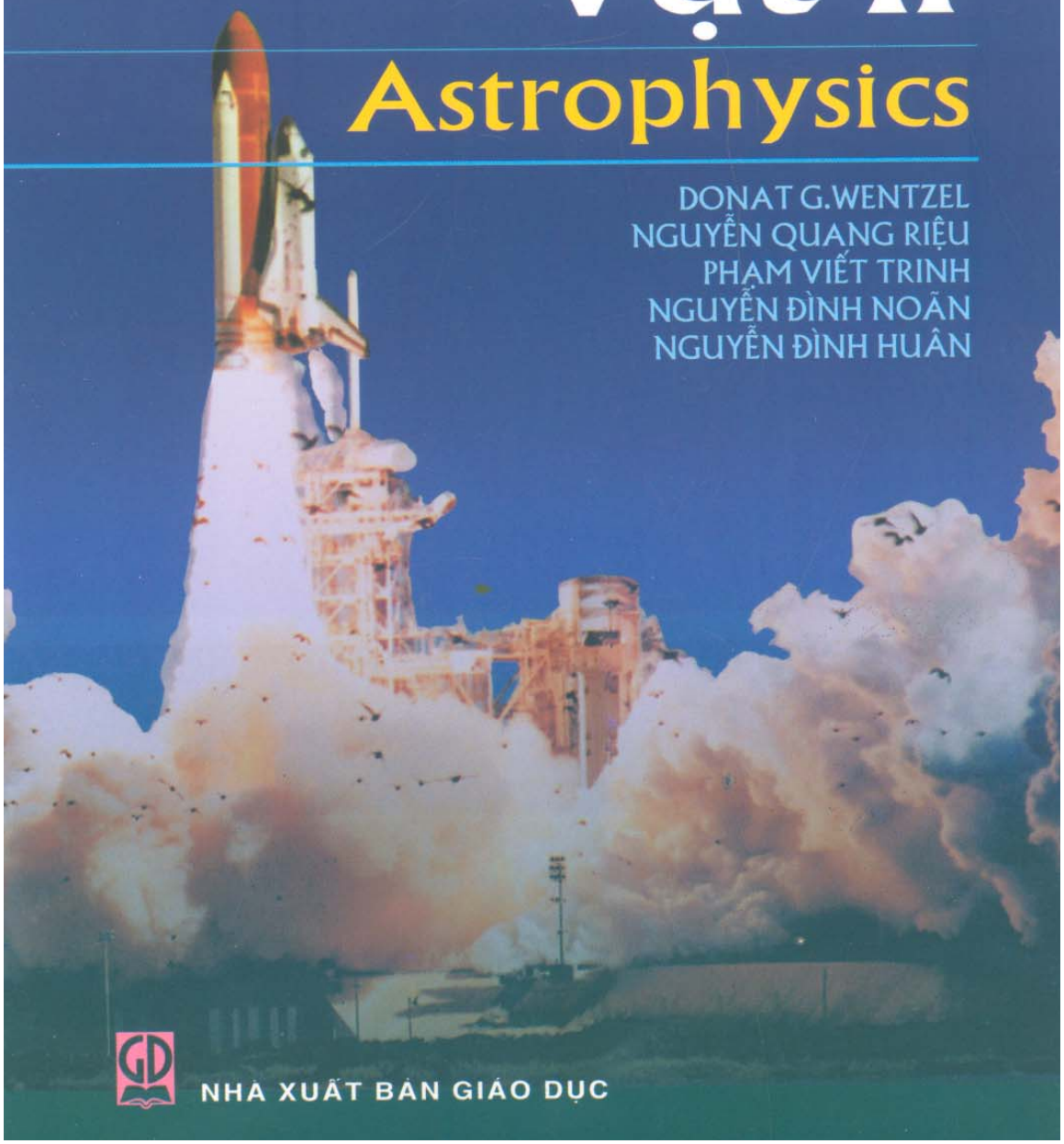
Thiên văn Vật lí

Astrophysics

DONAT G.WENTZEL
NGUYỄN QUANG RIỆU
PHẠM VIẾT TRINH
NGUYỄN ĐÌNH NOÃN
NGUYỄN ĐÌNH HUÂN



NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC

DONAT G.WENTZEL – NGUYỄN QUANG RIỆU
PHẠM VIẾT TRINH – NGUYỄN ĐÌNH NOÃN
NGUYỄN ĐÌNH HUÂN

THIÊN VĂN VẬT LÍ
ASTROPHYSICS

(Tái bản lần thứ ba)

NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC

Chịu trách nhiệm xuất bản :
Chủ tịch HĐQT kiêm Tổng Giám đốc NGÔ TRẦN ÁI
Phó Tổng Giám đốc kiêm Tổng biên tập NGUYỄN QUÝ THAO

Biên tập lần đầu :
LÊ HÙNG

Biên tập tái bản :
PHÙNG THANH HUYỀN

Biên tập kĩ thuật :
NGUYỄN QUỐC HỒNG

Trình bày bìa :
TẠ THANH TÙNG

Sửa bản in :
LÊ HÙNG

Chế bản tại :
PHÒNG CHẾ BẢN (NXB GIÁO DỤC TẠI HÀ NỘI)

Ảnh bìa 1 : NASA

Bản quyền thuộc HEVOBCO – Nhà xuất bản Giáo dục.

11 – 2007/CXB/268 – 2119/GD Mã số : 7K494T7 – DAI

THIÊN VĂN VẬT LÍ
ASTROPHYSICS

LỜI TỰA

Thiên văn học là một ngành khoa học tồn tại từ rất lâu. Việc phát minh ra kính thiên văn ở thế kỉ XVII dẫn tới sự phát hiện rằng Thiên hà của chúng ta, hay còn gọi là dải Ngân hà, chứa vô số ngôi sao. Việc phát hiện các tinh vân ngoài thiên hà và sự giãn nở của Vũ trụ vào đầu thế kỉ XX đã mở ra kỉ nguyên của Thiên văn học hiện đại. Thiên văn học đã thu được những tiến bộ vượt bậc kể từ chiến tranh thế giới lần thứ II nhờ sự phát triển của kĩ thuật mới, cho phép xây dựng những kính thiên văn quang học và kính thiên văn vô tuyến lớn, được trang bị các máy dò nhạy hơn trước rất nhiều. Hiện nay, Thiên văn học liên quan tới một số lĩnh vực khác như Toán học, Vật lí học, Hoá học và Sinh học. Mục đích của Thiên văn học là thăm dò Vũ trụ bằng cách quan sát với các thiết bị thiên văn và phát triển các lí thuyết mới với các định luật vật lí. Thiên văn học hiện đại, xem Vũ trụ như một phòng thí nghiệm vĩ đại, trở thành Thiên văn vật lí.

5 thập kỉ qua đã chứng kiến sự tiến bộ trong hiểu biết của chúng ta về Vũ trụ thông qua việc mở rộng quan sát ra ngoài dải quang học, tới các bước sóng hồng ngoại và vô tuyến. Các thiết bị trên tàu vũ trụ cho phép các nhà thiên văn quan sát sự phát xạ hồng ngoại xa, cực tím, tia X và tia gamma từ vũ trụ. Bức xạ ở những bước sóng này bị hấp thụ bởi khí quyển trái đất và do đó không phát hiện được bởi các kính thiên văn ở trên mặt đất. Cả các công việc quan sát và lí thuyết cho phép chúng ta hiểu về sự hình thành và sự tiến hoá của các ngôi sao và của Hệ Mặt Trời. Các công việc này cũng đã thành công trong việc phát hiện ra các pulsar và quasar có nguồn gốc tương ứng là các sao neutron và các hốc đen. Việc phát hiện các phân tử giữa các sao và các hành tinh ở ngoài Hệ Mặt trời là một bước đi đầu tiên trong việc tìm kiếm sự sống ở trên các hành tinh khác, ở bên trong và bên ngoài Hệ Mặt Trời của chúng ta. Việc phát hiện ngày càng nhiều các thiên hà ở xa và những sự quan sát gần đây về bức xạ phông vũ trụ vô tuyến bởi vệ tinh COBE cho chúng ta khả năng thám hiểm một cách chi tiết hơn các giai đoạn bắt đầu của sự tiến hoá của Vũ trụ.

Trong thực tế, Thiên văn vật lí hiện đại chưa được giảng dạy trong các trường đại học ở Việt Nam. Trong những năm gần đây, nhiều nỗ lực nhằm giới thiệu ngành này ở Việt Nam đã được thực hiện bởi các nhà khoa học đến từ Hội Thiên văn quốc tế, Đài Quan sát thiên văn Paris và Trường Đại học Pierre và Marie Curie (Paris). Việc đào tạo giáo viên và việc giảng dạy ở các trường cao đẳng và đại học, cùng với việc phổ biến là những công việc quan trọng nhất nhằm phát triển Thiên văn vật lí ở Việt Nam, trước khi một nhóm nghiên cứu được hình thành, sau nhiều năm nữa.

Cuốn sách này gồm các bài giảng đã được giảng dạy trong một số khoá học mà chúng tôi đã tổ chức ở Việt Nam, đặc biệt là những khoá học được tổ chức trong khuôn khổ Chương trình giảng dạy phát triển thiên văn của Hội thiên văn quốc tế. Cuốn sách này tượng trưng cho những nỗ lực chung của một đội ngũ các nhà thiên văn. GS. Phạm Viết Trinh viết chương I ; GS. Nguyễn Đình Huân viết chương II ; GS. Nguyễn Đình Noãn viết chương III ; GS. Donat Wentzel viết các chương V, VI, VII và VIII ; GS. Nguyễn Quang Riệu viết các chương IV, IX, X, XI và XII.

Foreword

Astronomy is a branch of science which has existed for a long time. The invention of the telescope in the seventeenth century led to the discovery that our Galaxy, the Milky Way, contains a myriad of stars. The discovery of extragalactic nebulae and the expansion of the Universe at the beginning of the twentieth century opened the era of modern astronomy. Astronomy has made great progress since World War II, thanks to the development of new technology, which permits the construction of large telescopes and radio telescopes equipped with detectors much more sensitive than in the past. It now involves several other fields, such as mathematics, physics, chemistry and biology. The purpose is to probe the Universe by observing with the astronomical instruments and developing new theories with the laws of physics. Modern astronomy, which considers the Universe as a giant laboratory, becomes astrophysics.

The last five decades have seen a progress in our knowledge of the Universe through the extension of the observations outside the optical range, to infrared and radio wavelengths. Instruments aboard spacecraft allowed astronomers to observe far-infrared, ultraviolet, X-ray and gamma ray emissions from space. Radiation at these wavelengths is absorbed by the Earth's atmosphere and is, therefore, undetectable by ground-based telescopes. Both observational and theoretical works have allowed us to understand how stars and the solar system are formed and how these objects evolve. They have resulted in the discovery of pulsars and quasars whose respective progenitors are neutron stars and black holes. The detection of interstellar molecules and extrasolar planets is a first step toward the search for life in other planets inside and outside our solar system. The detection of more and more distant galaxies and the recent observations of the radio cosmic background radiation by the satellite COBE have given us the possibility of exploring in more detail the early stages of the evolution of the Universe.

Modern astrophysics practically has not been taught in the Vietnamese universities. In recent years, much effort to introduce this discipline in Viet Nam has been made by scientists from the Observatory of Paris, the University Pierre and Marie Curie in Paris and the International Astronomical Union. Training of teachers and education in the colleges and the universities, as well as popularizing works, are now of prime importance to promoting astrophysics in Viet Nam, before a research group is set up in the long term.

This textbook includes lectures delivered during the series of courses that we organized in Viet Nam, in particular those given in the framework of the TAD (Teaching Astronomy Development) program of the International Astronomical Union. It represents the combined efforts of a team of astronomers qualified in different fields. Unit I on Brief History of Astronomy was written by Pham Viet Trinh, Unit II on Movement of Celestial Objects in Gravitational Field by Nguyen Dinh Huan, followed by Unit III on the Earth and its Motion by Nguyen Dinh Noan. Donat Wentzel wrote Unit V on the Adventure to Moon, Mars, Venus and Earth, Unit VI on Surprises in the Solar System, Unit VII on the Sun, and Unit VIII on Stars, Nguyen Quang Rieu wrote Unit IV on Cosmic Radiation, Unit IX on Our Galaxy, Unit X on Galaxies and Quasars, Unit XI Cosmology, and Unit XII on Astronomical Techniques.

Cuốn sách này được viết cả bằng tiếng Việt và tiếng Anh nhằm giúp bạn đọc Việt Nam làm quen với ngoại ngữ. Chúng tôi hi vọng rằng cuốn sách này sẽ giúp ích cho tất cả những ai muốn làm quen với những hiểu biết hiện đại về Vũ trụ. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Hội Thiên văn quốc tế về sự ủng hộ kinh phí trong việc in cuốn sách này và về sự quan tâm thường xuyên của Hội trong sự phát triển Thiên văn và Thiên văn vật lí ở Việt Nam.

CÁC TÁC GIẢ

The book is written in both Vietnamese and English in order to familiarize the Vietnamese readers with a foreign language. It is hoped that this volume will be of interest to all those who wish to be familiar with the modern understanding of the Universe

We thank the International Astronomical Union for its financial participation in printing this book and for its constant interest in the development of astronomy and astrophysics in Vietnam.

Authors

Chương I

LƯỢC SỬ THIÊN VĂN HỌC

Thiên văn học là ngành khoa học nghiên cứu chuyển động của các thiên thể, bản chất và sự tiến hoá của vật chất trong Vũ trụ.

Thiên văn học xuất hiện rất sớm trong lịch sử nhân loại từ nhu cầu của cuộc sống hàng ngày trong các nền văn minh cổ. Ngày nay Thiên văn học trở thành một ngành quan trọng của khoa học hiện đại. Sự phát triển của Thiên văn học liên quan mật thiết với sự tiến bộ trong nhận thức của con người về Vũ trụ.

NHỮNG SỰ PHÁT TRIỂN BAN ĐẦU CỦA THIÊN VĂN HỌC

Các nền văn minh cổ đã thu được những kinh nghiệm về sự thay đổi khí hậu và thời tiết qua một quãng thời gian dài.

Khoảng ba ngàn năm về trước, các nền văn minh ở các lưu vực của các con sông như sông Nin (Ai Cập), sông Tigơrơ (Babilon), sông Hằng (Ấn Độ) và sông Hoàng Hà (Trung Quốc) đã biết cách xác định thời gian của các mùa cũng như sự dâng nước của các con sông tương ứng với việc gieo trồng và thu hoạch mùa màng. Người Trung Quốc, Hi Lạp và Ai Cập bên cạnh việc suy đoán về nguồn gốc Vũ trụ còn xây dựng các lịch dựa trên sự chuyển động của Mặt Trăng và sự thay đổi của các mùa. Ngày nay chúng ta sử dụng dương lịch, là lịch được tạo ra muộn hơn rất nhiều so với lịch của người Trung Quốc, Hi Lạp và Ai Cập. Những tri thức thiên văn ban đầu này đã có ảnh hưởng lớn tới sự phát triển nông nghiệp trong các nền văn minh cổ và một số nơi như thung lũng sông Nin, mùa màng phụ thuộc hoàn toàn vào việc dự đoán sự dâng nước của sông Nin. Như vậy những nỗ lực nhằm giải thích các hiện tượng thiên văn đã được thúc đẩy bởi việc xem xét thực tế. Vì ở thời cổ đại, tri thức của con người còn bị hạn chế nên Thiên văn học đã liên quan một cách tự nhiên với các quan điểm tôn giáo. Người Ai Cập xem các ngôi sao và các chòm sao sáng là các vị thần đã sáng tạo ra Vũ trụ. Họ thờ các vị thần Mặt Trời và Mặt Trăng... Ở Trung Quốc, triết lí sống trung thành tuyệt đối với hoàng đế được mô tả một cách sinh động như các thần dân bao quanh hoàng đế, giống như các ngôi sao quay quanh sao Bắc cực. Người Babilon tin rằng các vị thần có thể dẫn dắt đời sống con người. Như vậy, cùng với sự xuất hiện của tri thức, các quan điểm tôn giáo cũng sớm xuất hiện.

THIÊN VĂN HỌC Ở HI LẠP CỔ ĐẠI

Các nước Trung Đông, đặc biệt là người Hi Lạp, có thể được xem là cái nôi của Thiên văn học cổ đại. Vào khoảng thế kỉ thứ VI trước công nguyên, Hi Lạp là một đất nước phồn vinh. Một số nhà triết học bắt đầu từ bỏ các quan điểm mê tín và cố gắng đưa ra những câu trả lời có lí trí đối với những câu hỏi liên quan tới thế giới xung quanh. Anaxagoras (499 - 429 trước công nguyên: tCN), một thành viên của trường phái Pythagore, cho rằng Trái Đất có dạng cầu, như được quan sát thấy trong các nguyệt thực, khi Mặt Trăng đi vào bóng tối của Trái Đất. Democritus (460-370 tCN) cho rằng dải Ngân hà được tạo bởi các sao ở xa. Heraclides (388-325 tCN) cho rằng nhật động của các thiên thể là kết quả của sự quay của Trái Đất.

Chapter I
BRIEF HISTORY OF ASTRONOMY

Astronomy concerns the motions of celestial bodies, and the nature and evolution of matter in the Universe.

Astronomy appeared very early in the history of mankind from the requirements of daily life in ancient civilizations. Today astronomy has become an important branch of modern science. The development of astronomy is closely linked to the progress of human perception of the Universe.

EARLY DEVELOPMENTS IN ASTRONOMY.

Ancient civilizations gathered experiences on the changes of climate and weather through a long period of time. About 3000 years ago, civilizations on basins of rivers such as Egypt (Nile river), Babylon (Tigris river), India (Ganges river) and China (Yangtze river) were capable of determining the times of the seasons and also the flooding of the rivers which correspond to the planting and reaping of crops. The Chinese, Greeks, Egyptians, besides speculating about the origin of the Universe, also established calendars based on the motion of the Moon, or on the change of seasons. Today we use the Gregorian calendar, which was created long after the Chinese, Greeks and Egyptians. This early astronomical knowledge had great impact on the development of agriculture in ancient civilizations, and in some places such as in the Nile valley the harvest depended entirely on the predictions of the Nile's flooding. Thus the efforts to explain astronomical phenomena were driven by practical considerations. Since human knowledge was still limited at that time, astronomy was naturally linked to religious views. The Egyptians assigned some bright stars and constellations to the gods who created the Universe. They worshiped the gods of the Moon and the Sun. In China the philosophy of absolute loyalty to the emperor was pictured as people revolving around the emperor, much like stars revolve around the North Polar Star. The Babylonians believed that gods could guide human life. Thus, parallel with the advent of knowledge the religious views also soon appeared.

ASTRONOMY IN ANCIENT GREECE.

The Middle Eastern countries, especially Greece, can be regarded as the cradle of ancient astronomy. Around the 6^{th} century B.C, Greece was a prosperous country. Several philosophers began to abandon the superstitious views and tried to give rational answers to the questions concerning the surrounding world. Anaxagoras (499 – 429 BC), a member of the Pythagorean school, proposed that the Earth was spherical, as observed during lunar eclipses when the Moon entered the Earth's shadow. Democritus (460 – 370 BC) proposed that the Milky Way was composed of distant stars. Heraclides (388 – 325 BC) proposed that the diurnal motion of celestial objects was the result of the rotation of the Earth.

Aristotle (384-322 tCN), một học trò của Plato, được xem là một trong số những nhà triết học vĩ đại nhất thời bấy giờ. Ông tin rằng Vũ trụ được tạo bởi 4 yếu tố: đất, nước, không khí và lửa. Mọi chuyển động và biến đổi có thể được giải thích dựa vào sự vận động của 4 yếu tố này. Mỗi yếu tố có vị trí tự nhiên riêng của nó. Vị trí của đất là Trái Đất, trung tâm bất động của Vũ trụ. Chuyển động của các thiên thể là chuyển động tròn, với tốc độ không đổi. Theo Aristotle, nhật động của các thiên thể chỉ là chuyển động biểu kiến và có thể được giải thích theo mô hình địa tâm hoặc theo quan điểm nhật tâm. Vì Trái Đất đứng yên và mọi vật đều rơi xuống Trái Đất nên Aristotle kết luận rằng Trái Đất phải là trung tâm của Vũ trụ.

Hipparchus (194-120 tCN) cho rằng Mặt Trời ở trung tâm Vũ trụ và mỗi ngôi sao chẳng qua chỉ là một Mặt Trời khác mà thôi. Ông đã sáng tạo một kĩ thuật quan sát mới mẻ và đã thiết lập một danh mục các ngôi sao được phân loại theo cấp sao của chúng. Ông cũng phát hiện ra sự thay đổi tuần hoàn đường kính góc của Mặt Trời. Từ đó, ông kết luận rằng khoảng cách Trái Đất - Mặt Trời thay đổi trong năm.

MÔ HÌNH ĐỊA TÂM

Từ thế kỉ thứ II sau CN, người ta đã biết vị trí và đặc điểm chuyển động của các hành tinh với độ chính xác đáng kể. Claudius Ptolemy (100 - 170 sCN), một nhà toán học và thiên văn học Hi Lạp đã phác thảo ra mô hình địa tâm về Vũ trụ trong luận thuyết "Almagest" vào năm 125 sCN. Một số đặc điểm chuyển động của các thiên thể được rút ra trên cơ sở các quan sát vào thời ấy có thể được tóm tắt như sau:

- Bầu trời quay xung quanh Trái Đất với chu kì 24 giờ (nhật động).

- Mặt Trời và Mặt Trăng, bên cạnh nhật động còn chuyển động đối với các sao, theo chiều ngược với chiều nhật động, với chu kì tương ứng là 365 ngày và 27 ngày.

- Các hành tinh cũng chuyển động với các sao theo chiều ngược với chiều nhật động nhưng cũng có những thời kì chúng dịch chuyển theo chiều ngược lại nên chuyển động của chúng có dạng nút so với phông tạo bởi các ngôi sao cố định.

- Hai hành tinh Thuỷ Tinh và Kim Tinh dao động xung quanh Mặt Trời với li giác tương ứng là 28 độ và 48 độ.

Hình I.1 : (Xem cuối chương)

Sự dịch chuyển của Thuỷ Tinh (đường chấm chấm) và Kim Tinh (đường liền nét) giữa các sao từ tháng 1 đến tháng 7 năm 1997.

Để giải thích các đặc điểm kể trên của các thiên thể, Ptolemy đã phác thảo một mô hình vũ trụ địa tâm như sau:

- Trái Đất nằm ở trung tâm Vũ trụ.

- Vũ trụ bị giới hạn bởi một mặt cầu chứa các ngôi sao cố định. Mặt cầu này quay xung quanh một trục đi qua tâm Trái Đất.

- Mặt Trời và Mặt Trăng chuyển động trên các quỹ đạo tròn với tốc độ không đổi, nhưng với chu kì lớn hơn chu kì nhật động.

Aristotle (384 – 322 BC), a disciple of Plato, was considered one of the greatest philosophers of that time. He believed that the Universe was made of four elements: earth, water, air and fire. Movements and changes could be understood in terms of motions of these four elements. Each element had its own natural place. The place of earth is the Earth, the stationary center of the Universe. The motions of heavenly bodies were circular and at constant speed. According to Aristotle the diurnal motion of heavenly bodies was simply an apparent motion and could be explained either by the geocentric model or the heliocentric view. Since the Earth was stationary and all bodies fell to Earth, Aristotle concluded that the Earth must be at the center of the Universe.

Hipparchus (194 – 120 BC) proposed that the Sun was at the center of the Universe and each star was simply another Sun. He created an innovative observational technique and established a catalogue of stars classified according to their magnitudes. He also discovered the periodic variation of solar angular diameter that led to the conclusion that the Earth-Sun distance was variable during the year.

THE GEOCENTRIC MODEL.

From the 2^{nd} century AD, the positions and properties of the motion of planets were known with considerable accuracy. Claudius Ptolemy (100 AD – 170 AD), a Greek mathematician and astronomer, outlined the geocentric model of the Universe in his treatise "Almagest" in 125 AD. Some properties of the motions of celestial objects based on observations of that time could be summarized as follows:

- The sky rotates around the Earth with a period of 24 hours (diurnal rotation)

- The Sun and the Moon, besides diurnal rotation, also have retrograde motion with periods of 365 days and 27 days, respectively.

- The planets also make retrograde motion but sometimes they reverse their course, making a small loop with respect to the background of fixed stars.

Figure I.1

- Two planets, Mercury and Venus, seem to oscillate around the Sun with maximum elongation of 28 degrees and 48 degrees, respectively.

To explain the above properties of the motions of the celestial objects, Ptolemy presented a geocentric model of the Universe:

- The Earth was stationary at the center of the Universe.

- The Universe was bounded by a sphere which contained the fixed stars. This sphere rotated around an axis passing through the center of the Earth.

- The Sun and the Moon moved on circular orbits at constant velocity but with period larger than that of diurnal rotation.

- Các hành tinh chuyển động với tốc độ không đổi trên những vòng tròn nhỏ (vòng ngoại luân). Tâm của ngoại luân chuyển động trên các quỹ đạo tròn (vòng chính đạo) xung quanh Trái Đất.

- Tâm các ngoại luân của các hành tinh bên trong (Kim Tinh và Thuỷ Tinh) nằm trên đường nối tâm Mặt Trời và Trái Đất.

Hình I.2 : (Xem cuối chương)

- Các thiên thể quay xung quanh Trái Đất, theo thứ tự xa dần Trái Đất là : Mặt Trăng, Thuỷ Tinh, Kim Tinh, Mặt Trời, Hoả Tinh, Mộc Tinh và Thổ Tinh

Mặc dầu mô hình địa tâm không mô tả một cách đúng đắn bản chất của Vũ trụ, nhưng nó đã được dễ dàng chấp nhận bởi nó phù hợp với thuyết "sáng thế" của Giáo hội La Mã. Ngoài ra, mô hình địa tâm có thể giải thích các quan sát thiên văn trong phạm vi độ chính xác đạt được ở thời đó. Dần dần, với các phương pháp và thiết bị quan sát chính xác hơn, người ta đã phát hiện ra một số đặc điểm chuyển động của các hành tinh không thể giải thích được theo mô hình địa tâm. Mô hình địa tâm đã được điều chỉnh cho phù hợp với các quan sát. Điều này chỉ làm cho mô hình trở nên phức tạp hơn. Tình trạng bế tắc này kéo dài mãi đến thế kỉ XVI.

MÔ HÌNH VŨ TRỤ CỦA COPERNICUS

Những thành tựu của người Hi Lạp và Ai Cập cổ đại là rất quan trọng nhưng vẫn hạn chế ở thiên văn quan sát. Sự phát triển của khoa học đòi hỏi con người phải biết vị trí của mình trong Vũ trụ. Câu hỏi được đặt ra trong giai đoạn khoa học dậm chân tại chỗ này là: Phải chăng Trái Đất nằm yên ở trung tâm Vũ trụ?

Từ thế kỉ XV, một số quốc gia Châu Âu đã thu được những thành tựu to lớn trong nghệ thuật, khoa học và kinh tế. Christopher Columbus phát hiện ra châu Mĩ trong khi đi tìm một con đường mới tới Ấn Độ. Magellan lần đầu tiên đi vòng quanh Trái Đất. Trong khoa học, uy lực của Giáo Hội và cách giảng dạy độc đoán của Giáo hội đã được thay thế bởi cách suy nghĩ và các phương pháp khoa học mới.

Mô hình nhật tâm (ngược với mô hình địa tâm) đã được đề xuất bởi một số nhà thiên văn Hi Lạp. Tuy nhiên, nó đã bị lãng quên bởi hàng ngày con người chứng kiến chuyển động nhật động và quan điểm duy trì bởi Giáo hội đều chống lại mô hình nhật tâm. Nhà thiên văn học Ba Lan Nicolaus Copernicus (1473-1543) là người đầu tiên có đủ can đảm để từ bỏ quan điểm được đông đảo mọi người thừa nhận ấy. Vào năm 1543, năm cuối đời của Copernicus, ông đã xuất bản cuốn sách "Về sự quay của thiên cầu" trong đó có mô hình vũ trụ nhật tâm :

- Mặt Trời nằm yên ở trung tâm Vũ trụ.

- Các hành tinh chuyển động xung quanh Mặt Trời trên các quỹ đạo tròn và cùng chiều.

- Trái Đất quay xung quanh trục của nó trong khi chuyển động quanh Mặt Trời.

Nicolaus Copernicus
(1473 - 1543)

- Planets moved at constant velocity on small circles (called epicycles) whose centers moved on circular orbits (called deferents) around the Earth.

- The centers of the epicycles of inner planets (Mercury and Venus) were located on the Earth-Sun line.

Figure I.2

- The objects orbiting the Earth were, in order of their distance, the Moon, Mercury, Venus, the Sun, Mars, Jupiter and Saturn.

Although the geocentric model did not describe correctly the nature of the Universe, it was accepted easily since it was consistent with creation theory of the Roman Catholic Church. Furthermore, the geocentric model could explain the astronomical observations within the accuracy of that time. Eventually, with more precise observational methods and instruments, several characteristics of the motion of the planets were revealed that could not be accounted for in the geocentric model. Several adjustments were introduced into the geocentric model in order to match observations. That only made the model more complicated. The situation of impasse lasted until the 16^{th} century.

THE COPERNICAN MODEL OF THE UNIVERSE.

The achievements of ancient Greeks, Egyptians were very important but still confined to observational astronomy. The development of science required that mankind must know its place in the Universe. The question posed during this stagnant period of science was: is the Earth stationary at the center of the Universe?

From the 15^{th} century, great progress in art, science, economy had been made in some European countries. Christopher Columbus discovered the American continent while trying to find a new way to India. Magellan first circumnavigated the Earth. In science the power of the Church and its dogmatic teaching were replaced by new scientific thinking and methods.

(Photo of Copernicus)

The heliocentric model (in contradiction with the geocentric model) had been proposed by some Greek astronomers. However it had been largely ignored since daily experience with diurnal rotation of heavenly bodies and the view maintained by the Church were all against it. The first individual who had the courage to break that commonly accepted point of view was the polish astronomer Copernicus (1473 – 1543). In 1543, the last year of his life, Copernicus published the book "On the Revolutions of Celestial Orbs" which contained his heliocentric model of the Universe:

- The Sun was placed stationary at the center of the Universe

- The planets revolved around the Sun in circular orbits in the same direction

- The Earth rotated around its axis while revolving around the Sun.

- Mặt Trăng chuyển động trên một quỹ đạo tròn xung quanh Trái Đất.

- Các hành tinh, kể theo thứ tự khoảng cách tăng dần từ Mặt Trời là: Thuỷ Tinh, Kim Tinh, Trái Đất, Hoả Tinh, Mộc Tinh và Thổ Tinh.

- Các sao ở rất xa và cố định trên thiên cầu.

Hình I.3 : (Xem cuối chương)

Sự thay đổi chủ yếu trong hệ nhật tâm Copernicus là đặt Mặt Trời ở trung tâm Vũ trụ và xem Trái Đất chỉ là một hành tinh bình thường trong Hệ Mặt Trời.

Về cơ bản, hệ nhật tâm Copernicus mô tả Hệ Mặt Trời một cách đúng đắn. Sử dụng mô hình này, người ta có thể giải thích các đặc điểm chuyển động nhìn thấy của các thiên thể một cách dễ dàng. Thí dụ: sở dĩ có nhật động là do ta quan sát các thiên thể từ Trái Đất đang quay; chuyển động dao động của Kim Tinh và Thuỷ Tinh xung quanh Mặt Trời là do hai hành tinh này có quỹ đạo chuyển động ở gần Mặt Trời hơn quỹ đạo của Trái Đất. Ngoài ra, mô hình nhật tâm cho phép xác định dù chỉ gần đúng chu kì chuyển động của các hành tinh và khoảng cách từ chúng tới Mặt Trời. Hệ nhật tâm của Copernicus đã đánh dấu bước ngoặt trong nhận thức của con người về Vũ trụ và mở đường cho sự tiến triển của khoa học. Rõ ràng, mô hình nhật tâm mâu thuẫn với giáo lí của nhà thờ nên nó đã bị chống đối và hoài nghi. Các tác phẩm của các nhà khoa học đương thời khác như Jocdano Bruno, Kepler, Galieo đã làm cho mô hình nhật tâm được chấp nhận.

Jocdano Bruno là nhà văn, nhà hùng biện, giáo sư đại học người Italia và là một người ủng hộ hệ Copernicus. Ông tin rằng mỗi ngôi sao là một Mặt Trời khác, chung quanh các sao cũng có các hành tinh và sự sống không đơn độc trong Vũ trụ bao la. Ông đã bị toà án dị giáo kết án tà đạo và bị thiêu sống ở quảng trường Roma.

JOHANNES KEPLER VÀ CÁC ĐỊNH LUẬT CHUYỂN ĐỘNG CỦA CÁC HÀNH TINH

Kepler (1571- 1630) là một nhà toán học và thiên văn học người Đức, chịu ảnh hưởng quan điểm của Pythagore về một vũ trụ điều hoà. Ông đã xây dựng một mô hình địa tâm để xác định quỹ đạo của các hành tinh trong hệ Copernicus. Ông đã gửi công trình của mình tới một số nhà khoa học, trong đó có Tycho Brahe. Khâm phục vốn hiểu biết về thiên văn học của Kepler, Tycho đã mời Kepler làm việc với ông ở Praha.

Trong khi nghiên cứu luật học ở Copenhagen, Tycho Brahe chứng kiến một nhật thực đã được dự báo trước. Bị cuốn hút bởi hiện tượng thiên nhiên kì thú này, ông chuyển sang nghiên cứu thiên văn. Nhà vua Đan Mạch cung cấp kinh phí để Tycho Brahe xây dựng một đài quan sát. Tycho Brahe là một nhà khoa học tài ba và cần cù, quan tâm đặc biệt tới độ chính xác trong các quan sát của mình. Năm 1572, ông phát hiện ra một ngôi sao mới. Ngôi sao này đã được mang tên ông (Tycho Nova). Số liệu mà ông thu thập được trong suốt 20 năm quan sát chuyển động của các thiên thể đã giúp Kepler phát hiện ra định luật chuyển động của các hành tinh.

Kepler
(1571 - 1630)

- The Moon moved in a circular orbit around the Earth.

- Planets, in order of distance from the Sun, were Mercury, Venus, the Earth, Mars, Jupiter and Saturn.

- The distant stars were fixed on the heavenly sphere.

Figure 1.3

The major change in the Copernican system was to place the Sun at the center of the Universe and considering the Earth as only a normal planet in the Solar system.

Basically, the Copernican system described the Solar system correctly. Using this model, the properties of the motion of planets could be explained easily. For example: diurnal motion was due to the fact that celestial objects were observed from the rotating Earth; the oscillating motions of Mercury and Venus around the Sun were the result of their orbits being closer to the Sun than the Earth's orbit. Furthermore, the heliocentric model enabled the periods of planets and their distances to the Sun to be determined, although approximately. The Copernican system marked the turning point in human perception of the Universe and opened the way for the scientific revolution. Obviously, the heliocentric model was contrary to the teaching of the Church and it was met with hostility and skepticism. The works of other contemporary scientists such as Jordano Bruno, Kepler, Galileo made possible the acceptance of the heliocentric model.

Jordano Bruno was an Italian writer, orator and professor and an advocate of the Copernican system. He believed that each star was another Sun, around stars there were also planets and life was not uncommon in the immense Universe. He was condemned by the Inquisition for heresy and burnt at the stake in Rome.

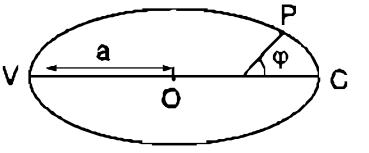
JOHANNES KEPLER AND THE LAWS OF PLANETARY MOTION.

Kepler (1571 – 1630) was a German mathematician and astronomer influenced by the Pythagorean view about a harmonious Universe. He constructed a geometric model to determine the orbits of planets in the Copernican system. He sent copies of his work to a number of scientists including Tycho Brahe. Impressed by Kepler's knowledge of astronomy, Tycho Brahe invited Kepler to join him at Prague.

(Photo of Kepler)

Tycho Brahe while studying law at Copenhagen witnessed a predicted solar eclipse. Fascinated by this natural event, he devoted himself to study astronomy. The King of Denmark provided him funds to construct an observatory. Tycho Brahe was a talented and diligent scientist with great concern for accuracy in his observations. He discovered in 1572 a new star which was named after him (Tycho Nova). The data he collected during 20 years observing the motion of celestial objects ultimately helped Kepler to discover the laws of planetary motion.

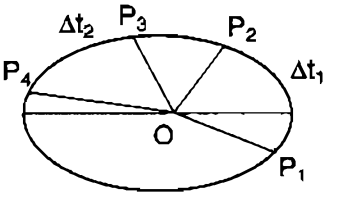
Sau khi hiệu chỉnh các số liệu quan sát của Tycho Brahe đối với sự khúc xạ của khí quyển, Kepler đã làm phù hợp quỹ đạo Hoả Tinh với kết quả quan sát. Ban đầu, cũng giống như các nhà thiên văn khác, Kepler chỉ xem xét các quỹ đạo tròn với vận tốc không đổi. Ông đã lặp đi lặp lại việc tính toán một cách không thành công nhằm làm phù hợp quỹ đạo Hoả Tinh với kết quả quan sát. Cuối cùng, ông đã tìm ra quỹ đạo của Hoả Tinh là một elíp. Năm 1609, ông công bố hai trong số các định luật của ông về chuyển động của các hành tinh:



Hình I.4

- Định luật thứ nhất nói rằng các hành tinh chuyển động trên một quỹ đạo elíp, Mặt Trời nằm tại một tiêu điểm.

- Định luật thứ hai nói rằng đoạn thẳng nối hành tinh với Mặt Trời quét những diện tích bề mặt bằng nhau trong những khoảng thời gian như nhau. Bởi vậy, vận tốc chuyển động của hành tinh không phải là một hằng số, giá trị vận tốc lớn nhất khi hành tinh ở gần Mặt Trời nhất.



Hình I.5

Năm 1619, Kepler công bố định luật thứ ba của ông về chuyển động của các hành tinh:

- Định luật thứ ba nói rằng bình phương chu kì chuyển động của các hành tinh tỉ lệ với lập phương bán trục lớn quỹ đạo của chúng.

$$P^2 = Ka^3$$

hay $$P^2 = a^3$$

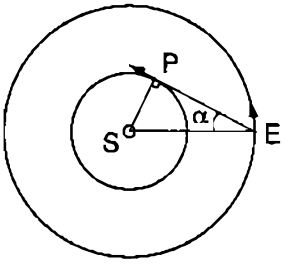
trong đó P là chu kì chuyển động của hành tinh tính theo năm, a là bán trục lớn tính theo đơn vị thiên văn. Đơn vị thiên văn là khoảng cách trung bình từ Mặt Trời tới Trái Đất.

Ba định luật Kepler mô tả một cách đầy đủ các đặc điểm chuyển động của hành tinh xung quanh Mặt Trời (quỹ đạo, vận tốc và khoảng cách tới Mặt Trời). Thí dụ, nếu biết chu kì P từ các quan sát thì bằng cách sử dụng định luật thứ ba của Kepler, chúng ta có thể tính được khoảng cách a. Với Mộc Tinh, P = 12 năm, bởi vậy a= 5,2 đơn vị thiên văn.

Kepler là nhà khoa học đầu tiên áp dụng các phương pháp toán học vào nghiên cứu khoa học và biểu diễn các định luật của tự nhiên theo các công thức toán học.

Phương pháp xác định khoảng cách tới Mặt Trời của Kepler:

Khoảng cách tương đối từ Mặt Trời tới các hành tinh bên trong (Thuỷ Tinh, Kim Tinh) đã được xác định bởi Copecnicus. Từ Trái Đất E, người ta có thể xác định được góc α giữa hành tinh P ở li giác cực đại của nó và Mặt Trời S. Góc SPE = 90^0, bởi vậy khoảng cách từ hành tinh tới Mặt Trời có thể tính được một cách dễ dàng theo khoảng cách Mặt Trời - Trái Đất: r = SEsinα .



Hình I.6

After correcting Tycho Brahe's observational data for atmospheric refraction, Kepler tried to fit the orbit of Mars with observations. At first, like other astronomers, he considered only circular orbits with constant velocity. He repeated unsuccessfully the calculations to fit the orbit of Mars with observations. Finally he found that the orbit of Mars was an ellipse. In 1609 he published two of his laws of planetary motion:

- The first law states that the planets move in an elliptical orbit with the Sun at a focus.

Figure I.4

- The second law states that the line joining the planet to the Sun sweeps out equal surface area in equal time. Hence the velocity of a planet is not constant; its value is largest when the planet is nearest to the Sun.

Figure I.5

In 1619 Kepler published his third law of planetary motion:

- The third law states that the squares of the periods of revolution of the planets are proportional to the cubes of their orbits' semi-major axes.

$$\begin{cases} P^2 = Ka^3 \\ \text{or } P^2 = a^3 \end{cases}$$

where P is the period of revolution of the planet in units of one year, a is the semi-major axis in astronomical units, the average Earth-Sun distance.

Kepler's 3 laws describe fully the properties of planetary motion around the Sun (the orbit, velocity, and distance to the Sun). For example, if the period P is known from observations, by using Kepler's third law one can calculate the distance a. For Jupiter, P = 12 years, thus a = 5.2 AU.

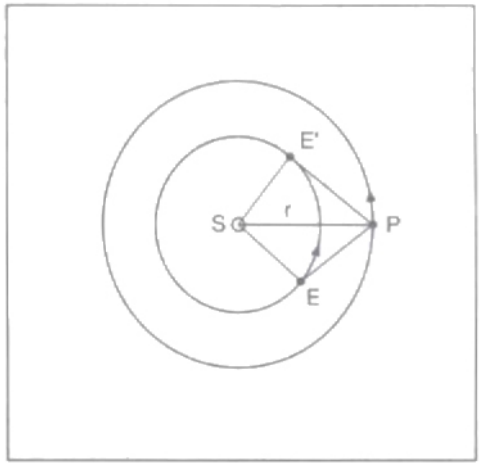
Kepler was also the first scientist to introduce mathematical methods into scientific research and to formulate the laws of nature in terms of mathematical formulae.

Kepler's method to determine distance to the Sun :

Figure I.6

The relative distance to the Sun of the inner planets (Mercury, Venus) had been measured by Copernicus. From the Earth E, the angle α between the planet P at its maximum elongation from the Sun S could be measured. The angle SPE is equal to 90^0, thus the distance planet-Sun could be calculated easily in term of the Earth-Sun distance: $r = SE\sin\alpha$.

Đối với các hành tinh bên ngoài, phương pháp trở nên phức tạp hơn. Giả sử rằng hành tinh được quan sát ở vị trí P khi Trái Đất ở vị trí E. Góc PES giữa đường nối Trái Đất - hành tinh và đường nối Trái Đất - Mặt Trời có thể xác định được bằng quan sát. Sau một chu kì chuyển động, hành tinh trở về vị trí P, nhưng lúc đó Trái Đất ở vị trí E'. Góc SE'P cũng được xác định bằng quan sát. Bằng các phép tính hình học đơn giản, khoảng cách EE' và các góc SEE', SE'E, PEE' và PE'E có thể tính được. Cuối cùng, từ tam giác PE'S, khoảng cách hành tinh - Mặt Trời r = PS có thể được xác định theo khoảng cách Trái Đất - Mặt Trời. Phương pháp này đã được Kepler sử dụng để xác định khoảng cách tới Hỏa Tinh và từ đó chứng tỏ quỹ đạo của Hỏa Tinh là một elíp.



Hình I.7

GALILEO - NGƯỜI SÁNG LẬP VẬT LÍ THỰC NGHIỆM HIỆN ĐẠI

Nhà Vật lí học Galileo Galilei (1564 -1642) người Italia đã có đóng góp rất lớn đối với sự phát triển của thiên văn học và vật lí học. Năm 1610, ông chế tạo chiếc kính thiên văn đầu tiên và hướng nó lên bầu trời để quan sát các thiên thể.

Ông đã thu được một số kết quả đáng ngạc nhiên:

- Có các dãy núi và các miệng núi lửa do va chạm ở trên Mặt Trăng.

- Mộc Tinh có 4 vệ tinh quay xung quanh nó (các vệ tinh Galileo).

- Mặt Trời có các vết đen. Galileo dùng các vết đen để xác định chu kì quay của Mặt Trời.

- Kim Tinh có các pha giống như Mặt Trăng. Đối với Galileo, điều này chứng tỏ một cách rõ ràng rằng Kim Tinh quay xung quanh Mặt Trời, chứ không phải quay xung quanh Trái Đất.

- Có vô số ngôi sao trong dải Ngân Hà. Phát minh này phù hợp với ý kiến của Bruno cho rằng mỗi ngôi sao chẳng qua chỉ là một Mặt Trời khác nhưng ở rất xa chúng ta và Vũ trụ là vô hạn.

Galilei
(1564 - 1642)

Cuốn sách của Galileo mang tên "Đối thoại về hai hệ thống thế giới" xây dựng một lập luận ủng hộ hệ nhật tâm Copernicus, phản đối quan điểm độc đoán của nhà thờ. Cuốn sách của ông bị nhà thờ ngăn cấm. Ông đã phải ra hầu toà án dị giáo, bị kết án và bị quản thúc tại gia cho đến khi ông qua đời. Cách đây mấy năm, nhà thờ đã giải tội cho Galileo.

Galileo được xem là ông tổ của khoa học hiện đại bởi ông đã tiến hành một số thí nghiệm quan trọng như nghiên cứu chuyển động của vật rơi tự do. Ông đã đưa ra khái niệm quán tính và đi tới một kết luận quan trọng rằng chuyển động của các vật thể trên Trái Đất và chuyển động của các thiên thể về cơ bản là giống nhau.

Figure I.7

For the outer planets, the method then becomes more complicated. Suppose that the planet was observed at the position P when the Earth was at the position E. The angle PES between the line Earth-planet and the line Earth-Sun could be measured from observations. After one period of revolution, the planet returned to P but the Earth was then at E'. The angle SE'P was also determined from observations. By simple geometric calculations the distance EE' and angles SEE' SE'E and thus PEE', PE'E could be calculated. Finally, using the triangle PE'S, the distance planet-Sun r = PS could be determined in terms of the distance Earth-Sun. This method was used by Kepler to determine the distance to Mars and therefore to demonstrate that the orbit of Mars was an ellipse.

GALILEO, THE FOUNDER OF MODERN EXPERIMENTAL PHYSICS.

The Italian physicist Galileo Galilei (1564-1642) contributed immensely to the development of astronomy and physics. In 1610 he built the first astronomical telescope and pointed it at the sky to observe celestial objects.

(Photo of Galileo Galilei)

He obtained some astonishing results:

- There are mountains and craters on the Moon.

- Jupiter has 4 satellites orbiting it (Galilean satellites)

- The Sun has spots. Galileo used the spots to determine the Sun's period of rotation.

- Venus shows phases like the Moon. To Galileo this clearly demonstrated that Venus was revolving around the Sun, not around the Earth.

- There are countless numbers of stars in the Milky Way. This discovery is consistent with the idea of Bruno that each star is another Sun but far away and the Universe is infinite.

Galileo's book "Dialogue on the two world systems" constituted an argument in support of the Copernican system, rejecting the Church's dogmatic view. His book was banned by the Church. Galileo himself was brought before the Inquisition, sentenced and confined to his home until his death. The Church exonerated Galileo several years ago.

Galileo was regarded as the father of modern science, since he carried out several important experiments such as the study of the motion of free-falling bodies. He introduced the concept of inertia and reached an important conclusion that the motion of bodies on Earth and that of celestial objects were basically similar.

NEWTON VÀ BƯỚC CUỐI CÙNG TRONG VIỆC CHỨNG MINH HỆ NHẬT TÂM COPERNICUS

Newton
(1643 - 1727)

Sau khi khai sinh ra vật lí thực nghiệm của Galileo, các nhà khoa học đã phát minh ra nhiều định luật vật lí mới trong một số ngành của vật lí học nhưng các định luật này chưa cung cấp một cơ sở tổng quát cho vật lí học. Sự phát triển của vật lí học, toán học và quang học đòi hỏi một cơ sở tổng quát và vững chắc. Newton là nhà khoa học có nhiều phát minh quan trọng trong lĩnh vực này.

Newton sinh năm 1643 trong một gia đình nghèo ở nước Anh. Hoàn cảnh trên đã có ảnh hưởng đến quan điểm của Newton và công việc khoa học của ông. Trong cơ học, Newton đã đưa ra các đại lượng cơ bản như khối lượng, lực, xung lượng, quán tính, hấp dẫn và ông đã xây dựng ba định luật cơ bản của động lực học.

Ông đã áp dụng phương pháp động lực học của mình cùng với định luật vạn vật hấp dẫn để nghiên cứu chuyển động của các hành tinh và bởi vậy ông đã cung cấp cơ sở vật lí cho hệ nhật tâm Copecnicus.

Kepler phát minh ra ba định luật chuyển động của các hành tinh vào nửa đầu thế kỉ XVII nhưng phải đợi đến gần nửa thế kỉ sau Newton mới tìm ra được nguyên nhân của lực hướng tâm giữ các hành tinh chuyển động xung quanh Mặt Trời.

Từ phân tích các đặc điểm của các vật chuyển động trên Trái Đất và chuyển động của các hành tinh, Newton đã cho rằng lực giữ Mặt Trăng chuyển động xung quanh Trái Đất về cơ bản có cùng bản chất như lực hấp dẫn trên Trái Đất. Với giả thiết gia tốc gây bởi Trái Đất tác dụng lên Mặt Trăng tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách giữa chúng, gia tốc này phải bé hơn 60^2 lần so với gia tốc mà Trái Đất tác dụng lên một vật thể rơi tự do ở trên Trái Đất. Biết gia tốc hấp dẫn trên bề mặt Trái Đất, khoảng $9,8 m/s^2$, gia tốc g' ở trên Mặt Trăng có thể tính được:

$$g' = \frac{g}{60^2} = \frac{9,8}{60^2} = 0,0027 \frac{m}{s^2}$$

Mặt khác, gia tốc hướng tâm của Mặt Trăng có thể được tính theo công thức Huygens:

$$g' = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{P}\right)^2 R$$

trong đó P là chu kì chuyển động của Mặt Trăng xung quanh Trái Đất (P =27,3 ngày), R là bán kính quỹ đạo của Mặt Trăng ($R = 60 R_o = 384.10^3$ km). Do đó, giá trị của g' là $0,0027 m/s^2$.

Sự phù hợp giữa hai phương pháp trong việc tính gia tốc chứng tỏ rằng lực giữ Mặt Trăng chuyển động xung quanh Trái Đất là lực hấp dẫn của Trái Đất tác dụng lên Mặt Trăng. Nếu có một số vệ tinh nhỏ chuyển động xung quanh Trái Đất thì lực hướng tâm tác dụng lên nó cũng sẽ là lực hấp dẫn. Nếu vì một lí do nào đó, tốc độ của chúng giảm thì chúng sẽ rơi xuống Trái Đất giống như một vật thể được ném theo phương nằm ngang. Newton đã mở rộng kết luận của ông về lực hấp dẫn

NEWTON AND THE FINAL STEP IN PROVING THE COPERNICAN SYSTEM.

After the work of Galileo creating experimental physics, scientists discovered many new physical laws in several branches of physics but the laws did not provide a general basis for physics. The development of physics, mathematics and optics required a general and solid basis. Newton was the scientist who made many important discoveries in those areas. Newton was born in 1643 into a poor family in England. This poverty clearly influenced Newton's view and his scientific work. In mechanics Newton introduced the fundamental quantities such as mass, force, momentum, inertia, gravity and established three fundamental laws of dynamics.

(Photo of Newton)

He applied his dynamical method together with the law of universal gravitation to study the planetary motion and therefore provided the physical basis for the Copernican system.

Kepler discovered the 3 laws of planetary motion in the first half of the 17^{th} century but only nearly a half century later did Newton find the origin of the centripetal force that keeps planets orbiting the Sun.

By analyzing the characteristics of bodies moving on Earth and of planetary motion, Newton demonstrated that the force keeping the Moon moving around the Earth had basically the same nature as gravity on Earth. With the assumption that the acceleration caused by the Earth on the Moon is inversely proportional to the square of the distance between them, this acceleration must be 60^2 times smaller than that experienced by a body free-falling on Earth. Knowing the gravitational acceleration on the surface of the Earth, about 9.8 m/s^2, the acceleration of the Moon g' could be calculated:

$$g' = \frac{g}{60^2} = \frac{9,8}{60^2} = 0,0027 \frac{m}{s^2}$$

On the other hand, the centripetal acceleration of the Moon can also be determined using Huygens' formula:

$$g' = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{P}\right)^2 R$$

where P is the period of revolution of the Moon around the Earth (P = 27.3 days), R is the radius of the Moon's orbit ($R = 60R_O = 384.10^3$ km). Hence, the value of g' is 0.0027 m/s^2.

The agreement between two methods in calculating the acceleration demonstrated that the force, which keeps the Moon revolving about the Earth, is the gravitational force of the Earth on the Moon. If there were several small moons moving around the Earth, the centripetal forces acting on them would also be the gravitational attraction. If their velocities were decreased for some reason, they would fall to Earth in the same way as a body being thrown horizontally. Newton extended his conclusion on gravitational

để áp dụng cho các hành tinh trong Hệ Mặt Trời. Các hành tinh đều bị hút bởi Mặt Trời và ngược lại, Mặt Trời cũng bị hút bởi các hành tinh. Ông đã chuyển khái niệm sự hút do hấp dẫn thành một định luật định lượng: lực hấp dẫn giữa hai vật thể tỉ lệ thuận với tích khối lượng của chúng và tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách giữa chúng:

$$F = Gm_1m_2/r^2$$

Áp dụng công thức tính lực hướng tâm mv^2/r và biểu thức định luật III Kepler $P^2 = Kr^3$ cho vật khối lượng m chuyển động trên một quỹ đạo tròn xung quanh một vật thể trung tâm có khối lượng M với vận tốc $v = 2\pi r/P$, chúng ta thu được lực mà vật thể có khối lượng M tác dụng lên vật thể có khối lượng m:

$$F = 4m/Kr^2 \sim m/r^2$$

Mặt khác, theo định luật thứ ba của động lực học, lực mà vật thể có khối lượng m tác dụng lên vật thể có khối lượng M có cùng độ lớn như vậy. Từ đó suy ra lực hấp dẫn tỉ lệ với tích các khối lượng của chúng. Bằng cách đưa ra một hệ số tỉ lệ, lực hấp dẫn có dạng:

$$F = GMm/r^2$$

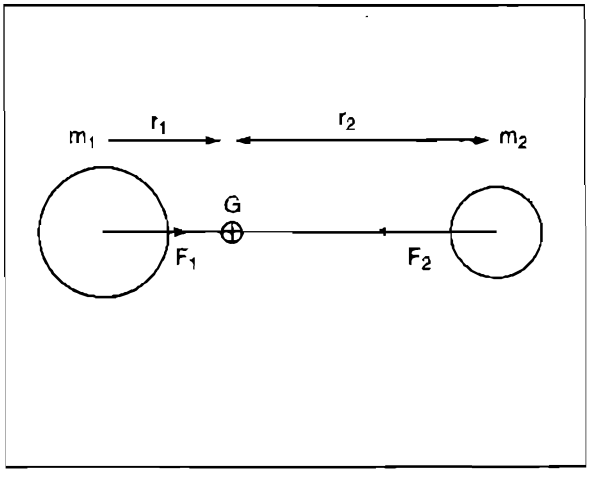
trong đó G là hằng số hấp dẫn và bằng $6,67.10^{-11}$ trong hệ đơn vị SI. Giá trị của G được xác định bằng thực nghiệm.

Với định luật vạn vật hấp dẫn và ba định luật động lực học, Newton đã thiết lập cơ sở vật lí cho hệ nhật tâm của Copernicus và cơ học thiên thể. Việc tiên đoán các nhật thực và nguyệt thực một cách chính xác, việc phát hiện ra Hải Vương Tinh, hành tinh thứ 8 trong Hệ Mặt Trời tiếp theo sau các tính toán của Le Verrier ở thế kỉ XIX, việc tính toán quỹ đạo của các tàu vũ trụ và các vệ tinh nhân tạo là những chứng minh hùng hồn cho sự thành công tuyệt vời của định luật vạn vật hấp dẫn.

BIỂU THỨC CHÍNH XÁC CỦA ĐỊNH LUẬT III KEPLER

Từ định luật vạn vật hấp dẫn và các định luật của động lực học, chúng ta có thể thu được ba định luật của Kepler về chuyển động của các hành tinh. Định luật thứ III của Kepler chỉ là một sự gần đúng của định luật chính xác vì khối lượng của Mặt Trời lớn hơn rất nhiều khối lượng của hành tinh. Có thể thu được biểu thức chính xác của định luật thứ ba của Kepler như sau.

Để cho đơn giản, chúng ta xem xét Mặt Trời có khối lượng m_1 và một hành tinh có khối lượng m_2 chuyển động trên các quỹ đạo tròn xung quanh khối tâm của chúng. Các quỹ đạo của chúng có bán kính tương ứng là r_1 và r_2. Vì lực hấp dẫn hướng dọc theo đường nối hai vật thể và khối tâm G của chúng nên hai vật thể có cùng chu kì chuyển động. Lực hướng tâm tác dụng lên mỗi vật là :



Hình I.8

force to apply to all planets in the solar system. All planets were attracted by the Sun and conversely, the Sun was also attracted by the planets. He transformed the concept of gravitational attraction into a quantitative law: the gravitational force between two bodies is proportional to the product of their masses and inversely proportional to the square of the distance of their separation.

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

Using the formula for the centripetal force mv^2/r and Kepler's third law $P^2 = Kr^3$ for a body of mass m moving in circular orbit around a central body of mass M with velocity $v = 2\pi r/P$, one obtains the force of body M on body m.

$$F = \frac{4m}{Kr^2} \sim \frac{m}{r^2}$$

On the other hand, according to the third law of dynamics, the force of m upon M has the same strength. Hence, the gravitational force is proportional to the product of their masses. By introducing a proportional constant, the gravitational force is:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

where G is the gravitational constant and equal to $6.67\ 10^{-11}$ in the SI units. The value of G was determined experimentally.

With his 3 laws of dynamics and the law of universal gravitation Newton established the physical foundation for the Copernican system and celestial mechanics. Accurate predictions of eclipses, the discovery of Neptune the 8th planet in the Solar system following calculations of Le Verrier in the 19th century, the calculations of the orbits of spacecraft and artificial satellites are the proofs of the extraordinary success of the universal law of gravitation.

EXACT EXPRESSION OF KEPLER'S THIRD LAW.

From the law of universal gravitation and the laws of dynamics one can derive Kepler's three laws of planetary motion. Kepler's third law is only an approximation to the exact law because the solar mass is much greater than the planet's mass. The exact expression for Kepler's third law can be derived as follows.

Figure I.8

For the sake of simplicity, we consider the Sun with mass m_1 and a planet of mass m_2 moving in circular orbits around their common center of mass. Their orbits have radii r_1 and r_2, respectively. Since the gravitational force is directed along the line joining the two bodies and their center of mass G, the two bodies have the same period of revolution. The centripetal force on each body is:

$$F_1 = \frac{m_1 v_1^2}{r_1} = \frac{4\pi^2 m_1 r_1}{P^2}$$

$$F_2 = \frac{m_2 v_2^2}{r_2} = \frac{4\pi^2 m_2 r_2}{P^2} \qquad (1.1)$$

vì $F_1 = F_2$ nên :

$$\frac{r_1}{m_2} = \frac{r_2}{m_1} = \frac{r_1 + r_2}{m_1 + m_2} = \frac{a}{m_1 + m_2} \qquad (1.2)$$

Phương trình (1.2) xác định vị trí khối tâm của hệ gồm hai vật thể ngăn cách nhau bởi khoảng cách a. Do đó, bán kính quỹ đạo của hành tinh (m_2) xung quanh Mặt Trời (m_1) là:

$$a = \frac{r_1(m_1 + m_2)}{m_2} \qquad (1.3)$$

Lực hấp dẫn $F_2 = F$ là:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{a^2} \qquad (1.4)$$

Từ (1.1) (1.3) và (1.4) chúng ta thu được:

$$P^2(m_1 + m_2) = 4\pi^2 \frac{a^3}{G} \qquad (1.5)$$

Biểu thức (1.5) là dạng chính xác của định luật thứ ba Kepler về chuyển động của các hành tinh.

Khối lượng trong biểu thức (1.5) có thể được xác định từ chu kì P và khoảng cách a là các đại lượng có thể xác định bằng quan sát. Như vậy các công trình của Kepler và Newton đã mở đường cho loài người xác định khối lượng của các thiên thể. Các kĩ thuật quan sát và các phương pháp giải tích của Kepler, các phương pháp thực nghiệm mới mẻ của Galileo và các phương pháp toán học của Newton kết hợp lại thành một công cụ mới và hữu hiệu trong việc nghiên cứu thiên văn nói riêng và khoa học nói chung.

Những thành tựu của Kepler, Galilei và Newton đã chứng minh và cung cấp cơ sở vật lí vững chắc cho hệ nhật tâm Copernicus.

VŨ TRỤ - PHÒNG THÍ NGHIỆM THIÊN NHIÊN VĨ ĐẠI

Các thiên thể liên tục phát ra năng lượng dưới dạng sóng điện từ, mang theo thông tin về các tính chất vật lí của thiên thể.

Từ nửa sau của thế kỉ XIX, sự phát triển của vật lí học, đặc biệt là nhiệt động lực học, quang phổ học và thiết bị quang phổ đã cho phép các nhà thiên văn xác định thành phần, nhiệt độ...của các thiên thể. Giả thiết cho rằng mỗi ngôi sao là một Mặt Trời khác đã được xác nhận. Các hành tinh là các thiên thể lạnh nhận và phản xạ ánh sáng mặt trời. Các thiên thể đều được tạo bởi các nguyên tố hoá học như nhau.

$$F_1 = \frac{m_1 v_1^2}{r_1} = \frac{4\pi^2 m_1 r_1}{P^2}$$

$$F_2 = \frac{m_2 v_2^2}{r_2} = \frac{4\pi^2 m_2 r_2}{P^2} \qquad (1.1)$$

Since $F_1 = F_2$,

$$\frac{r_1}{m_2} = \frac{r_2}{m_1} = \frac{r_1 + r_2}{m_1 + m_2} = \frac{a}{m_1 + m_2} \qquad (1.2)$$

Equation (1.2) determines the position of the center of mass of the system composed of two bodies separated by a distance a. Thus the radius of the orbit of planet (m_2) around the Sun (m_1) is:

$$a = \frac{r_1(m_1 + m_2)}{m_2} \qquad (1.3)$$

The gravitational attraction $F_2 = F$ is:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{a^2} \qquad (1.4)$$

From (1.1) (1.3) and (1.4) one obtains:

$$P^2(m_1 + m_2) = 4\pi^2 \frac{a^3}{G} \qquad (1.5)$$

The expression (1.5) is the exact form of Kepler's third law of planetary motion. The mass in equation (1.5) could be determined from the period P and distance a which are all obtained from observations.

Thus the works of Kepler and Newton opened the way for mankind to measure the masses of celestial objects.

The observational techniques and analysis methods of Kepler, innovative experimental methods of Galileo and the mathematical methods of Newton combined into a new powerful tool of research for astronomy in particular and also for science in general.

The achievements of Galileo, Kepler, Newton vindicated and provided solid physical foundation for the Copernican system.

THE UNIVERSE AS A GREAT NATURAL LABORATORY.

Celestial objects continuously emit energy in the form of electromagnetic waves which carry the information on the physical properties of the objects.

Since the second half of the 19th century, the development of physics, especially thermodynamics, spectroscopy and spectroscopic instruments enabled astronomers to determine the composition, temperature, etc., of celestial objects. The hypothesis that each star is another Sun was confirmed. Planets are cold bodies, which receive and reflect sunlight. Celestial objects are all made of the same chemical elements.

Trong thế kỉ XX, người ta đã chế tạo được các kính thiên văn quang học lớn, kính thiên văn vô tuyến và các giao thoa kế vô tuyến, các camera hồng ngoại và đặc biệt là các kính thiên văn vũ trụ. Một số hiện tượng mới đã được phát hiện không thể giải thích được bởi vật lí cổ điển. Các hiện tượng này bao gồm: sự dịch chuyển điểm cận nhật của Thuỷ Tinh, sự uốn cong của tia sáng ở gần các vật thể có khối lượng lớn (hiệu ứng thấu kính hấp dẫn), sự giãn nở của Vũ trụ, bức xạ dư...và các vật thể lạ như vụ nổ sao siêu mới, pulsar, hốc đen. Vật lí hiện đại và đặc biệt là thuyết tương đối của Einstein đã được áp dụng để giải thích các hiện tượng và các vật thể này, nhưng chúng ta vẫn cần một lí thuyết thống nhất để hiểu chúng một cách đầy đủ. Trong vũ trụ học - bộ phận của thiên văn học hiện đại nghiên cứu sự tiến hoá của Vũ trụ - lí thuyết vụ nổ lớn (Big Bang) đang được nghiên cứu mạnh mẽ. Có phải Vũ trụ không có một sự bắt đầu và một sự kết thúc hay không? Có phải Vũ trụ đã có một sự bắt đầu và sẽ có một sự kết thúc? Các ngôi sao và các hành tinh đã hình thành như thế nào? Liệu có sự sống và nền văn minh trí tuệ trên các hành tinh khác hay không?

Rõ ràng chỉ một phần nhỏ của phòng thí nghiệm thiên nhiên vĩ đại - Vũ trụ đã được thám hiểm và Vũ trụ sẽ mãi mãi là thách thức lớn nhất đối với trí tuệ của loài người và đối với các nhà khoa học.

VỊ TRÍ CỦA CHÚNG TA Ở TRONG VŨ TRỤ

Chúng ta sống trên Trái Đất - một hành tinh nhỏ đang quay quanh Mặt Trời với vận tốc khoảng 30 km/s. Hệ Mặt Trời cũng quay quanh tâm Thiên Hà của chúng ta với vận tốc khoảng 230 km/s. Giải Ngân Hà gồm khoảng một trăm tỉ ngôi sao. Kích thước của nó khoảng 100000 năm ánh sáng.

Người ta đã phát hiện được hơn 60 hành tinh ở ngoài Hệ Mặt Trời của chúng ta (trong Vũ trụ). Trong đó có hành tinh quay quanh sao Beta Pictoris (cách chúng ta 40 năm ánh sáng), và Pegasus (cách chúng ta 51 năm ánh sáng). Một số phân tử hữu cơ đã được phát hiện ra trong bụi và khí giữa các ngôi sao. Điều này nói lên rằng các hành tinh với các phân tử hữu cơ có thể quay xung quanh các ngôi sao khác Mặt Trời.

Những gì tồn tại trong Vũ trụ hiện nay là kết quả của sự tiến hoá liên tục của vật chất. Việc nghiên cứu Vũ trụ của chúng ta chính là việc nghiên cứu lịch sử để nhận thức sức mạnh của tự nhiên và đóng góp vào sự phát triển của khoa học nhằm phục vụ đời sống con người.

Các nhà thiên văn hứng thú nghiên cứu Vũ trụ còn vì lí do họ bị cuốn hút bởi sự muôn hình muôn vẻ của Vũ trụ - một yếu tố mang lại cho chúng ta niềm vui và sự say mê trong lao động sáng tạo và trong việc thử thách trí tuệ của con người.

During the 20th century, large optical telescopes, radio telescopes and radio interferometers, infrared cameras and especially the space-based telescopes became available. Several new phenomena were discovered which could not be explained by classical physics. These are the advancement of Mercury's perihelion, the bending of light near massive bodies (gravitational lensing effect), the expansion of the Universe, the relic radiation, etc., and mysterious objects such as supernovae, pulsars or black holes. Modern physics and in particular Einstein's theory of relativity, have been applied to explain these phenomena and objects, but we still need a unified theory in order to fully understand them. In cosmology – the branch of modern astronomy studying the evolution of the Universe - the theory of the "Big Bang" is currently being actively investigated. Is the Universe without a beginning or an end? Did it have a beginning and will it have an end? How are stars and planetary systems formed? Are there life and intelligent civilizations on other planets?

Clearly, only a small part of the great natural laboratory, the Universe, has been explored and the Universe will remain the greatest challenge to human's intelligence and to scientists.

OUR HOME IN THE UNIVERSE.

We are living on the Earth, a small planet orbiting the Sun with a velocity of about 30 km/s. The Solar system also revolves around the center of our Milky Way galaxy with an approximate velocity of 230 km/s. The Milky Way is made of around one hundred billion stars. Its size is about one hundred thousand light years.

More than 60 planets have been discovered outside the solar system (in the Universe). They include planets revolving around the star Beta Pictoris (40 light years away from us) and around 51 Pegasus (51 light years from us). Some organic molecules have been discovered in the dust and gases between the stars, suggesting that planets with organic molecules may revolve around stars other than the Sun.

What exists now in the Universe is the results of continual evolution of matter. Our research into the Universe means our research into history so as to perceive the forces of nature and make a contribution to the science development in service of people's life.

Astronomers are also interested in doing research into the Universe because they are attracted by the diversity of the Universe, a factor which brings us joy, eagerness in working creatively and in testing of man's intellect.

CÂU HỎI

1. Hãy giải thích các đặc điểm chuyển động nhìn thấy của Mặt Trời, Mặt Trăng, các hành tinh và các ngôi sao theo mô hình địa tâm Ptolemy và theo mô hình nhật tâm Copernicus.

2. Hãy giải thích bằng cách nào các pha của Kim Tinh được quan sát bởi Galileo, giúp ông khẳng định mô hình nhật tâm và bác bỏ thuyết địa tâm.

3. Nêu tóm tắt các phương pháp mà Kepler đã sử dụng để phát hiện ra rằng các hành tinh chuyển động theo quỹ đạo elíp.

4. Tóm tắt sự phát triển của phương pháp khoa học qua lịch sử phát triển thiên văn học.

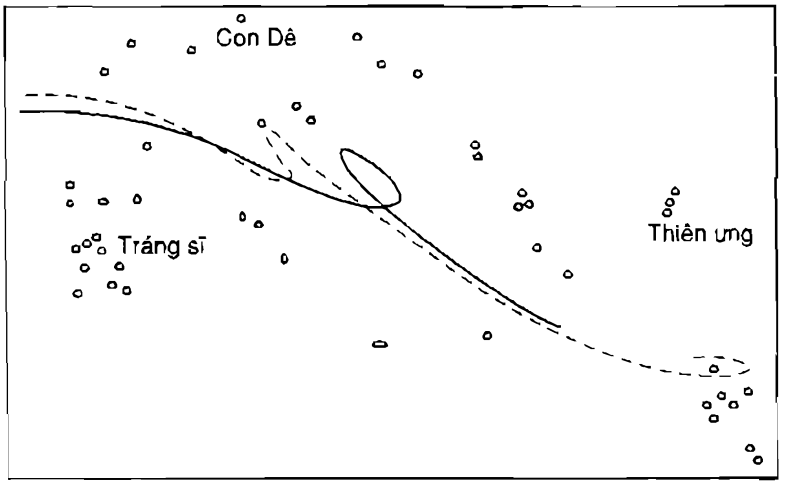
QUESTIONS

Question 1: Explain the properties of the visible motions of the Sun, the Moon, the planets and the stars based on Ptolemy's geocentric model and Copernicus' heliocentric model.

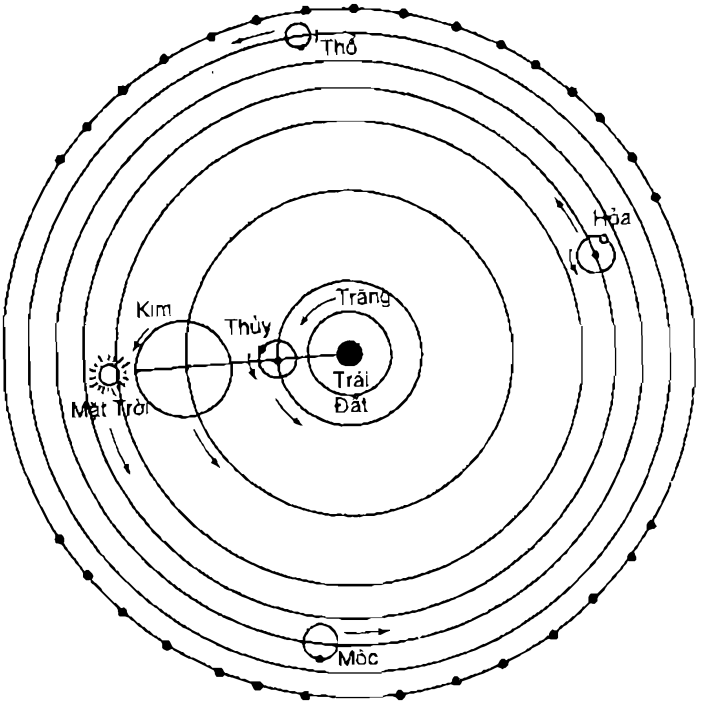
Question 2. Explain how the phases of Venus, observed by Galileo, confirmed for him the heliocentric model and disproved the geocentric model.

Question 3. Review the methods of Kepler used to discover that planets have elliptical orbits.

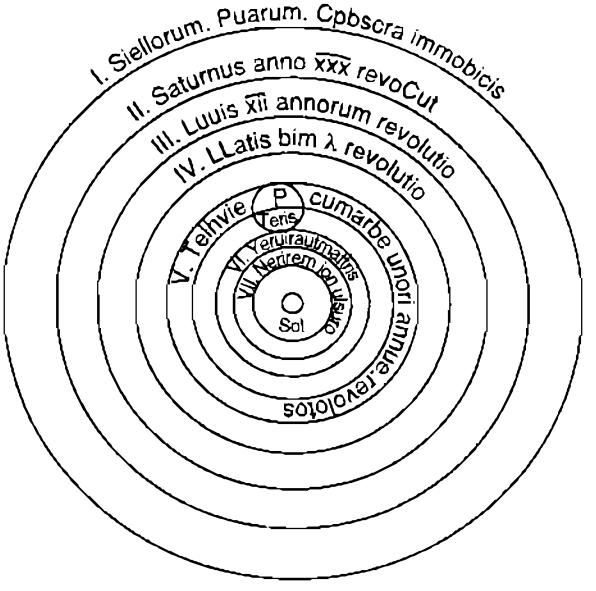
Question 4. Review the development of the scientific method using the historical development of astronomy.



Hình I.1



Hình I.2


I. Siellorum. Puarum. Cpbscra immobicis
II. Saturnus anno xxx revoCut
III. Luuis xii annorum revolutio
IV. LLatis bim λ revolutio
V. Telhvie
P
Tens
cumarbe unori annue revolotos
VI. Yeruiraulmatins
VII. Nerirem ien Jeiseno
Sol

Hình 1.3

Chương II

CHUYỂN ĐỘNG CỦA CÁC THIÊN THỂ TRONG TRƯỜNG LỰC HẤP DẪN

Nghiên cứu chuyển động của thiên thể là một trong những nhiệm vụ chủ yếu của cơ học thiên thể. Nhờ những phát minh khoa học nền tảng của Nicolaus Copernicus, Johannes Kepler, Galileo Galilei, Isaac Newton, Albert Einstein... mà cơ học thiên thể đã có những bước tiến rất xa trong việc khám phá Vũ trụ. Thành tựu to lớn nhất của cơ học thiên thể thế kỉ XIX và nửa đầu thế kỉ XX là lí thuyết chuyển động của Mặt Trăng và của các hành tinh trong Hệ Mặt Trời.

Ngày nay, các thành tựu mới nhất của khoa học và kĩ thuật tiên tiến, đặc biệt là Vật lí học, toán học và các kĩ thuật tính toán sử dụng các máy tính mạch cho phép cơ học thiên thể thiết lập các mô hình chuyển động của các thiên thể với độ chính xác cao, đáp ứng yêu cầu của các phương pháp và kĩ thuật quan sát hiện đại.

Ngoài việc nghiên cứu quy luật chuyển động của các thiên thể, tính chất bề mặt, khối lượng, xác định khoảng cách của chúng, Cơ học thiên thể còn nghiên cứu các hiện tượng trên Trái Đất như hiện tượng triều, sự quay của Trái Đất ...

Trong chương này chúng ta chỉ khảo sát những nguyên tắc cơ bản của cơ học thiên thể.

CHUYỂN ĐỘNG KHÔNG NHIỄU LOẠN CỦA CÁC THIÊN THỂ

Phương trình chuyển động

Chuyển động của các hành tinh trong Hệ Mặt Trời tuân theo các định luật thực nghiệm Kepler được gọi là chuyển động không nhiễu loạn. Từ định luật vạn vật hấp dẫn, ta có thể suy ra các định luật đó một cách tổng quát hơn bằng con đường lí thuyết, khi xét bài toán hai vật thể.

Bài toán hai vật thể nghiên cứu chuyển động của hai chất điểm dưới tác dụng của lực hấp dẫn Newton có ý nghĩa quan trọng khi khảo sát chuyển động của các thiên thể, thí dụ như chuyển động của hành tinh quanh Mặt Trời, của vệ tinh quanh hành tinh, của vệ tinh nhân tạo quanh Trái Đất. Lúc này, các thiên thể được xem như là các chất điểm, nghĩa là kích thước của chúng nhỏ so với khoảng cách giữa chúng và xem hình dạng của chúng có cấu trúc hình cầu. Ta khảo sát chuyển động của hai vật thể M_o có khối lượng m_o và M có khối lượng m, khoảng cách giữa chúng là r. Hai vật thể hấp dẫn lẫn nhau. Bài toán này có thể giải bằng các phương pháp khác nhau. Ở đây bài toán được giải theo phương pháp động lực học.

Trong hệ toạ độ tuyệt đối OXYZ, phương trình chuyển động của vật thể $M_o(X_o, Y_o, Z_o)$ là :

$$\frac{d^2X_o}{dt^2} = Gm\frac{X - X_o}{r^3} \; ; \; \frac{d^2Y_o}{dt^2} = Gm\frac{Y - Y_o}{r^3} \; ; \; \frac{d^2Z_o}{dt^2} = Gm\frac{Z - Z_o}{r^3} \; ; \qquad (2.1)$$

và của vật thể M(X,Y,Z) là :

Chapter II

MOVEMENT OF CELESTIAL OBJECTS IN GRAVITATIONAL FIELD

One of the main goals of celestial mechanics is to study the motion of celestial bodies. Thanks to the fundamental works of Nicolaus Copernicus, Johannes Kepler, Galileo Galilei, Isaac Newton, Albert Einstein, celestial mechanics has led to great progress in exploring the universe. The greatest achievements of the celestial mechanics in the 19^{th} century and the first half of the 20^{th} century were the fundamental theory of the motion of the Moon and of the planets in the solar system.

Today the latest achievements of modern science and technologies, especially physics, mathematics and computational techniques with powerful computers, have allowed celestial mechanics to establish models of the movement of celestial objects with high accuracy, satisfying the need of modern observational methods and techniques.

Besides studying the laws of motion, some surface properties and the masses of celestial objects and the determination of their distances, celestial mechanics also studies phenomena on Earth such as ocean tides, rotation of the Earth etc.

In this Chapter we limit ourselves to the study of the fundamental principles of celestial mechanics.

NON-PERTURBED MOTION OF CELESTIAL OBJECTS.

Equations of Motion.

Planetary motions in the solar system which obey the observational laws of Kepler are called non-perturbed motions. From the law of universal gravitation one can derive the laws of motion in a more general way by solving the two-body problem.

The two-body problem, which treats the motion of two point masses under their mutual gravitational attraction, has important implication in studying the motions of celestial objects, for example, the planetary motion around the Sun, the movement of satellites around planets and of artificial satellites around the Earth. In this section, celestial objects are considered to be point masses, which means their sizes are much smaller than the distance separating them, and their forms are spherical. We consider the motion of two bodies, one body called M_0 of mass m_0, and one body called M of mass m, separated by a distance r. Two bodies attract each other gravitationally. The problem can be solved with different methods. Here the problem is treated using the dynamical method.

In the reference frame (OXYZ), the equations of motion for M_0 (X_0, Y_0, Z_0) are:

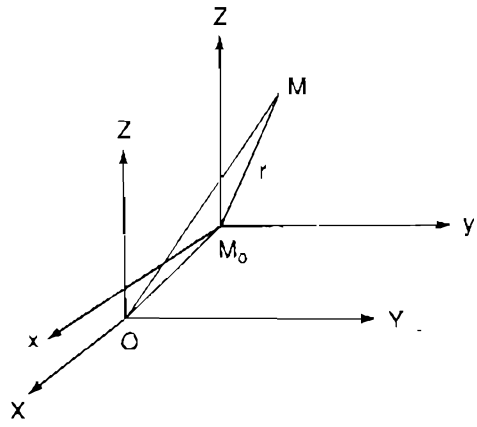
$$\frac{d^2X_o}{dt^2} = G\,m\,\frac{X - X_o}{r^3}\ ;\quad \frac{d^2Y_o}{dt^2} = G\,m\,\frac{Y - Y_o}{r^3}\ ;\quad \frac{d^2Z_o}{dt^2} = G\,m\,\frac{Z - Z_o}{r^3}\ ; \qquad (2.1)$$

And for M (X, Y, Z):

$$\frac{d^2X}{dt^2} = Gm_0\frac{X_0 - X}{r^3} \; ; \; \frac{d^2Y}{dt^2} = Gm_0\frac{Y_0 - Y}{r^3} \; ; \; \frac{d^2Z}{dt^2} = Gm_0\frac{Z_0 - Z}{r^3} \; ; \qquad (2.2)$$

Ở đây: $$r = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} \qquad (2.3)$$

Trong thực tế ta thường xét trong hệ toạ độ tương đối gốc tại M_0, các trục M_0x, M_0y, M_0z tương ứng song song với các trục OX, OY, OZ (hình II.1)



Hình II.1

Ở đây: $x = X - X_0$; $y = Y - Y_0$; $z = Z - Z_0$ và $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ (2.4)

Phương trình chuyển động tương đối của M đối với M_0 là:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -G(m_0+m)\frac{x}{r^3} = -K\frac{x}{r^3}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -G(m_0+m)\frac{y}{r^3} = -K\frac{y}{r^3}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -G(m_0+m)\frac{z}{r^3} = -K\frac{z}{r^3} \qquad (2.5)$$

Hay dưới dạng véc tơ:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -K\frac{\vec{r}}{r^3} \qquad (2.6)$$

Với $$K = G(m_0 + m) \qquad (2.7)$$

Hệ 3 phương trình vi phân hạng hai này mô tả chuyển động tương đối của vật thể M trong trường hấp dẫn của vật thể M_0.

Chuyển động theo quỹ đạo

Lực tác dụng của vật thể M_0 lên vật thể M đóng vai trò lực hướng tâm. Do đó quỹ đạo chuyển động của M là một đường cong nằm trong mặt phẳng đi qua tâm lực và M_0.

Như vậy, các phương trình mô tả chuyển động tương đối của M đối với M_0 trong mặt phẳng M_0xy trở thành:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -K\frac{x}{r^3}; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = -K\frac{y}{r^3} \qquad (2.8)$$

Nhân phương trình thứ nhất với - y và phương trình thứ 2 với x rồi cộng lại, ta được:

$$\frac{d}{dt}\left(x\frac{dy}{dt} - y\frac{dx}{dt}\right) = 0 \qquad \text{hay} \qquad x\frac{dy}{dt} - y\frac{dx}{dt} = \text{const} \qquad (2.9)$$

$$\frac{d^2X}{dt^2} = G\,m_o\,\frac{X_o - X}{r^3}\;;\quad \frac{d^2Y}{dt^2} = G\,m_o\,\frac{Y_o - Y}{r^3}\;;\quad \frac{d^2Z}{dt^2} = G\,m_o\,\frac{Z_o - Z}{r^3}\;; \tag{2.2}$$

Where: $$r = \sqrt{(X - X_o)^2 + (Y - Y_o)^2 + (Z - Z_o)^2} \tag{2.3}$$

In practice we usually use the relative reference frame associated with M_O having axes M_Ox, M_Oy, M_Oz parallel to the axes OX, OY, OZ, respectively.

Figure II.1

where

$$x = X - X_O,\quad y = Y - Y_O,\quad z = Z - Z_O\;;\text{ and } x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \tag{2.4}$$

The equations of motion of M relative to M_o become:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\,G\,(m_O + m)\frac{x}{r^3} = -K\frac{x}{r^3}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\,G(m_O + m)\frac{y}{r^3} = -K\frac{y}{r^3}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\,G(m_O + m)\frac{z}{r^3} = -K\frac{z}{r^3} \tag{2.5}$$

Or under the vector form:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -K\frac{\vec{r}}{r^3} \tag{2.6}$$

with $$K = G\,(m + m_O) \tag{2.7}$$

These three second order differential equations describe the relative motion of the object M in the gravitational field of object M_O.

The Orbits

The force of M_O on M plays the role of the centripetal force. Thus the orbit of M is a curve lying on the plane including the center of force and M_O.

Therefore, the equations describing the relative motion of M relative to M_O in the plane M_Oxy become:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -K\frac{x}{r^3}\;;\quad \frac{d^2y}{dt^2} = -K\frac{y}{r^3}\,p \tag{2.8}$$

Multiplying the first equation by - y and the second equation by x and summing, we obtain :

$$\frac{d}{dt}\left(x\frac{dy}{dt} - y\frac{dx}{dt}\right) = 0 \quad \text{or} \quad x\frac{dy}{dt} - y\frac{dx}{dt} = const \tag{2.9}$$

Chuyển qua hệ toạ độ cực ta có:

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = C \qquad (2.10)$$

Phương trình này mô tả định luật 2 Kepler: diện tích bề mặt quét bởi bán kính véc tơ trong một đơn vị thời gian là hằng số. (2.10) cho ta sự phụ thuộc của r vào φ, hay là phương trình quỹ đạo.

Trong (2.8) nhân phương trình thứ nhất với dx/dt và phương trình thứ 2 với dy/dt, cộng lại ta được:

$$\frac{d^2x}{dt^2}\frac{dx}{dt} + \frac{d^2y}{dt^2}\frac{dy}{dt} = -\frac{K}{r^3}\left(x\frac{dx}{dt} + y\frac{dy}{dt}\right)$$

hay

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right] = -\frac{K}{r^3}\left(r\frac{dr}{dt}\right)$$

$$\frac{d}{dt}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right] = -\frac{2K}{r^2}\frac{dr}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}\left(v^2\right) = 2K\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{r}\right)$$

$$v^2 = \frac{2K}{r} + B \qquad (2.11)$$

ở đây B là hằng số tích phân.

Trong hệ toạ độ cực: $v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2$ hay $v^2 = \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\left[\left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 + r^2\right]$

Thay $\frac{d\varphi}{dt}$ từ (2.10) vào phương trình trên, chúng ta thu được:

$$v^2 = \frac{C^2}{r^4}\left[\left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 + r^2\right] \qquad (2.12)$$

Từ (2.11) và (2.12) ta suy ra:

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{r^2}{C}\sqrt{\frac{2K}{r} + B - \frac{C^2}{r^2}}$$

hay:

$$d\varphi = \frac{-d\left(\frac{C}{r}\right)}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B - \left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)^2}}$$

Using polar coordinates we obtain:

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = C \tag{2.10}$$

This equation is Kepler's second law: the surface area swept out by the radius vector in a unit of time is a constant. (2.10) gives the dependence of r on φ or the equation of the orbit.

Multiplying the first equation of (2.8) with dx/dt and the second equation with dy/dt, summing:

$$\frac{d^2x}{dt^2}\frac{dx}{dt} + \frac{d^2y}{dt^2}\frac{dy}{dt} = -\frac{K}{r^3}\left(x\frac{dx}{dt} + y\frac{dy}{dt}\right)$$

or

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right] = -\frac{K}{r^3}\left(r\frac{dr}{dt}\right)$$

$$\frac{d}{dt}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2\right] = -\frac{2K}{r^2}\frac{dr}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}\left(v^2\right) = 2K\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{r}\right)$$

$$v^2 = \frac{2K}{r} + B \tag{2.11}$$

where B is a constant of integration. In polar coordinates:

$$v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2$$

or

$$v^2 = \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\left[\left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 + r^2\right]$$

Making the substitution of dφ/dt from (2.10) into the above equation, we obtain:

$$v^2 = \frac{C^2}{r^4}\left[\left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2 + r^2\right] \tag{2.12}$$

From (2.11) and (2.12) we derive:

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{r^2}{C}\sqrt{\frac{2K}{r} + B - \frac{C^2}{r^2}}$$

or

$$d\varphi = \frac{-d\left(\frac{C}{r}\right)}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B - \left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)^2}}$$

Vì K/C là hằng số nên : $$d\varphi = \frac{-d\left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B - \left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)^2}}$$

$$d\varphi = \frac{\frac{-d\left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}}}{\sqrt{1 - \left[\frac{\frac{C}{r} - \frac{K}{C}}{\frac{K^2}{C^2} + B}\right]^2}}$$

Tích phân hai vế, ta được :

$$\varphi = arccos\frac{\frac{C}{r} - \frac{K}{C}}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}} + A$$

hay : $\cos(\varphi - A) = \frac{\frac{C}{r} - \frac{K}{C}}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}}$

Từ đó ta suy ra :

$$r = \frac{\frac{C^2}{K}}{1 + \sqrt{1 + B\frac{C^2}{K^2}}cos(\varphi - A)} \tag{2.13}$$

Đặt $p = \frac{C^2}{K} = const$ và $e = \sqrt{1 + B\frac{C^2}{K^2}}$ (2.14)

Thay p và e từ (2.14) vào (2.13), ta có:

$$r = \frac{p}{1 + ecos(\varphi - A)} \tag{2.15}$$

Phương trình (2.15) mô tả một đường conic trong hệ toạ độ cực có gốc toạ độ tại điểm M_o. Các hằng số p và e được gọi là thông số và tâm sai của conic. Như vậy quỹ đạo của vật thể M xung quanh vật thể M_o là một đường tròn, elip, parabol hay hybebol, phụ thuộc vào tâm sai quỹ đạo e.

Since K/C is a constant:

$$d\varphi = \frac{-d\left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B - \left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)^2}}$$

$$d\varphi = \frac{-d\left(\frac{C}{r} - \frac{K}{C}\right)}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}\sqrt{1 - \left[\frac{\frac{C}{r} - \frac{K}{C}}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}}\right]^2}}$$

Integrating the above equation, we obtain:

$$\varphi = \arccos\frac{\frac{C}{r} - \frac{K}{C}}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}} + A$$

or

$$\cos(\varphi - A) = \frac{\frac{C}{r} - \frac{K}{C}}{\sqrt{\frac{K^2}{C^2} + B}}$$

We derive

$$r = \frac{\frac{C^2}{K}}{1 + \sqrt{1 + B\frac{C^2}{K^2}}\cos(\varphi - A)} \qquad (2.13)$$

Putting

$$p = \frac{C^2}{K} = const \quad \text{and} \quad e = \sqrt{1 + B\frac{C^2}{K^2}} \qquad (2.14)$$

and making the substitution of p and e into (2.13), we obtain:

$$r = \frac{p}{1 + e\cos(\varphi - A)} \qquad (2.15)$$

Equation (2.15) describes a conic curve in the polar coordinate system having M_0 as origin. The constants p and e are parameter and eccentricity of the conic. Therefore, the orbit of M around M_0 can be circular, elliptic, parabolic or hyperbolic depending on the eccentricity e.

Phân loại quỹ đạo trong bài toán 2 vật

Tâm sai quỹ đạo e và vận tốc v phụ thuộc vào nhau, vì cùng chứa hằng số B. Do đó dạng quỹ đạo phụ thuộc vào vận tốc của vật.

a. Quỹ đạo elíp : $e < 1$, $p = a(1 - e^2)$

$$B = -\frac{K}{a} < 0$$

và $$v_e^2 = \frac{2K}{r} - \frac{K}{a} = K\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right) \qquad (2.16)$$

Phương trình (2.16) được gọi là phương trình năng lượng theo quỹ đạo Kepler.

b. Quỹ đạo tròn : $e = 0$, $r = a$

và $$v_c^2 = \frac{K}{r} \qquad (2.17)$$

c. Quỹ đạo parabol : $e = 1$

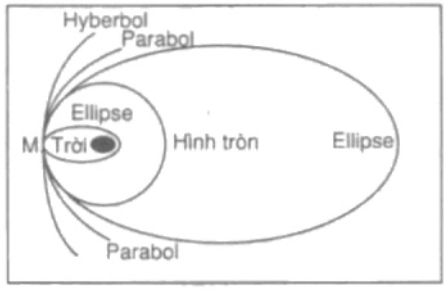
$$B = 0 \quad \text{và} \quad v_p^2 = \frac{2K}{r} = 2v_c^2 \qquad (2.18)$$

d. Quỹ đạo hypecbol : $e > 1$; $p = a(e^2 - 1)$

$$B = \frac{K}{a} \quad \text{và} \quad v_h^2 = K\left(\frac{2}{r} + \frac{1}{a}\right) \qquad (2.19)$$

Quỹ đạo của các hành tinh trong Hệ Mặt Trời đều là những elíp, nhận Mặt Trời làm một tiêu điểm và vận tốc của chúng được tính theo (2.16). Tâm sai quỹ đạo của các hành tinh đều rất bé.

Trừ Thuỷ Tinh và Diêm Vương Tinh, quỹ đạo của các hành tinh trong Hệ Mặt Trời gần như tròn. Mặt Trăng chuyển động quanh khối tâm chung của hệ Trái Đất - Mặt Trăng theo quỹ đạo elíp với tâm sai là 0,055 và khối tâm chung này lại chuyển động quanh Mặt Trời cũng theo quỹ đạo elíp với tâm sai là 0,017.



Hình II.2

Hoả Tinh có 2 vệ tinh: Phobos và Demos. Phobos có quỹ đạo elíp với tâm sai 0,015 trong khi Demos có quỹ đạo gần như tròn.

Các vệ tinh của các hành tinh khác (Thổ Tinh: 20; Thiên Vương Tinh: 15; Hải Vương Tinh: 8; Diêm Vương Tinh: 1) có quỹ đạo gần như tròn. Hầu hết các sao chổi có quỹ đạo quanh Mặt Trời là những elíp rất dẹt. Trong một số trường hợp, do nhiễu loạn hành tinh nên quỹ đạo của một số sao chổi là hybecbol, sau khi đi qua gần Mặt Trời chúng thoát ra khỏi Hệ Mặt Trời.

Classification of Orbits in Two-Body Problem.

The eccentricity of the orbit and the orbital velocity are mutually dependent since they both contain the constant B. Thus, the orbit depends on the object's velocity.

a. Elliptic orbit: $e < 1$, $p = a(1 - e^2)$

$$B = -\frac{K}{a} < 0$$

and
$$v_e^2 = \frac{2K}{r} - \frac{K}{a} = K\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right) \tag{2.16}$$

Equation (2.16) is called the equation of energy in Kepler's orbit.

b. Circular orbit: $e = 0$, $r = a$

$$v_c^2 = \frac{K}{r} \tag{2.17}$$

c. Parabolic orbit: $e = 1$

$$B = 0 \quad \text{and} \quad v_p^2 = \frac{2K}{r} = 2v_c^2 \tag{2.18}$$

d. Hyperbolic orbit: $e > 1$, $p = a(e^2 - 1)$.

$$B = \frac{K}{a} \quad \text{and} \quad v_h^2 = K\left(\frac{2}{r} + \frac{1}{a}\right) \tag{2.19}$$

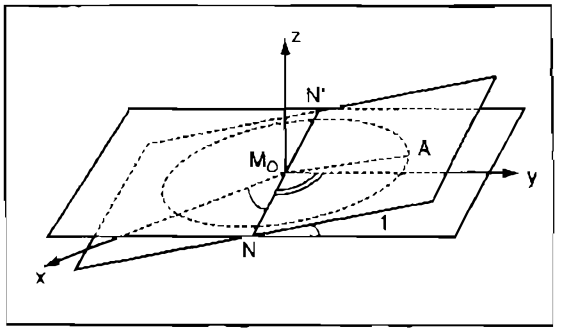
Planetary orbits in the solar system are all elliptic having the Sun at one of the foci and the planet's velocities calculated with equation (2.16). The eccentricity of planetary orbits is very small.

Figure II.2

Except for Mercury and Pluto, the orbits of planets in the solar system are nearly circular. The Moon revolves around the center of mass of the Earth-Moon system on an elliptical orbit with an eccentricity of 0.055 and the center of mass moves again on an elliptic orbit around the Sun with an eccentricity of 0.017.

Mars has two satellites: Phobos and Demos. Phobos has an elliptic orbit with eccentricity 0.015 while Demos has a nearly circular orbit. The satellites of other planets (Saturn: 20, Uranus: 15, Neptune: 8, Pluto: 1) also have nearly circular orbits. The orbits of most comets are very elongated ellipses. In some cases, cometary orbits are transformed into hyperbolic forms under the planetary perturbations and, after a passage near the Sun, they escape the solar system.

CÁC YẾU TỐ QUỸ ĐẠO HÀNH TINH



Hình II.3

Các yếu tố quỹ đạo xác định sự định hướng quỹ đạo của thiên thể trong không gian, cũng như hình dạng của quỹ đạo và vị trí của thiên thể trên quỹ đạo.

Giả sử chuyển động của vật thể M được khảo sát trong hệ toạ độ M_oxyz với gốc tại M_o và mặt phẳng M_oxy là mặt phẳng cơ bản. Mặt phẳng cơ bản cắt mặt phẳng quỹ đạo theo đường thẳng $N'M_oN$ gọi là đường nút, N gọi là nút lên, N' gọi là nút xuống. Góc tạo thành giữa hai mặt phẳng đó gọi là góc nghiêng i. Góc giữa trục M_ox và M_oN gọi là kinh độ của nút lên, kí hiệu là Ω. Kinh độ của điểm cận nhật là khoảng cách góc từ nút lên N tới cận điểm A, gọi là góc cận điểm, kí hiệu là ω.

Các đại lượng Ω, i, ω thuộc nhóm thứ nhất của các yếu tố quỹ đạo.

Ω và i xác định sự định hướng của mặt phẳng quỹ đạo, trong khi ω xác định sự định hướng của quỹ đạo.

Ta có: $0^o \leq i \leq 180^o$; $0^o \leq \Omega < 360^o$; $0^o \leq \omega < 360^o$

Trong trường hợp chuyển động của các hành tinh thì mặt phẳng cơ bản là mặt phẳng hoàng đạo và trục M_ox hướng tới chòm sao Bạch Dương.

Trong trường hợp các vệ tinh nhân tạo, mặt phẳng cơ bản là mặt phẳng xích đạo của Trái Đất và trục M_ox hướng tới điểm xuân phân.

Nhóm thứ hai gồm các yếu tố p, e và t xác định độ lớn, hình dáng và vị trí của thiên thể trên quỹ đạo.

Thông số quỹ đạo p và tâm sai e đặc trưng cho độ lớn và hình dạng quỹ đạo. Thời điểm đi qua cận điểm t xác định vị trí của thiên thể trên quỹ đạo.

Các yếu tố p, e, i, Ω, ω, t là các yếu tố quỹ đạo.

VẬN TỐC TRÊN CÁC QUỸ ĐẠO

Vận tốc trên quỹ đạo tròn

Các vật thể nhân tạo như các vệ tinh nhân tạo, tàu vũ trụ, trạm không gian giữa các hành tinh... được phóng lên từ bề mặt Trái Đất và chuyển động trên các quỹ đạo xung quanh Trái Đất hoặc thoát khỏi trường hấp dẫn của Trái Đất và bay về phía các hành tinh khác trong Hệ Mặt Trời. Khi tách ra khỏi tên lửa đẩy, các vật thể nhân tạo đã thu được một vận tốc xác định theo phương nằm ngang đủ lớn để chúng không rơi trở lại Trái Đất. Vị trí mà các vật thể nhân tạo tách ra được gọi là điểm vào quỹ đạo. Các vật thể nhân tạo chuyển động quanh Trái Đất gọi là vệ tinh nhân tạo. Vệ tinh nhân tạo đầu tiên được Liên Xô phóng ngày 4 tháng 10 năm 1957 và đánh dấu sự mở đầu của kỉ nguyên Vũ trụ.

ELEMENTS OF PLANETARY ORBITS.

Orbital elements determine the orientation of the orbit of the celestial body in space as well as the shape of the orbit, and the position of the body within the orbit.

Suppose that the movement of the body M is studied in the reference frame M_0xyz having M_0 as origin and the plane M_0xy is the reference plane. The reference plane cuts the orbital plane in a line called the line of nodes $N'M_0N$ where N is called the ascending node and N' is the descending node. The angle between the orbital plane and the reference plane is the inclination i. The angle between axes M_0x and M_0N is the longitude of the ascending node, denoted as Ω. The longitude of perihelion ω is the angular distance from the ascending node N to perihelion A.

Figure II. 3

The parameters Ω, i, ω belong to the first group of orbital elements.

Ω and i determine the orientation of the orbital plane while ω gives the orientation of the orbit. We have:

$$0^o \leq i \leq 180^o \; ; \; 0^o \leq \Omega \leq 360^o \; ; \; 0^o \leq \omega \leq 360^o$$

In the case of planetary motion, the reference plane is the plane of the ecliptic and the axis M_0x is directed toward the point of Aries.

In the case of artificial satellites, the reference plane is the Earth's equatorial plane and the axis M_0x points toward the vernal equinox.

The second group consists of parameters p, e and t which determine the size, the shape and the position of the celestial body in the orbit.

The orbital parameter p and eccentricity e define the size and the shape of the orbit. The time of perihelion passage t fixes the body's position in the orbit.

The parameters p, e, i, Ω, ω, t are the elements of the orbit

VELOCITY IN ORBITS

Velocity in Circular Orbit

Artificial bodies such as artificial satellites, spacecraft, space stations are launched from the surface of the Earth and move on orbits around the Earth or just escape the Earth's gravitational attraction and fly toward other planets of the solar system. At the moment of separation from the launch vehicle, artificial bodies have gained a tangential velocity high enough so that they not to fall back to Earth. The position of the artificial bodies at separation is called the orbit entry point. Artificial bodies orbiting the Earth are called artificial satellites. The first artificial satellite was launched on 4 October 1957 by the former Soviet Union and marked the beginning of the space age.

Vận tốc trên quỹ đạo tròn của vệ tinh được tính theo công thức (2.17):

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{r}} \tag{2.20}$$

Chu kì tương ứng của vệ tinh là:

$$P = \frac{2\pi r}{v_c} = \frac{2\pi r^{3/2}}{\sqrt{GM}} \tag{2.21}$$

Trong phương trình (2.20) nếu ta thay r bằng bán kính xích đạo của Trái Đất R = 6,38. 10^6 m, M = 5,98. 10^{24} kg là khối lượng Trái Đất; G = 6,67. 10^{-11} Nm^2/kg^2 là hằng số hấp dẫn, ta được:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = 7{,}91 \text{ km/s.} \tag{2.22}$$

v_1 là vận tốc quỹ đạo của vệ tinh xung quanh Trái Đất.

Ở độ cao h kể từ bề mặt của Trái Đất, vận tốc quỹ đạo là:

$$v_o = \sqrt{\frac{GM}{R+h}} \tag{2.23}$$

Đại lượng R + h là khoảng cách địa tâm.

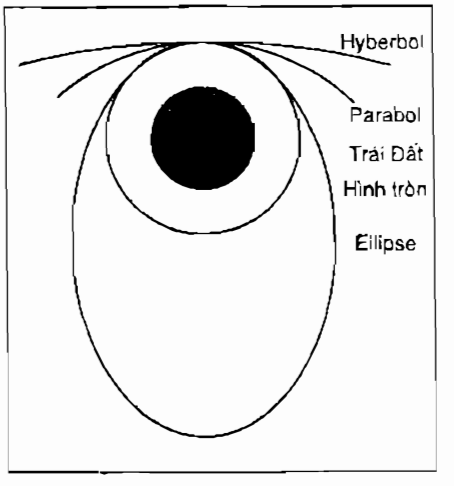
Mặt Trăng chuyển động quanh Trái Đất ở khoảng cách địa tâm 384.000 km với vận tốc quỹ đạo 1,02 km/s.

Các vệ tinh nhân tạo có khoảng cách địa tâm càng lớn thì chu kì chuyển động càng lớn và vận tốc chuyển động càng bé.

Trạm Vũ trụ Hoà bình của Nga có độ cao khoảng 620 km tương ứng với vận tốc quỹ đạo 7,54 km/s và chu kì chuyển động 97 phút. Tàu vũ trụ Con Thoi của Mĩ và một số vệ tinh liên lạc có độ cao khoảng 500 km tương ứng với vận tốc cỡ 7,61 km/s và chu kì chuyển động cỡ 94 phút. Các vệ tinh địa tĩnh có cùng chu kì chuyển động là 1 ngày sẽ trở nên cố định tại một điểm trên bầu trời ở độ cao khoảng 36.000 km. Ngày nay, vệ tinh địa tĩnh được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực dự báo khí tượng và thông tin liên lạc.

Ta thấy rằng vận tốc và chu kì quay của các vật thể nhân tạo không phụ thuộc vào khối lượng của chúng. Nếu trong tàu vũ trụ có nhà du hành vũ trụ thì vận tốc của con người và tàu vũ trụ là như nhau và trên tàu xuất hiện trạng thái không trọng lượng.

Trong khi chuyển động trên quỹ đạo, do có sức cản của khí quyển nên độ cao của vệ tinh nhân tạo giảm dần, trong khi vận tốc của nó tăng dần và chu kì của nó trở nên ngắn hơn. Khi đi vào lớp khí quyển dày đặc của Trái Đất, vệ tinh bị nung nóng mạnh và có thể bị bốc cháy. Tàu Con Thoi của Mĩ, nhờ áp dụng kĩ thuật cao trong công nghệ chế tạo, có thể trở về Trái Đất an toàn.



Hình II.4

The velocity on a circular orbit of a satellite is calculated by equation (2.17):

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{r}} \tag{2.20}$$

The corresponding period of the satellite is:

$$P = \frac{2\pi r}{v_c} = \frac{2\pi r^{3/2}}{\sqrt{GM}} \tag{2.21}$$

In equation (2.20), if we insert the value of the Earth's radius $R = 6.38 \times 10^6$ m and the Earth's mass $M = 5.98 \times 10^{24}$ kg and the gravitational constant $G = 6.67 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$, we obtain:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = 7.91 \text{ km/s.} \tag{2.22}$$

The velocity v_1 is the orbital velocity of the satellite around the Earth. At an altitude h from the Earth's surface, the orbital velocity becomes:

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{R+h}} \tag{2.23}$$

The quantity R + h is the geocentric distance.

The Moon orbits the Earth at a geocentric distance of 384 thousand km with an orbital velocity of 1,02 km/s.

The larger the geocentric distance, the longer is the period of revolution and smaller is the orbital velocity the satellite has.

The Russian space station MIR has an altitude of about 620 km which corresponds to an orbital velocity of 7.54 km/s and a period of 97 minutes. The US space shuttle and some communications satellites orbit the Earth at an altitude of about 500 km, with an orbital velocity and period of 7,61km/s and 94 minutes, respectively. Geostationary satellites which have a period of 24 hours will stay fixed on the sky at an altitude of 36 thousand km. Today, geostationary satellites are used widely in meteorological observations and in telecommunications.

Figure II.4

As we know from above, the orbital velocity and the period of artificial bodies are not dependent on their mass. Hence, if there is an astronaut inside the spacecraft, then the velocity is the same for the spacecraft and the astronaut. As a result, the state of weightlessness appears inside the spacecraft.

During orbital motion, due to the atmospheric drag, the altitude of an artificial satellite decreases while its velocity increases and its period becomes shorter. While entering the dense layers of the atmosphere it comes under intense heating and may burn. The US space shuttle, using high fabrication technologies, can return safely to Earth.

Nếu tại điểm vào của quỹ đạo, vận tốc không phải là vận tốc chuyển động theo quỹ đạo tròn thì vệ tinh chuyển động trên một quỹ đạo elip, với vận tốc thay đổi, tâm Trái Đất là một tiêu điểm. Vận tốc lớn nhất tại cận điểm và bé nhất tại viễn điểm. Nếu tại điểm vào của quỹ đạo, vận tốc tiếp tuyến đủ bé hơn v_c thì viễn điểm có thể nằm thấp hơn bề mặt Trái Đất và vệ tinh sẽ rơi vào Trái Đất, hoặc viễn điểm có thể nằm trong khí quyển Trái Đất, nên khí quyển gây ra một lực hãm lên vệ tinh, bởi vậy vệ tinh sẽ dần dần rơi ngược trở lại bề mặt Trái Đất.

Vận tốc thoát. Chuyển động theo quỹ đạo parabol

Các thiên thể (các hành tinh, các vệ tinh, các sao...) đều có trường hấp dẫn riêng và được đặc trưng bởi cầu hấp dẫn của chúng.

Bán kính cầu hấp dẫn của Trái Đất trong hệ Trái Đất-Mặt Trời là 930.000 km. Bán kính cầu hấp dẫn của Mặt Trăng trong hệ Mặt Trăng-Trái Đất là 66.000 km. Khi một tàu vũ trụ đi vào cầu hấp dẫn của Mặt Trăng, lực chiếm ưu thế là lực hấp dẫn của Mặt Trăng, còn lực hấp dẫn của Trái Đất và các hành tinh khác có thể coi như nhiễu loạn.

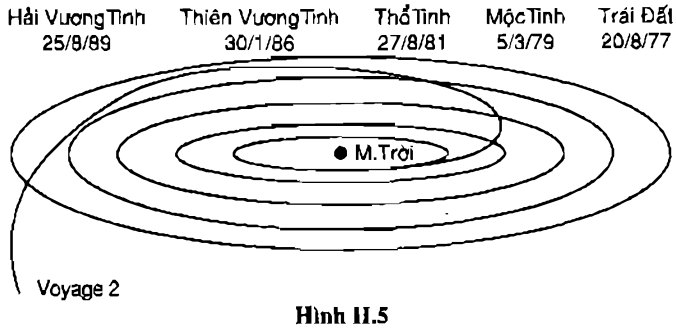
Các vệ tinh nhân tạo thu được vận tốc đủ lớn có thể thoát khỏi cầu hấp dẫn của Trái Đất. Trên quỹ đạo parabol, vận tốc của vệ tinh được tính theo công thức (2.18):

$$v_p = \sqrt{\frac{2K}{r}} = \sqrt{\frac{2GM}{R+h}} \qquad (2.24)$$

Trên bề mặt Trái Đất, h = 0:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2}\, v_I = 11{,}19 \text{ km/s}. \qquad (2.25)$$

Vận tốc này gọi là vận tốc thoát, là vận tốc tối thiểu mà vệ tinh nhân tạo cần có để thoát ra khỏi trường hấp dẫn của Trái Đất.



Hình II.5

Ngày nay, khoa học và kĩ thuật hiện đại đã mở ra một kỉ nguyên mới trong việc thám hiểm Vũ trụ.

Tàu thám hiểm vũ trụ Voyager 2 của Mĩ được phóng vào năm 1977, tới Mộc Tinh (1979) ; Thổ Tinh (1981); Thiên Vương Tinh (1986) và Hải Vương Tinh (1989). Đây là một trong những thành tựu vĩ đại của ngành khoa học vũ trụ.

CHUYỂN ĐỘNG NHIỄU LOẠN

Chuyển động nhiễu loạn của hành tinh

Các hành tinh chịu sự hấp dẫn của Mặt Trời chuyển động theo quỹ đạo Kepler. Chuyển động đó gọi là chuyển động không nhiễu loạn. Trong thực tế, các hành tinh, ngoài lực tác dụng của Mặt Trời còn chịu tác dụng hấp dẫn của các hành tinh khác trong Hệ Mặt Trời và quỹ đạo của chúng sai lệch so với quỹ đạo Kepler. Chuyển động đó gọi là chuyển động nhiễu loạn. Ảnh hưởng của các hành tinh khác là nhỏ, nhưng việc tính toán rất phức tạp.

If, at the orbit entry point, the velocity is not the circular velocity v_c, then the orbit will be an ellipse, with a varying velocity, and Earth's center as one focus. The velocity is largest at the perigee and smallest at the apogee. If, at the orbit entry point, the tangential velocity is sufficiently smaller than v_c, perigee may be lower than the Earth's surface and the satellite will hit Earth, or perigee may occur within the Earth's atmosphere, causing a drag on the satellite so that the satellite will eventually fall back to the Earth's surface.

Escape velocity. Motion in Parabolic Orbit.

Celestial bodies (planets, satellites, stars) have their own gravitational fields which are defined by their sphere of influence and their effective radius.

The effective radius of the Earth's sphere of influence in the system Earth-Sun is 930 thousand km and that of the Moon in the Moon-Earth system is 66 thousand km, respectively. When a spacecraft enters the Moon's sphere of influence the dominant force is lunar gravity and the Earth's gravitational attraction can be treated as perturbation.

Artificial satellites which have achieved a velocity high enough can escape the Earth's sphere of influence. In a parabolic orbit, the satellite's velocity is calculated using the equation (2.18):

$$v_p = \sqrt{\frac{2K}{r}} = \sqrt{\frac{2GM}{R+h}} \qquad (2.24)$$

On the Earth's surface h = 0:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2}\, v_I = 11.19 \text{ km/s}. \qquad (2.25)$$

This velocity is called the escape velocity, the minimum that artificial satellites must attain in order to leave the Earth's gravitational field.

Today, the use of modern technologies and science has opened a new era in space exploration. The US interplanetary mission Voyager 2 launched in 1977 has visited Jupiter (1979), Saturn (1981), Uranus (1986) and Neptune (1989). This is one of the greatest achievements in space science.

Figure II.5

PERTURBED MOTIONS.

Perturbed Motion of Planets.

The planets move in Kepler's orbits under the gravitational attraction of the Sun. This kind of motion is called non-perturbed motion. In reality, besides the attraction of the Sun, the motions of the planets are also influenced by the attraction of other planets in the Solar system as well. Thus, their orbits differ from Kepler's orbits. These motions are called perturbed motions. The influence of other planets might be small but the treatment is very complicated.

Nghiên cứu chuyển động nhiễu loạn trong Hệ Mặt Trời dẫn tới việc nghiên cứu bài toán n vật thể.

Gọi khối lượng của Mặt Trời và các hành tinh theo thứ tự m_0, m_1, m_2,... Lực hấp dẫn tương hỗ giữa hai thiên thể thứ i và thứ j là:

$$F_{ij} = G\frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} \tag{2.26}$$

Trong hệ toạ độ tuyệt đối, thành phần gia tốc của vật thể thứ i là:

$$x_i'' = G\sum_{j=0}^{n}{}' m_j \frac{X_j - X_i}{r_{ij}^3} \tag{2.27}$$

Trong đó j nhận các giá trị từ 0 đến n, trừ j = i

Đối với vật thể m_0 , ta có:

$$x_0'' = G\sum_{j=1}^{n} m_j \frac{X_j - X_0}{r_{j0}^3} \tag{2.28}$$

Trong hệ toạ độ tương đối, gốc tại Mặt Trời M_0, thì hình chiếu của vật thể m_i trên trục M_0x là:

$$x_i'' = -G(m_0 + m_i)\frac{x_i}{r_{oi}^3} + G\sum_{j=1}^{n}{}' m_j\left(\frac{x_j - x_i}{r_{ij}^3} - \frac{x_j}{r_{oj}^3}\right) \tag{2.29}$$

hay:

$$x_i'' = -K\frac{x_i}{r_{oi}^3} + G\sum_{j=1}^{n}{}' m_j\left(\frac{x_j - x_i}{r_{ij}^3} - \frac{x_j}{r_{oj}^3}\right) \tag{2.30}$$

Dưới dạng véc tơ, ta có:

$$\vec{r}_i'' = -K\frac{\vec{r}_i}{r_{oi}^3} + G\sum_{j=1}^{n}{}' m_j\left(\frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_{oj}^3}\right) \tag{2.31}$$

Phương trình (2.31) mô tả chuyển động của vật thể thứ i dưới tác dụng của các vật thể khác trong Hệ Mặt Trời.

Số hạng thứ nhất trong (2.31) là gia tốc hấp dẫn gây ra bởi Mặt Trời. Số hạng thứ hai được gọi là gia tốc nhiễu loạn gây nên bởi các hành tinh khác lên hành tinh thứ i và lên Mặt Trời.

Gia tốc nhiễu loạn phụ thuộc vào khoảng cách giữa các vật thể. Khoảng cách đó luôn thay đổi theo thời gian, bởi vậy làm cho bài toán nhiễu loạn rất phức tạp.

Việc giải bài toán n vật dẫn tới việc phát hiện các hành tinh mới bằng việc tính toán theo lí thuyết. Cho đến giữa thế kỉ XVIII, người ta mới biết được 6 hành tinh trong Hệ Mặt Trời. Thiên Vương Tinh là hành tinh thứ 7 được Herschel phát hiện vào năm 1781. Nghiên cứu quỹ đạo của

The problem of the perturbed motion in the solar system is reduced to the study of the N-body problem.

Let the masses of the Sun and other planets be m_0, m_1, m_2, ...The gravitational attraction force between the bodies i and j is:

$$F_{ij} = G\frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} \tag{2.26}$$

In the main reference frame, the components of the acceleration of the object i is:

$$x_i'' = G\sum_{j=0}^{n}{}' m_j \frac{X_j - X_i}{r_{ij}^3} \tag{2.27}$$

where j takes the value from 0 to n except j = i. For the body m_0, we have:

$$x_0'' = G\sum_{j=1}^{n} m_j \frac{X_j - X_0}{r_{j0}^3} \tag{2.28}$$

In the reference frame having origin at M_0, the projection of the acceleration of the body m_i on the axis M_0x is:

$$x_i'' = -G(m_0 + m_i)\frac{x_i}{r_{0i}^3} + G\sum_{j=1}^{n}{}' m_j\left(\frac{x_j - x_i}{r_{ij}^3} - \frac{x_j}{r_{0j}^3}\right) \tag{2.29}$$

or:

$$x_i'' = -K\frac{x_i}{r_{0i}^3} + G\sum_{j=1}^{n}{}' m_j\left(\frac{x_j - x_i}{r_{ij}^3} - \frac{x_j}{r_{0j}^3}\right) \tag{2.30}$$

In vector form:

$$\vec{r}_i'' = -K\frac{\vec{r}_i}{r_{0i}^3} + G\sum_{j=1}^{n}{}' m_j\left(\frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3} - \frac{\vec{r}_j}{r_{0j}^3}\right) \tag{2.31}$$

The equation (2.31) describes the motion of the body i under the influence of other bodies in the system.

The first term in (2.31) represents the gravitational acceleration caused by the Sun. The second term is called the perturbed acceleration caused by other planets on body i and on the Sun.

The perturbed acceleration depends on the distance between objects. These distances change with time and, hence, make the perturbation problem very complicated.

Solving the N-body problem led to the discovery of new planets through theoretical calculations. Until the middle of the 18^{th} century, only 6 planets were known. Uranus is the seventh planet, discovered by astronomer Herschel in 1781. Studying the orbit of

Thiên Vương Tinh, người ta cho rằng phải có một hành tinh khác gây nhiễu loạn lên chuyển động của nó. Ứng dụng bài toán nhiều vật, Le Verrier đã xác định được vị trí của hành tinh gây nhiễu loạn đó. Hành tinh thứ 8 đó là Hải Vương Tinh. Đêm 23/9/1846 Gale đã quan sát được Hải Vương Tinh, gần vị trí mà Le Verrier đã tính toán bằng lí thuyết.

Chuyển động nhiễu loạn của các vật thể nhân tạo

Khi khoa học vũ trụ hiện đại chưa ra đời, Cơ học thiên thể nghiên cứu chuyển động của các thiên thể như các sao, các hành tinh, sao chổi, các vệ tinh... Chúng là những vật thể tự nhiên, con người có thể quan sát sự chuyển động của chúng nhưng chuyển động của chúng không chịu tác động nào từ phía con người. Trong nửa sau của thế kỉ XX, trên bầu trời đã xuất hiện các thiên thể nhân tạo, như vệ tinh nhân tạo, tàu vũ trụ, trạm không gian giữa các hành tinh... Lực tác dụng lên các thiên thể nhân tạo gồm có lực hấp dẫn của các hành tinh và lực do con người tạo ra.

Nhiều vật thể nhân tạo chuyển động trong trường hấp dẫn của Trái Đất ở một độ cao không lớn, nên Trái Đất không thể xem là chất điểm được mà chúng ta phải tính đến đặc trưng không hình cầu của trường hấp dẫn của Trái Đất.

Thế hấp dẫn của Trái Đất được biểu diễn bằng công thức:

$$U = \frac{GM}{r}\left\{1-\sum_{n=2}^{\infty} J_n\left(\frac{r_0}{r}\right)^n P_n(\sin\varphi)+\sum_{n=2}^{\infty}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{r_0}{r}\right)^n P_n^{(k)}(\sin\varphi)\left[C_{nk}\cos k\lambda+S_{nk}\sin k\lambda\right]\right\} \qquad (2.32)$$

Ở đây: G là hằng số hấp dẫn, M và r_0 là khối lượng và bán kính xích đạo của Trái Đất. J_n , C_{nk} , S_{nk} là những hệ số không thứ nguyên phụ thuộc hình dạng và sự phân bố vật chất bên trong của Trái Đất, P_n và $P_n^{(k)}$ là đa thức Legendre và hàm phù hợp Legendre. r, φ, λ lần lượt là bán kính véc tơ, độ vĩ và độ kinh của một điểm trong trường hấp dẫn Trái Đất.

Công thức (2.32) được Uỷ ban N°7 Hội thiên văn Quốc tế thừa nhận là công thức chuẩn mô tả thế hấp dẫn của Trái Đất.

Ta có thể viết (2.32) dưới dạng :

$$U = \frac{GM}{r} + U_1 \qquad (2.33)$$

Trong đó U_1 là tổng tất cả các số hạng đặc trưng cho thế hấp dẫn không hình cầu của Trái Đất.

Phương trình chuyển động trở thành:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{\partial U}{\partial \vec{r}} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} + \frac{\partial U_1}{\partial \vec{r}} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} + \vec{F}_1 \qquad (2.34)$$

Số hạng thứ nhất ở vế phải của (2.34) đặc trưng cho lực hấp dẫn của Trái Đất hình cầu. Số hạng thứ hai đặc trưng cho nhiễu loạn của Trái Đất gây nên bởi cấu trúc không hình cầu của nó.

Nếu tính đến ảnh hưởng của Mặt Trời, Mặt Trăng, sức cản khí quyển Trái Đất, áp suất của bức xạ... thì phương trình chuyển động trở thành:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} + \vec{F}_1 + \vec{F}_T + \vec{F}_t + \vec{F}_c + \vec{F}_s ... \qquad (2.35)$$

Uranus, astronomers came to the conclusion that the perturbations of Uranus' motion were caused by the presence of another planet. Applying the N-body theory to this case, Le Verrier succeeded in calculating the position of the hypothetical planet. The 18^{th} planet is Neptune and Gale was able for the first time to observe it in the night of 23 September 1846 near the position calculated by Le Verrier.

Perturbed Motion of Artificial Bodies.

Before the advent of modern space science, celestial mechanics concerned the motion of celestial objects such as stars, planets, comets and satellites. They are planetary natural objects and we can observe their movements but can not have any influence on them. In the second half of the 20^{th} century, we saw the appearance of artificial objects in the sky such as artificial satellites, spacecraft or interplanetary spacecraft. The forces acting on these objects include the gravitational attraction of planets and man-made forces.

Many Earth-orbiting objects move in the gravitational field of the Earth at low altitude. Thus, the Earth can no longer be viewed as a point mass but one must take into account the non-spherical properties of the Earth's gravity.

The gravitational potential is expressed by the following formula:

$$U = \frac{GM}{r}\left\{1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{r_o}{r}\right)^n P_n(\sin\varphi) + \sum_{n=2}^{\infty}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{r_o}{r}\right)^n P_n^{(k)}(\sin\varphi)\left[C_{nk}\cos k\lambda + S_{nk}\sin k\lambda\right]\right\} \qquad (2.32)$$

where G is the gravitational constant, and M and r_o are the Earth's mass and radius, respectively. J_n, C_{nk}, S_{nk} are dimensionless coefficients which depend on the size and the distribution of matter inside the Earth. P_n are Legendre polynomials. r, φ, λ are vector radius, latitude and longitude respectively of the point in the Earth's gravity.

Equation (2.32) was recognized by the Commission 7 of the IAU as the standard description of the gravitational potential of the Earth. The above equation can be recast into the form:

$$U = \frac{GM}{r} + U_1 \qquad (2.33)$$

where U_1 is the sum of all terms characterizing the non-spherical potential of the Earth.
The equation of motion becomes:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{\partial U}{\partial \vec{r}} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} + \frac{\partial U_1}{\partial \vec{r}} = \frac{GM}{r^3}\vec{r} + \vec{F}_1 \qquad (2.34)$$

The first term on the right hand side of (2.34) represents the gravitational force of spherical Earth. The second term represents the perturbation caused by the Earth's non-spherical shape. If the influence of the Sun, the Moon, the atmospheric drag, radiation pressure are taken into account the equation of motion then becomes:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r} + \vec{F}_1 + \vec{F}_T + \vec{F}_t + \vec{F}_C + \vec{F}_S \ldots \qquad (2.35)$$

trong đó, $\vec{F}_T$ đặc trưng cho tác dụng hấp dẫn của Mặt Trời, $\vec{F}_l$ đặc trưng cho tác dụng hấp dẫn của Mặt Trăng, $\vec{F}_C$ đặc trưng cho tác dụng của sức cản không khí, $\vec{F}_S$ đặc trưng cho tác dụng của áp suất bức xạ. Tất cả các nhiễu loạn trên đều ảnh hưởng đến thời gian tồn tại của vệ tinh. Do ảnh hưởng của Mặt Trăng mà thời gian sống của vệ tinh nhân tạo Explorer-6 của Mỹ đã giảm từ 20 năm xuống còn 2 năm và trong vòng 3 tháng độ cao của nó đã giảm từ 250 km xuống 160 km.

Mật độ khí ở độ cao 240 km nhỏ hơn mật độ khí trên mực nước biển là 10^{10} lần. Khi vệ tinh đi vào khí quyển Trái Đất, độ cao của nó giảm dần. Do đó vận tốc của nó tăng lên và sức cản của khí quyển cũng trở nên mạnh hơn. Chúng ta chưa thể mô tả một cách chính xác các biến động của khí quyển Trái Đất vì nó luôn thay đổi. Mật độ khí ở lớp trên của khí quyển phụ thuộc vào sự hoạt động của Mặt Trời. Ở độ cao 1000 m, mật độ khí quyển ban ngày lớn hơn ban đêm khoảng 60 lần. Ở độ cao 200 m, mật độ khí quyển ban ngày lớn hơn ban đêm chỉ 2 lần. Tuy nhiên, những hiểu biết của chúng ta hiện nay cũng đủ cho phép chúng ta dự báo được thời gian sống của vệ tinh.

Khi vệ tinh chuyển động vào chuỳ bóng tối của Trái Đất thì tác dụng của áp suất ánh sáng mặt trời hầu như bằng không. Nhưng khi nó đi vào vùng có Mặt Trời chiếu sáng thì phải tính đến tác dụng của áp suất ánh sáng.

Ngoài ra, chúng ta còn phải tính đến các nhiễu loạn nhỏ khác như tác dụng của từ trường Trái Đất, áp suất ánh sáng do ánh sáng mặt trời bị phản xạ ...

Tuy nhiên, đối với các vệ tinh có độ cao bé, ảnh hưởng do sự không hình cầu của trường hấp dẫn Trái Đất là nhiễu loạn chính.

where F_T is the Sun's gravity, F_t is the Moon's gravity, F_c is the atmospheric friction, Fs is the radiation pressure. All these perturbations contribute to the change of the satellite lifetime. Due to the influence of the Moon, the lifetime of the American satellite Explorer-6 was reduced from 20 years to just 2 years and in a period of 3 months its altitude decreased from 250 km to 160 km.

Gas density at an altitude of 240 km is 10^{10} times smaller than that at the sea level. When the satellite enters the atmosphere, its altitude decreases gradually. As a result its velocity increases and atmospheric drag also becomes stronger. At present, precise predictions of the atmospheric variation are still difficult since the atmosphere changes continuously. Gas density of the upper layer of the atmosphere depends on the solar activitiy. At altitude of 1000 km, daytime atmospheric density is 60 times higher than the density during nighttime. At 200 km altitude, daytime atmospheric density is only 2 times higher than the density during nighttime. Nevertheless, our current understanding allows us to predict with accuracy the lifetime of a satellite.

When a satellite crosses the Earth's shadow, the radiation pressure becomes practically zero. But on the day side of the Earth, radiation pressure must be taken into account. Besides. other smaller perturbations due to the Earth's magnetic field, the radiation pressure by reflected sunlight must be considered.

However, for low altitude satellites the Earth's non-spherical shape is the dominant perturbation.

CÂU HỎI

1. Biết khoảng cách và vận tốc của vệ tinh tại cận điểm quỹ đạo là r_c và v_c. Tính khoảng cách và vận tốc của nó tại viễn điểm quỹ đạo: r_v và v_v.

2. Mặt Trăng chuyển động xung quanh khối tâm chung của hệ Trái Đất - Mặt Trăng. Xác định vị trí khối tâm chung đó. Cho biết: Trái Đất có khối lượng lớn gấp 81 lần khối lượng của Mặt Trăng và khoảng cách Trái Đất - Mặt Trăng là 382420 km.

3. Xác định khối lượng của Mặt Trời, cho biết: khoảng cách Trái Đất - Mặt Trời là 150 triệu km, chu kì quay của Trái Đất quanh Mặt Trời là $3,16.10^7$ s.

4. Độ cao lớn nhất và bé nhất của một vệ tinh tương ứng là 948 km và 228 km. Hãy tính tâm sai quỹ đạo vệ tinh (xem Trái Đất có dạng hình cầu).

5. Tính phần bổ sung vận tốc tối thiểu để một vệ tinh đang ở trên quỹ đạo cách bề mặt Trái Đất 230 km đi tới cận điểm quỹ đạo Mặt Trăng? Bỏ qua lực hấp dẫn của Mặt Trăng. Cho biết bán trục lớn quỹ đạo Mặt Trăng là 384 000 km và tâm sai quỹ đạo Mặt Trăng e = 1/18.

6. Tính bán kính địa tâm và vận tốc của một vệ tinh địa tĩnh.

7. Tính thời gian tối thiểu để một tàu vũ trụ bay từ Trái Đất đến Hỏa Tinh, ở trên quỹ đạo xung quanh Hoả Tinh một thời gian rồi trở về Trái Đất. Giả thiết quỹ đạo của Trái Đất và của Hoả Tinh xung quanh Mặt Trời là tròn và quỹ đạo của tàu vũ trụ tiếp xúc với quỹ đạo của cả hai hành tinh. Bán kính quỹ đạo của Trái Đất và của Hoả Tinh tương ứng là 1 và 1,6 đơn vị thiên văn.

QUESTIONS.

Question 1: Calculate distance r_a and velocity v_a of a satellite at apogee knowing its distance and velocity at the perigee r_p and v_p.

Question 2: The Moon revolves around the center of mass of the system Earth-Moon. Determine the position of the center of mass knowing that the Earth's mass is 81 times larger than the Moon's and the distance Earth Moon is 382.420 km.

Question 3: Calculate the mass of the Sun knowing the distance Earth-Sun is 150 million km and the Earth's period around the Sun is 3.16×10^7 s.

Question 4: The measured maximum and minimum altitudes of a satellite are 948 km and 228 km respectively. Calculate the eccentricity of the orbit (the Earth is supposed spherical).

Question 5: Calculate the minimum velocity increment necessary for a satellite in an orbit 230 km above the Earth's surface to reach the perigee of the Moon's orbit (neglect the Moon's gravity). Given: the semi-major axis of the Moon's orbit is 384.000 km and its eccentricity is 1/18.

Question 6: Calculate the geocentric radius and velocity of a geostationary satellite.

Question 7:

Calculate the minimum time for a spacecraft to go from the Earth to Mars, remain in orbit around Mars and return to Earth. Suppose that the orbits of Earth and Mars around the Sun are circular and the spacecraft's orbit is cotangential to the orbits of both planets. The orbital radii of the Earth and Mars are 1 and 1.6 astronomical units, respectively.

Chương III

TRÁI ĐẤT VÀ CHUYỂN ĐỘNG CỦA NÓ

HÌNH DẠNG, KÍCH THƯỚC VÀ CẤU TRÚC CỦA TRÁI ĐẤT

Trái Đất, một hành tinh trong Hệ Mặt Trời

Quỹ đạo của Trái Đất nằm ngoài quỹ đạo của Thuỷ Tinh và Kim Tinh. Về nguyên tắc, các vật thể có khối lượng lớn tự quay quanh mình chúng có dạng gần với hình cầu. Các thiên thể như Mặt Trời, Mặt Trăng, các hành tinh đều có dạng gần với hình cầu. Ảnh chụp từ các vệ tinh cho thấy rằng Trái Đất có dạng gần với hình cầu.

Hình III .1

Các hệ toạ độ địa lí

Trái Đất quay quanh một trục xuyên qua khối tâm. Trục tưởng tượng này cắt mặt đất tại hai điểm là địa cực bắc C_B và địa cực nam C_N. Mặt phẳng vuông góc với trục quay đi qua khối tâm Trái Đất, cắt mặt đất theo một đường tròn gọi là xích đạo, các vòng tròn nhỏ song song với xích đạo được gọi là vĩ tuyến. Các vòng tròn lớn đi qua hai cực được gọi là kinh tuyến.

Nửa vòng kinh tuyến đi qua Đài quan sát thiên văn Hoàng gia ở Greenwich, Anh ($C_BGG'C_N$) được quy ước là kinh tuyến gốc, hay kinh tuyến số không.

Hình III.2

Mỗi điểm trên mặt đất được xác định bởi hai toạ độ, độ vĩ φ và độ kinh λ. Độ vĩ được tính từ xích đạo đến hai cực, có giá trị từ 0 đến $\pm 90^o$. Dấu (+) ứng với bắc bán cầu, dấu (–) ứng với nam bán cầu. Độ kinh được tính từ kinh tuyến gốc theo chiều tự quay của Trái Đất, có giá trị từ 0 đến 360^o. Đôi khi, người ta quy ước độ kinh có giá trị từ 0 đến $\pm 180^o$, dấu (+) ứng với các nơi ở phía đông kinh tuyến gốc, dấu (–) ứng với phía tây.

Từ năm 1615, người ta đã sử dụng phương pháp tam giác đạc để đo độ dài cung 1^o của kinh tuyến. Gần đây, các phép đo chính xác cho thấy độ dài cung 1^o ở xích đạo là 110,6 km, ở địa cực là 111,7 km. Điều này chứng tỏ Trái Đất hơi dẹt ở hai cực, nghĩa là có dạng hình phỏng cầu. Dựa trên kết quả đo đạc này, năm 1964 Hội Thiên văn Quốc tế đã ghi nhận các giá trị sau đây của Trái Đất:

Bán kính ở xích đạo là a = 6378,16 km, bán kính ở địa cực là b = 6346,78 km.

Độ dẹt $\varepsilon = a - b/a = 1/298,25$

Chapter III
THE EARTH AND ITS MOTION

THE SHAPE, SIZE AND STRUCTURE OF THE EARTH.

The Earth, a planet in the solar system.

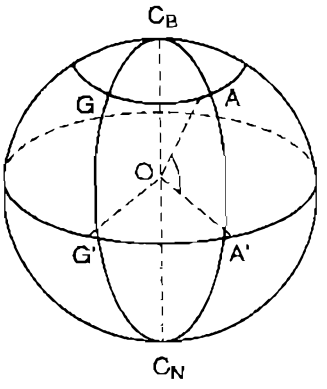
The Earth's orbit lies outside the orbit of Mercury and Venus. In principle, massive rotating objects must have nearly spherical shape. Celestial objects like the Sun, the Moon, the planets are nearly spherical. Photographs taken from satellites show that the Earth has nearly spherical shape.

(Fig.III.1)

Geographic coordinates.

The Earth rotates around an axis going through its center. This axis intersects the Earth's surface at two points, the north pole and the south pole. The intersection of the plane perpendicular to the Earth's axis and through the Earth's center is called the equator. Other circles parallel to the equator define the latitude. Great circles passing through the north and the south poles are called meridians. Longitude zero refers to the meridian passing through the Royal Observatory at Greenwich, England.

Positions on Earth are determined by two coordinates: longitude λ and latitude φ. The latitude is measured in degrees from the equator to the pole (0 to $\pm$ 90). Positive values correspond to positions on the northern hemisphere and negative values correspond to positions on the southern hemisphere. The longitude is measured eastward (in the direction of the Earth's rotation) from 0 to 360 degrees. In some cases, longitudes are measured east or west from 0 to $\pm$ 180 degrees with respect to zero longitude of Greenwich.



(Fig.III.2)

Since 1615, the triangulation method was used to measure the length of 1^0 latitude. Recently, accurate measurements showed that the length of 1^0 latitude at the equator is 110.6 km while at the pole it is 111,7 km. Hence, the Earth is slightly flattened at the poles. In other words, the Earth is an oblate spheroid. Based on these measurements, in 1964 the IAU defined the following parameters of the Earth:

Radius at equator a = 6378,16 km, Radius at the poles b = 6346,78 km,

Ellipticity $\varepsilon = (a - b)/a = 1/298,25$

4- TVVÄTLI

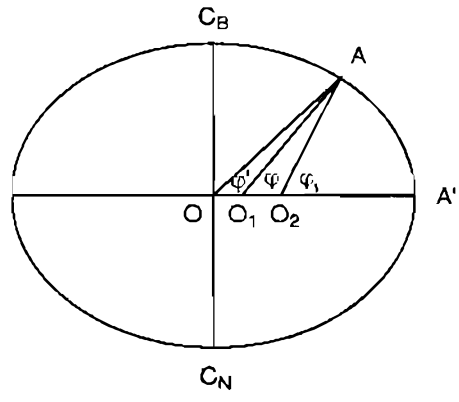
Do hình dạng không phải hình cầu của Trái Đất, nên có một số định nghĩa về độ vĩ:

- Độ vĩ thiên văn φ là góc giữa mặt phẳng xích đạo và đường dây dọi: $\varphi = \angle AO_1A'$

- Độ vĩ địa tâm φ' là góc giữa mặt phẳng xích đạo và bán kính véc tơ của điểm quan sát : $\varphi' = \angle AOA'$

- Độ vĩ trắc địa φ_1 là góc giữa mặt phẳng xích đạo với pháp tuyến của mặt phỏng cầu tại điểm khảo sát $\varphi_1 = \angle AO_2A'$.

Bằng quan trắc thiên văn, người ta xác định được độ vĩ thiên văn, bằng phương pháp trắc địa người ta xác định được độ vĩ trắc địa còn độ vĩ địa tâm được tính theo các công thức hình giải tích.



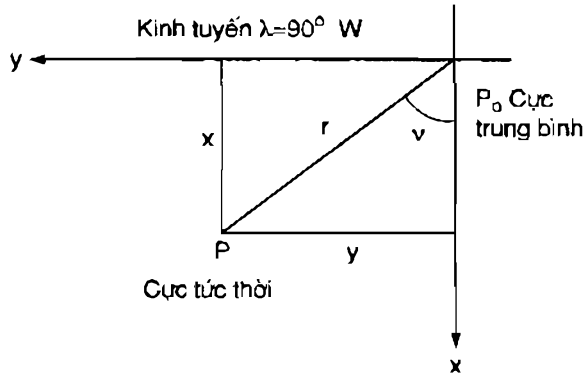
Hình III.3

Từ cuối thế kỉ XIX, các phép đo độ vĩ chính xác cho thấy độ vĩ một nơi thay đổi có tính tuần hoàn với biên độ khoảng 0",3. Một số trạm quan sát đã được thiết lập trên cùng một vĩ tuyến +39°08' để theo dõi độ vĩ một cách chính xác.

Hàng tháng, Cơ quan quốc tế nghiên cứu sự quay của Trái Đất (IERS) dựa vào số liệu quan trắc của các đài thiên văn trên tất cả các châu lục để xác định và công bố tọa độ trung bình của các cực của Trái Đất. Tọa độ địa lí trung bình φ_0, λ_0 và tọa độ tức thời là φ, λ có mối liên hệ :

$$\varphi_0 = \varphi - (x \cos\lambda_0 - y \sin\lambda_0)$$

$$\lambda_0 = \lambda + (x \sin\lambda_0 + y \cos\lambda_0) \operatorname{tg}\varphi_0$$



Hình III.4

Các đại lượng x,y (hình III. 4) được công bố trên thông báo của IERS.

Cấu trúc của Trái Đất

Sử dụng định luật vạn vật hấp dẫn, người ta xác định được khối lượng của Trái Đất là: $M = 5{,}98.10^{24} kg \approx 6.10^{24}$ kg

Biết bán kính của Trái Đất, chúng ta tính được mật độ trung bình của Trái Đất là:

$$D = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = 5520 \frac{kg}{m^3}$$

Hình III.5

Vì mật độ trung bình của lớp đất đá trên bề mặt Trái Đất vào khoảng 2800 kg/ m^3 nên nhân của Trái Đất phải có mật độ lớn. Việc quan sát sự truyền của sóng địa chấn tự nhiên và nhân tạo cho chúng ta những thông tin quan trọng về bản chất của cấu trúc bên trong của Trái Đất.

Due to the non-spherical shape of the Earth, there exist several definitions of latitude.

- Astronomical latitude is the angle between the equatorial plane and the direction of a plumb-line: $\varphi = \angle AO_1A'$.

- Geocentric latitude is the angle between the equatorial plane and the vector radius of the point considered: $\varphi' = \angle AOA'$.

- Geodesic latitude is the angle between the equatorial plane and the line normal to the spheroid at the point in question: φ_1 $\angle AO_2A'$.

(Fig.III.3)

From astronomical observations one can determine the astronomical latitude. Using geodesic methods one can measure the geodesic latitude and the geocentric latitude is then derived by calculations.

Since the end of the 19^{th} century, it was known from accurate measurements of latitude that the latitude of a place varies periodically with an amplitude of about 0.3". Several observing stations were established on the same latitude +39° 08' to accurately monitor the latitude.

(Fig.III.4)

The International Earth Rotation Service (IERS) publishes monthly the mean coordinates of the Earth's poles based on observations collected at observatories in all continents. The mean geographic coordinates φ_0 and λ_0 are related to the instantaneous coordinates as follows:

$$\varphi_0 = \varphi - (x \cos \lambda_0 - y \sin \lambda_0)$$

$$\lambda_0 = \lambda + (x \sin \lambda_0 + y \cos \lambda_0) \operatorname{tg} \varphi_0$$

where x and y (fig. III-4) are published in the bulletin of the IERS.

The structure of the Earth.

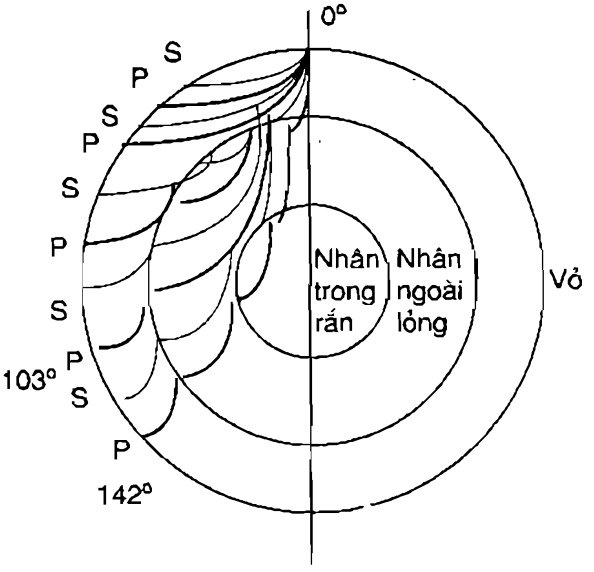
Using the universal law of gravitation, the mass of the Earth can be calculated:

$M = 5.98 \times 10^{24}$ kg ~ 6×10^{24} kg

Knowing the Earth's radius, one can derive the average density:

$D = M/4\pi R^3/3 = 5520$ kg/m^3

Since the mean density of the surface layer is only about 2800 kg/m^3, the Earth's core must have high density. Observations of the propagation of natural and artificial seismic waves provide important information on the nature of the Earth's interior structure.



(Fig.III.5)

Các chất lỏng chỉ truyền sóng dọc P và hấp thụ sóng ngang S. Nhưng cả sóng dọc P và sóng ngang S đều có thể truyền qua các vật liệu rắn như đá. Ngoài ra, sóng dọc P cũng bị phản xạ bởi nhân rắn của Trái Đất (hình III.5). Ngày nay, chúng ta biết rằng Trái Đất gồm một số lớp. Lớp vỏ, hay lớp trên cùng, dày 35 km có mật độ 3300 kg/m^3. Phía dưới lớp vỏ là lớp ma-tin, một lớp đá ở thể rắn dày, được tạo chủ yếu bởi si-li-cat [$(Mg,Fe)_2SiO_4$], có mật độ từ 3400 tới 5500 kg/m^3. Lớp này trải rộng tới độ sâu 2900 km ở phía dưới bề mặt Trái Đất. Nhân của Trái Đất được chia thành một nhân bề ngoài, ở thể lỏng, dày 2200 km, có mật độ khoảng từ 9000 kg/m^3 tới 12000 kg/m^3 và một nhân bên trong ở thể rắn, có bán kính 1300 km, có mật độ 13000 kg/m^3.

Nhiệt độ trong lòng đất tăng theo độ sâu. Ở độ sâu vài trăm kilômet nhiệt độ tăng nhanh, sau đó tăng chậm hơn. Ở nhân Trái Đất, nhiệt độ vào khoảng 3000 - 4000°C. Áp suất cũng tăng theo chiều sâu, theo phương trình cân bằng thủy tĩnh học, và người ta tin rằng áp suất ở trong nhân Trái Đất có thể tới 3,7. 10^6 atm. Lớp vỏ Trái Đất là đối tượng nghiên cứu của các nhà địa chất. Ba phần tư diện tích bề mặt Trái Đất được bao phủ bởi các biển và đại dương, là đối tượng nghiên cứu của ngành hải dương học. Quanh Trái Đất có bầu khí quyển là áo giáp bảo vệ sự sống trên Trái Đất khỏi bị tác hại của các tia vũ trụ và bức xạ cực tím của Mặt Trời, là đối tượng nghiên cứu của các ngành Vật lí Khí quyển, Khí tượng học...Tuy nhiên, khí quyển trái đất cũng cản trở đối với các quan sát thiên văn do sự hấp thụ và sự cuộn xoáy của nó.

SỰ QUAY CỦA TRÁI ĐẤT QUANH TRỤC CỦA NÓ. ĐỊNH NGHĨA THỜI GIAN

Chứng minh Trái Đất tự quay

Nicolas Copernicus là người đầu tiên giải thích hiện tượng nhật động dựa vào sự quay của Trái Đất quanh trục của nó. Về sau người ta đã làm thí nghiệm chứng minh cho sự quay này.

a- Con lắc Foucault

Năm 1851, nhà vật lí người Pháp Foucault đã tiến hành một thí nghiệm với con lắc nhằm phát hiện sự quay của Trái Đất. Thí nghiệm này dựa vào tính chất của con lắc có mặt phẳng dao động không đổi phương trong không gian. Foucault sử dụng một con lắc có chiều dài 67 m với quả nặng 28 kg và thấy rằng: mặt phẳng dao động của con lắc quay đối với mặt đất với vận tốc góc $\omega = 15^0 \sin\varphi$, φ là độ vĩ địa lí tại nơi làm thí nghiệm. Nếu làm thí nghiệm ở địa cực Bắc $\varphi = 90^0$, $\omega = 15^0/\text{h} = 360^0/24$ h, nghĩa là vận tốc quay của mặt phẳng dao động của con lắc Foucault đúng bằng vận tốc quay của Trái Đất. Ở xích đạo có độ vĩ $\varphi = 0^0$ thì $\omega = 0$.

b- Sự lệch về phía đông của các vật rơi tự do

Các vật càng ở cao trên mặt đất có vận tốc dài trong chuyển động quay quanh trục Trái Đất càng lớn. Do đó, khi nó rơi xuống một khoảng là h thì sẽ lệch về phía đông một đoạn x tính theo công thức :

$$x = \frac{2\pi h}{3P}\sqrt{\frac{2h}{g}}\cos\varphi$$

Trong đó P là chu kì quay của Trái Đất, g là gia tốc trọng trường, φ là độ vĩ địa lí.

Liquids only transmit P-waves and absorb S-waves. But both P-waves and S-waves can pass through solid materials like rocks. Furthermore, P-waves are also reflected by the solid core of the Earth (fig. III-5). We now know that the Earth consists of several layers. The crust or the uppermost layer of 35 km depth has a density of 3300 kg/m^3. Beneath the crust is the mantle, a thick region of solid rocks composed mainly of Silicate [$(Mg, Fe)_2SiO_4$] with a density between 3400 to 5500 kg/m^3. This region extends down to 2900 km below the Earth's surface. The core is subdivided into a liquid outer core of 2200 km thick with a density of about 9000 kg/m^3 to 12000 kg/m^3 and a solid inner core of 1300 km radius with a density of 13000 kg/m^3.

The temperature inside the Earth increases with depth. It increases rapidly at a depth of several hundreds km and then increases more slowly. At the center the temperature is thought to be about 3000 to 4000 C. Pressure also rises with depth, following the hydrostatic equilibrium equation and it's believed that the pressure at the center may attain 3.7 10^6 atm. The Earth's crust is the field of interest for geologists. Three quarters of the Earth's surface is covered by oceans and seas which constitute the field of study for oceanography. The Earth also has an atmosphere which provides a natural shield against cosmic rays and solar ultraviolet radiation, and constitutes the field of study for atmospheric physics, meteorology. However, the atmosphere also poses an obstacle to astronomical observations due to its absorption and turbulence.

THE ROTATION OF THE EARTH. DEFINITION OF TIME.

Proof of the rotation of the Earth.

Nicolas Copernicus was the first to explain the diurnal motion in terms of the Earth's rotation. Several experiments were subsequently carried out to demonstrate the rotation of the Earth.

The Foucault Pendulum

In 1851 the French physicist Foucault constructed an experiment to detect the effect of Earth's rotation on a pendulum. The experiment was based on the fact that the plane of oscillation of the pendulum remains fixed in space. Foucault used a pendulum 67m long, weighing 23 kg. He found that the plane of oscillation rotated with respect to the Earth with an angular velocity $\omega = 15^\circ \sin\varphi$. φ is the latitude of the place where the experiment was being conducted. If the experiment is carried out at the north pole, $\omega = 15^\circ/h = 360/24h$. That means the plane of oscillation of the pendulum appears to rotate at the same angular velocity as the Earth. At the equator, $\varphi = 0$, thus $\omega = 0$.

Eastward movement of falling bodies.

A body lying high above the Earth's surface will have higher tangential velocity. Hence, when it falls down to earth a distance h, the body also travels eastward a distance x:

$$x = \frac{2\pi h}{3P}\sqrt{\frac{2h}{g}}\cos\varphi$$

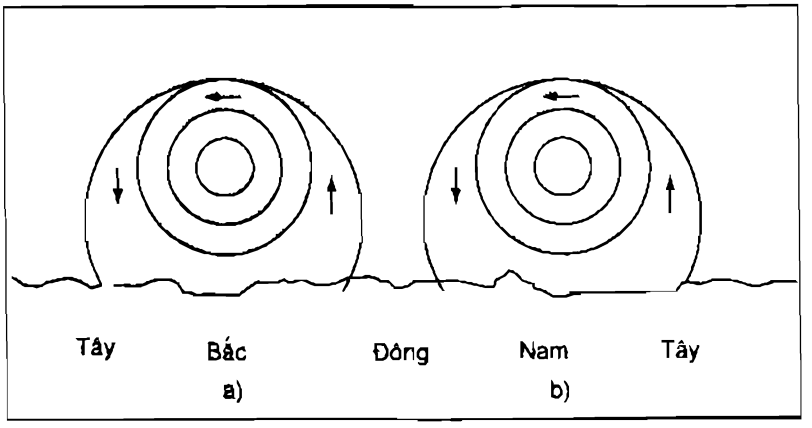
where P is the rotation period of the Earth, g is the gravitational acceleration, φ is the geographic latitude of the place being considered.

c. Hiệu ứng Coriolis

Vì Trái Đất quay quanh mình nó nên mọi vật thể chuyển động trên Trái Đất bị ảnh hưởng bởi lực Coriolis. Các tên lửa được phóng theo hướng Bắc - Nam bị lệch hướng bởi lực Coriolis.

Thiên cầu

Hàng ngày ta thấy Mặt Trời, Mặt Trăng, các sao mọc ở phía đông từ từ dịch chuyển trên bầu trời rồi lặn ở phía tây. Để xác định vị trí các thiên thể trên bầu trời người ta dùng một số hệ toạ độ. Thiên cầu là một mặt cầu tưởng tượng có tâm ở nơi ta quan sát, có bán kính vô cùng lớn. Ta có thể xem các thiên thể đều nằm trên mặt thiên cầu. Nhật động là hiện tượng các thiên thể dịch chuyển trên thiên cầu có chu kì là một ngày đêm, mỗi thiên thể tham gia nhật động vẽ nên một vòng tròn có tâm trên một trục được gọi là trục vũ trụ. Sở dĩ có nhật động của các thiên thể từ Đông sang Tây là do ta quan sát từ Trái Đất đang quay theo chiều từ Tây sang Đông. Trục vũ trụ cắt thiên cầu tại hai điểm tương ứng gọi là Thiên cực Bắc và Thiên cực Nam. Hiện nay, Thiên cực Bắc ở rất gần sao Bắc cực. Bằng mắt thường ta thấy sao Bắc cực dường như đứng yên, nhưng nếu quan sát nó trong một ống kính nhỏ thì ta sẽ thấy sao này có vòng nhật động rất bé (bán kính chưa đầy một độ góc). Những người ở bắc xích đạo, như ở Việt Nam thấy các sao ở gần Thiên cực Bắc không bao giờ lặn. Các sao ở gần Thiên cực Nam luôn luôn nằm ở dưới đường chân trời và bởi vậy không quan sát được.



Hình III.6

Để xác định phương hướng khi đi trên biển hay trên sa mạc người ta dùng sao Bắc cực. Có nhiều cách để xác định vị trí của sao Bắc cực trên bầu trời đêm. Để tìm sao Bắc cực ta có thể kéo dài đoạn thẳng nối từ sao β đến sao α chòm Đại hùng một đoạn gấp 5 lần đoạn ấy sẽ đến sao Bắc cực, đó chính là sao α chòm Tiểu hùng. Khi chòm Đại hùng ở dưới chân trời thì ta vẽ đường thẳng từ sao Υ của chòm Thiên hậu vuông góc với đoạn thẳng nối sao Υ với sao δ của chòm này, đường thẳng ấy sẽ gặp sao Bắc cực.

Hình III.7

Các hệ toạ độ

Để xác định vị trí của thiên thể trên thiên cầu ta cần hai toạ độ. Tuỳ theo việc chọn các điểm và các đường cơ bản trên thiên cầu ta có các hệ toạ độ khác nhau.

a. Hệ tọa độ chân trời

Mặt phẳng nằm ngang tại một nơi cắt thiên cầu theo một đường tròn lớn, được gọi là đường chân trời. Đường thẳng đứng cắt thiên cầu tại hai điểm, điểm trên đỉnh đầu là thiên đỉnh, điểm dưới là

The Coriolis effect.

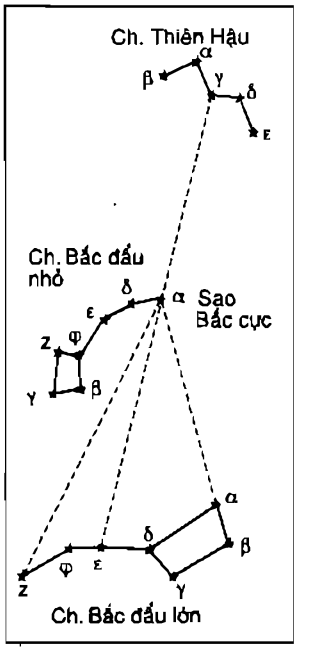
Since the Earth is in rotation, all moving bodies are influenced by the Coriolis force. Missiles launched in the north-south direction are deflected by the Coriolis force.

Celestial sphere.

Every day, we see the Sun, the Moon and stars rise in the east, move across the sky and set in the west. To determine the positions of celestial objects, several coordinates systems are used. The celestial sphere is defined as a sphere of large radius centered at the position of the observer. All celestial objects are considered to lie on this sphere. Due to the rotation of the Earth, celestial objects move on the sphere with a period of 24 hours around the Earth's rotation axis. This motion is called diurnal motion. The Earth rotates from west to east, therefore the stars observed from Earth move from east to west. The rotation axis intersects the sphere at two points, the north celestial pole and the south celestial pole, respectively. At present, the north celestial pole is very near the star Polaris. With naked eyes, Polaris seems to stay fixed, but observed through a small telescope, Polaris also shows small diurnal motion (a small circle of less than 1^{o} radius). For people north of the equator, such as in Vietnam, stars near the north celestial pole will never set and the stars near the south celestial pole are always below the horizon and therefore unobservable.

(Fig.III.6)

The star Polaris is usually used to find the direction by people on the sea or in a desert. There are many ways to locate the position of Polaris in the night sky. One can follow the line joining the star β to star α of the constellation Ursa Major a distance of about 5 times further than that between star β and star α. Polaris is the star α of the constellation Ursa Minor. When the constellation Ursa Major is below the horizon, one can find Polaris by drawing a line from star γ perpendicular to the line joining star γ and star δ of the constellation Cassiopea. This line points towards Polaris (fig. III-7).



(Fig.III.7)

Coordinate systems.

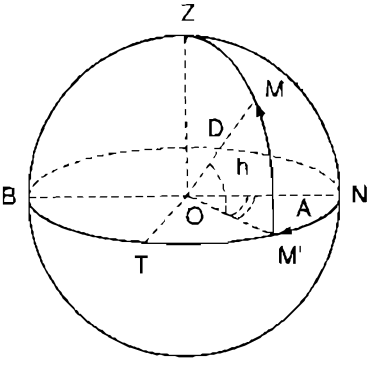
To find the position of a star on the celestial sphere we need two coordinates. Depending on the preferences, we have several coordinate systems.

Horizon system.

The horizontal plane intercepts the celestial sphere along a great circle, the horizon. The line perpendicular to the horizontal plane cuts the sphere at two points, zenith (above the observer) and nadir

thiên đế. Nửa vòng tròn lớn đi từ thiên cực Bắc qua thiên đỉnh đến thiên cực Nam gọi là kinh tuyến trên, nửa vòng còn lại đi qua thiên đế gọi là kinh tuyến dưới. Vòng kinh tuyến cắt đường chân trời tại điểm Bắc và điểm Nam. Vòng tròn lớn đi từ thiên đỉnh qua thiên thể đến đường chân trời, vuông góc với đường chân trời được gọi là vòng thẳng đứng. Hệ toạ độ chân trời gồm hai toạ độ: độ cao h và độ phương A. Độ cao h là khoảng cách góc từ thiên thể đến đường chân trời, có giá trị từ 0 đến 90^0. Nhiều khi người ta dùng khoảng cách đỉnh z thay cho độ cao h, khoảng cách đỉnh là khoảng cách góc từ thiên thể đến thiên đỉnh. Rõ ràng đối với một thiên thể thì tổng độ cao và khoảng cách đỉnh của nó bằng 90^0, $h + z = 90^0$.

Độ phương A của một thiên thể cho ta biết hướng quan sát thiên thể đó. Độ phương của một thiên thể là góc giữa vòng thẳng đứng đi qua điểm Nam và vòng thẳng đứng đi qua thiên thể ấy. Trên hình III - 8 độ phương A của thiên thể M là góc NOM' hay cung NM', độ phương có giá trị từ 0 đến 360^0 theo chiều Nam - Tây - Bắc - Đông. Vì các toạ độ chân trời phụ thuộc vào nơi quan sát và thời điểm quan sát nên hệ toạ độ chân trời không thuận tiện đối với việc quan sát thiên văn .



Hình III.8

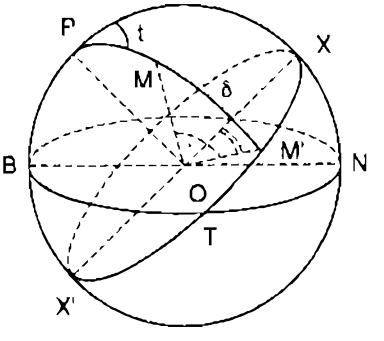
b. Hệ toạ độ xích đạo thứ nhất

Mặt phẳng thẳng góc với trục vũ trụ đi qua tâm thiên cầu cắt thiên cầu theo một đường tròn lớn gọi là xích đạo trời. Vòng tròn vẽ từ thiên cực Bắc P qua thiên thể M đến thiên cực Nam được gọi là vòng giờ.

Trong hệ toạ độ xích đạo thứ nhất có hai toạ độ là độ xích vĩ δ và góc giờ t. Độ xích vĩ δ là khoảng cách góc từ thiên thể đến xích đạo trên hình III.9 : δ = cung MM ' = góc MOM '.

Độ xích vĩ của các thiên thể có giá trị từ 0 đến $\pm 90^0$, dấu (+) tương ứng với các thiên thể ở nửa thiên cầu bắc, dấu (−) ở nửa thiên cầu nam.

Do nhật động, các thiên thể vẽ nên các vòng tròn song song với xích đạo trời. Bởi vậy, độ xích vĩ của các thiên thể không thay đổi theo thời gian. Góc giờ t của thiên thể là góc giữa kinh tuyến trên và vòng giờ đi qua thiên thể đó. Nó được tính từ kinh tuyến trên theo chiều nhật động và có giá trị từ 0 đến 360^0 hay từ 0h đến 24h. Rõ ràng do nhật động mà góc giờ t của mỗi thiên thể biến thiên một cách tuần hoàn (từ 0 đến 360^0 hay từ 0h đến 24h) với chu kì bằng chu kì nhật động, đồng thời nó còn phụ thuộc vào nơi quan sát. Hệ toạ độ này được sử dụng trong việc xác định giờ địa phương chính xác.



Hình III.9

c. Hệ toạ độ xích đạo thứ hai

Mặt Trời dịch chuyển trên thiên cầu trong một năm theo một đường tròn lớn gọi là hoàng đạo. Hoàng đạo cắt xích đạo trời tại hai điểm, điểm thứ nhất là điểm xuân phân được kí hiệu là γ, điểm thứ hai là điểm thu phân kí hiệu là Ω. Một ngày Mặt Trời dịch chuyển được gần 1^0 trên hoàng đạo theo chiều thuận (ngược chiều nhật động). Hai toạ độ trong hệ này là: Độ xích vĩ δ (cũng giống như trong hệ toạ độ xích đạo thứ nhất) và độ xích kinh α được tính từ điểm xuân phân theo chiều thuận.

(below the observer). The great circle passing through the north celestial pole, the south celestial pole, and the zenith is the local meridian. This great circle cuts the horizon at two points, the north point N and the south point S, respectively. The great circle passing through a star and the observer's zenith is called the vertical circle.

The horizon system is based on two coordinates: elevation h and azimuth A. Elevation h is the angle between the star and the horizon and is measured from 0 to $\pm 90^{o}$. Sometimes the zenith angle is also used instead of the elevation. For any star, the elevation angle and zenith angle must add up to $\pm 90^{o}$, $z + h = 90^{o}$.

(Fig.III.8)

The azimuth angle indicates the second direction of the star. Azimuth angle is measured from the south point to the vertical circle of the star. In fig. III-8 the azimuth angle is NOM' and measured clockwise. Since the horizontal coordinates depend on the location and the time of observations, the horizon system is not convenient to astronomical observations.

Equatorial system I.

The plane perpendicular to the rotation axis intersects the celestial sphere along a great circle, the equator. The great circle passing through the north celestial pole and the star is the hour circle.

There are two coordinates: declination δ and hour angle t. The declination is the angle between the star and the equator. In fig III.9 δ=MOM'. δ is expressed in degrees from 0 to $\pm 90^{o}$. Positive values correspond to positions on the northern hemisphere, negative values correspond to positions on the southern hemisphere.

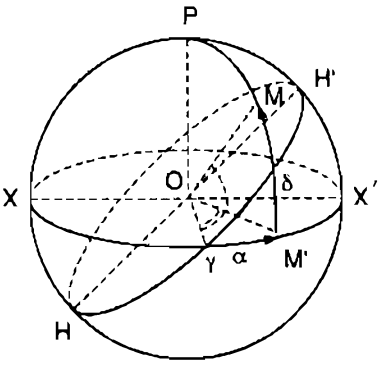
(Fig.III.9)

Due to diurnal motion, the stars move in circles on the celestial sphere parallel to the equator. Thus the declination will not change with time. Hour angle t is the angle between the meridian and the hour circle of the star and is measured counterclockwise from 0 to 360^{o} or from 0h to 24h. The hour angle changes with the rotation of the Earth and also depends on the location of the observer. This coordinate system is usually used to determine the exact local time.

Equatorial system II.

During the year, the Sun moves on the celestial sphere. Its path is a circle called ecliptic. The ecliptic intercepts the equator at two points: the vernal equinox γ and the autumnal equinox Ω. The Sun moves about 1 a day on the ecliptic in the opposite direction (eastward) to the diurnal motion. There are two coordinates in the equatorial system: the declination δ and the right ascension α measured eastward from the vernal equinox.

Điểm xuân phân cũng như các ngôi sao đều nhật động, nên độ xích kinh của chúng không thay đổi vì nhật động. Ngoài ra nó cũng không phụ thuộc vào nơi quan sát, nên các toạ độ δ và α được dùng để lập danh mục các sao, để thông báo toạ độ của các thiên thể như sao chổi, hành tinh.



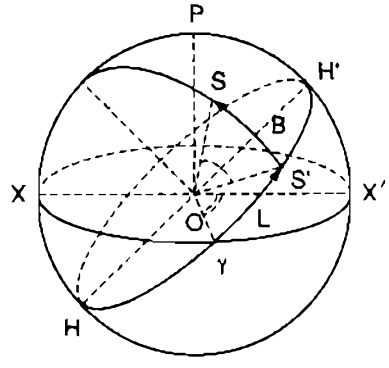
Hình III.10

d. Hệ toạ độ hoàng đạo

Đường thẳng vuông góc với mặt phẳng hoàng đạo cắt thiên cầu tại hai điểm là hoàng cực Bắc π và hoàng cực Nam π'. Hai toạ độ của hệ toạ độ hoàng đạo là hoàng kinh và hoàng vĩ. Hoàng kinh được đo từ điểm xuân phân (0 đến 360°). Hoàng vĩ là góc giữa thiên thể và mặt phẳng hoàng đạo và được đo theo độ, từ 0 đến ±90°. Hệ toạ độ hoàng đạo rất thuận tiện trong việc quan sát các hành tinh và cho việc lập kế hoạch xuyên hành tinh.

Sự định hướng của thiên cầu

Độ nghiêng trục quay của Trái Đất so với mặt phẳng chân trời phụ thuộc vào vị trí của người quan sát. Trên hình III.12, OP là trục quay của Trái Đất. Các trục vũ trụ ở A và B lần lượt là AP và BP. Các đường này song song với OP. Trên hình III.12, chúng ta thấy độ cao của thiên cực bắc bằng độ vĩ của A. Tương tự, $h_B = \varphi_B$. Bởi vậy, độ cao của thiên cực bắc cũng là độ vĩ nơi quan sát. Một trong số các phương pháp xác định độ vĩ là đo độ cao của thiên cực bắc. Trong trường hợp này, sao Bắc cực đóng vai trò vật chỉ hướng lí tưởng vì nó ở gần thiên cực bắc. Sau khi hiệu chỉnh độ cao quan sát được của thiên cực bắc, chúng ta thu được vĩ độ địa lí.

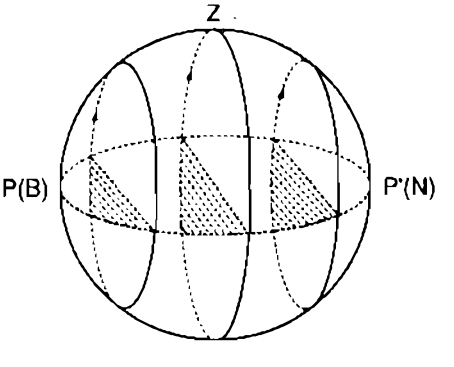


Hình III.11

Hình III. 12

Quan sát bầu trời ở những nơi có độ vĩ địa lí khác nhau

a. Ở xích đạo (φ = 0), độ cao của thiên cực bằng không, thiên cực bắc trùng với điểm Bắc. Trong trường hợp này vòng nhật động của các thiên thể thẳng góc với đường chân trời. Tất cả các thiên thể đều có mọc và lặn, chúng ta có thể quan sát được toàn bộ bầu trời sao.



Hình III. 13

b. Ở độ vĩ trung gian (0 < φ < 90°). Hình III.14 vẽ cho trường hợp người quan sát đứng ở nửa địa cầu Bắc, đặc điểm mọc và lặn của thiên thể còn phụ thuộc vào độ xích vĩ, các thiên thể có độ xích vĩ δ = 0 thì thời gian mọc bằng thời gian lặn. Thiên thể có độ xích vĩ thoả mãn hệ thức 0< δ < 90° − φ thì thời gian mọc lớn hơn thời gian lặn, các sao có độ xích vĩ thoả mãn δ > 90° − φ không bao giờ lặn. Ngược lại, các sao có độ xích vĩ thoả mãn −δ > 90° − φ không bao giờ mọc. Như vậy, đứng ở những nơi có độ vĩ trung gian ta không có khả năng quan sát được toàn bộ bầu trời sao, càng tiến về hai cực Trái Đất thì số sao thấy được càng ít.

(Fig.III.10)

Since the star and the vernal equinox have the same diurnal motion, the right ascension is independent of the rotation of the Earth and of the location of the observer. With this advantage the equatorial system is used in astronomy to establish star catalogues, to determine the position of comets, planets, etc.

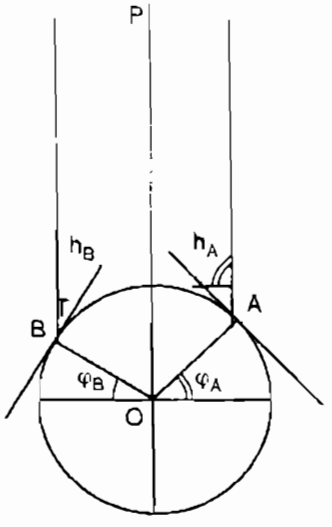
Ecliptic system

The line perpendicular to the ecliptic plane cuts the celestial sphere at two points: the north ecliptic pole π and the south ecliptic pole π'. Two coordinates of the ecliptic system are ecliptic longitude and ecliptic latitude. The ecliptic longitude is measured from the vernal equinox (0 to 360^{o}). The ecliptic latitude is the angle between the star and the ecliptic plane and measured in degrees from 0 to ± 90. The ecliptic coordinates are very useful in observing planets and in planning interplanetary missions.

(Fig.III.11)

Orientation of the celestial sphere.

The inclination of the Earth's rotation axis with respect to the horizontal plane depends on the position of the observer. In Fig III-12, OP is the Earth's rotation axis. The celestial axis at A and B is AP and BP, respectively. These lines are parallel to OP. It can be seen from the figure that the elevation of the North Pole is equal to the latitude of A. Similarly, $h_B = \varphi_B$. Therefore, the inclination angle of the North Pole is also the geographic latitude of the observer. One of the methods to determine the latitude is to measure the elevation of the North Pole. In this case the star Polaris serves as an ideal reference direction since Polaris is near the north pole. After making some corrections to the observed elevation of the north pole, one obtains the geographic latitude.



(Fig.III.12)

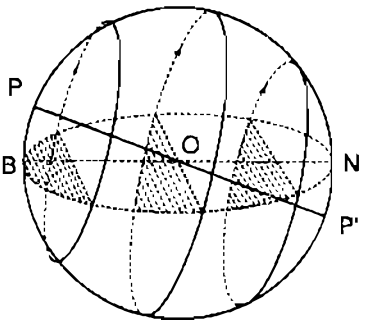
The sky seen from different latitudes.

a. At the equator ($\varphi = 0$), the elevations of the celestial poles are zero. The North Pole coincides with the north point. In this case, the diurnal circles intercept the horizon at right angle. All stars rise and set with respect to the observer. Hence, all stars are observable.

(Fig.III.13)

b. At intermediate latitudes, Fig III-14 is the sky as seen by an observer on the Northern Hemisphere. The rising and setting of a star depend on its declination. Stars with $\delta=0$ will be above and below the horizon for equal time. Stars with $0<\delta<90-\varphi$ are up more than half of the time. Stars with $\delta > 90-\varphi$ will never set. Conversely, stars whose latitude $-\delta > 90-\varphi$ will never rise. Therefore, from a place of intermediate latitude only part of the sky is observable. The closer to the pole, the smaller the number of observable stars.

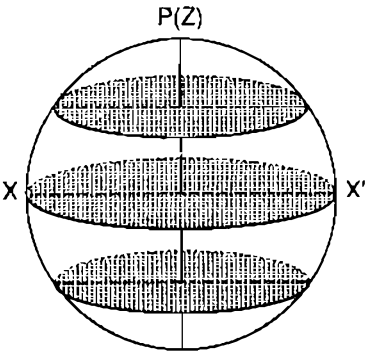
c. Ở địa cực ($\varphi = 90^{o}$). Ở địa cực Bắc, người quan sát chỉ quan sát được một nửa bầu trời. Các vòng nhật động song song với mặt phẳng chân trời. Các sao có xích vĩ bé hơn O không bao giờ mọc. Tương tự, ở địa cực Nam, người quan sát chỉ quan sát được các sao ở nửa thiên cầu nam.



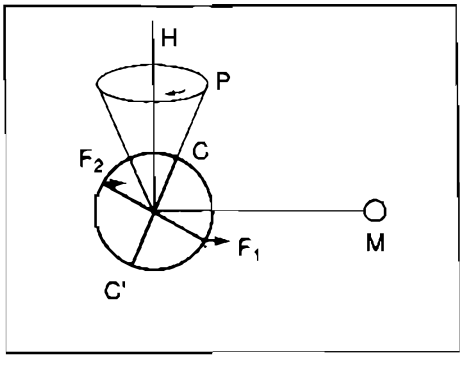
Hình III.14

Tiến động và chương động

Nếu Trái Đất có dạng thực đúng một khối cầu và có mật độ vật chất phân bố đều thì phương của trục quay cũng như chu kì quay của nó sẽ không đổi. Nhưng thực ra nó phình ra dọc theo xích đạo. Bởi vậy, lực hấp dẫn của Mặt Trời, Mặt Trăng và các hành tinh khác tác dụng lên nó không thể coi như tác dụng lên một chất điểm nằm ở tâm Trái Đất. Lực tác dụng này có thể coi như tổng hợp của ba lực: Lực F tác dụng lên khối phồng cầu có tâm tại O, lực F_1 tác dụng lên phần nhô của nửa vành xích đạo nằm gần Mặt Trời và lực F_2 tác dụng lên phần nhô về phía kia. Vì lực F_1 lớn hơn F_2 nên kết quả các lực tác dụng của Mặt Trời tạo nên một hợp lực có xu hướng làm quay mặt phẳng xích đạo của Trái Đất tới trùng với mặt phẳng hoàng đạo, là mặt phẳng quỹ đạo của Trái Đất xung quanh Mặt Trời. Song hiện tượng trên không thể xảy ra, vì Trái Đất đang quay quanh mình nó. Trường hợp này tương tự như hiện tượng tiến động của con quay cơ học: trục Trái Đất CC' đảo quanh pháp tuyến OH của mặt phẳng hoàng đạo một cách từ từ vẽ thành một mặt nón với góc ở đỉnh bằng 2 lần góc COH (bằng $46^{o}54'$). OH cắt thiên cầu tại H và điểm này chính là Hoàng cực. Hiện tượng tiến động của Trái Đất được Hipparchus phát hiện từ thế kỉ thứ II trước công nguyên. Do tiến động nên điểm xuân phân dịch chuyển trên hoàng đạo mỗi năm một cung 50"37. Như vậy thiên cực bắc dịch chuyển trên nền trời quanh Hoàng cực theo một đường tròn có bán kính góc là $23^{o}27'$ với chu kì khoảng 26.000 năm.



Hình III.15



Hình III.16

Hiện nay thiên cực Bắc nằm rất gần sao Bắc cực (sao α chòm Tiểu Hùng), sau 13.000 năm nữa thì sao Chức Nữ (sao α chòm Thiên Cầm) sẽ là sao Bắc cực.

Hình III.17

Chú ý rằng Mặt Trăng cũng gây nên hiện tượng tiến động trục quay của Trái Đất nhưng ở mức độ yếu hơn.

Ngoài hiện tượng tiến động, trục quay Trái Đất còn có một chuyển động nhiễu loạn bé được gọi là chương động. Cực vũ trụ thực dịch chuyển quanh cực vũ trụ trung bình theo một elip với bán trục lớn là 9"21, bán trục bé là 6"86. Do tiến động và chương động, cực vũ trụ dịch chuyển trên nền trời sao theo một đường uốn khúc gần với dạng hình sin.

(Fig.III.14)

c. At the North pole ($\varphi = 90$), only half of the sky is visible to the observer. The diurnal circles are parallel to the horizontal plane. Stars whose declination is smaller than 0 will never rise. Similarly, at the South Pole, only the southern hemisphere can be seen.

(Fig.III.15)

Precession and nutation.

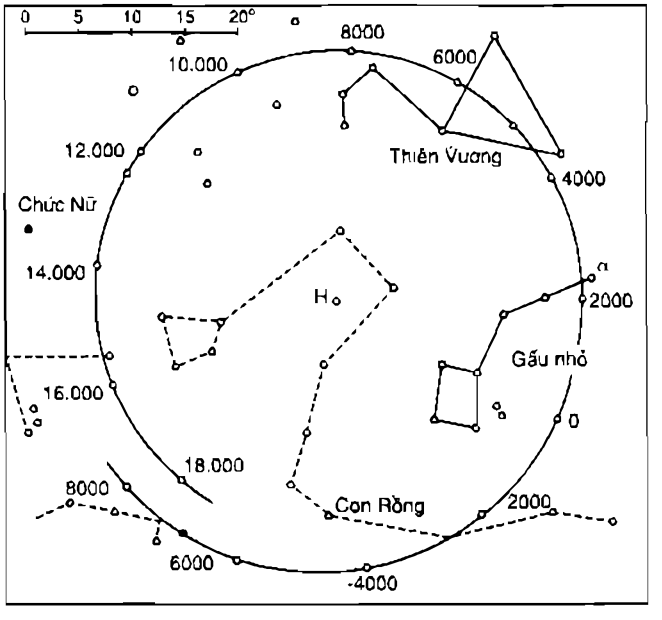
If the Earth had spherical shape and uniform internal distribution of matter, its rotation axis as well as its rotation period would remain unchanged with time. But in fact, the Earth bulges at the equator. Hence, the gravitational attraction of the Sun, the Moon or other planet on the Earth can not be considered as acting on a point mass at the Earth's center. Instead, the attraction is the combination of three components: the force F acting on the spheroid centered at O, the force F_1 acting on the part nearest to the Sun and the force F_2 acting on the part farthest away. Since F_1 is stronger than F_2, the gravitational attraction of the Sun tends to pull the equator into coincidence with the ecliptic, the Earth's orbital plane around the Sun. As the Earth rotates on its axis, the natural reaction is to make a precessional motion similar to a mechanical top. The rotation axis of the Earth pivots around the line OH perpendicular to the ecliptic and thus describes a conic surface with the angle at the apex $2COH = 46^{\circ}54'$. The line OH cuts the celestial sphere at a point H which is called the ecliptic pole. The precession of the Earth was discovered by Hipparchus in the second century BC. Due to the precession, the direction of the vernal equinox progresses 50"37 a year along the ecliptic. The north pole moves along a circle of $23^{\circ}27'$radius and completes a cycle around the ecliptic pole in 26 000 years.

(Fig.III.16)

At present the north pole is very near the star Polaris (star α of the constellation Ursa Minor). In 13 000 year, the star Vega (star α of the constellation Lyra) will be the pole star.

It should be mentioned that the attraction of the Moon also tends to pull on the rotation axis of the Earth but the effect is much smaller.

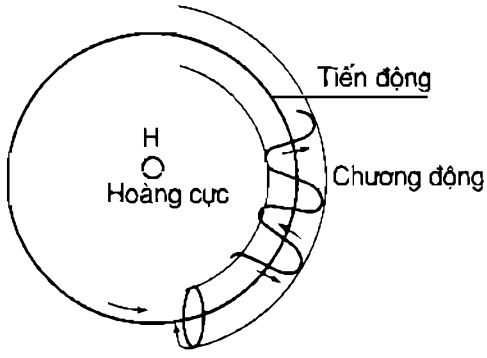
In addition to the precession, the Earth's rotation axis also has a small perturbed motion called nutation. The real celestial pole moves around the mean celestial pole on an ellipse of 9"21 semi-major axis and 6"86 semi-minor axis. As a result, the path of the celestial pole describes a slightly wavy circle on the sky.



(Fig III-17)

Ngày sao

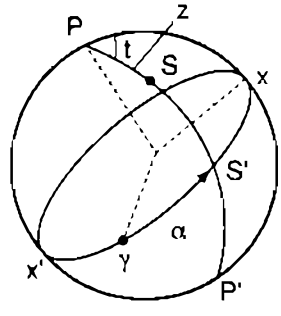
Ngày sao là chu kì quay của Trái Đất đối với các sao, đúng bằng chu kì nhật động của các sao. Ngày sao là khoảng thời gian giữa hai lần liên tiếp điểm xuân phân đi qua kinh tuyến trên tại một nơi quan sát. Người ta quy ước ngày sao tại mỗi nơi bắt đầu (0h sao) lúc điểm xuân phân qua kinh tuyến trên tại nơi đó. Do nhật động, góc giờ t của điểm xuân phân tăng dần một cách đều đặn. Khi điểm xuân phân nhật động được một vòng (trở lại kinh tuyến trên) thì một ngày sao (24h sao) đã trôi qua. Như vậy, giờ sao trong ngày ở một nơi có trị số bằng góc giờ của điểm xuân phân lúc ấy tại nơi đó.



Hình III.18

1 ngày sao = 24 giờ sao = 24 x 60 phút sao = 60 x 60 x 24 giây sao.

Điểm xuân phân là một điểm trên thiên cầu không quan sát trực tiếp được. Trong thực hành người ta xác định giờ sao bằng cách quan sát một ngôi sao cụ thể nào đó. Trên hình III.19, giờ sao của nơi quan sát ứng với thiên đỉnh Z có giá trị bằng cung S'X. Cung S'X = γ S' + S'X nghĩa là s = α + t. Trong đó t là góc giờ và α là xích kinh của sao S. Khi S đi qua kinh tuyến trên thì t = 0 và s = α. Như vậy giờ sao tại một nơi vào một thời điểm nào đó có trị số bằng xích kinh của ngôi sao đi qua kinh tuyến trên tại nơi đó đúng vào thời điểm ấy. Ngày sao, giờ sao được sử dụng chủ yếu trong thiên văn.



Hình III.19

Ngày Mặt Trời thực. Ngày Mặt Trời trung bình

Ngày Mặt Trời thực là khoảng thời gian giữa hai lần liên tiếp Mặt Trời đi qua kinh tuyến trên tại một nơi. Người ta quy ước ngày Mặt Trời thực tại mỗi nơi bắt đầu (0h) lúc Mặt Trời qua kinh tuyến dưới tại nơi đó (nửa đêm thực). Do nhật động, góc giờ Mặt Trời thực biến thiên. Giờ Mặt Trời thực được xác định bằng góc giờ (t_o) của Mặt Trời. Vì góc giờ của Mặt Trời (cũng như các thiên thể khác) được tính từ kinh tuyến trên, nên giờ Mặt Trời thực T_o ở một thời điểm nào đó, tại một nơi quan sát là : $T_o = t_o + 12$ h. Chẳng hạn lúc Mặt Trời qua kinh tuyến trên (giữa trưa) thì $T_o = 0 + 12h = 12$ h.

Khi Mặt Trời qua kinh tuyến dưới (nửa đêm) thì $T_o = 12 + 12 = 24h$ hay 0 h.

Cần chú ý rằng các ngày mặt trời thực trong một năm dài không bằng nhau do hai nguyên nhân:

- Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời với vận tốc không đều, nên ta thấy mỗi ngày Mặt Trời dịch chuyển trên hoàng đạo một cung không bằng nhau.

- Vì hoàng đạo nghiêng với xích đạo một góc $23^o27'$, nên góc giờ mặt trời phụ thuộc vào vị trí của nó trên hoàng đạo. (Góc giờ bé hơn ở các điểm xuân phân và thu phân, và góc giờ lớn hơn ở các điểm hạ chí và đông chí).

(Fig. III.18)

Sidereal day

Sidereal day is defined as the rotation period of the Earth with respect to the stars and hence equal to the diurnal period of the stars. Sidereal day is the interval of time between two successive passages of the equinox through the meridian at the place of the observer. The local sidereal time is zero when the equinox is on the meridian. The hour angle of the vernal equinox increases continuously due to the diurnal motion. When the vernal equinox returns to its initial position, a sidereal day has passed. Hence the local sidereal time is the hour angle of the vernal equinox.

1 sidereal day = 24 sidereal hours = 24x60 sidereal minutes = 24x60x60 sidereal seconds.

(Fig.III.19)

As the vernal equinox can not be easily determined, the sideral time is inferred from observations of known stars. In fig III-19, the sideral time is S'X: $S'X = \gamma S' + S'X$ or $s = \alpha + t$, where t is the hour angle and α is the right ascension of the star S. When $t = 0$ one obtains $s = \alpha$. Therefore the local sideral time is equal to the right ascension of a star which is on the meridian. Sideral time is used mainly in astronomy.

Apparent solar day, mean solar day.

The apparent solar day is the time interval between two successive passages of the Sun across the meridian. The meridian transit at lower culmination is referred to as midnight or 0^h solar time. The hour angle of the Sun varies as the Earth rotates. Solar time To is directly related to the hour angle of the Sun t_o: $T_O = t_O + 12h$. For example, when the Sun is on the meridian (local noon), solar time is $T_O = 0 + 12h = 12h$. When the Sun is at lower culmination (local midnight) solar time is $T_O = 12h + 12h = 24h$ or 0h.

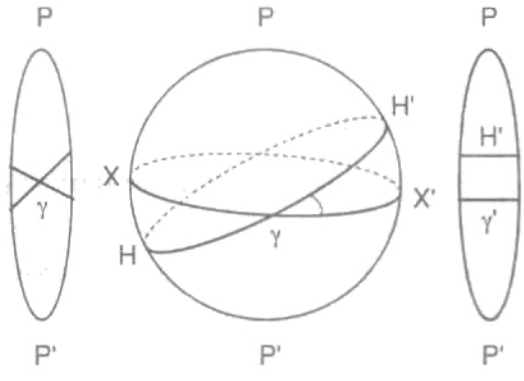
It should be noted that the length of a solar day varies during the year due to the following reasons:

- The velocity of the Earth in orbit around the Sun is not constant. Therefore the distance the Sun travels in a day on the ecliptic is also not constant.

- As the ecliptic is inclined $23^o27'$ with respect to the equator, the hour angle of the Sun depends on its position on the ecliptic (smaller hour angle at vernal or autumnal equinox and larger hour angle at summer or winter solstice).

Ví dụ, vào ngày 22/12 ngày mặt trời thực dài hơn 50 giây so với ngày mặt trời thực ở ngày 23/9.

Thực tế không thể chế tạo được loại đồng hồ chạy theo giờ mặt trời thực, nên trong đời sống người ta dùng thời gian mặt trời trung bình. Độ dài ngày mặt trời trung bình bằng độ dài bình quân của tất cả các ngày mặt trời thực trong một năm. Hiệu số giữa giờ mặt trời trung bình (T_m) và giờ mặt trời thực (T_o) tại một thời điểm nào đó được gọi là phương trình thời gian.



Hình III.20

$$\eta = T_m - T_o \text{ hay } T_m = \eta + T_o$$

Hình III.21

Giá trị của phương trình thời gian η hàng ngày được in trong các lịch thiên văn hàng năm. Như vậy bằng quan sát Mặt Trời ta biết được giờ mặt trời thực T_o, dem cộng với trị số η tính ở thời điểm quan sát, ta sẽ được giờ mặt trời trung bình T_m.

Đồ thị biểu diễn phương trình thời gian trong một năm là đường liền nét trên hình III.21. Nó là đường tổng hợp của hai đường hình sin, đường thứ nhất có chu kì một năm biểu thị nguyên nhân chuyển động không đều của Mặt Trời trên hoàng đạo; đường thứ hai có chu kì nửa năm biểu thị nguyên nhân Mặt Trời di chuyển trên hoàng đạo nghiêng với xích đạo. Phương trình thời gian có giá trị bằng không vào bốn ngày trong một năm và đạt các giá trị cực trị vào các ngày 11 tháng Giêng ($\eta = +14$ ph) và ngày 2 tháng XI ($\eta = -16$ ph).

Trong sinh hoạt người ta dùng thời gian mặt trời trung bình. Trong quan sát thiên văn người ta dùng thời gian sao, nên phải chuyển đổi từ thời gian này sang thời gian kia. Trên hình III.22, một người đứng ở A thấy Mặt Trời M và ngôi sao S đi qua kinh tuyến trên ở cùng một thời điểm. Khi Trái Đất đi từ vị trí 1 đến vị trí 2 Trái Đất đã quay được một vòng đối với ngôi sao S, nhưng để được một ngày mặt trời, Trái Đất phải quay thêm một góc a, nên ngày mặt trời trung bình dài hơn ngày sao:

24h MTTB = 24h 03ph 56s 555 sao

1h MTTB = 1h 00ph 09s 856 sao

1ph MTTB = 1ph 00s 164 sao

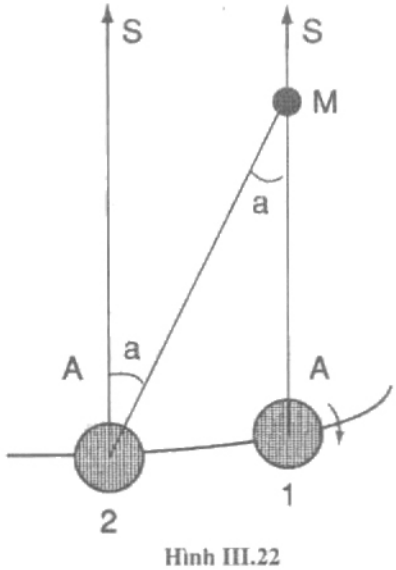
1s MTTB = 1s 003 sao

24 h sao = 23h 56ph 04s 091MTTB

1h sao = 59ph 50s 170 MTTB

1ph sao = 59s 836 MTTB

1s sao = 0s 997 MTTB



Hình III.22

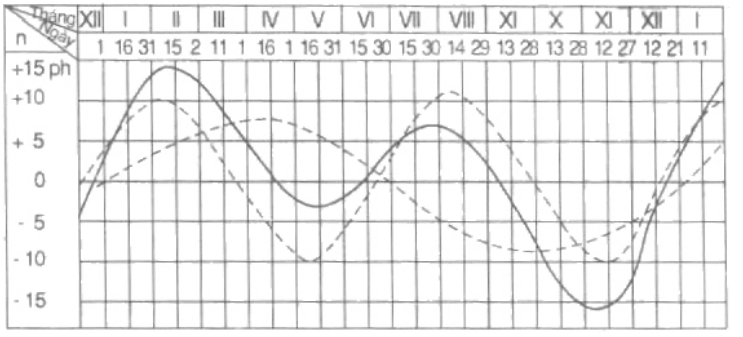
(Fig.III.20)

For example, the solar day on December 22 is about 50 seconds longer than the solar day on September 23.

Since the apparent solar time is not convenient for practical purposes, we use instead the mean solar time. The length of a mean solar day is defined as the average of the length of apparent solar days during the year. The difference between mean solar day and apparent solar day is called the equation of time.

$$\eta = T_m - T_o \text{ or } T_m = \eta + T_o$$

The value of the equation of time can be found in the astronomical almanac. Thus one can obtain the mean solar time Tm by correcting the apparent solar time T_o determined from observations by using the equation of time η.



(Fig.III.21)

The plot (solid line) in figure III-21 represents the variation of the equation of time during the year. The solid line is the combination of two curves which show the contribution of the motion of the Sun on the ecliptic and that of the inclination of the ecliptic with respect to the equator (period of 6 months). The equation of time is zero on 4 days during a year and reaches maximum values on January 11 (η = +14m) and November 2 (η = -16m).

In daily life the mean solar time is commonly used. But for astronomers only the sideral time is useful. Thus the conversion between two systems for measuring time is needed. In fig III-22, an observer at A sees the Sun and a star S pass the meridian at the same time. When the Earth moves from 1 to 2 and hence completes a rotation with respect to the star, the Sun is not on the meridian but lags behind an angle a. As a result, the mean solar day is longer than the sidereal day.

24h mean solar time = 24h 03m 56s555 sidereal time

1h mean solar time = 1h 00m 09s856 sidereal time

1m mean solar time = 1m 00s164 sidereal time

1s mean solar time = 1s 003 sidereal time

24h sidereal time = 23h 56m 04s091 mean solar time

1h sidereal time = 59m 50s170 mean solar time

1m sidereal time = 59s 836 mean solar time

1s sidereal time = 0s997 mean solar time

(Fig.III.22)

Các hệ tính thời gian phổ biến

a. Giờ địa phương và độ kinh địa lí

Giờ được xác định cho một nơi (có độ kinh xác định) được gọi là giờ địa phương của nơi đó. Các nơi nằm trên cùng một kinh tuyến có cùng giờ địa phương vì góc giờ của Mặt Trời không phụ thuộc vào vĩ độ.

Hai nơi khác nhau có hiệu độ kinh $\Delta\lambda$ thì góc giờ của một thiên thể nào đó quan sát tại hai nơi ấy ở cùng một thời điểm cũng khác nhau một lượng bằng $\Delta t = \Delta\lambda$.

Như vậy tại một thời điểm, hiệu giờ địa phương của hai nơi bằng hiệu độ kinh của hai nơi đó (tính theo đơn vị thời gian)

$$S_1 - S_2 = \lambda_1 - \lambda_2 \; ; \; T_{01} - T_{02} = \lambda_1 - \lambda_2 \; ; \; T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2$$

Trong đó S là giờ sao, T_0 là giờ Mặt Trời thực, T_m là giờ Mặt Trời trung bình. Ví dụ: Hà Nội có $\lambda_{HN} = 105^o\ 52'$, Hải Phòng có $\lambda_{HP} = 106^o\ 43'$, thì giờ địa phương ở Hải Phòng lớn hơn ở Hà Nội là :

$$T_{mHP} - T_{mHN} = \lambda_{HP} - \lambda_{HN} = 106^o\,43' - 105^o\,52' = 51' = 3\text{ph } 24\text{ s}.$$

Rõ ràng giờ địa phương chỉ có ý nghĩa trong quan trắc thiên văn.

b. Giờ múi - Giờ quốc tế

Các múi giờ được lấy theo thang thời gian mặt trời trung bình với quy ước như sau: Bề mặt Trái Đất được chia thành 24 múi giới hạn bởi 24 kinh tuyến nằm cách nhau 15^o hay 1 giờ. Các địa phương nằm trong một múi dùng thống nhất một giờ. Trên thực tế đường biên giới giữa các múi còn phải dựa theo đường biên giới địa lí của từng quốc gia. Giờ múi là giờ mặt trời trung bình địa phương của kinh tuyến chính giữa múi đó. Hai múi liên tiếp có giờ múi khác nhau 1 giờ. Các múi được đánh số từ 0 đến 23. Múi số 0 là múi mà kinh tuyến giữa của nó đi qua đài thiên văn Greenwich, các múi tiếp theo được đánh số theo chiều quay của Trái Đất. Các nước khác nằm trong các múi khác nhau có giờ địa phương khác nhau.

Hình III. 23 : (Xem cuối chương)

Năm 1884, Hội đo lường Quốc tế đã nhất trí lấy giờ múi số 0 làm giờ chung và được gọi là giờ Quốc tế T_0. Tại cùng một thời điểm giờ Quốc tế là T_0 thì giờ ở múi số M là : $T_M = T_0 + M$.

Giờ Quốc tế T_0 còn được gọi là giờ GMT (Greenwich mean time) hay giờ kinh tuyến Greenwich.

c. Đường đổi ngày

Khi ta du hành quanh Trái Đất theo chiều từ tây sang đông thì mỗi lần vượt qua một múi, ta phải vặn đồng hồ của mình tăng lên 1 giờ. Giả sử một người đi vòng quanh Trái Đất theo chiều từ tây sang đông. Người này khởi hành lúc 6 h ngày 01 tháng 1, mỗi ngày đi qua một múi thì khi về đến nhà là 6h ngày 25 tháng 1. Nhưng đối với người du hành, Mặt Trời đã mọc, lặn 25 lần và ngày trở về là 26 tháng 1. Hiện tượng nhầm lẫn một ngày này đã xảy ra đối với đoàn thám hiểm Magenllan khi họ đi vòng quanh Trái Đất lần đầu tiên vào năm 1521.

Common systems for measuring time.

Local time and geographic longitude.

The time determined at any location on Earth is called local time. Places on the same longitude have the same local time since the hour angle of the Sun is independent of latitude.

Two locations separated by a distance $\Delta\lambda$ will see the same star but at different hour angles. The difference is exactly $\Delta t = \Delta\lambda$.

Hence, the difference of local time between two separated locations is

$$S_1 - S_2 = \lambda_1 - \lambda_2 \; ; \; T_{o1} - T_{o2} = \lambda_1 - \lambda_2 \; ; \; T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2$$

where S is the sideral time, T_o is the apparent solar time, T_m is the mean solar time. For example, the longitude of Hanoi and Hai Phong is λ_{HN} and λ_{HP}, respectively. The difference of local time between the two cities is

$$T_{m\,HP} - T_{m\,HN} = \lambda_{HP} - \lambda_{HN}$$

The local time is only useful to astronomical observations.

Time zone and Universal time

Time zones are based on the mean solar time and defined as follows:

The Earth is divided into 24 time zones of 1h or 15^o bounded by 24 longitudes. Within each time zone, all places keep the same time. In reality the zone divisions follow the boundaries between nations. The time inside each time zone is the local mean solar time of the meridian passing through the middle of that zone. Time zones are numbered eastward (in the direction of the Earth's rotation) from 0 to 23. Time zone 0 is centered at the meridian passing through Greenwich. Countries in different time zones have different local times.

(Fig.III.23)

In 1884 The Comite International de Poids et de Mesure agreed to use the local time of time zone 0 as the universal time T_0. The local time in time zone M is related to the Universal time : $T_M = T_0 + M$.

The universal time is also known as GMT (Greenwich mean time) or the time at the meridian of Greenwich.

Date line.

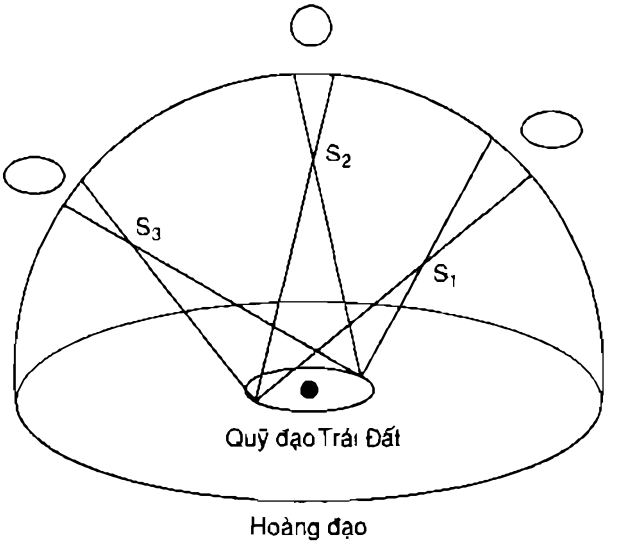
When travelling from west to east, one must set the clock ahead 1h after passing a time zone. Suppose that a man travels around the world from west to east. He starts the journey at 6am January 1 and crosses a time zone everyday. He completes his trip at 6 am January 25. But to him there are already 25 sunrises and sunsets. Hence, he believes his return is on January 26. This confusion happened to the expedition led by Magellan when they completed the first circumnavigation of the Earth in 1521.

Để tránh sự nhầm lẫn ấy người ta đã quy định đường đổi ngày là đường dọc theo kinh tuyến 180^0 đi qua Thái Bình Dương. Những người du hành khi đi qua đường đổi ngày từ Tây sang Đông thì phải giảm ngày lịch của mình một ngày. Ngược lại nếu theo chiều từ Đông sang Tây thì phải tăng lên một ngày.

CHUYỂN ĐỘNG CỦA TRÁI ĐẤT QUANH MẶT TRỜI. DƯƠNG LỊCH. CÁC MÙA. CÁC ĐỚI KHÍ HẬU

Chứng minh Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời

Trái Đất vừa chuyển động quanh Mặt Trời vừa tự quay quanh mình nó. Mặt phẳng quỹ đạo của Trái Đất cắt thiên cầu theo một đường tròn lớn gọi là Hoàng đạo. Đứng trên Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời mà quan sát các sao ở gần thì phương nhìn các sao ấy sẽ thay đổi rõ rệt, cụ thể là mỗi sao đi chuyển trên thiên cầu trong một năm theo một đường elip nào đó. Elip này được gọi là elip thị sai hay thị sai hàng năm (hiện tượng này đã được Copernicus dự đoán trước đối với các sao ở gần). Bán kính lớn của elip thị sai càng nhỏ nếu sao càng xa Trái Đất (từ đó người ta có thể xác định khoảng cách đến các sao qua kích thước elip thị sai của chúng). Đối với các sao nằm trên mặt phẳng Hoàng đạo thì elip thị sai có dạng một cung tròn, còn các sao nằm ở Hoàng cực thì elip thị sai là đường tròn. Thị sai hàng năm của các sao ở gần chứng tỏ Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời.



Hình III.24

Hiện tượng thứ hai chứng tỏ Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời là tinh sai. Giả sử K là tâm của thị kính (nơi đặt mắt quan sát) và O là tâm của vật kính của một kính thiên văn. Người quan sát cùng với kính di chuyển trong không gian theo phương KA với vận tốc v (v là vận tốc chuyển động của Trái Đất quanh Mặt Trời). Ánh sáng từ sao S truyền với vận tốc c đến vật kính tại O. Từ O đến K tia sáng phải truyền đi trong khoảng thời gian t (OK = ct). Như vậy ảnh của sao sẽ nằm tại K_1 với $KK_1 = vt$. Để thu được ảnh của sao nằm đúng tâm của thị kính, người ta phải hướng ống kính nghiêng theo phương K_0O ($K_0K = KK_1$). Như vậy phương của ống kính K_0S' tạo với phương thực KS một góc σ được gọi là góc dịch chuyển tinh sai hay gọi tắt là tinh sai của sao S. Từ hình III.25, ta có : $\sin\sigma = \frac{v}{c}\sin\alpha$. Trong đó α là góc giữa phương quan sát thiên thể và phương chuyển động của Trái Đất KA, A là điểm tới (điểm apec). Vì σ rất bé nên có thể viết $\sigma = 206\,265''(v/c)\sin\alpha$.

Hình III.25

Biết vận tốc của Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời là v = 29,78 km/s, vận tốc ánh sáng là c = 299 792 km/s, ta tính được tinh sai năm là $\delta = 20''\,50 \sin\alpha$.

To avoid this problem, an international date line is set along the 180^{0} longitude in the middle of the Pacific. When crossing the date line eastward, one must decrease the date by one day. Conversely, when travelling westward one must advance the date by one day.

MOTION OF THE EARTH AROUND THE SUN. CALENDARS - SEASONS AND CLIMATE ZONES.

Proof of the Earth's revolution around the Sun.

The Earth, in addition to the rotation around its axis, also revolves around the Sun. The Earth's orbital plane cuts the celestial sphere along a great circle, the ecliptic. For an observer on Earth, the position of a star on the celestial sphere changes during the year. The stars seem to move in a small ellipse. This effect, known as parallax, was predicted by Copernicus for nearby stars. The size of the ellipse is smaller when the star is farther away. Thus one can determine directly the distance of the star by measuring its parallax. A star on the ecliptic shifts back and forth in a straight line. The stars near the ecliptic poles move in small circles. The parallax of nearby stars proves that the Earth is revolving around the Sun.

(Fig.III.24)

The second effect which also demonstrates the revolution of the Earth around the Sun is aberration. Suppose that K is the center of the secondary mirror, O is the center of the primary mirror of a telescope. The observer and the telescope move in the direction KA with a velocity v which is the velocity of the Earth around the Sun. The light from star S travelling with velocity c arrives at O. The time for the light to go from O to K is t. Thus the image of the star will be at K_1 with $KK_1=vt$. To obtain the image of the star at K, the observer must tilt the telescope toward the direction K_0O

($K_0O = KK_1$). The angle between the telescope and the real direction of the star is called the aberration σ. From fig. 3-25 one obtains: $\sin\sigma = v/c.\sin\alpha$.

where α is the angle between the direction of the star and the direction of the Earth's motion KA (A being the apex point). Since σ is very small, the above expression is reduced to $\sigma = 206265''(v/c)\sin\alpha$.

Knowing the Earth's velocity around the Sun of about 29,78 km/s, and the velocity of light of 299792 km/s, one obtains the secular aberration $\delta = 20''50^{*}\sin\alpha$.

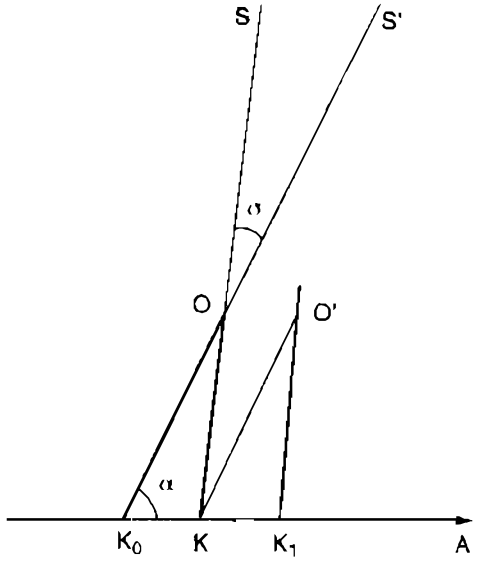


Fig.III.25

Vì điểm tới A nằm trên Hoàng đạo và dịch chuyển cùng với Trái Đất nên các ngôi sao ở gần Hoàng cực chuyển động trên các vòng tròn có tâm ở vị trí thực của chúng. Các ngôi sao khác vẽ nên những elip tinh sai với bán trục lớn là 20"50. Các thiên thể nằm trên mặt phẳng hoàng đạo có elip tinh sai là một cung 20",50 x 2 = 41".

Ngoài ra do Trái Đất chuyển động quay quanh trục nên ngoài tinh sai năm còn có tinh sai ngày. Tinh sai ngày phụ thuộc độ vĩ địa lí và bé hơn tinh sai năm rất nhiều.

Chuyển động có chu kì của Trái Đất quanh Mặt Trời

Từ thời thượng cổ con người đã thấy rằng: Mặt Trời dịch chuyển trên thiên cầu theo Hoàng đạo và đi qua một số chòm sao trong năm. Ở Á Đông, người ta đã chia Hoàng đạo ra 12 cung mỗi cung 30^{o} tương ứng với 12 chòm sao ở trên Hoàng đạo. Mỗi tháng, Mặt Trời đi qua một chòm sao.

Tháng	Chòm sao Mặt Trời đi qua	Kí hiệu	Tháng	Chòm sao Mặt Trời đi qua	Kí hiệu
1	Con hươu (Ma kết)	♑	7	Con tôm (Cự giải)	♋
2	Cái bình (Bảu bình)	♒	8	Sư tử	♌
3	Song ngư	♓	9	Trinh nữ	♍
4	Con dê Bạch dương	♈	10	Cái cân (Thiên bình)	♎
5	Con trâu (Kim ngưu)	♉	11	Thần nông	♏
6	Song tử	♊	12	Nhân mã	♐

Dựa vào vị trí Mặt Trời đối với các chòm sao Hoàng đới, ta có thể xác định được gần đúng ngày, tháng trong năm. Ví dụ tháng 3 Mặt Trời nằm trong chòm Song Ngư nên không nhìn được chòm này nhưng khi Mặt Trời lặn thì ta sẽ thấy ở đằng Đông chòm Trinh Nữ bắt đầu mọc... Mỗi khi nhận dạng được các chòm sao Hoàng đới thì ta có thể xác định gần đúng giờ trong đêm, chẳng hạn vào tháng 3 mà chòm Song ngư đã lên cao khoảng 30^{o} có nghĩa là Mặt Trời đã lặn khoảng hai giờ.

Chu kì dịch chuyển của Mặt Trời trên Hoàng đạo chính là chu kì chuyển động của Trái Đất quanh Mặt Trời bằng 365,26 ngày.

Vị trí của Mặt Trời trên thiên cầu. Các mùa

Các kết quả quan sát cho thấy hướng của các thiên cực thay đổi rất chậm. Bởi vậy, trong suốt năm, trục quay của Trái Đất không đổi phương trong không gian. Mặt phẳng hoàng đạo nghiêng với xích đạo Trái Đất một góc 23^{o} 27'. Do đó, hàng năm, độ xích vĩ δ của Mặt Trời biến thiên từ $-23^{0}27'$ đến $+23^{o}27'$. Trục quay của Trái Đất làm với mặt phẳng hoàng đạo một góc bằng $90^{0}- 23^{0}27' = 66^{0}33'$.

As the point A is on the ecliptic and also moves with the Earth, stars near the ecliptic pole move in circles centered at their real positions. Other stars describe small ellipses of 20"50 semi-major axis. Stars on the ecliptic plane move back and forth a distance 41" during the year. Due to the rotation of the Earth, there also exists the diurnal aberration. Diurnal aberration depends on latitude and is very small in comparison to secular aberration.

Periodic motion of the Earth around the Sun

It was known from ancient time that the Sun moves on the celestial sphere along the ecliptic and pass through several constellations during the year. In east Asia the ecliptic is divided into 12 subdivisions of 30° in length which correspond to 12 zodiacal constellations. The Sun passes a zodiacal constellation every month.

Month	Constellation	Symbol	Month	Constellation	Symbol
1	Capricornus	♑	7	Cancer	♋
2	Aquarius	♒	8	Leo	♌
3	Pisces	♓	9	Virgo	♍
4	Aries	♈	10	Libra	♎
5	Taurus	♉	11	Scorpion	♏
6	Gemini	♊	12	Sagittarius	♐

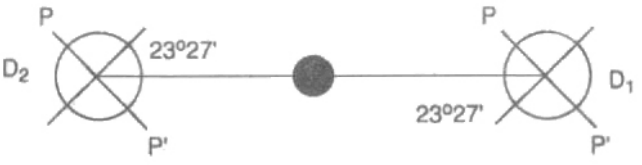
From observations of the position of the Sun with respect to the zodiacal constellations one can know approximately the date in a year. For example, in March the Sun is in constellation Pisces, hence the constellation Virgo will rise right after sunset. The relative position of constellations also indicates approximately the time during the night. In March when the constellation Leo is about 30^{o} above the horizon one knows that it's about 2 hours after sunset.

The period of the motion of the Sun in the ecliptic is also the period of revolution of the Earth around the Sun (365.26 days).

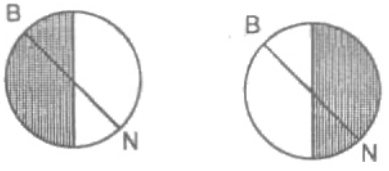
Positions of the Sun on the celestial sphere and Seasons.

Observations show that the direction of the celestial poles changes very slowly. Therefore, during any one year, the Earth's rotation axis can be considered to be fixed in the space. The ecliptic is inclined at $23^{o}27'$ to the Earth's equator. As a result, the declination of the Sun during the year varies between $-23^{o}27'$ and $+23^{o}27$. The angle between the Earth's rotation axis and the ecliptic is $90^{o} - 23^{o}27 = 66^{o}33'$.

Trên hình III.26, D_1 và D_2 là hai vị trí của Trái Đất nằm đối tâm với Mặt Trời vào ngày Hạ chí và Đông chí. Mặt phẳng OD_1D_2 là mặt phẳng hoàng đạo. Khi Trái Đất ở vị D_1, Mặt Trời ở nửa thiên cầu bắc, nằm trên mặt phẳng xích đạo một góc $23^0 27'$ ($\delta = +23^0 27'$), khi Trái Đất ở vị trí D_2, Mặt Trời nằm dưới mặt phẳng xích đạo một góc $23^0 27'$ ($\delta = -23^0 27'$).



Hình III.27



Hình III.26

Hàng năm vào ngày 21 tháng 3 Mặt Trời đi qua điểm Xuân phân ($\alpha = 0$), từ Nam thiên cầu lên Bắc thiên cầu. Ngày 22 tháng 6 Mặt Trời đi qua điểm Hạ chí ($\alpha = 6h$). Ngày 23 tháng 9 đi từ Bắc thiên cầu xuống Nam thiên cầu qua điểm Thu phân ($\alpha = 12h$). Ngày 22 tháng 12 Mặt Trời đi qua điểm Đông chí ($\alpha = 18h$). Ngày 21 tháng 3 năm tiếp theo Mặt Trời lại trở về điểm Xuân phân γ. Hàng năm Mặt Trời chuyển động biểu kiến trên Hoàng đạo, độ xích kinh α biến thiên từ 0 đến 24h. Độ xích vĩ δ biến thiên từ $-23^0 27'$ đến $+23^0 27'$. Bởi vậy điểm mọc, điểm lặn của Mặt Trời cũng như thời gian ở trên chân trời và thời gian lặn dưới chân trời hàng ngày của nó cũng thay đổi với chu kì 1 năm.

Vị trí của Mặt Trời và độ dài tương đối của ngày và đêm ở Bắc bán cầu

Vị trí	Ngày	δ	α	Độ dài ngày so với đêm
Xuân phân	21-III	O	O	Ngày = Đêm
Hạ chí	22-VI	$+23^0 27'$	6h	Ngày dài nhất trong năm
Thu phân	23-IX	O	12h	Ngày = Đêm
Đông chí	22-XII	$-23^0 27'$	18h	Ngày ngắn nhất trong năm

Ta thấy rằng vào các ngày xuân phân và thu phân, Mặt Trời nằm trên xích đạo trời, ngày và đêm dài bằng nhau; thông lượng bức xạ của Mặt Trời truyền đến hai nửa địa cầu như nhau. Khi Mặt Trời ở nửa thiên cầu Bắc ($\delta > 0$) ngày dài hơn đêm và thông lượng bức xạ truyền cho nửa địa cầu Bắc lớn hơn đối với nửa địa cầu Nam và cực đại vào ngày hạ chí. Ngược lại, khi Mặt Trời ở nửa thiên cầu Nam ($\delta < 0$) thì thông lượng bức xạ xuống nửa địa cầu Bắc bé hơn so với nửa địa cầu Nam và cực tiểu vào ngày đông chí. Chính vì vậy mà một năm có 4 mùa : xuân, hạ, thu, đông. Ở phương tây 4 ngày trong bảng trên là ngày bắt đầu của 4 mùa. Còn ở Á Đông thì 4 ngày ấy là 4 ngày ở chính giữa 4 mùa.

Chú ý rằng: ở Nam địa cầu thì 4 mùa diễn ra theo thứ tự ngược lại, chẳng hạn khi ở Bắc bán cầu là mùa hạ thì Nam bán cầu là mùa đông.

(Fig.III.26)

In fig III.26, D_1 and D_2 are positions of the Earth at summer solstice and winter solstice which are in opposite directions from the Sun. The plane OD_1D_2 is the ecliptic. When the Earth is at D_1, the Sun is in the northern Hemisphere, $23^o27'$ above the equator ($\delta = 23^o27'$). When the Earth arrives at D_2, the Sun is $23^o27'$ below the equator ($\delta = -23^o27'$).

On March 21 the Sun passes through the vernal equinox ($\alpha = 0$) from the southern hemisphere to northern hemisphere. On June 22 the Sun is at summer solstice (α = 6h). On September 23 the Sun passes from the northern hemisphere to the southern hemisphere through the autumnal equinox (α = 12h). On December 22 the Sun is at winter solstice (α = 18h). The Sun returns to the vernal equinox on March 21 and thus completes a cycle on the ecliptic. During the year, the Sun's right ascension varies between 0h and 24h. Its declination varies between $-23^o27'$ and $+23^o27'$. Thus, the direction of the Sun at sunrise or sunset as well as the duration of the day change periodically over the year.

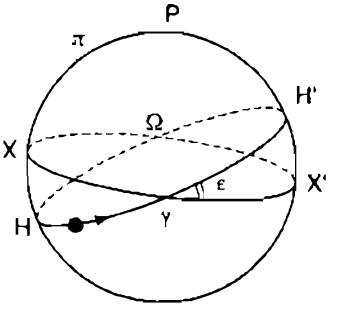


Fig.III.27

Table 4. Position of the Sun and the relative length of day and night for the northern hemisphere.

Position	Date	α	δ	Day/Night
Vernal equinox	Mars 21	O	O	day = night
Summer solstice	June 22	6h	$23^o27'$	longest day
Autumnal equinox	September 23	12h	O	day = night
Winter solstice	December	18h	$-23^o27'$	longest night

At vernal equinox and autumnal equinox the Sun is on the equator. Day and night have the same length. The two hemispheres receive the same amount of sunlight. When the Sun is in the northern hemisphere ($\delta > 0$), day is longer than night. The amount of heat received by the northern hemisphere is also larger than that for the southern hemisphere and reaches maximum at summer solstice. Conversely, when the Sun is in the southern hemisphere ($\delta < 0$), the amount of heat received by the northern hemisphere is smaller and reaches minimum at winter solstice. Thus there are four seasons in a year: spring, summer, autumn and winter. In the west, the days listed on table 4 are the beginnings of the seasons. But in east Asia these days are in the middle of the seasons.

It should be noted that in the southern hemisphere the time of seasons is reversed. Winter time in the southern hemisphere corresponds to summer time in the northern hemisphere.

Như vậy nguyên nhân có biến đổi mùa trên Trái Đất là do Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời có trục quay không thẳng góc với mặt phẳng quỹ đạo. Như vậy, chu kì biến đổi mùa bằng chu kì chuyển động của Trái Đất quanh Mặt Trời, nói chính xác hơn bằng chu kì chuyển động biểu kiến của Mặt Trời qua điểm xuân phân thường gọi là năm xuân phân và bằng 365,2422 ngày.

Dương lịch

Lịch là hệ thống tính khoảng thời gian dài. Trong lịch sử loài người đã có nhiều loại lịch khác nhau. Lịch ưu việt nhất được dùng trên toàn thế giới là dương lịch. Cơ sở xây dựng dương lịch là độ dài của năm xuân phân (chu kì bốn mùa). Vì độ dài của năm xuân phân không phải là một số nguyên ngày (365,24422 ngày) mà năm lịch phải chứa một số nguyên ngày nên năm lịch hoặc có 365 ngày hoặc có 366 ngày và bình quân độ dài của năm lịch phải có trị số gần nhất với độ dài của năm xuân phân.

Dương lịch cũ (Lịch Julian) được xây dựng vào năm 46 trước công nguyên. Mỗi năm có 365 ngày và cứ 4 năm có một năm nhuận (366 ngày). Như vậy trung bình mỗi năm dương lịch cũ dài 365,25 ngày. So với năm xuân phân mỗi năm sai 0,0078 ngày. Cứ 400 năm sai 3,21 ngày. Đến năm 1582 dương lịch cũ sai tới 10 ngày. Việc cải cách lịch cũ thành lịch mới đã được tiến hành bởi Giáo hoàng Gregory 18. Sau ngày 4 tháng 10 năm 1582 được gọi là ngày 15 tháng 10 năm 1582. Cứ 400 năm bỏ bớt 3 ngày nhuận. Các năm trọn thế kỉ mà số thế kỉ không chia hết cho 4 sẽ không phải là năm nhuận: Các năm 1700, 1800, 1900, 2100, 2200 không phải là năm nhuận, còn các năm 1600, 2000, 2400 là năm nhuận. Theo dương lịch mới, năm lịch còn sai lệch với năm xuân phân 0,0003 ngày, và cứ 3300 năm thì mới sai một ngày.

MẶT TRĂNG VÀ QUAN HỆ CỦA NÓ VỚI TRÁI ĐẤT

Mặt Trăng là một thiên thể phản xạ ánh sáng mặt trời. Tùy theo vị trí tương đối giữa Trái Đất và Mặt Trăng mà ta thấy được phần được dọi sáng của Mặt Trăng nhiều hay ít (tròn hay khuyết).

Mặt Trăng chuyển động quanh Trái Đất theo qũy đạo elip với tâm sai bé (e = 0,055). Mặt phẳng quỹ đạo của nó được gọi là mặt phẳng bạch đạo, nghiêng với mặt phẳng quỹ đạo của Trái Đất (Hoàng đạo) một góc $5^0 9'$. Chu kì chuyển động bằng 27,32 ngày. Chuyển động của Mặt Trăng rất phức tạp do các lực nhiễu loạn khá lớn và kích cỡ không thể bỏ qua của Mặt Trăng so với Trái Đất. Trên hình III.28, Trái Đất D và Mặt Trăng T chuyển động quanh khối tâm chung O. Gọi khoảng cách DO là x, khoảng cách từ Trái Đất đến Mặt Trăng là r, m là khối lượng Trái Đất, m_1 là khối lượng Mặt Trăng. Ta có: $mx = m_1 (r - x)$.

Quan sát khoảng cách từ Trái Đất đến Mặt Trăng, người ta xác định được x = 4635 km, r = 384 400 km. Từ đó tính được khối lượng Mặt Trăng là: $m_1 = (1/81)\ m$.

Hình III.28

Các lực nhiễu loạn đã làm cho các thông số quỹ đạo của Mặt Trăng không ngừng biến thiên, chẳng hạn như độ nghiêng giữa mặt phẳng bạch đạo và mặt phẳng hoàng đạo dao động trong khoảng $4^0 58'$ đến $5^0 20'$. Vì hệ Trái Đất - Mặt Trăng chuyển động xung quanh Mặt Trời nên chu kì chuyển động của Mặt Trăng đối với Mặt Trời là 29,53 ngày hay một tháng giao hội. Sau một tháng giao hội, Mặt Trăng, Trái Đất và Mặt Trời lại trở về cùng vị trí tương đối.

The change of seasons is due to the inclination of the Earth rotation axis with respect to the ecliptic. The change of seasons has a period equal to the Earth's period of revolution around the Sun or a tropical year (365,2422 days).

Gregorian calendar.

Calendars are systems for measuring time over an extended period. There are several kinds of calendars developed during the long history of human civilization. The most widely used today is the Gregorian calendar. The calendar is based on the length of the tropical year or the change of seasons. As the length of the tropical year is not an integer number of days (365,2422 days), the year must have either 365 days or 366 days and the average length of a year must be as close as possible to the length of the tropical year.

The Julian calendar was established in 46 B.C. There are 356 days a year and every 4 years there is a leap year of 366 days. Thus the Julian year on average has 365,25 days. The error between this and a tropical year is 0.0078 day. The error accumulates to 3.21 days every 400 years. In 1582 the error had amounted to nearly 10 days. The calendar reform was instituted by the pope Gregory 18. The day following October 4, 1582, became October 15. Only century years divisible by 400 should be leap years. Thus the discrepancy of 3.21 days every 400 years is greatly reduced. The years 1700, 1800, 1900, 2100 are not leap years. The year 1600, 2000, 2400 are leap years. The difference between the Gregorian year and the tropical year is only 0.0003 day and every 3300 years the errors add up to 1 day.

THE MOON AND ITS RELATION WITH THE EARTH.

The Moon is a celestial object which reflects sunlight. Depending on the relative positions of the Moon and the Earth, a smaller or larger part of the Moon's surface can be seen from Earth (Moon's phases).

The Moon's orbit around the Earth is an ellipse with small eccentricity (e=0.055). The Moon's orbit is inclined at $5^{o}09'$ to the ecliptic and the Moon's period of revolution around the Earth is 27.32 days. The motion of the Moon is very complex due to the presence of strong perturbations and the non-negligible size of the Moon compared with that for the Earth. In fig. III-28 the Earth D and the Moon T orbit around their center of mass O. Let x be the distance DO, r the distance Earth-Moon, m the Earth's mass, m_1 the Moon's mass. One obtains : $mx = m_1(r-x)$. From observations of the Earth-Moon distance, it was known that x = 4635 km and r = 384 400 km. One can calculate the Moon's mass: $m_1 = (1/81)m$.

(Fig.III.28)

Perturbations cause the Moon's orbit parameters to change continuously. The inclination of the Moon's orbit to the ecliptic varies slowly between $4^{o}58'$ and $5^{o}20'$. Since the Earth-Moon system moves around the Sun, the period of revolution of the Moon with respect to the Sun is 29.53 days or a synodic month. After a synodic month the Moon, the Earth and the Sun return to the same configuration.

Âm lịch và âm dương lịch

Âm lịch lấy chu kì tuần trăng hay tháng giao hội bằng 29,53 ngày làm cơ sở cho tháng. Dĩ nhiên tháng lịch phải chứa một số nguyên ngày, nên tháng âm lịch có 29 hoặc 30 ngày. Một năm có 12 tháng nên năm âm lịch có 354 ngày hoặc 355 ngày. Như vậy năm âm lịch ngắn hơn năm xuân phân trên 10 ngày, nên không phù hợp với chu kì thời tiết.

Về sau người ta đã xây dựng âm dương lịch dựa vào hai chu kì: Tháng âm lịch và năm xuân phân bằng cách đặt ra năm nhuận theo quy tắc: Cứ 19 năm có 7 năm nhuận, năm nhuận có 13 tháng. Như vậy 19 năm xuân phân có 365,2422 ngày x 19 = 6939,60 ngày, theo âm dương lịch trong 19 năm có (19 x 12) + 7 = 235 tháng bằng 29,53 ngày x 235 = 6939,55 ngày nghĩa là 19 năm âm dương lịch có số ngày tương đương số ngày của 19 năm dương lịch. Một so nước như Việt Nam dùng âm dương lịch trong việc tổ chức các lễ hội truyền thống của dân tộc.

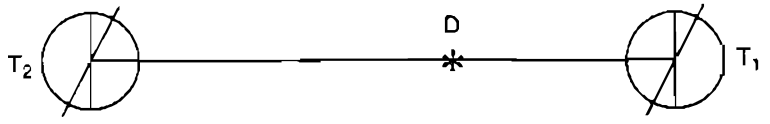
Sự tự quay của Mặt Trăng

Đứng trên Trái Đất quan sát Mặt Trăng, người ta chỉ thấy một nửa bề mặt Mặt Trăng, còn nửa sau không bao giờ nhìn thấy (Một nửa bề mặt Mặt Trăng không thể nhìn thấy từ Trái Đất lần đầu tiên được chụp ảnh tự động từ trạm vũ trụ "Mặt Trăng 3" của Nga phóng ngày 4 tháng 10 năm 1959). Đó là do chu kì tự quay của Mặt Trăng đúng bằng chu kì của Mặt Trăng chuyển động quanh Trái Đất, và quay cùng chiều với nhau. Như vậy chu kì tự quay quanh trục của Mặt Trăng bằng một tháng giao hội. Ở trên Mặt Trăng ngày sẽ dài bằng một tháng giao hội trên Trái Đất nghĩa là một ngày trên Mặt Trăng bằng 29,53 ngày trên mặt đất.

Hình III.29

Trục quay của Mặt Trăng không vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo của nó, mà nghiêng với pháp tuyến của mặt phẳng quỹ đạo một góc bằng $6^0 40'$. Tại mỗi thời điểm, từ Trái Đất con người chỉ quan sát được tối đa một nửa nguyệt cầu. Nhưng nếu quan sát trong một tháng giao hội thì có thể quan sát được 60% bề mặt của nó, do các nguyên nhân sau:

- Quỹ đạo Mặt Trăng có dạng elíp.
- Trục quay của Mặt Trăng nghiêng với mặt phẳng quỹ đạo.
- Mặt Trăng được quan sát từ các vị trí khác nhau trên Trái Đất.



Hình III.30

Nhật, nguyệt thực

Vào thời kì Mặt Trăng và Mặt Trời giao hội (thời kì không trăng) Mặt Trăng có thể che khuất Mặt Trời đối với người quan sát trên mặt đất. Hình III.31 cho ta thấy bóng Mặt Trăng. Ở vị trí T nơi bóng tối của Mặt Trăng chạm Trái Đất, Mặt Trời bị che khuất phía sau Mặt Trăng và người quan sát đứng ở T sẽ thấy nhật thực toàn phần. Các nơi ở trong vùng lân cận thì thấy nhật thực một phần.

Lunar and lunisolar calendars.

The lunar calendar is based on the length of the synodic month (29,53 days). The month must have an integer number of days, thus a lunar month has either 29 or 30 days. A year has 12 months, thus 354 or 355 days. As a result, the lunar year is 10 days shorter than the tropical year and not in pace with the change of seasons.

The lunisolar calendar is based two cycles: the lunar month and the tropical year. A leap year is inserted according to following rule: there are 7 leap years every 19 years and a leap year has 13 months. The number of days in one cycle of 19 lunisolar years is [(19x12) +7)x29,53] = 6939.55 equivalent to 19 tropical years (19x365.2422 = 6939.60 days). In some countries, such as Vietnam, the lunisolar calendar is used for setting traditional festivals.

Rotation of the Moon.

It's known that only one side of the Moon's surface is observable from Earth, the other side can never be seen from Earth. (The unseen side was photographed for the first time by the Russian spacecraft Lunar 3 launched on October 4, 1959). The reason is the coincidence of the period of revolution and rotation of the Moon. The Moon's synodic rotation period is equal to the length of a synodic month. Hence a day on the Moon is equivalent to 29.53 days on Earth.

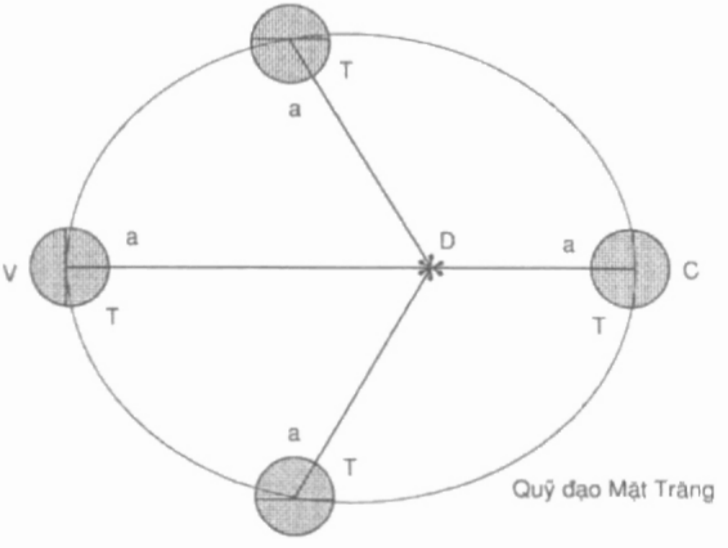


Fig.III.29

The Moon's rotation axis is inclined at $6^{O}40'$ to its orbit. At any time an observer on Earth can see at most half of the Moon's surface. But about 60% of the surface can be seen if one observes continuously during a synodic month. The reasons are:

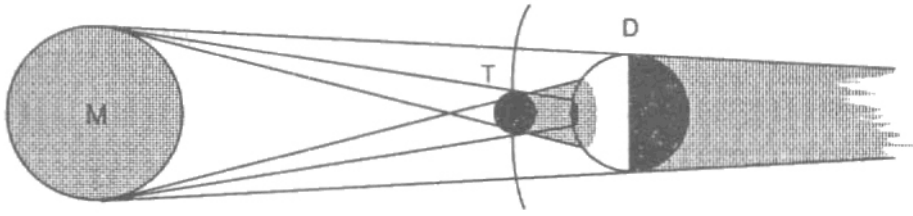
- The Moon's orbit is elliptical
- The Moon's rotation axis is inclined relative to its orbit
- The Moon is observed from different places on Earth.

Fig.III.30

Solar and lunar eclipses.

When the Moon is at new phase (in the direction of the Sun), the Sun might be covered partially or totally by the Moon. In fig III-31, the shadow of the Moon is plotted. At T where the Moon's umbra touches the Earth, the Sun is hidden behind the Moon and an observer at T will see a total eclipse. In other places there is only a partial eclipse of the Sun.

Do Mặt Trăng chuyển động và do Trái Đất tự quay, nên bóng tối của Mặt Trăng sẽ quét trên mặt đất thành một dải. Các địa phương nằm trong dải này sẽ lần lượt thấy nhật thực. Trong một số trường hợp, khi khoảng cách từ Trái Đất đến Mặt Trăng lớn đến mức bóng tối của Mặt Trăng không chạm vào mặt đất, các địa phương nằm trên trục bóng tối sẽ thấy nhật thực vành khuyên (Mặt Trời không bị che hết mà còn một vành sáng). Nhật thực có thể kéo dài hàng giờ, nhưng nhật thực toàn phần kéo dài không quá 7 phút.



Hình III.31

Vào thời kì trăng tròn, Mặt Trăng có thể đi vào bóng tối của Trái Đất và lúc này Mặt Trăng không còn được dọi sáng. Nguyệt thực xảy ra. Khác với nhật thực, khi có nguyệt thực thì các nơi đang là ban đêm đều thấy nguyệt thực. Ngoài ra, vì bóng tối của Trái Đất lớn nên nguyệt thực có thể kéo dài hơn nhật thực.

Hình III.32

Nếu hai mặt phẳng bạch đạo và hoàng đạo trùng nhau thì nhật nguyệt thực xảy ra hàng tháng âm lịch. Nhưng vì chúng nghiêng với nhau một góc $5^0 9'$, nên số lần có nhật nguyệt thực ít hơn nhiều. Trên hình III.33 cho thấy hiện tượng nhật nguyệt thực chỉ xảy ra khi Mặt Trăng giao hội hay xung đối ở gần tiếp tuyến NN' của mặt phẳng quỹ đạo Mặt Trăng với mặt phẳng quỹ đạo của Trái Đất. Như vậy một năm chỉ có hai đợt xảy ra nhật, nguyệt thực (khi Trái Đất ở các vị trí 1 và 3 trên hình III.33).

Hình III.33

Nhật thực mỗi đợt có ít nhất một lần nhiều nhất là hai lần. Còn nguyệt thực có thể có một lần hoặc không có lần nào.

Hiện tượng nhật nguyệt thực có tính chất tuần hoàn, người ta biết được rằng chu kì của hiện tượng này là 6585, 32 ngày hay 18 năm 11,32 ngày. Mỗi chu kì có 41 nhật thực và 29 nguyệt thực.

Thủy triều

Thủy triều là hiện tượng mực nước ở ven biển, cửa sông lên xuống theo quy luật xác định với chu kì 24 h 52 ph. Chu kì này đúng bằng khoảng thời gian giữa hai lần liên tiếp Mặt Trăng qua kinh tuyến trên của mỗi nơi. Do đó lực hấp dẫn của Mặt Trăng là nguyên nhân chính gây ra thủy triều.

Due to the motion of the Moon and the rotation of the Earth, the Moon's umbra sweeps across the Earth. Observers located along the path of the Moon's umbra will be able to observe the total solar eclipse successively. In some cases when the Earth-Moon distance is relatively large so that the Moon's umbra does not strike the Earth, an observer inside the umbra's cone will see an annular solar eclipse (the Sun is not totally covered but appears as a bright ring). Usually an eclipse of the Sun lasts for several hours but a total eclipse lasts less than 7 minutes.

Fig.III.31

At full Moon, the Moon may enter the Earth's shadow and hence receives no sunlight. A lunar eclipse occurs. An eclipse of the Moon is very different from solar eclipse since it can be seen from the entire night side of the Earth. In addition, the shadow of the Earth is large, and thus a lunar eclipse can last for a long time compared to the solar eclipse.

Fig.III.32

If the orbit of the Moon would lie on the ecliptic plane, there would be an eclipse every month. But the two planes make an angle of $5^{O}09'$. The number of eclipses is much smaller. As can be seen from fig. III-33, an eclipse can only occur when new Moon or full Moon is near the intersection NN' between the Moon's orbit and the ecliptic. Thus, there are only two eclipse seasons every year, when the Earth is at 1 or 3 (fig III-33).

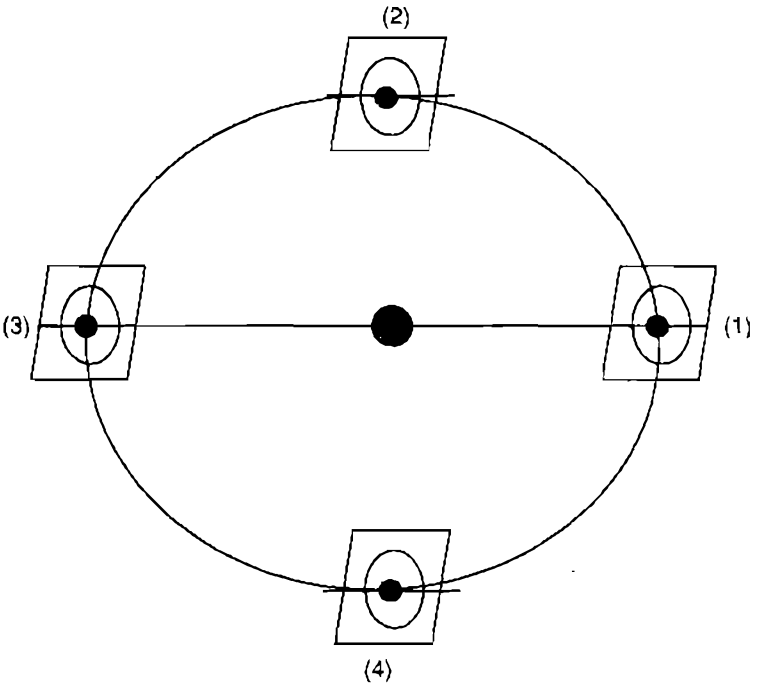
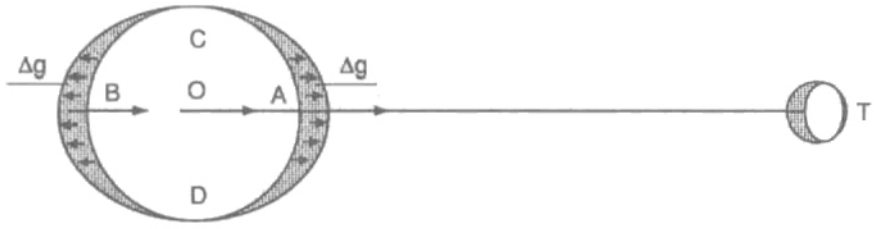


Fig.III.33

An eclipse of the Sun occurs at least once during every eclipse season and sometimes twice. A lunar eclipse may or may not occur during an eclipse season. The eclipses occur periodically. The eclipse cycle is known to have a period of 18 years and 11.32 days. There are 41 solar and 29 lunar eclipses in each cycle.

Tides

Tides are the rising and lowering of the sea levels with a period of 24h52m. This period is exactly the time interval between two successive passages of the Moon across the local meridian. Therefore, the gravitational attraction of the Moon is the main cause of the tides.



Hình III.34

Để đơn giản, ta xem Trái Đất như một hình cầu nhẵn được bao phủ bởi một lớp nước (hình III.34). Lực hấp dẫn của Mặt Trăng tác dụng lên Trái Đất được xem như một chất điểm có khối tâm O và gây nên gia tốc:

$$g_o = G\frac{m}{r^2}$$

Trong đó m là khối lượng Mặt Trăng, r là khoảng cách từ Mặt Trăng đến tâm Trái Đất. Rõ ràng gia tốc do Mặt Trăng gây nên đối với lớp nước ở vùng A gần Mặt Trăng hơn sẽ lớn hơn đối với vùng B.

$$g_A = G\frac{m}{(r-R)^2} \quad ; \quad g_B = G\frac{m}{(r+R)^2}$$

Trong đó R là bán kính Trái Đất. Hiệu số gia tốc ở vùng A so với tâm O là:

$$\Delta g = g_A - g_o = Gm\left[\frac{1}{(r-R)^2} - \frac{1}{r^2}\right] = Gm\frac{2rR - R^2}{(r-R)^2 r^2}$$

Vì R << r nên gia tốc thủy triều $\Delta g \approx \frac{2GmR}{r^3}$. Gia tốc này hướng về phía Mặt Trăng, nên nó làm cho mực nước ở vùng A dâng lên. Gia tốc thủy triều ở vùng B sẽ bằng:

$$\Delta g = g_B - g_O \approx -\frac{2GmR}{r^3}.$$

Gia tốc này hướng ra xa Mặt Trăng, kết quả nước ở vùng B cũng được dâng lên. Khi ở A và B triều lên thì ở các vùng C và D triều xuống. Do Trái Đất quay nên tại mỗi nơi trên mặt đất hàng ngày đều có triều lên và xuống. Mặt Trời cũng gây ra thủy triều, nhưng vì Mặt Trời ở quá xa so với Mặt Trăng, nên gia tốc thủy triều do Mặt Trời gây ra bé hơn một nửa gia tốc thủy triều do Mặt Trăng gây ra. Khi kết hợp cả hai gia tốc thủy triều của Mặt Trăng và của Mặt Trời thì mực nước lên xuống càng mạnh cho nên thủy triều lên xuống mạnh nhất vào các ngày không trăng hay trăng tròn và yếu nhất vào các ngày huyền.

Trong thực tế chế độ thủy triều ở một nơi diễn ra phức tạp hơn nhiều, nó phụ thuộc trạng thái bờ biển dốc hay thoai thoải, biển sâu hay nông...

Hiện tượng triều lên xuống cũng diễn ra đối với khí quyển và địa quyển (vỏ Trái Đất không phải tuyệt đối rắn). Người ta đã tính được ở một số nơi nhất định mặt đất được nâng lên và hạ xuống hàng ngày với biên độ vào khoảng vài đề xi mét.

Fig.III.34

For simplicity, we assume that the Earth is a sphere covered by a layer of water (fig. III.34). The gravitational force of the Moon on Earth considered as point mass centered at O creates an acceleration:

$$g_O = G\frac{m}{r^2}$$

where m is the Moon's mass, r is the distance between the Moon and the Earth's center. The acceleration caused by the Moon on the water layer at A, the part nearer to the Moon, is greater than the acceleration at B.

$$g_A = G\frac{m}{(r-R)^2} \; ; \; g_B = G\frac{m}{(r+R)^2}$$

where R is the Earth's radius. The difference of the acceleration at A and the Earth's center is :

$$\Delta g = g_A - g_O = Gm\left[\frac{1}{(r-R)^2} - \frac{1}{r^2}\right] = Gm\frac{2rR - R^2}{(r-R)^2 r^2}$$

Since R is much smaller than r, we obtain the tidal acceleration

$$\Delta g = \frac{2GmR}{r^3}.$$

The acceleration is directed toward the Moon, thus the level of water at A rises. At B we have

$$\Delta g = g_B - g_O = -\frac{2GmR}{r^3}$$

The acceleration at B is directed in the opposite direction of the Moon. Thus the level of water at B also rises. When there are high tides at A and B, low tides occurs at C and D. As the Earth rotates around its axis, every place will experience high tides and low tides during a day. The Sun also produces tides on Earth, although the Sun is less than half as effective in raising the sea level as the Moon. At new moon or full moon, the tides produced by the Moon and the Sun reinforce each other and are greater than normal. When the Moon is at quadrature, the effects of the Moon and the Sun cancel each other, hence the tides are smaller than normal.

However the actual tides are more complicated and depend on the shape of the coasts, the depth of the seas etc...

Tides also occur in the atmosphere and on the Earth itself (the Earth is not perfectly rigid). It's known from observations that at some places the level of the Earth surface changes by several 10 centimeters during a day.

CÂU HỎI

1. Tính khoảng cách giữa Hà Nội và Đài quan sát thiên văn Tokyo (Nhật Bản) dọc theo một vòng tròn lớn. Xem Trái Đất là một hình cầu có bán kính 6400 km. Toạ độ địa lí của Hà Nội và Tokyo là $\varphi_H = 21^0 03'$; $\lambda_H = 105^0 52'$ và $\varphi_T = 35^0 40'$; $\lambda_T = 139^0 30'$.

2. Sao Thiên lang có độ xích vĩ $\delta = -16^0 30'$. Tính độ cao và độ phương của nó khi qua kinh tuyến trên đối với một người quan sát ở Hà Nội ($\varphi = 21^0 03'$).

3. Sao Chức nữ có xích kinh là 18h34ph, xích vĩ là 38^0. Hỏi khi điểm xuân phân qua kinh tuyến trên đối với một người ở Hà Nội sao Chức nữ ở phương nào của bầu trời ? Ở thời điểm ấy, góc giờ của sao ấy là bao nhiêu?

4. Tính độ cao và độ phương của Mặt Trời lúc giữa trưa tại một nơi có độ vĩ là $18^0 40'$ vào các ngày xuân phân, hạ chí, thu phân, đông chí.

5. Ngày 1 tháng 1 năm 1998, xích vĩ của Mặt Trời là $-23^0 04'$, phương trình thời gian là 3 ph 14 s. Lúc Mặt Trời qua kinh tuyến trên tại Vinh ($\lambda = 105^0 40'$, $\varphi = 18^0 32'$) một đồng hồ đeo tay chỉ 12h 05ph. Tính:

a) Giờ trung bình địa phương ?

b) Đồng hồ đeo tay có chính xác không ?

c) Giờ Quốc tế lúc ấy ?

d) Độ cao và độ phương của Mặt Trời lúc ấy ?

6. Một nguyệt thực bắt đầu lúc 20h 13ph giờ mặt trời trung bình địa phương. Theo lịch thiên văn thì nguyệt thực lần này bắt đầu lúc 15h 51ph giờ Quốc tế. Tính độ kinh của nơi quan sát ?

7. Năm 1941 có hai lần nhật thực và hai lần nguyệt thực: ngày 13 tháng 3 có nguyệt thực một phần, ngày 27 tháng 3 có nhật thực vành khuyên, ngày 5 tháng 4 có nguyệt thực một phần, ngày 21 tháng 10 có nhật thực toàn phần. Xác định vào năm nào gần năm 1941 nhất cũng có 4 nhật, nguyệt thực. Tính ngày, tháng của các nhật, nguyệt thực.

Hình III.23

QUESTIONS

Question 1. Determine the distance between Hanoi and Tokyo observatory along a great circle. Suppose that the Earth is a sphere of 6400km radius. The coordinates of Hanoi and Tokyo are ($\varphi_H = 21^o03'$, $\lambda_H = 105^o52'$) and ($\varphi_t = 35^o40'$, $\lambda_t = 139^o30'$), respectively.

Question 2. The declination of Sirius is $\delta = -16^o30'$. Determine its elevation and azimuth at its meridian transit with respect to an observer in Hanoi

($\varphi = 21^o03'$).

Question 3. The equatorial coordinates of the star Vega are 18^h34^m and 38^o. Determine its direction when the vernal equinox is on the meridian of an observer in Hanoi. Calculate its hour angle.

Question 4. Determine the elevation and azimuth of the Sun for an observer at latitude $+18^o40'$ at noon on March 21 (vernal equinox), June 22 (summer solstice), September 23 (autumnal equinox) and December 22 (winter solstice).

Question 5. On January 1 1998, the declination of the Sun is $-23^o04'$ and the equation of time is 3^m14^s. When the Sun is on the meridian through the city of Vinh ($\lambda = 105^o40'$, $\varphi = 18^o32'$) a clock indicates 12^h05^m.

a. Calculate local solar mean time.

b. Is the clock correct ?

c. Calculate the universal time.

d. Calculate elevation and azimuth of the Sun.

Question 6. A lunar eclipse begins at 20^h13^m local time. According to the astronomical almanac, the eclipse begins at 15^h51^m UT. Calculate the longitude of the place where the eclipse is observed.

Question 7. In 1941 there were 2 solar eclipses and 2 lunar eclipses: a partial lunar eclipse on March 13, an annular solar eclipse on March 27, a partial lunar eclipse on April 5, and a total solar eclipse on October 21. Determine the most recent year when there were also 4 eclipses. Calculate the dates of the eclipses.

Chương IV

BỨC XẠ VŨ TRỤ

PHÒNG THÍ NGHIỆM VŨ TRỤ

Vũ trụ là một phòng thí nghiệm khổng lồ, trong đó những thí nghiệm khoa học xảy ra một cách tự nhiên. Vũ trụ cung cấp cho các nhà khoa học một tập hợp rộng lớn các điều kiện vật lí để nghiên cứu. Một số quá trình vật lí xảy ra trong phòng thí nghiệm vũ trụ đòi hỏi môi trường khác xa với môi trường của các phòng thí nghiệm trên Trái Đất, đến nỗi Vũ trụ là nơi duy nhất mà chúng ta có thể nghiên cứu được những quá trình như thế.

Các nhà thiên văn quan sát các thiên thể trong Vũ trụ qua kính thiên văn quang học và kính thiên văn vô tuyến đặt trên mặt đất hoặc trên các con tàu vũ trụ. Kính thiên văn ghi tín hiệu trong các máy thu được tạo bởi các chất bán dẫn và siêu dẫn, giống như các máy thu được trang bị các thiết bị điện tử hiện đại như các máy quay phim và máy thu vô tuyến. Sau khi phân tích dữ liệu, các nhà thiên văn áp dụng các định luật vật lí và xây dựng các mô hình toán học để mô phỏng những hiện tượng quan sát được nhằm tìm hiểu cơ chế của bức xạ trên các thiên thể. Những mô hình đó có thể được dùng để tiên đoán những hiện tượng sắp diễn ra.

Vũ trụ chứa hàng trăm tỉ thiên hà. Mỗi thiên hà là một tập hợp khí và bụi khổng lồ trong đó có chứa các ngôi sao. Một số ngôi sao có hành tinh quay xung quanh. Các thiên hà cũng như các ngôi sao thường tập hợp lại thành từng đám. Mặt Trời và các hành tinh của nó, trong đó có Trái Đất, nằm trong một thiên hà, được gọi là Thiên Hà của chúng ta hay Dải Ngân Hà.

Bức xạ điện từ

Ánh sáng cũng như mọi bức xạ điện từ khác, bao gồm điện trường và từ trường biến thiên, lan truyền trong không gian với vận tốc ánh sáng. Quá trình lan truyền của sóng ánh sáng cũng giống như sự lan truyền của sóng trên mặt nước. Bức xạ điện từ bao gồm một dải rộng các bước sóng. Thí dụ, ánh sáng trắng (ánh sáng bình thường) như ánh sáng mặt trời có thể bị phân tích qua một lăng kính thành các bức xạ, có các màu của cầu vồng, từ tím tới đỏ. Tất cả mọi bức xạ được đặc trưng bởi bước sóng λ và tần số $\nu = c/\lambda$ của chúng.

Một cách tiếp cận khác để xác định bản chất của bức xạ là áp dụng quan niệm cho rằng bức xạ bao gồm các bó năng lượng, được gọi là photon hay lượng tử, truyền đi với vận tốc ánh sáng. Quan niệm này, coi bức xạ như những chùm hạt, là có thể hiểu được qua các thí nghiệm trong đó các hạt photon đánh bật electron ra khỏi mặt kim loại. Việc sử dụng quan niệm hạt cũng thuận tiện khi chúng ta nghiên cứu các quá trình hấp thụ và phát xạ bức xạ bởi các nguyên tử trong chất khí. Bởi vậy chúng ta có thể cho rằng bức xạ điện từ có lưỡng tính sóng hạt. Nó gồm cả các hạt (photon) và sóng.

Ánh sáng nhìn thấy chỉ có một dải bước sóng ngắn (giữa 0,4 μm (400 nm) và 0,8 μm (800 nm)). Bức xạ điện từ có bước sóng ngắn nhất là tia gamma và tia X. Bức xạ điện từ có bước sóng dài nhất là sóng vô tuyến. Bên cạnh vùng phổ quang học có vùng phổ cực tím (UV) và hồng ngoại (IR) tương ứng nằm ở dải bước sóng ngắn và dải sóng có bước sóng dài (hình IV.1). Phân bố bức xạ điện từ theo tần số hoặc theo bước sóng được gọi là phổ điện từ.

Chapter IV

COSMIC RADIATION

COSMIC LABORATORY.

The Universe is a giant laboratory in which scientific experiments take place naturally. It provides scientists with a wide range of physical conditions to study. Some physical processes occurring in the cosmic laboratory require environments so different from those of terrestrial laboratories that the Universe is the only place where such phenomena can be investigated.

Astronomers observe objects in the Universe through optical telescopes and radio telescopes installed on Earth or on board satellites. The telescopes record the signal in the detectors made of semiconductors and superconductors like those which equip modern electronic devices such as video cameras and television receivers. After analysing the data, astronomers use the laws of physics and build mathematical models to simulate the observed phenomena in order to understand the mechanisms of the radiation at work in the astronomical objects. The models can be used to predict the phenomena to occur.

There are hundreds of billions of galaxies in the Universe. These objects are huge complexes of gas and dust in which are embedded stars occasionally surrounded by planets. Galaxies as well as stars can gather in clusters. The Sun and its planets including the Earth lie inside a galaxy, the Milky Way, which is our own Galaxy.

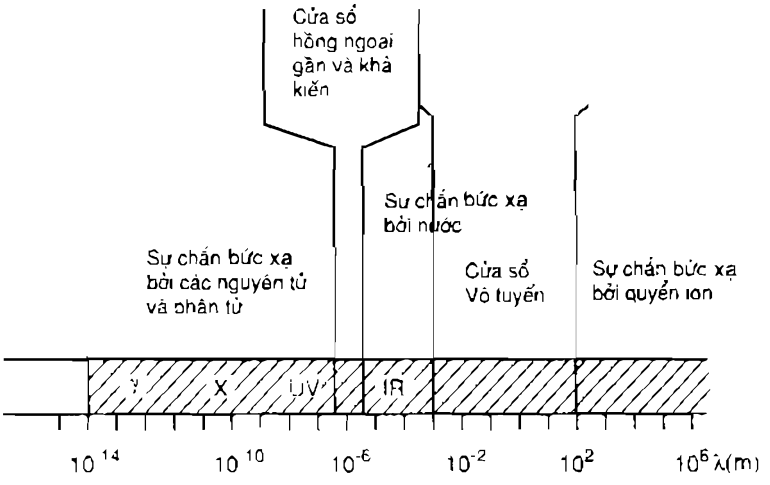
Electromagnetic radiation

Light, like any other electromagnetic radiation, consists of varying electric and magnetic fields with maxima and minima, propagating through space with the velocity of light c in a manner similar to that of waves moving along the surface of water. Electromagnetic radiation encompasses a large range of wavelengths. For instance, white (ordinary) light like the sunlight can be analyzed through a prism into radiations having the colors of the rainbow, from violet to red. All radiation is characterized by its wavelength λ and its frequency $\nu = c/\lambda$.

Another approach to define the nature of radiation is to use the concept that radiation consists of energy packets, called photons or quanta, travelling with the velocity of light. This concept, considering radiation as a stream of corpuscules, can be understandable in the experiments in which particles of photons eject electrons from a metal. It is also convenient to use the corpuscular concept when we study the processes of absorption and emission of radiation by atoms in a gas. We can therefore consider electromagnetic radiation as having a dual nature. It consists of both particles (photons) and waves.

Visible light has only a small range of wavelengths between 0.4 μm (400 nm) and 0.8 μm (800 nm). The shortest waves are gamma-rays and X-rays and the longest waves are radio waves. Next to the optical range there are the ultraviolet (UV) and infrared (IR) domains lying in the short wavelength range and in the long wavelength range, respectively (Figure IV.1). The distribution of electromagnetic radiation over frequency or wavelength is called the electromagnetic spectrum.

Bức xạ từ Vũ trụ gửi tới bị hấp thụ hoặc phản xạ bởi khí quyển Trái Đất trên một dải rộng của phổ điện từ. Tia gamma, tia X và bức xạ tử ngoại bị hấp thụ bởi các nguyên tử và phân tử trong khí quyển Trái Đất. Bức xạ hồng ngoại bị hấp thụ trong một vùng phổ rộng bởi các phân tử nước (H_2O) và đi-ô-xít các-bon. Sóng vô tuyến có bước sóng dài bị phản xạ ngược vào Vũ trụ bởi các lớp quyển ion ở phía trên khí quyển Trái Đất. Phần trên của khí quyển Trái Đất bị ion hoá bởi bức xạ cực tím của Mặt Trời. Trong khí quyển Trái Đất chỉ có hai cửa sổ phổ hẹp cho phép bức xạ vũ trụ truyền qua. Đó là:



Hình IV.1

Phổ điện từ bức xạ từ bên ngoài Vũ trụ không thể tới được mặt đất, ngoại trừ qua hai cửa sổ khí quyển: cửa sổ khả kiến - hồng ngoại gần và cửa sổ vô tuyến.

a) cửa sổ khả kiến và hồng ngoại gần, có bước sóng từ $\lambda \sim 0{,}4$ μm đến $\lambda \sim 3$ μm;

b) cửa sổ vô tuyến, có bước sóng từ $\lambda \sim 1$ mm đến $\lambda \sim 30$m.

Về nguyên tắc, một số phần trong cửa sổ phổ vô tuyến được bảo vệ nhằm tránh sự nhiễu tạo bởi các ra-đa và các trạm phát phóng trên mặt đất và trong không gian. Những tín hiệu vô tuyến do con người tạo ra phải được phát ngoài những phần của cửa sổ phổ vô tuyến được dành riêng cho thiên văn vô tuyến.

Kính thiên văn quang học và kính thiên văn vô tuyến milimét thường được lắp đặt trên các núi cao, ở đó khí quyển trong suốt hơn so với lớp khí quyển ở gần mặt đất nhằm cải thiện đến mức tối đa các điều kiện quan sát. Những vùng phổ nằm ngoài 2 cửa sổ kể trên, chỉ có thể tiếp cận được nhờ các thiết bị được lắp đặt trên các bóng thám không bay cao và trên các vệ tinh hoặc các tàu thăm dò vũ trụ ở ngoài khí quyển Trái Đất. Các nhà thiên văn cần phải quan sát không chỉ ở các bước sóng khả kiến mà còn cả trong vùng phổ điện từ càng rộng càng tốt nhằm nghiên cứu những điều kiện vật lí của các thiên thể.

Phổ bức xạ của các thiên thể

Trong chương này chúng ta nhắc lại những cơ chế phát bức xạ cơ bản của các bức xạ đến Trái Đất từ Vũ trụ. Khi dùng phổ kế phân tích bức xạ điện từ, bức xạ bị tách thành một dãy các vạch sáng và tối chồng lên trên một nền phổ liên tục.

Bức xạ liên tục trải dài từ tia gamma, tia X và sóng cực tím qua sóng quang học và hồng ngoại tới sóng vô tuyến. Cường độ của bức xạ liên tục và độ rộng của phổ của nó phụ thuộc vào quá trình bức xạ và những điều kiện vật lí, đặc biệt là nhiệt độ, mật độ và từ trường trong thiên thể. Sự phát xạ vạch phụ thuộc vào bản chất nguyên tử và phân tử có mặt trong khí quyển của thiên thể.

Figure IV.1

The electromagnetic spectrum. Radiation from outer space cannot reach the ground except through two atmospheric windows, the visible-near IR window and the radio window

Radiation from outer space is absorbed or reflected by the Earth's atmosphere in a large range of the electromagnetic spectrum. Gamma-rays, X-rays and UV radiation are absorbed by atoms and molecules in the atmosphere. Infrared radiation is absorbed in a large spectral domain by molecules of water (H_2O) and carbon dioxide (CO_2). Long wavelength radio waves are reflected back into space by the ionospheric layers of the upper terrestrial atmosphere, which is ionized by the ultraviolet radiation from the Sun. There exist only two narrow spectral windows in which the atmosphere is practically transparent to cosmic radiation:

a) the visible and near infrared window between $\lambda \sim 0.4$ μm and ~ 3 μm;

b) the radio window between $\lambda \sim 1$ mm and ~ 30 m.

Some parts of the radio window are, in principle, protected against interference produced by radars and broadcasting stations on the ground and in space. These man-made radio signals should be emitted outside the parts of the radio spectral window which are exclusively dedicated to radio astronomy.

Optical telescopes and millimeter radio telescopes are often installed on high mountains where the atmosphere is more transparent than at the ground level to improve as much as possible the observing conditions. The spectral ranges outside the two windows mentioned above are only accessible by instruments on board balloons flying at high altitudes and on satellites or space probes outside the terrestrial atmosphere. Astronomers need to observe not only at the visible wavelengths but also in a range of the electromagnetic spectrum as wide as possible, to investigate the physical conditions of the astronomical objects.

Radiation spectra of astronomical objects

In this chapter we review basic emission mechanisms for radiation reaching us from space. When electromagnetic radiation is analyzed by a spectrograph, it is spread in a series of bright and dark lines superimposed on a continuum background.

The continuum emission extends from gamma-rays, X-rays and ultraviolet waves through the optical and infrared waves to the radio waves. The intensity of the continuum and its spectral extent depend on the radiation process and on the physical conditions, in particular, the temperature, the density and the magnetic field in the astronomical object. Line emission depends on the nature of the atoms and molecules which exist in the atmosphere of the object.

SỰ PHÁT XẠ LIÊN TỤC

Sự phát xạ liên tục bắt nguồn từ hai quá trình chính. Đó là quá trình có bản chất nhiệt và quá trình không có bản chất nhiệt (còn gọi là quá trình phi nhiệt). Bức xạ nhiệt được phát ra bởi vật thể không trong suốt được nung nóng tới một nhiệt độ bất kì nào đó hoặc bởi một đám mây khí trong đó có các electron tự do chuyển động nhiệt hỗn loạn. Bức xạ phi nhiệt được phát ra bởi một đám mây khí trong đó các electron có năng lượng cao chuyển động nhanh được gia tốc trong một từ trường.

1) Bức xạ của vật đen là sự phát xạ nhiệt của một vật không trong suốt lí tưởng, được gọi là vật đen, có tính chất hấp thụ tất cả các bức xạ ở mọi bước sóng. Vật hấp thụ lí tưởng này đồng thời cũng là một vật phát xạ lí tưởng. Cửa của lò đốt hoạt động gần như một vật đen. Khi lò được hun nóng, cửa lò phát ra bức xạ vật đen. Sự phát xạ của các sao và các hành tinh, trong một chừng mực nào đó, có thể được xem như bức xạ nhiệt của vật đen.

2) Sự phát xạ nhiệt nảy sinh trong một đám mây khí, ở đó những nguyên tử bị ion hoá bởi các photon tử ngoại tới từ các ngôi sao hoặc do va chạm giữa các nguyên tử. Các electron tự do chuyển động hỗn loạn trong môi trường chứa ion. Những ion này dường như đứng yên đối với electron vì khối lượng của các ion lớn hơn nhiều so với electron. Các electron bị đổi hướng và bị gia tốc khi đi vào miền lân cận các ion phát bức xạ. Nhiệt độ của môi trường bị ion hoá phản ánh sự chuyển động nhiệt hỗn độn của electron. Những đám mây khí có màu sáng giữa các sao được gọi là tinh vân trong đó có chứa các ngôi sao nóng phát ra bức xạ nhiệt.

3) Bức xạ "phi nhiệt" phổ biến nhất đến từ Vũ trụ là bức xạ synchrotron. Bức xạ này được phát bởi các hạt tích điện, ví dụ như electron chuyển động với vận tốc gần bằng vận tốc ánh sáng (các electron tương đối tính) khi chúng gặp từ trường và được từ trường gia tốc. Bức xạ này sáng đến mức quá trình bức xạ không thể giải thích được trong phạm vi bức xạ nhiệt. Bức xạ phi nhiệt này đã quan sát được trong tàn dư của các sao đang bùng nổ và trong các thiên hà. Bức xạ này cũng được tạo ra trong phòng thí nghiệm trong một synchrotron là máy gia tốc hạt được dùng trong vật lí hạt nhân. Chính vì lí do đó mà bức xạ này được gọi là bức xạ synchrotron.

Các nhà thiên văn đo cường độ bức xạ của thiên thể ở các bước sóng khác nhau để vẽ phổ bức xạ của nó. Căn cứ vào hình dạng của phổ, người ta có thể phân biệt các cơ chế bức xạ nói trên. Những quá trình bức xạ nhiệt cho phép các nhà thiên văn xác định nhiệt độ của vật đen hoặc khí. Việc quan sát bức xạ synchrotron cho chúng ta biết thông tin về năng lượng của hạt tích điện và về từ trường tồn tại trong môi trường khí.

Sự phát xạ nhiệt từ một vật đen

Chúng ta hãy xem xét một phần tử bề mặt ds nằm trong bề mặt S đang phát ra bức xạ (hình IV.2). Chúng ta định nghĩa độ chói B_ν là năng lượng thu được trong một giây, trên một đơn vị độ rộng của dải sóng, qua một đơn vị diện tích và trên một đơn vị góc khối, từ phần tử ds nằm trong góc khối dω trong bầu trời. Steradian (st) là đơn vị của góc khối, là phần không gian nằm trong hình nón giới hạn bởi bề mặt ds. Độ chói B_ν được đo bởi $W/m^2/Hz/st$. Chú ý rằng oát (W) là đơn vị công suất tương đương với năng lượng phát ra trong một đơn vị thời gian (J/s).

CONTINUUM EMISSION.

The continuum emission arises from two main processes, the thermal and non-thermal processes. Thermal radiation is emitted by an opaque object heated at any temperature or by a gas cloud in which thermal free electrons move randomly. Non-thermal radiation is emitted by a gas cloud in which fast high energy electrons are accelerated in a magnetic field.

1) Black-body radiation is the thermal emission of an idealized opaque object called black body whose property is to absorb all radiations at all wavelengths. This perfect absorber is also a perfect emitter of radiation. The hole of a furnace behaves almost as a black body. When the furnace is heated, the hole emits black-body radiation. The emission of stars and planets to some extent can be considered as thermal black-body radiation.

2) Thermal emission arises in a gas cloud in which atoms are ionized by ultraviolet stellar photons or by collisions between atoms. Free electrons move randomly in a background of ions, which are nearly motionless with respect to electrons because the mass of ions is higher than that of electrons. The electrons, which are deflected and accelerated when they come in the vicinity of ions, emit radiation. The temperature of the ionized medium reflects the thermal random motion of electrons. Bright interstellar gas clouds called nebulae in which hot stars are embedded emit thermal radiation.

3) The most common non-thermal radiation coming from space is the synchrotron radiation emitted by charged particles, such as electrons travelling at velocities close to the velocity of light (relativistic electrons), when they encounter a magnetic field which accelerates them. This emission is so bright that the radiation process cannot be explained in terms of thermal radiation. Non-thermal emission is observed in the remnants of exploding stars and in galaxies. It is also produced in the laboratory in a synchrotron, which is an accelerator of particles used in nuclear physics. For this reason, this radiation is called synchrotron radiation.

Astronomers measure the intensity of an object at different wavelengths to draw its spectrum. According to the shape of the spectrum, they can distinguish between the above radiation mechanisms. Thermal radiation processes allow astronomers to probe the temperature of the black body or the gas. The observation of synchrotron radiation gives information on the energy of the particles and on the magnetic field in the gaseous medium.

Thermal emission from a black space body

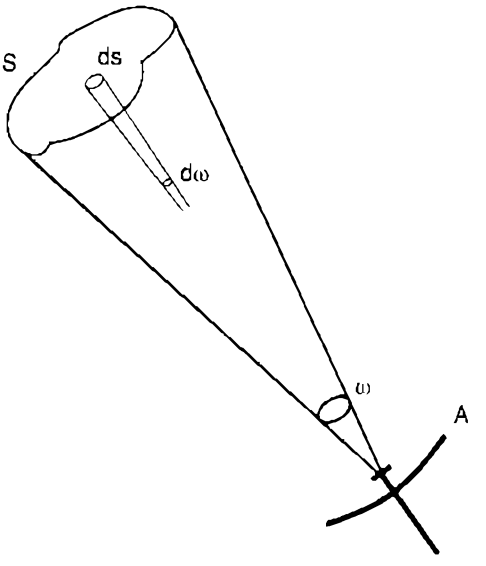
Let us consider an element of surface ds inside a surface S which emits radiation (Fig. IV.2). We define the brightness B_ν as the energy received per second, per unit of bandwidth, through a unit area and per unit of solid angle, from the element ds which subtends a solid angle $d\omega$ in the sky. Steradian (st) is the unit of solid angle that is the portion of space inside the cone which limits the surface ds. In the metric system, the brightness B_ν is then expressed in the unit $W/m^2/Hz/st$. Note that W (watt) is the unit of power which is equivalent to energy per unit of time (J/s).

Độ chói B_ν của bức xạ của vật đen chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ T của vật đen và tần số ν quan sát được. Độ chói được xác định theo công thức Planck được lập ra từ lí thuyết cơ học lượng tử :

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \qquad (4.1)$$

Trong đó c là vận tốc ánh sáng; h là hằng số Planck ($h=6{,}63.10^{-34}$J.s) và k là hằng số Boltzmann ($k= 1{,}38.10^{-23}$ W/Hz/K).

Những đường cong trên hình IV.3 biểu diễn hàm Planck như là hàm của tần số ứng với những nhiệt độ khác nhau của vật đen. Trước hết, chúng ta nhận thấy rằng các đường cong không cắt nhau và đạt giá trị cực đại tại những tần số khác nhau. Vị trí các cực đại của độ chói dịch về phía tần số cao khi nhiệt độ tăng lên, tuân theo định luật dịch chuyển Wien : $\nu_{max}(Hz) \approx 3kT/h \approx 6 . 10^{10} T (K)$



Hình IV.2

Độ chói của bức xạ từ Vũ trụ. A là ăng-ten.

Hình IV.3 : (Xem cuối chương)

Phổ Planck như là một hàm của nhiệt độ.

Độ chói cũng có thể được biểu diễn như là một hàm của bước sóng λ:

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \qquad (4.2)$$

Khi đó đơn vị của độ chói B_λ là $W/m^2/m/st$. Định luật dịch chuyển Wien trở thành $\lambda_{max}(m) \approx 2{,}9 . 10^{-3}/T (K)$.

Có thể tìm được định luật dịch chuyển Wien từ hàm Planck. Có nghĩa là cực đại của bức xạ của một ngôi sao nóng xảy ra ở tần số ν_{max} cao hơn (hoặc ở bước sóng λ_{max} ngắn hơn) so với cực đại bức xạ của một ngôi sao nguội. Bởi vậy trong vùng ánh sáng khả kiến, một ngôi sao nóng trông có màu xanh lam trong khi một ngôi sao nguội lại có màu đỏ. Thí dụ, một ngôi sao giống như Mặt Trời của chúng ta có nhiệt độ bề mặt khoảng 6000 K, phát xạ mạnh nhất ở bước sóng λ = 0,480 μm tương ứng với vùng xanh lam của phổ. Những ngôi sao lạnh hơn với nhiệt độ bề mặt vào cỡ 3000 K phát xạ chủ yếu ở vùng phổ hồng ngoại gần, với λ ~ 1 μm. Những hạt bụi trong không gian giữa các sao được đốt nóng bởi các sao, phát xạ ở các bước sóng dài hơn thuộc miền hồng ngoại xa có λ cỡ 100 μm. Phổ bức xạ vật đen đẳng hướng và phổ biến của Vũ trụ có dạng phổ phù hợp với đường cong Planck ở nhiệt độ T = 3K, có cực đại ở vùng phổ vô tuyến (hình IV.3). Bức xạ này là tàn dư của vụ nổ siêu lớn, gọi là Vụ nổ lớn (Big Bang), khai sinh ra Vũ trụ khoảng 15 tỉ năm về trước (xem chương XI).

Figure IV.2

Brightness of radiation from space. A is the antenna

The brightness of the black-body radiation B_ν depends only on the temperature T of the black body and on the observed frequency ν. It is determined from the Planck formula, which has been derived by using quantum mechanical theory :

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \qquad (4.1)$$

Here, c is the velocity of light, h the Planck constant (h = 6.63 x 10^{-34}J s) and k the Boltzmann constant (k = 1.38 x 10^{-23}W/Hz/K).

The series of curves in Figure IV.3 show the Planck function as a function of the frequency for various temperatures of the black body. We first notice that the curves do not intersect each other and peak at different frequencies. The position of the peak of maximum brightness shifts toward high frequencies when the temperature increases, according to the law ν_{max}(Hz) ≈ 3kT/h ≈ 6 x 10^{10} T (K) which is Wien's displacement law.

Figure IV.3

The Planck spectra as a function of temperature

The brightness can also be expressed as a function of wavelength λ:

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \qquad (4.2)$$

The unit of the brightness B_λ is now: W/m^2/m/st. The Wien's displacement law becomes: λ_{max}(m) ≈ 2.9 x 10^{-3}/T (K).

The Wien's displacement law can be derived from the Planck function. It means that the peak of radiation of a hot star occurs at a frequency ν_{max} higher (or a wavelength λ_{max} shorter) than that of the peak of radiation of a cool star. Therefore, in the visible a hot star looks blue while a cool star appears red. For instance, a star like our Sun whose surface temperature is about 6000 K radiates most strongly at λ = 0.480 μm, which corresponds to the blue region of the spectrum. Cooler stars with a surface temperature of ~ 3000 K, emit mostly in the near infrared at λ ~ 1 μm. Dust grains in the interstellar space (space between the stars) which are heated by stars emit at longer wavelengths, in the far-infrared around 100 μm. The spectrum of the isotropic and ubiquitous cosmic black-body radiation fits the Planck curve at 3 K, peaking in the radio spectral region (Fig.IV.3). This radiation is the remnant of the gigantic explosion, the Big Bang, which created the Universe some 15 billion years ago (see Chapter XI).

Năng lượng toàn phần của bức xạ tính được bằng cách tích phân đường cong Planck theo tất cả các tần số bằng σT^4. Đây là định luật Stefan-Boltzmann, với $\sigma = 5{,}7.10^{-8} W/m^2/K^4$. Định luật này nói lên rằng năng lượng tăng rất nhanh theo nhiệt độ. Vì lẽ đó, một diện tích phát xạ trên bề mặt một ngôi sao màu xanh lam phát ra nhiều năng lượng hơn cùng một diện tích trên bề mặt một ngôi sao màu đỏ.

Nếu tần số bức xạ không quá cao và nhiệt độ bức xạ không quá thấp sao cho $h\nu/kT<<1$ thì phương trình (4.1) có dạng gần đúng: $B_\nu = 2kT\nu^2/c^2$ hoặc $B_\lambda = 2kT/\lambda^2$. Nó được gọi là định luật gần đúng Rayleigh - Jeans. Năng lượng bức xạ bởi một vật thể ở một tần số xác định có thể được đặc trưng bởi một nhiệt độ chói T_b, là nhiệt độ của vật đen tương đương phát ra cùng một lượng năng lượng ở cùng tần số, $B_\nu = 2kT_b\nu^2/c^2$. Hệ thức này thường được các nhà thiên văn vô tuyến sử dụng để tính toán trong miền sóng có bước sóng bằng hoặc lớn hơn bước sóng centimet. Trong trường hợp này, độ chói B_ν tỉ lệ thuận với nhiệt độ chói T_b.

Sự phát xạ nhiệt từ khí bị ion hoá

Các đám mây khí giữa các sao được nung nóng và bị ion hoá bởi các photon ở bước sóng tử ngoại phát ra từ các ngôi sao. Trong những đám mây này, các electron tự do bứt ra từ các nguyên tử hiđrô trung hoà phát bức xạ nhiệt khi chúng bị đổi hướng bởi các proton. Bức xạ được phát ra tương tự như nhiễu được tạo bởi một điện trở bị đốt nóng.

Nhiệt biểu để dò tìm các tinh vân khí

Các quan sát vô tuyến thường được dùng để dò tìm khí bị ion hoá. Như trên đã nói, trong dải tần vô tuyến, độ chói B_ν tỉ lệ với nhiệt độ chói T_b, T_b phụ thuộc vào nhiệt độ của electron T_e. Một khối khí bị ion hoá không hoàn toàn trong suốt đối với bức xạ do nó phát ra. Nó phát xạ nhưng đồng thời nó cũng hấp thụ một phần bức xạ truyền qua nó. Nếu từ Trái Đất, chúng ta quan sát đám mây khí bị ion hoá này, chúng ta ghi nhận được nhiệt độ chói T_b:

$$T_b = T_e - T_e.\exp(-\tau) \qquad (4.3)$$

Biểu thức này nói lên rằng nhiệt độ chói quan sát được tương ứng với nhiệt độ electron T_e trong thể tích khí này trừ đi phần bức xạ bị mất mát ở trong đám mây khí. Độ dày quang học (hay độ chắn sáng) τ của đám mây khí là một hàm của độ dày của đám mây, nhiệt độ của nó và mật độ electron. Hệ thức trên cho ta thấy rằng nhiệt độ chói T_b của một nguồn vô tuyến đang phát bức xạ nhiệt không thể cao hơn nhiệt độ electron T_e. Nếu môi trường gần như trong suốt (rất mỏng về quang học, $\tau << 1$) thì từ (4.3) ta có $T_b \sim \tau T_e$. Đối với một nguồn dày về quang học ($\tau >> 1$) thì T_b bằng T_e. Trong trường hợp này môi trường đó đóng vai trò một vật đen, là một vật thể chắn sáng ở một nhiệt độ T_e và nhiệt độ của nó có thể được xác định trực tiếp từ nhiệt độ chói quan sát được. Bức xạ nhiệt được phát hiện trong các tinh vân, ở đó có chứa một hoặc một vài sao nóng sáng và ở đó nhiệt độ của electron thường thấp hơn 10^4 K. Sự phát bức xạ nhiệt liên tục từ các vùng chứa hiđrô bị ion hoá được phát hiện từ miền sóng khả kiến đến miền sóng vô tuyến.

The total energy of the radiation obtained by integrating the Planck curve over all frequencies is equal to σT^4. This is the Stefan-Boltzmann law, with $\sigma = 5.7 \times 10^{-8}$ W/m^2/K^4. This law indicates that the energy greatly increases with the temperature. An emitting area on the surface of a blue star emits therefore much more energy than the same area on the surface of a red star.

If the frequency is not too high and the temperature not too low such that $h\nu/kT << 1$, equation 4.1 is simplified to become $B_\nu = 2kT\nu^2/c^2$ (or $B_\lambda = 2kT/\lambda^2$). This law is called the Rayleigh-Jeans approximation law. The energy radiated by a body at a given frequency can be characterized by a brightness temperature T_b which is the temperature of an equivalent black body emitting the same amount of energy at that frequency, $B_\nu = 2kT_b\nu^2/c^2$. This relation is used by radio astronomers in the region of wavelengths equal or longer than the centimeter wavelengths. In this case, the brightness B_ν is simply proportional to the brightness temperature T_b.

Thermal emission from ionized gas

The interstellar gas clouds are heated and ionized by ultraviolet stellar photons. In these clouds, free electrons stripped from neutral hydrogen atoms emit thermal radiation when they are deflected by protons. The emitted radiation is similar to the noise produced by a heated resistor.

A thermometer to probe gaseous nebulae

Radio observations are commonly used to probe the ionized gas. As mentioned above, in the radio frequency band the brightness B_ν is proportional to the brightness temperature T_b, which depends on the electronic temperature, T_e (temperature of electrons). A volume of ionized gas is not completely transparent to the emitted radiation. It emits radiation but also absorbs part of the radiation propagating through it. If we observe this ionized cloud from the Earth, we detect a brightness temperature :

$$T_b = T_e - T_e \exp(-\tau) \qquad (4.3)$$

This relation simply expresses that the observed brightness temperature corresponds to the temperature in the volume of gas (temperature of electrons T_e) reduced by the fraction of the radiation lost in the gas cloud. The opacity τ of the gas cloud is a function of the thickness of the cloud, its temperature and the electron density. The above relation shows that the brightness temperature T_b of a radio source emitting thermal emission cannot exceed the electronic temperature T_e. If the medium is almost transparent (optically thin, $\tau << 1$), one gets from relation (4.3) $T_b \sim \tau T_e$. For an optically thick source ($\tau >> 1$), T_b is equal to T_e. In this case, the medium behaves like a black body, that is an opaque object at a temperature T_e, and its temperature can be directly determined from the observed brightness temperature. Thermal emission is detected in nebulae in which one or several hot stars are embedded and where the electronic temperature is usually smaller than $\sim 10^4$ K. Thermal continuum emission from regions of ionized hydrogen is detected from the visible to the radio wavelengths.

Nguồn bức xạ nhiệt

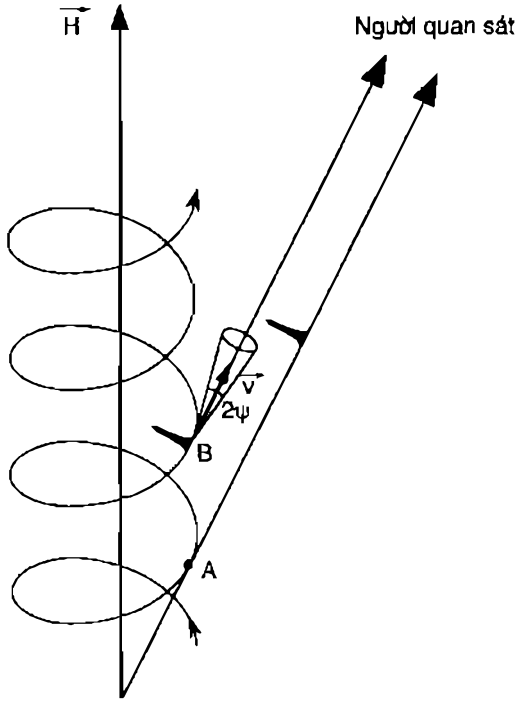
Các đám mây khí bị ion hoá hiện ra trong vùng bức xạ khả kiến như là những tinh vân khí nóng sáng. Chúng được gọi là những vùng HII (ngược với những vùng chứa khí hiđrô trung hoà HI). Miền HII chủ yếu bao gồm các electron và ion được tạo thành từ sự ion hoá các nguyên tử hiđrô và các-bon bởi bức xạ tử ngoại phát ra từ các sao nóng nằm trong các đám mây. Đôi khi các miền khí HII được bao bởi một viền sáng đặc trưng cho khu vực tương tác giữa các photon đang ion hoá do các sao phát ra với môi trường trung hoà xung quanh các sao. Môi trường của những vùng HII này thường là nơi chứa đựng các sao rất trẻ đang bắt đầu hình thành (tiền sao). Miền HII phát bức xạ nhiệt vô tuyến, là thành phần nhiệt của Thiên Hà của chúng ta.

Bức xạ synchrotron phi nhiệt

Nhiệt độ chói vượt quá hàng trăm ngàn độ Kelvin, quan sát được trong nhiều tinh vân, không thể giải thích được trong khuôn khổ bức xạ nhiệt. Nhiệt độ chói cao này có nguồn gốc từ các quá trình bức xạ phi nhiệt, trong đó các electron có năng lượng rất lớn chuyển động xoắn ốc trong từ trường. Ngược với bức xạ của vật đen và bức xạ nhiệt của khí bị ion hoá, trong trường hợp bức xạ phi nhiệt chúng ta không thể xác định một cách trực tiếp nhiệt độ môi trường qua cường độ bức xạ quan sát được.

Vai trò của từ trường

Khi một electron chuyển động trong từ trường với vận tốc tương đối tính (gần với vận tốc ánh sáng), quỹ đạo của nó là một đường xoắn ốc có trục song song với phương từ trường H (hình IV.4). Bức xạ tập trung cao độ trong một hình nón hẹp có góc mở $\Psi = m_0c^2/E$, có trục hướng theo hướng của véc tơ vận tốc tức thời v của eletron. E là năng lượng của electron, m_0 là khối lượng nghỉ của electron và c là vận tốc ánh sáng. Vì $m_0c^2 = 0{,}5.10^6$ eV nên đối với một electron mang năng lượng 1 GeV= 10^9 eV, góc Ψ chỉ cỡ 1,7 phút cung. Người quan sát nhận được một xung bức xạ ngắn mỗi khi, trong quá trình chuyển động theo đường xoắn ốc của mình, electron chuyển động theo phương tiếp tuyến với phương ngắm. Người quan sát thấy một loạt xung ngắn lặp lại với tần số rất nhanh, như là một phổ chuẩn liên tục.



Hình IV.4

Quỹ đạo của electron trong từ trường. Bức xạ synchrotron.

Tần số mà ở lân cận nó, bức xạ synchrotron đạt cực đại là $\nu_{max} \approx 16\ H_E^2$; ν được đo bởi MHz, E bởi GeV và thành phần từ trường $H_\perp$ vuông góc với vận tốc của electron được đo bởi micrô gauss (10^{-10} tesla). (Trong thực tế, $H_\perp$ là thành phần từ trường vuông góc với phương ngắm). Tần số bức xạ của một electron có năng lượng 1 GeV (10^9 eV) chuyển động trong từ trường của các thiên hà có độ lớn 10 micrô gauss là 160 MHz và nằm trong vùng phổ vô tuyến. Các electron mang năng lượng hàng ngàn GeV phát xạ ở vùng sóng khả kiến.

Sources of thermal emission

Ionized gas clouds appear in the visible as luminous gaseous nebulae. They are called HII regions (as opposed to HI regions of neutral gas) and consist mostly of electrons and ions resulting from the ionization of hydrogen and carbon atoms by the ultraviolet radiation of hot stars embedded in the clouds. They are sometimes bounded by a bright rim which represents the zone of interaction between the ionizing stellar photons and the ambient neutral medium between the stars. The environment of these HII regions often harbors very young stars, which are still beginning to form (protostars). HII regions emit thermal radio emission which constitutes the thermal component of our Galaxy.

Non-thermal synchrotron radiation

Brightness temperatures exceeding hundreds of thousands Kelvin, observed in many nebulae, cannot be interpreted in terms of thermal radiation. These high brightness temperatures arise from non-thermal processes in which very high energy electrons are spiralling in magnetic fields. Contrarily to the black-body radiation and the thermal emission from ionized gas, in the case of non-thermal radiation, it is impossible to determine directly the temperature of the medium from the observed intensity.

Role of magnetic field

When an electron moves in a magnetic field at a relativistic velocity (close to the velocity of light), its trajectory has the shape of a helix whose axis is in the direction of the magnetic field H (Fig. IV.4). The emission is strongly concentrated into a narrow cone of half-angle $\psi = m_0c^2/E$, the axis of the cone being oriented toward the direction of the instantaneous velocity vector v of the electron. E is the energy of the electron, m_0 is the mass of the electron when it is at rest (rest mass), and c is the velocity of light. Since $m_0c^2 = 0.5 \times 10^6$ eV, for an electron of 1 GeV (Giga electron-volt, 10^9 eV), the cone angle ψ is only 1.7 minute of arc. The observer receives a short pulse of radiation whenever the electron in its spiralling motion momentarily moves tangentially to the line of sight. He sees a series of short pulses, which repeat at a very rapid frequency, as a quasi continuous spectrum.

Figure IV.4

The trajectory of electrons in a magnetic field. Synchrotron radiation

The frequency near which the synchrotron emission is maximum is $\nu_{max} \approx 16\ H_\perp E^2$; ν is expressed in MHz, E in Gev and the component of the magnetic field $H_\perp$ perpendicular to the electron velocity in microgauss (10^{-10} Tesla). ($H_\perp$ practically is the component of the magnetic field perpendicular to the line of sight). The emission frequency of a 1 GeV (10^9 eV) electron moving in a 10 microgauss galactic magnetic field is 160 MHz and lies in the radio frequency range. Electrons of a few thousand GeV emit in the visible.

Cường độ bức xạ synchrotron do đám mây electron phát ra phụ thuộc vào sự phân bố năng lượng electron và từ trường trong đám mây. Sự phân bố năng lượng của các electron tương đối tính thường được biểu diễn theo một quy luật hàm mũ, $N(E) \propto E^{-\gamma}$. Thông lượng bức xạ synchrotron cũng biến thiên như là một hàm mũ của tần số, $F \sim \nu^{-(\gamma-1)/2}$ với $\gamma > 1$. Như vậy bức xạ synchrotron ở các tần số thấp hơn sẽ mạnh hơn.

Bức xạ synchrotron bị phân cực rất mạnh khi từ trường được phân bố đồng đều trong đám mây electron. Do trong thực tế từ trường trong môi trường giữa các sao được phân bố một cách ngẫu nhiên nên độ phân cực bé. Quan sát bức xạ synchrotron trong Vũ trụ là một trong những phương pháp được sử dụng để phát hiện sự có mặt của từ trường giữa các sao. Từ trường này có độ lớn trung bình cỡ $10^{-6} - 10^{-5}$ Gauss ($10^{-10} - 10^{-9}$ tesla).

Nguồn bức xạ phi nhiệt

Những ngôi sao có khối lượng lớn, ở giai đoạn cuối cùng trong cuộc đời của chúng, trải qua những vụ nổ mãnh liệt gọi là vụ nổ sao siêu mới. Tàn dư của những vụ nổ này chứa các hạt có năng lượng cao (xem chương VIII.B). Những hạt tương đối tính này bị nhốt trong từ trường giữa các sao bao quanh. Cường độ từ trường này tăng lên bởi sóng nổ được tạo ra bởi các vụ nổ. Bởi vậy, hình ảnh của các tàn dư vụ nổ sao siêu mới này thường có dạng của một vỏ rỗng. Tàn dư vụ nổ sao siêu mới là nguồn bức xạ synchrotron rất mạnh ở vùng sóng vô tuyến. Tốc độ của các vụ nổ sao siêu mới trong Thiên Hà của chúng ta vào khoảng một vụ nổ trong 100 năm. Vụ nổ sao siêu mới nổi tiếng nhất trong Dải Ngân Hà, được quan sát thấy vào năm 1054, và tàn dư của nó, được gọi là "Tinh vân Con Cua", hiện là một đối tượng thiên văn được nhiều người biết đến (xem hình VIII.10). Trong đám tinh vân này, vật chất sao được bắn vào không gian giữa các sao với vận tốc hàng nghìn km/s, trong khi đó nhân sao bị nén rất mạnh trở thành pulsar. Tinh vân Con Cua cũng là một nguồn bức xạ synchrotron mạnh cả ở vùng sóng khả kiến và vùng sóng vô tuyến. Vụ nổ sao siêu mới đầu tiên được quan sát bằng mắt thường, kể từ vụ nổ được phát hiện bởi Kepler vào năm 1604, đã được phát hiện vào năm 1987. Vụ nổ này xảy ra trong thiên hà ở gần chúng ta nhất, Đám mây Magenllan lớn, cách Trái Đất $1,6.10^5$ năm ánh sáng. Vận tốc của vật chất bắn ra lớn vào cỡ 25000 km/s đã được phát hiện.

Những thiên hà khác, giống như Thiên Hà của chúng ta, cũng phát bức xạ synchrotron phi nhiệt.

SỰ PHÁT XẠ VẠCH - QUANG PHỔ HỌC

Phổ quang học của các sao gồm các vạch phát xạ và hấp thụ hẹp nằm trên một nền liên tục. Vạch phát xạ hiện ra sáng hơn nền phổ liên tục ở cạnh nó và được tạo ra bởi sự phát bức xạ ưu tiên ở một bước sóng xác định. Vạch hấp thụ hiện ra tối hơn nền phổ liên tục ở lân cận nó và được tạo ra bởi sự hấp thụ ưu tiên của nền liên tục ở một bước sóng xác định. Nếu khí chứa trong khí quyển của sao nóng hơn bề mặt sao thì khí sẽ phát ra một dãy các vạch phổ có bước sóng xác định đặc trưng cho các nguyên tố chứa trong khí. Những vạch phát xạ sẽ được phát hiện trên nền phổ liên tục được phát xạ bởi bề mặt sao. Tương tự như vậy, khi khí nguội hơn bề mặt sao nằm dưới nó thì khí sẽ hấp thụ năng lượng của phổ liên tục tại một số bước sóng và kết quả là một dãy các vạch hấp thụ xuất hiện trên nền bức xạ liên tục (xem hình VII.3). Tổng quát hơn, phổ của môi trường giữa các sao cho biết dấu vết của cả các nguyên tử và phân tử. Mỗi hoá chất có một kiểu các vạch phổ riêng đặc trưng cho nó. Việc nghiên cứu phổ cho phép các nhà thiên văn xác định được thành phần hoá học của khí quyển sao và các đám mây giữa các sao.

The intensity of the synchrotron radiation from a cloud of electrons depends on the distribution of the electron energy and on the magnetic field in the cloud. The energy distribution of the relativistic electrons is usually assumed to follow a power law, $N(E) \propto E^{-\gamma}$. The flux of the synchrotron emission varies also as a power law of the frequency, $F \sim \nu^{-(\gamma-1)/2}$ with $\gamma > 1$. Thus the synchrotron radiation is stronger at lower frequencies.

The synchrotron emission is highly polarized when the magnetic field is uniformly distributed in the electron cloud. Since the magnetic field in the interstellar medium (between the stars) is actually randomly distributed, the degree of polarization is small. The observation of the synchrotron radiation in space is one of the methods used to reveal the presence of an interstellar magnetic field, which is on the average in the range 10^{-6} – 10^{-5} gauss (10^{-10} to 10^{-9} Tesla).

Non-thermal sources

Evolved massive stars undergo spectacular explosions, the supernovae, whose remnants contain high energy particles (see Chapter VIII.B). These relativistic particles are trapped in the surrounding interstellar magnetic field whose strength is increased by the blast wave created by the explosion. Therefore the image of these supernova remnants often has the shape of a hollow shell. Supernova remnants are powerful synchrotron sources of radio emission. The rate of supernova explosions in our Galaxy is about one every 100 years. The most famous supernova explosion, in the Milky Way, was observed in 1054, and its remnant, christened the "Crab Nebula", is nowadays a popular astronomical object (see Fig. VIII.10). In this nebula, stellar matter was ejected into interstellar space at velocities of thousands of kilometers per second, while the highly compressed core became a pulsar. The Crab nebula is also a strong synchrotron source, both in the visible and at radio wavelengths. The first naked-eye supernova explosion since the event detected by Kepler in 1604 was discovered in 1987. It happened in the closest galaxy, the Large Magellanic Cloud, located at 1.6×10^5 light years from the Earth. A velocity outflow as high as 25000 km/s has been detected.

Other galaxies like ours also emit non-thermal synchrotron radiation.

LINE EMISSION - SPECTROSCOPY.

Optical spectra of stars exhibit narrow emission and absorption lines superimposed on a continuum background. An emission line appears brighter than the adjacent continuum and is caused by the preferential emission of the radiation at a particular wavelength. An absorption line appears darker than the neighboring continuum and is caused by the preferential absorption of the continuum background at a specific wavelength. If the gas in the stellar atmosphere is hotter than the stellar surface, the gas emits a series of lines at well determined wavelengths, characterizing the atomic species it contains. The lines are then detected in emission above the continuum emitted by the stellar surface. Similarly, when the gas is cooler than the underlying stellar surface, the gas substracts the energy from the continuum at some wavelengths, and a series of lines appear in absorption against the continuum (See Fig.VII.3). More generally, the spectra of the interstellar medium show the signature of both atoms and molecules. Each chemical element has its own pattern of lines. The inspection of a spectrum allows astronomers to determine the chemical content of the stellar atmosphere and the interstellar clouds.

Phổ kế được dùng để nghiên cứu phổ bức xạ. Trong vùng phổ khả kiến, phổ kế là một thiết bị được tạo chủ yếu bởi một bộ phận, ví dụ lăng kính, làm nhiệm vụ phân tích ánh sáng trắng (như ánh sáng mặt trời) theo các bước sóng. Đường đi của tia sáng bị đổi hướng do hiện tượng khúc xạ xảy ra khi ánh sáng đi vào và đi ra khỏi lăng kính. Ánh sáng xanh lam, có bước sóng ngắn hơn, bị khúc xạ mạnh hơn ánh sáng đỏ. Hiện nay các nhà thiên văn thường sử dụng cách tử nhiễu xạ, gồm một tấm gương phẳng hoặc một bản thuỷ tinh mỏng trên đó có khắc nhiều khe thẳng, song song. Sóng ánh sáng đã phản xạ hoặc truyền qua thiết bị phân tích này giao thoa với nhau, bởi vậy theo một hướng xác định chúng loại trừ nhau, chỉ trừ ở một vài bước sóng đặc biệt. Cần phải có một khe vào để nhận được chùm sáng xác định trước khi chùm sáng tới thiết bị phân tích. Phổ thu được được ghi bởi máy thu điện tử hoặc kính ảnh. Trong thiên văn vô tuyến, tín hiệu vô tuyến từ thiên thể gửi đến được phân tích bởi phổ kế vô tuyến chứa nhiều "kênh tần số" hẹp cạnh nhau bao một băng tần rộng của phổ. Các nhà thiên văn vô tuyến thường hay nói về bức xạ vô tuyến bởi tần số ν của nó, là đại lượng tỉ lệ nghịch với bước sóng λ.

VẬT LÍ NGUYÊN TỬ

Trong chương này, chúng ta sẽ điểm qua một số khái niệm cơ bản của vật lí nguyên tử và phân tử.

Nguyên tử gồm một hạt nhân được tạo bởi proton và neutron và một số electron quay quanh hạt nhân. Trong một nguyên tử, số proton (mang điện tích dương) bằng số electron (mang điện tích âm), bởi vậy nguyên tử trung hoà về điện. Nguyên tử đơn giản nhất là nguyên tử hiđrô, chỉ có một proton ở hạt nhân và một electron quay xung quanh hạt nhân. Sự hình thành phổ thường có thể được trực quan hoá theo mẫu Bohr về nguyên tử hiđrô. Electron quay xung quanh proton có thể có những quỹ đạo khác nhau tương ứng với các mức năng lượng khác nhau. Electron chỉ có thể nhảy từ quỹ đạo này sang quỹ đạo khác một cách gián đoạn, tuân theo các định luật cơ học lượng tử.

Quỹ đạo của electron ở gần proton nhất tương ứng với mức năng lượng thấp nhất. Một cách tổng quát, năng lượng của mọi nguyên tử đều bị lượng tử hoá thành một dãy các mức gián đoạn (xem hình IV.5). Các mức năng lượng được đánh số từ n = 1 tới n = 2, 3... và n được gọi là số lượng tử chính. Mức năng lượng thấp nhất ứng với số lượng tử chính n = 1 được gọi là trạng thái cơ bản và các mức ứng với các số lượng tử chính cao hơn (n > 1) được gọi là các trạng thái kích thích. Sự chênh lệch năng lượng giữa 2 mức kề nhau giảm khi năng lượng tăng, bởi vậy các mức năng lượng cao ở gần nhau. Nếu khí ở nhiệt độ rất thấp (ví dụ gần nhiệt độ không tuyệt đối, 0K) thì các electron trong nguyên tử của khí đó sẽ ở trạng thái năng lượng thấp nhất, tức là trạng thái cơ bản. Các bước nhảy năng lượng từ một mức tới một mức khác tương ứng với sự sắp xếp lại năng lượng phụ thuộc vào quỹ đạo electron. Nếu các photon từ ngoại từ các ngôi sao rọi tới đám mây khí thì các electron trong đám khí có thể bị kích thích tới các mức kích thích cao hơn, hoặc thậm chí bị đánh bật ra khỏi nguyên tử. Nếu các electron bị đánh bật ra khỏi nguyên tử, chúng ta nói nguyên tử bị ion hoá và các electron chuyển động tự do bên ngoài nguyên tử bị ion hoá. Đối với nguyên tử hiđrô, năng lượng kích thích phải lớn hơn năng lượng ion hoá, 13,6 eV (xem hình IV.5)

Hình IV.5: (Xem cuối chương)

Sự dịch chuyển giữa các mức năng lượng thấp nhất của nguyên tử hiđrô

A spectrograph is used to study the spectrum of the radiation. In the visible spectral region, the spectrograph is a device consisting mainly of a unit, for instance a prism, which disperses the white light (like sunlight) according to the wavelengths. The path of the light is deflected by refraction while entering and leaving the prism. Blue light, which has a shorter wavelength, is more refracted than red light. Nowadays, astronomers often use a diffraction grating, which consists of a flat mirror or a sheet of glass on which are etched a large number of straight and parallel grooves. The light waves reflected or transmitted through this dispersing device interfere with one another, so that in a given direction they cancel out, except for a few specific wavelengths. There must be an entrance slit to have a well-defined beam of light before the beam reaches the dispersing device. The resultant spectrum is recorded with an electronic detector or a photographic plate. In radio astronomy, the radio signal coming from an astronomical object is analysed by a radio spectrograph having a large number of adjacent narrow "frequency channels" covering a large band of frequency spectrum. Radio astronomers often refer to radio emission by its frequency ν, which is inversely proportional to the wavelength λ.

ATOMIC PHYSICS.

In this chapter, we shall review briefly some basic notions of atomic and molecular physics.

An atom consists of a nucleus made of protons and neutrons, about which revolve a number of electrons. The number of protons (with positive electric charge) in an atom is equal to the number of electrons (with negative electric charge) so that the atom is electrically neutral. The simplest atom is the hydrogen atom which has a single nuclear proton and a single orbiting electron. The formation of the spectrum usually can be visualized in terms of the Bohr model for the hydrogen atom. The electron revolving around the proton can have various orbits corresponding to different energies. The electron can only jump from one orbit to another in a discrete (discontinuous) manner, according to the laws of quantum mechanics.

The electron orbit closest to the proton corresponds to the lowest energy. More generally, the energy of any atom is quantized in a series of discrete levels (Fig. IV.5). The energy levels are numbered from $n=1$ to $n= 2, 3$ ...., and n is called the quantum number. The lowest level with quantum number $n=1$ is called the ground state and levels with higher quantum numbers ($n>1$) are the excited states. The energy difference between the adjacent levels decreases as the energy increases so that high energy levels are close together. If the gas is at very low temperature (e.g. near absolute zero temperature, zero Kelvin), its electrons in the atoms are in the lowest energy state, that is the ground state. The energy jumps from one level to the other correspond to the energetic rearrangement depending upon the electron orbits. If the ultraviolet photons from stars shine on the gas cloud, electrons can be excited to higher excited levels or even ejected from the atom. In the latter case, the atom is ionized and the electrons move freely outside the ionized atom. For a hydrogen atom, the excitation energy should then be larger than the ionization energy, 13.6 ev (see Fig.IV.5).

Fig. IV.5

Transitions between the lowest energy levels of atomic hydrogen

Một photon với tần số ν được phát xạ hoặc hấp thụ khi electron nhảy từ một trạng thái lượng tử này sang một trạng thái lượng tử khác. Tần số ν của sự chuyển từ một mức năng lượng tới một mức năng lượng khác tỉ lệ với sự chênh lệch năng lượng ΔE giữa hai mức, tuân theo hệ thức $\Delta E = h\nu$. Một sự chuyển từ một mức cao hơn tới một mức thấp hơn tạo ra một vạch phổ phát xạ. Quá trình này có thể xảy ra một cách tự phát trong đám mây khí hoặc có thể xảy ra do sự va chạm với các nguyên tử khác. Mặt khác, khi bức xạ đi vào đám mây khí, một số nguyên tử ở trong đám mây có thể bị kích thích tới các mức năng lượng cao hơn, tạo nên một dãy các vạch phổ hấp thụ. Một photon được phát xạ khi năng lượng của electron giảm và một photon bị hấp thụ khi năng lượng của electron tăng. Về nguyên tắc, vạch phổ phát xạ của nguyên tử xuất hiện chỉ ở một tần số đơn lẻ. Tuy nhiên, các nguyên tử trong một đám mây giữa các sao chuyển động nhiệt hỗn độn. Kết quả là vạch phổ bị nhoè ra nhiều hoặc ít nhưng tâm của nó nằm ở tần số nghỉ (tương ứng với hạt ở trạng thái nghỉ) đặc trưng cho nguyên tử.

Vạch phổ hiđrô mạnh nhất thường được phát hiện ra trong các tinh vân nóng sáng là vạch phát xạ H_α có bước sóng $\lambda = 0{,}6563\ \mu m$ (6563 A°) ở vùng phổ phổ khả kiến. Vạch màu đỏ này xuất hiện do sự chuyển giữa mức 3 và mức 2 (xem hình VI. 5) thuộc về dãy Balmer tương ứng với những sự chuyển mức liên kết các mức năng lượng bị kích thích khác ($n > 2$) với mức năng lượng bị kích thích đầu tiên ($n = 2$) của nguyên tử hiđrô. Các vạch khác trong dãy này được gọi là H_β, H_γ... Sự chuyển giữa các mức năng lượng cao ($n \geq 2$) và mức năng lượng ở trạng thái cơ bản $n = 1$ thuộc về dãy Lyman (Ly_α, Ly_β, Ly_γ...). Sự phát xạ phổ liên tục được tạo ra khi các electron tự do bị bắt giữ bởi các proton vào các mức nguyên tử gián đoạn.

Vạch phổ 21 cm của nguyên tử hiđrô trung hoà

Vạch phổ vô tuyến được phát xạ bởi các nguyên tử hiđrô trung hoà tương ứng với sự chuyển giữa hai mức năng lượng con ở cạnh nhau trong trạng thái năng lượng cơ bản (thấp nhất) $n = 1$ (xem hình IV.5). Electron và proton của nguyên tử hiđrô đều có mômen xung lượng khi chúng tự quay xung quanh trục của chúng. Khi spin của chúng định hướng như nhau (song song) thì trạng thái năng lượng của nguyên tử hơi cao hơn so với trạng thái năng lượng khi các spin có hướng ngược nhau (đối song). Sự phát xạ một photon tương ứng với sự chuyển từ định hướng song song tới định hướng đối song. Vì sự chênh lệch năng lượng giữa hai trạng thái rất bé nên bức xạ được phát ra ở vùng sóng vô tuyến ở bước sóng 21 cm (tần số 1420,4 MHz). Tuy nhiên, đối với mỗi nguyên tử hiđrô, sự chuyển dời một cách tự phát từ một trạng thái cao hơn về một trạng thái thấp hơn là rất hiếm vì nó chỉ diễn ra một lần trong 11 triệu năm. Sự va chạm với những hạt khác, đặc biệt là với electron, có thể khởi tạo sự phát bức xạ cảm ứng và làm tăng một cách đáng kể tốc độ phát xạ. Những sự kiện va chạm vẫn rất hiếm trong điều kiện mật độ và nhiệt độ của môi trường giữa các sao và xảy ra một lần trong 400 năm. Mặc dầu vậy, sự phát xạ vạch 21 cm của nguyên tử hiđrô là sự phát xạ vạch có bản chất nhiệt mạnh nhất trong Dải Ngân Hà cũng như trong các thiên hà khác. Sở dĩ có điều này là do hiđrô là thành phần có độ phổ cập lớn nhất của khí giữa các sao. Các miền chứa hiđrô nguyên tử trung hoà được gọi là miền HI (ngược với các miền HII của khí bị ion hoá).

A photon of frequency ν is emitted or absorbed when the electron jumps from one quantum state to the other. The frequency ν of the transition from one energy level to another energy level is proportional to the energy difference ΔE between the two levels, according to the relation $\Delta E = h\nu$. A transition from a higher level to a lower level produces an emission line. This can occur spontaneously in the gas cloud or can be caused by collision with other atoms. On the other hand, when radiation falls on the gas cloud, some of the atoms occurs, some of the atoms inside the cloud can be excited to higher energy levels, resulting in a series of absorption lines. A photon is emitted when the energy of the electron decreases and it is absorbed when the energy increases. In principle, the atomic emission line appears just at a single frequency. However, the atoms in an interstellar cloud move randomly, as an effect of the temperature. This gives rise to a line more or less broadened but centered at the rest frequency (corresponding to a particle at rest), which characterizes each atomic species.

The strongest hydrogen line commonly detected in bright nebulae is the emission line called Hα which appears in the visible spectral region at wavelength $\lambda = 0.6563$ μm (6563 A). This red line, which arises from the transition between level 3 and level 2 (see Fig.IV.5), belongs to the Balmer series, which corresponds to the transitions connecting other excited energy levels (n>2) with the first excited energy level (n=2) of the hydrogen atom. The other lines in this series are called Hβ, Hγ, ... Transitions between high energy levels ($n \geq 2$) and the ground state energy level n=1 belong to the Lyman series (Lyα, Lyβ, Lyγ ..). . The continuum emission is produced when free electrons are captured by protons into discrete atomic levels.

The 21 cm line of neutral atomic hydrogen

The radio line emitted by neutral hydrogen atoms corresponds to a transition between the two closely spaced energy sublevels in the ground (lowest) energy state n=1 (see Fig.IV.5). The electron and the proton of the hydrogen atom have angular momentum as they spin about their axes. When both the spins have the same orientation (parallel), the energy state of the atom is slightly higher than the energy state in which the spins have opposite orientation (antiparallel). The emission of a photon corresponds to the change from the parallel orientation to the antiparallel orientation. Since the energy difference between the two states is very small, the radiation is emitted in the radio range at a wavelength of 21 cm (frequency 1420.4 MHz). However, for each hydrogen atom, a spontaneous change from the upper state to the lower state is very rare, since it occurs only every 11 million years. Collisions with other particles, especially with electrons, can trigger an induced emission and enhance considerably the emission rate. These collisional events are still rare under the conditions of density and temperature of the interstellar medium and happen roughly every 400 years. Yet, the 21 cm hydrogen line emission is the strongest thermal line emission in the Milky Way as well as in other galaxies. This is due to the fact that hydrogen is the most abundant constituent of the interstellar gas. Regions containing neutral atomic hydrogen are called HI regions (as opposed to HII regions of ionized gas).

Cấu trúc của phân tử không rắn chắc. Chúng ta có thể hình dung một phân tử như một hệ các nguyên tử được gắn với nhau bởi những lò xo vô hình. Cũng giống như nguyên tử, phân tử có thể thay đổi năng lượng của nó do sự thay đổi năng lượng của các electron trong các nguyên tử cấu tạo nên phân tử. Phân tử cũng có thể quay quanh một trục đi qua trọng tâm của nó. Vì phân tử có thể uốn được nên nó cũng có thể dao động. Bởi vậy, các phân tử trong một chất khí có thể có năng lượng quay và năng lượng dao động. Năng lượng của phân tử bị lượng tử hoá thành một dãy các mức gián đoạn (hình IV.6). Mỗi mức năng lượng dao động được đặc trưng bởi một số lượng tử dao động v. Tương tự như vậy, một mức năng lượng quay có số lượng tử J tương ứng với nó. Sự thay đổi giá trị năng lượng quay, năng lượng dao động và năng lượng electron tuân theo các quy luật cơ học lượng tử.

Cũng giống như trường hợp của một nguyên tử và ở trong các điều kiện bình thường, nghĩa là khi khí phát bức xạ nhiệt, sự phân bố của các phân tử theo các mức năng lượng tuân theo định luật Boltzmann (xem chương IX). Theo định luật này, số phân tử nằm ở một mức cao hơn thì ít hơn số phân tử nằm ở một mức thấp hơn.

Hình IV.6: **(Xem cuối chương)**

Những sự chuyển mức dao động - quay giữa trạng thái dao động thấp nhất v = 0 (trạng thái cơ bản) và trạng thái dao động thứ nhất v = 1 của một phân tử. Những quá trình này diễn ra trong vùng phổ hồng ngoại. Những sự chuyển mức quay ở trong cùng một trạng thái dao động diễn ra trong vùng phổ vô tuyến milimét.

Một sự nhảy từ một mức năng lượng quay này tới một mức năng lượng quay khác tạo nên sự phát xạ hoặc hấp thụ photon ở dải tần số vô tuyến. Tương tự như vậy, một sự thay đổi trong năng lượng dao động tạo nên sự phát xạ hoặc hấp thụ photon ở vùng hồng ngoại. Cuối cùng, một sự sắp xếp lại trong trạng thái năng lượng của các electron của một phân tử dẫn đến sự phát xạ hoặc hấp thụ bức xạ khả kiến và tử ngoại.

Các phân tử trong một đám mây khí có thể bị kích thích, nghĩa là chúng có thể nhảy từ một trạng thái năng lượng thấp hơn tới một trạng thái năng lượng cao hơn khi chúng hấp thụ bức xạ ở trong đám mây, hoặc khi sự va chạm giữa các hạt ở trong đám mây diễn ra trong một số điều kiện đặc biệt. Chẳng hạn, bức xạ hồng ngoại và bức xạ tử ngoại từ các ngôi sao và những sự va chạm với các nguyên tử và phân tử hiđrô, cho đến nay được xem như là thành tố có độ phổ cập lớn nhất trong Vũ trụ, gây ra sự kích thích nguyên tử và phân tử trong vũ trụ.

MOLECULAR PHYSICS.

The structure of a molecule is not rigid. We can imagine a molecule as a system of atoms which are attached together by a number of invisible springs. Like an atom, a molecule can change its energy as a result of a change in the energy of the electrons in the atoms which the molecule contains. The molecule can also rotate about an axis through its center of gravity. Since it is flexible, it can also vibrate. Molecules in a gas can therefore have rotational and vibrational energies. The molecular energies are quantized in a series of discrete levels (Fig. IV.6). Each vibrational energy level is characterized by a vibrational quantum number v. Likewise, a rotational energy level has its quantum number J. The changes in rotational, vibrational and electronic energies are subject to the restrictions imposed by quantum mechanics.

As in the case of an atom and in normal situations, that is when the gas emits thermal radiation, the distribution of molecules throughout the energy levels is governed by the Boltzmann law (see Chapter IX). According to this law, the number of molecules that occupy an upper level is smaller than the number of molecules that occupy a lower level.

Figure IV.6

Vibrational-rotational transitions between the lowest vibrational state v =0 (ground state) and the first vibrational state v =1 of a molecule. They occur in the infrared spectral region. Rotational transitions within a vibrational state occur in the millimeter radio spectral region.

A jump from one rotational energy level to another rotational level yields the emission or absorption of photons in the radio frequency range. Similarly, a change in vibrational energy results in the emission or absorption of photons in the infrared. Finally, a rearrangement in the energy state of electrons of a molecule leads to the emission or absorption of visible and ultraviolet radiations.

The molecules in a gas cloud can be excited, that is they can jump from a lower energy state to a higher energy state, when they absorb radiation within the cloud or when collisions between particles in the cloud occur in some particular conditions. For instance, infrared and ultraviolet radiation from stars and collisions with atoms and molecules of hydrogen, which are by far the most abundant species in the Universe, cause the excitation of atoms and molecules in space.

CÂU HỎI

1) Bức xạ từ Vũ trụ có thâm nhập được vào khí quyển trái đất không? Khí quyển trái đất trong suốt đối với những vùng bức xạ nào?

2) Những cơ chế bức xạ vũ trụ cơ bản?

3) Áp dụng công thức Planck (4.1) là công thức biểu diễn độ trưng của một vật đen như là một hàm của tần số để chứng minh công thức (4.2) là công thức biểu diễn độ trưng như là một hàm của bước sóng.

4) Hãy chứng minh định luật dịch chuyển Wien.

5) Làm thế nào để phân biệt bức xạ nhiệt với bức xạ phi nhiệt?

6) Chúng ta biết được những gì về một đám mây khí bị ion hoá từ sự phát xạ nhiệt liên tục của nó? Nhiệt độ electron của một môi trường bị ion hoá dày về mặt quang học có nhiệt độ chối đo được là 10^4 K là bao nhiêu? Cũng câu hỏi như trên đối với một môi trường có độ dày quang học bé.

7) Một electron tương đối tính có năng lượng 10^3 GeV chuyển động xoắn ốc trong từ trường $B = 10^{-9}$ T sẽ phát bức xạ thuộc miền sóng nào?

8) Ở trạng thái dao động cơ bản v = 0, năng lượng E của các mức quay bị lượng tử hoá : E = BJ(J + 1), B là một hằng số, được gọi là hằng số quay, J là số lượng tử quay đặc trưng cho mỗi mức. Hãy cho biết khoảng cách giữa các mức năng lượng phụ thuộc vào J như thế nào (xem hình IV.6) ?

QUESTIONS

Question 1: Does the radiation from outer space penetrate the Earth's atmosphere ? To what radiation is the atmosphere transparent ?

Question 2 : What are the basic mechanisms of cosmic radiation ?

Question 3 : Use the Planck formula 4.1 which relates the brightness of a black body as a function of frequency to demonstrate formula 4.2 expressing the brightness as function of wavelength ?

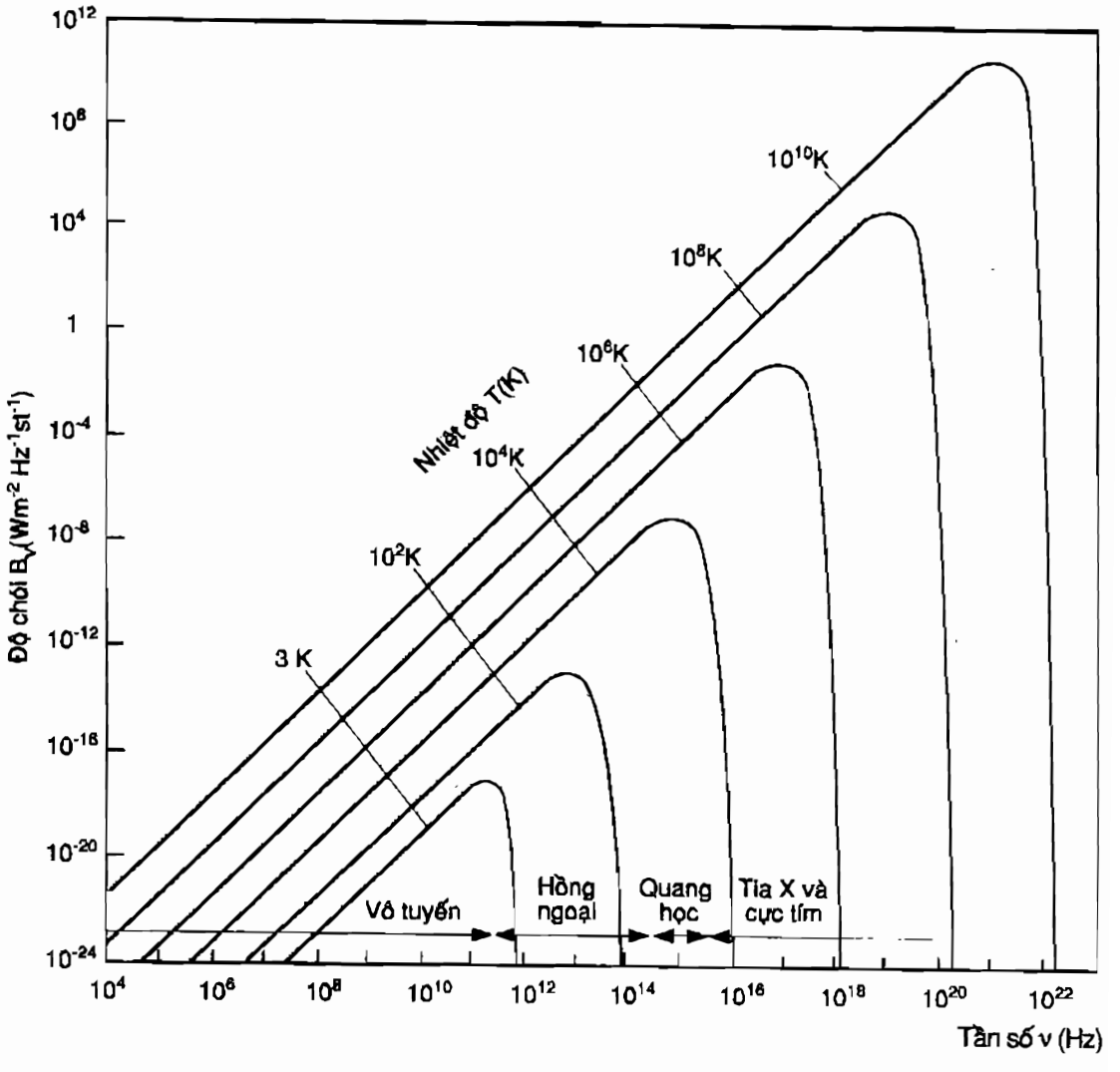
Question 4 : Demonstrate the Wien's displacement law.

Question 5 : How do we distinguish thermal radiation from a non-thermal radiation ?

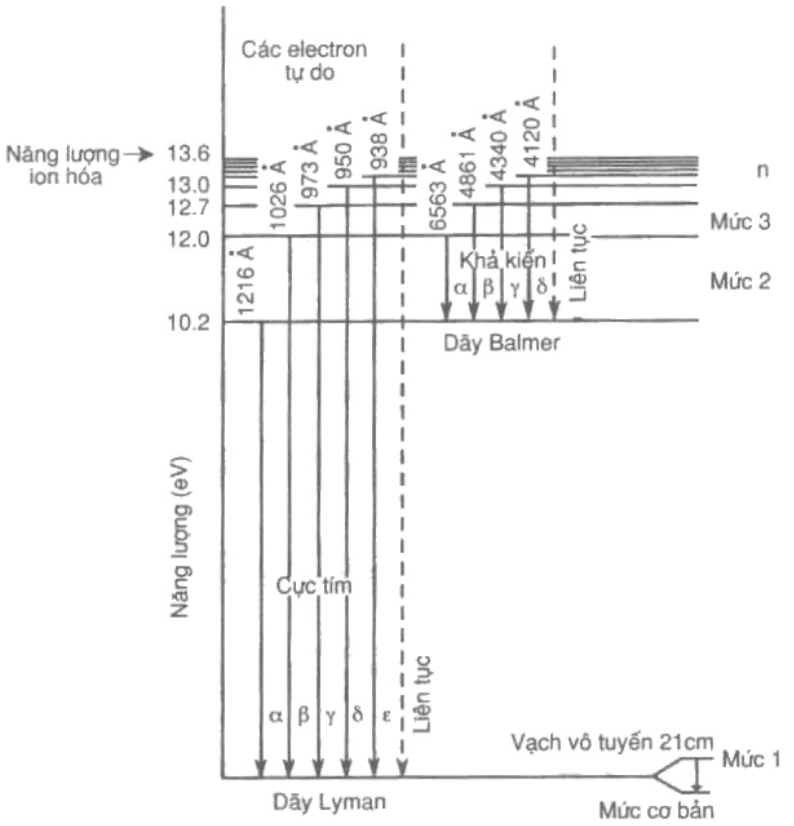
Question 6 : What do we learn about an ionized gas cloud from its thermal continuum emission? What is the electron temperature of an optically thick ionized medium whose measured brightness temperature is 10^4 K ? And for an optically thin medium ?

Question 7 : What is the spectral domain of emission of relativistic electrons of one thousand Gev, spiralling in a magnetic field of 10^{-9} Tesla ?

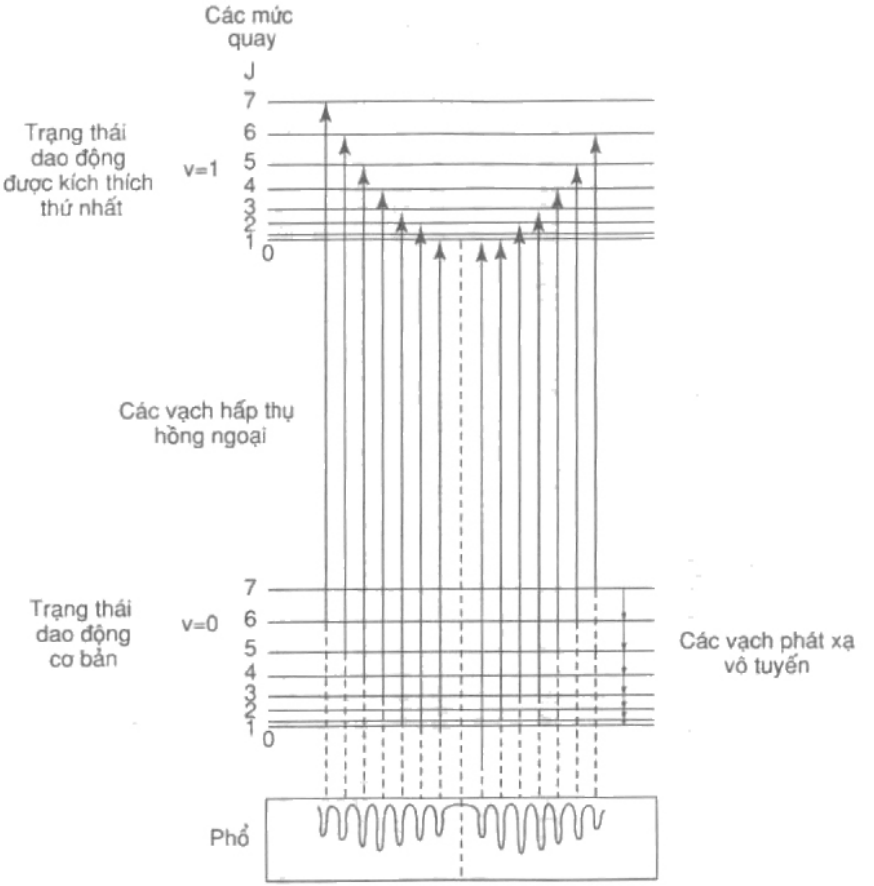
Question 8 : In the vibrational ground state v=0, the energy E of rotational levels is quantized : $E = BJ(J+1)$; B is a constant called rotational constant and J is the rotational quantum number which characterizes each level. How does the spacing between the energy levels depend on J (see Fig. IV.6) ?


Độ chói B_ν(Wm^{-2} Hz^{-1}st^{-1})
Tần số ν (Hz)
Nhiệt độ T(K)
10^{10}K
10^{8}K
10^{6}K
10^{4}K
10^{2}K
3 K
Vô tuyến
Hồng ngoại
Quang học
Tia X và cực tím

Hình IV.3



Hình IV.5



Hình IV.6

Chương V

CUỘC PHIÊU LƯU TỚI MẶT TRĂNG, HOẢ TINH, KIM TINH VÀ TRÁI ĐẤT

MỞ ĐẦU - SỰ PHÁN ĐOÁN KHOA HỌC VÀ SỰ MỞ RỘNG TRÍ TƯỞNG TƯỢNG

Sự phát biểu của các định luật Kepler, được suy từ các định luật về chuyển động và hấp dẫn của Newton, tạo nên cảm giác rằng khoa học là chính xác về mặt toán học và vĩnh cửu. Nhưng điều này chỉ đúng đối với khoa học đã được thiết lập vững chắc, đối với khoa học đã được kiểm chứng và được mô tả bằng toán học từ lâu. Thực tế, cảm giác này sai ngay cả đối với các định luật Kepler. Khi các nhà thiên văn học đo đạc vị trí của các hành tinh một cách rất chính xác, họ thấy rằng các định luật Kepler không hoàn toàn đúng. Thay vào đó, cần phải dùng thuyết tương đối tổng quát của Einstein để miêu tả các quan sát một cách rất chính xác. Một cách lí tưởng, phương pháp khoa học mang lại lời giải cho các vấn đề không chính xác. Việc quan sát những sai lệch đối với những lí thuyết hiện có dẫn tới lí thuyết mới. Lí thuyết mới này dẫn tới các tiên toán có thể được kiểm chứng. Thực vậy, thuyết tương đối tổng quát đã đưa ra những tiên đoán về Thiên văn học. Những tiên đoán này đã được kiểm chứng và thấy đúng tới độ chính xác rất cao. Nhưng chúng ta thực sự không biết liệu thuyết tương đối tổng quát có tuyệt đối chính xác hay không? Bài học rút ra là: Nếu chúng ta muốn đánh giá một lí thuyết là "đúng" hoặc "phù hợp", đối với các mục đích thực tiễn, chúng ta phải nhớ tới độ chính xác mà lí thuyết này đã được kiểm nghiệm.

Một lí thuyết tuyệt đối chính xác thì khách quan. Mọi người tán thành nó. Mọi người tìm kiếm một lí thuyết như vậy. Tuy nhiên, khoa học thực tế lại hoàn toàn khác vì mục tiêu tìm kiếm một lí thuyết đúng đắn thường xa vời tới mức các nhà khoa học không biết bằng cách nào để tới được. Sự tiến bộ liên quan tới việc thực hiện một bước nhỏ về phía một mục tiêu ở xa, và sau đó xem xét lại làm thế nào để thực hiện bước tiếp theo. Khoa học là một hoạt động mang tính người rất nhiều, được điều khiển bởi hứng thú cá nhân trong việc đạt được tiến bộ trong một số lĩnh vực lí thú của khoa học, chẳng hạn như Thiên văn học. Thông thường, phần khó khăn nhất và sáng tạo nhất của khoa học là lựa chọn các câu hỏi có thể trả lời được. Tiếp theo đó có lẽ là sự thiết kế một cách sáng tạo một thiết bị mới cho một kính thiên văn, sự chế tạo một cách cẩn thận thiết bị mới theo mục tiêu đã định. Sau đó là những sự quan sát mới và cẩn thận và ước tính độ chính xác của các quan sát. Tiếp theo là việc giải thích các kết quả quan sát và thảo luận với các nhà khoa học khác. Từ đó lại xuất hiện các câu hỏi mới có thể trả lời được. Trên mỗi bước đường, nhà khoa học vận dụng kinh nghiệm của mình để quyết định việc phải làm. Thông thường các nhà khoa học làm việc theo nhóm, hợp tác với nhau để phát huy một cách tốt nhất chuyên môn của mỗi người.

Tại sao khoa học lại phức tạp như vậy? Một lí do: Các quan sát và phát minh mới thường nằm ở giới hạn mà các thiết bị mới có thể chỉ ra. Kinh nghiệm của nhà khoa học là cần thiết để giải thích các quan sát. Đối với Thiên văn học, thông thường giới hạn của chúng ta là đối tượng nhỏ nhất mà chúng ta có thể nhận ra qua kính thiên văn. Một người quan sát có kinh nghiệm có thể nhận ra nhiều chi tiết trên một bức ảnh hơn một người tham quan. Khi Galileo, qua kính thiên văn nhỏ của ông, lần đầu tiên nhận ra rằng Mộc Tinh có các vệ tinh quay xung quanh nó,

Chapter V

THE ADVENTURE TO MOON, MARS, VENUS AND EARTH

INTRODUCTION - SCIENTIFIC JUDGMENT AND A STRETCH OF THE MAGINATION

Discussion of Kepler's laws, as derived from Newton's laws of motion and gravitation, gives the impression that science is mathematically precise and permanent. But that is true only for well established science, for science that has been tested and described mathematically for many years. In fact, the impression is wrong even for Kepler's laws. When astronomers measure positions of planets extremely accurately, they find that Kepler's laws are not quite correct. Instead, Einstein's theory of general relativity is needed to describe observations very accurately. Ideally, the scientific method leads to the solution for such problems of inaccuracy : The observation of discrepancies from existing theories leads to new theory, which leads to predictions, which can then be tested. Indeed, the theory of general relativity made astronomical predictions that have been tested and found to be correct to very high accuracy. But we really do not know that general relativity is absolutely accurate. The lesson is : If we want to consider a theory to be "true" or "correct", for practical purposes we must keep in mind to what accuracy it has been tested.

An absolutely accurate theory is impersonal. Everybody agrees to it. Everyone seeks such a theory. However, actual science is very different, because the goal of seeking a correct theory is often so far away that scientists cannot see how to get there. Progress involves taking a small step toward a distant goal, and then reviewing how to take the next step. Science is very much a human activity, driven by the personal excitement of making progress in some interesting part of science, such as astronomy. Often the most difficult and the most creative part of science is to select questions that probably can be answered. Then perhaps follow the creative design of a new instrument for a telescope, the careful construction of the instrument keeping the goals in mind, then new and careful observations and an estimate of the accuracy of the observations, then interpretation of the observations and arguments about the interpretation with other scientists, from which follow new questions that can probably be answered. At every step along the way, the scientist uses his or her scientific experience to decide what to do. Often, scientists work in teams, collaborating so as best to use everyone's expertise.

Why is science so complicated ? One reason : new observations and discoveries are often at the limit of what the new instruments can show. The scientist's experience is essential to interpret the observations. For astronomy, usually our limit is the smallest thing one can recognize through a telescope. The experienced observer can recognize more detail on a photograph than can a visitor.

Kim Tinh có các pha thay đổi theo thời gian, hoặc Thổ Tinh có các "tai" (hiện nay ta biết đó là các vành đai), chỉ Galileo có kinh nghiệm và sự kiên trì cần thiết để nhận ra những điều đó. Những phát minh của Galileo, trông có vẻ mâu thuẫn với các quan niệm thời đó, đã bị coi là rất đáng ngờ vì những người khác không lặp lại chúng. Hiện nay, chúng ta biết rằng Galileo đúng. Năm 1996, ba nhà khoa học thực hiện các phép đo đầu tiên qua kính hiển vi một mẩu đá có nguồn gốc từ Hoả Tinh đã giải thích các kết quả quan sát của họ như là dấu hiệu của sự sống đơn bào đã từng tồn tại trên Hoả Tinh. Tin này xuất hiện trên báo chí toàn cầu như một phát minh lớn. Tin này đã gây ra nhiều cuộc tranh luận khoa học. Nhiều nhà khoa học đã hỏi rằng: Liệu những sự giải thích này có đúng hay không? Trong vòng hai năm, các nhà khoa học khác đã chế tạo các thiết bị tốt hơn và đã chỉ ra rằng hầu như tất cả các bằng chứng giả định có thể được giải thích tốt hơn theo các cách khác. Hiện nay hầu như tất cả mọi người đều đồng ý rằng: Hòn đá từ Hoả Tinh không cung cấp bằng chứng về sự sống trước đây ở trên Hoả Tinh. Bài học rút ra là: Lẽ ra báo chí nên mô tả điều này như một phát minh khả dĩ, vẫn còn phải kiểm nghiệm nhiều. Thông thường, một lí thuyết khoa học cần phải được mô tả cùng với phẩm chất của bằng chứng và kinh nghiệm của người quan sát. Phẩm chất thường được diễn tả bởi các từ như nghèo nàn, đủ, tốt, rất tốt hoặc áp đảo. Những từ này xuất hiện nhiều lần trong chương này và các chương tiếp theo.

Lí do thứ hai làm cho khoa học phức tạp: Việc quan sát thiên nhiên mở rộng trí tưởng tượng của con người và sự mở rộng này dẫn tới các tư tưởng mới. Các tư tưởng thường phức tạp, ít nhất là vào lúc đầu, và chỉ một vài khía cạnh có thể được kiểm nghiệm. Ví dụ, một câu hỏi sẽ được nêu ra trong chương này: Có phải Mặt Trăng đã được hình thành do một vụ va chạm của một vật thể kiểu hành tinh vào Trái Đất? Nếu điều này là đúng, một vài tiên đoán có thể được nêu ra. Nhưng ngay cả nếu những tiên đoán này được quan sát chứng tỏ là đúng thì chúng vẫn có thể được giải thích theo một số cách khác. Bởi vậy câu hỏi đầu tiên vẫn chưa được trả lời thoả đáng. Như sẽ được đề cập đến trong chương này, lí thuyết cho rằng Mặt Trăng đã được hình thành do một vụ va chạm trên Trái Đất hiện nay được coi là rất có thể đúng nhưng lí thuyết này không giải thích được tất cả các quan sát và nó có thể bị thay đổi ở một mức độ nào đó trong tương lai.

Một câu hỏi khác sẽ được nêu ra trong chương này là: Liệu có phải nước ở thể lỏng đã từng tồn tại trên Hoả Tinh khoảng 2×10^9 năm về trước hay không? 30 năm về trước, ý kiến này đã được xem là "đáng nghi ngờ" nhưng với những bằng chứng thu được 20 năm về trước, ý kiến này trở nên "có thể" và những bằng chứng mới thu được vào năm 1998 làm cho ý kiến này trở thành "rất có thể". Bài học rút ra: Tính đúng đắn của một ý kiến phải được diễn tả bởi một sự phán đoán khoa học, chẳng hạn bởi các từ: có thể, có khả năng, "nói chung được chấp nhận là đúng" hoặc "được kiểm chứng rất tốt". Những từ này là một phần quan trọng của khoa học. Chúng xuất hiện nhiều lần trong chương này và các chương tiếp theo.

Chương này cũng nhằm mục đích mở rộng trí tưởng tượng của chúng ta theo thời gian. Con người quen nghĩ về các khoảng thời gian như tuần, năm hoặc thế kỉ. Thời tiết thay đổi theo tuần, số xe máy ở Việt Nam tăng theo năm, các vương quốc và quốc gia thay đổi qua các thế kỉ. Con người thường không chú ý tới các thay đổi diễn ra qua các thang thời gian dài hơn. Nhưng một bài học lớn được rút ra từ chương này và chương tiếp theo là: thiên nhiên thay đổi theo thời gian nhiều hơn nhiều so với ngay cả những gì các nhà khoa học đã dự đoán một số năm về trước. Khí hậu Trái Đất thay đổi trong vòng khoảng 10^4 năm qua, con người tiến hoá trong vòng 10^6 năm qua, các lục địa thay đổi trong khoảng 10^8 năm. 10^9 năm về trước, sự sống trên Trái Đất ở dạng đơn bào. 10^{10} năm về trước, cả Mặt Trời, Trái Đất và Mặt Trăng đều chưa tồn tại. Nghĩ tới khoảng thời gian 10^{10} năm

When Galileo first recognized, through his small telescope, that Jupiter had moons circling around it, that Venus shows phases which change with time, or that Saturn had "ears" (now known to be the rings), only Galileo had the experience and the patience necessary for this recognition. His discoveries, which seemed to contradict ideas of the time, were considered very doubtful because others did not duplicate them. Now we know that Galileo was correct. In 1996, three scientists who had made the first microscopic measurements of a rock, originally from Mars, interpreted their observations as signs of one-celled life that once existed on Mars. This news appeared in newspapers throughout the world as a major discovery. The news stimulated much scientific controversy. Many scientists asked : Are these interpretations correct ? Within two years, other scientists developed better instruments and showed that almost all the supposed evidence could be explained better in other ways. Now nearly everyone agrees : The rock from Mars does not provide evidence for ancient life on Mars. The lesson: newspapers should have described this as a possible discovery, still subject to much testing. Quite generally, a scientific theory must be described together with the quality of the evidence and with the experience of the observer. Quality is usually expressed in words like poor, or adequate, or good, or excellent, or overwhelming. These words appear many times in this and subsequent Chapters.

A second reason for science being complicated : Observation of nature stretches human imagination, and this stretching leads to new ideas. The ideas are often complicated, at least at first, and only some aspects can be tested. For example, a question posed later in this Chapter is : Was our Moon caused by an impact of a planet-like object on the Earth? If yes, a few predictions can be made. But, even if these few predictions are proven correct by observations, they may perhaps be explained some other way. Therefore, the original question is not yet answered reliably. As shown later in this Chapter, the theory that the Moon was caused by an impact on Earth is now considered very probably correct, but it does not explain every observation and it may be changed somewhat in the future.

Another question posed later in this Chapter is: Did liquid water exist on Mars about 2×10^9 years ago ? This idea was considered "doubtful" thirty years ago, but it became "probable" with evidence obtained twenty years ago, and new evidence in 1998 is making it "very probable". The lesson : The "correctness" of an idea must be expressed by a scientific judgment, such as by the word possible, or probable, or "generally accepted as correct", or "very well tested". These words are an essential part of science. They appear many times in this and subsequent Chapters.

This Chapter is also meant to stretch our imagination in time. Humans are used to thinking in terms of weeks, or years, or perhaps centuries. The weather changes in weeks, the increase in the number of motorcycles in Vietnam occurs over years, and major kingdoms and nations change over centuries. Humans tend to ignore changes over longer time scales. But a major lesson of this and the next Chapter is : nature changes much more with time than even scientists expected some years ago. The Earth's climate has changed over some 10^4 years, humans have evolved over some 10^6 years, the continents change over some 10^8 years, life on Earth was one-celled 10^9

là một sự mở rộng thực sự trí tưởng tượng. Chương này, đặc biệt là câu hỏi 9, giúp bạn trở nên quen thuộc với những thang thời gian đó. Chúng ta sẽ bắt đầu với lịch sử Trái Đất. Sau đó, chúng ta sẽ thám hiểm Mặt Trăng và các hành tinh kiểu Trái Đất (Thuỷ Tinh, Kim Tinh, Hoả Tinh) và lịch sử của chúng.

TRÁI ĐẤT, HÀNH TINH CÓ SỰ SỐNG

Cuộc sống thường ngày của con người bị giới hạn trong phạm vi vài kilômét đất và nước trên Trái Đất. Nhưng trong hai ngàn năm qua, các nhà thám hiểm và thương gia đã thực hiện những cuộc hành trình dài trong đó có một số cuộc hành trình trên các đại dương. Họ đã mở rộng hiểu biết của chúng ta: Trái Đất hình cầu với bán kính khoảng $6,4 . 10^3$km. Tuy nhiên, Trái Đất không phải là một hình cầu lí tưởng. Nó có các lục địa. Một số lục địa có núi cao. Trái Đất có các đại dương. Một vài chỗ ở các đại dương rất sâu. Liệu các lục địa và các đại dương là điều độc đáo của Trái Đất, hay các hành tinh khác cũng có các lục địa và đại dương? Liệu Trái Đất là độc nhất hay cũng giống như nhiều hành tinh khác? Kĩ thuật vũ trụ ngày nay cho phép chúng ta thám hiểm các hành tinh. Chúng ta thám hiểm các hành tinh một phần do chúng ta luôn luôn muốn khám phá những điều chưa biết, một phần do việc thám hiểm các hành tinh, xét về mặt khoa học, giúp chúng ta hiểu biết tốt hơn về hành tinh Trái Đất bé bỏng.

Có một đề tài đặc biệt lí thú liên quan đến Trái Đất, đó là: Trái Đất đã được hình thành như thế nào? Bằng cách nào Trái Đất có được kích cỡ, trọng lực và nhiệt độ phù hợp, cho phép sự sống tồn tại trên Trái Đất? Để trả lời câu hỏi liên quan đến Trái Đất này, chúng ta phải nghiên cứu những hòn đá già nhất mà chúng ta có thể tìm thấy vì những hòn đá này đã được tạo thành ở gần thời điểm Trái Đất hình thành. Những hòn đá già nhất được tìm thấy trên Trái Đất có tuổi $3,7 . 10^9$ năm. Nhưng chúng ta biết rằng Trái Đất đã được hình thành $4,6 . 10^9$ năm về trước. Chúng ta bị thiếu 9.10^8 năm! Tại sao lịch sử xa xưa của Trái Đất lại khó tìm như vậy?

Một lí do: núi bị xói mòn theo thời gian. Yếu tố chính gây ra sự xói mòn là nước, đặc biệt khi nó đóng băng. Trong khoảng 3×10^8 năm, núi có đỉnh cao trở thành núi thấp và nhẵn. Khoảng thời gian này là ngắn so với tuổi của Trái Đất. Tại sao hiện nay chúng ta vẫn có một số núi cao? Những núi mới phải được hình thành trong vòng 10^8 năm trở lại nay. Chúng được hình thành như thế nào? Lớp vỏ cứng ở bề mặt Trái Đất sâu chừng 20 km được tạo bởi các khối đá cứng gọi là các mảng. Tuy các khối đá này có vẻ cứng khi ta sờ tay vào chúng nhưng chúng vẫn thay đổi hình dạng khi chúng bị đẩy hoặc kéo trong hàng triệu năm. Các mảng chuyển động đối với nhau. Sự chuyển động và sự thay đổi của chúng theo thời gian được gọi là sự kiến tạo mảng. Các lục địa nằm trên đỉnh của các mảng và chuyển động cùng với các mảng. (Đó là lí do tại sao sự kiến tạo mảng thường được gọi là sự trôi dạt lục địa). Đôi khi, các mảng va chạm vào nhau và do đó các lục địa va chạm với nhau. Khi các lục địa va chạm với nhau, đá bị gấp nếp và tạo thành các dẫy núi cao mới. Ví dụ, khoảng 5.10^7 năm về trước, Tiểu lục địa Ấn Độ va vào Châu Á và tạo thành dãy núi Himalaya. Ở những nơi khác, khi các mảng va vào nhau, một mảng trượt xuống phía dưới mảng kia. Nó chìm trở lại trong lòng Trái Đất và tất cả các bằng chứng về những sự kiện diễn ra trên mảng này bị mất đi. Quá trình này diễn ra tại các rãnh rất sâu trong lòng đại dương, chẳng hạn ở gần Nhật Bản. Đó là lí do khiến Nhật Bản phải chịu nhiều trận động đất như vậy. Nhưng chúng ta biết rằng diện tích bề mặt Trái Đất không đổi. Nếu một vài mảng biến mất thì hoặc là các mảng mới phải được tạo thành hoặc các mảng cũ phải lớn lên. Một thí dụ là Đại Tây Dương.

years ago, and neither Sun nor Earth nor our Moon existed 10^{10} years ago. Thinking of 10^{10} years is a real stretch of the imagination. This Chapter, including particularly its question 9, serves to help you become used to these time scales. We start with the history of the Earth, and then proceed to explore the Moon and terrestrial planets (Mercury, Venus, Mars) and their histories.

EARTH, THE LIVING PLANET

The daily life of human beings is restricted to a few km of land and water on Earth. But in the last two thousand years, explorers and traders have taken long voyages, many of them on the oceans. They have widened our perspective : The Earth is round, with a radius of about 6.4×10^3 km. However, the Earth is not perfectly round. It has continents, some with tall mountains. It has oceans, which are very deep in some places. Are continents and oceans special to Earth, or do other planets also have them ? Is Earth unique, or like many other planets? Space technology now allows us to explore the planets. In part we explore the planets because humans have always explored the next frontier, in part because exploring the planets scientifically gives us a much wider perspective of tiny planet Earth.

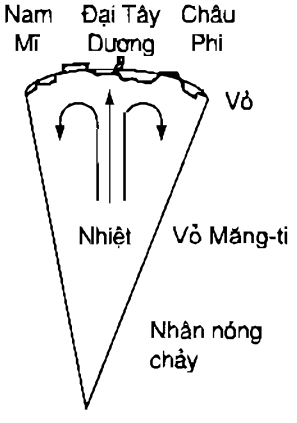
One special topic of interest regarding Earth is : How was the Earth formed? How did Earth acquire the size and gravity and temperature that allows life to exist on Earth? To answer this question on Earth, we must look for the oldest rocks we can find, because they were formed near the time when Earth formed. The oldest rocks found anywhere on Earth are 3.7×10^9 years old. Yet we know that the Earth was formed 4.6×10^9 years ago. We miss 9×10^8 years! Why is the long-ago history of Earth so difficult to find?

One reason : mountains erode with time. The main force causing erosion is water, especially when it freezes. Mountains with tall peaks become low, smooth mountains in roughly 3×10^8 years. That is short compared to the age of the Earth. Why do we have any tall mountains now ? New mountains must have been made in the last 10^8 years. How ? The surface crust of the Earth, roughly 20 km deep, is made of blocks of hard rock, called plates. Although these rocks seem hard when we touch them, they change their shape when they are pushed or pulled for millions of years. The plates move among each other. Their motions and changes with time are called plate tectonics. Continents sit on top of such plates and they travel with the plates. (That is why plate tectonics is often called continental drift.) Occasionally, plates collide and, therefore, continents collide. When continents collide, the rock folds and makes new tall mountain ranges. For instance, the subcontinent of India hit Asia some 5×10^7 years ago and made the Himalayan mountains. In other places, when plates collide, one of the plates slides below the other plate. It sinks back into the Earth and all evidence of events on that plate is lost. This occurs at the very deep trenches in the ocean, for instance near Japan. That is why Japan experiences so many earthquakes. But we know that the surface area of the Earth is constant. If some plates disappear,

Trên sống Bắc - Nam chạy dài giữa Đại Tây Dương có một vỏ đại dương mới nhô lên từ trong lòng Trái Đất. Vật chất mới bắt buộc lớp vỏ cũ tách ra. Bởi vậy Châu Âu dịch chuyển xa dần Bắc Mĩ và Nam Mĩ dịch chuyển xa dần Châu Phi. Khoảng $1,8.10^8$ năm về trước, Đại Tây Dương bắt đầu mở rộng ra và hiện nay nó vẫn còn tiếp tục mở rộng hơn (câu hỏi 1). Nếu bạn lấy một tấm bản đồ Trái Đất và cắt dọc theo chu vi của Nam Mĩ và Châu Phi, bạn sẽ thấy rằng hai lục địa này lắp gần khít nhau. Thực tế trước đây hai lục địa này dính liền nhau.

Tại sao Trái Đất có quá trình kiến tạo mảng? Trong lòng Trái Đất nóng. Nhiệt có xu hướng thoát ra ngoài. Nếu bạn quan sát một nồi súp đang sôi, bạn sẽ biết được nhiệt thoát ra như thế nào. Bạn có thể quan sát sự đối lưu trong nồi súp: Phần súp nóng hơn dâng lên bề mặt, phần súp lạnh hơn ở bên cạnh chìm xuống đáy. Nếu có một ít bọt ở trên bề mặt, chúng ta có thể thấy rằng nó chuyển động cùng với súp dọc theo bề mặt từ nơi súp dâng lên đến nơi súp lặn xuống.

Ở nơi súp lặn xuống, đôi khi bọt dừng lại ở đó, tại bề mặt, nhưng đôi khi nó lặn xuống cùng với súp. Điều tương tự xảy ra đối với Trái Đất. Đá ở phần bên ngoài của Trái Đất - lớp Măng-ti được nung nóng từ bên dưới, trong hàng triệu năm. Nó dâng lên dần dần, cũng giống như súp. Các mảng, trên đó có các lục địa, đóng vai trò như bọt trên nồi súp. Trong trường hợp của Đại Tây Dương, đá dâng lên ở nhiều nơi dọc theo sống chạy dọc theo hướng gần trùng với hướng Bắc - Nam ở giữa Đại Tây Dương.



Hình V.1

Khi đá mới nhô lên thì đá xuất hiện sớm hơn dịch chuyển sang một bên, ra khỏi đường của đá đang nhô lên. Thực tế, hai mảng gặp nhau ở sống của Đại Tây Dương dịch chuyển ra xa nhau. Xem hình V.1 (vỏ được vẽ không theo đúng tỉ lệ). Các mảng mang lục địa Châu Mĩ chuyển động về phía Tây so với sống đại dương và mang Châu Âu và Châu Phi chuyển động về phía Đông. Theo thời gian, Đại Tây Dương giữa các lục địa trở nên rộng hơn. Tốc độ mở rộng chỉ khoảng 2 cm/năm, nhưng trong 2.10^8 năm, độ mở rộng đã là 4.10^3 km. Đó chính là độ rộng đo được của Đại Tây Dương.

Tại sao trong lòng Trái Đất nóng? Một phần nhiệt sót lại từ thời Trái Đất hình thành, khi các tảng đá rơi vào Trái Đất - lúc bấy giờ còn bé hơn rất nhiều so với Trái Đất hiện nay - và động năng của chúng biến đổi thành nhiệt. Nhưng phần lớn nhiệt được tạo ra khi các nguyên tố phóng xạ phân rã. Sự phân rã này tạo ra nhiệt ở khắp Trái Đất. Hầu hết phóng xạ phát ra ở giai đoạn đầu của lịch sử Trái Đất, nhưng một phần hiện nay mới phát ra. Nhiệt thoát ra từ bên trong bằng cách gây ra sự đối lưu của lớp vỏ Măng-ti, giống như nhiệt được cung cấp cho súp dâng lên nhờ sự đối lưu của súp. Kết quả gây nên sự kiến tạo mảng và làm cho Trái Đất thay đổi một cách liên tục. (Chú ý: ở hầu hết mọi nơi trên Trái Đất, nhiệt độ bề mặt được điều khiển bởi Mặt Trời. Nhiệt từ trong lòng Trái Đất điều khiển nhiệt độ bề mặt Trái Đất chỉ ở những vùng có núi lửa hoạt động).

Trái Đất là một hành tinh rất hoạt động. Chúng ta nói tới một hành tinh có sự sống, đang thay đổi liên tục. Không có dấu vết còn lại nào ở trên Trái Đất cho ta biết về Trái Đất khi nó còn trẻ. Bằng cách nào chúng ta có thể mở rộng hiểu biết của chúng ta về lịch sử ban đầu của Trái Đất? Chúng ta phải quan sát Mặt Trăng và các hành tinh để khám phá lịch sử sơ khai của Trái Đất.

either new plates must be formed or old plates must grow. An example is the Atlantic Ocean. On a north-south ridge along the middle of the Atlantic Ocean, new oceanic crust is coming up from the Earth's interior. The new material forces older crust to move apart. Thus Europe gradually moves further away from North America, and South America from Africa. The Atlantic Ocean began opening about $1.8x10^8$ years ago and is still becoming wider today. [Question 1.] If you take a map of the Earth and cut out the outlines of South American and Africa, you will find that the continents very nearly fit together. Indeed, they were together in the past.

Why does the Earth have plate tectonics? The Earth is hot inside. Heat wants to escape. You can see how heat escapes if you watch a pot of boiling soup. You can observe convection in the soup : hotter parts of the soup rise to the surface, adjacent cooler parts sink back to the bottom. If some froth is on the surface, you can observe that it moves with the soup along the surface, from where the soup rises to where the soup sinks.

Where the soup sinks, sometimes the froth just stays there, at the surface, but sometimes it sinks down with the soup. The Earth behaves similarly. Rock in the outer part of the Earth, the mantle, is heated from below for millions of years. It gradually rises just like soup does. The plates, which hold the continents, are like the froth on the soup. In the case of the Atlantic Ocean, rock rises up in many places along the approximately north-south ridge that lies along the middle of the Atlantic ocean.

Fig.V.1

When this new rock emerges, other rock that came up earlier moves sideways, out of the way of the emerging rock. In fact, the two plates that meet at the Atlantic ridge move apart. See figure V.1 (crust not drawn to scale). The plates carry the American continents westward relative to the ridge, Europe and Africa eastward. With time, the Atlantic Ocean between the continents becomes wider. The rate of widening is only about 2 cm per year, but in $2x10^8$ years, that is $4x10^3$ km, the observed width of the Atlantic Ocean.

Why is the Earth hot inside? Some heat is left from the time when the Earth formed, when rocks fell onto the then still much smaller Earth, and their energy of motion was converted to heat. But most of the heat is generated when radioactive elements decay. This decay produces heat throughout the Earth. Much radioactivity was released early in the history of the Earth, but some is released now. The heat from the interior escapes by causing the convection of the mantle, much as the heat provided to the soup rises by convection of the soup. The result causes plate tectonics and causes the Earth to change continuously. [Note : in most places on Earth, the surface temperature is controlled by sunlight. The heat from the Earth's interior controls the Earth's surface temperature only in actively volcanic regions.]

Earth is an extremely active planet. We speak of a living planet, changing continually. There is nothing left on Earth to tell us what Earth looked like when it was young. How can we expand our perspective on Earth's early history ? We must look to the Moon and the planets to discover Earth's earliest history.

Vì Trái Đất thay đổi rất nhanh theo thời gian nên chúng ta phải đặt câu hỏi: Bằng cách nào các điều kiện thích hợp cho sự sống trên Trái Đất vẫn được duy trì mặc cho mọi sự thay đổi diễn ra? Sự sống trên Trái Đất phụ thuộc vào khí quyển Trái Đất và nước ở thể lỏng của nó. Các nhà khoa học biết rằng khí quyển và đại dương là các hiện tượng rất phức tạp. Nhiều yếu tố tự nhiên có thể làm thay đổi khí quyển và đại dương. Chúng ta biết rằng các hoạt động của con người đang làm thay đổi khí quyển. Tiếc là chúng ta không thể nghiên cứu khí quyển và đại dương của Trái Đất bằng thực nghiệm vì điều này là quá nguy hiểm. May mắn là chúng ta có một số khí quyển tự nhiên khác thích hợp cho việc nghiên cứu. Chúng ta quan sát các hành tinh để biết về khí quyển và đại dương của các hành tinh khác.

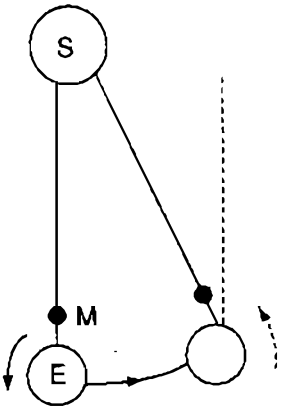
Trong khi thám hiểm các hành tinh, chúng ta cũng tự hỏi: Có lẽ có sự sống nguyên thuỷ ở các hành tinh khác? Chúng ta không mong đợi có người, muỗi hoặc sâu bọ, nhưng có lẽ có sự sống nguyên thuỷ kiểu như vi khuẩn đơn bào. Chúng ta thực sự không biết các tế bào sống đầu tiên đã hình thành trên Trái Đất như thế nào. Nhưng điều đó đã xảy ra trên Trái Đất. Liệu nó có xảy ra ở một nơi nào khác hay không?

SỰ TIẾN TRIỂN CỦA CÁC HÀNH TINH RẮN: MẶT TRĂNG VÀ KẾ HOẠCH APOLLO

Mặt Trăng được quan sát từ Trái Đất

Mặt Trăng là thiên thể ở gần ta nhất. Nó là vệ tinh tự nhiên của Trái Đất.

Chu kì quỹ đạo của Mặt Trăng xung quanh Trái Đất là bao nhiêu? Tháng Mặt Trăng, khoảng 29,5 ngày, là thời gian cần thiết để Mặt Trăng chuyển động từ đường nối Trái Đất và Mặt Trời (Trăng non) vòng quanh Trái Đất cho đến khi nó trở lại đường nối Trái Đất và Mặt Trời (đường liền nét trên sơ đồ). Nhưng trong khoảng thời gian ấy Trái Đất đã chuyển động một phần xung quanh Mặt Trời. Nếu nhìn từ một vị trí ở xa (đường đứt nét trên hình V.2) chúng ta thấy Mặt Trăng đã thực hiện được hơn một vòng quay xung quanh Trái Đất. Nhìn từ một vị trí ở xa, Mặt Trăng có chu kì quỹ đạo xung quanh Trái Đất khoảng 27,3 ngày.



Hình V.2

Mặt Trăng có tự quay xung quanh trục của nó hay không? Có, nhưng rất chậm. Một phía của Mặt Trăng luôn luôn hướng về Trái Đất. Nhìn từ một nơi ở xa, chúng ta thấy rằng phía của Mặt Trăng hướng về Trái Đất quay một vòng xung quanh trục của Mặt Trăng trong khi Mặt Trăng quay một vòng xung quanh Trái Đất. Bởi vậy chu kì quay của nó là 27,3 ngày.

Khoảng cách trung bình từ Mặt Trăng tới Trái Đất bằng 60 lần bán kính Trái Đất. Làm sao chúng ta biết được điều này? Theo cách cổ điển, nó được đo bằng phép tam giác đạc, bằng cách quan sát vị trí biểu kiến của Mặt Trăng trên bầu trời cùng một lúc từ hai vị trí trên Trái Đất. Newton đã biết một cách gần đúng khoảng cách tới Mặt Trăng. Giá trị chính xác hơn của quỹ đạo Mặt Trăng là: khoảng cách trung bình giữa tâm Trái Đất và tâm Mặt Trăng là 384×10^3 km và e = 0,05. Phép đo chính xác nhất, có độ chính xác tới 2 cm, thu được bằng cách phóng xung ánh sáng từ một nguồn laser tới Mặt Trăng, cho chúng phản xạ trên một cái gương rồi đo thời gian cần thiết để ánh sáng trở về Trái Đất.

Since Earth changes so much with time, we must ask : How did conditions suitable for life on Earth continue despite all the changes that have occured ? Life on Earth depends on Earth's atmosphere and on its liquid water. Scientists have learned that the atmosphere and oceans are very complex phenomena. Many natural factors can change the atmosphere and the oceans. We know that human activities are changing the atmosphere. Unfortunately, we cannot study our atmosphere and oceans by experiment because it is too dangerous. Fortunately, we do have some other natural atmospheres available for study. We look to the planets to learn about alternative atmospheres and oceans.

While we explore the planets, we also ask : Is there, perhaps, any primitive life on planets other than Earth? We do not expect any humans or mosquitoes or worms, but perhaps there is primitive life like one-celled bacteria. We do not really know how the first living cells formed on Earth. But it did happen on Earth. Did it happen anywhere else?

THE EVOLUTION OF THE SOLID PLANETS: THE MOON AND PROJECT APOLLO

The Moon observed from Earth.

The Moon is the nearest celestial object. It is a natural satellite of the planet Earth.

What is the orbital period of the Moon around the Earth? The lunar month, about 29.5 days, is the time needed for the Moon to move from the line between Earth and Sun (new Moon) around the Earth until it is again in the line between Earth and Sun (solid lines in diagram). But in that time the Earth has partially moved around the Sun. Seen from some distant place (dashed line in figure V.2), the Moon has performed more than one revolution around the Earth. Seen from a distant place, the Moon has an orbital period around the Earth of about 27.3 days.

Fig.V.2

Does the Moon rotate around its axis? Yes, but very slowly. One side of the Moon always faces the Earth. Seen from a distant place, the side facing the Earth rotates once around the Moon's axis while the Moon revolves once around the Earth. So its rotation period is 27.3 days.

The Moon's distance on average is about 60 Earth radii. How do we know? Classically, it is measured by triangulation, by looking at the Moon's apparent position in the sky simultaneously from two places on Earth. Newton knew the Moon's distance approximately. More precise values of the Moon's orbit are : the mean distance between Earth and Moon centers is 384×10^3 km and $e = 0.05$. The most precise measurement, accurate to 2 cm, comes from sending pulses of light from a laser to the Moon, reflecting them off a mirror, and measuring the time for the light to return to Earth.

Bán kính Mặt Trăng bằng khoảng một phần tư bán kính Trái Đất. Làm sao chúng ta biết được điều này? Đường kính góc trung bình của Mặt Trăng nhìn từ Trái Đất vào khoảng 31 phút cung, tức là khoảng 1/120 radian. Bởi vậy đường kính Mặt Trăng vào khoảng 1/120 khoảng cách từ Mặt Trăng tới Trái Đất (chính xác hơn, R = 1738 km).

Khối lượng Mặt Trăng vào khoảng 1/81 khối lượng Trái Đất. Chúng ta biết khối lượng này khá chính xác kể từ khi tàu vũ trụ đầu tiên từ Trái Đất đến gần Mặt Trăng. Gia tốc của tàu vũ trụ cho ta biết lực hấp dẫn của Mặt Trăng. Kết quả là $M = 7{,}35 \times 10^{22}$ kg (câu hỏi 2).

Biết bán kính và khối lượng Mặt Trăng, chúng ta có thể tìm được lực hấp dẫn tại bề mặt Mặt Trăng. Tỉ số giữa lực hấp dẫn ở bề mặt Mặt Trăng và lực hấp dẫn ở bề mặt Trái Đất là $(M_M/M_E)\,(R_E/R_M)^2$, vào khoảng 1/6. Các nhà du hành vũ trụ có thể thực hiện những bước nhảy dài trên Mặt Trăng bất chấp bộ áo giáp vũ trụ nặng nề của họ (câu hỏi 3).

Một phía của Mặt Trăng luôn luôn hướng về Trái Đất. Khi chúng ta thấy Trăng tròn, Mặt Trời chiếu sáng phần Mặt Trăng đang hướng về chúng ta. Nhiệt độ ở bề mặt Mặt Trăng được Mặt Trời chiếu sáng có thể lên tới 380 K. Hai tuần sau, khi chúng ta nhìn thấy Trăng non, không có ánh sáng mặt trời tới phần Mặt Trăng đang hướng về chúng ta. Nhiệt độ trên bề mặt tối của Mặt Trăng có thể xuống tới 140 K. Nếu bạn đứng ở một vị trí bất kì trên Mặt Trăng, bạn sẽ ở ngoài ánh sáng mặt trời trong hai tuần, và ở trong bóng tối hai tuần. Một cách chính xác hơn, "ngày" Mặt Trăng bằng 29,5 ngày Trái Đất (câu hỏi 4).

Nhiệt độ cao ở phần Mặt Trời chiếu sáng và lực hấp dẫn bé có nghĩa rằng tất cả các khí thoát khỏi Mặt Trăng. Thực tế, ở trên Mặt Trăng không có khí quyển (câu hỏi 5).

Kế hoạch Apollo

Kế hoạch Apollo là tên của một chương trình do Mĩ bắt đầu thực hiện vào năm 1961 nhằm mục đích đưa con người lên Mặt Trăng trước năm 1970. Thực vậy, cuộc đổ bộ đầu tiên của con người lên Mặt Trăng được thực hiện vào năm 1969 và cho đến cuối năm 1972 còn có thêm năm cuộc đổ bộ nữa. Mục tiêu khoa học là thám hiểm lịch sử Mặt Trăng để hiểu thêm về lịch sử Trái Đất. Nhưng kế hoạch cực kì tốn kém ngay cả đối với Mĩ này đã được thực hiện trước hết vì lí do chính trị: nó tạo nên một cuộc thi đua hoà bình chống lại Liên Xô, nước đã phóng vệ tinh Sputnik vào năm 1957. Kế hoạch Apollo là một tiêu điểm kích thích dân chúng Mĩ.

Hình V.3 : (Xem cuối chương)

Trái Đất được quan sát lúc sáng tròn, tháng 12/1972. Có thể nhận ra Bắc Phi, Biển Đỏ và Bán đảo Ả Rập ở phần trên đỉnh. (Ảnh: NASA).

Một sự kiện đặc biệt diễn ra vào năm 1968 đã làm thay đổi hiểu biết của con người về Trái Đất. Ngày 24/12/1968, một tàu vũ trụ Apollo đã ở trên quỹ đạo xung quanh Mặt Trăng (không định đổ bộ). Nhà du hành vũ trụ Lovell gửi bức thông điệp vô tuyến sau đây về Trái Đất, tới cử toạ gồm nhiều triệu người: "sự hiu quạnh mênh mông... của Mặt Trăng... làm cho bạn nhận thức về những gì bạn có ở trên Trái Đất ". Nhà du hành vũ trụ Anders bổ sung thêm một lời mô tả Trái Đất : "màu độc nhất trong vũ trụ... rất mỏng manh... nó làm tôi nhớ đến sự trang trí của cây thông Nô-en". Lần đầu tiên trong lịch sử, nhờ bức thông điệp vô tuyến này và một bức ảnh Trái Đất được truyền về từ Mặt Trăng, con người trên Trái Đất có được một hiểu biết về kích cỡ bé nhỏ của Trái Đất, trên đó có quá nhiều người sinh sống. Lần đầu tiên, nhân dân ở nhiều nước nói đến "con tàu vũ trụ Trái Đất bé bỏng".

The Moon's radius is about one fourth of Earth's radius. How do we know? The Moon's angular diameter as seen from Earth is about 31 minutes of arc on average, or about 1/120 of a radian. Thus the diameter is about 1/120 of the Moon's distance. (More precisely, R = 1738 km.)

The Moon's mass is about 1/81 of Earth's mass. We have known this mass quite accurately since the first space craft from Earth came close to the Moon. The acceleration of the space craft told us the Moon's gravity. The result is $M = 7.35 \times 10^{22}$ kg. [Question 2.]

Once we know the Moon's radius and mass, we can find the surface gravity on the Moon. The ratio of lunar to Earth's surface gravities is $(M_M / M_E)(R_E / R_M)^2$, about 1/6. The astronauts could make long leaps on the Moon, despite their heavy space suits. [Question 3.]

One side of the Moon always faces the Earth. When we see full moon, the Sun shines on the part of the Moon facing us. The temperature on the sunlit lunar surface can be as high as 380 K. Two weeks later, when we see the Moon in new phase, no sunlight reaches the part of the Moon facing us. The temperature on the dark lunar surface can be as low as 140 K. If you are standing on any part of the Moon, you are about two weeks in sunshine, about two weeks in the dark. More precisely, the lunar "day" is 29.5 Earth days long. [Question 4.]

The high temperature in sunshine and the low gravity mean that all gases escape from the Moon. There is practically no atmosphere on the Moon. [Question 5.]

Project Apollo

Project Apollo was the name of the program, started in 1961 by the USA, to land a human on the Moon by 1970. Indeed the first lunar landing was in 1969, and five more landings occured by the end of 1972. The scientific goal was to explore the history of the Moon, in order to learn something of the history of the Earth. But the project, enormously expensive even for the USA, was carried out primarily for political reasons : it formed a peaceful competition against the Soviet Union, which had launched Sputnik in 1957, and it provided a focus for energizing the US population.

Figure V.3

Earth observed in full phase. December 1972. Northern Africa, the Red Sea and the Arabian Peninsula are recognizable at the top. (NASA)

A special event in 1968 changed the human perspective of Earth. On December 24 of 1968, an Apollo space craft was in orbit around the Moon (without attempting to land). Astronaut Lovell sent this radio message back to Earth, to an audience of many million people: the "vast loneliness ... of the moon... makes you realize just what you have back there on Earth." Astronaut Anders added a description of the Earth: "the only color in the universe -- very fragile... it reminded me of a Christmas tree ornament." This radio message, and a picture of the Earth transmitted from the Moon, was the first time that humans on Earth were given a perspective on the small size of the Earth on which so many people live. For the first time, people in many nations spoke of "tiny spaceship Earth".

Hình V.4 : (Xem cuối chương)

Nhà địa chất Jack Schmitt đứng trước một tảng đá lớn ở trên Mặt Trăng và ở gần chiếc xe mà các nhà du hành vũ trụ dùng để đi lại trên Mặt Trăng. Bầu trời có màu đen. (Ảnh: NASA).

Đưa người đổ bộ xuống Mặt Trăng là một đề án táo bạo. Vì khí quyển trái đất làm cho các bức ảnh bị nhoè một giây cung nên từ Trái Đất chúng ta không thể nhận ra các vật thể có kích thước bé hơn 1 km ở trên Mặt Trăng. Thế mà chúng ta lại muốn đổ bộ lên Mặt Trăng với một con tàu vũ trụ đứng trên ba chân, các chân cách nhau không quá bốn mét. Có thể Mặt Trăng được bao phủ bởi quá nhiều tảng đá đến mức con tàu vũ trụ hạ cánh xuống Mặt Trăng bị nghiêng và không thể rời Mặt Trăng được nữa? Cũng có thể Mặt Trăng bị bụi bao phủ, bởi vậy tàu vũ trụ chìm trong bụi và không thể rời Mặt Trăng được nữa. Các bức ảnh cận cảnh đầu tiên của bề mặt Mặt Trăng thu được nhờ một camera chụp trong khi nó rơi về phía Mặt Trăng vào năm 1964. Những bức ảnh được truyền về Trái Đất bởi tín hiệu vô tuyến ngay trước khi camera va vào bề mặt Mặt Trăng cho thấy: trên bề mặt Mặt Trăng có những vùng bằng phẳng cho tàu vũ trụ hạ cánh. Trên bề mặt Mặt Trăng có những tảng đá to, bởi vậy tàu vũ trụ sẽ không bị chìm sâu trong bụi. Việc đổ bộ lên Mặt Trăng bỗng nhiên được xem là khả thi.

Hình V.5: (Xem cuối chương)

Ảnh Mặt Trăng được chụp từ Vũ trụ. Phía bên trái hướng về Trái Đất. Phía bên phải không nhìn thấy được từ Trái Đất. (Ảnh: NASA).

Hình V.6 : (Xem cuối chương)

Ảnh Biển bóng tối được chụp từ một vị trí ở gần Mặt Trăng. Đồng bằng bằng phẳng được bao bọc bởi núi và cao nguyên lởm chởm. (Ảnh: NASA).

Hãy nghiên cứu các bức ảnh Mặt Trăng ở hình V.5 và V.6. Hai quang cảnh tồn tại trên Mặt Trăng : 1) Các vùng núi, sáng, gọi là cao nguyên với nhiều miệng núi lửa do va chạm và 2) Các vùng khá bằng phẳng và tối hơn, gọi là đồng bằng, có ít miệng núi lửa do va chạm. Các cao nguyên chiếm hầu hết phía bên phải hình V.5 và phần trên hình V.6. Galileo là người đầu tiên nhận ra rằng Mặt Trăng không phải có dạng hình cầu lí tưởng mà thực ra trên Mặt Trăng có núi (Xem chương I). Galileo gọi các vùng đồng bằng là "mare", nghĩa là biển, nhưng trên đó không có nước. Độ sáng khác nhau của hai quang cảnh khiến ta nghĩ rằng trên Mặt Trăng có các loại đá khác nhau. Nhưng từ Trái Đất chúng ta không thể nói được đó là những loại đá nào.

Từ các bức ảnh Mặt Trăng, chúng ta có thể xác định niên đại tương đối: Nếu mép của một miệng núi lửa do va chạm bị phá huỷ một phần bởi mép của một miệng núi lửa do va chạm khác thì núi lửa do va chạm thứ nhất đã được hình thành trước núi lửa do va chạm thứ hai (câu hỏi 6). Trên hình V.6, núi lửa do va chạm lớn ở vùng đồng bằng phải xuất hiện sau khi đồng bằng đã hình thành. Miệng núi lửa do va chạm lớn ở gần đường chân trời (Núi lửa Copernicus, đường kính khoảng 100 km) cũng phải được hình thành muộn hơn vì các mẫu vật chất bắn ra từ vụ va chạm có thể được nhận ra trên đồng bằng. Điều không may là chúng ta không thể đo tuổi của các miệng núi lửa từ những bức ảnh này.

Figure V.4

Geologist Jack Schmitt in front of a large lunar boulder, and near the vehicle the astronauts used to drive on the Moon. The sky is black. (NASA)

Landing a human on the Moon was a very daring proposition. Because the Earth's atmosphere blurs images by one second of arc, we can recognize from Earth nothing smaller on the Moon than about 1 km in diameter. Yet we wanted to land on the Moon with a space craft standing on three legs no more than four meters apart. Perhaps the Moon is covered by so many rocks that the landed space craft is tilted, so that it cannot leave again? Perhaps the Moon is covered by dust, so that the space craft sinks into the dust and cannot leave again? The first close-up pictures of the lunar surface came from a camera falling toward the Moon in 1964 . The photos, transmitted by radio just before it crashed on the surface, showed : Yes, there are flat areas to land on. Yes, there are boulders on the surface, so the space craft will not sink into deep dust. A lunar landing suddenly seemed really possible.

Figure V.5

Photo of the Moon taken from space. The left side faces Earth. The right side is invisible from the Earth. (NASA)

Figure V.6

Photo taken from near the Moon of Mare Imbrium (Sea of Shadows). The smooth plains are bounded by mountains and rough highlands. (NASA)

Study the photos of the Moon, Figures V.5 and V.6. Two landscapes exist on the Moon: 1) bright, mountainous regions called highlands with many craters, and 2) relatively flat and darker regions called plains, with rather few craters. Highlands dominate the right side of Figure V.5 and the upper part of Figure V.6. Galileo first recognized that the Moon was not perfectly spherical but had mountains. See Chapter I. He called the plains "mare", translated as sea, but there is no water there. The different brightness of the two landscapes suggests different kinds of rocks, but from Earth one cannot tell what kinds of rocks.

From photographs of the Moon, one can do relative dating: If one crater rim is partially destroyed by another crater rim, then the first crater was formed before the second crater. [Question 6.] In Figure V.6, the large crater in the plains must have been made after the plains were made. The large crater near the horizon (Copernicus, about 100 km in diameter) must also have formed later, because pieces ejected from the impact can be recognized on the plains. Unfortunately, one cannot measure from such pictures the actual number of years since these craters were made.

Hai quang cảnh khác nhau - đồng bằng và núi non - dẫn tới một điều khó giải thích: Các miệng núi lửa hình thành khi các tảng đá lớn (thiên thạch) rơi xuống bề mặt. Chúng ta biết số miệng núi lửa hình thành hàng năm trên Trái Đất và có thể tính số miệng núi lửa hình thành hàng năm trên Mặt Trăng. Nếu tốc độ tạo thành miệng núi lửa không đổi trong 4×10^9 năm qua thì chúng ta có thể dự đoán rằng số miệng núi lửa có trên 1 km^2 ở mọi nơi trên Mặt Trăng bằng số miệng núi lửa có trên 1 km^2 ở vùng đồng bằng như chúng ta nhìn thấy. Dẫu sao, số miệng núi lửa có trên 1 km^2 ở vùng cao nguyên lại lớn hơn. Nhiều miệng núi lửa này đã hình thành khi nào? Phải chăng vào thời xa xưa, tốc độ hình thành miệng núi lửa đã lớn hơn nhiều? Nếu đúng như vậy, chúng ta gặp một vấn đề khác: Một số lượng tương tự các miệng núi lửa trên mỗi km^2 cũng phải được hình thành ở nơi mà ngày nay chúng ta nhìn thấy như là đồng bằng. Tại sao chúng ta không thấy những miệng núi lửa này? Đây là một trong những câu hỏi mà dự án Apollo muốn giải đáp.

Một vài kiến thức vật lí : xác định niên đại tuyệt đối của đá dựa theo độ phóng xạ của chúng

Tất cả các đá đều chứa một ít nguyên tử phóng xạ, chẳng hạn như ^{238}U hoặc ^{40}K. Mọi nguyên tử phóng xạ đều có khả năng phóng xạ. Nếu ở thời điểm ban đầu chúng ta có một số lượng lớn n nguyên tử của một chất phóng xạ thì số nguyên tử phân rã trong thời gian dt là λndt và số nguyên tử còn lại thay đổi theo quy luật $dn = - \lambda ndt$. Bởi vậy, nếu ở thời điểm ban đầu chúng ta có n_0 nguyên tử thì ở thời điểm t, chúng ta sẽ có $n = n_0 \exp(-\lambda t)$ nguyên tử. Chu kì bán rã τ được định nghĩa bởi $n = 1/2\ n_0$ hay $\tau = 0{,}693/\lambda$. Để đo tuổi của đá theo thang thời gian 10^9 năm, chúng ta phải nghiên cứu các nguyên tử phóng xạ có chu kì bán rã dài. Ví dụ, ^{40}K phân rã thành ^{40}Ar với chu kì bán rã $1{,}3 \times 10^9$ năm, và ^{238}U phân rã thành ^{206}Pb với chu kì bán rã $4{,}5 \times 10^9$ năm. Chúng ta biết từ các phép đo khác rằng một hòn đá ban đầu không chứa ^{40}Ar. Bây giờ chúng ta khảo sát hòn đá này. Nó chứa ^{40}K và ^{40}Ar với số lượng bằng nhau. Bởi vậy, một nửa lượng ^{40}K đã phân rã. Tuổi của đá phải bằng chu kì bán rã của ^{40}K, tức là $1{,}3 \times 10^9$ năm (câu hỏi 7). Tuổi của Trái Đất đã được xác định theo phương pháp này. Nếu chúng ta quan tâm đến những khoảng thời gian ngắn hơn, ví dụ hàng triệu năm hoặc chỉ vài năm, thì chúng ta phải sử dụng các nguyên tử phóng xạ có chu kì bán rã cỡ ấy.

Những kết quả chính của kế hoạch Apollo :

Các nhà du hành vũ trụ của tàu Apollo đã tiến hành nhiều thí nghiệm trên Mặt Trăng. Họ để lại trên Mặt Trăng một thiết bị đo nguyệt chấn và một cái gương để phản xạ các xung laser phát đi từ Trái Đất trở về Trái Đất. Quan trọng nhất là các nhà du hành vũ trụ đã mang về Trái Đất nhiều kg đá lấy từ những vị trí khác nhau trên Mặt Trăng. Đá mang về từ Mặt Trăng được nghiên cứu trong những phòng thí nghiệm được xây dựng một cách đặc biệt, có khả năng thực hiện những phép đo chính xác nhất có thể được đối với những hòn đá này. Những kết quả chính đối với chúng ta là:

1) Việc xác định niên đại tuyệt đối xác nhận rằng đá ở vùng cao nguyên trên Mặt Trăng già hơn đá ở trên Trái Đất. Bởi vậy, chúng ta có thể thám hiểm ngược về quá khứ ở trên Mặt Trăng xa hơn ở trên Trái Đất.

2) Việc xác định niên đại tuyệt đối xác nhận rằng đá ở vùng cao nguyên lâu đời hơn đá ở vùng đồng bằng. Do đó, tốc độ tạo thành miệng núi lửa do va chạm trong thời kì tiền sử của Mặt Trăng phải lớn hơn hiện nay.

The two different landscapes, plains and highlands, lead to a puzzle: The craters are formed when large rocks (meteorites) fall onto the surface. We know the number of craters made per year on Earth and can compute the number of craters made per year on the Moon. If the cratering rate has been constant for the last 4×10^9 years, then we predict about as many craters per km^2 everywhere on the Moon as we actually see on the plains. However, there are many more craters per km^2 in the highlands. When were these many craters formed? Perhaps the cratering rate was much higher long ago? If so, we have another problem: Equally many craters per km^2 must also have been made where we now see plains. Why do we not see these craters? This is one of the questions Project Apollo was designed to solve.

Some physics background : Absolute dating of rocks by their radioactivity.

All rocks contain a few radioactive atoms, for instance uranium 238 (^{238}U) or Potassium 40 (^{40}K). Every radioactive atom has a chance to decay. If we have a large number n of one kind of radioactive atom, the number decaying in time dt will be $\lambda n\, dt$, and the remaining number will change according to $dn = -\lambda n\, dt$. Therefore, if we start with an initial number n_0, we will later have $n = n_0 \exp(-\lambda t)$. The half life τ is defined by $n = \frac{1}{2} n_0$ or $\tau = 0.693/\lambda$. To measure ages of rocks of the order of 10^9 years, one must investigate radioactive atoms that have a long half-life. For instance, ^{40}K decays to ^{40}Ar with a half-life of 1.3×10^9 years, and ^{238}U decays to ^{206}Pb with a half-life of 4.5×10^9 years. We know, from other measurements, that a rock initially contained no ^{40}Ar. We measure this rock now. It contains equal amounts of ^{40}K and ^{40}Ar. Therefore, half the initial ^{40}K has decayed. The age of the rock must equal the half-life of ^{40}K, 1.3×10^9 years. [Question 7.] The age of the Earth has been determined in this manner. If one is interested in shorter time periods, say millions of years or merely a few years, then one must use radioactive atoms with half-lives of that order.

Major results of Project Apollo.

The Apollo astronauts performed many experiments on the Moon. They left on the Moon an instrument that measured moonquakes and a mirror to reflect laser pulses from Earth back to Earth. Most importantly, they returned to Earth many kilograms of rocks from various parts of the Moon. The rocks were examined in specially built laboratories, capable of making the most accurate possible measurements of the rocks. The main results relevant for us are:

1) Absolute dating confirms that highland rocks on the Moon are older than rocks on the Earth. Therefore, we can explore the past back further on the Moon than we can on the Earth.

2) Absolute dating confirms that highland rocks are older than the rocks in the plains. Therefore, the cratering rate must have been higher during the early history of the Moon.

3) Việc xác định niên đại tuyệt đối của các vật liệu tạo nên đồng bằng chỉ ra rằng đồng bằng hình thành trong khoảng từ 3,8 đến 3,1 x 10^9 năm về trước. Hiển nhiên là những vật liệu này đã phủ kín rất nhiều miệng núi lửa được hình thành trước đó.

4) Thành phần hoá học: So với Trái Đất, Mặt Trăng có rất ít nguyên tố hoặc phân tử dễ bay hơi. Hoàn toàn không có chút nước nào đo được trong đá Mặt Trăng! Đá trên Mặt Trăng chứa ít nước hơn cả những hòn đá khô nhất ở trên Trái Đất.

Mặc dù có các thông tin này, có một câu hỏi quan trọng vẫn chưa có thể trả lời được: Mặt Trăng đã được hình thành như thế nào? Tất cả đá trên Mặt Trăng đã bị biến đổi, ở một thời điểm nào đó, bởi các vụ va chạm diễn ra trên Mặt Trăng. Không có bằng chứng trực tiếp về những gì xảy ra khi Mặt Trăng hình thành. Bởi vậy cần phải xây dựng nhiều mô hình khác nhau về sự hình thành Mặt Trăng và đánh giá chúng dưới ánh sáng của các phát minh của kế hoạch Apollo. Mô hình 1: Phải chăng Mặt Trăng đã hình thành một cách độc lập ở một nơi nào đó trong Hệ Mặt Trời và sau đó bị bắt giữ vào quỹ đạo xung quanh Trái Đất? Nếu Trái Đất là một quả cầu rắn và cứng thì quỹ đạo của Mặt Trăng ở gần Trái Đất là một hyperbol xung quanh Trái Đất và sự bắt giữ không thể xảy ra. Thực tế Trái Đất có khí quyển và có thuỷ triều, bởi vậy sự bắt giữ có thể xảy ra được nhưng sự đánh giá khoa học cho rằng: sự bắt giữ rất ít có khả năng xảy ra. Mô hình 2: Phải chăng Mặt Trăng là một hành tinh độc lập, hình thành ở gần Trái Đất đến nỗi lực hấp dẫn của chúng giữ chúng lại với nhau? Nếu như thế thì hai hành tinh phải có cùng số lượng các nguyên tố. Số liệu của Apollo cho thấy: Không phải như vậy. Mô hình 3: Phải chăng Trái Đất đã bị tách thành hai mảnh, có lẽ do nó quay rất nhanh? Nếu như thế thì Mặt Trăng phải chứa các nguyên tố có trong vỏ măng-ti của Trái Đất. Nhưng thực tế lại có nhiều sự khác nhau về chi tiết.

Cả 3 mô hình này đều quá đơn giản. Chúng không phù hợp. Tuy nhiên, những sự quan sát mới dẫn tới một mô hình mới, mô hình 4: Mặt Trăng đã được hình thành bởi một vụ va chạm mạnh diễn ra trên Trái Đất khi nó còn trẻ. Hãy tưởng tượng có một vật thể có kích cỡ của Hoả Tinh va vào bề mặt Trái Đất, không phải theo phương vuông góc mà vận tốc của nó làm với bề mặt Trái Đất một góc nào đó. Nhiều vật chất bị bắn vào vũ trụ và mang theo đa phần mô-men xung lượng của vật thể va chạm. Do đó, đa phần vật chất đi vào quỹ đạo xung quanh Trái Đất. Sau nhiều năm, vật chất này tập hợp dần dần tạo thành Mặt Trăng. Mô hình này hiện đang được xây dựng một cách chi tiết. Nó không giải thích được hết tất cả các quan sát. Ví dụ, nó không thể tiên đoán một cách chính xác cả khối lượng đo được và mô-men xung lượng đo được của Mặt Trăng đang chuyển động xung quanh Trái Đất. Nhưng những tiên đoán của nó phù hợp với rất nhiều sự quan sát, đến nỗi hiện nay hầu như tất cả các nhà khoa học nghiên cứu về Mặt Trăng đều chấp nhận mô hình này.

Phác hoạ lịch sử Mặt Trăng :

1) Sự hình thành Mặt Trăng bởi một vụ va chạm mạnh diễn ra trên Trái Đất (mô hình 4): Khi Trái Đất hình thành, cách đây khoảng 4,6 x 10^9 năm, các vật chất nặng hơn như sắt, lắng đọng lại tạo thành lõi. Đá nhẹ hơn tạo thành lớp vỏ măng-ti và một lớp vỏ đá mỏng và rắn hình thành ở ngoài cùng. Khoảng 4,5 x 10^9 năm về trước, Trái Đất bị va chạm rất mạnh bởi một vật thể có kích cỡ Hoả Tinh. Một miệng núi lửa do va chạm khổng lồ đã được hình thành trên lớp vỏ măng-ti của Trái Đất. Vụ nổ này làm cho đá đã bị nung nóng bởi va chạm từ lớp vỏ măng-ti của Trái Đất và từ vật thể va chạm bị bắn lên cao đến nỗi chúng đi vào quỹ đạo xung quanh Trái Đất. Trong chân không vũ trụ, mọi thứ có thể bốc hơi đều đã bốc hơi. Tất cả nước trong vật chất đang quay trên quỹ đạo đều đã bốc hơi hết. Phần vật chất còn lại dần dần tập hợp trên quỹ đạo, tạo thành những hòn đá lớn hơn và sau đó những hòn đá này tập hợp lại tạo thành Mặt Trăng. Những hòn đá rắn già nhất ở

3) Absolute dating of the materials that make up the plains show that the plains were made 3.8 to 3.1 x 10^9 years ago. Evidently, these materials covered up the very many craters that were made earlier.

4) Chemical composition: Compared to the Earth, the Moon has very little of the elements or molecules that evaporate easily. There is absolutely no measurable water in lunar rocks! Lunar rocks contain less water than the driest rocks on Earth.

Despite all this information, one important question could not be answered immediately : How was the Moon formed? All lunar rocks had been changed at some time by the impacts on the Moon. None could tell us directly what happened when the Moon formed. Therefore, it was necessary to construct various models of the formation of the Moon, and to evaluate them in light of the Apollo discoveries. Model 1: Did the Moon form independently somewhere in the solar system and then was captured in orbit around the Earth? If the Earth is a hard solid sphere, the Moon's path near the Earth is a hyperbola around the Earth, and capture is impossible. Actually, the Earth has an atmosphere, and tides, so that capture is possible, but the scientific judgement is: capture is very unlikely. Model 2: Is the Moon an independent planet that formed so close to Earth that their gravity kept them together? Then the two planets should have the same amounts of all the elements. Apollo data show: They do not. Model 3: Did Earth split into two pieces, perhaps because it was rotating very rapidly? Then the Moon should have the elements of the Earth's mantle, but there are many detailed differences.

All three of these models are too simple. They are not adequate. However, the new observations led to a new model 4: The Moon was formed as the result of a large impact on the young Earth. Imagine a Mars-sized object hitting the surface of the Earth, not perpendicularly but with its velocity making some angle relative to the surface of the Earth. Much material is thrown into space. It carries much of the angular momentum of the impacting object. Therefore, much material goes into orbit around the Earth. During many years, this material gradually collects into the Moon. This model has now been worked out in great detail. It does not explain every observation. For instance, it cannot yet predict accurately both the observed mass and the observed angular momentum of the Moon moving around the Earth, but its predictions fit so many of the observations that now nearly all lunar scientists accept this model.

An outline of the history of the Moon

1) Formation of the Moon by a large impact on Earth (model 4): When Earth formed about 4.6 x10^9 years ago, denser materials like iron settled into a core, lighter rocks formed a mantle, and a thin hard rocky crust formed at the top . About 4.5 x10^9 years ago, Earth suffered an enormous impact from a Mars-sized body. A huge crater was formed in the Earth's mantle. The explosion sent impact-heated rock from the Earth's mantle and from the impacting object so high up that it went into orbit around Earth. In the vacuum of space, anything that can evaporate did evaporate. All water in the orbiting material evaporated. The rest of the material gradually collected in orbit to form larger rocks and then these collected to become the Moon. The oldest solid rocks

trên Mặt Trăng hiện nay đã được hình thành 4,42 tỉ năm về trước. (Độ chính xác khác thường tới 3 chữ số này được bảo đảm bởi độ chính xác của các phép đo và nhờ biết một cách chính xác chu kì bán rã của vật liệu phóng xạ được đo). Không còn dấu vết còn lại của miệng núi lửa do va chạm này ở trên Trái Đất vì nó đã bị lấp đầy trong vòng 0,5 x 10^9 năm sau vụ va chạm và vật chất đã bị thay đổi nhiều lần bởi sự kiến tạo mảng.

2) Sau khi tất cả đá trên quỹ đạo xung quanh Trái Đất đã tập hợp lại để tạo thành Mặt Trăng, bề mặt Mặt Trăng trở nên lạnh và cứng. Đồng thời có nhiều tảng đá khác ở trên quỹ đạo xung quanh Mặt Trời. Một số tảng đá lớn như các tiểu thiên thạch mà chúng ta thấy ngày nay. Thỉnh thoảng, những hòn đá này va chạm với Mặt Trăng. Khi một trong số những hòn đá này xuyên qua bề mặt Mặt Trăng, đá Mặt Trăng làm giảm tốc độ của hòn đá. Khi hòn đá va chạm giảm tốc, sóng xung kích rất mạnh làm vỡ cả tảng đá va chạm và đá Mặt Trăng ở gần. Động năng va chạm biến đổi thành chuyển động mạnh và nhiệt. Nhiều vật chất nổ bắn lên trên, xuyên qua bề mặt Mặt Trăng. Đa phần vật chất đã bị bắn ra với tốc độ cao đến nỗi chúng bị đẩy ngược trở lại vào không gian vũ trụ, tới quỹ đạo xung quanh Mặt Trời. Phần còn lại rơi ngược trở lại tới những phần xa của Mặt Trăng. Vụ nổ để lại một miệng núi lửa do va chạm. Một số tảng đá lớn nhất, có đường kính 50 km, tạo nên các miệng núi lửa do va chạm có đường kính 500 km (0,3 bán kính Mặt Trăng!). Mép của một trong những miệng như vậy vẫn còn nhìn thấy được như là một dãy núi, có nơi cao tới 5 km, ở cạnh của vùng đồng bằng trên hình V.6.

Việc xác định niên đại bằng phóng xạ cho chúng ta biết: Tất cả những vụ va chạm mạnh nhất ở trên Mặt Trăng đều diễn ra trong vòng khoảng 0,7 x 10^9 năm sau khi Mặt Trăng hình thành. Khoảng 3,8x10^9 năm về trước, Mặt Trăng trông phải rất khác hiện nay vì lúc đó trên bề mặt của nó có những hố rất lớn, một số hố có đường kính tới 500 km. Tất nhiên, đa số những vụ va chạm yếu hơn nhiều. Những miệng núi lửa do va chạm điển hình, có đường kính 10 km đã được tạo bởi một hòn đá có đường kính cỡ 1 km. Nhiều vụ va chạm yếu hơn đã tạo nên những miệng núi lửa do va chạm chồng lên những miệng núi lửa do va chạm khác. Nhiều miệng núi lửa do va chạm loại này vẫn còn có thể được nhìn thấy trên các cao nguyên của Mặt Trăng. Nhưng những miệng núi lửa do va chạm rất lớn trên Mặt Trăng ở thời kì ấy đã không còn có thể nhìn thấy được. Điều gì đã xảy ra với chúng?

3) Trong khoảng thời gian từ 3,8 đến 3,1 x 10^9 năm về trước, những dòng nham thạch đã lấp đầy những miệng núi lửa do va chạm lớn. Chúng ta phải hình dung cảnh những dòng sông nham thạch đang chảy dồn vào những chỗ thấp nhất trên bề mặt Mặt Trăng, từ đáy những miệng núi lửa do va chạm lớn. Mỗi dòng nham thạch có thể đã tồn tại trong nhiều ngàn năm (Một số dòng nham thạch trên Trái Đất có thể tồn tại trong một triệu năm). Nham thạch từ mỗi dòng nguội và đông đặc dần dần. Sau đó một dòng sông nham thạch khác lại bắt đầu ở một nơi nào đó, chảy tràn qua các dòng nham thạch cũ. Dần dần, những miệng núi lửa do va chạm lớn nhất được lấp đầy. Dòng nham thạch cuối cùng hiện nằm ở phía trên. Chúng tạo thành các đồng bằng ngày nay. Nơi mà cách đây rất lâu các miệng núi lửa do va chạm lớn nhất đã bị bao bọc bởi các mép miệng núi lửa do va chạm thì nay đó chính là các đồng bằng có núi bao quanh.

4) Theo thời gian, nhiệt tạo nên nham thạch thoát khỏi Mặt Trăng. Khoảng 2,5 x 10^9 năm về trước, Mặt Trăng trở nên không hoạt động. Những miệng núi lửa do va chạm mà chúng ta trông thấy trên các vùng đồng bằng, chẳng hạn miệng núi lửa do va chạm mà chúng ta trông thấy trên hình V.6, đều được tạo ra bởi các vụ va chạm diễn ra trong vòng 3 x 10^9 năm qua. Thậm chí ngày nay, thỉnh thoảng một vụ va chạm tạo nên một miệng núi lửa do va chạm mới. Nhưng điều này chẳng làm thay đổi đáng kể bề mặt Mặt Trăng.

now on the Moon were formed 4.42 billion years ago. (This unusual three-digit accuracy is warranted by the accuracy of the measurements and the accurate knowledge of the half life of the measured radioactive material.) There is no evidence left of the crater on Earth because it filled, probably within 0.5×10^9 years after the impact, and the material has been altered by plate tectonics many times.

2) After all the rocks in orbit around Earth had collected to form the Moon, the lunar surface became cool and hard. Meanwhile, many other rocks were in orbit around the Sun, some as large as the asteroids we see today. Occasionally, these rocks collided with the Moon. When one of these rocks penetrated through the lunar surface, the lunar rock slowed it down. As the impacting rock decelerated, violent shock waves broke up both the impacting rock and the neighboring lunar rock. The kinetic energy of impact was converted into violent motions and heat. Much material exploded upward through the surface. Much of the material was ejected with such high speed that it was blown back into space, to orbit around the Sun. Other material fell back onto distant parts of the Moon. The explosion left a crater. Some of the largest boulders, 50 km in diameter, made craters about 500 km in diameter (0.3 of the lunar radius) ! The rim of one such crater is still visible as a chain of mountains, up to 5 km high in some places, at the edge of the plains in Figure V.6.

Radioactive dating tells us : The large impacts on the Moon were all made within about 0.7×10^9 years after the Moon's formation. The Moon, about 3.8×10^9 years ago, must have looked drastically different than today because of these enormous holes in its surface, some up to 500 km in diameter. Of course, most impacts were much smaller. The common craters 10 km in diameter were made by common rocks merely 1 km in diameter. Many of the smaller impacts made craters superposed on other craters. These many craters remain visible on the lunar highlands. But the very large crater holes on the Moon at that time are no longer visible. What happened to them?

3) Lava flows filled the big impact craters during the period from 3.8 to 3.1×10^9 years ago. One has to imagine rivers of lava pouring out of the lowest places on the lunar surface, from the floors of the big craters. Each lava flow may have lasted for many thousands of years. (Some lava flows on Earth may last a million years). The lava from each flow gradually cooled and solidified. Then another lava river would start somewhere else, flowing over earlier lavas. Gradually, the largest craters were filled. The last of the lava flows are now on top. They form what are now the plains. Where long ago the largest craters were surrounded by crater rims, now the plains are surrounded by the mountains.

4) With time, the heat that created the lavas escaped from the Moon. The Moon became inactive about 2.5×10^9 years ago. The craters we see on the plains, such as the one in Figure V.6, were all made by impacts roughly in the last 3×10^9 years. Even today, an occasional impact makes a new crater, but little else changes.

Thuỷ Tinh:

Thuỷ Tinh chỉ hơi lớn hơn (khoảng 40%) Mặt Trăng. Khó quan sát được Thuỷ Tinh một cách chi tiết vì nó xuất hiện trên bầu trời ở khá gần Mặt Trời, sáng hơn nó rất nhiều. Nhiệt độ trên Thuỷ Tinh lên tới 700 K vào ban ngày và giảm xuống còn khoảng 100 K vào ban đêm. Chưa có tàu vũ trụ nào từng hạ cánh xuống Thuỷ Tinh, nhưng có một số tàu vũ trụ đã từng bay qua Thuỷ Tinh. Các bức ảnh Thuỷ Tinh được gửi về Trái Đất bằng tín hiệu vô tuyến cho thấy rằng Thuỷ Tinh có các cao nguyên với những miệng núi lửa do va chạm đè lên nhau và Thuỷ Tinh có các đồng bằng. Các nhà chuyên môn nhìn thấy những điểm khác nhau lí thú giữa Thuỷ Tinh và Mặt Trăng. Dẫu sao, đa số mọi người (thậm chí hầu hết các nhà thiên văn) khi nhìn vào một bức ảnh Mặt Trăng và một bức ảnh Thuỷ Tinh không thể chỉ ra đâu là ảnh Mặt Trăng và đâu là ảnh Thuỷ Tinh. Sự quan sát đơn giản này dẫn tới hai kết luận quan trọng:

Thứ nhất, mặc dù Mặt Trăng là một vệ tinh của hành tinh Trái Đất, nó có thể được xem xét như là một hành tinh độc lập khi chúng ta so sánh sự tiến hoá của Mặt Trăng, Thuỷ Tinh, Hoả Tinh, Trái Đất và Kim Tinh.

Thứ hai, dường như rất nhiều vụ va chạm đã diễn ra trên Thuỷ Tinh vào thời xa xưa, như đã từng diễn ra trên Mặt Trăng. Điều này có nghĩa rằng những tảng đá va vào Trái Đất và Mặt Trăng không phải là đặc biệt đối với phần của Trái Đất của Hệ Mặt Trời. Thực ra, những tảng đá này hẳn đã từng bay khắp miền không gian phía trong Hệ Mặt Trời.

SỰ TIẾN TRIỂN CỦA CÁC HÀNH TINH RẮN: HOẢ TINH VÀ CÁC NÚI LỬA CỦA NÓ

Hoả Tinh có kích thước bằng khoảng một nửa kích thước của Trái Đất và khoảng gấp hai lần kích thước Mặt Trăng. Hoả Tinh đã được thám hiểm bởi các vệ tinh quay xung quanh nó, chủ yếu bằng cách chụp ảnh bề mặt ngày càng chi tiết hơn và bởi 3 tàu vũ trụ đã từng đổ bộ trên bề mặt Hoả Tinh.

Hình V.7 : (Xem cuối chương)

Ảnh Hoả Tinh thu được bằng cách ghép nhiều bức ảnh chụp bởi tàu vũ trụ Viking. Chạy ngang qua tâm bức ảnh là thung lũng hình thành do sự rạn nứt dài 5000 km. Những vết tối ở bên trái là các núi lửa (Ảnh: NASA/JPL/USGS).

Đa phần bề mặt Hoả Tinh là sa mạc. Hoả Tinh rất lạnh, không thích hợp cho sự sống. Một số khu vực trên Hoả Tinh giống như các đồng bằng trên Mặt Trăng. Một số khu vực giống như các cao nguyên trên Mặt Trăng và bị bao phủ bởi các miệng núi lửa do va chạm. Đối với Hoả Tinh, cũng giống như đối với Thuỷ Tinh, chúng ta chỉ có niên đại tương đối. Dẫu sao, vì những vùng đồng bằng trên Hoả Tinh giống như những vùng đồng bằng trên Mặt Trăng nên chúng ta cho rằng lịch sử ban đầu của Hoả Tinh cũng giống như lịch sử ban đầu của Mặt Trăng.

Những vụ va chạm mạnh có lẽ đã diễn ra trong giai đoạn ban đầu của lịch sử Hoả Tinh và tốc độ tạo thành các miệng núi lửa do va chạm đã lớn, giống như đối với Mặt Trăng và Thuỷ Tinh. Điều này có nghĩa là trong thời kì lịch sử ban đầu của Hệ Mặt Trời, nhiều tảng đá lớn đã chuyển động trên các quỹ đạo ở khắp miền bên trong của Hệ Mặt Trời, ít nhất là trong vùng không gian từ Thuỷ Tinh (cách Mặt Trời 0,4 đ.v.t.v) tới Hoả Tinh (cách Mặt Trời 1,6 đ.v.t.v). Đa số những tảng đá này hoặc đã va chạm với các hành tinh và vệ tinh còn lại, hoặc đã rơi vào Mặt Trời, hoặc đã chuyển vào các quỹ đạo xa Mặt Trời, thậm chí có lẽ những quỹ đạo rời khỏi Hệ Mặt Trời. Trong khoảng không gian gần

Mercury.

The planet Mercury is slightly (about 40%) larger than the Moon. Mercury is difficult to see in detail because it appears in the sky relatively near the much brighter Sun. The temperature on Mercury rises to 700 K in daytime and sinks to only about 100 K at night. No space craft have landed on Mercury, but some space craft have flown past Mercury. Their photographs, sent back to Earth by radio signals, show that Mercury has highlands with crater upon crater, and it has plains. The experts see interesting differences between Mercury and the Moon. However, most people (even most astronomers), looking at one picture of the Moon and one of Mercury, cannot tell which picture shows the Moon and which shows Mercury. This simple observation leads to two important conclusions:

First, although the Moon is a satellite of planet Earth, it can be considered like an independent planet when we compare the evolution of Moon, Mercury, Mars, Earth and Venus.

Second, it appears that very many impacts occurred on Mercury a long time ago, just as they did on the Moon. That means that the boulders which hit the Earth and the Moon were not special to Earth's part of the solar system. Indeed these boulders must have been flying throughout the space of the inner solar system.

THE EVOLUTION OF THE SOLID PLANETS : MARS AND ITS VOLCANOES

Mars is about half Earth's size, about twice Moon's size. Mars has been explored by satellites orbiting around Mars, mainly by taking photographs of the surface in ever increasing detail, and by three space craft that have landed on the Martian surface.

Figure V.7

Mars as it appears by assembling many photos from the space craft Viking. Crossing the center of the picture is the 5000 km long rift valley. Dark spots on the left are volcanoes. (NASA/JPL/USGS)

Mars is mostly desert, very cold, inhospitable. Some areas on Mars resemble the lunar plains. Some areas resemble the lunar highlands and are covered with craters. For Mars, just as for Mercury, we have only relative dating. However, because the plains resemble those on the Moon, we assume that the early history of Mars was similar to that of the Moon.

Giant impacts probably occurred early in the history of Mars and the cratering rate was high, just as it was on the Moon and on Mercury. This means that, early in the history of the solar system, many huge rocks were orbiting throughout the inner solar system, at least in the space from Mercury (0.4 A.U. from the Sun) to Mars (1.6 A. U. from the Sun). Most of these rocks either collided with the remaining planets and moons, or fell into the Sun, or changed onto orbits that reached far from the Sun, perhaps even onto orbits leaving the solar system. In the space near

Trái Đất và Mặt Trăng, những tảng đá này đã biến mất, khoảng 3,8 x 10^9 năm về trước. Chúng ta cho rằng những tảng đá cũng đã biến mất khỏi không gian gần Thuỷ Tinh và Hoả Tinh trong cùng thời gian. Điều này có ý nghĩa về mặt lí thuyết (xem chương VI), nhưng chúng ta phải chờ đợi việc xác định niên đại tuyệt đối của đá lấy từ Thuỷ Tinh và Hoả Tinh để xác minh giả thiết này. Nếu điều này là đúng thì phía bên trong của Hệ Mặt Trời dường như đã trống rỗng như hiện nay, từ 3,8 x 10^9 năm về trước.

Ở trên Hoả Tinh, cũng như ở trên Mặt Trăng và trên Thuỷ Tinh các miệng núi lửa do va chạm lớn đã bị lấp đầy bởi các dòng nham thạch. Những dòng nham thạch cuối cùng bao phủ bề mặt và tạo nên các đồng bằng mà chúng ta trông thấy ngày nay. Chúng ta không biết những dòng nham thạch ấy xuất hiện khi nào. Vì Hoả Tinh lớn hơn Mặt Trăng và chứa nhiều nhiệt hơn nên có lẽ những dòng nham thạch trên Hoả Tinh đã có thể duy trì lâu hơn các dòng nham thạch trên Mặt Trăng.

Cho đến lúc ấy, lịch sử của Hoả Tinh giống như lịch sử Mặt Trăng và Thuỷ Tinh. Nhưng trên Hoả Tinh còn xảy ra nhiều sự kiện hơn.

Hoả Tinh có một thung lũng lớn, dài 5000 km, rộng tới 200 km và sâu 7 km. Đây không phải là một lòng sông. Thung lũng này có cấu trúc giống như Thung lũng lớn tạo bởi sự rạn nứt của Trái Đất ở Châu Phi. Vết nứt này xuất hiện do Châu Phi hiện đang tách thành hai lục địa. Vết rạn nứt giữa hai mảnh của Châu Phi trải dài khoảng 5000 km từ nước Jordan (30 vĩ độ Bắc) qua núi Kilimanjaro tới nước Mô-dăm-bích (20 vĩ độ Nam). Tương tự, thung lũng lớn trên Hoả Tinh cũng được xem là thung lũng rạn nứt. Tuy nhiên thung lũng lớn tạo bởi sự rạn nứt ở Châu Phi chỉ khoảng 10^6 năm tuổi. Rõ ràng rằng thung lũng tạo bởi sự rạn nứt của Hoả Tinh không trẻ như vậy. Có thể nhìn thấy nhiều miệng núi lửa do va chạm ở trong thung lũng và sự trượt của đất đã làm mòn các cạnh. Vì không có đá để xác định niên đại tuyệt đối nên chúng ta chỉ có thể nói rằng trước kia, Hoả Tinh đã rất hoạt động. Vì chỉ có một thung lũng rạn nứt như vậy ở trên Hoả Tinh và vì nó vẫn còn nguyên vẹn nên chúng ta có thể dự đoán rằng khá nhiều nhiệt đã thoát ra từ bên trong Hoả Tinh, làm tách bề mặt, nhưng sau đó, phần bên trong Hoả Tinh mất nhiệt, chuyển động trên bề mặt dừng lại và Hoả Tinh trở nên không hoạt động.

Hình V.8: (Xem cuối chương)

Núi lửa lớn nhất trên Hoả Tinh. Ảnh được chụp bởi một camera trên một tàu vũ trụ quỹ đạo. Cấu trúc vòng tròn ở đỉnh có đường kính 65 km. Chân núi bị mây che phủ một phần, có đường kính khoảng 700 km (Ảnh: NASA/JPL).

Có bằng chứng tin cậy cho thấy rằng đúng là phía bên trong Hoả Tinh đã nóng vào thời xa xưa. Ở gần một trong số hai đầu thung lũng rạn nứt có 4 núi lửa khổng lồ, nay đã ngừng hoạt động. Núi lửa lớn nhất trong các núi lửa này được chỉ ra trên hình V.8 và được mô tả trong phần chú thích. Đây là núi lửa lớn nhất trong Hệ Mặt Trời.

Tại sao núi lửa này lại lớn hơn các núi lửa trên Trái Đất? Những núi lửa lớn nhất trên Trái Đất nhô lên từ đáy Thái Bình Dương. Đỉnh của chúng tạo thành các đảo thuộc quần đảo Hawaii. Núi lửa lớn dần theo thời gian vì có một nguồn nhiệt và dung nham ở phía dưới các đảo, phía dưới Thái Bình Dương. Nhưng đáy đại dương ở gần Hawaii dịch chuyển cùng với mảng Thái Bình Dương, gần như về phía nước Nhật Bản trong khi nguồn nhiệt vẫn ở nguyên tại chỗ. Khi núi lửa lớn dần, nó bị mang đi xa nguồn nhiệt. Khi núi lửa bị mang đi đủ xa, nó trở nên không hoạt động. Nó ngừng lớn trước khi trở nên rất cao. Đồng thời một núi lửa mới lại mọc lên phía trên nguồn nhiệt.

Earth and Moon, these rocks disappeared by about 3.8 x 10^9 years ago. We assume that the rocks also disappeared from the space near Mercury and Mars at about the same time. This makes sense theoretically (see Chapter VI), but we must await the absolute dating of rocks from Mercury and Mars in order to confirm the assumption. If this is correct, then the inner solar system was nearly empty, as it still is today, by 3.8x10^9 years ago.

On Mars, as on the Moon and on Mercury, major craters apparently were filled later by lava flows. The last lava flows covered the surface and made the plains we see today. We do not know when these lava flows occurred. Since Mars is larger than the Moon and contains more heat, the lava flows may well have lasted longer than on the Moon.

Up to that stage, the history of Mars is like that of Moon and Mercury. But much more happened on Mars.

Mars has a giant valley, 5000 km long, up to 200 km wide and 7 km deep. This is not a river valley. The valley is structurally similar to the Earth's Great Rift Valley of Africa. It occurs because Africa now is splitting into two continents. The rift between the two pieces of Africa extends some 5000 km from the country Jordan (latitude 30 degrees north) past Mount Kilimanjaro to the country Mozambique (latitude 20 degrees south). By analogy, the giant valley on Mars is believed also to be a rift valley. However, the Great Rift Valley of Africa is only about 10^6 years old. The Martian rift valley is clearly not so young. Many craters can be seen within the valley, and land slides have eroded the edges. Without rocks for absolute dating, we can say only that Mars was active some time ago. Since there is only one such rift valley on Mars, and since it has been preserved, we can speculate that enough heat emerged from the Martian interior to split the surface, but then the interior of Mars lost its heat, motion on the surface stopped, and Mars became inactive.

Figure V.8

The largest volcano on Mars, photographed by a camera on an orbiting space craft. The circular structure on top has a diameter of 65 km. The base, partly obscured by clouds, has a diameter of about 700 km. (NASA/JPL)

There is good evidence that, indeed, the interior of Mars was hot long ago. Near one end of the rift valley there are four giant, now inactive volcanoes. The largest of these volcanoes is shown in Figure V.8 and described in its caption. This is the largest volcanic mountain in the solar system.

Why is it larger than volcanoes on Earth ? The largest volcanoes on Earth grow from the bottom of the Pacific Ocean. Their tops form the islands of Hawaii. The volcanoes grow with time because a source of heat and lavas exists underneath the islands, underneath the Pacific Ocean. But the ocean floor near Hawaii moves with the Pacific plate, approximately toward Japan, while the source of the heat stays in place. As each volcano grows, it is carried away from the source of heat. When it has been carried far enough, the volcano becomes inactive. It stops growing before it becomes extremely tall. Meanwhile a new volcano grows over the source of heat.

9- TVVATLI

Chúng ta suy ra rằng: trên Hoả Tinh, các núi lửa có thể phát triển trong một thời gian dài hơn nhiều và các núi lửa cao nhất trở nên cao hơn rất nhiều so với các đảo ở quần đảo Hawaii vì không có sự kiến tạo mảng nào phát triển để mang các núi lửa đi xa nguồn nhiệt của nó. Trong thực tế, các núi lửa có thể lớn dần lên cho đến khi Hoả Tinh mất nhiệt bên trong của nó. Núi lửa cao nhất trên Hoả Tinh có thể là sản phẩm cuối cùng trong quá trình hoạt động núi lửa của Hoả Tinh. Rất khó xác định thời điểm núi lửa ngừng lớn vì người ta phải đếm số miệng núi lửa do va chạm nằm trên các cạnh của núi lửa. Những miệng núi lửa do va chạm này dễ bị phá huỷ trong một thời gian dài sau khi núi lửa hình thành. Dường như không có miệng núi lửa do va chạm trên một số dòng chảy từ núi lửa. Chúng ta có một sự bất định rất lớn: Có thể núi lửa ngừng hoạt động chỉ khoảng 10^8 năm về trước - rất gần ngày nay, so với thang đo thiên văn; có thể núi lửa ngừng hoạt động từ 10^{10} năm về trước hoặc thậm chí lâu hơn nữa.

SỰ TIẾN TRIỂN CỦA CÁC HÀNH TINH RẮN: TRÁI ĐẤT VÀ KIM TINH

Trái Đất

Trái Đất lớn hơn Hoả Tinh. Nó vẫn còn nhiệt và vẫn còn sự kiến tạo mảng. Tại sao Trái Đất giữ được nhiệt lâu hơn Hoả Tinh, Thuỷ Tinh hoặc Mặt Trăng ? Hành tinh càng lớn thì càng cần nhiều thời gian để nhiệt của nó thoát ra ngoài. Một cách sơ lược, nếu nhiệt thoát đi theo cùng một cách đối với tất cả các hành tinh, thì nhiệt lượng có trong hành tinh tỉ lệ với R^3, lượng nhiệt thoát đi trong một đơn vị thời gian tỉ lệ với R^2, và thời gian để nhiệt thoát đi tỉ lệ với R. Nhưng điều này chỉ là gần đúng vì các hành tinh lớn hơn có thể phát triển nhiều cách hữu hiệu hơn cho phép nhiệt thoát ra ngoài.

Trái Đất lớn nhất trong số những thiên thể này. Nó giữ được nội nhiệt lâu hơn cả. Sự kiến tạo mảng và hoạt động núi lửa là một cách làm cho nhiệt thoát ra từ bên trong Trái Đất. Dường như là gần đây Hoả Tinh đã mất nội nhiệt của nó, mặc dầu chúng ta chưa biết nó mất nội nhiệt bằng cách nào. Rõ ràng là, vì Hoả Tinh đã làm ít nhiệt thoát ra từ nó hơn Trái Đất nên Hoả Tinh có thể làm nhiệt thoát ra mà không cần có các hoạt động kiến tạo mảng dữ dội. Hoả Tinh có thể làm nhiệt thoát ra chủ yếu qua các núi lửa lớn và các dòng nham thạch phun ra từ núi lửa. Trong số các thiên thể bé nhất - Mặt Trăng và Thuỷ Tinh, chúng ta biết rằng Mặt Trăng mất nội nhiệt của nó trong chừng $1{,}5 \times 10^9$ năm đầu, có lẽ chủ yếu bởi các dòng dung nham.

Từ những bằng chứng được đưa ra cho tới lúc này, chúng ta biết rằng Trái Đất rắn không có gì đặc biệt lắm. Nó chỉ hơi lớn hơn và bởi vậy hoạt động mạnh hơn và hoạt động trong thời gian dài hơn.

Kim Tinh

Kim Tinh có kích cỡ gần bằng Trái Đất. Kim Tinh từng được xem là hành tinh chị em của Trái Đất. Các nhà thiên văn tiên đoán: Nếu kích cỡ là tham số quan trọng duy nhất thì Kim Tinh cũng có hoạt động kiến tạo mảng như Trái Đất. Có đúng thế không?

Kim Tinh bị mây che phủ hoàn toàn. Không có một bức ảnh được chụp bởi tàu vũ trụ quỹ đạo nào có thể cho chúng ta thấy bề mặt Kim Tinh. Bằng cách nào chúng ta có thể quan sát bề mặt Kim Tinh? Sóng vô tuyến truyền qua khí quyển Kim Tinh. Bởi vậy chúng ta có thể quan sát bề mặt Kim Tinh nhờ ra-đa: Một tàu vũ trụ quay quanh Kim Tinh phóng sóng vô tuyến xuống. Sóng vô tuyến truyền qua các đám mây, phản xạ ở bề mặt Kim Tinh, trở lại tàu vũ trụ và sau đó các thiết bị trên tàu vũ trụ đo cường độ tín hiệu trở về và thời gian cần thiết để tín hiệu đi tới Kim Tinh và trở về.

On Mars, we deduce, the volcanoes could grow for a much longer time and the tallest became much taller than the Hawaiian islands because no plate tectonics developed to carry the volcanoes away from its source of heat. In fact, the volcanoes may have grown until Mars lost its internal heat. The tallest volcano on Mars may have been its last volcanic production. The actual time when that volcano stopped growing is very difficult to measure, because one must count craters on the sides of the volcano, and these are easily destroyed for a long time after the formation of the volcano. Some flows from the volcano show almost no craters. We have a very large uncertainty : Perhaps the volcano became inactive only some 10^8 years ago, very recently by astronomical standards; perhaps it became inactive 10^9 years ago or even more.

THE EVOLUTION OF THE SOLID PLANETS: EARTH AND VENUS

Earth

Earth is larger than Mars. It still has its heat, still has plate tectonics. Why has Earth retained its heat longer than Mars, Mercury or the Moon? The larger the planet, the more time is needed for its heat to escape. Very roughly, if heat escapes in the same manner for all the planets, then the amount of heat is proportional to R^3, the escaping heat per unit time is proportional to R^2, and the time for heat to escape is proportional to R. But this is very approximate, because the larger planets can develop more efficient ways to let their heat escape.

Earth is the largest among these objects. It has retained its internal heat for the longest time. The Earth's plate tectonics and its volcanoes are one way for heat to escape from Earth's interior. Mars appears to have lost its internal heat, though we do not know how recently. Apparently, since Mars had less heat to get rid of than Earth does, it could do it without all the violent activity of plate tectonics. It could do it mainly through large volcanoes and related volcanic flows. Among the smallest objects, Moon and Mercury, we know that the Moon lost its internal heat in roughly the first 1.5×10^9 years, probably mostly by lava flows.

We learn, from the evidence given so far, that there is nothing very special about the solid Earth. It is merely somewhat larger and, therefore, has been more active and remained active longer.

Venus

Venus is nearly the same size as Earth... Venus used to be thought as a sister planet to Earth. Astronomers made a prediction : If size is the only important parameter, then Venus has plate tectonics like Earth does. Does it?

Venus is totally cloudy. No photograph from an orbiting spacecraft can show us the surface of Venus. How can we explore the surface ? Radio waves pass through the Venus atmosphere. Therefore, we can observe Venus ground by radar : A space craft orbiting Venus sends down radio waves, they pass through clouds, bounce off the ground, come back to the space craft, and then instruments on the space craft measure the intensity of the returned signal and how long the signals needed to travel to Venus and back.

Tàu vũ trụ Magellan bay vào quỹ đạo xung quanh Kim Tinh vào tháng 9 năm 1990. Các quan sát sau nhiều năm đã được sử dụng để lập bản đồ Kim Tinh. Kết quả: Có những đồng bằng nhô lên, hạ xuống một cách thoai thoải và có hai dãy núi có kích cỡ của lục địa. Tuy nhiên, không có những hào sâu giống như ở đáy biển của Trái Đất, ở gần Nhật Bản, nơi mà đáy Thái Bình Dương sụt xuống dưới lục địa Châu Á. Bởi vậy trên Kim Tinh không có hoạt động kiến tạo mảng như ở trên Trái Đất. Sự tiên đoán của chúng ta đã sai. Sai lầm của chúng ta cảnh cáo chúng ta khi chúng ta muốn tiên đoán các tính chất của các hành tinh quay quanh các ngôi sao khác mà chỉ dựa trên kích thước của hành tinh.

Hình V.9: (Xem cuối chương)

Bản đồ Kim Tinh thu được bằng cách cho sóng ra-đa phản xạ trên bề mặt Kim Tinh. Phần sáng là địa hình lởm chởm, được xem là địa hình núi non (Ảnh: NASA/JPL/USGS).

Sự tiên đoán của chúng ta sai ở đâu? Một bằng chứng chính là ở số lượng miệng núi lửa do va chạm. Trên Kim Tinh có khá ít miệng núi lửa do va chạm. Số miệng núi lửa do va chạm đã phát hiện được có thể đã được tích luỹ trong khoảng $5x10^8$ năm qua. Có lẽ đã từng có một thời kì hoạt động núi lửa mạnh, vào khoảng $5x10^8$ năm về trước và nham thạch thời đó đã phá huỷ hoặc đã bao phủ tất cả các miệng núi lửa do va chạm được tạo thành trước đó. Ngày nay Kim Tinh có vẻ không hoạt động. Liệu một sự thay đổi lớn như thế về sự hoạt động của hành tinh có hợp lí hay không? Đã từng có những thời kì trên Trái Đất có những dòng dung nham lớn, ví dụ như dòng dung nham tồn tại $6x10^7$ năm về trước tạo nên cao nguyên mà ngày nay chúng ta gọi là Tiểu lục địa Ấn Độ. Hiện nay, không có những dòng nham thạch lớn như vậy ở trên Trái Đất. Có lẽ trong tương lai lại sẽ có những dòng nham thạch như vậy. Hoạt động địa chất đi qua các thời điểm hoạt động cực đại xen kẽ với những thời điểm ít hoạt động hơn. Bởi vậy, có thể là có lí khi cho rằng Kim Tinh đã từng có một thời hoạt động mạnh cách đây khoảng $5x10^8$ năm, phá huỷ hầu hết các miệng núi lửa do va chạm hình thành trước đó. Có lẽ nhiệt thoát ra trong thời kì hoạt động mạnh ấy đã làm cho hoạt động kiến tạo mảng trở nên không cần thiết.

Bằng chứng thứ hai là ở khí quyển Kim Tinh: Khi trạm thăm dò vũ trụ Venera của Nga hạ cánh xuống bề mặt Kim Tinh, nó đã đo được khí quyển với áp suất gấp 95 lần áp suất khí quyển Trái Đất và chứa chủ yếu là CO_2 với nhiệt độ rất cao, vào khoảng 730 K! (Thậm chí trước đó, quan sát vô tuyến từ Trái Đất đã chỉ ra một nhiệt độ cao ở bề mặt Kim Tinh nhưng những phát hiện này đã không được quan tâm đúng mức). Trên Trái Đất, một nhiệt độ như thế là đủ cao để làm chì nóng chảy. Tại sao bề mặt Kim Tinh quá nóng? Nhiệt trên Kim Tinh không thể có nguồn gốc từ bên trong Kim Tinh. Nó phải có nguồn gốc từ Mặt Trời. Ánh sáng Mặt Trời đi vào khí quyển Kim Tinh và nung nóng khí quyển này cho đến khi năng lượng có thể phát xạ vào vũ trụ. Sau đó khí quyển nóng của Kim Tinh nung nóng các tảng đá nằm trên bề mặt từ phía trên. Các tảng đá nóng vẫn còn ở thể rắn nhưng chúng nóng đến mức chúng có thể biến dạng từ từ khi chúng bị đẩy hoặc nén. Nếu thêm vào đó lại có một ít nội nhiệt dư và dung nham dâng lên tại một điểm nóng ở một nơi nào đó trên Kim Tinh thì bề mặt của nó sẽ không còn hoàn toàn rắn mà sẽ biến dạng. Bởi vậy, nhiệt và nham thạch dâng lên không thể đẩy toàn bộ mảng rắn và cứng đi xa, như đã từng xảy ra ở trên Trái Đất. Có lẽ hoạt động kiến tạo mảng không diễn ra trên Kim Tinh vì khí quyển nóng.

The Magellan space craft went into orbit around Venus in September 1990. Its observations over several years have been used to create a map of Venus. Results : There are rolling plains and two continent-sized mountains. However, there are no deep trenches like in the Earth's ocean floor near Japan, where the Pacific Ocean floor sinks under the Asian continent. Therefore, there are no plate tectonics on Venus similar to that on Earth. Our prediction was wrong. Our error should caution us when we want to predict properties of planets around other stars based only on their size.

Figure V.9

A map of Venus using radar bounced off the Venus surface.
Bright means rough terrain, interpreted as mountainous terrain. (NASA/JPL/USGS)

What was wrong with our prediction ? One main clue is in the number of craters. There are rather few craters. The detected number of craters may be accumulated in merely the last 5 x 10^8 years. Perhaps there was an episode of much volcanic activity about 5 x 10^8 years ago, and the lavas of that time destroyed or covered up all older craters? Now Venus appears inactive. Is such a large change in activity reasonable? Earth has had some episodes of great lava flows, for instance the flows $6x10^7$ years ago that formed the plateau of what is now the Indian sub-continent. Currently, there are no such major lava flows on Earth. Perhaps there will be such flows again in the future. Geologic activity goes through times of peak activity, interspersed with times of less activity. Therefore, it may be reasonable that Venus had a period of intense activity $5x10^8$ years ago which destroyed most older craters. Perhaps the heat escaping during this period of intense activity made plate tectonics unnecessary.

A second clue lies in the Venus atmosphere: When the Russian space probe Venera landed on the surface of Venus, it measured an atmosphere with pressure 95 times that at Earth, mostly CO_2, with the huge temperature of about 730 K! [Even before the Russian landing, radio observations from Earth had indicated a high ground temperature, but they were not taken very seriously.] On Earth, such a temperature is high enough to melt lead. Why is the ground of Venus so hot? The heat on Venus cannot come from inside Venus. It must come from the Sun. Sunlight enters the atmosphere and heats the atmosphere until the energy can be radiated into space. The hot Venus atmosphere then heats the surface rocks from above. The hot rocks are still solid, but they are so hot that they can slowly adjust their shape when they are pushed or squeezed. If, in addition, some extra internal heat and lava rises at a hot spot somewhere on Venus, the surface will not remain truly solid but will adjust its shape. Therefore, the rising heat and lava cannot push away an entire hard, solid plate as happens on Earth. Perhaps plate tectonics are absent on Venus because of the hot atmosphere.

Mặc dầu hiện nay các tảng đá trên Kim Tinh ở thể rắn, chúng có lẽ đã từng trở nên kém rắn trong suốt thời kì khi mà toàn bộ Kim Tinh đã ấm hơn, trong thời kì hoạt động mạnh, khoảng $5x10^8$ năm về trước. Sau đó, đá trên bề mặt Kim Tinh có lẽ đã đủ mềm để các miệng núi lửa do va chạm hình thành trước đó bị san phẳng và trở nên không nhìn thấy được ngay cả nếu như chúng không bị bao phủ hoàn toàn bởi các dòng nham thạch xuất hiện vào thời kì ấy. Một ngày nào đó, khi chúng ta có thể giải thích sự thoát nhiệt cả ở trên Kim Tinh và Trái Đất, chắc chắn chúng ta sẽ hiểu về Trái Đất rõ hơn hiện nay (câu hỏi 9).

KHÍ HẬU TRÊN HOẢ TINH CÓ THAY ĐỔI HAY KHÔNG ?

Ngày nay Hoả Tinh dường như hoang vu. Chúng ta nhìn thấy Hoả Tinh có màu đỏ vì đất trên Hoả Tinh chứa một tỉ lệ phần trăm ô-xít sắt (F_2O_3) lớn. Hoả Tinh có rất ít khí quyển, gồm 95% CO_2, có áp suất bằng khoảng 1% áp suất khí quyển Trái Đất. Không một máy bay nào có thể bay trên Hoả Tinh, nhưng các khinh khí cầu mang từ Trái Đất lên có thể sẽ bay qua bề mặt Hoả Tinh trong vòng vài năm. Trên Hoả Tinh có các đám mây mỏng, mỏng đến nỗi chúng thường không cản trở việc quan sát bề mặt Hoả Tinh của chúng ta. Tuy nhiên, những trận bão bụi có thể bao phủ bề mặt Hoả Tinh gần như tới đỉnh các núi lửa cao nhất.

Bề mặt Hoả Tinh rất lạnh. Vào mùa hạ, nhiệt độ bề mặt hiếm khi vượt quá 290 K. Các khu vực có màu trắng ở gần các cực được tạo bởi băng. Chúng thường có nhiệt độ đủ thấp để làm CO_2 đóng băng (dưới 150 K ở áp suất bề mặt Hoả Tinh), nhưng vào mùa hè CO_2 bay hơi. Khi ấy chỉ còn lại phần vĩnh cửu là chỏm ở cực Hoả Tinh và nhiệt độ lên tới 190 K nói lên rằng phần băng này chính là nước đóng băng. Độ sâu của lớp nước đóng băng ở cực chỉ cỡ vài mét, bé hơn rất nhiều độ sâu của lớp nước đóng băng ở gần các cực Trái Đất.

Có nhiều bằng chứng cho thấy rằng trước đây Hoả Tinh đã khác với ngày nay. Nước ở thể lỏng đã từng tồn tại trên bề mặt Hoả Tinh, và một số thời kì trong quá khứ, khí quyển Hoả Tinh đã dày hơn, bởi vậy nước ở thể lỏng đã có thể tồn tại dễ dàng hơn. Sau đây là một vài bằng chứng:

a) Toàn bộ Hoả Tinh đã được chụp ảnh từ các vệ tinh quay trên quỹ đạo xung quanh Hoả Tinh. Trên những vùng đất lâu đời nhất (bị va chạm nhiều nhất), có những thung lũng giống như các lòng sông (nay đã cạn). Ở nhiều nơi trên Hoả Tinh cũng có các con kênh (nay đã cạn). Rõ ràng là ở đó có nhiều nước (nếu đó đúng là nước) đã từng chảy đến nỗi có lẽ các hồ và thậm chí các đại dương đã hình thành và một khí quyển mới đã xuất hiện. Tất cả nước ở thể lỏng này đã đến từ đâu? Có lẽ nhiều nước đã đóng băng vào trong lòng đất, ở độ sâu nhiều mét? Điều này được biết rõ ở các miền cực Bắc của Trái Đất như Alaska. Trên Hoả Tinh, nước đã từng chảy trên các con kênh có lẽ đã tan ra từ chỉ một phần nhỏ của băng ngầm dưới đất và phần lớn lượng băng đó vẫn còn tồn tại thậm chí cho tới ngày hôm nay.

Hình V.10: (Xem cuối chương)

"Các con kênh cạn" ở trên các cao nguyên của Hoả Tinh, nay đã khô, gợi ý rằng các dòng nước chảy xiết đã từng tồn tại trên Hoả Tinh trước đây. Khu vực được chụp ảnh rộng khoảng 300 km (Ảnh: NASA).

Although the rocks on Venus are now solid, they may have become less solid during the time when all of Venus was somewhat warmer, during the time of great activity some 5×10^8 years ago. Then the surface rocks perhaps were soft enough so that older craters were smoothed out and became invisible, even if they were not all covered by the lava flows of that time. Someday, when we can explain the escape of heat on both Venus and Earth, we shall surely understand the Earth better than we do now. [Question 9.]

THE CLIMATE ON MARS : HAS IT CHANGED?

Mars now is mostly desert. Mars appears red to the eye because the soil contains a large percentage of iron oxide (Fe_2O_3). Mars has very little atmosphere, composed 95% of CO_2 , with a pressure about 1% of ours. No airplanes can fly on Mars, but balloons brought from Earth will probably fly across the surface of Mars within a few years. There are thin clouds, so thin that they usually do not obscure our view of the Martian surface. However, dust storms can cover the surface of Mars almost to the top of the highest volcanoes.

The Martian surface is very cold. In summer, the ground temperature rarely rises above 290 K. White regions near the poles consist of ices. They usually have a temperature cold enough for frozen CO_2 (less than 150 K at the Martian ground pressure), but in summer the CO_2 evaporates. Then only the permanent part of the polar cap remains and the temperature, up to 190 K, indicates that the ice is water ice. The depth of the polar water ice is only a few meters, much less than the depth of ice near the Earth's poles.

There is much evidence that Mars was different in the past. Liquid water existed on the surface, and the atmosphere was thicker sometime in the past, so that liquid water could exist more easily. Here are some of the kinds of evidence :

a) All of Mars has been photographed from satellites in orbit around Mars. On the oldest (most cratered) terrains there are river-like (but now dry) valleys. Also, in many places on Mars there are (now dry) channels where, apparently, so much water flowed (if it was water) that perhaps lakes and even an ocean formed, and a new atmosphere appeared. Where did all the liquid water come from? Perhaps much water was frozen into the ground, many meters deep. This is well known in arctic parts of the Earth such as Alaska. On Mars, the water that flowed in the channels probably melted from only a small part of the underground ice, and much of the ice still remains even now.

Figure V.10

"Runoff channels" in the Martian highlands, now dry, suggesting powerful water flows at some time in the past The image is about 300 km wide. (NASA)

b) Các nguyên tử hiđrô và một số nguyên tử ôxi, bằng một nửa số nguyên tử hiđrô đang thoát khỏi Hoả Tinh. Tỉ số này gợi ý rằng nước đang thoát khỏi bề mặt Hoả Tinh. Bởi vậy, trước đây trên Hoả Tinh có nhiều nước hơn hiện nay.

c) Có một bằng chứng bổ sung cho thấy rằng nước đã thoát khỏi Hoả Tinh: Một số thiên thạch được tìm thấy trên Trái Đất được biết là có nguồn gốc từ Hoả Tinh. Lượng nước ít ỏi tìm thấy trong các thiên thạch này có tỉ số giữa đơ-tê-ri (hiđrô nặng - hạt nhân gồm một proton và một neutron) và hiđrô thường khá lớn so với tỉ số ấy của nước ở trên Trái Đất. Tỉ số này được giải thích như thế nào? Các phân tử nước có chứa đơ-tê-ri hơi nặng hơn, chuyển động hơi chậm hơn và bởi vậy chúng bốc hơi và thoát khỏi Hoả Tinh hơi chậm hơn các phân tử bình thường. Khi đã có nhiều nước bay hơi, khá nhiều phân tử nước có chứa đơ-tê-ri còn dư lại (câu hỏi 10). Bởi vậy, việc quan sát được đơ-tê-ri dư ra có nghĩa là nước đã từng bốc hơi khỏi Hoả Tinh và đã từng có nhiều nước hơn tồn tại trên Hoả Tinh vào thời xa xưa.

d) Năm 1976, hai con tàu vũ trụ mang tên Viking đã đổ bộ xuống Hoả Tinh. Chúng đo thành phần hoá học của khí quyển Hoả Tinh (chủ yếu là CO_2). Kết quả thu được: Tỉ số giữa argon và các nguyên tố nhẹ hơn ở trên Hoả Tinh lớn hơn ở trên Trái Đất. Điều này xảy ra khi đa phần khí quyển thoát khỏi hành tinh. Nói một cách chính xác hơn, các nguyên tử như hiđrô và ôxi và các phân tử nhẹ hơn, như hơi nước (phân tử lượng 18) thoát vào Vũ trụ. Nhưng các nguyên tử nặng hơn ở trong khí quyển như argon (nguyên tử lượng 40) và các phân tử như CO_2 (nguyên tử lượng 28) có tốc độ chuyển động nhiệt khá thấp và không thể thoát khỏi hành tinh. Lượng argon ở trên Hoả Tinh cho ta biết rằng Hoả Tinh đã từng có khí quyển bằng 1/4 khí quyển Trái Đất.

e) Ở trên Trái Đất, các núi lửa đóng góp nhiều CO_2 và hơi nước vào khí quyển. Những núi lửa khổng lồ trên Hoả Tinh có lẽ đã từng đóng góp nhiều hơi nước vào khí quyển trong thời gian núi lửa hoạt động.

f) Năm 1997, một trạm thăm dò vũ trụ mang tên Người tìm đường Hoả Tinh đã đổ bộ xuống Hoả Tinh và một chiếc xe nhỏ có 6 bánh (nặng 1 kg và cao khoảng 30 cm) đã được điều khiển (thông qua tàu vũ trụ đổ bộ) để thám hiểm tính chất vật lí của một số hòn đá và chụp ảnh vùng lân cận. Vị trí đổ bộ đã được chọn trên một trong số những con kênh mà người ta cho rằng đã từng có nước chảy ở đó vào thời xa xưa. Thực vậy, các bức ảnh cho thấy một tảng đá bị nghiêng và đất đá xung quanh chứng tỏ rằng nhiều nước ở thể lỏng đã chảy qua tảng đá này vào một kì nào đó trong quá khứ.

g) Một tàu vũ trụ mang tên Người quan sát tổng thể Hoả Tinh, hiện đang quay quanh Hoả Tinh, đã chụp ảnh một khu vực nhỏ trên bề mặt Hoả Tinh và cho thấy rằng có một cái hồ cạn, vì nước đã bay hơi hết. Khi nước mưa chảy trên sa mạc ở trên Trái Đất, nó hoà tan nhiều hợp chất hoá học. Sau đó những hoá chất này được mang tới một hồ nhỏ tạm thời. Khi nước bốc hơi, các hoá chất hiện ra dưới dạng các kết tủa có màu sáng ở trên mặt đất. Những kết tủa như vậy đã được quan sát thấy ở trên Hoả Tinh.

h) Vùng đất thấp ở phía bắc rất phẳng. Tính phẳng này có thể được giải thích như là vật chất kết tủa trên đáy của một đại dương cổ.

Tại sao 8 loại chứng cớ này lại được nêu ra ở đây? Chúng được nêu ra không phải chỉ để mà nhớ! Chúng được nêu ra ở đây để chỉ ra số lượng và chất lượng của các bằng chứng về một khí quyển ẩm ướt hơn ở trên Hoả Tinh, vào thời kì trước đây. Ba loại bằng chứng (từ b đến d) là định lượng. Nhưng tự bản thân chúng không thuyết phục được nhiều nhà thiên văn. Chúng ta không biết khí quyển này đã từng tồn tại cách đây bao lâu và nó tồn tại trong bao lâu.

b) Hydrogen atoms and about half as many oxygen atoms are escaping from Mars. The ratio suggests that water is leaving the surface of Mars. Therefore, more water existed on Mars in the past.

c) There is additional evidence that water has escaped from Mars : Some meteorites found on Earth are known to come from Mars. The small amount of water found in these meteorites has a relatively large ratio of deuterium (heavy hydrogen; the nucleus consists of a proton and a neutron) to normal hydrogen compared to water on Earth. How is that ratio explained? The slightly heavier water molecules with deuterium move slightly less fast, and thus they evaporate and escape from Mars slightly less rapidly than do normal molecules. When much water has evaporated, relatively more of the water molecules with deuterium remains behind. [Question 10.] Therefore, the observations of extra deuterium mean that water evaporated from Mars, and more water must have existed on Mars long ago.

d) In 1976, two space craft named Viking landed on Mars. They measured the chemical composition of the atmosphere (mostly CO_2). One result : The ratio of Argon to lighter elements is larger than on Earth. This happens when much of an atmosphere escapes from the planet. More precisely, the atoms like H and O and the lighter molecules like water vapor (atomic weight 18) escape into space. But the heavier atoms in the atmosphere like Argon (atomic weight 40) and molecules like CO_2 (atomic weight 28) have a relatively low thermal speed and cannot escape. The amount of Argon on Mars suggests that Mars once had 1/4 of Earth's atmosphere.

e) On Earth, volcanoes contribute much CO_2 and water vapor to our atmosphere. The giant volcanoes on Mars probably contributed much water vapor to the atmosphere at the time when the volcanoes were active.

f) In 1997, a space probe called Mars Pathfinder landed on Mars and a small six-wheeled vehicle (weighing 1 kg and about 30 cm high) was commanded (via the landed space craft) to explore the physics of several rocks and take photographs of the surroundings. The landing site was chosen on one of the channels that suggest a long-ago water flow. Indeed, photographs showed a tilted rock and surrounding soil that suggested much liquid water flowing past the rock at some time in the past.

g) A space craft called Mars Global Surveyor, now orbiting Mars, has photographed a small area on the surface that suggests that a lake has evaporated. When rain water runs on the desert of Earth, it dissolves various chemical compounds. These are then carried to a small temporary lake. When the water evaporates, the compounds appear as light-colored deposits on the ground. Such has been observed on Mars.

h) The northern lowlands are extremely flat. The flatness may be explained by materials deposited on the floor of an ancient ocean.

Why are these eight kinds of evidence listed here ? They are not to be memorized ! They are listed here to show the quality and quantity of evidence for an earlier, wetter atmosphere on Mars. Three kinds of evidence (b to d) are quantitative. But by themselves they did not convince many astronomers. We do not yet know how long ago this atmosphere existed, or for how long it existed.

Chúng ta không biết đã từng có bao nhiêu nước (nhưng có lẽ ít hơn nhiều so với lượng nước ở trên Trái Đất). Bây giờ, với vài kiểu bằng chứng mới, mặc dầu chỉ là định tính, người ta đã chấp nhận một cách rộng rãi (tuy vẫn chưa được chứng minh thực sự) rằng Hoả Tinh đã từng có một khí quyển dày hơn và đã từng có nước ở thể lỏng.

LIỆU CÓ - HOẶC ĐÃ TỪNG CÓ - SỰ SỐNG TRÊN HOẢ TINH HAY KHÔNG?

Một thế kỉ trước, một số nhà thiên văn khi quan sát Hoả Tinh qua kính thiên văn đã có cảm tưởng là đã nhìn thấy những đường mỏng trên Hoả Tinh. Họ cho rằng những đường mỏng này là những con kênh đào. Họ cũng có cảm tưởng là đã nhìn thấy màu lục ở gần các cực màu trắng. Họ giải thích màu lục này là màu thực vật. Cả những đường và màu sắc đã đánh lừa con mắt và trí óc của chúng ta. Trên Hoả Tinh không có các kênh đào và không có thực vật. Nhưng do sự gợi ý (sai lầm) về các kênh đào và thực vật trên Hoả Tinh, nhiều cuốn tiểu thuyết đã được viết, kể về cuộc sống trên Hoả Tinh và vấn đề sự sống trên Hoả Tinh vẫn thu hút sự quan tâm của đông đảo quần chúng.

Chắc chắn là không có sự sống cao cấp ở trên Hoả Tinh như được miêu tả trong các tiểu thuyết. Liệu có bằng chứng nào về sự sống nguyên thuỷ, đơn bào, ví dụ như vi khuẩn, hay không? Ngay cả ở trên Trái Đất, chúng ta vẫn không biết các tế bào sống đầu tiên đã hình thành như thế nào? Nhưng mọi người đồng ý rằng nước ở thể lỏng là cần thiết cho các tế bào sống như chúng ta biết về chúng. Sự có mặt có thể của nước trước đây ở trên Hoả Tinh làm nhiều người lạc quan cho rằng các tế bào sống có thể đã hình thành ở trên Hoả Tinh ở một thời kì nào đó trong quá khứ.

Liệu có sự sống ở trên Hoả Tinh hiện nay hay không?

Bức xạ tử ngoại của Mặt Trời giết chết mọi vi khuẩn ở trên bề mặt Hoả Tinh nhưng chúng ta có thể tưởng tượng có những vi khuẩn sống trong lòng đất. Năm 1976, hai tàu vũ trụ mang tên Viking đã đổ bộ xuống Hoả Tinh. Một cánh tay dài vươn ra từ con tàu, xúc một ít đất và đưa vào con tàu. Ở bên trong con tàu vũ trụ, các hoá chất được bổ sung vào đất. Các hoá chất này có thể được các sinh vật (nếu có) ở trong đất dùng làm thức ăn. Các hoá chất có chứa các-bon phóng xạ. Nếu CO_2 phóng xạ xuất hiện trong các khí bao quanh đất thì đây sẽ là bằng chứng về sự trao đổi chất và sự sống nguyên thuỷ. Thực nghiệm không phát hiện được bằng chứng nào về sự trao đổi chất. Thực nghiệm cũng không tìm thấy bằng chứng về vi khuẩn đã chết.

Kết luận rút ra từ Viking là: Tại hai nơi mà các thí nghiệm của tàu Viking đã đo đạc đất trên Hoả Tinh, đất chưa hề chứa bất cứ một bằng chứng về sự sống có thể đo được nào cả. Vì mọi phép đo đều có sai số nên chúng ta không thể nói rằng không có vi khuẩn đã chết, nhưng chúng ta có thể nói rằng có ít vi khuẩn hơn cả ở những nơi khô cằn nhất và hầu như không có sự sống của Trái Đất, ở châu Nam Cực. Nói một cách chính xác, kết luận này chỉ đúng cho hai vị trí hẹp ở trên Hoả Tinh. Tuy nhiên, chúng ta cho rằng hai nơi này là điển hình cho toàn bộ Hoả Tinh vì những luồng gió mạnh trên Hoả Tinh có thể mang vi khuẩn đang sống hoặc đã chết từ bất cứ nơi nào trên Hoả Tinh tới những nơi tàu Viking đổ bộ.

Năm 1996, một bài báo nói rằng một thiên thạch có nguồn gốc từ Hoả Tinh được tìm thấy ở châu Nam Cực có chứa những dấu hiệu của sự sống nguyên thuỷ trên Hoả Tinh vào thời xa xưa. Điều này đã gây ra một sự xôn xao quốc tế rất mạnh mẽ. Nhờ những nghiên cứu tiếp theo, kết luận nêu trên không còn được mọi người tin nữa nhưng sự quan tâm của mọi người về khả năng có sự sống trên Hoả Tinh vẫn còn. Nó dẫn đến các kế hoạch phóng tiếp một số tàu vũ trụ tới Hoả Tinh trong vòng mười năm tới.

We do not yet know how much water there was (but probably very much less than on Earth). Now, with several new kinds of evidence, though only qualitative, it is widely accepted (though still not really proven) that Mars had a thicker atmosphere and liquid water.

IS THERE - OR WAS THERE - LIFE ON MARS?

A century ago, some astronomers looking at Mars through telescopes had visual impressions of thin lines on Mars, popularly interpreted as canals, and they had impressions of green color near the white poles, interpreted as vegetation. Both lines and color were tricks of the eye and of our mind. There are no canals. There is no vegetation. But, because of the (incorrect) suggestion of canals and vegetation on Mars, many novels were written about life on Mars, and the question of life on Mars has retained broad popular interest.

Certainly there is no advanced, intelligent life as it is described in novels. Is there any evidence for primitive, single-celled life such as bacteria? Even on Earth, we still do not know how the first living cells formed. But everyone agrees that liquid water is essential for living cells as we know them. The probable past presence of water on Mars makes many people optimistic that living cells may have formed on Mars at some time in the past.

Is there any life on Mars now?

Solar ultraviolet radiation kills any bacteria on the surface, but one can imagine bacteria living in the soil. Two space craft named Viking landed on Mars in 1976. A long arm extended from the craft, picked up some soil, and then deposited the soil inside. Inside the space craft, chemicals were added that might be used as food by any living organisms in the soil. The chemicals included radioactive carbon. If radioactive CO_2 appeared in the surrounding gases, this would be evidence for metabolism and primitive life. The experiments detected no evidence for metabolism. The experiments also found no evidence for any dead bacteria.

The conclusion from Viking was : In the two places where the Viking experiments measured the Martian soil, the soil has never contained any measurable amount of life. Since every measurement has some uncertainty, we cannot say there are zero dead bacteria, but we can say there are less bacteria than is found in the driest, most nearly lifeless part of the Earth, in Antarctica. Strictly, that conclusion holds only for two small places on Mars. However, we expect these two places to be typical of all of Mars, because the strong Martian winds can bring live or dead bacteria from anywhere on Mars to the Viking sites.

In 1996, an article was published claiming that a meteorite, found in Antarctica, had come to Earth from Mars and carried signs of primitive life on Mars long ago. It caused enormous international excitement. Because of further research, the conclusion is no longer believed, but the popular excitement about possible life on Mars still remains. It has caused the planning of several more space probes to Mars in the next ten years.

MỘT SỐ BÀI HỌC LIÊN QUAN ĐẾN SỰ SỐNG TRÊN TRÁI ĐẤT ĐƯỢC RÚT RA TỪ VIỆC NGHIÊN CỨU KIM TINH

Áp suất khí quyển trên bề mặt Kim Tinh rất cao, gấp 95 lần áp suất khí quyển Trái Đất. Tàu vũ trụ đầu tiên do người Nga phóng lên Kim Tinh đã bị nén bẹp bởi áp suất khí quyển Kim Tinh. Khí quyển hầu như chỉ chứa toàn CO_2. Nhiệt độ bề mặt ở những nơi tàu vũ trụ đã đổ bộ thành công vào khoảng 730 K và nhiệt độ ở một số vị trí khác thì cao hơn. Sự sống, như chúng ta biết về nó, không tồn tại trên Kim Tinh. Chúng ta giải thích như thế nào về sự quá khác nhau giữa Kim Tinh và Trái Đất?

Hiệu ứng nhà kính

Nếu không có khí quyển, như trường hợp Mặt Trăng và Thuỷ Tinh thì nhiệt độ bề mặt ổn định bởi vậy năng lượng của ánh sáng Mặt Trời được hấp thụ bởi bề mặt được cân bằng bởi năng lượng ở dạng bức xạ (hồng ngoại) được phát xạ bởi bề mặt (câu hỏi 8).

Nếu khí quyển chứa CO_2 và/hoặc có thêm H_2O thì bức xạ hồng ngoại từ mặt đất bị hấp thụ bởi các phân tử trong khí quyển. Sau đó các phân tử tái phát xạ bức xạ theo mọi hướng. Sự hấp thụ và tái phát xạ lặp lại nhiều lần. Nếu nhiệt độ ở phía dưới cao hơn ở phía trên thì bức xạ tán xạ dần lên phía trên. Cuối cùng, ở một độ cao nào đó trong khí quyển, bức xạ có thể thoát vào vũ trụ. Nhiệt độ bề mặt được điều chỉnh sao cho năng lượng bức xạ tán xạ lên phía trên và thoát vào vũ trụ cân bằng với năng lượng ánh sáng Mặt Trời bị hấp thụ bởi mặt đất. Sự chặn bức xạ thoát ra bởi khí quyển được gọi là hiệu ứng nhà kính. Nó sưởi nóng không chỉ mặt đất mà cả khí quyển phía trên mặt đất.

Khi có thêm CO_2 và/hoặc H_2O được bổ sung vào khí quyển, thì sự tán xạ lên phía trên bị chậm lại. Để bù lại, mặt đất và khí quyển nóng lên cho đến khi sự chênh lệch nhiệt độ so với khí quyển trên cao đủ lớn để tất cả năng lượng tới đó có thể thoát ra. Trên Kim Tinh có nhiều CO_2 đến mức nhiệt độ mặt đất lên tới khoảng 730 K. (Khí quyển Kim Tinh còn không thích hợp với con người vì những lí do khác. Ví dụ: Các lớp mây ở trên cao gồm chủ yếu là axít sun-fu-ríc tinh khiết, H_2SO_4).

Tại sao Trái Đất lại quá khác Kim Tinh? Cho rằng các núi lửa trên Trái Đất phát ra nhiều CO_2, tại sao có quá ít CO_2 trong khí quyển Trái Đất? Câu trả lời là: Phần lớn CO_2 được tạo bởi núi lửa bị hấp thụ bởi đại dương, ở đó các-bon là thành phần của các đá các-bon-nát và vỏ sò. Bởi vậy, chúng ta có quá ít CO_2 trong khí quyển Trái Đất vì nước ở thể lỏng và các đại dương tồn tại trên Trái Đất. Kim Tinh ở đủ gần Mặt Trời và bị Mặt Trời nung đủ nóng bởi vậy hơi nước trên Kim Tinh không bao giờ chuyển sang thể lỏng. Không có nước ở thể lỏng, toàn bộ CO_2 từ các núi lửa ở lại trong khí quyển và kết quả là Kim Tinh rất nóng.

Hiệu ứng nhà kính trên Trái Đất là rất quan trọng đối với sự sống trên Trái Đất. Nhiệt độ trung bình ở bề mặt Trái Đất là $15^oC = 288$ K. Do đó, nước trên Trái Đất chủ yếu ở thể lỏng. Một phép đo hay được trích dẫn về hiệu ứng nhà kính trên Trái Đất là như sau: Giả sử rằng không có hiệu ứng nhà kính và bức xạ phát từ mặt đất thoát li thẳng vào không gian, nhưng Trái Đất vẫn còn đủ khí quyển và đại dương để làm cho nhiệt độ đồng đều khắp Trái Đất và Trái Đất vẫn còn phản xạ 35% ánh sáng của Mặt Trời. Khi đó, nhiệt độ của Trái Đất sẽ là $-20^oC = 253$ K (câu hỏi 11). Với giả thiết này thì nước trên Trái Đất sẽ đông lại và Trái Đất giống như Hoả Tinh, không có sự sống. Hiệu ứng nhà kính trên Trái Đất là rất quan trọng đối với nước ở thể lỏng và với sự sống trên Trái Đất.

SOME LESSONS FROM VENUS REGARDING LIFE ON EARTH

The atmospheric pressure on the ground of Venus is very high, 95 times ours. The first spacecraft sent by Russia to land on Venus collapsed under the pressure. The atmosphere is nearly all CO_2. The ground temperature at the successful landers was about 730 K, and in places it is higher. Life as we know it is impossible on Venus. How do we explain that Venus is so different from Earth?

The greenhouse effect

If there is no atmosphere, as for the Moon or Mercury, the ground temperature is fixed so that the energy of sunlight absorbed by the ground is balanced by the energy in the (infrared) radiation emitted by the ground. [Question 8.]

If an atmosphere containing CO_2 and/or H_2O is added, the infrared radiation from the ground is absorbed by molecules in the atmosphere. The molecules then re-emit the radiation in any direction. Absorption and re-emission are repeated very many times. If the temperature is warmer below than above, the radiation slowly diffuses upward. Finally, at some height in the atmosphere, the radiation can escape into space. The temperature of the ground is adjusted so that the energy in radiation diffusing upwards and escaping equals the energy in sunlight absorbed by the ground. The atmospheric blocking of the escaping radiation is called the greenhouse effect. It warms not only the ground but the atmosphere above the ground.

When more CO_2 and/or H_2O is added to the atmosphere, the upward diffusion is slowed down. To compensate, the ground and atmosphere warm up until the temperature difference to the high atmosphere is sufficient so that all the arriving energy can escape. On Venus, there is so much CO_2 that the ground temperature has risen to about 730 K. (The Venus atmosphere is unpleasant for humans in other ways. For instance the high cloud layers are nearly pure sulfuric acid, H_2SO_4.)

Why is Earth different from Venus ? Given that our volcanoes emit much CO_2, why is there so little CO_2 in our atmosphere ? The answer is: Most of the CO_2 produced by volcanoes is absorbed by the ocean, where the carbon is used in carbonate rocks and seashells. Therefore, we have so little CO_2 in our atmosphere because liquid water and oceans exist on Earth. Venus is close enough to the Sun, and heated sufficiently by the Sun, so that water vapor on Venus never became liquid. Without liquid water, all the CO_2 from volcanoes remained in the atmosphere, and as a result Venus is very hot.

The greenhouse effect on Earth is very important for life on Earth. The Earth's average temperature at the surface is 15 C = 288 K. Therefore, water on Earth is mainly liquid. An often quoted measure of the natural greenhouse effect on Earth is the following. Assume that there is no greenhouse effect, that radiation emitted from the ground escapes directly into space, but Earth still has enough atmosphere and oceans to make the temperature uniform over the Earth, and that Earth still reflects 35% of the sunlight. Then our temperature is -20 C = 253 K. [Question 11.] With this assumption, water on Earth is frozen and Earth resembles Mars, without life.The greenhouse effect on Earth is essential for liquid water and life on Earth.

Thời đại công nghiệp bắt đầu từ khoảng 150 năm trước. Từ bấy đến nay, con người đã đốt cháy nhiều dầu và khí trong các động cơ. Khí CO_2 sinh ra được bổ sung vào khí quyển. Làm sao chúng ta biết được? Không khí bị bẫy trong các núi băng từ hai thế kỉ trước đây chứa ít CO_2 hơn không khí hiện nay. Chắc chắn là chúng ta đang làm tăng hiệu ứng nhà kính, nhưng chúng ta còn chưa chắc chắn, làm tăng bao nhiêu. Liệu một khí hậu ấm hơn có làm tăng lượng mây che, khiến cho nhiều ánh sáng Mặt Trời bị phản xạ vào không gian hơn? Một hiệu ứng như vậy có thể giữ cho khí hậu của chúng ta không đổi. Còn các đại dương sẽ phản ứng thế nào? Các đại dương có thể xử sự như một chai nước xô-đa nếu bạn làm nóng nước trong chai, thì nhiều CO_2 hơn sẽ thoát ra khỏi chai. Có khả năng là một khí quyển ấm hơn sau một thời gian sẽ dẫn đến một đại dương ấm hơn. Nếu một đại dương ấm hơn lại thả thêm CO_2 vào khí quyển thì khí quyển lại trở nên ấm hơn nữa. Khi đó, nó lại làm đại dương ấm thêm... Đây là một chu trình tăng theo thời gian theo hàm mũ! Liệu khí quyển Trái Đất có nóng lên đến mức nó trở thành giống Kim Tinh hay không? May thay, chúng ta biết rằng cách đây 10^8 năm, khi mà khí quyển chứa nhiều CO_2 hơn rất nhiều, và nhiệt độ chung cao hơn một vài độ, thì điều đó đã không xảy ra. Dường như khí hậu của chúng ta được cân bằng tốt, nhưng chúng ta không biết nó tốt ra sao.

Nhưng nếu khí hậu toàn cầu chỉ nóng hơn một chút cũng có thể ảnh hưởng lớn đối với nền văn minh nhân loại. Thí dụ băng của châu Nam Cực có thể tan nhiều đến mức mực nước ở các đại dương sẽ dâng lên thêm nhiều mét. Khi đó, các đại dương sẽ huỷ diệt thành phố New York, thành phố Hồ Chí Minh và nhiều thành phố ven biển khác. Các số liệu do các vệ tinh bay quanh Trái Đất thu được đang được sử dụng để tìm hiểu rõ hơn, xem băng của châu Nam Cực nóng chảy khó, dễ ra sao. Trong khi đó các điểm chưa chắc chắn về mặt khoa học lại lớn. Nhiều nhà khoa học đã lo lắng, và họ nghĩ rằng các chính phủ cũng phải lo lắng. Liệu người ta có thể nghĩ ra cách làm giảm tốc độ sản xuất CO_2 mà không hạn chế các tiến bộ công nghệ? Có lẽ người ta có thể đẩy CO_2 vào lòng đại dương sâu thẳm chăng?

BÀI HỌC ĐỐI VỚI TRÁI ĐẤT VÀ SỰ SỐNG TRÊN TRÁI ĐẤT ĐƯỢC RÚT RA TỪ CÁC HÀNH TINH KHÁC

Trái Đất là một hành tinh rất phức tạp. Nhiệt độ toàn cầu là kết quả của sự cân bằng giữa nhiều lực mạnh của tự nhiên. Sự sống phụ thuộc một cách quyết định vào nhiệt độ ấy, đặc biệt vì sự sống cần có nước ở thể lỏng. Thế mà chúng ta không biết con người đã làm thay đổi sự cân bằng giữa các lực ấy như thế nào. Làm thí nghiệm với khí hậu Trái Đất là nguy hiểm, vì có quá nhiều điều không chắc chắn về mặt khoa học (câu hỏi 12). Chúng ta có thể giải phóng các lực nhiều hơn là điều khiển chúng. Các hành tinh khác, khác với Trái Đất ở mức độ cần thiết để có thể cho chúng ta biết nhiều điều về Trái Đất mà không cần làm thí nghiệm.

The industrial age started about 150 years ago. Ever since then, humans have been burning much oil and gasoline in their motors and engines. The resulting CO_2 is added to our atmosphere. How do we know? Air that was trapped in glacier ice two centuries ago contains less CO_2 than does air today. Certainly, we are increasing the greenhouse effect, but we are not yet sure by how much. Will a warmer climate increase the cloud cover so that more sunlight is reflected into space? Such an effect can keep our climate nearly constant. How will the oceans react? The oceans may behave like the contents of a soda bottle : if you warm the water in the bottle, more CO_2 emerges from the water in the bottle. A warmer atmosphere probably means, after some time, a warmer ocean. If a warmer ocean releases CO_2 into the atmosphere, then the atmosphere becomes still warmer. Then it warms the ocean more, and so on. This is a cycle that grows exponentially with time! Will Earth's atmosphere warm up until it becomes like Venus? Fortunately, we know this did not happen 10^8 years ago, when there was much more CO_2 in the atmosphere and the global temperature was higher by several degrees. Our climate appears to be well balanced, but we do not know how well.

Even a rather modest global warming can be significant to human civilization. For instance, so much ice may melt in the Antarctic that the oceans rise by several meters. Then the oceans destroy New York City, Ho Chi Minh City, and many more coastal cities. Data from Earth-orbiting satellites are being used to learn more about how easily the Antarctic ices melt. Meanwhile, the scientific uncertainties are large. Many scientists are worried, and they think governments should worry also. Can one think of ways to reduce the production rate of CO_2 without inhibiting technological progress? Can one perhaps force CO_2 into the deep ocean?

LESSONS FROM THE OTHER PLANETS FOR EARTH AND LIFE ON EARTH

Earth is a very complicated planet. The global temperature results from balances between powerful natural forces. Life is crucially dependent on that temperature, in particular because life needs liquid water. Yet humans are changing the balance between the forces in ways we do not yet understand. It is dangerous to experiment with Earth's climate because there are too many scientific uncertainties. [Question 12.] We may unleash forces much larger than we can control. The other planets are sufficiently different so as to teach us about the Earth without experimenting.

CÂU HỎI

1) Hãy ước tính độ rộng của Đại Tây Dương và biết tuổi của nó, hãy tính tốc độ mà các lục địa rời xa nhau, theo cm/năm và km/triệu năm?

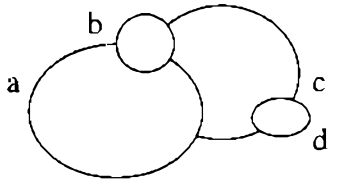
2) Cho biết khối lượng và bán kính của Trái Đất và Mặt Trăng, hãy tính chu kì quỹ đạo của một tàu vũ trụ bay cách bề mặt Mặt Trăng khoảng 20 km? Sử dụng thông tin nói rằng các vệ tinh quay quanh Trái Đất có chu kì quỹ đạo khoảng 100 phút. Nếu sóng vô tuyến từ con tàu vũ trụ không đi xuyên qua Mặt Trăng thì trên mỗi quỹ đạo con tàu không thể liên lạc với Trái Đất trong bao lâu?

3) Sử dụng công thức $g = GM/R^2$ để tính gia tốc hấp dẫn trên Mặt Trăng và tốc độ thoát của Mặt Trăng.

4) Mặt Trăng, ở nhiệt độ ấy, bức xạ trong dải bước sóng nào (tử ngoại, khả biến, hồng ngoại, vô tuyến)? Từ Trái Đất chúng ta làm thế nào để đo được nhiệt độ Mặt Trăng?

5) Đôi khi các sao chổi mang nước tới Mặt Trăng. Hãy tính tốc độ căn quân phương $(3\ kT/m)^{1/2}$ của phân tử nước (H_2O) ở T = 380K. Bây giờ, hãy làm phép tính, rất phỏng chừng này: Nếu tốc độ căn quân phương tối thiểu bằng 0,1 tốc độ thoát, thì các va chạm sau một thời gian đã cho phép mọi phân tử nước đạt tốc độ thoát. Liệu các phân tử nước có thoát được không?

6) Hình vẽ cho thấy vài miệng núi lửa do va chạm ở trên Mặt Trăng. Miệng nào già nhất nghĩa là miệng nào được tạo ra đầu tiên? Bạn có thể nhận biết miệng nào trẻ nhất không và nếu không thì tại sao?



7) Tuổi của một hòn đá là bao nhiêu, nếu số nguyên tử ^{40}Ar nhiều gấp 7 lần số nguyên tử ^{40}K?

8) Tính nhiệt độ ở bề mặt của Mặt Trăng tại một vết sáng hướng về Mặt Trời trong một thời gian dài. Cho biết thông lượng năng lượng tới của Mặt Trời ở khoảng cách 1 đ.v.t.v là $F = 1367\ W/m^2$. Giả sử toàn bộ bức xạ Mặt Trời bị Mặt Trăng hấp thụ. Sử dụng các thông tin trong chương IV.

9) Bài này đã nêu nhiều sự kiện trong quá khứ từ 10^6 năm tới vài lần 10^9 năm trước đây. Một cách để tóm tắt các sự kiện đã qua là vẽ một trục thời gian. Bên phải là một trục thời gian được biểu diễn theo thang lô-ga-rít từ 10^{10} năm trước đến 10^6 năm trước và ba sự kiện được ghi trên đó. Hãy vẽ trục thời gian trên một tờ giấy rời, nguyên vẹn và ghi mọi sự kiện đã nêu trong chương này lên trục này. Nếu thời gian là không chắc chắn thì ghi sự kiện từ thời điểm sớm nhất tới thời điểm muộn nhất khả dĩ.

QUESTIONS

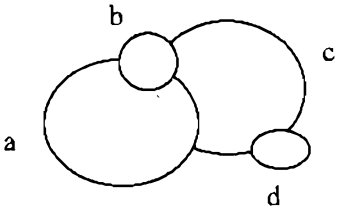
Question 1: Estimate the width of the Atlantic ocean and, given its age, compute the speed with which the continents move apart, both in cm per year and in km per million years.

Question 2: Given the masses and radii of Earth and Moon, what is the orbital period of a space craft about 20 km above the lunar surface? Use the information that satellites orbiting around the Earth have an orbital period about 100 min. If radio waves from the space craft do not penetrate the Moon, about how long during each orbit is the space craft unable to communicate with Earth?

Question 3 : Use $g = GM/R^2$ to evaluate the gravitational acceleration on the Moon and the escape speed.

Question 4 : In what wavelength ranges (ultraviolet, visible, infrared, radio) does the Moon radiate at these temperatures? How can we measure the lunar temperature from the Earth?

Question 5 : Sometimes comets bring water to the Moon. Evaluate the rms speed $(3kT/m)^{1/2}$ for water (H_2O) molecules at T = 380 K. Now make the following, very rough estimate: If the rms speed is at least 0.1 of the escape speed, then collisions over time have allowed all the water molecules to reach the escape speed. Do the water molecules escape?

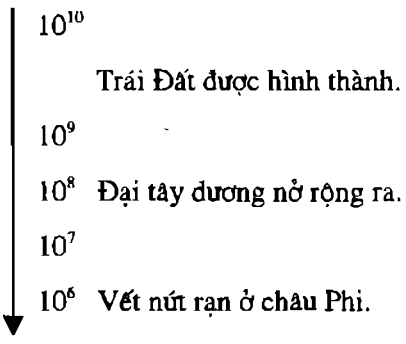


Question 6 : The sketch shows some craters on the Moon. Which is the oldest crater, that is, which crater was made first? Can you identify the youngest crater, and if not, why not?

Question 7: What is the age of a rock if there are 7 times as many atoms of ^{40}Ar as there is of ^{40}K?

Question 8: Compute the Moon's ground temperature at a spot facing the Sun for a long time. You are given the incoming solar energy flux at 1 A.U.: $F = 1367\ W/m^2$. Assume that all solar radiation is absorbed on the lunar surface. Use information from Chapter IV.

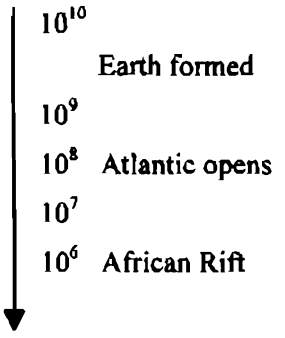
Question 9: This Chapter has mentioned many events in the past, from 10^6 to several times 10^9 years ago. A way to summarize events in the past is to draw a time line. On the right is a time line, logarithmic from 10^{10} years ago to 10^6 years ago, and three events are entered on it. Draw the time line on an entire separate piece of paper and enter all the events mentioned in this Chapter. If the time is very uncertain, enter the event at the earliest and latest likely time.



10) Giả sử xác suất để các phân tử nước thoát ly là tỉ lệ thuận với số phân tử chuyển động với vận tốc lớn hơn vận tốc thoát v_{esc}, xấp xỉ bằng $\exp(-mv_{esc}^2/2kT)$. Giả sử rằng tốc độ căn quân phương cuả H_2O chỉ bằng 0,1 v_{esc}. Hỏi xác suất thoát li của phân tử nước HDO (D = đơ-tê-ri) nhỏ hơn xác suất thoát ly của H_2O bao nhiêu lần?

11) Tính nhiệt độ bề mặt của Trái Đất, giả sử rằng nhiệt độ này có cùng giá trị trên khắp Trái Đất, và giả sử rằng 65% ánh sáng Mặt Trời rọi vào Trái Đất bị hấp thụ, và bức xạ được phát từ toàn bộ bề mặt Trái Đất. Hãy bắt đầu với câu hỏi số 8.

12) Phần mở đầu của chương này nhấn mạnh sự cần thiết của lí luận khoa học, và nhấn mạnh rằng cách lập luận ấy là một phần cốt yếu của khoa học. Hãy đọc lại chương này và chỉ ra những chỗ mà lập luận khoa học được diễn đạt bằng các từ như "có khả năng" hoặc "không thể"... Cách diễn đạt một lập luận khoa học có phải là một khía cạnh quan trọng của chương này hay không?

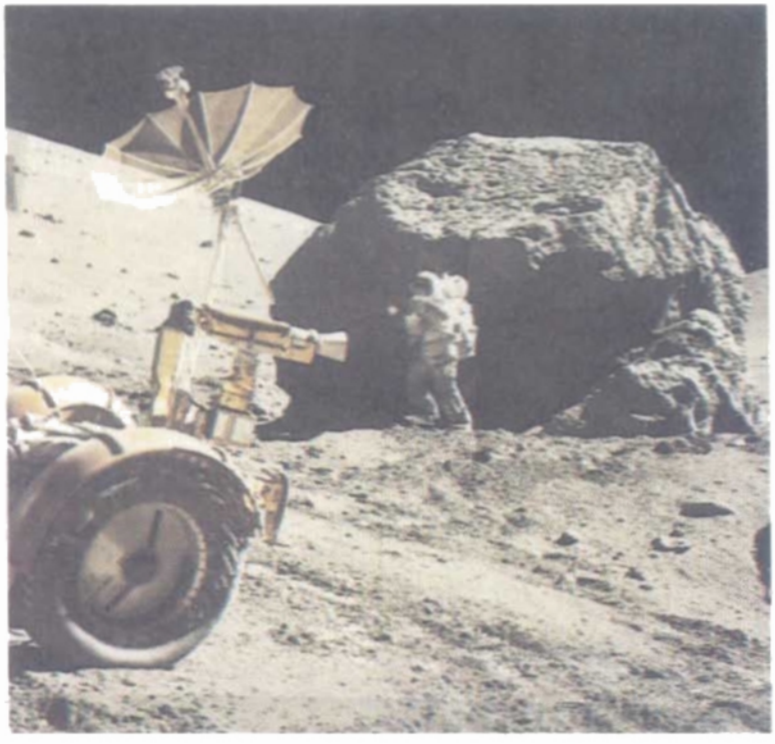


Question 10: Suppose the probability of water molecules escaping is simply proportional to the number faster than v_{esc}, roughly $\exp(-m v_{esc}^{2}/2kT)$. Assume the rms speed of H_2O is just 0.1 v_{esc}. By what factor is the probability of escape of the water molecule HDO (D = deuterium) smaller than the probability of escape for H_2O ?

Question 11: Compute the surface temperature of the Earth, assuming that the temperature is the same all over the Earth, that 65% of sunlight falling on Earth is absorbed, and that radiation is emitted from the entire surface of Earth. Start with your answer to question 8.

Question 12: The introduction to this Chapter stresses the need for scientific judgment, and that such judgment is an integral part of science. Read through this Chapter again and identify each place where a scientific judgment has been expressed, through words such as "probable" or "unlikely", etc. Is the expression of scientific judgment an important aspect of this Chapter ?

Hình V.3



Hình V.4

Hình V.5

Hình V.6

Hình V.7

Hình V.8

Hình V.9

Hình V.10

Chương VI

NHỮNG ĐIỀU NGẠC NHIÊN TRONG HỆ MẶT TRỜI

Hình VI.1 : (Xem cuối chương)

Mộc Tinh: Cấu trúc vành đai và các vết đỏ (nằm ngay phía dưới đường xích đạo) của nó. Ảnh chụp bởi tàu vũ trụ Pioneer 10 (NASA).

MỞ ĐẦU : CÁC HÀNH TINH KIỂU MỘC TINH : MỘC TINH, THỔ TINH, THIÊN VƯƠNG TINH VÀ HẢI VƯƠNG TINH

Mọi thứ trở nên lớn hơn ở phía bên ngoài của Hệ Mặt Trời. Để dễ hình dung, chúng ta hãy sử dụng mô hình tỉ lệ được sử dụng trong lớp học: Giả như Mặt Trời là một hạt đậu (có đường kính 3 mm) thì Trái Đất là một hạt bụi không nhìn thấy được, có đường kính 0,03 mm ở cách hạt đậu 30 cm; Mộc Tinh ở cách 1,5 m và có kích thước của một hạt cát (0,3 mm, gấp 11 lần đường kính Trái Đất); Hải Vương Tinh ở cách 10 m, đường kính 0,1 mm (câu hỏi 1).

Các hành tinh kiểu Mộc Tinh đều quay quanh Mặt Trời trong cùng một mặt phẳng (mặt phẳng hoàng đạo) và cùng chiều với chiều quay của các hành tinh kiểu Trái Đất, nhưng với tốc độ quay chậm hơn rất nhiều. Nếu chúng ta quan sát Mộc Tinh trong nhiều đêm liền, chúng ta sẽ thấy rằng nó di chuyển chậm chạp ở giữa các ngôi sao. Cần khoảng 12 năm để Mộc Tinh chuyển động một vòng giữa các ngôi sao và trở về đúng vị trí của chòm sao ban đầu, nếu nhìn từ Trái Đất. Như vậy chu kì quỹ đạo xung quanh Mặt Trời của Mộc Tinh là 12 năm. Từ định luật 3 của Kepler, chúng ta suy ra khoảng cách từ Mộc Tinh tới Mặt Trời vào khoảng 5,2 đ.v.t.v. Nếu nhìn từ khoảng cách của Mộc Tinh, Trái Đất hiện lên như một chấm màu xanh lam mờ, rất khó nhận ra vì nó ở gần Mặt Trời chói sáng.

Chúng ta biết được khối lượng của các hành tinh kiểu Mộc Tinh vì mỗi hành tinh đều có vệ tinh quay xung quanh. (Tương tự như trong các thứ tiếng nước ngoài, từ nay về sau ta dùng thuật ngữ "mặt trăng" để chỉ các thiên thể quay quanh các hành tinh, còn Mặt Trăng viết hoa là tên riêng của vệ tinh quay quanh Trái Đất). Các hành tinh kiểu Mộc Tinh có khối lượng lớn hơn rất nhiều so với các hành tinh kiểu Trái Đất. Các hành tinh kiểu Mộc Tinh lớn hơn các hành tinh kiểu Trái Đất đến mức các hành tinh kiểu Mộc Tinh có tỉ trọng trung bình tính được bé hơn tỉ trọng trung bình của các hành tinh kiểu Trái Đất. Thổ Tinh có tỉ trọng trung bình thấp hơn tỉ trọng của nước ở thể lỏng trên Trái Đất. Bởi vậy các hành tinh kiểu Mộc Tinh phải dường như ở thể khí hoàn toàn. Chúng không có bề mặt rắn. Khi chúng ta nói tới bề mặt của các hành tinh kiểu Mộc Tinh là chúng ta muốn nói tới lớp khí mà từ đó bức xạ khả kiến đến chúng ta, nghĩa là lớp gồm các đám mây có thể được nhìn thấy trên các bức ảnh.

Những nguyên tố ở trạng thái khí dễ dàng nhất là hiđrô và hêli. Thực vậy, khi tàu vũ trụ Galileo đến Mộc Tinh và gửi một máy thăm dò nhỏ xuống hành tinh này, nó đo thấy rằng khoảng 75% của 1 kg khí là hiđrô (chủ yếu ở dạng phân tử H_2) và khoảng 23% là hêli. Những khí này không thoát ra khỏi bề mặt các hành tinh kiểu Mộc Tinh như trong trường hợp các hành tinh kiểu Trái Đất bởi vì các hành tinh kiểu Mộc Tinh có trường hấp dẫn tại bề mặt lớn hơn và có nhiệt độ bề mặt thấp hơn. (Mộc Tinh là hành tinh nặng nhất, có khối lượng bằng 318 lần khối lượng Trái Đất. Lực hấp dẫn tại bề mặt của nó bằng 2,74 lần lực hấp dẫn ở bề mặt Trái Đất). Nhiệt độ bề mặt quan sát được nằm trong khoảng từ 110 đến 150 K (câu hỏi 2).

Chapter VI

SURPRISES IN THE SOLAR SYSTEM.

Figure VI.1

Jupiter, its banded structure and the red spot (just below the equator), photographed by the space craft Pioneer 10. (NASA)

INTRODUCTION. THE JOVIAN PLANETS : JUPITER, SATURN, URANUS AND NEPTUNE.

Everything is larger in the outer solar system. A scale model in a classroom is useful : If the Sun is a pea (diameter 3 mm), then Earth is an invisibly sized dust grain (diameter 0.03 mm) 30 cm away from the pea; Jupiter is 1.5 meters away and has the size of a grain of sand (0.3 mm, 11 times Earth's diameter); Neptune is 10 meters away, 0.1 mm in diameter. [Question 1.]

The Jovian planets revolve around the Sun in the same plane (the ecliptic) and in the same direction as do the terrestrial planets, but much more slowly. If we watch Jupiter for several nights, we see that it slowly shifts among the stars. Jupiter takes about 12 years to move among the stars by a complete circle and to return to the same constellation, as seen from Earth. Thus its orbital period around the Sun is about 12 years. Kepler's third law yields a distance from the Sun of about 5.2 A.U. Seen from the distance of Jupiter, Earth appears as a faint blue object, difficult to see because it appears next to a brilliant Sun.

We know the masses of the Jovian planets because each has moons circling around it. (In English, moons are objects circling planets, but Moon with a capital M is the specific name of the moon that circles the Earth.) The Jovian planets have much more mass than the terrestrial planets. The Jovian planets are also so much larger than the terrestrial planets that the Jovian planets have a deduced lower average density than the terrestrial planets. Saturn has an average density less than liquid water on Earth. Therefore, the Jovian planets must be almost totally gaseous. There is no solid surface. When we speak of the surface of a Jovian planet, we mean the layer of gas from which visible radiation reaches us, that is, the layer of clouds that is visible in photographs.

The elements that remain gaseous most easily are hydrogen and helium. Indeed, when the space craft Galileo reached Jupiter and sent a small probe into the planet, this probe measured that about 75% of a kg of gas is hydrogen (mostly in the molecular form H_2) and about 23% is helium. These gases do not escape as they do from the terrestrial planets, because the Jovian planets have higher surface gravity and lower surface temperature. (Jupiter is the most massive planet, at 318 times the Earth's mass. Its surface gravity is 2.74 times Earth's. Observed surface temperatures range from 110 to 150 K. [Question 2.])

Liệu có cách nào để hiểu hết tất cả những tính chất này của các hành tinh kiểu Mộc Tinh và những nét khác nhau cơ bản giữa các hành tinh kiểu Mộc Tinh và các hành tinh kiểu Trái Đất hay không? Có! Hiện có một lí thuyết khá tổng quát nhưng nó không đủ chi tiết để đưa ra những tiên đoán có ý nghĩa, ví dụ về những hành tinh ở gần những ngôi sao khác. Việc quan sát gần đây về những hành tinh xung quanh các ngôi sao khác (chương VIII), và việc quan sát khí và bụi xung quanh các ngôi sao mới đang hình thành (chương IX) là cần thiết để cải tiến lí thuyết này.

Sự hình thành Hệ Mặt Trời

Độ phổ cập lớn của hiđrô và hêli trong các hành tinh kiểu Mộc Tinh là không có gì đáng ngạc nhiên. Hầu hết vũ trụ, kể cả khí giữa các sao, đều chứa hiđrô và hêli, và chỉ chứa một phần nhỏ các nguyên tố nặng hơn, bao gồm một phần nhỏ các hạt bụi và hạt băng giá trong môi trường giữa các sao. Vì Mặt Trời hình thành từ khí giữa các sao nên một cách đương nhiên, chúng ta dự đoán rằng Mặt Trời và các hành tinh của nó chủ yếu chứa hiđrô và hêli. Kết quả quan sát những vị trí nơi các sao trẻ đang hình thành (hình VIII.7) cho chúng ta thấy rằng sự hình thành các sao và (rất có thể) các hành tinh là một quá trình rất bình thường.

Sự hình thành Mặt Trời và Hệ Mặt Trời, khoảng $4{,}6 \times 10^9$ năm về trước, bắt đầu khi chuyển động của khí giữa các sao vốn có từ trước quy tụ tạo nên một đám mây khí lớn (bán kính ~ 10^3 đ.v.t.v.). Thành phần chủ yếu của khí đó là hiđrô và hêli, nhưng có trộn lẫn khoảng 2% theo trọng lượng các nguyên tố khác, trong đó một số ở dạng các hạt bụi và hạt băng. Do một số nguyên nhân chưa được biết, đám mây trở nên đủ đậm đặc để có lực hấp dẫn đủ mạnh để nó bắt đầu co lại dưới tác dụng của lực hấp dẫn. Những phần ở bên trong cùng của đám mây co thành quả cầu khí và sau vài triệu năm đã trở thành Mặt Trời (chương VIII). Phần ngoài của đám mây cũng co lại nhưng không phải chỉ do lực hấp dẫn. Lúc đầu, khí bên ngoài quay rất chậm, nhưng khi nó co lại, nó bắt đầu quay nhanh hơn (bảo toàn mô-men xung lượng). Khi khí quay đủ nhanh, lực li tâm cân bằng với lực hấp dẫn. Sự co ngừng lại. Toàn bộ khí đồn lại trong một đĩa bao quanh Mặt Trời tương lai. Từng mẩu khí quay quanh Mặt Trời tuân theo gần đúng định luật 3 Kepler. Các hành tinh hình thành từ khí này. Như vậy, chúng ta đã giải thích tại sao các hành tinh ở trong cùng một mặt phẳng và quay cùng chiều xung quanh Mặt Trời. Nhưng vì sao các hành tinh hình thành? Có lẽ sự kiện sau đây đã xảy ra trong suốt hàng triệu năm đầu tiên của Hệ Mặt Trời đang còn trẻ:

Khí chứa các hạt bụi và các hạt băng. Thoạt đầu các hạt có kích thước vi mô. Thời gian trôi qua, thỉnh thoảng các hạt va chạm vào nhau, chúng kết dính lại với nhau và trở thành hạt lớn hơn. Những hạt lớn hơn này lại va chạm vào nhau và dần dần chúng kết thành những hòn đá được trộn lẫn với băng rồi chúng tiếp tục kết dính thành những tảng đá lớn hơn. Khi những tảng đá đủ lớn, lực hấp dẫn của chúng hút tiếp các hạt bụi và các hòn đá. Dần dần, những thiên thể có kích thước cỡ hành tinh hình thành. Vì đại bộ phận các tảng đá đều rơi vào các thiên thể cỡ hành tinh với tốc độ lớn, giải phóng nhiều nhiệt năng, nên các thiên thể cỡ hành tinh nóng lên và nhiều phần của chúng nóng chảy. Nhiệt cho phép các nguyên tố nặng hơn, đặc biệt là sắt (Fe) dồn về gần tâm của các thiên thể kiểu hành tinh. Nhiệt cũng làm băng bốc hơi và thoát khỏi thiên thể. Sau một thời gian, khi không còn các tảng đá rơi vào thiên thể nữa, phần ngoài của các thiên thể có kích cỡ hành tinh này nguội và rắn lại. Các hành tinh kiểu Trái Đất đã hình thành như vậy. Trái Đất hiện vẫn có một nhân được tạo chủ yếu bởi sắt nóng chảy (chương V).

Is there some way we can understand all these many properties of the Jovian planets, and the significant differences between Jovian and terrestrial planets? Yes, there is a rather general theory, but it is not specific enough to make significant predictions, for instance about planets near other stars. Recent observations of planets around other stars (Chapter VIII) and observations of gas and dust around newly forming stars (Chapter IX) are needed to improve the theory.

Formation of the solar system.

The abundance of hydrogen and helium in the Jovian planets is not surprising: most of the universe, including the gases between the stars, consists of hydrogen and helium, with only a small fraction of the heavier elements, including between the stars a small fraction of dust grains and ice grains. Since the Sun is formed out of gases between the stars, one naturally expects the Sun and planets to consist of mostly hydrogen and helium. Observations of places where new stars are now forming (Fig.VIII.7) show us that the formation of stars and (very probably) of planets is a very normal process.

The formation of the Sun and the solar system, about 4.6×10^9 years ago, started when the motions of gases between already existing stars resulted in a large (radius ~ 10^3 A.U.) cloud of gas. Most of the gas was hydrogen and helium, but mixed in were about 2% by weight of other elements, some of which were in the form of dust grains and ice grains. For unknown reasons, the cloud became dense enough to have strong enough gravity so that it began to contract under the influence of that gravity. The innermost parts of the cloud contracted into a ball of gas that, after a few million years, finally became the Sun (Chapter VIII). The outer part of the cloud also contracted, but it responded not only to gravity. At first the outer gas rotated very slowly, but as it contracted it began to rotate ever faster (constant angular momentum). When the gas rotated sufficiently rapidly, centrifugal force balanced the gravity. Contraction stopped. All the gas settled into a disk surrounding the future Sun. Each piece of gas revolved around the Sun approximately according to Kepler's third law. Planets formed out of this gas. Thus we have explained why the planets are all in the same plane, revolving in the same sense around the Sun. But why did the planets form? Probably the following happened during the first several millions years of the young solar system:

The gas contained dust grains and ice grains. At first the grains were microscopically small. As time passed, grains sometimes collided with other grains, they stuck together and became a bigger grain. These collided, and gradually the grains merged into rocks mixed with ice and these merged to become large boulders. When the boulders were large enough, the gravity of the boulders attracted even more grains and rocks. Gradually, planetary-sized objects grew. Because most of the boulders fell onto the planetary-sized objects at high speed, releasing much heat, the planetary-sized objects were hot, and many parts were molten. The heat allowed the heavier elements, especially iron, to settle near the center of the planetary objects. The heat also caused the evaporation and escape of all the ices. After some time, when no more boulders were available, the outer parts of these planetary-sized objects cooled and solidified. Thus were formed the terrestrial planets. The Earth still has a core made largely of molten iron (Chapter V).

Một hiện tượng bổ sung đã xảy ra đối với các hành tinh kiểu Mộc Tinh: ở rất xa Mặt Trời, các khí, chủ yếu là hiđrô và hêli, rất lạnh. Chúng dễ bị hút bởi lực hấp dẫn của các thiên thể có kích thước cỡ hành tinh. Thật vậy, các hành tinh kiểu Mộc Tinh đã tích luỹ thêm rất nhiều khối lượng ở dạng khí so với khối lượng của các thiên thể có kích cỡ hành tinh ban đầu. Bởi vậy, hiện nay, các hành tinh kiểu Mộc Tinh chứa chủ yếu là hiđrô (hiđrô phân tử, H_2, ở gần bề mặt) và hêli với một lõi vật chất ở dạng đá rắn tương đối nhỏ nằm ở gần tâm.

Ở phía ngoài xa của Hệ Mặt Trời, sự va chạm không làm biến mất tất cả các thiên thể bé hơn. Một số thiên thể bé này ngày nay vẫn còn quan sát được, như các sao chổi khi chúng tới gần Mặt Trời, như vệ tinh Triton của Hải Vương Tinh, cũng như hành tinh Diêm Vương Tinh. Thực ra Diêm Vương Tinh giống với vệ tinh Triton hơn là một hành tinh kiểu Mộc Tinh.

Cuối cùng, khi Mặt Trời trở nên nóng và phát sáng, toàn bộ các khí, bụi và các hạt băng còn lại đều bị thổi ra khỏi Hệ Mặt Trời và Hệ Mặt Trời trở thành có dạng đại thể như chúng ta biết về nó ngày hôm nay (câu hỏi 3).

Hình VI.2 : (Xem cuối chương)

Tàu vũ trụ Voyager. Camera nằm ở phía dưới bức ảnh.
Cấu trúc lớn nhất là ăng-ten vô tuyến dùng để gửi tín hiệu, kể cả các bức ảnh chụp được, về Trái Đất (Ảnh NASA)

Khám phá của tàu Voyager

Hai tàu vũ trụ mang tên Voyager được phóng đến miền không gian bên ngoài của Hệ Mặt Trời vào năm 1977. Mỗi tàu có khối lượng khoảng 10^3 kg. Chúng lướt qua vành đai tiểu hành tinh một cách an toàn. Cả hai tàu vũ trụ thám hiểm Mộc Tinh vào năm 1979, thám hiểm Thổ Tinh vào năm 1980 và 1981. Sau đó Voyager II đi qua Thiên Vương Tinh vào năm 1986, đi qua Hải Vương Tinh vào năm 1989 và tiếp tục đi đến những vùng xa hơn. Tàu Voyager I chu du vào vùng không gian bên ngoài của Hệ Mặt Trời nhưng không đi gần bất cứ một hành tinh nào. Voyager I hiện là vật thể nhân tạo ở xa chúng ta nhất, ở cách Mặt Trời khoảng 70 đ.v.t.v.

Mỗi tàu vũ trụ mang theo máy ảnh để chụp ảnh các hành tinh, các vệ tinh và các vành đai của chúng. Ngoài ra, các tàu còn được trang bị nhiều thiết bị đo đạc khoa học khác để đo môi trường xung quanh các hành tinh (xem chương VII). Cần có nguồn điện để chạy các thiết bị, để gửi các bức ảnh và các dữ liệu khác về Trái Đất dưới dạng tín hiệu vô tuyến và để định hướng cho ăng-ten vô tuyến của tàu vũ trụ luôn hướng về Trái Đất, đồng thời để tinh chỉnh quỹ đạo con tàu. Trong vùng không gian giữa các hành tinh kiểu Mộc Tinh, ánh sáng Mặt Trời quá yếu, không đủ để cung cấp năng lượng. Thay vào đó, người ta đã dùng máy phát nhiệt điện hoạt động nhờ năng lượng của nguồn đồng vị phóng xạ với công suất 400 oát. Đó là công suất của một số bóng đèn chiếu sáng. Tín hiệu vô tuyến phát ra từ Voyager II vẫn có thể nhận được trên Trái Đất ngay cả khi Voyager II nằm ở khoảng cách của Hải Vương Tinh. Ngay cả hiện nay, chúng ta vẫn thu nhận được tín hiệu phát ra từ cả hai tàu vũ trụ Voyager. Tín hiệu này cho chúng ta biết được vị trí của những miền mà tại đó gió mặt trời gặp khí giữa các ngôi sao.

Thời tiết của Mộc Tinh - vết đỏ

Nghiên cứu thời tiết Mộc Tinh nhờ tàu vũ trụ Voyager là một công trình được chờ đợi nhiều nhất. Từ Trái Đất, chúng ta nhìn thấy trên bề mặt Mộc Tinh một vài lớp mây. Các đám mây được

One additional phenomenon occurred for the Jovian planets : At that great distance from the Sun, the gases, mostly hydrogen and helium, were very cold. They could easily be attracted by the gravity of the planetary-sized objects. Indeed, the Jovian planets accumulated much more mass in the form of gases than the mass of the original planetary-sized objects. Therefore, today the Jovian planets are mostly hydrogen (near the surface molecular hydrogen, H_2) and helium, with a relatively small solid core of rocky material near the center.

Far out in the solar system, collisions did not remove all the smaller objects. Some of these are still observed today, as the comets when they approach the Sun, as Neptune's moon Triton, and as the planet Pluto, which is really more similar to Triton than to a Jovian planet.

Finally, when the Sun became hot and luminous, all remaining gases and dust and ice grains were blown out of the solar system, and the solar system became roughly as we know it today. [Question 3.]

Figure VI.2

The space craft Voyager. The camera is at the bottom of the picture. The largest structure is the radio antenna for sending signals, including the photographs, back to Earth. (NASA)

The Voyager exploration.

Two space craft named Voyager were launched toward the outer solar system in 1977. Each weighed about 10^3 kg. They crossed the asteroid belt without being hit by any asteroid big enough to cause damage. Both space craft explored Jupiter, in 1979, and Saturn, in 1980 and 1981. Then Voyager II traveled past Uranus in 1986, Neptune in 1989, and continued to still greater distances. Voyager I also traveled into the outer solar system, but not near any planets. Voyager I is now the most distant human-made object, about 70 A.U. from the Sun.

Each space craft carried a camera to photograph the planets, their moons, and their rings, plus much other scientific equipment to measure the surroundings of the planets (see Chapter VII). Electrical power is needed to run the instruments, to send the photos and other data back to Earth as radio signals, to keep the space craft's radio antennas pointing to Earth, and for small corrections of the orbit. Out among the Jovian planets, sunlight is far too weak to provide enough energy. Instead, radioisotope thermoelectric generators furnish 400 watts of energy. That is the power of a few lightbulbs, and yet the radio signals from Voyager II could be received at Earth even when Voyager II was as far as Neptune. Even now we receive signals from both Voyagers, telling us where the solar wind meets the interstellar gases.

Jupiter's weather - the red spot:

The most anticipated research by the Voyager space craft was the weather on Jupiter. From Earth, we see on Jupiter's surface several cloud layers. The clouds are composed mostly of

tạo chủ yếu bởi các phân tử H_2. Nhưng ở đó còn có một số phân tử khí quan trọng khác được tạo ra khi hiđrô kết hợp với những nguyên tố có độ phổ cập bé hơn. Đặc biệt, có amoniac NH_3 (khi chúng ngưng tụ lại tạo thành những đám mây lạnh hơn, nằm ở cao hơn) và hơi nước (chúng ngưng tụ lại tạo thành những đám mây kém lạnh hơn nằm ở thấp hơn). Màu sắc của các đám mây trên Mộc Tinh bắt nguồn từ quá trình kết hợp giữa các phân tử hiđrô với những nguyên tử tương đối hiếm hơn, chẳng hạn như phốt pho.

Trạm thăm dò vũ trụ Galileo, hiện đang quay quanh Mộc Tinh, đã gửi một máy thăm dò có dù vào các đám mây của Mộc Tinh. Khi máy thăm dò càng hạ thấp độ cao, khí quyển càng trở nên đậm đặc hơn trước, cho đến khi máy thăm dò bị nén bẹp dúm lại. Thật không ngờ, máy thăm dò đã rơi vào một vùng thuộc khí quyển Mộc Tinh có ít hơi nước hơn so với bình thường. Chúng ta biết rằng khí quyển Mộc Tinh phức tạp hơn rất nhiều so với những gì chúng ta đã dự đoán - như khí quyển Trái Đất.

Năng lượng hồng ngoại phát ra từ Mộc Tinh nhiều hơn năng lượng do Mặt Trời tới nó. Phần năng lượng trội hơn này phải lấy từ trong lòng Mộc Tinh. Vì Mộc Tinh lớn hơn rất nhiều so với các hành tinh kiểu Trái Đất nên việc Mộc Tinh vẫn tiếp tục mất nhiệt từ trong lòng nó là một điều không có gì đáng ngạc nhiên. Trên Trái Đất, mỗi khi nhiệt có cường độ lớn dâng lên từ các đại dương ấm áp ở vùng nhiệt đới thì vòi rồng và bão tố, là những cơn bão xoáy có áp suất thấp, được hình thành, cực mạnh đủ để phá huỷ bất cứ vật gì chúng gặp. Trên Mộc Tinh, khi nhiệt từ trong lòng nó dâng lên cao cũng gây ra bão trong phạm vi lớn. Chúng ta nhìn thấy chúng như những đốm rộng trên bề mặt Mộc Tinh. Đốm mà chúng ta biết rõ nhất là đốm đỏ của Mộc Tinh, có đường kính gấp khoảng 3 lần đường kính Trái Đất (hình VI.1). Nó chính là một cơn bão xoáy khổng lồ có áp suất cao đã tồn tại khoảng 300 năm. Những đốm khác có màu gần như trắng hơn và thay đổi sau nhiều năm. Việc quan sát cẩn thận thời tiết trên Mộc Tinh có thể giúp chúng ta kiểm tra những hiểu biết của chúng ta về thời tiết trên Trái Đất. Tàu vũ trụ Galileo đang bay trên quỹ đạo bao quanh Mộc Tinh và hiện đang ngày ngày gửi về Trái Đất những bức ảnh ghi lại sự thay đổi thời tiết trên Mộc Tinh.

NHỮNG ĐIỀU NGẠC NHIÊN

Cho đến nay, giá trị vĩ đại nhất của những bức ảnh được chụp bởi Voyager là điều đáng ngạc nhiên. Hành trình của Voyager được so sánh với những chuyến hành trình đầu tiên bằng thuyền buồm đi vòng quanh Trái Đất, khoảng 5 thế kỉ trước.

Hình VI.3 : (Xem cuối chương)

Vệ tinh Io của Mộc Tinh được chụp bởi Voyager.
Những cấu trúc tròn trên bề mặt được gây ra bởi sự phun núi lửa (Ảnh NASA).

Núi lửa trên vệ tinh Io của Mộc Tinh

Chúng ta hy vọng rằng các vệ tinh của Mộc Tinh sẽ lạnh, là hỗn hợp đá và băng, và có khả năng bề mặt bị lõm (câu hỏi 3). Nhưng 2 vệ tinh Io và Europa hoàn toàn khác với điều đã dự đoán.

Vệ tinh Io có kích thước cỡ Mặt Trăng nhưng nó hoạt động rất mạnh. Những núi lửa hoạt động mạnh nhất trong hệ Mặt Trời đang phun trên vệ tinh Io cả vào lúc này, trong khi bạn đang đọc cuốn sách này. Vật chất nóng dâng đến độ cao 250 km trên bề mặt của Io. Điều đó chứng tỏ trong lòng Io nóng. Tại sao ? Lực hấp dẫn do Mộc Tinh và những vệ tinh khác tác động lên Io liên tục làm biến dạng Io. Sự biến dạng có nghĩa là một số phần

H_2 molecules. But there are some important additional molecules, made when hydrogen combines with elements of lower abundance. In particular, there is NH_3= ammonia (which condenses to make the higher, colder clouds) and H_2O = water vapor (which condenses to make the lower, less cold clouds). The colors of Jupiter's clouds come from molecules of hydrogen combined with even more rare atoms such as phosphorus.

The space probe Galileo, now orbiting Jupiter, sent a probe with a parachute into the clouds of Jupiter. As the probe descended, the atmosphere became ever denser, until the probe collapsed. Unexpectedly, the probe sank in a region of Jupiter with less than normal water vapor. We learn that Jupiter's atmosphere is more complex than expected, just as is Earth's atmosphere.

More infrared energy is emitted from Jupiter than solar energy reaches Jupiter. This excess energy must come from inside. Since Jupiter is much larger than the terrestrial planets, it is not surprising that Jupiter still loses heat from its interior. On Earth, when intense heat rises upward, from the warm tropical oceans, the results are typhoons and hurricanes, low-pressure rotating storms with much power to destroy whatever they hit. On Jupiter, when heat rises upwards, coming from the inside, the results are also large storms. We see them as the large spots on the surface of Jupiter. The best known spot is Jupiter's red spot, which has a diameter about three times Earth's diameter (Figure VI.1). It is a giant rotating high-pressure storm that has lasted already about 300 years. Other spots are more nearly white and change over the years. Careful observations of the weather on Jupiter can be used to check our understanding of Earth's weather. The space craft Galileo, in orbit around Jupiter, now routinely sends to Earth pictures of the changing weather on Jupiter.

SURPRISES.

By far the greatest value of the Voyager photographs were the surprises. The travels of the Voyagers have been compared to the first voyages on sailboats all the way around the Earth, about five centuries ago.

Figure VI.3

Jupiter's moon Io, photographed by Voyager.
The round structures on the surface are caused by volcanic eruptions. (NASA)

Volcanoes on Jupiter's moon Io.

We expected Jupiter's moons to be cold, a mixture of rocks and ices, perhaps cratered [Question 3]. But the two moons Io and Europa are totally different.

Jupiter's moon Io is about the size of our Moon, but it is very active. The most powerful volcanoes in the solar system are erupting on Io even now, while you read this book. Hot matter rises up to 250 km above the surface. Obviously, Io is hot inside. Why ? The gravitational forces acting on Io from Jupiter and from other moons continually distort Io. Distortion means that parts

đá rắn phải chuyển động qua nhau. Ma sát được sinh ra làm nóng đá. Sự nung nóng này đã được tiên đoán bằng lí thuyết ngay trước khi Voyager tới Mộc Tinh, nhưng sự xuất hiện núi lửa chưa hề được dự đoán. Núi lửa phun ra hợp chất rất nóng có chứa sun-fua. Nham thạch chứa sun-fua bao phủ khắp Io và làm cho Io trông rất khủng khiếp.

Trong hai thập kỷ kể từ ngày phát hiện các núi lửa trên Io, có một núi lửa tiếp tục bùng nổ, có một vài núi lửa đã ngừng hoạt động và một vài núi lửa mới đã bắt đầu bùng nổ. Những núi lửa này không chỉ hoạt động mạnh hơn mà còn tồn tại lâu hơn so với núi lửa ở trên Trái Đất. Bề mặt được nham thạch bao phủ của Io đã thay đổi rất đáng kể trong những năm đó.

Hình VI.4 : (Xem cuối chương)

Hai bức ảnh do tàu vũ trụ Galileo chụp khi nó nhìn thẳng xuống bề mặt của vệ tinh Europa của Mộc Tinh. Những đường trong bức ảnh được coi là những vết nứt trên băng. Những chi tiết nhỏ nhất có kích cỡ khoảng 1,6 km (bên trái) và khoảng 0,2 km (bên phải). (Ảnh: NASA/JPL).

Đại dương đóng băng và sự sống nguyên thuỷ (có thể) trên vệ tinh Io của Mộc Tinh

Vệ tinh Europa hơi nhỏ hơn Mặt Trăng và nằm cách Mộc Tinh xa hơn so với Io. Điều ngạc nhiên là trên Europa hầu như không có miệng núi lửa do va chạm nào. Bề mặt nó trơn tru rõ rệt. Sự diễn giải tốt nhất là bề mặt Europa được bao phủ bởi một đại dương nước, với độ sâu có thể là nhiều km, lớp trên cùng đã bị đóng băng. Bằng chứng nào nói lên rằng lớp trên cùng là nước đóng băng? Tàu vũ trụ Galileo đã tới cách bề mặt Europa 200 km và đã chụp ảnh bề mặt với những chi tiết có kích cỡ 6 m. Các bức ảnh cho thấy những đường hẹp chạy dài trên bề mặt vệ tinh có thể sáng hơn và cũng có thể tối hơn so với miền quanh chúng (xem hình VI.4). Những vết nứt trông giống như những vết nứt dài trên băng của Nam Cực trên Trái Đất, được nhìn từ máy bay. Bằng chứng của nước ở thể lỏng ở dưới lớp băng là gì? Các bức ảnh cho thấy những vị trí trông giống như nước ở thể lỏng bắn lên qua vết nứt, trào ra theo mọi hướng rồi đóng băng lại. Một miệng núi lửa dường như đã được nước lấp đầy bởi nước ở thể lỏng cho tới mức ngang với bề mặt quanh đó và sau đó nước đóng băng. Các đường nhỏ gợi cho ta liên tưởng đến tình huống nước ở thể lỏng trào từ trong ra: những đường tối hơn có thể được tạo bởi nước phun qua vết nứt dài trong băng, mang theo bụi bẩn sau đó đóng băng lại. Những đường sáng hơn được hình thành từ nước sạch hơn, phun ra sau. Loại trừ trường hợp các núi lửa do va chạm mới nhất, các miệng núi lửa đều đã biến mất hoặc vì chúng đều đã ngập dưới băng hoặc do băng khá mềm bởi vậy vành miệng núi lửa chìm xuống và đáy miệng núi lửa lại dâng lên.

Nhiệt độ bề mặt trên vệ tinh Europa cũng tương tự như nhiệt độ bề mặt Mộc Tinh, rất thấp theo tiêu chuẩn ở trên Trái Đất. Tại sao lại có nước ở thể lỏng ở dưới băng? Có lẽ phần bên trong của vệ tinh Europa bị nung nóng bởi ma sát thuỷ triều giống như phần bên trong của vệ tinh Io. Bằng chứng về một đại dương bị đóng băng ở bề mặt là gián tiếp và có thể là sai. Nhưng chúng ta hãy xem xét những hệ quả đầy ấn tượng có thể xảy ra nếu lời giải thích trên đây là đúng:

Nếu có nước ở thể lỏng thì liệu có thể có sự sống nguyên thuỷ ở trên vệ tinh Europa hay không ? Hầu hết mọi người trả lời : Tất nhiên là không, vì ở đó quá lạnh. Nhưng có thể ở đó không quá lạnh. Trên Trái Đất, một phần nhiệt dâng lên từ dưới các đại dương được quy tụ trong những vùng nhỏ của đáy đại dương. Tại những nơi đó, nước nóng chảy ra, mang theo khá nhiều hoá chất đã hoà tan để duy trì sự sống. Thực vậy, trong suốt hàng chục năm gần đây, thật đáng ngạc nhiên

of solid rock must move past other parts. The resulting friction heats the rock. This heating was theoretically predicted just before Voyager reached Jupiter, but the resulting volcanoes were still unexpected. The volcanoes eject very hot material containing sulfur. The sulfurous lavas cover much of Io and make Io look quite frightful.

In the two decades since the discovery of Io's volcanoes, one volcano has continued to erupt, a few have stopped, and a few new ones have started. The volcanoes are not only more powerful than on Earth, but they also last longer. The lava-covered surface of Io has changed drastically in just these few years.

FigureVI.4

Two photographs by the Jupiter-orbiting space craft Galileo, looking down on the surface of Jupiter's moon Europa. The lines are thought to be cracks in ice. Smallest details are about 1.6 km (left) and about 0.2 km (right). (NASA/JPL)

A frozen ocean and perhaps primitive life on Jupiter's moon Europa ?

The moon Europa is slightly smaller than our Moon and further from Jupiter than Io. Surprisingly, there are almost no craters on Europa. It is remarkably smooth. The best interpretation is: Europa is covered by an ocean of water, perhaps many km deep, with the top layer frozen. What is the evidence for the layer of ice? The space craft Galileo has come within 200 km of the surface of Europa and has photographed the surface with detail as small as 6 meters. The photographs show long narrow lanes on the surface that are either darker or lighter than their surroundings. (Figure VI.4) The cracks look like the long cracks in the ice of Earth's arctic ocean, seen from an airplane. What is the evidence for liquid water under the ice? Photographs show places that look like liquid water erupted through a crack, flowed in all directions, and froze. One crater seems to have been filled by liquid water up to the level of the surroundings, and then the water froze. The lanes also suggest emerging liquid water : Darker lanes may be made by water that erupts through a long crack in the ice, carries dirt with it, then freezes. Lighter lanes are from later erupting, cleaner water. All except the newest impact craters have disappeared, either because they were flooded or because the ice is sufficiently soft so that crater rims sink and crater floors rise.

The surface temperature on Europa is similar to that of Jupiter, very cold by Earth standards. Why is there any liquid water underneath the ice? Perhaps the inside of Europa is heated by tidal friction, much like the inside of Io. The evidence of an ocean, frozen at the surface, is indirect and perhaps wrong. But consider the possible dramatic implications if the interpretation is correct :

If there is liquid water, is there perhaps primitive life there? Most people answer : Of course not, it is far too cold. But perhaps it is not too cold. On Earth, part of the heat emerging from under oceans is concentrated in small areas of the ocean floor. In these places, hot water emerges, carrying enough dissolved chemicals to support life. Indeed, during the last ten years, surprisingly

có nhiều hình thức sống mới khá kì quặc đã được phát hiện tại những nơi nước nóng chảy ra từ đáy đại dương. Nếu nhiệt phát ra từ trong lòng vệ tinh Europa, có lẽ nhiệt cũng được quy tụ vào những vùng tại đó các dòng nước nóng phun lên từ đáy đại dương. Có thể những dòng suối đó chứa đựng một vài dạng của sự sống nguyên thuỷ chăng? Chúng ta không biết, nhưng chúng ta hi vọng tiếp tục thám hiểm vệ tinh Europa.

Sự sống nguyên thuỷ trên vệ tinh Titan của Thổ Tinh

Vệ tinh Titan của Thổ Tinh có kích cỡ gần bằng Thuỷ tinh. Nhưng nó ở xa Mặt Trời và rất lạnh. Nhiệt độ bề mặt ở thể rắn (hoặc có thể ở thể lỏng) vào khoảng 94 K. Titan bị bao phủ hoàn toàn bởi các đám mây. Khí quyển Titan chủ yếu là nitơ N_2 cùng với một ít mêtan CH_4 và có áp suất bề mặt gấp 1,6 lần áp suất ở bề mặt Trái Đất. Điều ngạc nhiên là: các phản ứng hoá học đã tạo ra những phân tử phức tạp hơn mê-tan. Hiển nhiên là trên đó có đủ ánh sáng mặt trời để tạo ra những phản ứng này. Phân tử mêtan kết hợp với những phân tử khác để tạo nên những phân tử lớn hơn trông giống như sương mù. Vì những phân tử này đều bắt nguồn từ mêtan nên chúng đều chứa nguyên tố cacbon. Vì lẽ đó, chúng ta phân loại chúng như là những phân tử hữu cơ. Trên Trái Đất, có thể những phân tử như vậy đã từng được sử dụng để hình thành các tế bào sống đầu tiên. Điều này dẫn đến một dự báo: có lẽ trên vệ tinh Titan có nước ở thể lỏng, thậm chí có những hồ nước, chứa các phân tử hữu cơ? Có lẽ các tế bào sống đơn giản đã được tạo ra mặc dầu nhiệt độ rất thấp? Hiện đang có những kế hoạch chế tạo một tàu vũ trụ đặc biệt để thám hiểm vệ tinh này. Cho đến khi con tàu đó đến Titan, chúng ta buộc phải dựa vào những biểu hiện gián tiếp (do suy diễn). Những sự tranh luận về sự sống nguyên thuỷ có thể có ở trên Hoả tinh và trên vệ tinh Europa (vẫn còn đang gây tranh cãi) đã khiến nhiều người lạc quan cho rằng bản thân Titan cũng phải là cái nôi của sự sống nguyên thuỷ. (Câu hỏi 5)

Hình VI.5 :

Thổ Tinh và các vành đai của nó. Ảnh được chụp bởi tàu vũ trụ Voyager. Các vành in bóng tối lên Thổ Tinh (Ảnh: NASA/JPL)

Các vành đai và vệ tinh của Thổ Tinh:

Các vành đai của Thổ Tinh được tạo bởi các hạt bụi và một ít hòn đá. Hiện nay, từ Trái Đất, chúng ta có thể nói rằng mỗi hạt bụi hoặc hòn đá chuyển động xung quanh Thổ Tinh một cách độc lập đối với các hạt bụi hoặc hòn đá khác, trên một quỹ đạo, tuân theo định luật 3 của Kepler. Bằng cách nào chúng ta biết được điều đó? Ánh sáng Mặt Trời bị tán xạ bởi bụi trong các vành đai và một phần ánh sáng này đi về phía chúng ta. Khi chúng ta chụp phổ của ánh sáng đến từ một phần bất kì của vành đai, chúng ta thấy phổ đó rất giống với phổ của ánh sáng mặt trời, nhưng tất cả các vạch phổ bị dịch chuyển theo hiệu ứng Doppler do chuyển động của các hạt bụi gửi ánh sáng về phía chúng ta gây ra. Độ dịch chuyển Doppler càng lớn đối với những vành đai ở gần Thổ Tinh hơn: vận tốc của các hạt tỉ lệ với $1/r^{1/2}$. Bởi vậy vận tốc tính được ở những khoảng cách khác nhau phù hợp với định luật 3 của Kepler.

Trong một số ít trường hợp, khi chúng ta nhìn từ Trái Đất theo phương song song với bề mặt các vành đai Thổ Tinh, chúng ta có thể nói rằng tất cả các vành đai đều nằm trong một mặt có bề dày rất mỏng. Các vành đai hầu như luôn luôn nghiêng so với chúng ta. Nhờ đó chúng ta nhận ra 3 vành đai chính với độ dày cỡ 10^4 km. Ngoài ra, 19 vệ tinh cũng đã được phát hiện bằng cách quan sát từ Trái Đất.

many new forms of life have been discovered where such hot water emerges from the ocean floor. If heat emerges from the inside of Europa, perhaps it is also concentrated into places where streams of hot water erupt from the ocean floor. Perhaps such streams contain primitive life of some form? We do not know, but we hope to explore Europa further.

Primitive life on Saturn's moon Titan ?

Saturn's moon Titan is nearly the size of Mercury. But it is far from the Sun, very cold : The temperature of the solid (or perhaps liquid) surface is about 94 K. Titan is completely covered by clouds. Its atmosphere is mostly nitrogen, N_2, plus some CH_4 = methane, and has a surface pressure 1.6 times that of Earth. The surprise : chemical reactions have created molecules more complicated than methane. Apparently there is enough sunlight to cause these reactions. The methane has combined with other molecules to make large molecules that appear like a fog. Since the molecules start with methane, these molecules contain the element carbon. Therefore, we classify them as organic molecules. On Earth, such molecules probably were used to form the first living cells. This leads to speculation : Perhaps there are on Titan liquids, even lakes, consisting of organic molecules? Perhaps simple living cells have been created, despite the very low temperature ? There are plans to build a space craft specifically to explore Titan. Until it arrives at Titan, we must base an opinion on circumstantial evidence. The arguments about possible primitive life on Mars and on Europa (themselves still very controversial) make many people optimistic that Titan might indeed harbor primitive life. [Question 5.]

Figure VI.5

Saturn and its rings, photographed by Voyager. The rings throw a dark shadow onto Saturn. (NASA/JPL)

Saturn's rings and moons:

Saturn's rings are made of dust particles and a few rocks. As far as we can tell from Earth, each dust particle or rock moves around Saturn independently of the others, in an orbit according to Kepler's third law. How do we know? Sunlight is scattered off the dust in the rings, and some of that light comes toward us. When we take a spectrum of the light from any one part of the rings, that spectrum is very similar to the spectrum of sunlight, but all the spectrum lines are Doppler shifted by the motion of the dust that sent the light toward us. The Doppler shift is larger for the rings nearer to Saturn: the velocity is proportional to $1/r^{1/2}$. Therefore, the deduced velocities at various distances fit Kepler's third law.

On the rare occasions when we look from Earth parallel to the surface of the rings, we can tell that the rings all lie in a thin plane. But most of the time, the rings are tilted relative to us. Then we recognize three main rings, with widths of the order of 10^4 km. Also, 19 moons have been discovered by looking from Earth.

Hiện nay các trạm thăm dò vũ trụ đã chụp ảnh các vành đai ở khoảng cách rất gần. Thực ra mỗi một vành đai chính được nhìn thấy từ Trái Đất đều chứa hàng trăm vành đai mỏng, với độ rộng cỡ 2 km. Tại sao có nhiều vành riêng lẻ như vậy? Thổ Tinh có rất nhiều vệ tinh hơn so với 19 vệ tinh được phát hiện từ Trái Đất. Có bằng chứng về hàng chục vệ tinh nhỏ, có đường kính từ 10 đến 100 km. Có lẽ, mỗi một khoảng trống giữa các vành đai mỏng có một vệ tinh nhỏ riêng của nó. Do có hàng trăm khoảng trống nên có thể có hàng trăm vệ tinh.

Một cách trực giác chúng ta có thể coi rằng mỗi một vệ tinh nhỏ hút tất cả các hạt bụi ở gần nó và do đó tạo ra một khoảng trống không chứa bụi, ở trong vành đai. Chúng ta có thể dự đoán rằng những vành và vệ tinh khá ổn định. Nhưng ngay cả các chuyên gia cũng cảm thấy bất ngờ rằng điều này chỉ đúng trong một ít năm. Sau nhiều năm, quỹ đạo của những hòn đá nhỏ và các hạt bụi nhỏ sẽ bị thay đổi do lực hấp dẫn của nhiều vệ tinh. Sau những thay đổi đáng kể của quỹ đạo, những khoảng trống không còn trống nữa và một số hạt bụi và các hòn đá va chạm với các vệ tinh. Một loại chứng cớ: Chúng ta quan sát thấy rằng vệ tinh Iapetus có màu khác nhau ở mặt trước và mặt sau, có lẽ do một phía thu nhận bụi từ các vành đai hoặc bụi được bắn ra từ các vệ tinh khác. Loại chứng cớ khác: chúng ta quan sát các miệng núi lửa được sinh ra bởi sự va chạm mạnh. Vệ tinh Mimas có một miệng núi lửa khổng lồ có đường kính 130 km, khoảng 1/4 đường kính của vệ tinh. Khi vụ va chạm ấy diễn ra, đá và bụi bắn được tung vào vũ trụ và chúng bổ sung thêm cho các vành đai mỏng. Thông thường một số vụ va chạm tạo ra bụi mới và củng cố thêm một số vành đai, những vụ va chạm khác lại làm bụi văng ra, và làm suy yếu một số vành đai. Nếu chúng ta đi ngược trở về Thổ Tinh cách đây một thế kỉ thì những chi tiết trên các hình ảnh của các vành đai mỏng có thể thay đổi đáng kể. Trong thực tế, hai vành đai mỏng dường như chuyển động quanh nhau trong một bức ảnh được chụp bởi tàu Voyager I, đã không còn quan sát được vào 9 tháng sau đó bởi tàu Voyager II.

Khi chúng ta gửi tàu vũ trụ đến Thổ Tinh, chúng ta hi vọng thám hiểm các vành đai không thay đổi kể từ khi Thổ Tinh được hình thành, hơn 4.10^9 năm về trước. Hiện nay chúng ta quan sát các vành đai thay đổi một cách chi tiết theo năm và theo thế kỉ. Một lần nữa chúng ta thấy rằng hệ Mặt Trời là một nơi hoạt động hơn nhiều so với những điều được dự đoán. Chúng ta thấy rằng: ý tưởng về các đường tròn hoàn hảo và vĩnh cửu của Aristotle là không xác đáng!

CÁC TIỂU HÀNH TINH

Các tiểu hành tinh (hay còn được gọi là hành tinh nhỏ) nói chung là những vật thể bằng đá. Đa số các tiểu hành tinh có quỹ đạo gần tròn xung quanh Mặt Trời, ở trong vành đai tiểu hành tinh - một miền không gian tương đối trống rỗng nằm giữa các quỹ đạo của Hoả tinh và Mộc Tinh. Đường kính của các tiểu hành tinh nằm trong khoảng từ 940 km (Ceres, trong vành đai tiểu hành tinh) cho tới đường kính của các tiểu hành tinh nhỏ nhất phát hiện được ở gần Trái Đất, khoảng 1 km, và chắc rằng còn có nhiều tiểu hành tinh nhỏ hơn. Một số tiểu hành tinh, có đường kính bé hơn 100 km, có quỹ đạo cách Mặt Trời không quá 1 đ.v.t.v. Thỉnh thoảng, một số tiểu hành tinh đi đến Trái Đất. Các tiểu hành tinh xuyên qua khí quyển đi đến Trái Đất được gọi là thiên thạch. Thành phần hoá học của thiên thạch cho chúng ta biết rằng chúng thực sự là những mẩu của tiểu hành tinh. Hầu hết các thiên thạch trông giống như những hòn đá. Chúng bị bật ra từ một tiểu hành tinh khi tiểu hành tinh này va chạm với một tiểu hành tinh khác.

Space probes to Saturn have now photographed the rings from nearby. Each main ring seen from Earth really consists of hundreds of thin rings, with widths down to 2 km. Why so many separate rings? There are many more moons than the 19 moons discovered from Earth. There is evidence for dozens of small moons, between 10 and 100 km in diameter. Probably, each gap between the thin rings has its own small moon. Since there are hundreds of gaps, there may be hundreds of moons.

It seems intuitively reasonable that each moon sweeps up the dust near it and, therefore, creates a gap in the rings where there is no dust. Then we can expect the rings and moons to be quite permanent. But, to even the experts' surprise, that is true for only a few years. Over many years, the orbits of the small rocks and dust grains are changed by the gravity of the many moons. After enough change in the orbits, gaps are no longer empty and some of the dust and rocks collide with the moons. One kind of evidence : We observe that the moon Iapetus is colored differently on its front and back sides, probably because one side collects dust from the rings or dust knocked off another moon. Another form of evidence : We observe craters caused by powerful collisions. The moon Mimas has a huge crater, with a diameter of 130 km, about ¼ of the moon's diameter. When that impact occurred, rocks and dust were thrown into space, and they replenished the thin rings. Quite generally, some collisions make new dust and strengthen some rings, other collisions remove dust and weaken some rings. If we return to Saturn a century from now, the details in the patterns of the thin rings may be changed significantly. In fact, two thin rings that seemed to be wound around each other in a photograph by the first Voyager were no longer observed nine months later by the second Voyager.

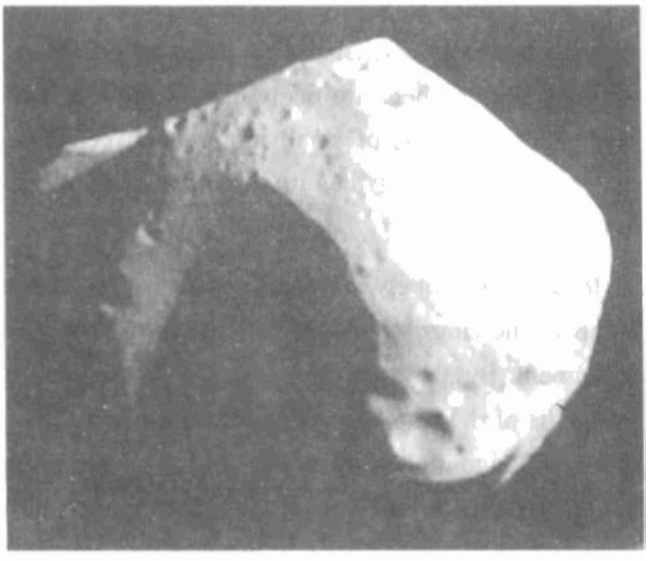
When we first sent space craft to Saturn, we expected to explore rings that had been constant since the time when Saturn formed, over 4×10^9 years ago. We now observe rings that change in detail in years and centuries. Once again, we find that the solar system is a much more active place than was expected. Little remains of Aristotle's ideal of permanent and perfect circles!

ASTEROIDS.

The asteroids (also called minor planets) are generally rocky objects. Most asteroids have roughly circular orbits around the Sun, in the asteroid belt, the relatively empty space between the orbits of Mars and Jupiter. Their diameters range from 940 km (Ceres, in the asteroid belt) down to the smallest detectable diameter of asteroids near Earth, about 1 km, and surely there are many smaller ones. A few asteroids, with diameter smaller than 100 km, have orbits that reach within 1 A.U. from the Sun. Occasionally asteroids arrive at Earth. Those that fall through the atmosphere down onto the Earth are called meteorites. The chemistry of meteorites tells us that they are actually pieces of asteroids. Most meteorites look like stones. They were knocked off an asteroid when that asteroid collided with yet another asteroid.

Tiểu hành tinh Mathilde 253

Tàu vũ trụ NEAR bay qua tiểu hành tinh Mathilde 253, cách tiểu hành tinh này khoảng 1200 km vào ngày 27/6/1997. NEAR, cũng giống như các tàu vũ trụ khác, gửi tín hiệu vô tuyến về Trái Đất ở một tần số vô tuyến đã được biết rất chính xác. Tần số mà chúng ta thu được phụ thuộc vào vận tốc tương đối giữa Trái Đất và NEAR. Độ dịch chuyển tần số do hiệu ứng Doppler đo được của sóng vô tuyến được phát ra từ tàu vũ trụ cho chúng ta thấy rằng vận tốc của tàu vũ trụ thay đổi chỉ khoảng 0,23 mm/s do trường hấp dẫn của Mathilde! Để so sánh, hãy lưu ý rằng, con người đi bộ với tốc độ khoảng 1,4 m/s. Độ dịch Doppler rất bé đo được của sóng vô tuyến chứng tỏ khả năng của công nghệ vũ trụ có thể đo các tần số vô tuyến với một độ chính xác tuyệt vời.



Hình VI.6

Tiểu hành tinh Mathilde, được chụp bởi trạm thăm dò Vũ trụ NEAR. Mathilde có kích cỡ khoảng 50 km. Nó có hình dạng dị thường do có nhiều miệng núi lửa lớn được tạo thành do sự va chạm và bóng tối trong những miệng núi lửa này làm cho nó trông càng dị thường. (Ảnh: NASA).

Sự thay đổi vận tốc của NEAR được gây bởi lực hấp dẫn của Mathilde cho chúng ta biết khối lượng của Mathilde là 10^{17} kg. Biết kích cỡ của nó vào khoảng 46x48x66 km, chúng ta suy ra mật độ của nó là $1,3.10^3$ kg/m^3. Đây là một điều bất ngờ vì đá (như ở trên Mặt Trăng và ở khu vực bên ngoài của Trái Đất) thường có mật độ tối thiểu 3.10^3 kg/m^3; thậm chí hỗn hợp giữa đá và băng (như ở trên hai vệ tinh của Mộc Tinh mang tên Ganymede và Callisto và tiểu hành tinh lớn nhất, Ceres) có mật độ vào khoảng 2.10^3 kg/m^3 (xem câu hỏi 4). Mật độ thấp hơn của tiểu hành tinh Mathilde gợi ý rằng nó được tạo bởi đá vụn khá lỏng lẻo, với những khoảng trống giữa các hòn đá, có lẽ được tích luỹ từ những vụ va chạm trước đó. Quả thực, các bức ảnh của các tiểu hành tinh cho thấy trên đó có một miệng núi lửa rất lớn (so với kích thước tiểu hành tinh) được tạo thành do va chạm, rộng 30 km, sâu 6 km và có thêm 4 miệng núi lửa rộng tối thiểu 20 km. 5 miệng núi lửa do va chạm này bao phủ gần một nửa bề mặt tiểu hành tinh. Kích cỡ của các miệng núi lửa do va chạm gợi cho ta nghĩ tới những vụ va chạm trong quá khứ dường như đã làm cho tiểu hành tinh bị vỡ vụn ra. Bởi vậy chúng ta dự đoán có đá vụn. Tuy nhiên các miệng núi lửa do va chạm có cạnh sắc nét và không có vẻ là do đá vụn tạo thành. Như vậy chúng ta có cả một sự ngạc nhiên và một điều khó giải thích.

SAO CHỔI

Các sao chổi chuyển động xuyên qua Hệ Mặt Trời theo những quỹ đạo elíp rất dẹt. Phần lớn thời gian chúng ở rất xa Mặt Trời, ở đó nhiệt độ của sao chổi rất thấp. Chúng ở gần Mặt Trời chỉ trong vài tuần hoặc vài tháng, ở đó chúng bị nung nóng. Do chúng ta quan sát thấy các sao chổi chuyển động chính xác trên những quỹ đạo elíp, tuân theo định luật 3 của Kepler nên rõ ràng là chúng chỉ chịu ảnh hưởng của lực hấp dẫn của Mặt Trời. Bởi vậy, các sao chổi phải chủ yếu ở thể rắn. Tuy nhiên, khi sao chổi tới đủ gần Trái Đất đến mức chúng ta có thể chụp được ảnh nhân sao chổi từ Trái Đất, nó bị bao bọc bởi một lớp khí, do đó chúng ta không thể nhìn thấy nhân sao chổi.

Figure VI.6

Asteroid Mathilde photographed by the space probe NEAR. Mathilde's size is about 50 km, but its shape is irregular because of large impact craters, and dark shadows in the impact craters make it look even more irregular in shape. (NASA)

Asteroid 253 Mathilde :

The space craft NEAR flew past the asteroid 253 Mathilde, approaching within 1200 km on June 27, 1997. NEAR, like other space craft, sends to Earth radio waves at a very precisely known radio frequency. The frequency we receive depends on the relative velocity of Earth and NEAR. The measured Doppler frequency shift of the radio waves from the space craft showed that the velocity of the space craft changed by only 0.23 mm/s due to the gravity of Mathilde ! For comparison, humans walk at a rate of about 1.4 m/sec. The radio waves' measured small Doppler shift attests to the ability of space engineers to measure radio frequencies with fantastic accuracy.

This change in the velocity of NEAR, caused by the gravity of Mathilde, tells us the mass of Mathilde, 10^{17} kg. Given its size of about 46x48x66 km, the density turns out to be only $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. This is surprising since rocks (such as on our Moon, and in the outer part of the Earth) generally have a density of at least $3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; even mixtures of rock and ices (such as the two moons of Jupiter called Ganymede and Callisto and the largest asteroid Ceres) have a density of about $2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. [See question 4.] The asteroid's lower density suggests that it is composed of rather loose rubble with space between the rocks, perhaps accumulated from past collisions. Indeed, the photographs of the asteroid showed one truly enormous (relative to the asteroid's size) crater 30 km wide and 6 km deep, and there are four more craters at least 20 km wide. The five impact craters cover nearly half the surface. The sizes of the craters suggest collisions in the past that nearly shattered the asteroid. Therefore, rubble is to be expected. Yet the craters are sharply edged and do not seem to consist of rubble. Thus we have both a surprise and a puzzle.

COMETS.

Comets move through the solar system along very elongated elliptical orbits. They spend most of their time far from the Sun, where they are very cold, and they spend a relatively brief few weeks or months near the Sun, where they heat up. Since comets are observed to move precisely on elliptical orbits, following Kepler's laws, the comets apparently feel only the force of solar gravity. Therefore, the comets must be mostly solid. However, when a comet is near enough to Earth so that we can try to photograph the solid comet from Earth, it is surrounded by gases so that we cannot see the solid comet.

Các sao chổi nổi tiếng bởi đuôi khí của chúng. Nhiều sao chổi có hai đuôi. Một đuôi tạo bởi các phân tử như CO, CO_2, H_2O, NH_3, NH_4, được bắn ra từ sao chổi, sau đó bị ion hoá bởi ánh sáng Mặt Trời, nhanh chóng bị gió Mặt Trời cuốn đi (Chương VII) và nhanh chóng bị mang đi xa Mặt Trời. Đuôi này có dạng gần thẳng. Đuôi thứ hai tạo bởi bụi, bị đẩy đi xa Mặt Trời một cách từ từ hơn bởi áp suất của bức xạ Mặt Trời. Đuôi này hơi cong. Phán đoán từ các phân tử và bụi bị bắn ra, chúng ta cho rằng nhân sao chổi là hỗn hợp băng của CO_2, H_2O, NH_3 và CH_4, bụi và vật chất đá. Khi sao chổi ở gần Mặt Trời, băng bị hun nóng, bay hơi, thoát khỏi sao chổi và mang theo bụi cùng với chúng. Dựa vào những sao chổi đã biết trước đây cùng với sự mất mát khí và bụi của chúng, chúng ta dự kiến rằng các sao chổi khá nhỏ, có đường kính chỉ vài ki-lô-mét.

Hình VI.7

Sao chổi Arend Roland 1957, với một đuôi hẹp (các phân tử bị ion hoá) và một đuôi rộng (bụi). Suốt trong thời gian chụp, máy ảnh đuổi theo sao chổi đang chuyển động bởi vậy các ngôi sao hiện lên như những vệt ngắn. Một chấm ở gần phía trước chỉ rõ vị trí của nhân sao chổi. (Ảnh: In lại theo sự cho phép của F.Miller).

HìnhVI.8:

Sao chổi Halley được chụp bởi tàu vũ trụ Giotto vào năm 1986. Khí và bụi bị phóng ra hiện lên như những tia chớp sáng loáng. Chúng tách khỏi vật thể rất tối ở bên phải nhân sao chổi. (Ảnh: ESA)

Sao chổi Halley

Sao chổi nổi tiếng nhất, sao chổi Halley, có quỹ đạo với bán trục lớn là 18 đ.v.t.v, có cận điểm cách Mặt Trời khoảng 0,6 đ.v.t.v, viễn điểm cách Mặt Trời khoảng 35 đ.v.t.v. Nó nổi tiếng vì với chu kì quỹ đạo 76 năm, nó đã được sử sách ghi lại nhiều lần trong suốt 2000 năm qua.

Figure VI.7

Comet Arend Roland 1957, with a narrow tail (ionized molecules) and a broad tail (dust). During the exposure, the camera followed the moving comet, so that stars appear as short lines. A dot near the front shows where the solid body of the comet is located. (Permission F. Miller)

Comets are famous for their gaseous tails. Many comets have two tails. One tail consists of molecules such as CO, CO_2, H_2O, NH_3 and CH_4, ejected from the comet, then ionized by sunlight, quickly picked up by the solar wind (Chapter VII), and rapidly carried away from the Sun. This tail is nearly straight. The other tail consists of dust, which is more gradually pushed away from the Sun by the pressure of solar radiation. This tail is slightly curved. Judging from the ejected molecules and dust, one expects the solid comet to be a mixture of ices of CO_2, H_2O, NH_3 and CH_4, dust and rocky material. When the comet is near the Sun, the ices heat up, evaporate, escape from the comet, and carry the dust with them. Based on historical comets and their loss of gas and dust, one expects the comets to be quite small, only a few km in diameter.

Figure VI.8

Halley's comet as photographed by the space craft Giotto in 1986. Ejected gases and dust appear as bright streaks. They emerge out of the very dark object to the right, the solid comet. (ESA)

Comet Halley.

The most famous comet, Halley, has an orbit with semi-major axis 18 A.U., reaching within 0.6 A.U. from the Sun and as far as 35 A.U.. It is famous because, with its orbital period of 76 years, it has been recorded historically many times during the last 2000 years.

Vào năm 1986, khi sao chổi Halley tới gần Mặt Trời, một số tàu vũ trụ đã được phóng tới gần sao chổi. Tàu vũ trụ Giotto của Châu Âu đến cách sao chổi 600 km vào ngày 14/3/1986. Bức ảnh cuối cùng, chụp được ngay trước khi một mẩu bụi va đập vào camera đã được chụp ở cự li 1700 km (hình VI.8). Bề mặt của sao chổi Halley có dạng của một củ lạc với kích thước cỡ 16x8x8 km. Máy ảnh được hướng về phần sáng nhất của sao chổi. Nhưng, đây là một điều bất ngờ, phần sáng nhất đặc trưng cho luồng khí và bụi bắn ra từ sao chổi. Chúng phản xạ ánh sáng mặt trời về phía chúng ta. Nhân sao chổi gần như đen. Máy ảnh, tự động hướng vào khu vực sáng nhất, dường như bỏ qua nhân sao chổi. Tại sao nhân sao chổi lại tối như vậy? Vật chất có màu đen bao gồm những chất có trong sao chổi mà chúng không bốc hơi trong nhiều lần sao chổi đi ngang qua gần Mặt Trời trước đây. Vật chất có màu đen này tạo nên một vỏ rắn. Tuy nhiên có những hốc hổng ở trong vỏ cứng. Khí bốc hơi thổi từ những hốc này, kéo theo các hạt bụi hiện ra sáng trong bức ảnh do Giotto chụp và sau đó trở thành đuôi sao chổi mà chúng ta quan sát được.

Thỉnh thoảng, một số mẩu bật khỏi sao chổi. Những mẩu này tiếp tục chuyển động trên gần như cùng một quỹ đạo elíp của sao chổi, nhưng sau nhiều năm, chúng tách khỏi nhau dọc theo quỹ đạo. Sau nhiều năm, hình thành một ống hình elíp có dạng giống như quỹ đạo của sao chổi chứa đầy các mẩu băng, đá và bụi. Khi Trái Đất chuyển động qua ống này, một số mảnh của sao chổi va vào Trái Đất. Thông thường chúng bốc cháy trong khí quyển Trái Đất. Chúng ta nhìn thấy chúng như những sao băng hay còn gọi là sao sa. Sao chổi Halley đã từng mất đi một số mảnh. Mưa sao sa diễn ra vào khoảng ngày 4/5 và 20/10 được gây ra bởi sao chổi Halley.

Hình VI.9 :

21 sao chổi ở gần Mộc Tinh. Ảnh được chụp từ khoảng cách Trái Đất bởi kính thiên văn vũ trụ Hubble, tháng 5-1994. Chúng là các mảnh của sao chổi Shoemaker-Levy 9. Tháng 7/1994, những mảnh này đã va vào Mộc Tinh. (Ảnh NASA/STScI)

Vụ va chạm của sao chổi Shoemaker-Levy 9 vào Mộc Tinh

Vào khoảng năm 1992, sao chổi mà giờ đây chúng ta gọi là sao chổi Shoemaker-Levy 9 (mang tên những người phát hiện ra nó) đã tới gần Mộc Tinh. Lực thuỷ triều hấp dẫn của Mộc Tinh đã tách sao chổi này thành nhiều mảnh. Khoảng 21 mảnh đã được chụp ảnh bởi kính thiên văn vũ trụ Hubble (hình VI.9). Vào tháng 7/1994, các nhà thiên văn và đông đảo dân chúng đã quan sát thấy những mảnh này va vào Mộc Tinh trong suốt 2 tuần liền, cứ vài giờ lại có một vụ va chạm. Sự tiên đoán khoa học về hậu quả của những vụ va chạm rất khác nhau vì chẳng ai biết được khối lượng của từng mảnh riêng rẽ và cũng chẳng ai biết rõ các hòn đá trong từng mảnh liên kết với nhau một cách lỏng lẻo đến mức nào. Ngay cả các chuyên gia cũng rất ngạc nhiên về việc các vụ va chạm đã được quan sát một cách dễ dàng. Chúng ta đã có thể quan sát thấy những luồng khí đang phun lên ở phía trên một số hốc va chạm và những vết có kích cỡ Trái Đất xuất hiện trên Mộc Tinh. Một số vết đó tồn tại tới 4 năm sau.

When comet Halley approached the Sun in 1986, several space craft were sent close to Halley. The European space craft Giotto approached Halley within 600 km on March 14, 1986. The last picture, just before a piece of dust hit the camera, was taken at a distance of 1700 km (Figure VI.8). Halley's surface has the shape of a peanut, roughly 16 x 8 x 8 km in size. The camera was aimed at the brightest part of the comet. But, and this was a surprise, the brightest part represents the jets of gas and dust that emerge from the comet. They reflect sunlight toward us. The solid comet is nearly black. The camera, automatically aimed at the brightest area, almost missed the solid comet. Why is it so dark? The black material consists of that material in the comet that has not evaporated during many previous passages near the Sun. This black material makes a solid crust. However, there are holes in the crust. From these holes blow the evaporating gases, which drag along the dust grains, and which appear bright in the Giotto photograph and later become observable as the comet's tails.

Occasionally, pieces break off the comet. These pieces continue to move on nearly the same elliptical orbit as the comet, but over the years they spread out along the orbit. After many years, there is an elliptical tube, shaped like the comets' orbit, filled with pieces of ice, rock and dust. When the Earth moves through this tube, some of the pieces of the comet collide with the Earth. Usually they burn up in the atmosphere. We see them as "falling stars", more properly called meteors. Comet Halley has already lost a few pieces. The annual meteor showers on about May 4 and October 20 are caused by Comet Halley.

Figure VI.9

Twenty one comets near Jupiter, photographed from Earth's distance by the Hubble Space Telescope in May 1994. They are pieces of what earlier was one comet, comet Shoemaker-Levy 9. In July 1994, the pieces hit Jupiter. (NASA/STScI)

The impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter.

In about 1992, a comet now called Shoemaker-Levy 9 (named after its discoverers) came close to Jupiter. The gravitational tidal forces from Jupiter tore the comet into many pieces. About 21 of the pieces were photographed by the Hubble Space Telescope (Figure VI.9). In July 1994, astronomers and many other people watched the pieces hit Jupiter, with an impact as often as every few hours during a two-week interval. Scientific predictions of the effects of the impacts varied enormously, because no one knew the mass of the individual pieces and no one knew how loosely the rocks within each piece are held together. Even the experts were surprised how easily the impacts were observed. Gaseous jets could be seen rising upward from some impacts, and Earth-sized spots appeared on Jupiter. Some of the spots are still present four years later.

Tầm quan trọng nhất của sự kiện này chính là sự chú ý của công chúng đối với sự kiện. Khắp mọi nơi ở châu Á và châu Phi, công chúng đã cố gắng quan sát hậu quả của sự va chạm này bằng những kính thiên văn nhỏ. Báo chí đã tường thuật sự kiện này một cách chi tiết. Sao chổi Shoemaker-Levy 9 đã cung cấp cho chúng ta một bằng chứng xác thực rằng những sự va chạm là hiện tượng có tầm quan trọng trong Hệ Mặt Trời. Các nhà thiên văn rất vui mừng vì vài năm trước đó họ đã rút ra được một kết luận tương tự. Trái Đất sẽ bị tổn thương như thế nào đối với những vụ va chạm như vậy ?

VA CHẠM TRONG HỆ MẶT TRỜI

Ý tưởng cơ bản cho rằng các vật thể trong Hệ Mặt Trời có thể va chạm vào nhau thực sự không phải là mới. Chúng ta đều biết rằng sự va chạm đã từng xảy ra thường xuyên trong khoảng 7.10^8 năm đầu của Hệ Mặt Trời. Chúng ta có bằng chứng tốt về những sự va chạm này từ sự hình thành Mặt Trăng và từ các miệng núi lửa do va chạm khổng lồ cổ xưa ở trên Mặt Trăng, Thuỷ tinh và Hoả tinh (chương V). Từ khi Hệ Mặt Trời hình thành cho đến khi Hệ Mặt Trời khoảng 7.10^8 năm tuổi, hầu hết những hòn đá lớn chuyển động xung quanh Mặt Trời đều đã từng va chạm với các hành tinh và bị các hành tinh bắt giữ hoặc đã rơi vào Mặt Trời, hoặc bị bắn ra khỏi Hệ Mặt Trời. Hệ Mặt Trời trở nên khá trống rỗng nhưng không phải trống rỗng hoàn toàn. Một ít tiểu hành tinh lớn ở lại trong cái mà hiện nay chúng ta gọi là vành đai tiểu hành tinh, đang chuyển động trên các quỹ đạo nằm giữa Hoả Tinh và Mộc Tinh. Những vụ va chạm đã trở nên những sự kiện hiếm hoi nhưng chúng chắc chắn vẫn có thể xảy ra.

Một số tiểu hành tinh đã bị va chạm thậm chí trong vòng khoảng hàng trăm triệu năm trở lại nay. Bằng cách nào chúng ta biết được điều này? Khi tia vũ trụ (các proton chuyển động với vận tốc gần bằng vận tốc ánh sáng) va vào thiên thạch, chúng sẽ xuyên qua khoảng 1 mét đá trước khi chúng dừng lại. Các tia vũ trụ bị giảm tốc và cuối cùng dừng lại trong đá bởi rất nhiều vụ va chạm nhỏ với các nguyên tử riêng rẽ. Kết quả, mỗi tia vũ trụ để lại trong đá một vết tạo bởi các nguyên tử bị nhiễu loạn. Những vết này có thể được nhận ra và được đếm dưới một kính hiển vi. Càng có nhiều vết như thế nghĩa là hòn đá đã ở trong vũ trụ càng lâu, bị các tia vũ trụ bắn phá. Tia vũ trụ cũng tạo ra nhiều nguyên tử đồng vị ^{3}He, nguyên tố này thường không có ở trong đá. Càng nhiều ^{3}He được tìm thấy trong thiên thạch nghĩa là đá nằm trong vũ trụ càng lâu, bị các tia vũ trụ bắn phá. Giả sử chúng ta đo thấy rằng một thiên thạch nằm phơi ngoài tia vũ trụ trong 10^8 năm. Điều này có nghĩa rằng: hơn 10^8 năm về trước, thiên thạch đó đã ở trong một tiểu hành tinh lớn hơn, được bảo vệ khỏi bị các tia vũ trụ bắn vào. Sau đó, 10^8 năm về trước, một số tảng đá va vào tiểu hành tinh, đánh bật thiên thạch ra khỏi tiểu hành tinh nói trên. Kể từ đó, thiên thạch có quỹ đạo riêng của nó xung quanh Mặt Trời mãi cho đến khi nó va vào Trái Đất, chỉ cách đây mấy năm.

Chúng ta thấy rằng phần lớn thiên thạch bắt nguồn từ một số ít tiểu hành tinh và hầu hết các tiểu hành tinh đá đã ở trong vũ trụ chỉ trong khoảng 10^8 năm, một số ở trong vũ trụ trong một khoảng thời gian ngắn hơn nhiều. Ví dụ, thiên thạch được các phương tiện thông tin đại chúng đề cập tới như là một bằng chứng có thể về sự sống trên Hoả Tinh vào thời xa xưa (nhưng hiện nay lập luận này được xem là sai) (chương V) đã bật khỏi Hoả Tinh khoảng 16.10^6 năm về trước.

Tàu vũ trụ Galileo trên đường tới Mộc Tinh, đã thu được thêm các bằng chứng về những vụ va chạm gần đây khi tàu đi qua gần tiểu hành tinh Gaspra. Một bức ảnh cho thấy rằng Gaspra có chiều dài khoảng 19 km và bề mặt của nó có 600 miệng núi lửa do va chạm, từ những miệng có kích thước lớn cho tới những miệng có kích thước bé tới mức chúng ta còn có thể nhận ra. Gaspra cần bao nhiêu thời gian để tích luỹ được 600 miệng núi lửa do va chạm? Khoảng 2.10^8 năm. Có lẽ Gaspra đã bị bật ra từ một tiểu hành tinh lớn hơn, chỉ 2.10^8 năm về trước!

The greatest importance of this event lay in the attention paid to the event by the public. In Asia, Africa, everywhere, people with small telescopes tried to see the effects of the impacts. The newspapers reported the event in detail. Shoemaker-Levy 9 provided dramatic proof that collisions are a significant phenomenon in the solar system. Astronomers were delighted because they had reached the same conclusion a few years earlier. How vulnerable is Earth to such collisions?

COLLISIONS IN THE SOLAR SYSTEM.

The basic idea that objects in the solar system can collide with each other is certainly not new. We know that collisions were common during about 7×10^8 years early in the life of the solar system. We have good evidence for these collisions from the formation of the Moon, and from the ancient huge craters on Moon, Mercury, and Mars (Chapter V). By the time the solar system was about 7×10^8 years old, most of the large rocks orbiting around the Sun either had collided with and were absorbed on the planets, or had fallen into the Sun, or were ejected from the solar system. The solar system became relatively empty, but not entirely empty. A few large asteroids remained in what is now the asteroid belt, moving in orbits situated between Mars and Jupiter. Collisions became rare events but they definitely were still possible.

Some asteroids have suffered collisions even within the last few 10^8 years. How do we know? When cosmic rays (protons at nearly the speed of light) hit a meteorite, they pass through roughly one meter of rock before they are stopped. The cosmic rays are slowed down and finally stopped in the rock by very many small collisions with individual atoms. Consequently, each cosmic ray leaves in the rock a trail of disturbed atoms. These trails can be recognized and counted under a microscope. The more such trails, the longer the rock has been in space, exposed to the cosmic rays. The cosmic rays also create many atoms of the isotope ^{3}He, which is normally almost absent in rock. The more ^{3}He one finds in a meteorite, the longer the rock has been in space, exposed to the cosmic rays. Suppose we measure that a meteorite has been exposed to cosmic rays for 10^8 years. That means : Earlier than 10^8 years ago, the meteorite was inside some larger asteroid, protected from cosmic rays. Then, 10^8 years ago, some rock hit the asteroid and knocked the meteorite out of that asteroid. Thereafter, the meteorite had its own orbit around the Sun until it hit the Earth, just a few years ago.

We find that most meteorites come from a small number of asteroids, and most stony meteorites have been in space for only a few 10^8 years, some much less. For instance, the meteorite that appeared in the news for possible (but now thought to be incorrect) evidence for life on Mars long ago (Chapter V) was knocked off Mars merely 16×10^6 years ago.

More evidence for recent collisions was obtained by the space craft Galileo on its way to Jupiter, when it passed near the asteroid Gaspra. A photograph shows that Gaspra is about 19 km long and its surface shows 600 impact craters, from large to as small as one can recognize. How long did Gaspra need to accumulate 600 impact craters? About 2×10^8 years. Probably, Gaspra was knocked off an even larger asteroid only 2×10^8 years ago!

Va chạm với Trái Đất 65 triệu năm về trước

Khi các nhà địa chất nhìn vào tiết diện ngang của các hòn đá, ví dụ đá lộ ra ở một vách đá, họ thấy rằng những lớp thấp hơn được tích tụ cách đây rất lâu, những lớp ở trên được tích tụ gần đây hơn. Đặc biệt thú vị đó là một lớp đá khác biệt, dày vài cm được tích tụ 65 triệu năm về trước. Lớp này có sự thú vị đặc biệt vì nó đặc trưng cho một sự kiện tuyệt chủng lớn. Những lớp ở ngay dưới lớp này, nghĩa là những lớp chỉ hơi già hơn, có nhiều hài cốt động vật. Những lớp ngay ở phía trên, tức là hơi trẻ hơn, chứa ít hài cốt hơn nhiều. Xương khủng long tồn tại trong các lớp ở dưới lớp này, chứ không có ở trong các lớp ở trên lớp này. Bởi vậy, nhiều loài động vật, kể cả khủng long, bị tuyệt chủng 65 triệu năm về trước.

Ngay cả các dạng sống vi mô cũng đã trở nên tuyệt chủng hoặc gần như tuyệt chủng. Làm sao chúng ta biết? Tỉ số đồng vị $^{13}C/^{12}C$ ở trong vật chất sống khác với ở trong vật chất vô cơ (câu hỏi 6). Sinh vật phù du là những vật chất sống vi mô ở trên bề mặt đại dương. Khi chúng chết, chúng chìm xuống đáy đại dương. Bởi vậy tỷ số $^{13}C/^{12}C$ ở trầm tích đại dương chịu ảnh hưởng của số lượng phù du sống trên mặt đại dương. Đa phần của lớp lắng đọng 65 triệu năm về trước đã lắng đọng lại trên một đáy đại dương. Tỉ số đồng vị các-bon đo được thay đổi theo lớp. Điều này cho chúng ta biết về một sự thay đổi đáng kể về số lượng phù du sống trên bề mặt các đại dương của Trái Đất trong suốt thời kì khi lớp này lắng đọng. Kết luận: Khoảng 70% tất cả các loài đã trở nên bị tuyệt chủng trong suốt thời kì lớp này được lắng đọng lại.

Tỉ số đồng vị các bon trở lại bình thường sau nửa triệu năm. Các loài còn sống sót được nhân lên và tiến hoá. Đặc biệt, số động vật có vú đã phát triển rất nhanh sau thời kì tuyệt chủng. Chúng ta có thể suy đoán rằng: phải chăng loài người tồn tại hiện nay là nhờ một sự tuyệt chủng xảy ra 65 triệu năm về trước?

Vậy nguyên nhân nào đã gây ra sự tuyệt chủng? Việc nghiên cứu lớp đá được lắng đọng 65 triệu năm về trước cho thấy một tính chất hoá học mà chúng ta không ngờ tới: đá giàu iridium hơn mức bình thường. Iridium là một vật liệu rất hiếm ở trên Trái Đất. Vậy điều gì đã gây ra sự dư dật iridium? Vật chất của thiên thạch giàu iridium hơn vật chất của Trái Đất. Phải chăng lượng iridium dư nói trên đã được mang đến Trái Đất bởi một thiên thạch lớn? Nếu đúng như vậy thì từ lượng iridium đo được chúng ta suy ra thiên thạch phải có đường kính cỡ 10 km. Điều gì sẽ xảy ra nếu một thiên thạch có đường kính 10 km va vào Trái Đất? Câu hỏi này đã thách thức trí tưởng tượng của ngay cả các chuyên gia. Sau đây là một câu trả lời có thể:

Khi vụ va chạm xảy ra, một miệng núi lửa lớn do va chạm hình thành. Đá nóng bắn ra từ miệng núi lửa xa hàng nghìn dặm. Khi đá rơi xuống, nó bắt đầu bốc cháy. Hơn nữa, rất nhiều khí và bụi, kể cả iridium bị thổi lên tầng cao khí quyển, cao hơn rất nhiều so với các đám mây gây mưa. Khi khí và bụi lên tới đó, chúng ở đó hàng tuần, hàng tháng, thậm chí hàng năm. Gió mang khí và bụi đi khắp Trái Đất. Bụi che Mặt Trời. Bề mặt Trái Đất trở nên tối tăm (sau khi đã cháy) và không khí trở nên lạnh. Hầu hết các loại cây cối không thể lớn được, lương thực cạn kiệt. Có mưa axít trong nhiều năm. Nhiều loài sinh vật bị tuyệt chủng. Nhưng dần dần qua một số năm, bụi lắng đọng xuống mặt đất trên toàn Trái Đất. Iridium cùng với bụi lắng xuống mặt đất. Lớp bụi lắng đọng này kết hợp với vật chất bình thường tạo thành đá. Hiện nay, sau 65 triệu năm, chúng ta nhìn vào lớp đá này và nhận ra rằng ở đó có nhiều iridium. Chúng ta nhận ra rằng đã từng có một sự tuyệt chủng lớn nhưng một số dạng sống vẫn tiếp tục (câu hỏi 7).

The collision with Earth 65 million years ago.

When geologists look at a cross section of rocks, for instance the rock exposed at a cliff, they find that the lower layers were deposited long ago, the top layers more recently. Of special interest is a distinctive layer of rock, a few cm thick, that was deposited 65 million years ago. This layer has special interest because it represents a major extinction event : the layers just below it, thus the slightly older layers, are rich in skeletal remains; the layers immediately above, thus slightly younger, contain much less skeletal remains. Dinosaur bones exist in the lower layers, not in the upper layers. Therefore, many species of animals including the dinosaurs became extinct 65 million years ago.

Even microscopic life forms became extinct or nearly extinct. How do we know? The isotope ratio $^{13}C/^{12}C$ in living matter is different than in inorganic matter. [Question 6.] Plankton is microscopic living matter on the surface of the ocean. When plankton dies, it sinks to the ocean floor. Therefore, the isotope ratio $^{13}C/^{12}C$ in ocean sediment is influenced by the plankton that lives at the surface of the ocean. Much of the layer deposited 65 million years ago was deposited on an ocean floor. The measured carbon isotope ratio changes across the layer. That tells us about a significant change in the amount of plankton living at the surface of the Earth's oceans, during the time when this layer was deposited. The conclusion : About 70% of all species became extinct during the time when this layer was deposited.

The carbon isotope ratio became normal again after half a million years. The surviving species multiplied and evolved. In particular, the number of mammals grew rapidly after the extinction. We may speculate : do humans exist now because of the extinction event 65 million years ago?

What might have caused the extinction? The investigation of the rock layer deposited 65 million years ago showed an unexpected chemical property : The rocks had a higher-than-normal abundance of iridium. Iridium is a very rare material on Earth. What might explain the extra iridium? Meteorites have more iridium per kg of material than Earth does. Perhaps the extra iridium was brought to Earth by a large meteorite? If yes, then the measured amount of iridium suggested a meteorite roughly 10 km in diameter. What happens if a rock 10 km in diameter hits the Earth? That question stretched even the experts' imagination. Here is a possible answer:

At the time of the collision, a large crater is formed. Hot stone is thrown out of the crater for thousands of miles, and where it lands it starts fires. In addition, much gas and dust, including the iridium, is blown into the upper atmosphere, far above any rain clouds. Once the gas and dust are up there, they stay there for weeks, months, and even years. Winds carry the gas and dust all across the Earth. The dust obscures the Sun. At the surface of the Earth, it is dark and (after the fires) the air becomes cold. Most plants cannot grow, and food disappears. For years, the rain is acid. Many species of life become extinct. But, gradually, over several years, the dust settles to the ground all over Earth, and with the dust the iridium settles to the ground. This settled dust together with ordinary materials becomes rock. Now, 65 million years later, we look at this rock and recognize that there is much iridium, that there was a major extinction of life, but some life continued. [Question 7.]

Khi sự va chạm của một thiên thạch được đề xuất như là nguyên nhân của sự tuyệt chủng 65 triệu năm về trước, hầu hết các nhà khoa học hoài nghi cách giải thích này. Hiện nay, có một bằng chứng rất mạnh khẳng định sự va đập của thiên thạch vào Trái Đất 65 triệu năm về trước. Đó là:

1. Một miệng núi lửa do va chạm, có tuổi đúng 65 triệu năm, có đường kính khoảng 250 km, đã được tìm thấy bị chôn vùi ở dưới bán đảo Yucatan của Mê-hi-cô và ở dưới đại dương lân cận.

2. Muội than phát hiện được trong cùng lớp với iridium, cho thấy rằng những phần rộng lớn của Trái Đất đã bị đốt cháy cùng thời với vụ va chạm. Hiện nay mọi người thống nhất với ý kiến cho rằng vụ va chạm đã gây ra sự tuyệt chủng, cả ở trên đất liền lẫn trong các đại dương, của khoảng 70% các loài.

Người ta cũng đã ghi nhận được nhiều trường hợp tuyệt chủng khác. Có lẽ một số trường hợp có thể được giải thích theo những cách khác, ví dụ như do dòng nham thạch từ trong lòng đất trào ra và tồn tại trong thời gian dài. Dẫu sao, số liệu chi tiết đang được tích luỹ nói lên rằng một sự tuyệt chủng xảy ra khoảng 251 triệu năm về trước cũng được gây ra bởi một vụ va chạm. Vào thời kì đó, 85% các loài sinh vật biển và 70% các loài động vật có xương sống sống trên cạn đã bị tuyệt chủng. Đối với sự kiện này, sự thay đổi của tỷ lệ đồng vị các-bon kéo dài chỉ trong một khoảng thời gian ngắn, không quá 165 ngàn năm. Khoảng thời gian ngắn này nói lên rằng nguyên nhân sự kiện phải gắn liền với tai biến. Nó không phù hợp với sự kiện phun trào nham thạch trong thời gian dài. Các quan sát đã cho những dữ liệu phù hợp với giả thuyết về một vụ va chạm của một sao chổi.

Đó chỉ là những vụ va chạm lớn trong quá khứ. Những vụ va chạm nhỏ xảy ra thường xuyên trên Trái Đất. Một sự kiện xảy ra vào tháng 6/1908 ở Tunguska, Xiberia. Có một vụ nổ lớn, tuy không để lại miệng núi lửa nhưng đã làm đổ dạt cây cối giống như một quả bom khổng lồ. Có lẽ một mảnh của sao chổi đã nổ tung trong khí quyển Trái Đất? Một số tiểu hành tinh va chạm hụt với Trái Đất. Ngày 23/3/1989, một tiểu hành tinh có đường kính khoảng 1 km tới gần Trái Đất, chỉ cách Trái Đất một khoảng cách bằng 2 lần khoảng cách từ Mặt Trăng đến Trái Đất. Khoảng cách này là rất bé theo chuẩn của Hệ Mặt Trời ! Mặc dầu nó tới rất gần chúng ta nhưng các nhà thiên văn chỉ phát hiện ra nó sau khi nó đã đi ngang qua Trái Đất. Điều gì đã xảy ra giá như quỹ đạo của tiểu hành tinh này đã hơi khác đi một chút để nó va vào Trái Đất?

Khả năng của một sự va đập lớn với Trái Đất dẫn tới việc nghiên cứu mới và công nghệ mới. Sau một ít năm nữa, chúng ta có thể phát hiện hầu hết các tiểu hành tinh có kích cỡ từ 200 m trở lên thường lui tới gần Trái Đất một cách có quy luật. Chúng ta sẽ làm gì khi chúng ta thực sự phát hiện thấy rằng một tiểu hành tinh có thể va đập vào Trái Đất? Có thể chúng ta sẽ phóng một tàu vũ trụ để đẩy tiểu hành tinh sang một quỹ đạo hơi khác?

Lí thuyết hỗn loạn (chaos)

Khoảng 20 năm về trước, khi tốc độ xử lí của các máy tính đã đủ nhanh, có một ngành toán học mới xuất hiện. Nó liên quan tới việc tìm nghiệm của các hệ phương trình vi phân phi tuyến với số phương trình không nhỏ hơn 3. Các hệ này chỉ có thể giải được bởi máy tính. Từ hỗn loạn (chaos) ám chỉ một tính chất không dự đoán trước được của những phương trình như thế: thậm chí những sự thay đổi rất nhỏ của điều kiện ban đầu dẫn tới những nghiệm rất khác nếu chúng ta tích phân các phương trình trong một khoảng thời gian đủ dài. Các phương trình xác định thời tiết là một ví dụ. Các hiện tượng thời tiết, ví dụ như những cơn bão lớn, rất khó dự báo trước một vài ngày bởi lẽ chỉ cần các điều kiện ban đầu hơi thiếu chính xác sẽ dẫn đến những kết quả sai.

When the impact of a meteorite was suggested as the cause of the extinction 65 million years ago, most scientists were extremely skeptical about this explanation. Now there is very strong evidence for the meteorite impact 65 million years ago :

1) an impact crater of the correct age, about 250 km in diameter, has been found buried under Mexico's Yucatan peninsula and under the adjacent ocean.

2) Carbon soot, recognized in the same layer as the iridium, indicates that large parts of Earth burned at the time of the impact. There is now general agreement that the impact caused the extinctions, on land and in the oceans, of roughly 70% of all species.

Numerous other extinction events have been recorded. Perhaps some can be explained in other ways, such as long-lasting lava flows from Earth's interior. However, detailed data are accumulating that an extinction event about 251 million years ago was also caused by an impact. At that time, 85% of marine species and 70% of land animals (vertebrates) became extinct. For this event, the change in carbon isotope ratio lasted only a brief time, no more than 165 thousand years. This short time interval indicates a catastrophic event. It does not fit to long lasting lava flows. The observations do fit the impact of a comet.

These are just the largest of past impacts. Minor impacts on Earth happen frequently. One event occurred in Tunguska, Siberia, in June 1908. There was a major explosion that left no crater but pushed trees to the ground like a huge bomb. Perhaps a piece of a comet exploded in the atmosphere? Some asteroids just miss colliding with Earth. On March 23, 1989, an asteroid with a diameter of almost 1 km came within twice the Moon's distance from Earth. That distance is very near by the standards of the solar system! Even though it came so near to us, astronomers discovered this object only after it had passed Earth. What would have happened if the orbit of this object had been only very slightly different so that the object hit Earth?

The possibility of a large impact on Earth is leading to new research and new technology. In a few years, we shall be able to detect most of the asteroids that regularly come near Earth, with sizes down to 200 meters. What shall we do when we actually find an asteroid that may hit Earth? Should we perhaps send a space craft to push the asteroid into a slightly different orbit?

Chaos theory.

A new branch of mathematics started about twenty years ago, when computers became sufficiently fast. It concerns the solutions for non-linear differential equations when there are at least three equations. These can be solved only by computer. The word chaos refers to an unexpected property of such equations : Even very slight changes in initial conditions lead to widely different solutions if one integrates the equations over a long enough time. The equations determining our weather are an example. Weather phenomena, such as typhoons, are very difficult to predict ahead for several days because even slightly wrong initial conditions lead to wrong results.

Lí thuyết hỗn loạn có một tính chất quan trọng mà chúng ta không gặp trong các ngành toán học thông thường: nghiệm của bài toán bị gián đoạn, nghĩa là trong hầu hết mọi thời điểm các nghiệm đó có thể bình thường và tiên đoán được, nhưng tại một số thời điểm không biết trước được, nghiệm có thể thay đổi một cách đáng kể với tốc độ lớn. Với các tiểu hành tinh, chịu ảnh hưởng hấp dẫn của tất cả các hành tinh trong Hệ Mặt Trời, tính không liên tục có nghĩa rằng các tiểu hành tinh có thể chuyển động trên một quỹ đạo gần như không đổi, gần như tuân theo các định luật Kepler, quay xung quanh Mặt Trời trong 10^8 năm. Tiếp đó, suốt trong 10^6 năm, chúng có thể thay đổi quỹ đạo (bán trục lớn và tâm sai) một cách đáng kể, rồi sau đó các quỹ đạo trở nên ổn định trở lại trong 10^8 năm. Các quỹ đạo mới có thể hơi khác so với các quỹ đạo ban đầu. Với một số tiểu hành tinh, những quỹ đạo mới có thể tới cách Mặt Trời 1 đ.v.t.v. Sau đó một tiểu hành tinh như vậy có thể va vào Trái Đất. Quả thực, có nhiều khả năng là tiểu hành tinh sẽ thực sự va vào Trái Đất trong vòng khoảng 10^8 năm! Như vậy, hiện nay, lí thuyết hỗn loạn cho chúng ta một cách giải thích tại sao lại có nhiều thiên thạch tồn tại trong vũ trụ không quá 10^8 năm. (Lí thuyết này không áp dụng được cho các hành tinh. Quỹ đạo của các hành tinh có thể dự đoán trước được).

Một cách suy nghĩ mới

Hai mươi năm về trước, các nhà khoa học đã biết rằng các miệng núi lửa do va chạm được tạo bởi những vụ va chạm của thiên thạch với Trái Đất. Nhưng những sự va chạm chưa được đánh giá đúng mức. Cách nhìn nhận này đã thay đổi cùng với việc thừa nhận có một vụ va chạm diễn ra 65 triệu năm về trước và việc quan sát sự va chạm của sao chổi vào Mộc Tinh xảy ra vào năm 1994. Hiện nay, những vụ va chạm lớn xảy ra trong quá khứ và tương lai được xem xét một cách nghiêm túc và chúng tạo nên một đối tượng nghiên cứu được nhiều người quan tâm.

20 năm trước, các nhà khoa học nghĩ rằng Hệ Mặt Trời tiến hoá dần dần, rất chậm và không đột biến. Họ nghĩ rằng sự sống trên Trái Đất tiến hoá dần dần, rất chậm và không đột biến. Bây giờ chúng ta đang nói đến một Hệ Mặt Trời dữ dội, đang biến đổi, và chúng ta nói đến sự tiến hoá không liên tục của cả Hệ Mặt Trời và sự sống trên Trái Đất. Chính bản thân khoa học cũng thay đổi một cách không liên tục.

Chaos theory has an important property that we are not used to from ordinary mathematics : The solutions are intermittent, that is, the solutions may appear very regular and predictable most of the time, but at some unpredictable times they may rapidly change significantly. For the asteroids, influenced by the gravity of all the planets, intermittency means that they may follow a nearly constant, nearly Keplarian orbit around the Sun for 10^8 years ; then, during a few times 10^6 years, they may change their orbits (semi-major axis and eccentricity) significantly ; and then the orbits may remain practically constant again for 10^8 years. The new orbits may be quite different from the original ones. For some asteroids, the new orbits may reach within 1 A.U. from the Sun. Then such an asteroid may collide with Earth. In fact, the chance is good that the asteroid will indeed collide with Earth within about 10^8 years! Thus chaos theory now gives us an explanation why so many meteorites were in space for no more than for 10^8 years. (This does not apply to planets. The planets' orbits are quite predictable.)

A new way of thinking.

Twenty years ago, scientists knew of craters made by meteorite collisions with Earth. But the collisions were not taken very seriously. This attitude changed with the acceptance of the impact 65 million years ago and with the observation in 1994 of the comet impact on Jupiter. Now, past and possible future impacts are taken very seriously and form an active subject of research.

Twenty years ago, scientists thought of the solar system evolving gradually, very slowly and uneventfully. They thought of life on Earth as evolving gradually, very slowly and uneventfully. Now we talk of the violent, changing solar system and we talk of intermittent evolution of both the solar system and of life on earth. Science itself changes intermittently!

CÂU HỎI

1) Giả sử rằng bạn muốn thiết lập một mô hình Hệ Mặt Trời dọc theo một trong những cái hồ ở Hà Nội hoặc dọc theo một công viên cạnh Nhà thờ lớn ở thành phố Hồ Chí Minh. Bạn đề xuất kích thước của các hành tinh trong mô hình và khoảng cách giữa chúng như thế nào?

2) Giả sử rằng bạn có 1 kính thiên văn nhỏ và bạn quan sát Mộc Tinh và các vệ tinh của nó một cách đều đặn trong nhiều năm liền. Bạn không biết gì về Mộc Tinh trừ những gì bạn quan sát được. Bạn cần đo những đại lượng nào để xác định được khối lượng, bán kính và mật độ trung bình của Mộc Tinh? Bạn có thể giả thiết rằng tất cả các quỹ đạo mà bạn đang quan tâm đều là những đường tròn. Bạn có thể sử dụng bất cứ phương trình nào bạn cần. Bạn có thể giả sử rằng bạn biết khối lượng Mặt Trời tính bằng kg, giá trị của 1 đơn vị thiên văn tính bằng km và giá trị của 1 năm tính bằng giây.

3) Hãy tưởng tượng có 1 đám mây khí hình cầu khối lượng M, bán kính r và mật độ khí đồng đều ρ. Không có áp suất, chỉ có lực hấp dẫn. Mỗi mẩu khí rơi vào tâm hình cầu sao cho mật độ khí vẫn đồng nhất. Ở đây chúng ta ước tính cần bao nhiêu thời gian cho sự sụp đổ này.

a) Phép phân tích thứ nguyên: Viết phương trình chuyển động (gia tốc vật lí bằng gia tốc hấp dẫn) cho một phần tử khí ở bề mặt đám mây khí theo M, r, G và thời gian t. Nhìn vào phương trình để tìm thứ nguyên của hằng số hấp dẫn G biểu diễn qua đơn vị đo của khối lượng, khoảng cách và thời gian. G phải được nhân với tính chất đơn giản nào của đám mây (M, r hoặc ρ) để tích thu được chỉ liên quan tới đơn vị đo của thời gian? (Bỏ qua các hệ số, ví dụ π là hệ số liên hệ M, r và ρ với nhau). Tích đó phải được nâng lên luỹ thừa bao nhiêu để nó thực sự có thứ nguyên thời gian? Đặt đại lượng này cân bằng với thời gian cần thiết để đám mây đó suy sụp dưới tác dụng của lực hấp dẫn của chính nó.

b) Tính thời gian tạo thành Hệ Mặt Trời nếu Hệ Mặt Trời xuất phát từ một đám mây khí có khối lượng gấp 2 lần khối lượng Mặt Trời, trong một hình cầu có bán kính 3.10^3 đơn vị thiên văn.

4) Tính mật độ của Mặt Trăng bằng cách sử dụng các số liệu về Mặt Trăng đã nêu ra trước đây. Giả sử đó là mật độ điển hình của đá. Hãy ước tính tỉ lệ băng và đá để có mật độ của vệ tinh Ganymede, khoảng 2.10^3 kg/m^3.

5) Một sinh viên theo học khoá học về thiên văn này làm việc cho một toà báo. Người biên tập của tờ báo đó muốn đăng lên trang đầu: "Sự sống đã được phát hiện trên vệ tinh Europa của Mộc Tinh và trên vệ tinh Titan của Thổ Tinh ". Sinh viên nói với người biên tập rằng viết "đã được phát hiện" là không chính xác. Người biên tập yêu cầu sinh viên đó viết một truyện ngắn (không quá 15 câu) để giải thích tình huống một cách cẩn thận hơn. Người sinh viên đó nên viết như thế nào?

6) Các đồng vị như ^{13}C và ^{12}C biểu hiện như nhau về mặt hoá học. Tính chất hoặc biểu hiện vật lí nào là khác nhau để tỉ lệ đồng vị ở một nơi này có thể khác tỉ lệ đồng vị ở nơi khác?

7) Hãy ước tính động năng của 1 tiểu hành tinh có bán kính 1 km, mật độ 4.10^3 kg/m^3 và tốc độ tương đối đối với Trái Đất là 20 km/s. So sánh năng lượng đó với năng lượng của quả bom lớn nhất đã từng nổ ở trên Trái Đất, khoảng 4.10^{17} J.

QUESTIONS

Question 1: Suppose you want to set up a scaled model of the solar system along one of the lakes in Hanoi or along the park next to the cathedral of Ho Chi Minh City. What sizes of model planets, and distances between them, do you propose?

Question 2: Suppose that you have a small telescope and you observe Jupiter and its moons patiently for several years. You know nothing about Jupiter except what you observe. What measurements are needed for you to determine the mass, radius, and average density of Jupiter? You may assume that all orbits of interest are circular. You may use any needed equations. You may assume that you know the mass of the Sun in kg, the value of 1 A.U. in km, and the value of 1 year in seconds.

Question 3: Imagine a spherical cloud of gas of mass M, radius r, and uniform gas density ρ. There is no pressure, only gravity. Each piece of gas falls toward the center so that the gas density remains uniform. Here we estimate how much time is needed for this collapse.

a) Dimensional analysis: Write the equation of motion (physical acceleration = gravitational acceleration) for an element of gas at the surface of the cloud, in terms of M, r, G, and time t. Look at the equation to find the dimensions of the gravitational constant G, expressed in units of mass, distance, and time. By which single property of a cloud (M, r, or ρ) must G be multiplied so that the product involves only the unit of time? (Ignore any numerical factors like π that relate M, r, and ρ to each other.) To what power must this product be raised so that it actually has the dimension of time? Set this quantity equal to the time needed for the cloud to collapse under its own gravity.

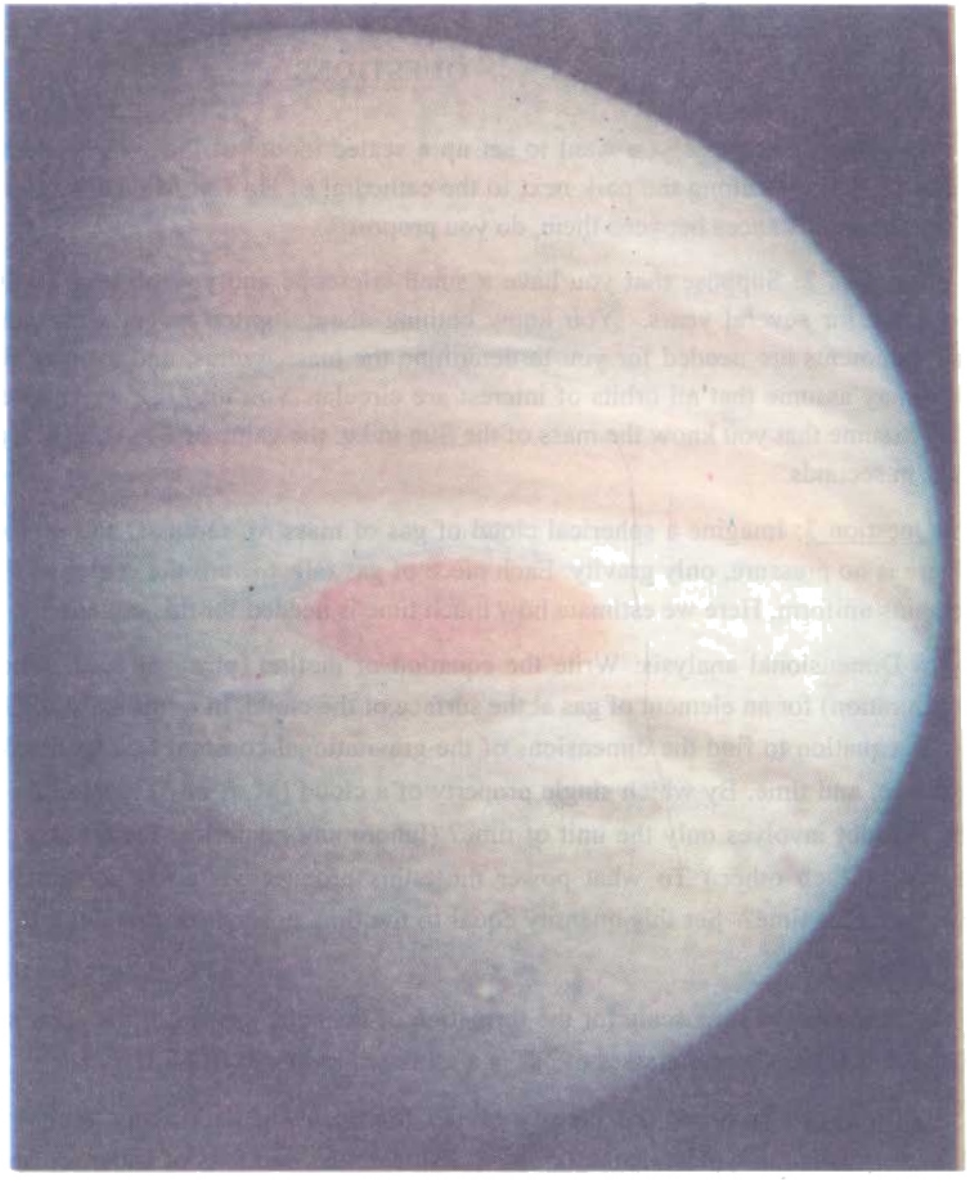
b) Evaluate the time scale for the formation of the solar system, if the solar system started as a cloud containing 2 solar masses of gas in a sphere of radius 3×10^3 A.U.

Question 4: Compute the density of the Moon, using data about the Moon given earlier. Assume this is the typical density of rock. Estimate the fractions of water ice and rock that would yield the density of Jupiter's moon Ganymede, about 2×10^3 kg/m^3.

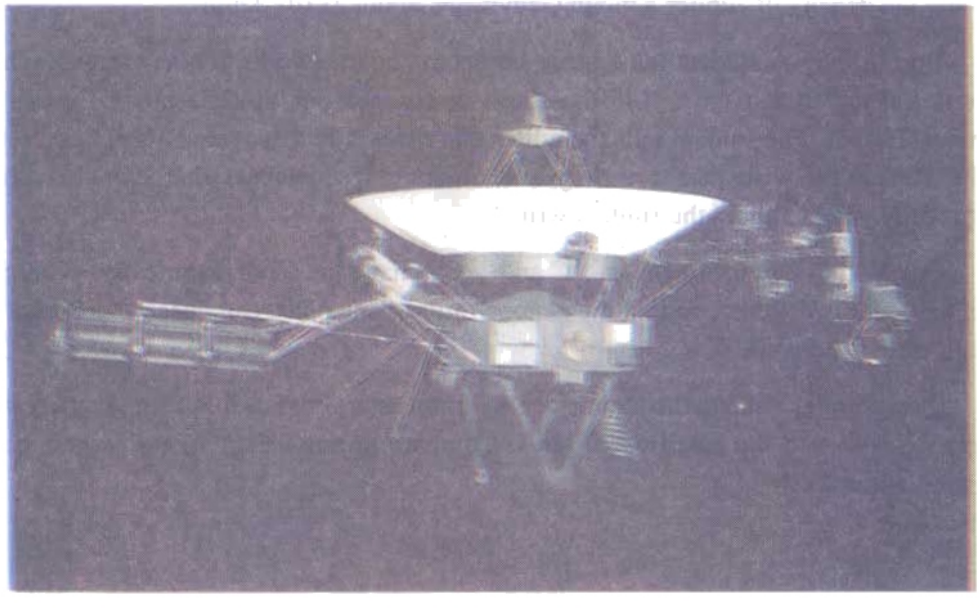
Question 5: A student taking this astronomy course works at a newspaper. The editor wants to write on the front page : "Life has been discovered on Jupiter's moon Europa and on Saturn's moon Titan". The student tells the editor that the word "discovered" is not correct. The editor tells the student to write a short story (maximum 15 sentences) that explains the situation more carefully. What should the student write?

Question 6: Isotopes such as ^{13}C and ^{12}C behave the same chemically. What physical property or behavior is different so that the isotope ratio in one place can become different from the isotope ratio somewhere else?

Question 7: Estimate the kinetic energy of an asteroid of radius 1 km, density 4×10^3 kg/m^3, and speed relative to the Earth of 20 km/s. Compare to the energy of the largest bomb exploded on Earth, about 4×10^{17} j.

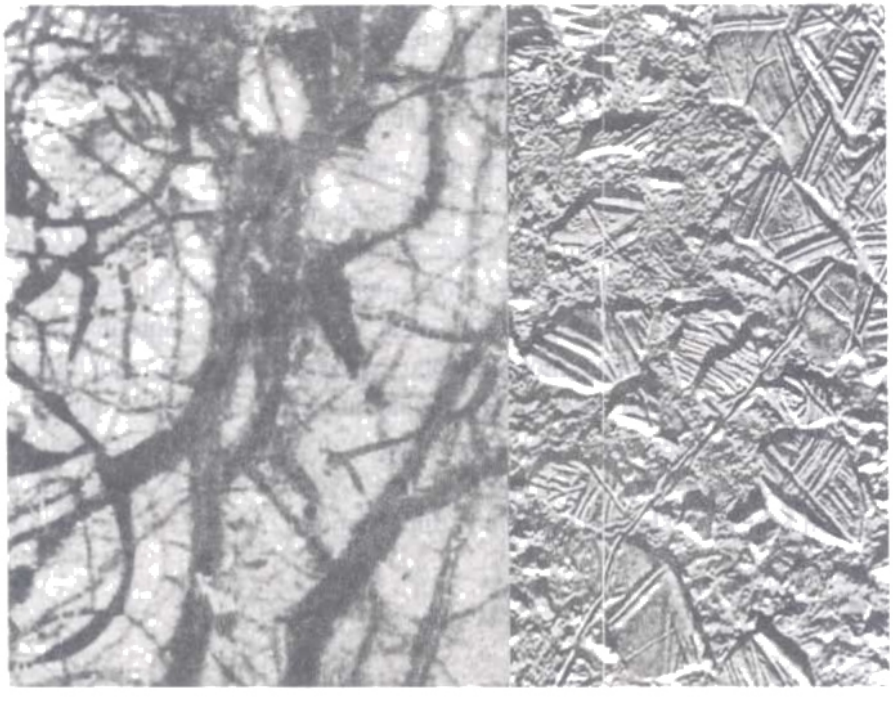


Hình VI.1



Hình VI.2

Hình VI.3



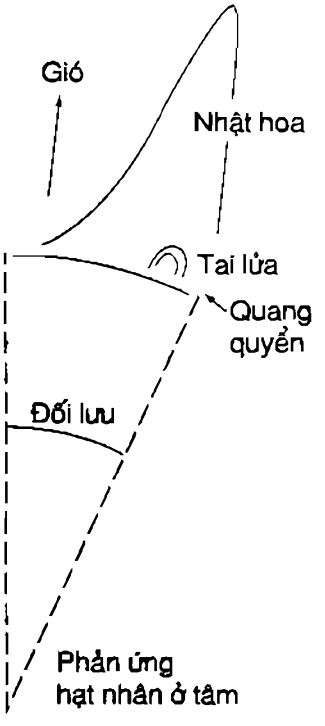
Hình VI.4

Chương VII

MẶT TRỜI

Giới thiệu: Các lớp của Mặt Trời

Mặt Trời là một ngôi sao bình thường. Nó đặc biệt đối với con người vì nó là ngôi sao ở gần chúng ta nhất. Chương này đề cập đến khí quyển Mặt Trời, hoạt động của Mặt Trời và ảnh hưởng của nó đối với Trái Đất, bên trong Mặt Trời, đặc biệt là phản ứng hạt nhân cung cấp năng lượng cho Mặt Trời.



Hình VII.1

Mặt Trời hoàn toàn là khí. Khoảng 75% (của mỗi kg khí) là hiđrô, 23% là hêli, các khí còn lại chỉ chiếm 2%. Nếu chúng ta tưởng tượng thực hiện một cuộc hành trình từ tâm Mặt Trời đi ra ngoài, qua các hành tinh, thì mật độ khí luôn luôn giảm xuống. Mật độ khí giảm cỡ 10^{26} lần. Đầu óc của con người nghĩ về những con số như thế này không phải rất dễ dàng. Bởi vậy để hiểu biết về Mặt Trời, chúng ta chia Mặt Trời thành các lớp khác nhau một cách thuận tiện. Hình VII.1 chỉ rõ những lớp này. Nhân ở tâm rất nóng ($T \sim 1{,}6.10^7$ K). Ở đó, nhiệt năng được tạo bởi những phản ứng hạt nhân. Bức xạ rất mạnh ở nhân. Từ đó, bức xạ khuếch tán từ từ ra phía ngoài, mang năng lượng tới những vùng ít nóng hơn. Ở ngoài xa hơn nữa, năng lượng được mang bởi sự đối lưu hơn là bức xạ. Cuối cùng, khi nhiệt độ giảm xuống tới khoảng 6.10^3 K, mật độ thấp đến nỗi dường như tất cả bức xạ có thể thoát vào vũ trụ. Đó chính là lớp mà chúng ta quan sát thấy như là bề mặt của Mặt Trời - quang quyển. Khi chúng ta đi ra ngoài xa hơn nữa, nhiệt độ đột ngột tăng lên tới khoảng 2.10^6 K. Các khí nóng này, vành nhật hoa của Mặt Trời, có thể được nhìn thấy, ví dụ trong suốt một nhật thực toàn phần, chẳng hạn như nhật thực toàn phần xảy ra ở Việt Nam vào năm 1995. Các lớp phía ngoài của Mặt Trời, kể cả quang quyển và vành nhật hoa, được gọi là khí quyển Mặt Trời. Khi chúng ta đi ra ngoài xa hơn nữa, các khí của Mặt Trời chuyển động ra xa Mặt Trời. Đó là gió Mặt Trời. Nó thổi qua các hành tinh và gặp các khí giữa các sao ở cách Mặt Trời khoảng 150 đơn vị thiên văn (đ.v.t.v).

Chapter VII

THE SUN

Introduction: The many layers of the Sun.

The Sun is an ordinary star. It is special to humans because it is the nearest star. This Chapter concerns the solar atmosphere, its activity and its influence on Earth, and the solar interior, especially the nuclear fusion that provides the Sun's energy.

Figure VII.1

The Sun is entirely gaseous. About 75% (of each kg of gas) is hydrogen, 23% is helium, and all the other elements add up to only 2%. If we imagine taking a trip from the solar center outward past the planets, the density of gas always decreases. The density decreases by 26 orders of magnitude! The human mind does not think very easily using such numbers. Therefore, for the purposes of our understanding the Sun, we divide the Sun into layers with conveniently different properties. Fig. VII.1 shows these layers. The central core is very hot ($T \sim 1.6 \times 10^7$K). The thermal energy there is produced by nuclear reactions. Radiation is intense in the core. From there, radiation slowly diffuses outwards, carrying energy toward less hot regions. Further out, energy is carried by convection rather than radiation. Finally, when the temperature has fallen to about 6×10^3 K, the density is so low that nearly all radiation can escape into space. That is the layer we observe as the surface of the Sun, the photosphere. As we travel still further out, the temperature suddenly increases again, to about 2×10^6K. These hot gases, the solar corona, can be seen, for instance, during a total solar eclipse, such as happened in Vietnam in 1995. The outer layers of the Sun, including the photosphere and corona, are called the solar atmosphere. As we travel still further out, the solar gases are moving away from the Sun. That is the solar wind. It blows past the planets and meets the gases between the stars roughly 150 A. U. from the Sun.

Chương VII. A

KHÍ QUYỂN MẶT TRỜI

QUANG QUYỂN

Bề mặt của Mặt Trời là lớp khí mà từ đó ánh sáng tới chúng ta, lớp mà chúng ta có thể chụp ảnh được. Lớp này - được gọi là quang quyển, hiện ra như một mép sắc cạnh của Mặt Trời vì độ dày của nó, khoảng 3. 10^2 km, là nhỏ so với những chi tiết nhỏ nhất mà chúng ta có thể nhận ra (thậm chí với các kính thiên văn) khi chúng ta nhìn vào Mặt Trời qua khí quyển Trái Đất. Bán kính Mặt Trời được xác định như là khoảng cách của quang quyển tính từ tâm Mặt Trời, $R = 7x10^5$ km. Màu sắc và cường độ của ánh sáng mặt trời (được xác định tương ứng theo định luật dịch chuyển Wien và định luật Stefan-Boltzmann) đều cho nhiệt độ bề mặt vào khoảng 5,8. 10^3K (câu hỏi A1 - A4).

Ánh sáng mặt trời có cường độ rất mạnh. Không được nhìn vào Mặt Trời bằng mắt trần, và đặc biệt là không được nhìn vào Mặt Trời qua các thấu kính hoặc kính thiên văn. Một số kính thiên văn có thể được sử dụng để chiếu ánh sáng mặt trời vào một bề mặt màu trắng. Hình ảnh này là an toàn nếu nhìn vào đó.

Hình VII.2 : (Xem cuối chương)

Ảnh của Mặt Trời được chụp vào ngày 7/4/1947, ở thời điểm có một nhóm vết đen mặt trời lớn một cách khác thường, nằm ở phía trên tâm bức ảnh. Một nhóm vết đen mặt trời khác nằm ở bên trái và có một vài vết đen bình thường. (Ảnh: Carnegie Institution of Washington).

Phổ của Mặt Trời

Nếu chúng ta đo cường độ của ánh sáng mặt trời ở những bước sóng khác nhau thì kết quả thu được rất giống với phổ nhiệt Planck (phương trình 4.1). Dẫu sao, ở nhiều bước sóng xác định, ánh sáng bị hấp thụ trước khi rời khỏi Mặt Trời. Trên phổ có những vạch hấp thụ tối màu ở những bước sóng này (chương IV).

Hình VII.3 : (Xem cuối chương)

Một phần của phổ của Mặt Trời từ màu xanh lam tới màu lục, có bước sóng từ khoảng $3,90\times10^{-7}$ tới khoảng $4,60\times10^{-7}$m. Các nguyên tố gây ra các vạch phổ hấp thụ quan trọng nhất được xác định.

Những vạch phổ này chứa rất nhiều thông tin.

Thứ nhất, chúng là những vạch phổ hẹp. Điều này nói lên rằng Mặt Trời được cấu tạo bởi các chất khí bởi vì các chất rắn và các chất lỏng có phổ với những vạch rất rộng.

Thứ hai, những bước sóng xác định của các vạch phổ hấp thụ xác định các nguyên tố có ở trong Mặt Trời. Những vạch tối nhất là các vạch phổ của hiđrô, canxi, natri, và có nhiều vạch phổ của sắt. Ngoài ra cũng có những vạch phổ của tất cả những nguyên tố bền.

Chapter VIIA

THE SOLAR ATMOSPHERE

THE PHOTOSPHERE.

The surface of the Sun is that layer of gas from which light reaches us, the layer which we can photograph. This layer, the photosphere, appears to us like a sharp edge of the Sun because its thickness, about $3x10^2$ km, is small compared to the smallest details we can recognize (even with telescopes) when we look at the Sun through the Earth's atmosphere. The solar radius is defined as the distance of the photosphere from the center, R = $7x10^5$ km. The color and the intensity of the sunlight (Wien's law and Stefan-Boltzmann law, respectively) both give a surface temperature about $5.8x10^3$ K. [Questions A1 - A4.]

Sunlight is very intense. Do not try to look at the Sun with the naked eye, and especially not through any lens or telescope. Some telescopes can be used to project the sunlight onto a white surface. That image is safe to look at.

Figure VII.2

Photograph of the Sun, April 7, 1947, at the time of an unusually large sunspot group, above photo center. Another spot group is on the left, and there are several ordinary spots. (Carnegie Institution of Washington)

The solar spectrum.

If we measure the intensity of sunlight at various wavelengths, the result is very similar to a Planck thermal spectrum (equ.4.1). However, at many specific wavelengths, light has been absorbed before leaving the Sun. The spectrum shows dark "absorption lines" at these wavelengths (Chapter IV).

Figure VII.3

A part of the Sun's spectrum from blue to green, wavelengths between about 3.90×10^{-7} and about 4.60×10^{-7} m. The elements causing the most obvious absorption lines are identified.

These spectrum lines are rich in information.

First, the spectrum lines are narrow. This shows that the Sun is gaseous, because solids and liquids have spectra with very broad lines.

Second, the specific wavelengths of absorption lines identify the elements found in the Sun. The darkest lines are from H = hydrogen, Ca = calcium, Na = sodium, and there are very many lines from Fe = iron. But there are lines from all the stable elements.

Thứ ba, với những kiến thức về vật lí nguyên tử và lí thuyết, chúng ta có thể suy ra độ phổ cập của mỗi nguyên tố (số lượng của nguyên tố so với hiđrô). Vào đầu thế kỉ XX, các nhà thiên văn cho rằng những nguyên tố có các vạch phổ mạnh nhất, H, Ca, Na và nguyên tố cho nhiều vạch phổ nhất, Fe, có độ phổ cập như nhau. Tuy nhiên, vào những năm 1920, một trong những nhà nữ thiên văn đầu tiên, Cecilia Payne-Gaposhkin, phân tích một cách chi tiết theo vật lí nguyên tử và sau vài năm đã thuyết phục các nhà thiên văn hoài nghi rằng những nhận định ban đầu của họ là sai. Ngày nay, chúng ta biết rằng Mặt Trời chứa chủ yếu là hiđrô và một ít hêli. Những nguyên tố nặng hơn hiđrô và hêli đóng góp một phần rất nhỏ vào khối lượng của Mặt Trời. Các vạch phổ của Ca và Na là quá mạnh và các vạch phổ của Fe là quá nhiều là do những tính chất của nguyên tử quyết định.

Thứ tư, những vạch phổ được lựa chọn một cách cẩn thận có thể được dùng để xác định từ trường trong các khí mặt trời (theo sự tách vạch Zeeman, xem phần dưới) hoặc để xác định vận tốc của khí (bởi độ dịch vạch theo hiệu ứng Doppler, chương IV).

Hình VII.4 : (Xem cuối chương)

Một vết đen mặt trời riêng lẻ, được chụp từ tàu vũ trụ Con Thoi vào tháng 8 năm 1995 với những chi tiết bé nhất có thể nhận ra được là 200 km. Khu vực trung tâm, khá tối bị bao bọc bởi những hình ảnh có dạng sợi có đường kính gấp đôi đường kính Trái Đất. Vết đen mặt trời được bao bọc bởi các khí đối lưu mặt trời thông thường : các khí sáng hơn và nóng hơn dâng lên và mang nhiệt từ bên trong lên trên; nhiệt của chúng sau đó được bức xạ vào vũ trụ; các khí nguội hơn và khá tối vừa được tạo thành chìm xuống dưới.
(Ảnh: NASA and Lockheed Research Laboratories).

VẾT ĐEN MẶT TRỜI : DÒNG ĐIỆN VÀ TỪ TRƯỜNG CỦA CHÚNG

Galileo là người đầu tiên quan sát Mặt Trời và các vết đen của nó dường như mỗi ngày. Ông quan sát thấy rằng những vết đen mặt trời rộng hơn và tồn tại lâu hơn hiện ra ở một phía của Mặt Trời, sau đó di chuyển ngang qua bề mặt Mặt Trời, và biến mất ở phía khác sau khoảng 2 tuần. Galileo đã khẳng định rằng những vết đen mặt trời phải thực sự là một phần của Mặt Trời và quay cùng với Mặt Trời. Ông đã kết luận rằng Mặt Trời tự quay một vòng trong khoảng 28 ngày và Mặt Trời không phải là một quả cầu lí tưởng như Aristotle và những người ủng hộ ông đã từng tuyên bố.

Đường kính của các vết đen rộng nhất vào cỡ 10^4 km, nghĩa là gấp vài lần đường kính Trái Đất. Những vết đen rộng nhất tồn tại trong khoảng 2 tháng. Khoảng thời gian này là đủ dài để các vết đen biến mất ở một phía của đĩa mặt trời và tái xuất hiện ở phía khác hai tuần sau đó. Hầu hết các vết đen được quan sát thấy trong vài ngày và sau đó biến mất, để được thay thế bởi những vết đen khác.

Hầu hết các bức ảnh vết đen mặt trời được in sao cho các vết đen mặt trời hiện ra có màu đen. Các vết đen mặt trời hoàn toàn không phải đen. Độ sáng bề mặt của chúng điển hình vào khoảng 1/4 độ sáng của môi trường xung quanh. Độ sáng này vẫn dễ làm mù mắt người. Theo định luật Stefan-Boltzmann, nhiệt độ của các vết đen vào khoảng 4.10^3 K.

Third, given enough atomic physics and theory, one can deduce the abundance of each element (the amount of the element relative to hydrogen). Early in the 20th century, astronomers thought that the elements giving the strongest lines, H, Ca, Na, and the most lines, Fe, have similar abundances. However, in the 1920's, one of the early woman astronomers, Cecilia Payne-Gaposhkin, worked out the detailed atomic physics and, after several years, convinced the skeptical astronomers that their earlier ideas were wrong. We now know that the Sun consists mostly of H = hydrogen, and some He = helium. The elements heavier than H and He contribute only a very small fraction of the mass of the Sun. The lines of Ca and Na are so strong and the lines of Fe are so numerous because of atomic properties.

Fourth, carefully selected spectral lines can be used to identify magnetic fields in the solar gases (by the Zeeman splitting of the lines, see below) or to identify velocities of the gases (by the Doppler shift of the lines, Chapter IV).

Figure VII.4

A simple sunspot, photographed from the Space Shuttle in August 1995, with recognizable features as small as 200 km. The central, relatively dark region is surrounded by a filamentary pattern, whose diameter is about twice that of Earth. The spot is surrounded by normal solar convective gases : Warmer, brighter gases rise and bring heat up from the interior ; their heat is then radiated into space , and the resulting cooler and relatively dark gases sink back down (NASA and Lockheed Research Laboratories)

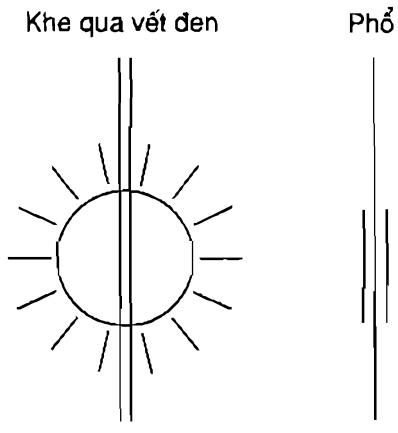
SUNSPOTS, THEIR ELECTRICAL CURRENTS AND MAGNETIC FIELDS.

Galileo was the first to observe the Sun and its spots almost daily. He observed that the larger and longer-lasting sunspots appear on one side of the Sun, then migrate across the face of the Sun, and disappear on the other side after about two weeks. Galileo was convinced that sunspots must actually be a part of the Sun, and rotating with the Sun. He concluded that the Sun rotates once in about 28 days, and that the Sun is not a perfect sphere as was claimed by Aristotle and his followers.

The diameter of the larger spots is several times 10^4 km, that is, several times the diameter of the Earth. The largest spots last up to about two months, which is long enough for the spots to disappear on one side of the Sun's disk and reappear on the other side two weeks later. Most spots are seen for a few days and then they disappear, to be replaced by other spots.

Most photographs of sunspots are printed so that sunspots appear black. Sunspots are definitely not dark. Typically, their surface brightness is about ¼ that of the surroundings. This still easily blinds the human eye. According to the Stefan-Boltzmann law, the temperature of the spots is about 4×10^3 K.

Cơ sở vật lí : Hiệu ứng Zeeman



Hình VII.5

Từ trường trong một chất khí có thể được phát hiện bởi vì các bước sóng của một số vạch phổ xác định, ví dụ một số vạch phổ của các nguyên tử Fe, bị thay đổi bởi từ trường. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng Zeeman. Tại sao các vạch phổ này lại thay đổi? Chúng ta có thể hình dung các electron trong nguyên tử đang quay trên các quỹ đạo xung quanh hạt nhân, mv^2/r cân bằng với lực hút tĩnh điện của hạt nhân. Nhưng đồng thời các electron cũng chịu tác dụng của một lực có cường độ yếu hơn nhiều do từ trường xung quanh tác động lên chúng. Mỗi electron có xu hướng quay theo một hướng trong từ trường. Cần có năng lượng để buộc electron quay theo hướng khác. Bởi vậy, năng lượng của một electron trong nguyên tử hơi lớn hơn nếu các electron quay theo một chiều nào đó xung quanh từ trường và bé hơn nếu electron quay theo hướng ngược lại. Khi các electron trong nguyên tử trong một từ trường nhảy từ một mức nguyên tử tới một mức nguyên tử khác và phát xạ photon, chúng phát xạ photon với năng lượng hơi khác nhau tuỳ thuộc electron chuyển động trên quỹ đạo theo hướng nào. Nếu một chất khí chứa các nguyên tử Fe phát bức xạ về phía chúng ta và từ trường nằm dọc theo đường ngắm của chúng ta đến đám khí thì các bước sóng được phát xạ bị tách, nghĩa là các bước sóng hơi cao hơn và hơi thấp hơn mức bình thường (và bức xạ ở hai bước sóng có độ phân cực tròn trái ngược nhau). Sự chênh lệch giữa hai bước sóng, được gọi là sự tách vạch Zeeman, cho chúng ta biết cường độ từ trường nơi nguyên tử định vị.

Quan sát vết đen mặt trời

Bằng cách nào chúng ta có thể quan sát sự tách vạch Zeeman của bức xạ phát ra từ một vết đen mặt trời? Một cái khe được đặt trên hình ảnh của vết đen mặt trời như được chỉ ra ở phía bên trái của hình VII.5. Chỉ có ánh sáng đi qua khe mới được phép rơi vào phổ kế (hoặc một lăng kính) và bị tách ra thành phổ của vết đen mặt trời. Một vùng rất nhỏ của các bước sóng của phổ được chỉ ra ở bên phải. Ở phía trên và phía dưới có một vạch phổ hấp thụ đơn. Nơi khe cắt ngang vết đen, vạch phổ hấp thụ đơn thông thường bị tách.

Kết quả của sự quan sát này là gì ? Thông thường, từ trường của vết đen có phương thẳng đứng so với bề mặt Mặt Trời. Giá trị của từ trường trong hầu hết các vết đen vào khoảng 0,1 đến 0,2 Tesla. Từ trường giảm tới gần giá trị 0 trong một vùng dày khoảng 10^3 km, mỏng so với đường kính của vết đen.

Dòng điện trong vết đen mặt trời

Vì toàn bộ Mặt Trời là một quả cầu khí nên không thể có các vật chất từ rắn ở đó. Từ trường phải do dòng điện tạo ra, như đã xảy ra đối với một nam châm trong phòng thí nghiệm. Các dòng điện có thể chạy trong các chất khí hay không? Có. Có nhiều nguyên tử trong khí mặt trời bị ion hoá bởi vậy có các electron tự do.

Khi các electron và các hạt mạng điện của chúng chuyển động tương đối đối với các nguyên tử và các ion, có một dòng điện chạy trong chất khí.

Physics background : The Zeeman effect.

A magnetic field in a gas can be detected because the wavelengths of certain spectrum lines, for instance some lines of Fe atoms, are changed by the magnetic field. This is known as the Zeeman effect. Why do the lines change? We may think of the electrons in the atom as circling in orbits around the nucleus, with mv^2/r balancing the electrical attraction to the nucleus. But the electrons also feel a much weaker force due to the surrounding magnetic field. Each electron prefers to circle one way in the magnetic field. Some energy is required to make it circle the other way. Therefore, the energy of an electron in an atom is slightly larger if the electron orbits one way around the magnetic field, smaller if it orbits the other way. When electrons of atoms in a magnetic field jump from one to another atomic level and emit photons, they emit photons of slightly different energies depending on which way the electrons orbit. If a gas of Fe atoms radiates toward us, and the magnetic field is along our line of sight to the gas, the emitted wavelengths are split, that is, the wavelengths are slightly higher and slightly lower than normal (and the radiations at the two wavelengths have opposite circular polarizations). The difference between the two wavelengths, called Zeeman splitting, informs us of the strength of the magnetic field where the atoms are located.

Figure VII.5

Sunspot observations.

How does one observe the Zeeman splitting of radiation from a sunspot? A slit is placed over the image of the sunspot, as shown on the left side of fig. VII.5. Only the light passing through the slit is allowed to fall into a spectrograph (or onto a prism) and is spread out into its spectrum. A very small range of wavelengths from the spectrum is shown on the right. At the top and bottom, there is a single absorption line. Where the slit crosses the spot, the normally simple absorption line is split.

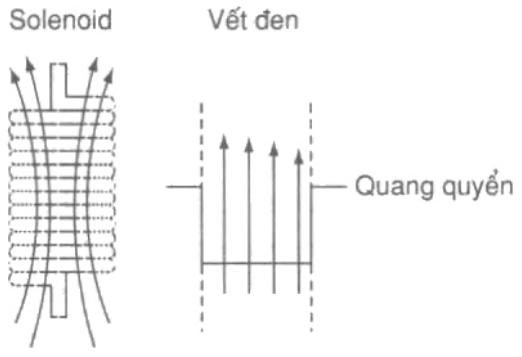
What are the results of such observations? Typically, the magnetic field of a spot is vertical relative to the surface of the Sun. The value of the field strength in most spots is about 0.1 to 0.2 Tesla. The magnetic field decreases to nearly zero within a boundary roughly 10^3 km thick, thin compared to the diameter of the spot.

Sunspot electrical currents.

Since all the Sun is gaseous, there cannot be any solid magnetic material. The magnetic field must be due to an electrical current, as occurs for an electromagnet in the laboratory. Can electrical currents run in gases? Yes. Enough atoms of the solar gas are ionized so that there are free electrons.

When the electrons and their electrical charges move relative to the atoms and ions, that is the same as an electrical current running through the gas.

Có thể lấy hình ảnh solenoid như một mô hình của vết đen mặt trời : dây được quấn chặt theo dạng một ống hình trụ. "Dây" tương ứng với khí ở vùng biên giới của vết đen. Như vậy "dây" mà trong đó có các dòng điện chạy dày khoảng 10^3 km. (Những đường tối màu trên giản đồ vết đen). Các dòng điện quay xung quanh vết đen, với đường kính khoảng 10^4 km, ở đó từ trường là đồng nhất. Để đơn giản hoá, chúng ta sẽ giả sử rằng solenoid dài hơn rất nhiều so với đường kính của nó. Khi đó, từ trường trong ống dây là đồng nhất. Một solenoid dài "vô hạn" như vậy được quấn bởi n vòng dây trên một mét mang dòng điện I có từ trường đồng nhất ở bên trong với cường độ $B = 4\pi x10^{-7}$ nI, nếu B được đo bởi tesla và I được đo bởi am-pe. Với B = 0,15 T quan sát được, chúng ta suy ra $nI = 1,2x10^5$ A/m. Đây là dòng điện quay quanh solenoid dọc theo mỗi mét dài (Giá trị của n không liên quan với khí liên tục. Chỉ có tích nI là quan trọng).



Hình VII.6:

Sự ước tính tốt nhất của chúng ta đối với độ sâu thực sự đạt được bởi một vết đen mặt trời và từ trường của nó là 3.10^4 km. Do đó, solenoid dài 3.10^4 km và dòng điện tổng cộng quay quanh solenoid, nghĩa là quay quanh vết đen mặt trời, là $4x10^{12}$ A. Dòng điện này là rất mạnh! Tất nhiên, B = 0,15 T cũng là một từ trường rất mạnh. Từ trường này mạnh gấp hàng ngàn lần từ trường của Trái Đất và nằm trong một thể tích lớn hơn thể tích Trái Đất. Mỗi vết đen mặt trời phải được xem xét như một nam châm rất mạnh.

Có thêm một sự khác biệt giữa các vết đen mặt trời ở thể khí và phòng thí nghiệm: Trong phòng thí nghiệm nếu chúng ta dùng dây mảnh thì dòng điện mạnh nung nóng dây. Dây càng dày thì có càng ít nhiệt. "Dây" Mặt Trời dày như vết đen, 10^3 km. Thực tế không có nhiệt toả ra. Thực tế dòng điện có thể chạy mãi mãi nghĩa là cho đến khi có một lực khác làm biến mất vết đen mặt trời. Trong chừng mực nào đó, vết đen mặt trời phải được xem xét như một nam châm siêu dẫn.

Các vết đen mặt trời là một trong số nhiều ví dụ của các dòng điện và từ trường vũ trụ. Xung quanh các vết đen mặt trời bình thường có nhiều vết đen mặt trời bé, các solenoid với từ trường và dòng điện tương tự nhưng với đường kính bé hơn nhiều, thường chỉ 100 km. Tầm quan trọng của chúng sẽ được đề cập tới ở cuối chương VII.A này. Một số dòng điện và từ trường có thể được tìm thấy ở khắp nơi trên Mặt Trời cũng như ở trên các hành tinh và trong không gian giữa các hành tinh. Dòng điện và từ trường tồn tại ở hầu hết các ngôi sao khác. Bức xạ synchrotron (chương IV) cho chúng ta biết rằng từ trường tồn tại khắp nơi trong không gian giữa các sao (chương IX) và thậm chí khắp toàn bộ các thiên hà (chương X). (Kiến thức vật lí: Vì không có nam châm rắn trong thiên văn vật lí và tất cả các dòng điện trong chất khí đều được tính đến một cách chính xác, không cần thiết phải xem xét một cách riêng rẽ từ trường H và cảm ứng từ hay mật độ thông lượng B. Trong thiên văn vật lí, B được xem như từ trường).

Figure VII.6

A model of the sunspot is that of a solenoid: wire wrapped tightly in the form of a cylinder. The "wire" corresponds to the gas in the boundary of the spot. Thus the "wire" in which run the electrical currents is about 10^3 km thick. (Dashed line in spot diagram). The electrical currents encircle the sunspot, with diameter roughly 10^4 km, in which the magnetic field is uniform. For simplicity, we shall assume that the solenoid is much longer than its diameter. Then the magnetic field within the cylinder is uniform. Such an "infinitely" long solenoid wound by n turns of wire per meter and carrying current I has a uniform magnetic field inside with strength $B = 4\pi \times 10^{-7} nI$, if B is in Tesla and I in Amperes. For an observed B = 0.15 Tesla, we deduce $nI = 1.2 \times 10^5$ amperes/meter. This is the current encircling the solenoid for each meter of length. (The value of n is irrelevant for continuous gas. Only the product nI is important.)

Our best estimate for the actual depth reached by a sunspot and its magnetic field is 3×10^4 km. Then the solenoid is actually 3×10^4 km long and the total current encircling the solenoid, that is, encircling the sunspot, is 4×10^{12} Ampere. That is a lot of current! Of course, B = 0.15 Tesla is also a very strong magnetic field. It is thousands of time stronger than the Earth's magnetic field, and fills a volume larger than the volume of Earth. A sunspot must be considered a very powerful electromagnet.

There is one more difference between gaseous sunspots and the laboratory: In the laboratory, if we use thin wires, strong electrical current heats the wire. The thicker the wire, the less heat arises. The solar "wires" are as thick as the boundary of the spot, 10^3 km. Practically no heat is generated. The currents can run practically forever, that is, until other forces disperse the sunspot. In a sense, the sunspot must be considered a superconducting electromagnet.

Sunspots are one of many examples of cosmic electrical currents and magnetic fields. In the surroundings of normal sunspots are many more mini-sunspots, solenoids with similar magnetic fields and electrical currents but with diameters very much smaller, often only 100 km. Their importance will be described at the end of this Chapter VIIA. Some electrical currents and magnetic fields can be found in all parts of the Sun, and also on the planets and throughout the space between the planets. Electrical currents and magnetic fields exist in most other stars. Synchrotron radiation (Chapter IV) tells us that magnetic fields exist everywhere in the space between the stars (Chapter IX), and even throughout entire galaxies (Chapter X). (Physics background: Because there are no solid magnets in astrophysics and all the currents in gases are accounted for explicitly, there is no need to consider separately the magnetic field $\underline{H}$ and the magnetic induction or flux density $\underline{B}$. In astrophysics, $\underline{B}$ is referred to as the magnetic field.)

CÁC TAI LỬA

Khi đĩa sáng của Mặt Trời bị che phủ, ví dụ trong dịp nhật thực, chúng ta thấy hiện ra trên bầu trời đen các vòng khí màu đỏ, điển hình khoảng 10^4 km phía trên bề mặt Mặt Trời. Khí này được gọi là các tai lửa vì chúng ta thấy chúng nhô ra từ Mặt Trời. Chúng tồn tại ở phía trên bề mặt của Mặt Trời trong một số ngày. Màu đỏ (bước sóng 656,3 nm) cho chúng ta biết rằng chúng ta đang quan sát hiđrô nóng (khoảng 10^4 K). Tại sao những khí nóng này lại ở đó? Tại sao chúng không rơi vào bề mặt Mặt Trời ? Một bằng chứng được rút ra từ hình dáng của nhiều tai lửa. Hãy nhìn vào bức ảnh ở hình VII.7: Tai lửa sắc nét giống như hình ảnh của bột sắt xung quanh một nam châm rắn trong phòng thí nghiệm. Hình ảnh của bột sắt cho biết từ trường của nam châm. Rõ ràng là có một từ trường tạo nên tai lửa! Nếu ở đó cũng có dòng điện thì tai lửa có thể được nâng lên bởi các lực $\underline{I} \times \underline{B}$.

Hình VII.7

Tai lửa được quan sát ở ánh sáng hiđrô đỏ, hiện lên phía trên cạnh Mặt Trời ngày 6 tháng 10 năm 1977.

Nguồn của các dòng điện là gì? Liệu có vết đen mặt trời ở dưới tai lửa hay không? Khi tai lửa được quan sát thấy ở cạnh của Mặt Trời thì vết đen mặt trời không hiện ra trên bề mặt Mặt Trời. Dẫu sao, khi sự quay của Mặt Trời mang tai lửa tới phía trước của đĩa thì chúng ta thực sự quan sát thấy các vết đen mặt trời ở bề mặt Mặt Trời nằm phía dưới (hoặc tối thiểu là ở gần) các tai lửa. Nếu thậm chí một phần rất bé (có lẽ 10^{-3}) của dòng điện quay quanh vết đen (hoặc của các vết đen nhỏ ở cạnh nó) thoát vào các tai lửa thì lực $\underline{I} \times \underline{B}$ tạo thành có thể nâng các tai lửa thắng lực hấp dẫn. Việc các tai lửa được nâng lên như thế nào, một cách chi tiết, là một phần của việc nghiên cứu đang được chú ý hiện nay.

Hình VII.8 :

Nhật thực
12 giờ 43 phút (giờ Quốc tế) tại Vapor Cue, Paraguay.
(Ảnh : Dr.E. Hiei, Meisei University Tokyo, Japan).

NHẬT THỰC VÀ VÀNH NHẬT HOA:

Trong suốt nhật thực toàn phần, khi Mặt Trăng bao phủ đĩa sáng của Mặt Trời, Mặt Trời được bao bọc bởi ánh sáng yếu, huyền ảo, được gọi là vành nhật hoa (tiếng La tinh nghĩa là vương miện). Nhật thực toàn phần có thể kéo dài 7 phút, nhưng nhật thực xảy ra ở Việt Nam vào năm 1995 chỉ kéo dài gần 2 phút.

PROMINENCES.

When the bright disk of the Sun is covered up, for instance during a solar eclipse, one sees, against the black sky, loops of red gases, typically some 10^4 km above the solar surface. These gases are called prominences because they are seen to protrude from the Sun. They remain above the surface of the Sun for days. The red color (wavelength 656.3 nm) tells us that we are looking at hot (about 10^4 K) hydrogen. Why are these hot gases there? Why do they not fall toward the solar surface? A clue comes from the shape of many prominences. Look at the photo Figure VII.7 : The prominence is shaped like the pattern of iron filings around a solid magnet in the laboratory. The pattern of iron filings indicates the magnetic field of the magnet. Surely there is a magnetic field shaping the prominence! If there are also electrical currents, then a prominence can be held up by $\underline{I} \times \underline{B}$ forces.

Figure VII.7

Prominence, observed in the red light of hydrogen, protruding above the edge of the Sun on October 6, 1997.

What is the source of the electrical currents ? Is there a sunspot under a prominence? When a prominence is seen at the edge of the Sun, the sunspot in the solar surface is not visible. However, when solar rotation carries the prominence in front of the disk, then indeed we observe sunspots in the solar surface underneath (or at least near) prominences. If even a tiny fraction (perhaps 10^{-3}) of the electrical currents encircling a sunspot (or its neighboring mini-sunspots) escapes to the prominences, the resulting $\underline{I} \times \underline{B}$ forces can hold up the prominences against gravity. Just how the prominences are held up, in detail, is part of current active research.

Figure VII.8

Solar Eclipse
3 November 1994 12 : 43UT Vapor Cue, Paraguay
3 November 1994 13 : 50UT Yohkoh Soft X-ray
Courtesy of Dr. E. Hiei, Meisei University (Tokyo, Japan)

THE SOLAR ECLIPSE AND THE CORONA.

During a total solar eclipse, when the Moon covers the bright disk of the Sun, the Sun is surrounded by a faint, ghostly light, the corona (Latin for crown). Total solar eclipses can be up to 7 minutes long, but the eclipse in Vietnam in 1995 lasted only a little less than 2 minutes.

Nguyên nhân của ánh sáng nhìn thấy được phát ra từ vành nhật hoa là gì? Hầu hết ánh sáng này là ánh sáng mặt trời được tán xạ về phía chúng ta bởi các electron tự do (bị bật ra khỏi các nguyên tử hidrô bởi các vụ va chạm, xem phần dưới). Lí thuyết vật lí cho chúng ta biết khá chính xác về việc một electron chuyển bức xạ vào các hướng khác như thế nào, đặc biệt là việc chúng chuyển bức xạ đang chuyển động ra xa từ quang cầu tới hướng về phía chúng ta như thế nào. Từ độ sáng của ánh sáng mặt trời bị tán xạ, chúng ta biết mật độ của electron và của các proton trong vành nhật hoa. Với một phần điển hình của vành nhật hoa như được nhìn thấy ở hình VII.8, mật độ khí có thể đạt 10^{-6} mật độ trong quang quyển. Không có gì đáng ngạc nhiên về việc vành nhật hoa mờ như vậy. Mật độ còn giảm hơn nữa ở phía ngoài.

Một phần khác của bức xạ từ vành nhật hoa là sự phát xạ, ở những bước sóng xác định, từ các nguyên tử bị ion hoá cao độ, như các ion sắt mất 8 đến 12 electron. Bằng cách nào các nguyên tử có thể bị ion hoá cao độ như vậy? Khi một ion được tích điện nhiều như vậy, cần rất nhiều năng lượng để dịch chuyển tiếp một electron. Những electron còn lại trong các ion phải bị đánh bật ra bởi những vụ va chạm rất mạnh với các electron hoặc ion khác. Năng lượng va chạm cao đòi hỏi chuyển động nhiệt với tốc độ lớn, do đó nhiệt độ cao. Vật lí nguyên tử cho chúng ta biết rằng nhiệt độ của vành nhật hoa phải vào khoảng $2x10^6$K! Gần như tất cả hiđrô đều bị ion hoá ở nhiệt độ này.

Vì những vụ va chạm giữa các nguyên tử và electron mạnh như vậy nên các photon được phát ra mang năng lượng rất lớn. Ở nhiệt độ của vành nhật hoa, hầu hết các photon là tia X (chương IV). Bởi vậy hình ảnh của vành nhật hoa có thể thu được bằng cách sử dụng một camera tia X. Vì tia X không xuyên qua khí quyển trái đất nên camera tia X phải được đặt trong vũ trụ. Hình VII.9 thu được nhờ trạm vũ trụ đầu tiên của Mỹ, Skylab. Màu trắng trong bức ảnh nói lên rằng có nhiều tia X.

Hình VII.9: (Xem cuối chương)

Mặt Trời được quan sát ở vùng tia X, từ Skylab, ngày 5/9/1973. Nguồn tia X mạnh nhất hiện ra ở màu trắng. 7 nguồn nằm trong vành nhật hoa, mỗi nguồn nằm trên một nhóm các vết đen mặt trời không được trông thấy ở tia X. Các nguồn tia X được nối bởi các vành khí phát xạ tia X (Ảnh: NASA).

Những bức ảnh tia X đầu tiên của vành nhật hoa, giống như bức ảnh VII.9, đã làm ngạc nhiên tất cả các chuyên gia. Họ đã hy vọng có một bức ảnh trơn tru. Nhưng thay vào đó họ thấy rằng tia X có hình ảnh vòng, đặc biệt là ở những nơi vành nhật hoa nằm trên các vết đen (câu hỏi A5). Rõ ràng là khí nóng ở vành nhật hoa không được phân bố một cách đồng đều mà được sắp xếp trong các vòng. Chúng ta phải đặt ra câu hỏi tương tự như câu hỏi mà chúng ta đã đặt ra đối với các tai lửa: Tại sao các khí này không rơi xuống bề mặt Mặt Trời? Câu trả lời cũng tương tự như trong trường hợp tai lửa: Các vòng nói lên rằng có các dòng điện và từ trường, và lực $\underline{I}x\underline{B}$ nâng khí thắng lực hấp dẫn. Ngay cả lực $\underline{I}x\underline{B}$ ở xa Mặt Trời cũng liên quan tới các vết đen và những vùng lân cận của chúng. Ví dụ, cấu trúc dài nhất trong bức ảnh nhật thực ở hình VII.8 có thể nối với một nhóm vết đen trên đĩa mặt trời (nhưng chúng không được nhìn thấy trong bức ảnh nhật thực vì đĩa mặt trời bị Mặt Trăng che khuất). Bởi vậy sự ảnh hưởng của một phần nhỏ của những dòng điện rời khỏi vết đen mặt trời đạt tới tối thiểu là 1 triệu km trong vũ trụ.

What causes the visible light from the corona? Most of it is sunlight scattered toward us by free electrons (knocked out of hydrogen atoms by collisions, see below). Physics theory tells us quite accurately how effectively any one electron turns radiation into other directions, specifically how they turn radiation moving away from the photosphere into the direction toward us. From the brightness of the scattered sunlight, we learn the density of electrons, and thus also of protons in the corona. For a typical part of the corona such as seen in Figure VII.8, the gas density may be 10^{-6} of the density in the photosphere. It is not surprising that the corona is so faint. And the density drops even more further out.

Another part of the radiation from the corona consists of emission, at specific wavelengths, from highly ionized atoms, such as iron ions that have lost 8 to 12 electrons. How can atoms be so highly ionized? When an ion is so highly electrically charged, it takes much energy to remove one more electron. The electrons remaining in the ions must be knocked out by powerful collisions with other electrons or ions. High collision energies require fast thermal motions, therefore high temperature. The appropriate atomic physics tell us the coronal temperature must be about 2×10^6 K! Nearly all the hydrogen is ionized at this temperature.

Since collisions among atoms and electrons are so powerful, emitted photons are also very energetic. At the coronal temperature, most photons are x-rays (Chapter IV). Therefore, an image of the corona can be obtained using an x-ray camera . Since x-rays do not penetrate the Earth's atmosphere, the x-ray camera must be in space. Figure VII.9 was obtained from the first space station of the USA, Skylab. White in the picture implies many x-rays.

Figure VII.9

The Sun observed in x-rays from Skylab, September 5, 1973. The most intense sources of x-rays appear white. The seven sources are in the corona, each over a group of sunspots which are not visible in x-rays. The x-ray sources are connected by x-ray emitting gaseous loops. (NASA)

The first x-ray pictures of the corona, like Figure VII.9, surprised all the experts. They expected a smooth picture. Instead, they saw that x-rays follow a pattern of loops, especially in parts of the corona situated over sunspots. [Question A5.] Apparently the hot coronal gas is not distributed uniformly but is arranged in loops. We must ask the same question as for the prominences: Why do these gases not fall down to the surface? The answer is the same as for prominences : the loops imply electrical currents and magnetic fields, and $\underline{I} \times \underline{B}$ forces support the gases against gravity. Even the $\underline{I} \times \underline{B}$ forces that reach far out from the Sun are still related to sunspots and their neighborhoods. For instance, the longest structure in the eclipse photo Figure VII.8 can be connected to a group of sunspots on the solar disk (but these are not visible in the eclipse photograph because the disk is covered by the Moon). Therefore, the influence of the small fraction of the electrical currents leaving the sunspots reaches at least a million km into space.

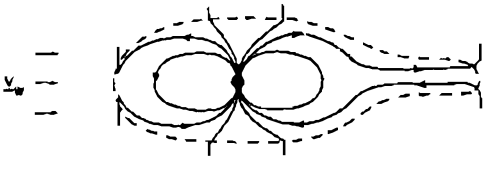
Hình VII.10 : (Xem cuối chương)

Một hình ảnh tia X của vành nhật hoa được chụp vào năm 1998, trên một khu vực khoảng 1/10 đĩa Mặt Trời, cho thấy các vòng hẹp đến mức camera tia X còn có thể thu được. Giá như một trong số các nguồn ở hình VII.9 đã được quan sát với một thiết bị mới hơn thì nó sẽ trông giống như nhiều vòng phát ra từ khu vực của các vết đen mặt trời ở phía trên bên trái. (Ảnh: NASA).

Các chuyên gia đồng ý rằng vành nhật hoa nóng vì dòng điện trong vành nhật hoa được biến đổi thành nhiệt. Nhưng các chuyên gia không đồng ý với nhau về cách thức diễn ra quá trình này. Cần phải thực hiện nhiều quan sát chi tiết hơn nữa. Hình VII.10 giới thiệu một bức ảnh tia X mới được chụp, ở bước sóng thích hợp đối với các ion sắt đã mất 8 electron. Nó cho thấy rất nhiều vòng mỏng trong khí của vành nhật hoa, nhiều vòng thoát ra từ một khu vực ở phía trên bên trái nơi có nhiều vết đen mặt trời lớn (không được nhìn thấy ở bước sóng này). Mặt Trời đang ngăn cản bước tiến của các nhà khoa học: mỗi khi một camera được chế tạo để ghi nhận chi tiết bé hơn thì người ta lại thấy rằng vẫn có nhiều chi tiết bé hơn nữa mà camera không thể ghi được.

GIÓ MẶT TRỜI VÀ TỪ QUYỂN CỦA TRÁI ĐẤT

Vành nhật hoa ở hình VII.9 không hiện ra ở phần Mặt Trời nằm phía dưới, bên phải. Tại sao lại không có vành nhật hoa ở đó? Không có các vết đen mặt trời ở bề mặt gần đó? Rõ ràng là các khí nóng trong vành nhật hoa ở đó không được nâng bởi các lực $\underline{I} \times \underline{B}$ và các khí nóng ở đó có đủ áp suất khí để thắng lực hấp dẫn. Các khí dần dần được gia tốc ra ngoài. Khi các khí đạt tới 3 lần bán kính Mặt Trời, chúng có tốc độ giữa 400 km/s và 700 km/s. Các khí đang chuyển động này là gió mặt trời. Vì gió mặt trời thoát ra từ Mặt Trời nên chỉ một phần ít của khí còn lại phía sau để được quan sát như một vành nhật hoa. Trong bức ảnh nhật thực ở hình VII.9, phần trống rỗng của vành nhật hoa ở phía dưới, bên phải là trống rỗng bởi vì các khí ở đó đã thoát dưới dạng gió mặt trời.



Hình VII.11

Gió Mặt Trời đến từ phía trái và thổi xung quanh từ quyển (các đường kẻ vạch) điều khiển từ trường của Trái Đất (các đường liền nét).

Gió mặt trời thổi qua Trái Đất. Tại sao gió mặt trời không va vào Trái Đất ? Trái Đất cũng là một nam châm. Từ trường của nó tạo ra một vành bảo vệ xung quanh Trái Đất, được gọi là từ quyển. (Nó không có dạng cầu, mà bị kéo dài về phía đêm của Trái Đất). Ở phía trước của từ quyển, các dòng điện tạo ra lực $\underline{I} \times \underline{B}$ ngăn chặn gió mặt trời và làm đổi hướng nó ở xung quanh vành đai bảo vệ. Vào năm 1910, sao chổi Halley có đuôi rất dài chuyển động qua Trái Đất. Nhiều người sợ các phân tử khí độc trong đuôi, nhưng ngày nay chúng ta biết rằng đuôi này bị ngăn ở xa chúng ta nhờ vành đai bảo vệ từ trường của Trái Đất.

Gió mặt trời có thể thổi xa đến mức nào? Tàu thăm dò vũ trụ Pioneer 10, được phóng vào năm 1972, để đi tới Mộc Tinh và Thổ Tinh và tàu vũ trụ Voyager 1 (chương VI) hiện nay ở cách Mặt Trời

Figure VII.10

An x-ray image of the corona made in 1998, over an area about one-tenth of the solar disk, shows loops as narrow as the x-ray camera can record. If one of the sources in Figure VII.9 had been observed with the newer instrument, it would look like the many loops that emerge from an area of sunspots in the upper left. (NASA)

The experts agree that the corona is hot because electrical currents in the corona are converted to heat. But the experts do not yet agree how this process works. Much more detailed observations are needed. Figure VII.10 shows a recent x-ray picture, taken at a wavelength appropriate to iron ions that have lost 8 electrons. It shows very many thin loops of coronal gas, many emerging from a region in the upper left where there are some large spots (invisible at this wavelength). The Sun is frustrating to scientists : everytime a camera is built to record finer detail, it turns out that there is still more detail that the camera cannot record.

THE SOLAR WIND AND THE EARTH' S MAGNETOSPHERE.

The corona of Figure VII.9 is absent over part of the Sun on the lower right. Why is no corona there? There are no sunspots on the surface nearby. Apparently, the hot coronal gases there are not held in place by $\underline{I} \times \underline{B}$ forces, and the hot gases there have enough gas pressure so that it overcomes gravity. The gases gradually accelerate outwards. By the time they reach about 3 solar radii from the Sun, they have speeds between 400 km/s and 700 km/s. These moving gases are the solar wind. Because the solar wind escapes from the Sun, only little gas is left behind to be observed as a corona. In the eclipse picture Figure VII.9, the empty part of the corona in the lower right is empty because the gases there have escaped as the solar wind.

Figure VII.11

The solar wind comes from the left and flows around the magneto-sphere (dashed outline) which is controlled by Earth's magnetic field (solid lines).

The solar wind flows past the Earth. Why does it not hit the Earth? The Earth is also a magnet. Its magnetic field creates a cavity around the Earth, called the magnetosphere. (It is not spherical, but elongated on the night side of Earth.) At the front of the magnetosphere, electrical currents create $\underline{I} \times \underline{B}$ forces which stop the wind and deflect it around the cavity. In the year 1910, Halley's comet had a very long tail which moved past the Earth. Many people were afraid of the poisonous molecules in the tail, but we now know that this tail was kept away from us by the Earth's magnetic cavity.

How far does the solar wind blow? The space craft Pioneer 10, launched in 1972 to travel to Jupiter and Saturn, and the space craft Voyager 1 (Chapter VI) are now as far as 70 A.U. from the Sun.

70 đơn vị thiên văn, ở hướng ngược với Mặt Trời. Cả hai tàu vũ trụ vẫn đang cho chúng ta biết rằng gió mặt trời đang thổi qua chúng, và thổi xa hơn vào vũ trụ. Ở một nơi nào đó, không xa hơn nhiều nơi hai tàu vũ trụ này đang ở, các khí của gió mặt trời trộn lẫn với khí giữa các ngôi sao (câu hỏi A6).

CHU KÌ VẾT ĐEN MẶT TRỜI

Cuộc sống của con người phụ thuộc vào năng lượng mặt trời. Năng lượng mặt trời cho phép thực vật phát triển, và sau đó con người và động vật thu được năng lượng từ thực vật. Năng lượng mặt trời làm bốc hơi nước từ các đại dương, và sau đó độ ẩm và mưa điều khiển khí hậu Trái Đất. Sự cung cấp của năng lượng mặt trời có thể dự đoán được đến nỗi chúng ta giả sử rằng Mặt Trời bức xạ một lượng năng lượng như nhau trong mọi thời điểm. Trong thực tế, chúng ta gọi năng lượng mặt trời tới một đơn vị diện tích, sau một đơn vị thời gian, ở khoảng cách 1 đơn vị thiên văn là hằng số mặt trời (chương V, câu hỏi 8).

Tuy nhiên, trong vòng 20 năm qua, chúng ta đã biết rằng Mặt Trời không hoàn toàn ổn định và sự thay đổi của Mặt Trời có thể có ảnh hưởng quan trọng đối với nền văn minh kĩ thuật của chúng ta ở trên Trái Đất. Dường như tất cả những sự thay đổi này là có chu kì, với chu kì khoảng 11 năm hoặc khoảng 22 năm. Như sẽ được chỉ ra ở phần dưới, các vết đen mặt trời cũng hoạt động có chu kì, với chu kì khoảng 11 năm hoặc khoảng 22 năm. Bởi vậy chúng ta hy vọng rằng sự thay đổi trên Trái Đất có liên quan mật thiết với các vết đen Mặt Trời và môi trường xung quanh chúng.

Chu kì 11 năm của Mặt Trời chủ yếu liên quan với số vết đen được quan sát thấy ở trên Mặt Trời ở một thời điểm bất kì. Như được chỉ ra trên giản đồ, cứ vào khoảng 11 năm lại có hàng chục vết đen mặt trời. Những khoảng thời gian này được xem là một cực đại của vết đen mặt trời. Khoảng 6 năm sau đó, có rất ít vết đen mặt trời hoặc không có vết đen nào. Những khoảng thời gian này được xem là một cực tiểu của vết đen mặt trời.

Hình VII.12:

Đo số vết đen mặt trời được quan sát thấy trên Mặt Trời trong suốt các năm từ 1610 đến 1992.

Chu kì 11 năm của Mặt Trời cũng liên quan đến vị trí của các vết đen trên Mặt Trời. Những vết đen đầu tiên của một chu kì mới, ngay sau một cực tiểu Mặt Trời, diễn ra ở các vĩ độ Mặt Trời khoảng 35° Bắc và Nam. Khi những vết đen này biến mất, những vết đen mới hình thành ở gần đường xích đạo. Và quá trình cứ thế tiếp diễn. Tại cực đại của vết đen mặt trời, hầu hết các vết đen mặt trời nằm ở vĩ độ khoảng 15° Bắc và Nam. Vào cuối chu kì chúng hiện ra ở gần xích đạo.

Hình VII.13 : (Xem cuối chương)

Sự phân cực của vết đen mặt trời : Với mỗi chu kì 11 năm, sự phân cực của các cặp vết đen mặt trời được tổ chức như ở bên trái, với chu kì tiếp theo, như ở bên phải. Hình ảnh từ trường lặp lại với một chu kì 22 năm. Ở mỗi thời điểm, độ phân cực ở bán cầu Bắc ngược với độ phân cực ở bán cầu Nam.

in opposite directions from the Sun. Both still inform us that the solar wind is blowing past them, further out into space. Somewhere, not much further than these two space craft, the gases of the solar wind mix with the gases between the stars. [Question A6.]

THE SUNSPOT CYCLE.

Humans depend on solar energy. Solar energy allows plants to grow, and then humans and animals obtain energy from the plants. Solar energy evaporates water from the ocean, and then the humidity and rains control our climate. The supply of solar energy is so predictable that we assume the Sun radiates the same amount of energy all the time. In fact, we call the solar energy per unit area and time arriving at 1 A. U. the Solar Constant. [Chapter V, question (8).]

However, in the last twenty years we have learned that the Sun is not really constant, and the changes can have important effects for our technical civilization on Earth. Nearly all these changes are cyclical, with periods of about 11 or about 22 years. As outlined below, the sunspots also behave cyclically, with periods of about 11 and about 22 years. Therefore, we expect that the changes on Earth are ultimately related to sunspots and their surroundings.

The 11-year solar cycle refers mainly to the number of spots seen on the Sun at any one time. As shown in the diagram, about every 11 years there are dozens of spots. These times are referred to as a sunspot maximum. About 6 years later there are few spots or none. These times are referred to as a sunspot minimum.

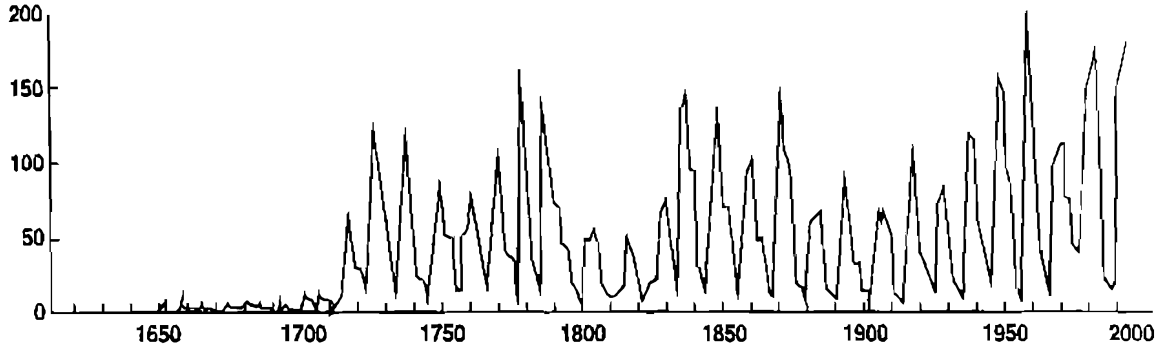


Figure VII.12

The measure of the number of sunspots visible on the Sun during the years 1610 to 1992.

The 11-year solar cycle also refers to the positions of the spots on the Sun. The first sunspots of a new cycle, soon after spot minimum, occur at solar latitudes about 35 degrees north and south. When these spots disappear, new ones form slightly closer to the equator, and so on. At sunspot maximum, most of the spots are at latitudes about 15 degrees north and south. At the end of the cycle they appear close to the equator.

Figure VII.13

Spot polarities: For one 11-year cycle, polarities of sunspot pairs are organized as on the left, for the next cycle as on the right. The magnetic pattern repeats with a cycle of 22 years. At any time, the polarities in the northern hemisphere are opposite to those in the south.

Chu kì 22 năm liên quan tới hướng của từ trường của vết đen. Khi hiệu ứng Zeeman tách một vạch phổ, sự phân cực tròn của hai vạch cho chúng ta biết liệu từ trường được định hướng về phía chúng ta hay đi xa chúng ta. Hầu hết các vết đen xuất hiện thành cặp, định hướng Đông Tây, với từ trường trong một vết đen định hướng về phía chúng ta, từ trường trong vết đen khác định hướng đi xa chúng ta. Sự định hướng của từ trường được chỉ thị bởi N và S ở hình VII.13. Trong suốt một chu kì 11 năm, sự phân cực từ trường của các cặp vết đen ở phía Bắc của đường xích đạo là theo một hướng, ở phía Nam của đường xích đạo là theo hướng khác, như được chỉ ra ở hình VII.13. Trong suốt một chu kì 11 năm tiếp theo, sự định hướng của cặp vết đen là ngược lại. Sau một chu kì 22 năm, sự phân cực lặp lại. Chưa có một lời giải thích thoả đáng cho chu kì Mặt Trời. Nhưng có nhiều ảnh hưởng của sự hoạt động có chu kì của Mặt Trời đối với Trái Đất.

HOẠT ĐỘNG CỦA MẶT TRỜI VÀ MỐI QUAN HỆ MẶT TRỜI - TRÁI ĐẤT

1) Sự mất các vệ tinh quay quanh Trái Đất. Vành nhật hoa của Mặt Trời phát xạ chủ yếu tia X. Một số tia X này chạm vào khí quyển Trái Đất. Khi tia X bị dừng lại bởi các nguyên tử và phân tử trong khí quyển trái đất, khí quyển Trái Đất bị nung nóng. Khi khí quyển trái đất bị nung nóng, nó nở ra. Nó chỉ có thể nở về phía trên. Vào những năm có nhiều vết đen mặt trời, vành nhật hoa phát xạ nhiều tia X và khí quyển của trái đất nở tới độ cao lớn hơn. Khi khí quyển của trái đất nở tới độ cao nơi có quỹ đạo của các vệ tinh, khí quyển trái đất tác dụng lực ma sát lên các vệ tinh. Ma sát này làm các vệ tinh mất độ cao, chuyển động vào khí quyển đậm đặc hơn, ở đó ma sát lớn hơn, quá trình cứ thế tiếp diễn cho đến khi vệ tinh bốc cháy và bay hơi trong khí quyển trái đất.

Skylab là trạm vũ trụ đầu tiên của Mĩ. Nó được phóng vào năm 1973. Ba nhóm các nhà du hành vũ trụ đã sống trên Skylab, mỗi nhóm sống ở đó tối đa 3 tháng. Skylab đã quay quanh Trái Đất khoảng 35 ngàn lần. Nhưng vào năm 1978 và 1979 đã có nhiều vết đen Mặt Trời (xem hình VII.12). Bởi vậy, khí quyển trái đất rất cao vào năm ấy. Ma sát không khí vào Skylab rất lớn. Năm 1979, Skylab đi vào khí quyển trái đất và bị phá huỷ. Một số mảnh lớn rơi xuống nước Úc nhưng không gây nên thiệt hại gì. Trạm vũ trụ lớn mang tên Hoà bình của Nga đã trở lại khí quyển Trái Đất và bị phá huỷ trong năm 2001.

Hình VII.14 : (Xem cuối chương)

Chớp lửa mặt trời (sáng) được quan sát ở ánh sáng hiđrô đỏ, bước sóng 656,3 nm, ngày 7/8/1972 từ Big Bear Observatory, California. Chớp lửa này bùng sáng trong hơn một giờ và lan rộng tới hơn 1,4. 10^5 km. Nó gây ra những hiệu ứng khác thường rất mạnh ở trên Trái Đất như sự chập mạch điện. Hai sợi chớp lửa bao quanh một vết đen lớn (Ảnh: Big Bear Solar Observatory, California).

2) Chớp lửa mặt trời. Thỉnh thoảng, bề mặt Mặt Trời bùng sáng trong vài phút, có khi trong một giờ. Chớp lửa quan sát được ở ánh sáng khả kiến được chỉ ra ở hình VII.14 bao phủ một vùng rộng khác thường của Mặt Trời. Nếu tia X của Mặt Trời được đo ở thời điểm của một chớp lửa, chúng ta thấy rằng các khí trong chớp lửa được nung nóng tới khoảng 2.10^7K, nghĩa là 10 lần nhiệt độ bình thường của nhật hoa. Một chớp lửa thực sự là một vụ nổ khổng lồ trong vành nhật hoa. Nguyên nhân của nó là gì? Một bằng chứng: Chớp lửa diễn ra trên một nhóm các vết đen mặt trời với một hình ảnh phức tạp như là một nhóm lớn các vết đen ở hình VII.2.

The 22-year cycle refers to the direction of the magnetic fields of the spots. When the Zeeman effect splits a spectrum line, the circular polarizations of the two lines tell us whether the magnetic field is oriented toward us or away from us. Most spots occur in pairs, aligned east-west, with the magnetic field in one spot oriented toward us, in the other spot away from us. The field orientations are indicated by N and S in fig. VII.13. During one 11-year cycle, the magnetic polarity of spot pairs north of the equator is one way, south of the equator the other way, as shown in the fig.VII.13. During the next 11-year cycle, the orientation of the spot pairs is reversed. After a cycle of 22 years, the polarities repeat. There is not yet any plausible explanation for the solar cycle. But its effects on the Earth are many .

SOLAR ACTIVITY AND SOLAR TERRESTRIAL RELATIONS.

1) The loss of Earth-orbiting satellites. The solar corona emits mainly x-rays. Some of these x-rays hit the atmosphere of the Earth. When the x-rays are stopped by atoms and molecules in Earth's atmosphere, the atmosphere is heated. When the atmosphere is heated, it expands. It can only expand upward. In the years when there are many sunspots, the corona emits many x-rays, and the Earth's atmosphere expands to greater height. When the atmosphere extends to the height where satellites orbit, then the atmosphere exerts friction on the satellites. The friction causes the satellites to lose altitude, to move into denser atmosphere, where the friction is greater, and so on, until the satellites burn and evaporate in the Earth's atmosphere.

Skylab was the first space station of the USA. It was launched in 1973. Three teams of astronauts lived in Skylab for up to three months each. Skylab orbited the Earth some 35 thousand times. But there were many sunspots in 1978 and 1979 (see fig. VII.12). Therefore, the Earth's atmosphere was very high in that year. Air friction on Skylab was high. In 1979, Skylab entered the atmosphere and was destroyed. Some large pieces fell on Australia, but there was no damage. The large Russian space station Mir re-entered the atmosphere and was destroyed in year 2001.

Figure VII.14

Solar flare (bright) observed in the red light of hydrogen, wavelength 656.3 nm, on August 7, 1972 from Big Bear Observatory, California. This flare was bright for more than an hour and extended over about $1.4x10^5$ km. It caused unusually strong terrestrial effects such as electrical power failures. The two flare filaments surround a large spot. (Big Bear Solar Observatory)

2) Solar flares. Occasionally, the Sun's surface brightens for several minutes, sometimes as long as an hour. The flare observed in visible light shown in Figure VII.14 covers an unusually large area of the Sun. If solar x-rays are measured at times of a flare, we find that the gases in the corona are heated to roughly $2x10^7$ K, ten times the normal coronal temperature. A flare is really a giant explosion in the corona. What causes it? One clue : flares occur over groups of sunspots with a complicated pattern, such as the large group of spots in Figure VII.2.

Hình ảnh phức tạp nói lên rằng dòng điện lớn một cách khác thường thoát từ các vết đen vào vành nhật hoa. Rõ ràng, sự chập mạch diễn ra trong các dòng điện chạy trong vòng nhật hoa ở phía trên các vết đen mặt trời. Chớp lửa nhất thiết là một tia lửa khổng lồ. Không ai có thể giải thích được nguyên nhân của chớp lửa một cách chi tiết.

Sự bùng nổ của vành nhật hoa làm tăng tốc electron và proton tới gần tốc độ của ánh sáng. Một số electron chuyển động nhanh chuyển động xuống phía dưới về phía bề mặt của Mặt Trời. Ở đó, chúng nung nóng khí xung quanh. Khí này chiếu sáng hơn, như được nhìn thấy trong bức ảnh ở hình VII.14. Các electron và proton chuyển động nhanh khác chuyển động về phía trên, vào vũ trụ. Khi chúng chạm tới Trái Đất, chúng làm gián đoạn liên lạc vô tuyến. Khi, trong tương lai, chúng chạm vào người các nhà du hành vũ trụ đang bay tới Hoả Tinh, chúng sẽ làm ảnh hưởng tới sức khoẻ của các nhà du hành vũ trụ.

Hình VII.15 : (Xem cuối chương)

Khí thoát ra từ vành nhật hoa của Mặt Trời với tốc độ cao, được chụp từ tàu vũ trụ SOHO nằm cố định trên đường nối Trái Đất và Mặt Trời. Vành tròn màu trắng có kích cỡ của đĩa mặt trời, khu vực xung quanh bị phơi sáng quá mức và không trông thấy. Khi đã chuyển động vào vũ trụ tới khoảng cách khoảng 5. 10^6km, nghĩa là 7 lần đường kính Mặt Trời và 0,03 đơn vị thiên văn (Ảnh: NASA/ESA).

3) Khí trong vòng nhật hoa phóng ra và sự nguy hiểm đối với cơ sở hạ tầng kĩ thuật. Thỉnh thoảng, một số vành khí nóng trong vành nhật hoa đột ngột dâng lên phía trên Mặt Trời và dịch chuyển ra xa vào Vũ trụ (hình VII.15). Rõ ràng là chúng bật ra vì chúng đã trở nên quá lớn, đạt tới độ cao quá cao ở phía trên Mặt Trời đến mức lực hấp dẫn của Mặt Trời bé hơn đáng kể so với lực hấp dẫn ở bề mặt Mặt Trời. Khí này đạt tới tốc độ từ 500 đến 1000 km/s, nhanh hơn tốc độ thoát từ Mặt Trời ở những độ cao này (câu hỏi A2). Lực nào làm chúng chuyển động tới độ cao như vậy? Trong một số trường hợp, những sự quan sát có thể được giải thích để suy ra lực $\underline{I}x\underline{B}$ tác động lên khí. Gia tốc được tiên đoán của các vành khí phù hợp với gia tốc quan sát được trong phạm vi 10^2, được xem là tuyệt vời. Thêm một lần nữa chúng ta phát hiện trong lực $\underline{I}x\underline{B}$ hiệu ứng của dòng điện liên quan tới các vết đen mặt trời (chỉ tạm thời).

Các khí từ Mặt Trời chuyển động nhanh tới khoảng cách của Trái Đất sau khoảng 2 ngày. Điều gì xảy ra nếu Trái Đất nằm trên đường đi của những khí này? Khí va vào từ quyển của Trái Đất. Từ quyển ngăn cản sự va chạm bằng cách tạo ra các dòng điện mới và các lực $\underline{I}x\underline{B}$. Một phần của các dòng điện tới sâu vào trong từ quyển, thậm chí tới bề mặt Trái Đất và gây ra nhiều thiệt hại. Ví dụ, khi các khí mặt trời chuyển động nhanh tới Trái Đất, vào tháng giêng năm 1997, chúng gây ra một sự chập mạch trong một vệ tinh liên lạc mới, trị giá 400 triệu đôla và làm cho vệ tinh này trở nên vô dụng.

Một chuỗi dài các sự kiện liên quan các vết đen mặt trời với sự nung nóng vành nhật hoa, với sự thoát đột ngột của khí mặt trời, với sự tới ở từ quyển trái đất và với những hậu quả bất thường. Thông thường, các nhà khoa học không nỗ lực giải quyết những vấn đề phức tạp như thế này. Nhưng trong trường hợp thực tế này, rõ ràng là rất cần thiết phải hiểu tất cả các hiện tượng diễn ra từ bề mặt Mặt Trời cho tới bề mặt Trái Đất.

The complicated pattern implies that unusually much electrical current escapes from the spots into the corona. Apparently, a short-circuit happens in the electrical currents running within the corona over such sunspots. A flare is essentially a powerful spark. No one can explain the cause of a flare in any detail.

The coronal explosions accelerate electrons and protons to speeds near the speed of light. Some of the fast electrons move downwards, toward the surface of the Sun. There, they heat the local gases, which shine more brightly, as seen in the photo Figure VII.14. Other fast electrons and protons travel upward, into space. When they reach Earth, they cause problems with radio communications. When, in the future, they reach astronauts traveling to Mars, they will endanger the health of the astronauts.

Figure VII.15

Gases ejected from the solar corona at high speed, photographed from the space craft SOHO which is located permanently on a line between the Earth and the Sun. The white circle is the size of the Sun's disk, the surrounding area is overexposed and not shown. The gases have moved into space by about $5x10^6$ km, that is, seven solar radii and 0.03 A U. (NASA/ESA)

3) Ejected coronal gases and damage to our technological infrastructure. Occasionally, some loops of hot gas in the corona suddenly rise above the Sun and speed away into space (Figure VII.15). Apparently, they lift off because they have become too large, reaching so high above the Sun that solar gravity is significantly weaker than at the solar surface. The gases attain speeds of 500 to 1000 km/sec, faster than the escape speed from the Sun at these heights. [Question A2.] What forces drive them to such high speeds? In some cases, observations can be interpreted to yield the $\underline{I} \times \underline{B}$ force acting on the gas. The predicted acceleration of the loop fits the observed acceleration within a factor two, which is considered excellent. Once more, we detect in the $\underline{I} \times \underline{B}$ force the effect of electrical currents that are (now only distantly) related to sunspots.

The fast solar gases reach Earth's distance in about two days. What happens if the Earth is in the way of these gases? The gases hit the Earth's magnetosphere. The magnetosphere resists the impact by creating new electrical currents and $\underline{I} \times \underline{B}$ forces. Some of the currents reach deep into the magnetosphere, even to the surface of the Earth, and cause much damage. For instance, when fast solar gases arrived in January 1997, they caused a short circuit in a new 400-million-dollar communications satellite and made the satellite useless.

A long chain of events connects sunspots to coronal heating to the sudden escape of solar gases to their arrival at the Earth's magnetosphere, and to the subsequent effects. Usually, scientists do not attempt such complicated problems. But in this practical case, it is considered absolutely necessary to understand all the phenomena occuring from the surface of the Sun down to the ground on Earth

*4) **Hằng số mặt trời thay đổi.*** Vì các vết đen mặt trời là khá tối nên chúng ta dự đoán rằng trong suốt một cực tiểu của vết đen Mặt Trời có ít ánh sáng mặt trời và ít năng lượng tới Trái Đất. Có lẽ điều này sẽ ảnh hưởng tới khí hậu Trái Đất chăng? (Khí hậu là thời tiết được tính trung bình trong 1 năm hoặc trong vài năm). Việc đo một cách chính xác thông lượng của năng lượng mặt trời tới Trái Đất phải được tiến hành từ một vệ tinh và là rất khó khăn, xét về mặt kĩ thuật. Từ khoảng năm 1980, các vệ tinh đã đo được thông lượng của năng lượng mặt trời với một độ chính xác tốt hơn 0,1%. Kết quả: Thực ra thông lượng của năng lượng mặt trời ở khoảng cách 1 đơn vị thiên văn thay đổi. Hằng số mặt trời không phải là một hằng số. Điều ngạc nhiên: Sự thay đổi ngược với sự tiên đoán!

Ở những thời điểm của cực đại của vết đen mặt trời, Mặt Trời phát ra năng lượng nhiều hơn khoảng 0,1% so với năng lượng được phát ra ở thời điểm của cực tiểu của vết đen mặt trời. Tại sao? Để giải thích, trước hết, chúng ta phải xem xét những vết đen mặt trời bình thường. Chúng ta mô hình hoá các vết đen mặt trời như là solenoid với đường kính 10^4 km hoặc lớn hơn. Các lực $\underline{I}x\underline{B}$ tác động lên biên giới của vết đen làm áp suất khí và mật độ khí bé hơn và ở bên trong vết đen, khí trở nên trong suốt hơn so với ở cùng độ cao ở quang quyển bình thường. Bởi vậy, khi chúng ta nhìn vào một vết đen, chúng ta nhìn xa hơn vào Mặt Trời so với khi chúng ta nhìn vào quang quyển bình thường. Bề mặt tương đối đen mà chúng ta chụp được thực sự nằm ở dưới quang quyển bình thường vài trăm km. Khi có hàng chục vết đen mặt trời thì ở lân cận các vết đen cũng có nhiều vết đen nhỏ. Những vết đen nhỏ này cũng có thể được mô hình hoá như những solenoid với từ trường và dòng điện tương tự và tương tự với một bề mặt thấp hơn so với quang quyển bình thường. Tuy nhiên chúng có đường kính rất bé, chỉ cỡ 10^2 km. Chúng bé đến nỗi rất khó được phát hiện ở trên Mặt Trời. Chúng cũng bé đến nỗi khi chúng ta nhìn từ một góc bất kì, chúng ta thường không nhìn trực tiếp vào các vết đen nhỏ, và chúng ta không nhìn vào bề mặt tối như chúng ta đã từng làm đối với các vết đen thông thường. Thay vào đó, chúng ta chủ yếu nhìn vào thành của những vết đen nhỏ. Xem hình VII.16. Thành của vết đen nhỏ bị nung nóng bởi khí xung quanh. Khí xung quanh, nằm phía dưới quang quyển bình thường, nóng hơn quang quyển bình thường. Bởi vậy, thành của các vết đen nhỏ nóng hơn quang quyển bình thường và chúng ta thu được nhiều bức xạ hơn so với những nơi không có các vết đen nhỏ. Năng lượng tăng lên do nhiều vết đen nhỏ thì lớn hơn năng lượng giảm xuống do các vết đen bình thường.

Hình VII.16:

SỰ THAY ĐỔI TRÊN MẶT TRỜI VÀ TRÊN TRÁI ĐẤT SAU NHIỀU THẬP KỈ

Sự thay đổi trong thông lượng của năng lượng mặt trời trong suốt một chu kì 11 năm hiển nhiên không gây ra một sự thay đổi đáng kể trong khí hậu của Trái Đất với chu kì 11 năm. Tuy nhiên, số vết đen mặt trời cũng thay đổi một cách không bình thường qua hàng thập kỉ và thế kỉ. Đặc biệt, những ghi chép lịch sử cho thấy dường như không có vết đen mặt trời trong các năm từ 1645 đến 1715 sau Công nguyên (xem hình VII.12). Nếu sự quan sát của thông lượng của năng lượng mặt trời trong suốt 20 năm qua có thể được suy rộng trở ngược tới 3 thế kỉ thì chúng ta dự báo rằng Trái Đất đã nhận ít năng lượng Mặt Trời hơn trong suốt những năm dường như không có vết đen mặt trời. Liệu khi ấy khí hậu Trái Đất có lạnh hơn không? Chúng ta cần phải nhìn vào những đất nước có giữ những tài liệu lịch sử chi tiết về những năm này. Quả thực, ở châu Âu và Bắc Mĩ, các mùa hè đã lạnh đến nỗi mùa màng không kịp chín trước khi mùa đông bắt đầu và đã có nhiều nạn đói trong những năm này.

4) The unconstant Solar Constant. Since sunspots are relatively dark, one expects less sunlight, less energy flux to reach Earth during sunspot minimum. Perhaps this influences the Earth's climate? (Climate is the weather averaged over a year or over several years.) Accurate measurement of the solar energy flux reaching Earth must be carried out from a satellite and is very difficult technically. Since about 1980, satellites have measured the solar energy flux with an accuracy better than 0.1% . The result : Indeed the solar energy flux at 1 A. U. does change. The Solar Constant is not constant. Surprise : The change is opposite to the prediction!

At times of sunspot maximum, the Sun emits roughly 0.1% more energy than at times of sunspot minimum. Why? To explain, we first again consider normal sunspots. We modeled the sunspots as solenoids with diameter of 10^4 km or more. The $\underline{I} \times \underline{B}$ forces acting on the boundary of the spots make the gas pressure and the gas density smaller and the gas more transparent inside the spot than at the same height in the normal photosphere. Therefore, we look further into the Sun when we look at a spot than when we look at the normal photosphere. The relatively dark surface that we photograph actually lies below the normal photosphere by several hundred km. When there are dozens of sunspots, there are also, in the spots' neighborhoods, many mini-spots. These can also be modeled as solenoids, with similar magnetic fields and electrical currents, and with a similarly lower surface than the normal photosphere. However, they have very small diameters, many only 10^2 km. They are so small that they are very difficult to detect on the Sun. They are also so small that, when we look from some arbitrary angle, we do not usually look directly into the mini-spots, and we do not see the dark surface as we do for normal spots. Instead, we see mainly the walls of the mini-spots. See figu.VII.16. The walls are heated by the surrounding gases. The surrounding gases, being below the normal photosphere, are hotter than the normal photosphere. Therefore, the walls of the mini-spots are hotter than the normal photosphere, and we receive more radiation than without the mini-spot. The energy increase from the many mini-spots is larger than the energy decrease from the normal sunspots.

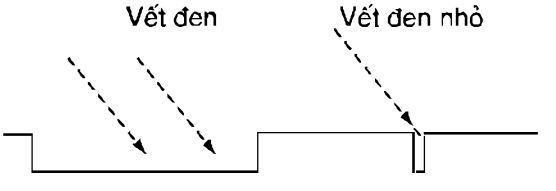


Figure VII.16

CHANGES ON THE SUN AND ON EARTH OVER MANY DECADES.

The change in the solar energy flux during the 11-year cycle apparently does not cause a measurable change in our climate with an 11-year cycle. However, the number of sunspots also changes in an irregular manner over the decades and centuries. In particular, during the years from 1645 to 1715 A.D., historical records show almost no sunspots (see fig. VII.12). If the observation of solar energy flux during the last twenty years can be extended back by three centuries, then we predict that Earth received less solar energy during those years with almost no spots. Was the Earth's climate cooler then? We must look to countries which kept detailed historical records in those years. Indeed, in Europe and North America, summers were so cool that the crops did not ripen before winter started and there was much hunger during those years.

Liệu có phải thời kì có thời tiết lạnh đã thực sự được gây bởi sự giảm của thông lượng của năng lượng mặt trời hay không? Chúng ta không thể trả lời câu hỏi này một cách trực tiếp vì chúng ta đã không đo thông lượng của năng lượng mặt trời 3 thế kỉ trước. Dẫu sao, ngoài Mặt Trời còn có nhiều ngôi sao có cùng chu kì vết đen tương tự. Từ những ngôi sao này, chúng ta ước tính rằng 3 thế kỉ trước Mặt Trời phát xạ năng lượng khoảng 0,25% ít hơn so với năng lượng trung bình mà Mặt Trời phát ra trong 20 năm qua. Điều này có thể khẳng định cho sự giá lạnh trong quá khứ, nhưng có một vài sự bất định trong phép tính này. Bởi vậy, sự lạnh giá ở khắp toàn cầu trong suốt những năm ấy có thể đã liên quan tới thông lượng năng lượng mặt trời thấp hơn liên quan với sự thiếu vắng các vết đen trong những năm đó, nhưng điều này chỉ là có thể.

Ngoài ra cũng có một thời kì có khí hậu khác thường khác trong nhiều thế kỉ trước đây, liên quan tới (bởi những phép đo gián tiếp) các cực đại và cực tiểu của các vết đen mặt trời. Quả thực, những chu kì có nhiều vết đen mặt trời có liên quan tới những thời kì khí hậu nóng ở trên Trái Đất. Điều này ủng hộ cho những ý kiến cho rằng khí hậu của Trái Đất liên quan tới sự biến đổi trong thời gian dài của số các vết đen mặt trời. Hầu hết các chuyên gia cho rằng mối liên hệ này là rất có thể.

Điều được quan tâm đặc biệt là trong vòng 40 năm qua có rất nhiều vết đen mặt trời. Khí hậu của Trái Đất đã trở lên nóng hơn trong vòng 30 năm qua. 10 năm gần đây, khí hậu trở nên rất nóng. Chúng ta nói tới sự nóng lên toàn cầu. Liệu có phải sự nóng lên toàn cầu này là do các vết đen Mặt Trời hay không? Hầu hết (nhưng không phải tất cả) các chuyên gia trả lời: Không! Sự nóng lên toàn cầu mạnh hơn so với sự nóng lên tính toán được theo số vết đen mặt trời. Rất có thể sự nóng lên toàn cầu là do hiệu ứng nhà kính mạnh được gây ra bởi nền văn minh kĩ thuật của con người (chương V).

Was this time of cool weather really caused by a decreased flux of solar energy? We cannot answer this question directly because we did not measure the solar energy flux three centuries ago. However, there are stars other than the Sun that have similar spot cycles. From these stars, we estimate that the Sun emitted about 0.25 % less energy three centuries ago than the average over the last twenty years. This can account for the historical cooling, but several uncertainties appear in this computation. Therefore, the global cooling during those years probably was related to the lower solar energy flux associated with the lack of sunspots in those years, but only probably.

There have been other extremes in climate, during various earlier centuries, which are (by indirect measurements) associated with maxima or minima of sunspots. Indeed, periods of many spots are related to times of hot climate on Earth. This supports the arguments that Earth's climate is related to long-term variation in sunspot numbers. Most experts think it makes the relation very probable.

Of special interest are the last 40 years, when there have been many spots. The Earth's climate has become warmer during the last 30 years. The most recent 10 years have been especially warm. We speak of global warming. Is global warming perhaps due to the sunspots? Most (but not all) experts answer : No. The global warming is stronger than can be accounted for by the number of sunspots. Very probably the global warming is due to the enhanced greenhouse effect caused by human technical civilization (Chapter V).

CÂU HỎI

A1) Góc chắn bởi một lớp khí dày 300 km được nhìn từ khoảng cách 1 đ.v.t.v là bao nhiêu? So sánh với góc chắn bởi những cấu trúc nhỏ nhất có thể nhận ra qua các kính thiên văn 0,5 m và lớn hơn, vào khoảng một giây cung, và với góc chắn bởi những cấu trúc nhỏ nhất có thể nhận ra bởi mắt người, khoảng một phút cung.

A2) Hãy ước tính gia tốc hấp dẫn ở bề mặt Mặt Trời và tốc độ thoát từ bề mặt Mặt Trời bằng cách sử dụng các dữ liệu đã cho. Tốc độ thoát ở độ cao bằng một lần bán kính Mặt Trời ở phía trên bề mặt Mặt Trời là bao nhiêu?

A3) Chúng ta coi quang cầu của Mặt Trời tạo bởi hiđrô trung hoà ở nhiệt độ đồng nhất T. Các khí chịu tác dụng của một lực hấp dẫn đồng nhất g. Mỗi lớp khí được nâng lên, thắng lực hấp dẫn, bởi một áp suất ở đáy của lớp hơi lớn hơn ở đỉnh. Xét về mặt toán học, $dp/dz = - g\rho$. Đối với khí lí tưởng, $p = nkT$, trong đó n là mật độ số hạt của các nguyên tử hiđrô. Với nguyên tử hiđrô, $\rho = nm_p$ với m_p là khối lượng của proton. Hãy giải phương trình vi phân đó và chỉ ra rằng áp suất p tỉ lệ thuận với $\exp(-z/H)$ và tìm thang độ cao H theo các hằng số của bài toán. Hãy ước lượng H ở bề mặt Mặt Trời.

A4) Hãy kiểm tra lại rằng định luật Stefan-Boltzmann thực sự cho nhiệt độ bề mặt này. Thông lượng của năng lượng mặt trời ở khoảng cách 1 đ.v.t.v đã được cho ở chương V.

A5) Không có vết đen mặt trời nào được quan sát thấy trong các bức ảnh tia X như ở Hình VII.9. Tại sao?

A6) a) Biết giá trị của thông lượng năng lượng của mặt trời ở khoảng cách 1 đ.v.t.v từ chương V, câu hỏi 8, và giá trị của 1 đ.v.t.v ở chương III, hãy tính độ trưng của Mặt Trời, L = năng lượng toàn phần tạo ra bởi Mặt Trời trong một giây.

b) Tính phần của L rời Mặt Trời dưới dạng gió Mặt Trời. Lấy tốc độ gió v = 400 km/s, mật độ $n = 10^7$ proton/m^3 (và mật độ electron cũng có cùng trị số) ở khoảng cách 1 đ.v.t.v và giả sử rằng và gió Mặt Trời thổi về mọi hướng là như nhau.

QUESTIONS

Question A1 : What angle is subtended by a layer 300 km thick seen from a distance of 1 A.U.? Compare to the angle subtended by the smallest structures recognizable through 0.5 meter and larger telescopes, which is about one second of arc, and to the angle subtended by the smallest structures recognized by our eye, about one minute of arc.

Question A2: Evaluate the solar surface gravity and the escape speed from the solar surface, using already given data. What is the escape speed one solar radius above the solar surface?

Question A3: We consider the solar photosphere to consist of neutral hydrogen at a uniform temperature T. The gases feel a uniform gravity g. Each layer of gas is supported against gravity by a pressure at the bottom of the layer that is slightly larger than at the top. Mathematically, $dp/dz = -g\rho$. For an ideal gas, $p = nkT$, where n is number density of hydrogen atoms. For atomic hydrogen, $\rho = nm_p$ where m_p is the mass of a proton. Solve the differential equation to show that the pressure, p, is proportional to exp(-z/H), and find the scale height, H, in terms of the constants of the problem. Evaluate H at the solar surface.

Question A4: Check that the Stefan-Boltzmann law indeed gives this surface temperature. The flux of solar energy at 1 A.U. was given in Chapter V.

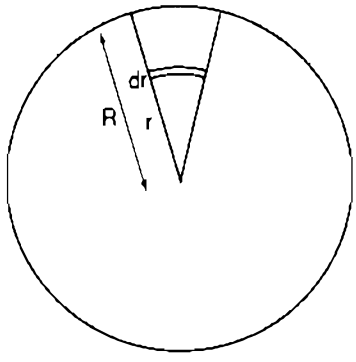
Question A5: No sunspots are visible on an x-ray photograph such as FigureVII.9. Why?

Question A6: a) Given the solar energy flux at 1 A.U. from Chapter V, question 8, and the value of 1 A.U. from Chapter III, compute the solar luminosity L = total energy production of the Sun per second. b) Compute the fraction of L that leaves the Sun in the form of the solar wind. Use a wind speed v = 400 km/s, a density $n = 10^7$ protons/m^3 (and equally many electrons) at 1 A.U. and assume the same wind in all directions away from the Sun.

Chương VII.B

BÊN TRONG MẶT TRỜI

Làm thế nào để ước tính độ sâu bên trong Mặt Trời?



Hình VII.17

Chúng ta không thể quan sát Mặt Trời bằng ánh sáng khả kiến. Nhưng lí thuyết cho chúng ta rất nhiều thông tin. Chúng ta bắt đầu với sự thật rằng phần bên trong của Mặt Trời ổn định trong hàng triệu năm. Mặt Trời phải ở trạng thái cân bằng thuỷ tĩnh. Hãy tưởng tượng Mặt Trời được chia thành các lớp cầu. Khí trong mỗi lớp chịu tác động của lực hấp dẫn kéo nó xuống. Để giữ lớp khí ở độ cao không đổi, áp suất khí ở phía dưới lớp phải cao hơn so với ở phía trên lớp. Độ chênh lệch cần thiết về áp suất p(r) ngang theo một lớp có độ dày dr, ở cách tâm một khoảng cách r là:

$$dp = -g(r)\rho(r)dr \qquad (7.1)$$

Trong đó g(r) là gia tốc hấp dẫn và ρ(r) là mật độ khí. Vế phải là lực hấp dẫn tác động lên chất khí trong một xi lanh nhỏ có tiết diện ngang 1 m^2 và độ dài dr. Vế trái là sự chênh lệch về áp suất (lực trên một đơn vị diện tích) tại đỉnh và tại đáy của xi-lanh.

Gia tốc hấp dẫn g(r) có giá trị như khi tất cả khối lượng M(r) bên trong quả cầu bán kính r được đặt tại tâm quả cầu, $g(r) = -GM(r)/r^2$. (Chúng ta có thể chứng minh được điều này bằng một phép tí h phân đơn giản để tính lực hút hấp dẫn giữa một mẫu khí và tất cả các mẫu còn lại trong ngôi sao, hoặc chúng ta cũng có thể chứng minh điều này một cách khá đẹp đẽ hơn bằng cách sử dụng hệ phương trình vi phân). Khối lượng bên trong một lớp khí hình cầu có độ dày dr là $dM(r) = 4\pi r^2\rho(r)dr$.

Chúng ta có thể biểu diễn dp từ phương trình VII.1 dưới dạng:

$$dp = \frac{GM(r)}{4\pi r^2}dM(r) \qquad (7.2)$$

Phương trình này tiện ích hơn phương trình 7.1 vì nó được diễn tả chỉ theo một hàm số chưa biết M(r), và chúng ta biết giá trị của nó tại bề mặt, M(r=R) = M, khối lượng đã biết của Mặt Trời. Để tính tích phân một cách chính xác phương trình 7.2, chúng ta cần sử dụng thêm nhiều kiến thức vật lí. Nhưng chúng ta cũng đã có thể biết được một số thông tin quan trọng về bên trong Mặt Trời.

Chúng ta có thể chứng tỏ một cách khá chặt chẽ rằng áp suất tại tâm của một ngôi sao như Mặt Trời phải rất lớn. Chúng ta biết rằng $dp/dr < 0$ ở khắp nơi để duy trì trạng thái cân bằng thuỷ tĩnh. Bởi vậy, áp suất tại tâm p (tại tâm) phải là áp suất lớn nhất trong ngôi sao, và nó phải lớn hơn bất cứ áp suất nào được tính trung bình cho toàn Mặt Trời. Ở đây chúng ta chọn một giá trị trung bình của p(r) theo toàn bộ khối lượng Mặt Trời

$$\langle p \rangle = \int p(r)\frac{dM(r)}{M} = -\int M(r)\frac{dp(r)}{M} \qquad (7.3)$$

Chapter VIIB

THE SOLAR INTERIOR

How to estimate the deep interior of the Sun.

Figure VII.17

We cannot look into the Sun using visible light. But theory gives a lot of information. We start with the fact that the interior has been steady for millions of years. The Sun must be in hydrostatic equilibrium. Imagine the Sun divided into spherical layers. The gas in each layer experiences gravity pulling it down. To keep the layer at a constant height, the gas pressure must be higher below the layer than above it. The needed difference in pressure, p(r), across a layer of thickness dr at distance r from the center is

$$dp = -g(r)\rho(r)\, dr\,. \qquad (7.1)$$

Here g(r) is the gravitational acceleration and ρ(r) is the density of the gas.The right side is the gravitational force acting on the gas in a small cylinder with 1 m^2 cross section and length dr. The left side is the difference in pressure (force per unit area) at the top and bottom of the cylinder.

The gravity g(r) is the same as if all the mass inside the sphere of radius r , M(r), is placed at the center of the sphere, $g(r) = -GM(r)/r^2$. (One can show this either by a rather tedious integration of the gravitational attraction between one piece of gas and all the other pieces of gas in the star, or one can show it rather elegantly using partial differential equations). The mass inside a spherical layer of thickness dr is $dM(r) = 4\pi r^2 \rho(r)\, dr$.

We now can express dp from equation (7.1) as :

$$dp = \frac{GM(r)}{4\pi r^2} dM(r) \qquad (7.2)$$

This form is more useful than equation (7.1) because it is expressed in terms of just one unknown function, M(r), and we know its value at the surface, M(r=R) = M, the known mass of the Sun. For a precise integration of equation (7.2), more physics is needed. But already one can learn some significant information about the solar interior.

We can show quite rigorously that the pressure at the center of a star like the Sun must be very high. We know that dp/dr < 0 everywhere in order to maintain hydrostatic equilibrium. Therefore, the central pressure, p(center) must be the largest pressure in the star, and it must be greater than any pressure averaged over the Sun. We choose here an average of p(r) over the mass in the Sun,

$$\langle p \rangle = \int p(r) \frac{dM(r)}{M} = -\int M(r) \frac{dp(r)}{M} \qquad (7.3)$$

trong đó trong tích phân thứ nhất chúng ta tích phân theo M(r) từ M(r=0) = 0 (tại tâm) đến M(r=R) = M (tại bề mặt). Để thu được tích phân thứ hai, chúng ta thực hiện tích phân từng phần, với p(r=R) được bỏ qua vì nó bé hơn nhiều bậc so với <p>. Bây giờ chúng ta sử dụng phương trình (7.2) cho dp(r):

$$\langle p\rangle = G\int\left[\frac{M^2(r)}{4\pi r^4}\right]\frac{dM(r)}{M} > \left[\frac{G}{4\pi R^4}\right]\int M(r)^2\,\frac{dm(r)}{M} \qquad (7.4)$$

Để thoả mãn bất đẳng thức, chúng ta thay r^4 bởi $R^4 > r^4$. Kết quả có thể tích phân được. Chúng ta thu được:

$$p(tại\ tâm) > \langle p\rangle > \frac{GM^2}{12\pi R^4} = 3.10^{13}\frac{N}{m^2} = 3.10^8\,atm \qquad (7.5)$$

Rõ ràng là áp suất tại tâm của Mặt Trời là rất lớn.

Chúng ta có thể thực sự ước tính áp suất tại tâm bằng cách tích phân phương trình (7.2) theo toàn bộ ngôi sao một cách gần đúng. Ở vế trái, ∫dp = p(tại tâm) vì p(tại bề mặt) được bỏ qua. Ở vế phải, chúng ta thay r bởi R/3 vì khoảng một nửa khối lượng của Mặt Trời nằm bên trong r = R/3 và chúng ta tích phân một cách đơn giản $\int M(r)dM(r) = (1/2)\,M^2$. Kết quả ước tính thu được

$$p(\text{tại tâm}) \sim \frac{81}{8\pi}GM^2R^{-4} = 3.10^{15}\frac{N}{m^2} \qquad (7.6)$$

Các mô hình chi tiết thu được giá trị $2{,}5\text{x}10^{16}$ N/m^2. Giá trị ước tính (7.6) nằm trong phạm vi mười lần giá trị của mô hình này. Điều này là hợp lí đối với một sự ước tính đơn giản như thế. Điều quan trọng hơn, khi chúng ta xem xét một sao biến quang, chương VIII, sự ước tính này cho thấy rằng p(tại tâm) tỉ lệ với giá trị M^2R^{-4} đối với những ngôi sao này.

Chúng ta cũng có thể thực hiện một sự ước tính đơn giản nhiệt độ tại tâm bằng cách liên hệ nó với áp suất tại tâm, p = nkT. Chúng ta chọn giá trị T(tại tâm) = p(tại tâm)/<n>k. Chúng ta cần biểu diễn <n> theo M và R. Nếu khí là hiđrô bị ion hoá, n là số electron và proton thì $\rho = (1/2)nm_p$. Chúng ta thu được <ρ> từ sự ước tính $M = (4\pi/3)(R/3)^3\langle\rho\rangle$. Bởi vậy, sử dụng phương trình 7.6:

$$T(\text{tại tâm}) \sim \frac{p(\text{tại tâm})m_p}{2\langle\rho\rangle k} \sim \frac{m_p}{4k}\frac{GM}{R} = 3.10^7\,K \qquad (7.7)$$

Giá trị này nằm trong phạm vi hai lần giá trị chính xác tính được, T(tại tâm) = $1{,}6\text{x}10^7$ °K. Sự phù hợp tốt này là khá ngẫu nhiên. Nhưng chúng ta biết rằng: bên trong Mặt Trời phải rất nóng! Thực vậy, nhiệt độ cao ở tâm là cần thiết cho các phản ứng hạt nhân ở đó.

Sự tổng hợp hạt nhân

Chúng ta biết, từ các bằng chứng vật lí ở trên Trái Đất, rằng Mặt Trời ở trạng thái ổn định trong nhiều triệu năm. Nguồn năng lượng nào có thể tồn tại lâu như vậy? Nguồn có thể duy nhất là sự biến đổi khối lượng thành năng lượng theo phương trình Einstein $E = mc^2$: Khi một khối lượng m biến mất, lượng năng lượng E xuất hiện (hoặc ngược lại). Một lượng năng lượng rất lớn được giải phóng thậm chí khi chỉ một khối lượng rất bé được biến đổi thành năng lượng (câu hỏi B1 - B2).

where in the first integral we integrate over M(r) from M(r=0) = 0 (at the center) to M(r=R) = M (at the surface). To obtain the second integral, we do an integration by parts, with p(r=R) neglected because it is many orders of magnitude smaller than <p>. Now we use equation (7.2) for dp(r):

$$\langle p\rangle = G\int\left[\frac{M^2(r)}{4\pi r^4}\right]\frac{dM(r)}{M} > \left[\frac{G}{4\pi R^4}\right]\int M(r)^2\,\frac{dm(r)}{M} \qquad (7.4)$$

For the inequality we replaced r^4 by $R^4 > r^4$. The result can be integrated. We obtain:

$$p(center) > \langle p\rangle > \frac{GM^2}{12\pi R^4} = 3.10^{13}\,\frac{N}{m^2} = 3.10^8\,atm \qquad (7.5)$$

Obviously, the central pressure in the Sun is enormous.

We can actually estimate the central pressure by integrating equation (7.2) over the star in a very approximate manner. On the left side, $\int dp$ = p(center), since p(surface) is negligible. On the right side we replace r by R/3, since about half the Sun's mass is inside r = R/3, and we simply integrate $\int M(r)\,dM(r) = \frac{1}{2} M^2$. Then the estimate is:

$$p(center) \sim \frac{81}{8\pi} GM^2R^{-4} = 3.10^{15}\,\frac{N}{m^2} \qquad (7.6)$$

Detailed models yield $2.5\times10^{16}\,N/m^2$. The estimate (7.6) is within an order of magnitude of the model value. That is reasonable for such a simple estimate. More importantly, when we consider pulsating stars, in Chapter VIII, this estimate shows that p(center) is proportional to the value of $M^2 R^{-4}$ for these stars.

We can also make a simple estimate of the central temperature by relating it to the central pressure, p = nkT. We choose to evaluate T(center) = p(center)/<n>k. We need to express <n> in terms of M and R. If the gas is ionized hydrogen, n is the number of both electrons and protons, so $\rho = \frac{1}{2} n m_p$. We obtain <ρ> from the estimate $M = (4\pi/3)(R/3)^3\langle\rho\rangle$. Therefore, using equation (7.6)

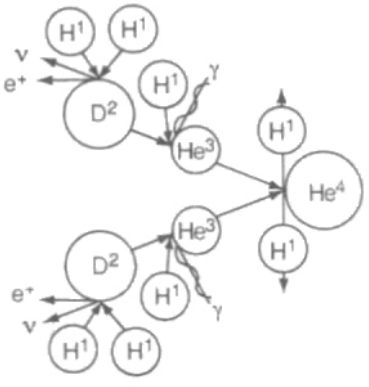
$$T(center) \sim \frac{p(center)m_p}{2\langle\rho\rangle k} \sim \frac{m_p}{4k}\frac{GM}{R} = 3.10^7\,K \qquad (7.7)$$

This is within a factor 2 of the correctly computed T(center) = 1.6×10^7 K. The close agreement is rather an accident. But we learn: It must be hot inside the Sun! Indeed, the high central temperature is needed for nuclear fusion there.

Nuclear fusion.

We know, from physical evidence on Earth, that the Sun has been steady for many millions of years. What source of energy might last this long? The only possible source is the conversion of mass into energy according to Einstein's law $E = mc^2$: When an amount of mass m disappears, energy in the amount E appears (or the other way around). Very large energies are released even when only a small amount of mass is changed into energy. [Questions B1 - B2.]

Chúng ta hãy ước tính xem Mặt Trời có thể sống được bao lâu nếu nó biến đổi toàn bộ vật chất của nó thành năng lượng. Thời gian tính được là $Mc^2/L = 1{,}5 \times 10^{13}$ năm, trong đó độ trưng $L = 4 \times 10^{26}$ W là tốc độ mất mát năng lượng của Mặt Trời. Thời gian này lớn hơn nhiều so với tuổi của Trái Đất và Mặt Trời. Tuy nhiên, Mặt Trời không biến toàn bộ khối lượng của nó thành năng lượng. Nó chỉ biến đổi 4 hạt nhân H thành một hạt nhân He. Khối lượng He tạo thành bé hơn khối lượng của 4 hạt nhân H khoảng 0,7%. Chỉ phần khối lượng này biến đổi thành năng lượng. Sự tổng hợp hạt nhân chỉ diễn ra ở 10% khối lượng ở tâm, nóng nhất của Mặt Trời. Bởi vậy Mặt Trời chỉ có thể chuyển khoảng 0,07% khối lượng hiđrô tổng cộng của nó thành năng lượng và sự tổng hợp hiđrô sẽ dừng lại sau khoảng $0{,}0007 \times 1{,}5 \times 10^{13} = 10^{10}$ năm. Thật may mắn cho sự sống trên Trái Đất, Mặt Trời có đủ nhiên liệu hạt nhân để duy trì sự ổn định tới tương lai xa.



Hình VII.18

Sự tổng hợp của 4 hạt nhân H thành 1 hạt nhân He diễn ra qua một số bước. Phản ứng đầu tiên là:

$$p + p \Rightarrow d + e^+ + \nu \ (2{,}3.10^{-13}\ J)$$

trong đó p – proton, là hạt nhân H bình thường; d – deuteron, hạt nhân H nặng, sự kết hợp của một proton và một neutron; e^+ – positron, ν – neutrino và sự giải phóng năng lượng có thể được so sánh với $m_e c^2 = 0{,}8 \times 10^{-13}$ J. ν và năng lượng của nó thoát ra từ Mặt Trời. Phản ứng thứ hai là: $d + p \Rightarrow {}^3He + \gamma \ (8{,}8.10^{-13}\ J)$. Ở đây γ – tia gamma. Một cách phổ biến hơn, khi mỗi một phản ứng này diễn ra hai lần thì ${}^3He + {}^3He \Rightarrow {}^4He + 2p \ (20{,}7.10^{-13}\ J)$. Xem hình VII.18. Sự va chạm biến đổi năng lượng của γ và của tất cả các hạt được tạo thành từ các phản ứng hạt nhân thành năng lượng nhiệt được phân bố theo rất nhiều nguyên tử.

Kiến thức vật lí

Phản ứng đầu tiên, p + p, diễn ra rất chậm. Mỗi khi phản ứng này diễn ra, tất cả các phản ứng khác diễn ra rất nhanh chóng. Phản ứng p + p diễn ra với tốc độ chậm đến mức một proton điển hình, lang thang xung quanh tâm Mặt Trời, có cơ hội tốt để tổng hợp với proton khác chỉ sau khoảng 5×10^9 năm. Tại sao tốc độ của phản ứng p + p lại chậm như vậy?

Thứ nhất, khi hai proton kết hợp với nhau tạo thành một proton và một neutron, một trong số những proton này phải mất điện tích dương của nó bằng cách phát xạ một positron. Đây là một sự kiện rất có thể không xảy ra, ngay cả khi hai proton tiếp xúc với nhau về mặt vật lí.

Thứ hai, rất khó để hai proton tiếp xúc với nhau. Hai hạt tích điện dương đẩy nhau. Theo vật lí cổ điển, năng lượng cần thiết để hai proton tiến lại gần nhau trong phạm vi bán kính hạt nhân 10^{-15} m là $2{,}5 \times 10^{-13}$ J. Nếu chúng ta cân bằng năng lượng này với năng lượng chuyển động nhiệt trung bình của proton, 3/2 kT, chúng ta thu được $T \sim 10^{10}$ K. Rõ ràng, vấn đề là phản ứng hạt nhân cần nhiệt độ rất cao! Tuy nhiên chúng ta không cần nhiệt độ cao như vậy. Các proton thực sự là các hệ lượng tử có thể được miêu tả bởi các sóng, và các sóng có thể chui qua một hàng rào, nơi các hạt không thể chui qua được theo vật lí cổ điển. Xác suất của sự chui qua như thế tỉ lệ với exp-(8×10^{-14} J/năng lượng proton). Tại nhiệt độ của tâm Mặt Trời, $T = 1{,}6 \times 10^7$ K, năng lượng trung bình của proton là $3{,}3 \times 10^{-16}$ J. Bởi vậy, các proton điển hình có xác suất xuyên qua là exp(-240), có thể được bỏ qua.

Let us estimate how long the Sun can live if it converts all of its matter into energy. This time is $Mc^2/L = 1.5 \times 10^{13}$ years, where the luminosity $L = 4 \times 10^{26}$ w is the solar rate of energy loss. This time is much longer than the ages of the Earth and of the Sun. However, the Sun does not totally convert all its mass into energy. It merely converts 4 H nuclei into 1 He nucleus. The mass of the resulting He is smaller than the mass of the 4 H by 0.7%. Only this fraction of the mass is converted into energy. The fusion occurs only in the hottest, central 10% of the mass of the Sun. Therefore, the Sun can convert only about 0.07% of its total hydrogen mass into energy, and hydrogen fusion will stop after only about $0.0007 \times 1.5 \times 10^{13} = 10^{10}$ years. Fortunately for life on Earth, the Sun has enough nuclear fuel to remain steady far into the future.

Figure VII.18

The fusion of 4 H nuclei into 1 He nucleus occurs in several steps. The first reaction is :

$$p+p \Rightarrow d+e^+ +\nu \ (2.3 \times 10^{-13} j).$$

Here p – proton, the normal H nucleus; d = deuteron, a heavy H nucleus, the combination of one proton and one neutron; e^+ – positron, ν – neutrino, and the energy release may be compared to $m_e c^2 = 0.8 \times 10^{-13}$ j. The ν and its energy escape from the Sun. The second reaction is : $d+p \Rightarrow {}^3He + \gamma \ (8.8 \times 10^{-13} j)$. Here γ – gamma ray. Most commonly, when each of these reactions has happened twice, then ${}^3He + {}^3He \Rightarrow {}^4He + 2p \ (20.7 \times 10^{-13} j)$. See fig. VII.18. Collisions convert the energies of the γ and of all the particles resulting from the nuclear reactions into thermal energy distributed over very many more atoms.

Physics background.

The first reaction, p+p, is a very slow one. Once it occurs, all the other reactions occur quickly. The p+p reaction is so slow that a typical proton, wandering around the center of the Sun, has a good chance of fusing with another proton only after roughly 5×10^9 years. Why is the p+p rate so slow?

First, when the two protons combine to form a proton and a neutron, one of the protons must lose its positive electrical charge by emitting a positron. This is a very improbable event, even if two protons physically touch each other.

Second, it is very difficult for two protons to touch each other. The two positive electric harges repel each other. According to classical physics, the energy needed for two protons to approach each other within a nuclear radius of 10^{-15}m is 2.5×10^{-13}j. If we equate this with the mean thermal energy of protons, 3/2 kT, we obtain $T \sim 10^{10}$K. Obviously, the problem is that fusion needs very high temperatures! However, we do not need temperatures quite this high. The protons really are quantum systems that can be described by waves, and waves can tunnel through a barrier where particles cannot according to classical physics. The probability for such tunneling is proportional to exp-(8×10^{-14} j/proton energy). At the central temperature of the Sun, $T = 1.6 \times 10^7$ K, the average proton energy is 3.3×10^{-16} j. Therefore, typical protons have tunneling probabilities such as exp(-240), which is negligible.

Các hạt có năng lượng cao hơn có xác suất xuyên qua lớn hơn, nhưng có rất ít hạt kiểu này, tỉ lệ với exp(-năng lượng proton/kT). Người ta đã chứng tỏ được rằng các proton có năng lượng bằng khoảng 12 lần năng lượng chuyển động nhiệt có một xác suất xuyên qua hợp lí, exp(−20), và cũng có đủ nhiều hạt, cỡ một phần của exp(−18), đủ để cho phản ứng tổng hợp xảy ra. Trong thực tế, nhiệt độ tại tâm Mặt Trời được điều chỉnh tới giá trị $1{,}6 \times 10^7$ K bởi vì nhiệt độ này cho phép một số lượng cần thiết những sự xuyên qua và những phản ứng tổng hợp hạt nhân.

Mô hình Mặt Trời

Mỗi khi nhiệt và bức xạ được tạo ra ở gần tâm, bức xạ khuếch tán ra phía ngoài và mang theo năng lượng. Sự khuếch tán diễn ra rất chậm. Điển hình, một photon ở gần tâm Mặt Trời chuyển động được khoảng 10^{-4} m trước khi nó bị hấp thụ, và sau đó nó lại phát xạ theo một hướng khác. Cần có hàng triệu năm để bức xạ khuếch tán thậm chí ra ngoài tới r = 0,3R. Sự khuếch tán ở phía ngoài diễn ra nhanh hơn. Ở phía ngoài khoảng cách 0,7R kể từ tâm, nhiệt được mang ra ngoài chủ yếu bởi sự đối lưu. Tại mỗi lớp, sự hấp thụ và sự tái phát xạ của photon làm thay đổi phổ của photon sao cho nó cân bằng với phổ Planck tương ứng với nhiệt độ cục bộ. Các photon thay đổi dần dần từ vùng tia X ở gần tâm tới vùng cực tím và sau đó tới ánh sáng khả kiến ở gần bề mặt. Cuối cùng, tại bề mặt, các photon khả kiến mang hầu hết năng lượng của Mặt Trời vào Vũ trụ.

Các máy vi tính có thể tạo ra các mô hình chi tiết thoả mãn những điều kiện này: Mỗi lớp khí được nâng bởi lực hấp dẫn, khối lượng của tất cả các lớp bổ sung vào khối lượng đã biết M, năng lượng hạt nhân tổng cộng được tạo thành ở gần tâm bổ sung vào năng lượng đã biết L, và năng lượng truyền ra ngoài mà không tiếp tục thu thập thêm nữa. Bảng dưới đây cho chúng ta biết những kết quả này. Khó khăn trong việc tạo ra các mô hình tốt xuất phát từ vật lí nguyên tử ở các khu vực với nhiệt độ xấp xỉ 10^5 K, ngay phía dưới bề mặt Mặt Trời, với r/R vào khoảng 0,98. Ở những nhiệt độ này, các nguyên tử và các ion hấp thụ và phát xạ photon rất phức tạp và nhiều chương trình máy tính phức tạp riêng biệt là cần thiết chỉ để tính toán xem bức xạ được phát xạ và hấp thụ tại những nhiệt độ này như thế nào.

Khoảng cách tới tâm: R/R_o	Nhiệt độ T (K)	Áp suất P (N/m^2)	Mật độ ($10^3 kg/m^3$)
0	16.10^6	$2{,}5.10^{16}$	160
0,2	10.10^6	$4{,}6.10^{15}$	36
0,5	$3{,}4.10^6$	$6{,}1.10^{13}$	1,3
0,8	$1{,}3.10^6$	$6{,}2.10^{11}$	0,035
0,98	$0{,}1.10^6$	10^9	0,001

Từ mô hình chúng ta biết rằng hầu hết năng lượng hạt nhân được tạo ra ở vùng phía trong nhất và nóng nhất, chiếm khoảng 10% khối lượng Mặt Trời. Áp suất, mật độ và nhiệt độ của Mặt Trời đều giảm theo luỹ thừa của 10 cùng với sự tăng của khoảng cách tính từ tâm Mặt Trời. Các đại lượng này giảm rất nhanh cùng với sự tăng của bán kính khi nhiệt độ giảm xuống 10^5 K vì thang độ cao (xem phương trình A3) trở nên luôn luôn bé hơn ở những nhiệt độ thấp này.

The higher energy particles have more probability of tunneling, but there are very few of them, proportional to exp(-proton energy/kT). It turns out that protons at roughly 12 times thermal energy have a reasonable probability of tunneling, exp(-20), and are also sufficiently numerous, roughly a fraction exp(-18), so that sufficient fusion reactions occur. In fact, the temperature at the Sun's center is adjusted to the value 1.6×10^7 K because that temperature allows the needed number of tunnelings and fusion reactions.

A model of the Sun.

Once heat and radiation are produced near the center, the radiation diffuses outwards and carries energy with it. The diffusion is very slow. Typically, a photon near the solar center travels only about 10^{-4} m before it is absorbed, and then it is again emitted in some other direction. Millions of years are needed for radiation to diffuse even out to r = 0.3 R. Diffusion further out is somewhat faster. Beyond a distance of 0.7 R from the center, heat is carried outward mainly by convection. At each layer, the absorptions and re-emissions of photons adjust the photon spectrum so that it equals the Planck spectrum appropriate for the local temperature. The photons change gradually from the x-ray range near the center to the ultraviolet and then to the visible near the surface. Finally, at the surface, visible photons carry most of the solar energy into space.

Computers can produce a detailed model which satisfies these conditions : each layer is held up against gravity, the mass of all the layers adds up to the known M, the total nuclear energy produced near the center adds up to the known L, and energy travels outward without collecting anywhere. The table gives the results. The difficulty in producing good models has come from the atomic physics of the regions with a temperature roughly 10^5 K, which are just below the surface at r/R about 0.98. At these temperatures, the atoms and ions that absorb and radiate photons are very complicated, and enormous separate computer programs have been necessary to compute just how radiation is emitted and absorbed at these temperatures.

Distance to center: R/R_o	Temperature (K)	Pressure P (N / m^2)	Density ($10^3 kg / m^3$)
0	16×10^6	2.5×10^{16}	160
0.2	10×10^6	4.6×10^{15}	36
0.5	3.4×10^6	6.1×10^{13}	1.3
0.8	1.3×10^6	6.2×10^{11}	0.035
0.98	0.1×10^6	10^9	0.001

We learn from the model that most of the nuclear energy is produced in the innermost, hottest 10% of the Sun's mass. The pressure, density and temperature all decrease by orders of magnitude with increasing distance from the center. They drop particularly strongly with increasing radius once the temperature is as low as 10^5 K, because the scale height (see question A3) becomes ever smaller at these low temperatures.

Các sóng âm của Mặt Trời

Bằng cách nào chúng ta có thể kiểm tra thấy rằng mô hình tính toán là gần đúng? Một sự kiểm tra quan sát dựa trên các sóng âm của Mặt Trời. Các sóng âm truyền qua các khí của Mặt Trời giống như sóng âm truyền qua một chiếc đàn organ, hoặc một chiếc sáo, hoặc một chiếc chuông. Mặt Trời cũng giống như một chiếc chuông đang ngân vang. Nếu chuông có âm cao, chúng ta biết rằng chiếc chuông là bé; nếu âm thấp thì chiếc chuông là lớn. Chúng ta có thể quan sát được các sóng âm trên Mặt Trời. Đa số chúng có chu kì khoảng 5 phút (lớn hơn rất nhiều so với những chu kì của những sóng âm mà chúng ta nghe thấy trên Trái Đất). Điều này có nghĩa là các khí trong quang quyển chuyển động lên xuống với chu kì khoảng 5 phút và chúng ta có thể đo độ dịch chuyển Doppler tạo bởi sự dịch chuyển này.

Các sóng âm trên Mặt Trời đã từng được đo trong khoảng 10 năm lại đây. Chúng ta quan sát được hàng ngàn âm sắc, và chúng cho chúng ta biết về bên trong của Mặt Trời cũng giống như những âm sắc từ một chiếc chuông cho chúng ta biết về chiếc chuông. Chúng ta có thể xác định tốc độ âm truyền qua Mặt Trời. Nó phù hợp với tốc độ âm được tính từ các mô hình tính toán tốt nhất về Mặt Trời với sai số khoảng 1%. Đối với thiên văn học, đây là một độ chính xác rất cao!

Vấn đề neutrino

Có một cách khác để kiểm tra mô hình tính toán về Mặt Trời. Neutrino được tạo ra tại tâm Mặt Trời. Chúng dễ dàng thoát khỏi Mặt Trời. Nhưng một số hạt neutrino có thể được bắt bởi các thiết bị thu đặc biệt, nằm sâu ở dưới bề mặt Trái Đất. Hiện nay có 3 máy thu đang hoạt động. Điều ngạc nhiên: Các máy thu chỉ bắt được khoảng từ 1/3 đến 1/2 số neutrino được dự đoán. Liệu có phải mô hình về Mặt Trời của chúng ta là sai hay không? Không, rất có thể là mô hình về Mặt Trời của chúng ta là đúng, nhưng vật lí về neutrino là chưa hoàn thiện. Vào năm 1998, người ta đã chứng tỏ được rằng neutrino có khối lượng rất bé, bằng cách sử dụng một trong những máy thu neutrino. Khi khối lượng này được đo một cách chính xác, nó sẽ thay đổi dự đoán về số hạt neutrino của Mặt Trời mà các máy thu có thể bắt được. Liệu sự tiên đoán mới có phù hợp với các quan sát hay không? Chúng ta cần phải kiên nhẫn đợi chờ kết quả.

Mặt Trời đã mang lại cho chúng ta một số điều ngạc nhiên. Tuy nhiên, nếu chúng ta so sánh số những điều ngạc nhiên và số những sự phù hợp một cách chi tiết giữa tiên đoán và quan sát đối với các hành tinh (chương V và chương VI) và đối với Mặt Trời (chương này), chúng ta sẽ thấy rằng chúng ta hiểu về Mặt Trời tốt hơn về các hành tinh (câu hỏi B3).

Solar sound waves.

How can we check that the computed model is actually close to correct? One observational check is based on solar sound waves. Sound waves travel through the gases of the Sun much like they travel through an organ, or a flute, or a bell. The Sun resembles a ringing bell. If a bell has high tones, we know that the bell is small; low tones mean that the bell is large. The sound waves on the Sun can be observed. Most of them have a period of about 5 minutes (much longer than the periods of sound waves we hear on Earth). That means that the gases in the photosphere move up and down, with a period of about 5 minutes, and we can measure the resulting Doppler shift.

The solar sound waves have been measured now for about ten years. We observe literally thousands of tones, and they inform us about the interior of the Sun like the tones from a bell inform us about the bell. We can determine the sound speed throughout the Sun. It agrees with the sound speed from the best computed model of the Sun to within about 1%. For astronomy, that is an enormous degree of accuracy!

The neutrino problem.

There is another way to check the computed solar model. Neutrinos are produced at the Sun's center. They easily escape from the Sun. But a few can be caught in special detectors, deep under Earth's surface. Three detectors are now operating. Surprise : the detectors catch only between 1/3 and ½ of the predicted neutrinos. Is our model of the Sun wrong? No, very probably the solar model is correct, but the physics of the neutrinos is incomplete. In 1998 it was demonstrated, using one of the neutrino detectors, that neutrinos have a very tiny mass. When that mass is measured accurately, it will change the prediction for the number of solar neutrinos caught. Will the new prediction match the observations? We must patiently wait for the results.

The Sun has brought some surprises. However, if we compare the number of surprises and the number of detailed agreements between prediction and observation for the planets (Chapters V and VI) and for the Sun (this Chapter), we find that we understand the Sun better than its planets. [Question B3.]

CÂU HỎI

B1) Giả sử rằng 1g vật chất được biến đổi thành năng lượng, theo hệ thức $E = mc^2$ và năng lượng này được dùng để nâng 1 giáo sư có khối lượng 60 kg. Hỏi giáo sư này sẽ bay lên trên với tốc độ bằng bao nhiêu? Liệu ông ta có thoát khỏi sức hút của Trái Đất không? Liệu ông ta có thoát khỏi sức hút của Mặt Trời không? Liệu ông ta có rời khỏi Dải Ngân Hà không? (Chương IX, tốc độ thoát khoảng 400 km/s)

B2) Hãy tính tốc độ mất mát khối lượng của Mặt Trời theo kg/s, cho biết $E = mc^2$ và $L = 4.10^{26}$ W.

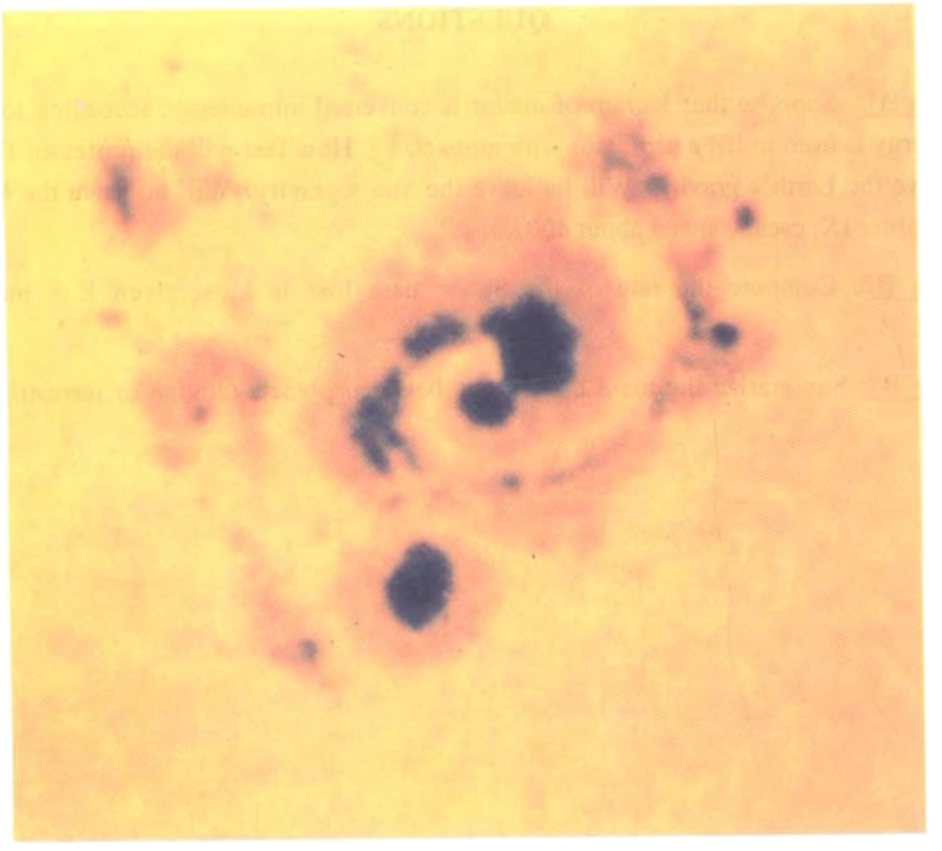
B3) Hãy tổng kết những sự khác nhau cơ bản giữa các hành tinh (thuộc nhóm Mộc Tinh hoặc nhóm Trái Đất) và Mặt Trời (một ngôi sao).

QUESTIONS

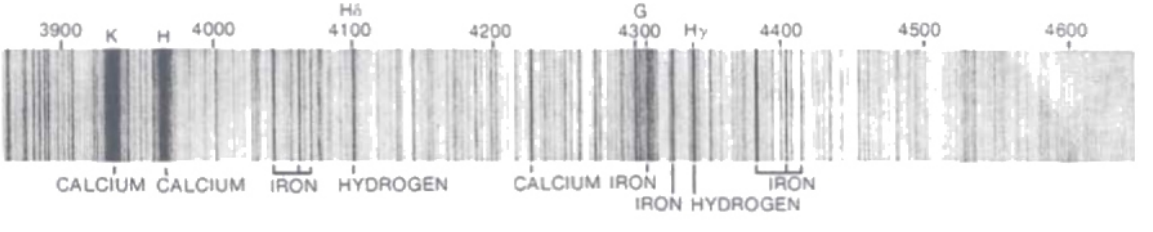
Question B1: Suppose that 1 gram of matter is converted into energy, according to $E = mc^2$, and this energy is used to lift a professor with mass 60 kg. How fast will the professor fly upward? Will he leave the Earth's gravity? Will he leave the Sun's gravity? Will he leave the Milky Way Galaxy (Chapter IX, escape speed about 400 km/s)?

Question B2: Compute the rate of the Sun's mass loss in kg/s, given $E = mc^2$ and $L = 4 \times 10^{26}$ watt.

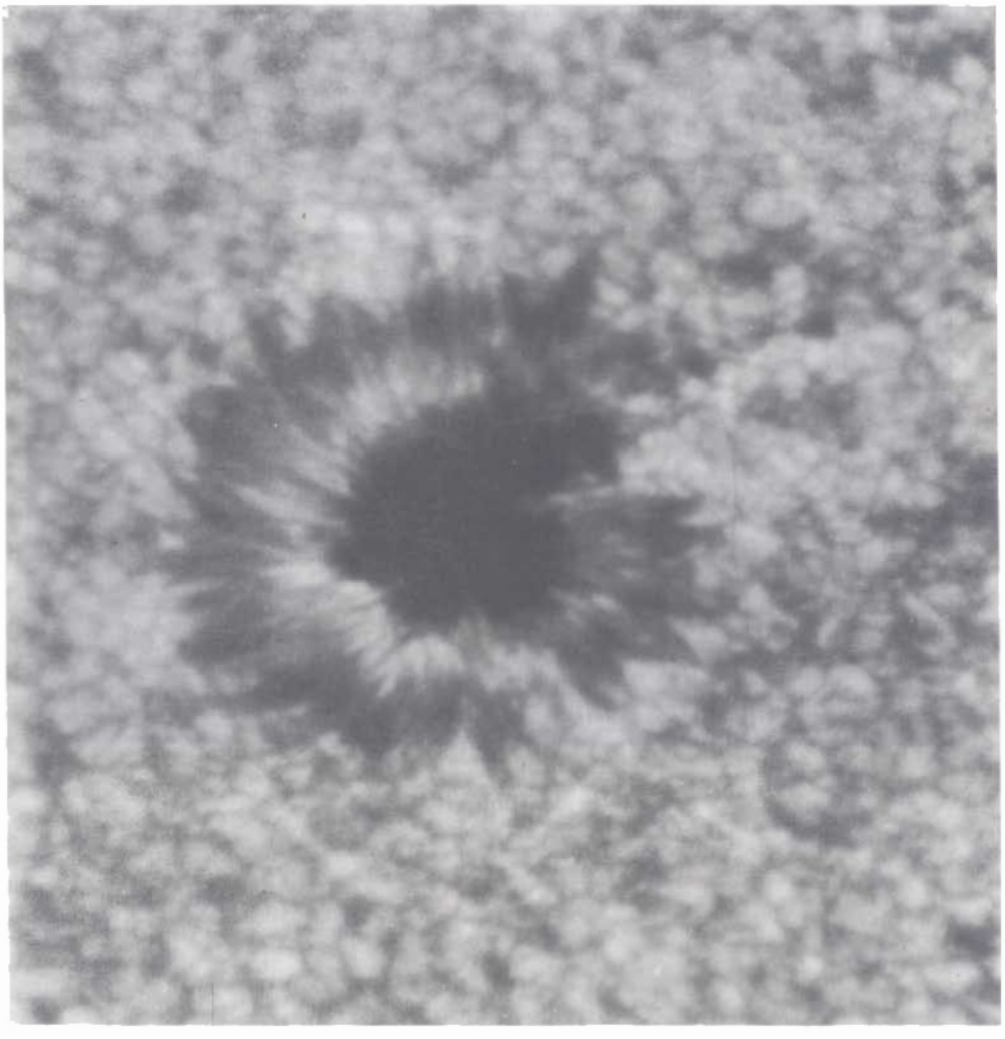
Question B3: Summarize the main differences between planets (Jovian or terrestrial) and the Sun (a star).



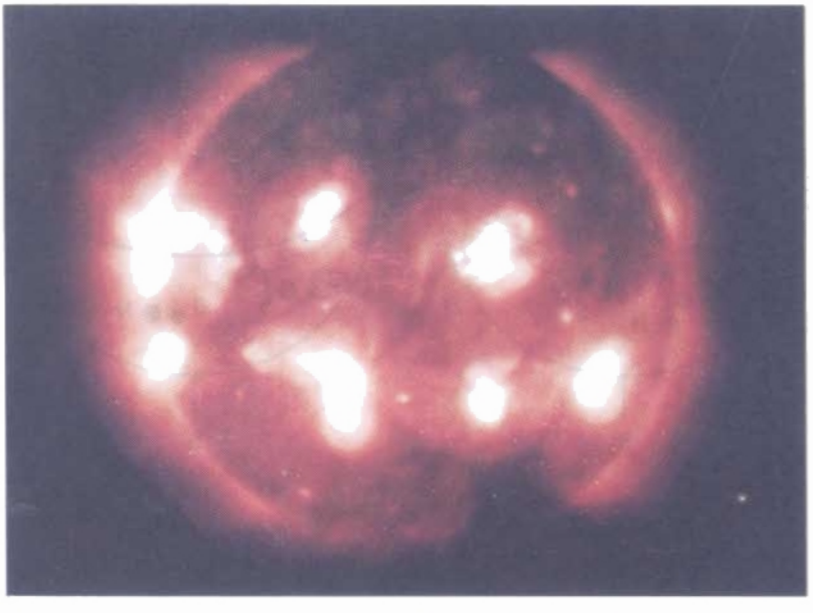
Hình VII.2



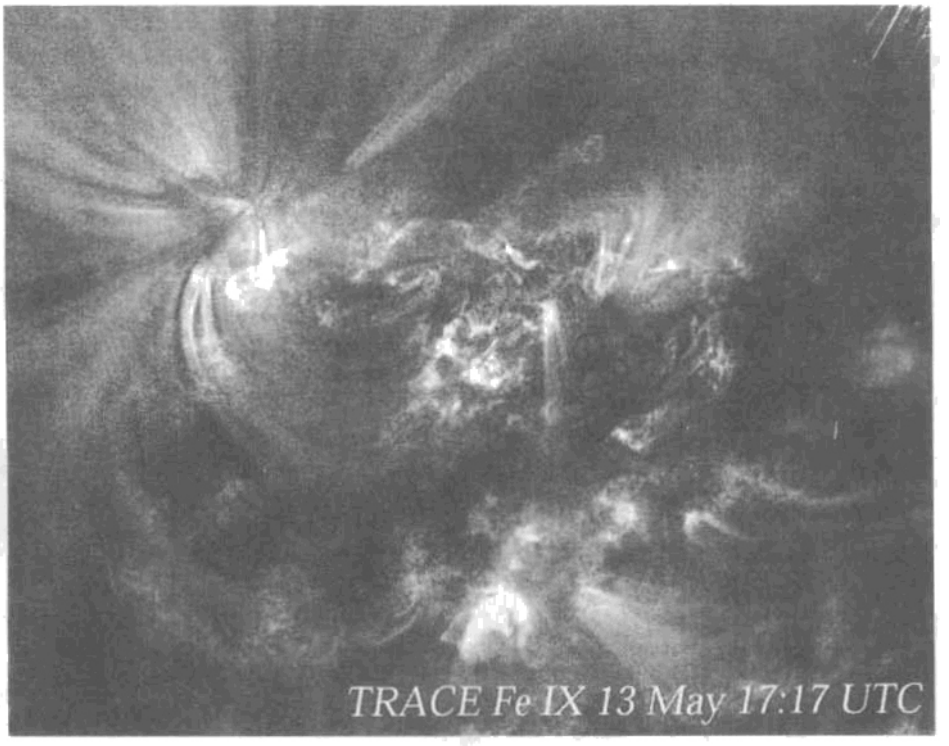
Hình VII.3



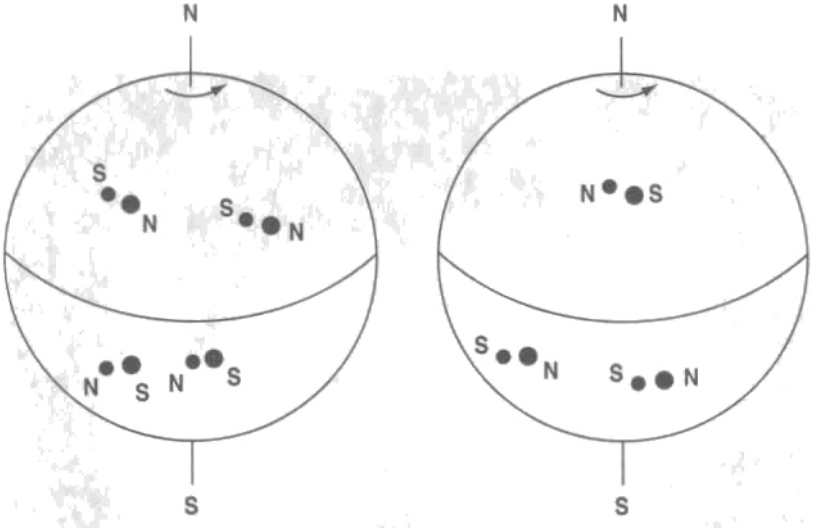
Hình VII.4



Hình VII.9

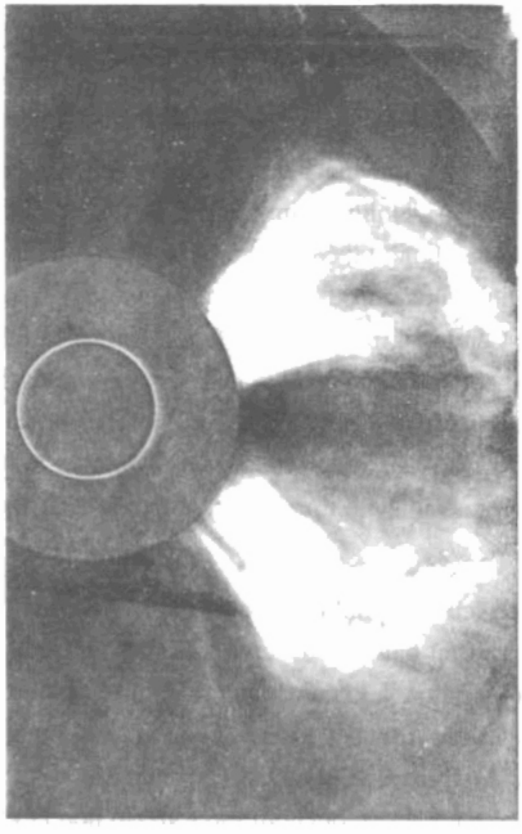


Hình VII.10



Hình VII.13

Hình VII.14



Hình VII.15

Chương VIII

CÁC NGÔI SAO : TÍNH CHẤT, SỰ SỐNG VÀ CÁI CHẾT CỦA CHÚNG

GIỚI THIỆU : "XA" NGHĨA LÀ GÌ ?

Một đứa bé nghĩ rằng "xa" nghĩa là phía bên kia đường phố. Một người trẻ tuổi, có nhiều kinh nghiệm hơn, nghĩ rằng "xa" nghĩa là thành phố gần nhất, có thể là Hà Nội hoặc Huế. Một thương gia, với nhiều kinh nghiệm hơn, nghĩ rằng "xa" nghĩa là New York hoặc Singapore, nhưng sau khi các sinh viên đọc về New York hoặc Singapore và nhìn lên bản đồ của thành phố này, thì khi ấy các thành phố này trở nên không còn xa nữa. 30 năm về trước, Mặt Trăng và các hành tinh đã là "xa" đối với hầu hết mọi người. Nhưng trong thời đại du hành vũ trụ và thời đại của các máy thăm dò vũ trụ, chúng ta có thể đọc về Mặt Trăng và các hành tinh, và chúng ta có thể đọc về các nhà du hành vũ trụ đi tới Mặt Trăng chỉ sau vài ngày hành trình, và chúng ta có thể đọc về các nhà du hành vũ trụ tương lai tới Hoả tinh sau 9 tháng hành trình. Ngày nay, Mặt Trăng, các hành tinh và mọi thứ trong Hệ Mặt Trời trở nên không còn "xa" nữa.

Các ngôi sao có "xa" không ? Có, ít nhất là vào lúc ban đầu. Chúng chắc chắn xa hơn nhiều so với Copernicus đã từng tưởng tượng. Để các bạn trở nên quen thuộc với các khoảng cách của các ngôi sao, chúng tôi mời các bạn tham dự một cuộc hành trình tưởng tượng từ Trái Đất, trong một tàu vũ trụ chuyển động với một vận tốc gần bằng với vận tốc ánh sáng, đi theo hướng của chòm sao Lạp Hộ (Orion).

Sau 8 phút, chúng ta đã đi được khoảng 1 đơn vị thiên văn. Nhìn ngược trở lại, Trái Đất hiện ra như một hành tinh, giống như Hoả Tinh và Kim Tinh. Trái Đất có một bạn đồng hành - Mặt Trăng, hiện ra rất mờ từ tàu vũ trụ của chúng ta. Sau 3 giờ hành trình, chúng ta đã đi được khoảng 20 đơn vị thiên văn. Nếu chúng ta nhìn ngược trở lại, qua cửa sổ của tàu vũ trụ, lúc này Mặt Trời vẫn là vật thể sáng nhất trên bầu trời. Các hành tinh của Mặt Trời trải rộng ra trên một phần rộng lớn của bầu trời. Hải Vương Tinh có thể còn ở đủ gần để hiện ra khá sáng, nhưng Trái Đất hiện ra rất mờ. Sau 5 ngày hành trình, chúng ta đi được 10^3 đơn vị thiên văn, Mặt Trời vẫn là vật thể sáng nhất, nhưng tất cả các hành tinh, tập hợp lại gần nhau xung quanh Mặt Trời, hiện ra rất mờ. Sau 50 ngày, chúng ta đã đi được 10^4 đơn vị thiên văn, các hành tinh hiện ra ở gần Mặt Trời đến nỗi chúng biến mất trong ánh sáng của Mặt Trời.

Sau 1 năm, không còn có ích gì để nhìn ngược trở lại bởi vì Mặt Trời chỉ là một ngôi sao trong số rất nhiều ngôi sao hiện ra trên bầu trời. Lúc bấy giờ chúng ta đã hành trình được một khoảng cách bằng một năm ánh sáng, nghĩa là khoảng cách mà ánh sáng đi được trong một năm, và chúng ta đi vào thế giới của các ngôi sao. Lúc bấy giờ sẽ là có ích nếu chúng ta nhìn theo các hướng khác. Chúng ta nhận thấy rằng những hình ảnh quan sát được của các ngôi sao trên bầu trời bắt đầu thay đổi. Ví dụ, ngôi sao Sirius có thể hiện ra xa chòm sao Lạp Hộ hơn là khi ta nhìn nó từ Trái Đất.

Chapter VIII

STARS : THEIR PROPERTIES, THEIR LIVES AND THEIR FATES

INTRODUCTION: WHAT IS "FAR" ?

A small child thinks "far" means the other side of the street. A young person, with more experience, thinks "far" means the nearest city, perhaps Hanoi or Hué. A business traveler, with more experience, thinks "far" means New York or Singapore, but after students read about New York or Singapore, and look at the maps of those cities, then those cities soon seem no longer far. Thirty years ago, the Moon and planets were "far" for most people. But in today's world of space travel and space probes, we can read about the Moon and the planets, we can read about astronauts reaching the Moon in a few days, we can read about future astronauts reaching Mars in nine months. Today, the Moon, planets, and everything else in the solar system no longer seem "far".

Are the stars "far"? Yes, at least at first. They are certainly much further than Copernicus imagined. For you to become used to stellar distances, please join us on an imaginary trip from Earth, in a space craft moving at nearly the speed of light, in the general direction of the star constellation Orion.

After eight minutes, we have moved by 1 A.U.. On looking back, the Earth appears as a planet much like Mars and Venus do. Earth has a companion, the Moon, which is faintly visible from our space craft. After 3 hours of travel, we have traversed some 20 A.U. If we look back, out of the window of our space craft, the Sun is still by far the brightest object in the sky. The Sun's planets are spread out over much of the sky. Neptune may be near enough to appear quite bright, but Earth appears very faint. After 5 days of travel, and 10^3 A.U., the Sun is still the brightest object, but all the planets, clustered closely around the Sun, appear very faint. After 50 days, 10^4 AU, the planets appear so close to the Sun that they disappear in the Sun's light.

After a year, there is no purpose looking back., because the Sun is just another star among the many stars visible in the sky. We have now traveled the distance of one light year, the distance light travels in a year, and we enter the realm of stars. It is now userful to look in other directions. We notice that the apparent patterns of the stars on the sky begin to change. For instance, the star Sirius may appear further from the Orion constellation than it does seen from Earth.

Sau 10 năm hành trình, chúng ta có thể tới gần Sirius hơn Mặt Trời. Khi chúng ta đi qua Sirius, nó có thể hiện ra ở bất cứ nơi nào trên bầu trời, nhưng hầu hết các chòm sao trông vẫn còn quen thuộc giống như khi chúng ta nhìn chúng từ Trái Đất. Sau 500 năm, chúng ta có thể tới gần Betelgeuse hơn Mặt Trời, và sự sắp xếp của các ngôi sao trên bầu trời trở nên hoàn toàn xa lạ. Lúc này chúng ta ở giữa thế giới của các ngôi sao mà chúng ta sẽ mô tả ở chương này. Chúng ta kết thúc cuộc hành trình ở đây, và mô tả những điều mà các nhà thiên văn biết được về các ngôi sao, cho đến khi thế giới các ngôi sao này không còn trở nên "xa" nữa.

After ten years of travel, we may be closer to Sirius than to the Sun. As we pass Sirius, it may appear anywhere in the sky, but most star constellations still look familiar, much as they appeared as seen from Earth. After 500 years, we may be closer to Betelgeuse than to the Sun, and the arrangement of stars on the sky becomes completely unfamiliar. Now we are within the realm of the stars that we shall describe in this Chapter. We end our travel here, and describe what astronomers have learned about stars, until this realm of the stars no longer seems "far".

Chương VIII.A

CÁC NGÔI SAO : TÍNH CHẤT CỦA CHÚNG

CÁC NGÔI SAO SÁNG NHẤT VÀ Ở GẦN NHẤT

Từ Trái Đất, các ngôi sao hiện lên như những chấm sáng trên bầu trời. Ví dụ Sirius hoặc Betelgeuse. Chúng ta cần tiến hành những phép quan sát nào để biết được các tính chất vật lí của các ngôi sao, nghĩa là độ trưng L, nhiệt độ bề mặt T, bán kính R, khối lượng M và thành phần hoá học của các ngôi sao? Chúng ta cần tiến hành 5 kiểu quan sát quan trọng.

Hình VIII.1 : (Xem cuối chương)

1. Thị sai nhật tâm: Khi Trái Đất chuyển động xung quanh Mặt Trời, chúng ta thấy các ngôi sao ở gần dịch chuyển đối với các ngôi sao ở xa. Xem hình VIII.1. Nếu chúng ta chụp ảnh một ngôi sao ở gần vào thời điểm khi Trái Đất ở vị trí 1, và hai tháng sau đó, khi Trái Đất ở vị trí 2, thì Trái Đất đã dịch chuyển được 1 đơn vị thiên văn, vuông góc với đường ngắm, và ngôi sao đã dịch chuyển tương đối đối với các ngôi sao ở xa hơn một góc được gọi là thị sai nhật tâm, hoặc như các nhà thiên văn thường gọi một cách đơn giản là thị sai, thường được kí hiệu là π. Độ dịch chuyển thực bé hơn rất nhiều so với trên giản đồ: $\pi < 1''$ (một giây cung) đối với tất cả các ngôi sao. Độ dịch chuyển này bé hơn rất nhiều so với 1' (1phút cung) như Copernicus hoặc Galileo đã từng phát hiện được. Để đo độ dịch chuyển thị sai của một ngôi sao ở giữa các thời điểm của hai lần chụp ảnh, các nhà thiên văn phải biết góc trên bầu trời tương ứng với 1 cm trên phim ảnh, và tỉ số này phụ thuộc vào loại kính thiên văn được sử dụng. Sau đó vị trí của ngôi sao trên tấm ảnh phải được đo với kính hiển vi.

Các nhà thiên văn cảm thấy thuận tiện để định nghĩa parsec như là khoảng cách mà tại đó thị sai của một ngôi sao là một giây cung. Vì 1 radian = $57,3^{o} = 2.10^{5}$'' nên 1pc = 2.10^{5} đ.v.t.v = 3.10^{16} m. Tổng quát, khoảng cách của một ngôi sao là :

$$d \text{ (đo theo đơn vị parsec)} = 1/\pi \text{ (đo theo đơn vị giây cung)} \qquad (8.1)$$

Đơn vị khoảng cách được sử dụng phổ biến là năm ánh sáng, là khoảng cách ánh sáng đi được trong 1 năm = 10^{16} m. Một cách gần đúng, 1 pc = 3 năm ánh sáng.

Trên các bức ảnh được chụp từ Trái Đất, hình ảnh các ngôi sao bị nhoè và có độ rộng tối thiểu 0,3''. Vị trí của chúng có thể được đo với độ chính xác không bé hơn 0,01''. Bởi vậy, thị sai được đo với sai số tối thiểu 0,01'' ngay cả với những bức ảnh tốt nhất được chụp từ Trái Đất. Với một ngôi sao ở gần, với thị sai đo được 0,1'', giá trị thực của nó có thể là 0,09'' hoặc 0,11'', và khoảng cách 10 pc có sai số 10%. Khoảng cách của những ngôi sao với $\pi < 0,01''$, nằm ở khoảng cách lớn hơn 100 pc, không thể đo được bởi các kính thiên văn ở trên Trái Đất. Tuy nhiên một vệ tinh nhân tạo của Trái Đất mang tên HIPPARCOS đã quan sát hàng ngàn ngôi sao trong 4 năm liền với nhiều thiết bị điện tử phức tạp. Nó thu được thị sai với sai số điển hình chỉ 0,002''. Hiện nay chúng ta biết khoảng cách của khoảng 10^{5} ngôi sao với sai số tối đa vài phần trăm.

Chapter VIII A

STARS : THEIR PROPERTIES

THE NEAREST AND BRIGHTEST STARS.

Stars seen from Earth are small dots in the sky. Think of Sirius or Betelgeuse. What observations are needed to deduce the physical properties of the stars, that is the luminosity L, the surface temperature T, the radius R, the mass M and the chemical composition of the stars? We need to make essentially five kinds of observations.

Figure VIII.1

1) Heliocentric parallax: As the Earth moves around the Sun, nearby stars appear to shift relative to far ones. See fig. VIII.1. If we photograph a nearby star at the time when Earth is at position 1, and then again two months later when Earth is at position 2, then Earth has moved by 1 A.U. perpendicular to the line of sight, and the star has apparently shifted relative to much more distant stars by an angle called the heliocentric parallax or, among astronomers, just parallax, with the usual symbol π. The actual shift is much smaller than in the diagram : $\pi < 1$" (one second of arc) for every star. It is very much smaller than the 1' (one minute of arc) Copernicus or Galileo could detect. In order to measure the parallax shift of a star between the times of two photographs, the astronomer must know what angle in the sky corresponds to 1 cm on the photographic plate, and that ratio depends on the telescope used. Then the star positions on the photographs must be measured with a microscope.

Astronomers have found it convenient to define a parsec as that distance at which the parallax of a star is one second of arc. Since 1 radian = $57.3^{0} = 2\text{x}10^{5}$", 1 pc = $2\text{x}10^{5}$A.U. = $3\text{x}10^{16}$m. In general, the distance of a star is:

$$d(\text{measured in parsecs}) = 1/\pi \text{ (measured in seconds of arc).} \qquad (8.1)$$

A popularly used unit of distance is the light year, the distance traveled by light in one year = 10^{16} m. Approximately, 1 pc = 3 light years.

On Earth-based photographs, star images are blurred and at least 0.3" wide. Their positions can be measured no better than to 0.01". Therefore, parallaxes are uncertain by at least 0.01", even on the best Earth-based photographs. For a nearby star with a measured parallax of 0.1", the true value might be 0.09" or 0.11", and the distance of 10 pc has an uncertainty of 10%. Distances of stars with $\pi < 0.01$" , situated beyond 100 pc, cannot be measured at all by telescopes on Earth. However, an Earth satellite called HIPPARCOS spent four years observing many thousands of stars with a sophisticated electronic instrument. It obtained parallaxes with typical uncertainties of only 0.002". We now know distances to some 10^{5} stars with uncertainties of at most a few per cent.

Ngôi sao ở gần nhất cách chúng ta 1,3 pc hay 4 năm ánh sáng. Ánh sáng mà bây giờ chúng ta nhận được từ ngôi sao này đã rời ngôi sao khoảng 4 năm về trước. Ánh sáng hiện giờ tới chúng ta từ Betelgeuse, ở khoảng cách khoảng 150 pc đã rời ngôi sao này khoảng 500 năm trước. Chúng ta dừng cuộc hành trình vũ trụ của chúng ta ở một nơi nào đó ở gần Betelgeuse, giữa thế giới của các ngôi sao. Chúng ta có may mắn hơn nhiều so với Copernicus và Galileo: Chúng ta có thể tưởng tượng sự du hành vũ trụ. Chúng ta có thể trở nên quen thuộc với thế giới của các ngôi sao, trong khi Copernicus và Galileo không thể làm được điều này.

2. Độ sáng của các ngôi sao: Các nhà thiên văn thường liệt kê các ngôi sao theo một thang tỉ lệ gọi là cấp sao biểu kiến. Thang đo thay đổi từ m = – 4,4 đối với Kim Tinh tại vị trí sáng nhất của nó, m = – 1,5 đối với ngôi sao sáng nhất, Sirius, m = 0 đối với Vega, m = +6 đối với ngôi sao mờ nhất có thể nhìn thấy bằng mắt thường, đến + 28 đối với các điểm sáng mờ nhất có thể nhìn thấy qua những kính thiên văn lớn nhất đặt trên Trái Đất hoặc qua kính thiên văn vũ trụ Hubble. Thang đo cấp sao là hữu ích khi chúng ta quan sát bầu trời bằng mắt trần, hoặc bằng cách nhìn qua một kính thiên văn nhỏ, hoặc khi chúng ta muốn đưa ra một ý tưởng sơ lược về độ mờ của vật thể.

Với những thông tin chính xác hơn, chúng ta đo số photon, với những màu sắc khác nhau, được tập trung qua một kính thiên văn và bị bắt vào một tấm phim ảnh hoặc một thiết bị quang điện. Nếu chúng ta biết hiệu suất của phim hoặc của thiết bị và đường kính của kính thiên văn thì chúng ta có thể tìm ra năng lượng đi vào kính thiên văn trên một đơn vị diện tích và trong một đơn vị thời gian. Tiếp theo đó, chúng ta phải hiệu chỉnh sự hấp thụ ánh sáng của ngôi sao bởi khí quyển trái đất. Điều này có thể thực hiện được bằng cách quan sát cùng ngôi sao ở một số thời điểm vào ban đêm khi ánh sáng truyền qua những lượng khí quyển trái đất khác nhau. Cuối cùng chúng ta thu được năng lượng F của ánh sáng của ngôi sao đi vào khí quyển trái đất trên một đơn vị diện tích sau một đơn vị thời gian (câu hỏi A1).

Việc đo F không cho chúng ta biết một điều gì về bản thân ngôi sao vì ánh sáng biểu kiến của ngôi sao phụ thuộc vào khoảng cách của ngôi sao. Tuy nhiên, chúng ta có thể đo cả F và khoảng cách d, khi đó

$$L = 4\pi d^2 F \qquad (8.2)$$

là năng lượng được phát bởi ngôi sao trong một đơn vị thời gian hay còn gọi là độ trưng của ngôi sao. Có thể biểu diễn L một cách thuận tiện theo đơn vị của độ trưng của Mặt Trời Lo. (Trong phần tiếp theo kí hiệu "o" đặc trưng cho giá trị của Mặt Trời). Một số ngôi sao có L lớn cỡ 10^6 Lo, một số ngôi sao có L bé hơn 10^{-4} Lo.

3. Nhiệt độ bề mặt : Các ngôi sao có màu đỏ là nguội, các ngôi sao có màu xanh lam là nóng. Màu sắc của một ngôi sao thường được xác định bằng cách đo thông lượng năng lượng được nhận qua các bộ lọc truyền qua 3 dải bước sóng xác định, ví dụ xanh lam, vàng và đỏ. Một ngôi sao có màu đỏ đậm như Betelgeuse hiện ra sáng nhất trong phim lọc màu đỏ và mờ nhất trong phim lọc màu xanh lam. Một ngôi sao giống như Mặt Trời hiện ra sáng nhất trong phim lọc màu vàng. Một ngôi sao màu xanh lam như Rigel hiện ra sáng nhất trong phim lọc màu xanh lam. Đối với các phép đo chi tiết hơn, chúng ta giả thiết rằng ngôi sao có phổ Planck. Hình dạng của phổ Planck chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ. Mỗi khi chúng ta đã đo được thông lượng năng lượng qua hai phim lọc, chỉ có một nhiệt độ phù hợp với quan sát. Một ngôi sao rất đỏ như Betelgeuse có nhiệt độ bề mặt vào khoảng 3,4 x 10^3 K, một ngôi sao có màu xanh lam đậm, giống như Rigel có nhiệt độ vào khoảng 11,2 x 10^3 K.

The nearest star is 1.3 pc or about 4 light years away. The light we now receive from that star left there about 4 years ago. The light reaching us now from Betelgeuse, at a distance of about 150 pc, left there about 500 years ago. We stopped our space travel somewhere near Betelgeuse, in the realm of stars. We have a great advantage over Copernicus and Galileo : we can imagine space travel. We can become familiar with the realm of stars, while Copernicus and Galileo could not.

*2) **Brightness of the stars.*** Astronomers usually list stars on a scale called the apparent magnitude. The scale ranges from m = -4.4 for Venus at its brightest, m = -1.5 for the brightest star, Sirius, m = 0 for Vega, m = +6 for the faintest star visible to the naked eye, on to +28 for the faintest points of light visible through the largest telescopes on Earth or through the Hubble Space Telescope. The magnitude scale is useful when one observes the sky with the naked eye, or by looking through a small telescope, or when one wants to give a rough idea of how faint an object is.

For more precise information, one measures the number of photons, of various colors, that are collected through a telescope and caught on a photographic film or by a photoelectric device. If one knows the efficiency of the film or device, and the diameter of the telescope, then one can find the energy per unit area and per unit time entering the telescope. Next, one must correct for the absorption of star light by our atmosphere. This is possible by observing the same star at several times of the night when the light has to pass different amounts of our atmosphere. Finally, one obtains the starlight energy per unit area and per unit time entering the Earth's atmosphere, F. [Question A1.]

The measurement of F does not tell us anything about the star itself, because the apparent brightness is influenced by the star's distance. However, once we have both F and the distance d, then:

$$L = 4\pi d^2 F \qquad (8.2)$$

is the energy emitted by the star per unit time, the star's luminosity. It is convenient to express L in units of the solar value, Lo. (In the following, the symbol o represents a value for the Sun.) Some stars have L as large as 10^6 Lo, some less than 10^{-4} Lo .

*3) **Surface temperature.*** Red stars are cool, blue stars are hot. The color of the star is usually evaluated by measuring the energy flux received through filters passing three specific wavelength bands, for instance in the blue, yellow, and red. A very red star like Betelgeuse appears brightest in the red filter and faintest in the blue filter. A star similar to the Sun appears brightest in the yellow filter. A blue star like Rigel appears brightest in the blue filter. For more detailed measurements, one assumes that the star has a Planck spectrum. The shape of the Planck spectrum depends only on the temperature. Once one has measured the energy flux through two filters, there is only one temperature that matches the observations. A very red star like Betelgeuse has a surface temperature of about 3.4×10^3 K, a very blue star like Rigel about 11.2×10^3 K. In principle, only two filters are needed. But starlight becomes redder as it travels from the star to us, because of dust between the

Về nguyên tắc, chỉ cần hai phim lọc. Nhưng ánh sáng của ngôi sao trở nên đỏ hơn khi nó đi từ ngôi sao tới chúng ta do bụi giữa các ngôi sao (chương IX) giống như Mặt Trời hiện ra đỏ ở gần hoàng hôn khi ánh sáng của nó truyền tới chúng ta qua bụi trong khí quyển trái đất. Phim lọc thứ ba có thể được sử dụng để đánh giá sự đỏ hoá này, bởi vậy hai phim lọc đầu tiên cho biết màu chính xác của ngôi sao.

Kích cỡ của ngôi sao: Trên các bức ảnh, các ngôi sao hiện ra như các chấm sáng bé xíu. Kích cỡ của các chấm ở trên bức ảnh cho chúng ta biết một cách sơ lược sự cuộn xoáy của khí quyển trái đất (nếu quan sát từ mặt đất) hoặc nó cho chúng ta biết về giới hạn phân giải của kính thiên văn (nếu quan sát từ Vũ trụ, chương XII). Kích cỡ của chấm trên ảnh không cho chúng ta biết về bán kính của ngôi sao. Bán kính của ngôi sao có thể thu được bằng cách giả sử rằng ngôi sao có phổ Planck, từ đó chúng ta biết:

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4 \qquad (8.3)$$

Vì chúng ta đã biết L và T, chúng ta xác định được R từ công thức này. Hầu hết bán kính của các ngôi sao được biểu diễn theo bán kính Ro của Mặt Trời.

Có những kiểu sao nào ? Liệu có phải các ngôi sao được phân loại theo các tổ hợp của L, T và R không? Không.

Hình VIII.2: (Xem cuối chương)

Sẽ là thuận tiện nếu biểu diễn các ngôi sao theo L và T của chúng như trên giản đồ L - T, hình VIII.2. Chú ý rằng T tăng từ phải sang trái, vì những lí do lịch sử. Mặt Trời được biểu diễn như một vòng tròn nhỏ.

Ký hiệu "x" biểu diễn 20 ngôi sao sáng nhất trên bầu trời, trong đó có Betelgeuse. Giả sử rằng chúng ta quyết định khám phá chỉ 20 ngôi sao sáng nhất này và Mặt Trời. Chúng ta có thể kết luận như thế nào bằng cách nhìn vào các kí hiệu x trên giản đồ L – T ? Chúng ta tìm thấy rằng 20 ngôi sao này sáng hơn rất nhiều so với Mặt Trời. Chúng cũng lớn hơn Mặt Trời. Mặt Trời hoàn toàn không phải là điển hình của các ngôi sao sáng.

Liệu có phải điều này nói lên rằng Mặt Trời là một ngôi sao không bình thường? Không. Hãy xem xét ví dụ tương tự sau đây: Giả sử rằng chúng ta đứng ở một góc phố ở Hà nội vào ban đêm.

Chúng ta quyết định quan sát chỉ những phương tiện có đèn sáng mà chúng ta có thể thấy được khi các phương tiện này ở cách xa vài ngã tư. Các phương tiện này là những ô tô. Chúng ta có thể quyết định như thế nào nếu chúng ta chỉ quan sát thấy những ô tô? Chúng ta nói rằng hầu hết người dân Hà Nội đi bằng ô tô. Nhưng điều này có thực sự đúng không? Tất nhiên là không. Chúng ta đã lựa chọn một mẫu các phương tiện không điển hình. Kết luận sai của chúng ta là do sự lựa chọn. Chúng ta cần phải làm gì nếu chúng ta muốn biết hầu hết dân chúng Hà nội đi lại bằng phương tiện gì ?

Chúng ta có thể đếm tất cả các phương tiện ở giữa chúng ta và ngã tư tiếp theo, dù chúng dễ hay khó quan sát. Khi đó chúng ta sẽ thấy chủ yếu là xe đạp, một số xe gắn máy và rất ít ôtô.

Chúng ta có thể chọn mẫu đúng cho các ngôi sao bằng cách nào? Chúng ta phải nghiên cứu các ngôi sao trong một phạm vi khoảng cách cố định kể từ Mặt Trời, không kể các ngôi sao đó dễ hay khó nhìn thấy. Những vòng tròn nhỏ có màu đen trên giản đồ L – T đại diện cho 20 ngôi sao ở gần chúng ta nhất. Hầu hết các ngôi sao này nằm trên một đường chéo trên giản đồ L–T, được gọi là giải chính. Chúng ta tìm thấy rằng hầu hết các ngôi sao này kém sáng hơn Mặt Trời, nhưng ba trong số những ngôi sao ở gần ta nhất, Sirius, α Centauri và Procyon, sáng hơn Mặt Trời.

stars (Chapter IX), much as the Sun appears red near sunset when its light travels to us through the dust in our atmosphere. The third filter can be used to evaluate the reddening, so that the first two filters give the correct color of the star.

The sizes of stars. On photographs, all stars appear as tiny dots. The size of the dots on a photograph merely informs us of the blurring by Earth's atmosphere (if observed from the ground) or it informs us of the limited resolution of the telescope (if observed from space, Chapter XII). The size of the dot on the photograph does not inform us about the radius of a star. The radius of a star must be derived by assuming it has a Planck spectrum, for then we know:

$$L = 4\pi\sigma R^2 T^4 \qquad (8.3)$$

Since we already know L and T, we determine R from the formula. Most star radii are expressed in terms of the solar radius Ro.

What kinds of stars are there? Do they come in all combinations of L, T, and R? No.

Figure VIII.2

It is useful to plot stars according to their L and T, as in the L-T diagram, fig. VIII.2. Note that T increases to the left, for historical reasons. The Sun is indicated as a small open circle.

The symbols x represent the 20 brightest stars in the sky, including Betelgeuse. Suppose we decide to investigate only these 20 brightest stars and the Sun. What can we conclude by looking at the symbols x in the L-T diagram ? We find that these 20 stars are much more luminous than the Sun is. They are also larger than the Sun.The Sun is not at all typical of the apparently bright stars.

Does that mean that the Sun is a very unusual star ? No. Consider the following analogy: Suppose we stand at a street corner in Hanoi at night.

We decide to watch only vehicles with bright lights that can be seen even when they are several street intersections away. These are the automobiles. What can we conclude if we watch only automobiles? We decide that most people in Hanoi travel in automobiles. But is that really true ? Of course not. We have selected a sample of vehicles that is not typical. Our wrong conclusion is caused by a selection effect. What should we do if we want to know how most people in Hanoi travel?

We can count all the vehicles between us and the next street intersection, no matter whether easy or hard to see. Then we find mostly bicycles, and several motorcycles, very few automobiles.

How can we correct the selection effect for the stars ? We must investigate all the stars within some fixed distance from the Sun, no matter whether they are easy to see or not. The small black circles in the L-T diagram represent the 20 nearest stars. Most fall along an approximately diagonal line in the L-T diagram called the main sequence. We find that most of them are less luminous than the Sun, but three of the nearest stars are more luminous, Sirius, α Centauri, and Procyon. You can identify them on the diagram using the Table below. We now find that the Sun is a fairly typical star, though somewhat more luminous than most.

Bạn có thể nhận ra chúng trên giản đồ bằng cách sử dụng bảng dưới đây. Bây giờ chúng ta thấy rằng Mặt Trời là một ngôi sao khá điển hình, dù nó có sáng hơn hầu hết các ngôi sao khác.

Hiệu ứng lựa chọn là rất quan trọng khi các nhà thiên văn phát hiện ra các thiên thể mới, như các tiểu hành tinh (chương VI) và các pulsar (ở cuối chương này) hoặc các quasar (chương X) vì chúng ta thường xuyên phát hiện ra các vật thể sáng nhất trước tiên. Thông thường, cần nhiều năm quan sát để tìm ra những ví dụ điển hình hơn của các thiên thể này.

Hai nhóm sao được chỉ ra trên giản đồ L-T đặc trưng cho một khoảng rất rộng về kích cỡ các ngôi sao. Hai ngôi sao ở gần chúng ta nhất, ở phía dưới bên trái cửa giản đồ L-T có bán kính chỉ khoảng 10^{-2} Ro, xấp xỉ kích cỡ của Trái Đất. Chúng được gọi là các sao trắt trắng. (Tính từ trắng được dùng không đúng. Ánh sáng Mặt Trời được định nghĩa là trắng. Các sao trắt trắng thực sự gần với màu xanh lam hơn). Những ngôi sao lớn nhất, ở phía trên bên phải, có bán kính tới 10^3 Ro. Chúng được gọi là các sao kềnh và các sao siêu kềnh. Nếu một trong số những sao lớn nhất, ví dụ Betelgeuse với R ~ 10^3 Ro, được tưởng tượng nằm vào vị trí của Mặt Trời thì ngôi sao này sẽ bao tất cả các hành tinh kiểu Trái Đất và có lẽ cả Mộc Tinh .

Các ngôi sao ở gần chúng ta nhất

Tên	L/Lo	T (10^3 °K)	d (pc)
α Cen A	1.4	5.8	1.3
Sao Barnard	$4.5x10^{-4}$	3.2	1.8
Wolf 359	$1.9x10^{-5}$	3.0	2.3
Lalande 21185	$5.5x10^{-3}$	3.6	2.5
Sirius A	24	9.2	2.6
Sirius B (w.d.)	$2.9x10^{-2}$	27	2.6
Luyten 726-8 A	$5.7x10^{-5}$	3.0	2.7
Luyten 726-8 B	$4.2x10^{-5}$	3.0	2.7
Ross 154	$4.8x10^{-4}$	3.4	2.9
Ross 248	$1.1x10^{-4}$	3.2	3.2

Những ngôi sao sáng nhất

Tên	L/Lo	T(10^3 °K)	d(pc)	cấp sao
Sirius A, αCMa	24	9.2	2.6	-1.5
Canopus, αCar	$1.3x10^3$	7.1	55	-0.7
α Cen A	1.4	5.8	1.3	-0.3
Arcturus, αBoo	100	4.4	11	-0.1
Vega, αLyr	49	9.5	8.1	0.0
Capella, αAur	134	4.9	4	0.0
Rigel, βOri A	$5.3x10^4$	11.2	250	0.1
Procyon, αCMiA	6.4	6.4	3.5	0.3
Betelgeuse, αOri	$6x10^4$	3.4	150	0.8
Achernar, αEri	640	18.7	20	0.5

Selection effects are very important when astronomers discover new objects, such as asteroids (Chapter VI) or pulsars (later in this Chapter) or quasars (Chapter X), because we always discover the brightest objects first. Often it takes years of observations to find the more typical examples of these objects.

The two groups of stars shown in the L-T diagram represent a very large range in star sizes. Two of the nearest stars, in the lower left part of the L-T diagram, have radii of only about 10^{-2} Ro, roughly the size of the Earth. They are called white dwarfs. (The adjective white is misleading. Sunlight is defined to be white. The white dwarfs are really more nearly blue.) The largest stars, in the upper right, have radii up to 10^{3} Ro. They are called, appropriately, giants and supergiants. If one of the largest stars, for example Betelgeuse with R ~ 10^{3} Ro, is imagined in the place of the Sun, then this star envelopes all the terrestrial planets and perhaps even Jupiter.

Nearest Stars

Name	L/Lo	T (in 10^{3}°K)	d (pc)
α Cen A	1.4	5.8	1.3
Barnard's star	4.5×10^{-4}	3.2	1.8
Wolf 359	1.9×10^{-5}	3.0	2.3
Lalande 21185	5.5×10^{-3}	3.6	2.5
Sirius A	24	9.2	2.6
Sirius B (w.d.)	2.9×10^{-2}	27	2.6
Luyten 726-8 A	5.7×10^{-5}	3.0	2.7
Luyten 726-8 B	4.2×10^{-5}	3.0	2.7
Ross 154	4.8×10^{-4}	3.4	2.9
Ross 248	1.1×10^{-4}	3.2	3.2

Brightest Stars

Name	L/Lo	T(in 10^{3}°K)	d(pc)	mag
Sirius A, αCMa	24	9.2	2.6	-1.5
Canopus, αCar	1.3×10^{3}	7.1	55	-0.7
α Cen A	1.4	5.8	1.3	-0.3
Arcturus, αBoo	100	4.4	11	-0.1
Vega, αLyr	49	9.5	8.1	0.0
Capella, αAur	134	4.9	4	0.0
Rigel, βOri A	5.3×10^{4}	11.2	250	0.1
Procyon, αCMiA	6.4	6.4	3.5	0.3
Betelgeuse, αOri	6×10^{4}	3.4	150	0.8
Achernar, αEri	640	18.7	20	0.5

Trong bảng, A và B biểu thị các sao đôi ; "w. d" biểu thị sao trắt trắng, α và β biểu thị các ngôi sao sáng nhất và các ngôi sao sáng thứ nhì trong một chòm sao. Tên của các ngôi sao là tên được sử dụng chủ yếu bởi cộng đồng thiên văn quốc tế sử dụng tiếng Anh.

4. Các sao đôi và khối lượng của các ngôi sao : Khối lượng của một ngôi sao là tính chất cơ bản nhất của nó. Tất cả các thông số khác, L, T, R, và sự thay đổi của ngôi sao theo thời gian được xác định bởi khối lượng của nó. Chúng ta đo khối lượng của Mặt Trời bằng cách sử dụng định luật thứ 3 của Kepler và thông tin về quỹ đạo của Trái Đất xung quanh Mặt Trời (chương III). Khối lượng của các ngôi sao có thể đo được khi chúng ta quan sát 2 ngôi sao quay xung quanh nhau. Các cặp sao quay quanh nhau được gọi là các sao đôi. Chúng ta đợi đủ lâu để đo chu kì quỹ đạo và bán trục chính của quỹ đạo, và sau đó sử dụng định luật thứ 3 của Kepler được mở rộng để tính đến cả khối lượng của 2 ngôi sao:

$$P^2(M_1 + M_2)/a^3 = 4\pi^2/G \qquad (8.4)$$

Hơn một nửa các ngôi sao thuộc vào các hệ sao đôi. Tuy nhiên, chỉ vài chục sao đôi được quan sát một cách kỹ lưỡng từ bề mặt Trái Đất để khối lượng của mỗi ngôi sao có thể đo được với độ chính xác tốt hơn 10%. Các quan sát của vệ tinh HIPPARCOS đã làm tăng con số này tới hơn một ngàn.

Với mỗi ngôi sao với khối lượng đã đo được, chúng ta cũng biết L và T. Chúng ta giả sử rằng mỗi ngôi sao với L và T có cùng khối lượng như ngôi sao đã được đo. Khối lượng của ngôi sao thay đổi từ 0.1 Mo ở phía dưới của dãy chính (phía dưới bên phải trên giản đồ L–T) tới khoảng 100 Mo ở phía trên (phía trên bên trái trên giản đồ L–T).

Hình VIII.3 : (Xem cuối chương)

Một ví dụ của việc xác định khối lượng được chỉ ra trên hình VIII.3 đối với ngôi sao Sirius. Sirius, một trong những ngôi sao ở gần chúng ta nhất, có thị sai đã đo được rất chính xác, 0,38", và khoảng cách 2,6 pc. Sirius thực sự gồm 2 ngôi sao, ngôi sao sáng được gọi là Sirius A và một sao trắt trắng được gọi là Sirius B, được chỉ ra trên giản đồ L – T. (Hình VIII.2). Ngôi sao này quá mờ, không quan sát được bằng mắt thường. Sirius B là ngôi sao trắt trắng đầu tiên được chụp ảnh vào năm 1862. Sirius A và Sirius B quay xung quanh nhau với chu kì P = 50 năm. Vị trí trên bầu trời của hai ngôi sao trong vài thập kỉ được chỉ ở bên trái của giản đồ. Quỹ đạo của chúng xung quanh khối tâm được chỉ ở phía trên, bên phải. Chuyển động của một ngôi sao đối với ngôi sao khác được chỉ ở phía dưới, bên phải. Ngôi sao được chọn làm mốc không nằm tại tiêu điểm của hình e líp. Bởi vậy, quỹ đạo không nằm trong mặt phẳng của bầu trời. Quỹ đạo thực dường như tròn hơn so với quỹ đạo mà chúng ta trông thấy. Chúng ta tìm thấy rằng bán trục chính của quỹ đạo là 7,6". Với d = 2,6 pc, 1" tương ứng với 2,6 đ.v.t.v ở khoảng cách của Sirius. Bởi vậy, bán trục chính là a = 20 đ.v.t.v. Nếu T được đo theo năm, a theo đ.v.t.v, và M theo khối lượng Mặt Trời Mo thì phương trình (8.4) trở thành $P^2(M_1 + M_2)/a^3 = 1$. (Hãy kiểm tra lại: điều này cũng phù hợp đối với Mặt Trời và Trái Đất, khi bỏ qua khối lượng của Trái Đất). Đối với Sirius, chúng ta tìm ra rằng $M_1 + M_2 = 3,1$ Mo. Cuối cùng, giản đồ ở phía trên, bên phải chỉ cho chúng ta thấy rằng một ngôi sao ở cách khối tâm khoảng 2 lần khoảng cách từ khối tâm tới ngôi sao khác, nói lên rằng $M_2/M_1 = 0,5$. Một cách chính xác hơn, $M_2/M_1 = 0,47$. Chúng ta tìm thấy rằng khối lượng của Sirius A là 2,1 Mo và khối lượng của Sirius B là 1,0 Mo (câu hỏi A2 và A3).

In the table, A and B denote binary stars; w.d. denotes white dwarf ; α and β denote the brightest and second-brightest stars in a constellation. The names of stars are those used by the mainly English-speaking international astronomical community.

4) Binaries and stellar masses. The mass of a star is its most fundamental property. All the other parameters, L, T, R and the changes of the star with time are determined by its mass. We measure the Sun's mass by using Kepler's third law and the information on the orbit of Earth around the Sun (Chapter III) . The mass of stars can be measured when we observe two stars orbiting around each other. Orbiting pairs of stars are called binaries. We wait long enough to measure the orbital period and the semi-major axis of the orbit, and then use Kepler's third law, extended to include the masses of both stars,

$$P^2(M_1 + M_2)/a^3 = 4\pi^2/G \qquad (8.4)$$

More than half of all stars occur in binary pairs. However, only a few dozen binaries are observed sufficiently well from the surface of Earth that the mass of each star can be measured to an accuracy better than 10%. The observations by the satellite HIPPARCOS have increased that number to over a thousand.

For each of the stars with measured mass, we also know L and T. We assume that every other star with that L and T has the same mass as the measured star. Star masses range from about 0.1 Mo at the low end of the main-sequence (lower right in the L - T diagram) to about 100 Mo at the high end (upper left in the L-T diagram).

Fig. VIII.3

An example of mass determination is shown in fig.VIII.3, for the star Sirius. Sirius, being one of the nearest stars, has a very well measured parallax, 0.38", and thus a distance of 2.6 pc. Sirius really consists of two stars, the bright star properly called Sirius A and a white dwarf, Sirius B, identified in the L-T diagram fig. VIII.2. It is too faint to be seen with the naked eye. Sirius B was the first white dwarf to be photographed, in 1862. Sirius A and B orbit around each other with a period P = 50 years. The positions on the sky of the two stars over several decades are shown on the left of the diagram. Their orbit about the center of mass is shown in the upper right. The motion of one star relative to the other is shown in the lower right. The reference star is not at the focus of the ellipse. Therefore, the orbit is not in the plane of the sky. The orbit is actually more nearly circular than it appears to us. We find that the semi-major axis of the orbit is 7.6" . With d = 2.6 pc, 1" corresponds to 2.6 A.U. at the distance of Sirius. Therefore, the semi-major axis is a = 20 A.U. If T is measured in years, a in A.U., and M in solar masses Mo, then equation (8.4) becomes $P^2(M_1 + M_2)/a^3 = 1$. (Check : This works for the Sun and Earth, with the mass of Earth neglected.) For Sirius, we find that $M_1 + M_2 = 3.1$ Mo. Finally, the diagram in the upper right shows us that one star is about twice as far from the center of mass than the other, suggesting $M_2/M_1 = 0.5$. More accurately, $M_2/M_1 = 0.47$. We find that the mass of Sirius A is 2.1 Mo and the mass of Sirius B is 1.0 Mo. [Questions A2 and A3.]

Hình VIII.4:

Chúng ta đã thực hiện 4 loại quan sát đối với các ngôi sao và đã suy ra các giá trị của L, R, T và M. Hình VIII.4 nêu lên sự tóm tắt.

5. Phổ của ngôi sao : Nếu chúng ta thu phổ của nhiều ngôi sao với những màu sắc khác nhau, thì phổ thu được trông sẽ khác nhau. Một số phổ dường như không có các vạch hấp thụ, một số phổ có nhiều vạch hấp thụ đến nỗi chúng đè lên nhau. Hơn một thế kỉ về trước, trước khi bản chất vật lí của phổ được biết tới, các phổ được nhóm lại một cách đơn giản và được kí hiệu bởi các chữ cái: phổ sao A, phổ sao B, v.v... Mặt Trời được phân loại như một ngôi sao G. Sự cải tiến đầu tiên diễn ra khi các nhà thiên văn nhận ra rằng phổ của các ngôi sao màu xanh lam có các vạch hấp thụ chủ yếu từ He, phổ của các ngôi sao như Mặt Trời chứa các vạch phổ hấp thụ chủ yếu của H, Ca, Na và Fe, và phổ của các ngôi sao màu đỏ chứa các vạch phổ hấp thụ của các phân tử. Sự giải thích đầu tiên cho rằng một số ngôi sao được tạo bởi He, một số được tạo bởi H, Ca, Na và Fe, và một số được tạo bởi các phân tử. Sự giải thích này là sai, như đã thực sự được đề cập tới trong mối liên hệ với Mặt Trời (chương VII). Vào năm 1925, Cecilia Payne-Gaposhkin đã chỉ ra trong luận án tiến sĩ của mình rằng tất cả các ngôi sao bình thường chứa chủ yếu là hiđrô, mặc dầu có rất nhiều nguyên tố khác xuất hiện trong phổ của chúng. Bà đã chỉ ra rằng các vạch xuất hiện trong phổ sao, cũng giống như màu sắc của các ngôi sao cho chúng ta biết trước hết về nhiệt độ bề mặt của các ngôi sao. Việc giải thích một cách chi tiết dựa vào vật lí nguyên tử về việc tại sao các sao nóng có các vạch He và tại sao chỉ những ngôi sao có nhiệt độ trung bình giống như Mặt Trời có các vạch H. Chỉ những ngôi sao rất nguội có các vạch phân tử vì các phân tử bị phá huỷ bởi các va chạm với nguyên tử trong các ngôi sao nóng hơn. Thứ tự của các phổ hiện nay là O B A F G K M, từ $T \sim 3x10^4$ K đối với các ngôi sao loại O tới $T \sim 3x10^3$ K đối với các ngôi sao loại M, Mặt Trời vẫn là một ngôi sao loại G, $T = 5,8x10^3$ K.

Các nhà thiên văn chuyên về giải thích phổ sao có thể nhìn vào nhiều chi tiết trên các vạch phổ, đặc biệt là độ rộng của vạch phổ và suy ra độ trưng của ngôi sao từ phổ. Mỗi khi họ biết L từ phổ và đo F, họ có thể tính được khoảng cách d. Điều này là rất hữu ích vì hầu hết các ngôi sao ở quá xa chúng ta và chúng ta không thể đo khoảng cách tới chúng bằng phương pháp thị sai.

CÁC SAO BIẾN QUANG

Hầu hết các ngôi sao ổn định và duy trì sự ổn định trong hàng ngàn hoặc thậm chí nhiều triệu năm. Tuy nhiên, một số ngôi sao co giãn: Chúng trở nên lớn hơn và bé hơn và chúng thay đổi độ trưng và phổ của chúng một cách đều đặn với một chu kỳ co giãn có thể đo được một cách dễ dàng. Loại sao co giãn được biết rõ nhất, các sao biến quang Cepheid, được mang tên ngôi sao δ Cephei. Một số sao biến quang Cepheid co giãn một lần trong một số ngày, một số sao biến quang Cepheid co giãn một lần trong một năm. Từ các sao biến quang Cepheid ở khá gần, chúng ta biết rằng chu kì co giãn có liên quan tới độ trưng của ngôi sao. Ví dụ, mỗi sao Cephei co giãn một lần trong hai tháng có độ trưng (được tính trung bình theo toàn chu kì co giãn) vào khoảng 10^4 Lo.

Các sao biến quang Cepheid là rất quan trọng đối với các nhà thiên văn vì chúng là những ngôi sao phát sáng rất mạnh bởi vậy chúng có thể được nhận ra từ khoảng cách rất xa. Khi chúng ta quan sát một ngôi sao Cephei ở xa với chu kì co giãn 2 tháng, chúng ta có thể lập tức suy ra độ trưng của nó, $L = 10^4$ Lo. Mỗi khi chúng ta đo thông lượng F, chúng ta có thể xác định khoảng cách của sao Cephei (phương trình 8.2). Khi một sao Cephei được quan sát thấy trong một thiên hà (chương X), chúng ta có thể biết không chỉ khoảng cách của sao Cephei ấy mà còn biết cả khoảng cách của toàn thiên hà vì tất cả hàng triệu ngôi sao trong thiên hà này trong thực tế có cùng khoảng cách đối với chúng ta.

We have now made four kinds of measurement on the stars, and deduced L, R, T and M. Fig. VIII.4 provides a summary.

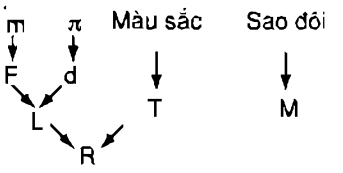


Fig. VIII.4

5) Stellar spectra. If one takes spectra of many stars of different colors, the spectra may look quite different. Some spectra have almost no absorption lines, some have so many lines that they overlap. Over a century ago, before the physics of the spectra were known, the spectra were simply grouped and given letters : A star spectra, B star spectra, and so on. The Sun was listed as a G star. A first improvement came when astronomers realized that spectra of blue stars show absorption lines mainly from He, spectra of stars like the Sun show absorption lines mainly of H, Ca, Na, and Fe, and spectra of red stars show absorption lines of molecules. The initial interpretation was that some stars are made of He, some of H, Ca, Na, and Fe, and some of molecules. This interpretation was wrong, as already mentioned in connection with the Sun (Chapter VII). In 1925, Cecilia Payne-Gaposhkin showed in her doctoral thesis that all normal stars consist of mostly hydrogen, even though so many other elements appear in their spectra. She showed that the lines appearing in stellar spectra, just like the stars' colors, tell us primarily about surface temperatures. Details of atomic physics explain why hot stars show He lines and why only stars of intermediate temperature like the Sun show H lines. Only very cool stars show lines from molecules because molecules are destroyed by atomic collisions in warmer stars. The order of spectra is now O B A F G K M, from $T \sim 3 \times 10^4$ K for O stars to $T \sim 3 \times 10^3$ K for M stars, with the Sun still a G star, $T = 5.8 \times 10^3$ K.

Astronomers specializing in interpretation of stellar spectra can look at many more details of the spectral lines, especially the width of spectral lines, and deduce a star's luminosity from the spectrum. Once they know L from the spectrum and measure F, they can deduce the distance d. This is very useful because most stars are too far away to measure their distance by parallax.

PULSATING STARS.

Most stars are steady and remain steady for thousands or even many millions of years. However, a few stars pulsate : they become larger and smaller, and they change their luminosity and spectrum in a regular fashion, with an easily measurable period of pulsation. The best known type of pulsating stars, the Cepheids, is named after the star δ Cephei. Some Cepheids pulsate once in as little as a day, others in as long as a year. From the reasonably nearby Cepheids, we learn that the period of pulsation is related to the luminosity of the star. For instance, every Cepheid pulsating once in two months has a luminosity (averaged over a pulsation period) of about 10^4 Lo.

Cepheids are very important to astronomers because they are very luminous stars, so that they can be recognized very far away. When we observe a distant Cepheid with a pulsation period of two months, we can immediately deduce its luminosity, $L = 10^4$ Lo. Once we measure the flux F, we can determine the distance of the Cepheid (equation 8.2). When a Cepheid is observed in a galaxy (Chapter X), we can learn not only the distance of that Cepheid but also the distance of the entire galaxy, because all the millions of stars in that galaxy are at practically the same distance from us.

Nếu thiên hà này là một thành viên của một đám gồm hàng trăm thiên hà (chương XI) thì chúng ta cũng có thể biết khoảng cách tới đám thiên hà ấy vì các thiên hà thành viên trong thực tế ở cùng khoảng cách đối với chúng ta. Một trong những nhiệm vụ chính của kính thiên văn vũ trụ Hubble là đo khoảng cách tới các sao biến quang Cephei trong các đám thiên hà ở gần chúng ta nhất. Sau đó khoảng cách này được dùng để xác định kích cỡ và tuổi của Vũ trụ (chương XI).

Các sao biến quang cũng đóng vai trò quan trọng đối với lí thuyết về bên trong của ngôi sao. Ở chương VII chúng ta thấy rằng sóng âm đo được trên bề mặt Mặt Trời có thể cho chúng ta biết về tốc độ âm ở mọi nơi trong Mặt Trời. Đối với các sao biến quang, chu kì co giãn cho chúng ta thông tin tương tự về tốc độ âm bên trong các sao biến quang. Tại sao tốc độ âm này liên quan tới chu kì co giãn ? Áp suất thay đổi được truyền qua khí với tốc độ âm. Ví dụ, khi nói, chúng ta tạo ra một sự thay đổi áp suất trong không khí truyền đi với tốc độ âm. Khi khí trong một ngôi sao chịu tác động của một áp suất quá lớn, nó chuyển động và bằng cách thay đổi áp suất, nó gửi tín hiệu truyền với tốc độ âm làm cho phần khí bên cạnh cũng chuyển động. Trong các sao biến quang, tất cả các lớp chuyển động vào phía trong hoặc ra ngoài đối với nhau với cùng chu trình. Chuyển động của chúng liên quan với nhau bằng cách gửi sóng âm tới nhau. Bởi vậy chu kì co giãn liên quan với thời gian cần thiết để sóng âm truyền qua ngôi sao.

Chúng ta có thể dự đoán một cách gần đúng thời gian cần thiết để sóng âm truyền qua một ngôi sao. Tốc độ của âm là $v_s \sim (p/\rho)^{1/2}$, trong đó p là áp suất và ρ là mật độ khí. Mật độ trung bình của ngôi sao là $\rho \sim M/R^3$. Từ phép tính tích phân đơn giản của Mặt Trời trong chương VII, phương trình (VII.6), $p \sim GM^2/R^4 \sim GM\rho/R$. Thời gian cần thiết để sóng âm truyền qua ngôi sao xấp xỉ bằng

$$\frac{R}{v_s} \sim R\sqrt{\frac{\rho}{p}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \qquad (8.5)$$

Do có số hạng $\rho^{-1/2}$ chúng ta dự đoán rằng các ngôi sao kém đậm đặc hơn có chu kì co giãn dài hơn. Các sao biến quang Cepheid chỉ có một dải khối lượng bé. Các sao biến quang Cepheid kém đậm đặc hơn thì lớn hơn và có độ trưng lớn hơn. Bởi vậy các sao biến quang phát sáng mạnh hơn, có chu kì co giãn lớn hơn. Mối quan hệ này giữa độ trưng và chu kì co giãn đã thực sự quan sát được (câu hỏi A4).

Trong nhiều năm, rất khó để làm phù hợp giữa lí thuyết và quan sát một cách chi tiết. Sự không phù hợp chủ yếu cũng giống như sự phân tích sóng âm quan sát được đối với Mặt Trời. Rất khó có thể tính toán xem nguyên tử hấp thụ và phát xạ bức xạ như thế nào trong khoảng nhiệt độ $T \sim 10^5$ K. Vấn đề này của vật lí nguyên tử hiện đã được giải quyết với độ chính xác khoảng 1%. Kết quả hiện đang được sử dụng không chỉ trong thiên văn học mà còn được sử dụng cả trong kĩ thuật công nghiệp liên quan đến nhiệt độ cao. (Đối với Mặt Trời, từ phương trình (8.5) chúng ta tính được chu kì co giãn vào khoảng 1 giờ. Sóng quan sát được trong 5 phút không làm cho toàn bộ Mặt Trời co giãn. Thay vào đó, sóng này truyền qua Mặt Trời.

CÁC HÀNH TINH Ở XUNG QUANH CÁC NGÔI SAO KHÁC

Mặt Trời là một ngôi sao khá bình thường. Nó có hành tinh. Bởi vậy, hầu hết các nhà thiên văn hi vọng rằng các ngôi sao khác cũng có hành tinh quay xung quanh chúng. Nhưng khó phát hiện các hành tinh này. Chúng ta không thể chụp ảnh được chúng vì chúng quá mờ so với một ngôi sao trung bình ở cạnh. Nhưng kĩ thuật của tương lai sẽ loại trừ được ánh sáng của ngôi sao.

If this galaxy is a member of a cluster of hundreds of galaxies (Chapter XI), then we also learn the distance to that cluster of galaxies because the member galaxies are at practically the same distance from us. A major accomplishment of the Hubble Space Telescope has been to measure the distance to Cepheids in the nearest cluster of galaxies. That distance then is used to help determine the size and age of the Universe (Chapter XI).

Pulsating stars are also important for the theory of stellar interiors. In Chapter VII we saw that sound waves measured on the surface of the Sun can inform us of the sound speed everywhere inside the Sun. For pulsating stars, the period of pulsation gives us similar information about the sound speed inside pulsating stars. Why is the sound speed related to the period of pulsation? Pressure changes are carried through gases at the speed of sound. For instance, when humans speak, we create pressure changes in the air that travel at the speed of sound. When gas in a star feels too much pressure, it moves and, by changing the pressure, it sends a signal traveling at the speed of sound that the next piece of gas also should move. In pulsating stars, all layers move inward or outward together, in the same cycle. Their motions have been coordinated by sending each other sound waves. Therefore, the pulsation period is related to the time needed for sound waves to travel through the star.

We can predict, approximately, how much time is needed for sound waves to cross a star. The sound speed is $v_s \sim (p/\rho)^{1/2}$, where p is pressure and ρ is gas density. An average density of the star is $\rho \sim M/R^3$. From the simple integration of the Sun in Chapter VII, equation (7.6), $p \sim GM^2/R^4 \sim GM\rho/R$. The time needed for a sound wave to cross the star is roughly

$$\frac{R}{v_s} \sim R\sqrt{\frac{\rho}{p}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \qquad (8.5)$$

Because of the factor $\rho^{-1/2}$, we predict that less dense stars have longer periods of pulsation. The Cepheids have only a small range in masses. The less dense Cepheids are the larger and more luminous ones. Therefore, the more luminous pulsating stars have longer periods of pulsation. This relation of luminosity to pulsation period is indeed observed. [Question A4.]

For many years it was difficult to match the theory and observations in detail. The main obstacle was the same as for the analysis of the Sun's observed sound waves. It was the difficult computation how atoms absorb and emit radiation in the temperature range $T \sim 10^5$ K. This problem of atomic physics has now been solved with an accuracy of about 1%. The results are being used not only in the science of astronomy but also in industrial technologies that involve high temperatures. (For the Sun, equation 8.5 yields a pulsation period of about an hour. The observed five-minute waves do not set the entire Sun to pulsate. Instead, these waves travel throughout the Sun.)

PLANETS AROUND STARS OTHER THAN THE SUN.

The Sun is a fairly normal star. It has planets. Therefore, most astronomers expect that other stars also have planets orbiting around them. But it has been difficult to detect those planets. They cannot yet be photographed because they are too faint compared to the immediately adjacent star. But future techniques will eliminate the star light.

Từ năm 1995, các hành tinh quay quanh có thể được phát hiện vì lực hấp dẫn của chúng hút ngôi sao và làm ngôi sao chuyển động. Trong trường hợp Mặt Trời, lực hấp dẫn của Mộc Tinh hút Mặt Trời làm cho Mặt Trời chuyển động trên một quỹ đạo nhỏ xung quanh khối tâm Mặt Trời - Mộc Tinh , với vận tốc 12 m/s. Tương tự, đối với ngôi sao khác, chuyển động của các ngôi sao được gây bởi các hành tinh gây ra một sự dịch chuyển Doppler rất nhỏ, thay đổi một cách thường xuyên cùng với chu kì quỹ đạo của hành tinh. Sự dịch chuyển Doppler thay đổi một cách đều đặn, nhỏ vào cỡ 10 m/s hiện nay có thể đo được đối với vài chục ngôi sao sáng. Tốc độ 10 m/s = 36 km/h là tốc độ điển hình của ô tô trên Trái Đất. Tốc độ này là cực bé so với tốc độ thông thường đo được trong thiên văn, vào cỡ km/s hoặc cao hơn. Cần phải đợi một số năm để phát triển các kỹ thuật của cả các phương pháp quan sát và phân tích dữ liệu bởi máy tính trước khi phát hiện ra các hành tinh.

Để minh hoạ việc phát hiện hành tinh, chúng ta hãy giả sử rằng chúng ta biết khối lượng M* của ngôi sao, mặt phẳng quỹ đạo nằm dọc theo đường ngắm, quỹ đạo hành tinh là tròn, và độ dịch chuyển Doppler của ngôi sao thay đổi theo thời gian theo qui luật hình sin, với chu kì P, và có biên độ đo được là v*. Hành tinh quay với vận tốc v mà chúng ta không quan sát được. Chúng ta muốn tìm khối lượng m của hành tinh và bán kính r của quỹ đạo. Ba phương trình cơ bản thu được từ sự bảo toàn xung lượng trong hệ quy chiếu khối tâm, từ giả thiết quỹ đạo tròn, và từ sự cân bằng giữa lực hấp dẫn và lực hướng tâm, nghĩa là

$$v^*/v = m/M^*,\ 2\pi r/P = v,\ v^2/r = GM^*/r^2 \qquad (8.6)$$

Việc khử ẩn v cho hai phương trình đối với r và m liên quan với các đại lượng quan sát được, v* và P, và đại lượng đã biết, M*. Chúng ta thu được

$$(m/M^*)^3 = v^{*3}P/(2\pi GM^*),\ r^3 = P^2 GM^*/4\pi^2 \qquad (8.7)$$

Phương trình thứ hai có dạng quen thuộc. Nó là định luật Kepler thứ ba. Nếu chúng ta biểu diễn m theo đơn vị khối lượng của Mộc Tinh ($m_J/Mo = 10^{-3}$), M* theo đơn vị của Mo, r theo đ.v.t.v, và P theo năm thì chúng ta thu được:

$$(m/m_J)^3 = 4.4\text{x}10^{-5} v^{*3} (P/1\text{ năm})\,(Mo/M^*),$$

$$(r/1\text{ đ.v.t.v})^3 = (P/1\text{ năm})^2 (M^*/Mo) \qquad (8.8)$$

trong đó v* vẫn được đo theo đơn vị m/s (câu hỏi A5).

Sau đây là hai thí dụ về những số liệu thu được: Đối với ngôi sao 47UMa, chúng ta đo M* = 1,05 Mo, v*(rad) = 44 m/s và P = 3 năm; và đối với sao 51Peg: M* = 1,0 Mo, v*(rad) = 58 m/s và P = 4,2 ngày. Bởi vậy, với 47UMa, m = 2,3 m_J, r = 2,1 đ.v.t.v; với 51Peg, m = 0,46 m_J, r = 0,05 đ.v.t.v.

Chúng ta đã đưa ra một giả thiết quan trọng: Mặt phẳng quỹ đạo nằm dọc theo đường ngắm của chúng ta. Nếu mặt phẳng quỹ đạo nghiêng đối với đường ngắm thì vận tốc quỹ đạo thực lớn hơn v* đo được và khối lượng thu được của hành tinh lớn hơn. Như vậy, phép tính nêu trên chỉ thu được khối lượng cực tiểu của hành tinh, $m_P > 2,3\ m_J$ với 47UMa, $m_P > 0,46\ m_J$ với 51Peg. Tuy nhiên nếu các mặt phẳng quỹ đạo định hướng ngẫu nhiên thì hầu hết khối lượng cực tiểu thu được sẽ nằm trong phạm vi một trăm lần khối lượng thực của hành tinh.

Since 1995, orbiting planets can be detected because their gravity pulls on the star and makes the star move. In the case of the Sun, Jupiter's gravitational pull on the Sun causes the Sun to perform a small orbit around the Jupiter-Sun center of mass, with a velocity of 12 m/s. Similarly for other stars, the star motion caused by planets results in a very small Doppler shift, which changes regularly with the orbital period of the planet. Periodically changing Doppler shifts as small as 10 m/s can now be measured for a few dozen bright stars. A speed of 10 m/s = 36 km/hour is a typical speed of automobiles on Earth. It is extremely slow compared to speeds normally measured in astronomy, of the order of km/s and higher. Several years were needed for the technical development of both the observational methods and the data analysis by computer before planets could be detected.

To see how this detection works, let us assume that we know the mass of the star, M*, that the orbital plane is along the line of sight, that the planet orbit is circular, and that the Doppler shift of the star changes sinusoidally with time, with period P, and has an amplitude measured to be v*. The planet orbits with a velocity v which we cannot observe. We want to find the mass of the planet, m, and the radius of the orbit, r. The three fundamental equations derive from the constant momentum in the center-of-mass frame, from the assumption of a circular orbit, and from the balance between gravity and centripetal force, that is,

$$v^*/v = m/M^* , \quad 2\pi r/P = v , \quad v^2/r = GM^*/r^2 \tag{8.6}$$

Elimination of the unknown v gives two equations for r and m involving the observed quantities v* and P, and the known M*. One obtains

$$(m/M^*)^3 = v^{*3} P/(2\pi GM^*) , \quad r^3 = P^2 GM^*/4\pi^2 \tag{8.7}$$

The second equation should look familiar. It is just Kepler's third law. If we express m in units of Jupiter's mass ($m_J/Mo = 10^{-3}$), M* in units of Mo, r in units of A.U., and P in years, we obtain:

$$(m/m_J)^3 = 4.4\times10^{-5} v^{*3} (P/1\text{ year}) (Mo/M^*) ,$$
$$(r/1\text{A.U.})^3 = (P/1\text{ year})^2 (M^*/Mo) \tag{8.8}$$

where v* is still in units of meters/s. [Question A5.]

Here are two examples of the data obtained : for the star 47UMa, we measure M* = 1.05 Mo, v*(rad) = 44 meters/s, and P = 3 years; and for 51Peg: M* = 1.0 Mo, v*(rad) = 58 meters/s, and P = 4.2 days. Therefore, for 47UMa, m = 2.3 m_J, r = 2.1 A.U.; for 51Peg, m = 0.46 m_J, and r = 0.05 A.U.

We made an important assumption : the orbital plane is along our line of sight. If the orbital plane is inclined to the line of sight, the actual orbital velocity is larger than the measured v* and the deduced mass of the planet is larger. Thus the above procedure yields only a minimum planet mass, $m_p > 2.3\ m_J$ for 47UMa, $m_p > 0.46\ m_J$ for 51 Peg. However, if the orbital planes are randomly oriented, then most deduced minimum masses will be within a factor two of the actual planetary masses.

Cuối cùng chúng ta đã phát hiện được các hành tinh!

Biết rằng hiện nay chúng ta không thể đo được các vận tốc sao $v^* < 3$ m/s, hiện nay chúng ta chỉ có thể phát hiện được các hành tinh có khối lượng tương tự khối lượng của Mộc Tinh, quay trên các quỹ đạo ở cách ngôi sao một khoảng cách không xa hơn khoảng cách từ Mộc Tinh tới Mặt Trời. Thế mà cuối cùng chúng ta đã phát hiện được các hành tinh xung quanh các ngôi sao khác! Kết quả là gì? Thật đáng ngạc nhiên! Không ai có thể tiên đoán được sự phong phú của các quỹ đạo mà chúng ta đã phát hiện được.

i) Một số hành tinh như hành tinh 47UMa thực sự tương tự như Mộc Tinh về khối lượng cực tiểu và bán kính quỹ đạo.

ii) Một vài hành tinh như 51Peg có quỹ đạo gần tròn nhưng chúng ở gần ngôi sao một cách đáng ngạc nhiên, với chu kì quỹ đạo cỡ vài ngày. Với khối lượng tương tự Mộc Tinh của chúng, người ta hi vọng rằng các hành tinh này là khí (chủ yếu là hiđrô, giống như Mộc Tinh). Bằng cách nào khí quyển tạo bởi khí ở rất gần ngôi sao lại có thể sống sót dù chịu sự nung nóng mạnh của ngôi sao? Liệu các hành tinh chỉ mới hình thành gần đây hay có lẽ hay chúng mới tới vị trí hiện nay của chúng từ một quỹ đạo lớn hơn? Có lẽ cả hai. Hiện nay, trong khi chúng ta có những sự quan sát này, các nhà lí thuyết sử dụng lí thuyết hỗn loạn (chương VI) phát hiện ra rằng quỹ đạo của các hành tinh có thể thay đổi một cách đáng kể trong khoảng thời gian khoảng 10^8 năm trong khi các hành tinh vẫn đang hình thành.

iii) Một số vật thể thu được là rất hướng tâm, nghĩa là có quỹ đạo elíp trải dài, rất khác với quỹ đạo của các hành tinh của Mặt Trời. Những sự quan sát này không hoàn toàn phù hợp với lí thuyết cho rằng các hành tinh tạo thành từ một đĩa khí và bụi quay xung quanh ngôi sao trung tâm. Rất có thể hơn là những vật thể này là những ngôi sao đồng hành bé. Chúng đã được tạo thành vào cùng thời điểm như ngôi sao chính, từ cùng một đám mây khí (chủ yếu là hiđrô), trước thời điểm khi đám mây khí có thể lắng đọng lại trong một đĩa để tạo thành các hành tinh. Chúng khác với những ngôi sao bình thường vì phản ứng hạt nhân không bao giờ bắt đầu tại tâm của chúng.

Vào năm 1999 số liệu được tích luỹ sau một khoảng thời gian đủ dài để nhận ra rằng ngôi sao υAnd có ba hành tinh quay xung quanh với khối lượng tương ứng bằng 0,75, 2, và 4 lần khối lượng Mộc Tinh. Những hành tinh này không thể là những bạn sao đồng hành. Chúng ta đã phát hiện ra hệ hành tinh đầu tiên! Hai trong số các hành tinh ở cách ngôi sao những khoảng cách bé hơn 1 đơn vị thiên văn, gần một cách đáng ngạc nhiên, như đã được mô tả ở phần ii) trên đây.

Tới cuối năm 2001, người ta đã phát hiện được hơn 50 hành tinh chuyển động xung quanh các ngôi sao khác. Nhờ việc quan sát tốt hơn, trong thời gian dài hơn, cùng với việc xử lí số liệu bằng máy tính đã được cải tiến, người ta đã phát hiện được hai hành tinh có khối lượng bé như Thổ Tinh. Mọi người hy vọng rằng sẽ phát hiện thêm nhiều hành tinh bé hơn trong những năm tiếp theo.

At last we have detected planets!

Given that $v^* < 3$ m/s cannot now be measured, we can now detect only planets with masses similar to Jupiter, orbiting at distances from the star not greater than Jupiter is from the Sun. Nevertheless, we have finally detected planets around other stars! What are the results? Surprise! No one expected the variety of orbits that have been detected so far.

i) Some planets such as the planet of 47UMa are indeed similar to Jupiter in minimum mass and orbital radius.

ii) Several planets such as the planet of 51Peg have nearly circular orbits but they are at a surprisingly small distance from the star, with orbital periods of merely a few days. With their Jupiter-like masses, one expects these planets to be gaseous (mostly hydrogen, like Jupiter). How can gaseous atmospheres so close to the star survive the intense heating by the star? Have the planets formed only recently or, perhaps, have they recently arrived from a larger orbit? Probably both. Now that we have these observations, theoreticians using chaos theory (Chapter VI) discover that the orbits of planets can change significantly during the time interval of roughly 10^8 years while planets are still forming.

iii) Some of the derived objects have very eccentric, that is very elongated elliptical orbits, very different from any planet of the Sun. These observations do not fit at all to the theory that planets form from a disk of gas and dust revolving around the central star. More probably, these objects are small companion stars. They were formed at the same time as the main star, out of the same cloud of (mostly hydrogen) gas, before the time when the gas cloud could settle into a disk to form planets. They are different from ordinary stars because nuclear fusion never starts at their centers.

In 1999, data accumulated for enough years to recognize that the star υ And is orbited by three planets, with 0.75, 2, and 4 times Jupiter's mass. These cannot be stellar companions. We have discovered the first planetary system! Two of the planets are less than 1 A.U. from the star, surprisingly near as described in ii) above.

As of the end of year 2001, over 50 planets have been detected moving around stars other than the Sun. Because of better and longer observations and improved computer data reductions, two planets have been discovered with a mass as small as Saturn. Everybody expects many more smaller planets will be discovered over the next few years.

CÂU HỎI

A1) Hãy tính độ trưng của một ngôi sao biết rằng trong mỗi giây máy thu của bạn thu được 10^{10} photon phát ra từ ngôi sao đó ở một bước sóng trung bình $\lambda = 500$ nm. (1 nm = 10^{-9} m). Hiệu suất của máy thu là 20%, kính thiên văn có bán kính 1 m, khí quyển truyền qua 50% ánh sáng tới và khoảng cách của ngôi sao là d = 1.5 pc.

A2) Giả sử rằng chúng ta quan sát một cặp sao đôi. Sao thứ nhất chuyển động tương đối đối với sao thứ 2 theo một quỹ đạo e líp có e = 0,5. Sao 2 hiện ra chính xác tại tâm của e líp này. Chuyển động của các ngôi sao có thể diễn ra trên mặt phẳng của bầu trời được không? Sự giải thích của bạn về những dữ liệu này là gì ?

A3) Khi đánh giá khối lượng của Thiên Lang A và Thiên Lang B chúng ta đã coi rằng chúng cách đều ta để ước tính bán trục lớn của quỹ đạo. Phép gần đúng ấy có hợp lí không?

A4) Trong câu hỏi (3) của chương VI, chúng ta ước tính thời gian rơi tự do của một đám mây có mật độ ban đầu ρ xấp xỉ bằng $(G\rho)^{-1/2}$. Hãy so sánh thời gian đó với chu kì co giãn của một sao biến quang, phương trình 8.5. Hiện tượng vật lí nào làm cho 2 phương trình đó có dạng tương tự?

A5) Hãy kiểm tra lại rằng hai phương trình thu được (8. 8) có thể áp dụng được đối với Mộc Tinh.

QUESTIONS

Question A1: calculate the luminosity of a star from which your detector records 10^{10} photons per sec at an average wavelength λ = 500 nm. (1 nm = 1 nanometer = 10^{-9} m.) The detector has 20% efficiency, the telescope has a radius of 1 meter, the atmosphere transmits 50% of the light, and the distance to the star is d = 1.5 parsecs.

Question A2: Suppose we observe a binary pair of stars. The motion of star 1 relative to star 2 is an ellipse with e = 0.5. Star 2 appears exactly in the center of the ellipse. Can these motions be in the plane of the sky? What is your interpretation of these data?

Question A3: In estimating the masses of Sirius A and B, we used the same distance to both stars in order to evaluate the semi-major axis. Is that approximation reasonable?

Question A4: In question (3) of Chapter VI, we estimated the free-fall time for a cloud of initial density ρ to be roughly $(G\rho)^{-1/2}$. Compare this time with the period of pulsation of a pulsating star, equation 8.5 . What physics makes the two equations appear so similar?

Question A5: Check that the two derived equations (8.8) work for Jupiter.

Chương VIII.B

CÁC NGÔI SAO : SỰ SỐNG VÀ SỰ TẬN CÙNG CỦA CHÚNG

Hầu hết các ngôi sao chiếu sáng do phản ứng hạt nhân ở bên trong lòng nó. Nhiên liệu hạt nhân được sử dụng dần dần. Bởi vậy, các ngôi sao phải thay đổi theo thời gian. Các ngôi sao phải kết thúc cuộc đời của chúng bằng một cách nào đó. Chúng phải được tạo thành bằng một cách nào đó. Hầu hết các nhà thiên văn sử dụng một sự tương tự thuận tiện: Chúng ta nói về cuộc đời của ngôi sao, có nghĩa là nó có sự sinh (hình thành), tuổi trẻ, giai đoạn chính trong cuộc đời, giai đoạn tuổi già, và cái chết (kết thúc).

Giản đồ L - T ở hình VIII.2 miêu tả các ngôi sao như chúng đang tồn tại hiện nay. Mỗi ngôi sao hiện nay được biểu diễn bởi một chấm trên giản đồ. Nếu chúng ta tưởng tượng quan sát cùng ngôi sao đó nhiều năm về trước thì các giá trị của L và T đã khác đi. Trên giản đồ L – T, cùng ngôi sao này đã được biểu diễn bởi một chấm khác. Theo thời gian, chấm biểu diễn một ngôi sao dịch chuyển trên giản đồ. Đường này được gọi là "vết tiến hoá" trên giản đồ L – T.

Hình VIII.5 : (Xem cuối chương)

Giản đồ L - T với vết tiến hoá của Mặt Trời và một vết tiến hoá được đơn giản hoá của một ngôi sao có khối lượng gấp khoảng 20 lần khối lượng Mặt Trời. Đường chấm chấm biểu diễn giải chính. Chấm biểu diễn Mặt Trời khi sự tổng hợp H bắt đầu.

SỰ TIẾN HOÁ CỦA MẶT TRỜI

Sự sinh (sự hình thành)

Khoảng 4,6 x 10^9 năm về trước, một đám mây khí giữa các ngôi sao co lại để tạo thành Hệ Mặt Trời (chương VII). Phần trung tâm của đám mây dần dần trở nên nhỏ hơn và đậm đặc hơn. Nó trở nên không trong suốt đối với ánh sáng hồng ngoại và ánh sáng khả kiến. Sau đó phần trung tâm này của đám mây chiếu sáng từ một bề mặt rất giống quang quyển của Mặt Trời. Dần dần bề mặt trở nên nóng hơn. Khi nhiệt độ bề mặt đạt tới khoảng 10^3 K, vật thể trông rất giống một ngôi sao mới, một tiền sao, tiền Mặt Trời. Nó được ghi trên giản đồ L–T ở hình VIII.5 như là chấm đầu tiên của vết tiến hoá của Mặt Trời.

Tuổi trẻ (tiền sao) :

Phần bên trong của tiền Mặt Trời nhanh chóng trở nên cân bằng thủy tĩnh (chương VII). Áp suất và nhiệt độ cao nhất ở tâm và giảm khi đi ra ngoài. Nhưng sự cân bằng này không thể duy trì mãi mãi vì ngôi sao bức xạ và năng lượng thoát ra ngoài. Điều này có nghĩa là có một sự giảm của nhiệt và áp suất nâng đỡ từ bên trong. Tiền Mặt Trời phải thay đổi như thế nào để sự cân bằng thuỷ tĩnh nâng mỗi lớp có thể được duy trì chống lại sự mất bức xạ này? Câu trả lời là: Tiền Mặt Trời phải trở nên nhỏ hơn một cách từ từ để các khí bên trong dần dần trở nên đậm đặc hơn. Vì chúng bị nén, chúng trở nên nóng hơn. Sự nóng lên bởi sự nén làm tăng áp suất đủ để nâng mỗi lớp và giải phóng nhiệt bức xạ ra ngoài.

Chapter VIII B

STARS : THEIR LIVES AND THEIR FATES

Most stars shine because of nuclear fusion in the interior. The nuclear fuel is gradually used up. Therefore, the stars must change with time. The stars must end in some way. They must have been formed in some way. Most astronomers use a convenient analogy : We speak of the life of a star, meaning that it has a birth (formation), a youth, a main life stage, a senile period, and death (end).

The L-T diagram figure VIII.2 describes stars as they are now. Any one star now is represented by a dot in the diagram. If we imagine observing the same star many years ago, its values of L and T then were different. In the L-T diagram, the same star was represented by a different dot. With time, the dot representing a star moves through the diagram. The path is usually called an "evolutionary track" in the L-T diagram.

Figure VIII.5

L-T diagram with evolutionary track of the Sun and a very simplified track of a star with about 20 Mo. The dashed line represents the main-sequence. The dot represents the Sun when H fusion started.

SOLAR EVOLUTION.

Birth (formation).

About 4.6×10^9 years ago, a cloud of gases between the stars contracted to form the solar system (Chapter VII). The central part of the cloud became ever smaller and denser. It became opaque to infrared and visible light. Thereafter, this central part of the cloud was shining from a surface much like the solar photosphere. Gradually the surface became warmer. When the surface temperature reached about 10^3 K, the object appeared like a new star, a proto-star, the proto-Sun. It is recorded on the L-T diagram fig. VIII.5 as the first point of the Sun's evolutionary track.

Youth (proto star).

The interior of the proto-Sun quickly comes into hydrostatic equilibrium (Chapter VII). The pressure and temperature are highest at the center and decrease outwards. But this equilibrium cannot be maintained forever, because the star radiates and energy escapes. That means a decrease of heat and pressure support inside. How can the proto-Sun adjust so that hydrostatic support of each layer can be maintained despite the loss of radiation? The answer is : The proto-Sun must become smaller, slowly, so that the interior gases gradually become more dense. Because they are being compressed, they become warmer. The warming by compression raises the pressure enough to support each layer and also releases heat to be radiated away.

Vết ở phía bên phải của giản đồ L - T cho chúng ta thấy sự tiến hoá tính toán được của tiền Mặt Trời khi nó dần dần co lại tới kích cỡ hiện nay. Trong khi bán kính trở nên khoảng 10^2 lần bé hơn, nhiệt độ bề mặt tăng chỉ khoảng 3 lần. Sự tiến hoá này diễn ra trong khoảng 3×10^7 năm (câu hỏi B1).

Giai đoạn chính (ngôi sao ở dải chính):

Trong khi tiền Mặt Trời co lại, khí ở tâm của nó bị nén và trở nên nóng hơn. Cuối cùng khi R đạt tới Ro, và L đạt tới khoảng 0,8Lo, tâm trở nên đủ nóng để sự tổng hợp hiđrô bắt đầu tại tâm. Đây là sự bắt đầu của Mặt Trời như chúng ta biết về nó. Sau đó Mặt Trời gần như ở trạng thái ổn định trong khoảng 10^{10} năm. Đây là giai đoạn chính của cuộc đời nó, được mô tả ở chương VII. Trên giản đồ L-T, Mặt Trời là một chấm duy trì gần như ở cùng một vị trí trên dải chính trong 10^{10} năm. Cuộc đời ổn định dài này yêu cầu không chỉ sự cân bằng thuỷ tĩnh. Năng lượng nhiệt cũng phải ở trạng thái cân bằng. Toàn bộ nhiệt được tạo ra tại tâm dần dần được chuyển ra ngoài bề mặt mà không tích tụ tại bất cứ một lớp nào. Tại bề mặt tất cả năng lượng bức xạ vào vũ trụ.

Hiện nay Mặt Trời là một ngôi sao đã ở trong dải chính được $4{,}6 \times 10^9$ năm, dường như một nửa giai đoạn chính của cuộc đời nó. Việc L đã tăng chỉ khoảng 30% trong toàn bộ thời gian này là quan trọng đối với sự tiến hoá của sự sống trên Trái Đất.

Tuổi già:

Điều gì xảy ra khi nhiên liệu hiđrô gần như được sử dụng hết tại tâm? Khi đó phản ứng hạt nhân của hiđrô chậm lại, có ít nhiệt được tạo ra hơn và có ít áp suất nâng đỡ hơn. Một lần nữa, cần có sự nâng đỡ áp suất mới. Áp suất này xuất hiện khi khí tại tâm co lại một cách từ từ. Sự co lại làm nóng khí. Nhiệt độ tại tâm tăng một cách từ từ.

Một hiện tượng mới diễn ra khi nhiệt độ tại tâm đạt tới 10^8 K. Ở nhiệt độ này, $3\ {}^4He \Rightarrow {}^{12}C + \gamma$; 3 hạt nhân He có thể tổng hợp thành 1 hạt nhân C, với một phần khối lượng biến đổi thành nhiệt. Như vậy He còn dư từ sự tổng hợp H, trở thành nhiên liệu hạt nhân mới. Nó tạo cho Mặt Trời một cuộc sống mới. Độ trưng của Mặt Trời đạt tới giá trị $L \sim 10^4$ Lo. Lượng bức xạ lớn này chỉ có thể thoát ra từ Mặt Trời khi phần ngoài của Mặt Trời trở nên lớn hơn nhiều, $R \sim 100$Ro. Mặt Trời trở thành một sao kềnh đỏ, như được chỉ trên giản đồ L-T. Tại thời điểm này, Mặt Trời trở nên lớn đến nỗi Thuỷ Tinh nằm bên trong Mặt Trời. Toàn bộ nước sẽ bốc hơi và thoát khỏi Trái Đất. Sự sống sẽ không tồn tại trên Trái Đất. Một vệ tinh của Thổ Tinh có thể thích hợp cho sự sống (câu hỏi B2).

He có sẵn cho sự tổng hợp hạt nhân được sử dụng một cách nhanh chóng. Mặt Trời tồn tại như một sao kềnh đỏ chỉ trong khoảng 10^8 năm, khoảng 1% toàn bộ cuộc đời Mặt Trời. Sau đó Mặt Trời phóng một lớp khí. Chúng ta nhìn thấy những lớp khí này xung quanh các ngôi sao khác, giống như Mặt Trời, nhưng già hơn. Bức ảnh của Tinh vân Chiếc nhẫn, hình VIII.6, là một ví dụ. Khoảng 10^4 năm về trước, khí này được thổi vào vũ trụ bởi một ngôi sao mà hiện nay chúng ta nhìn thấy ở nhân của Tinh vân. Nếu chúng ta nhìn ngược vào 10^4 năm kể từ hiện nay, Tinh vân sẽ lớn gấp hai lần và mờ hơn nhiều.

Mỗi khi Mặt Trời đã mất các lớp bên ngoài của nó thì tất cả những gì còn lại là He và C, sản phẩm còn lại của phản ứng tổng hợp hạt nhân. Các khí này mất nhiệt còn lại của chúng bằng cách bức xạ. Mặt Trời co tới $R \sim 10^{-2}$ Ro, xấp xỉ kích cỡ Trái Đất, sau khoảng 10^4 năm. Khoảng thời gian này là rất ngắn! Nếu chúng ta nhìn vào Tinh vân Chiếc nhẫn sau 10^4 năm nữa, ngôi sao ở tâm sẽ dường như không được nhìn thấy.

The track on the right side of the L-T diagram shows the computed evolution of the proto-Sun as it gradually shrinks to its present size. While the radius becomes about 10^2 times smaller, the surface temperature increases only by about 3 times. This evolution takes about $3x10^7$ years. [Question B1.]

Main life stage (main sequence star).

While the proto-Sun shrinks, its central gases are compressed and become hotter. Finally, when R reaches Ro and L about 0.8Lo, the center becomes hot enough so that hydrogen fusion starts at the center. This is the beginning of the Sun as we know it. Then the Sun remains nearly constant for about 10^{10} years. This is its main life stage, described in Chapter VII. On the L-T diagram, the Sun is a dot that remains almost in the same place on the main sequence, for 10^{10} years. This long, steady life requires more than merely hydrostatic equilibrium. Thermal energy must also be in equilibrium. All the heat produced at the center gradually migrates toward the surface without accumulating at any one layer. At the surface, all the energy is radiated into space.

The Sun now has been a main sequence star for $4.6x10^9$ years, almost half of its total main life stage. That L has increased by only 30% in all that time has been important for the evolution of life on Earth.

Senility.

What happens when the hydrogen fuel is nearly used up at the center? Then the nuclear fusion of hydrogen slows down, there is less heat produced and less pressure support. Once again, new pressure support is needed. It becomes available when the gas at the center contracts, slowly. The compression heats the gas. The central temperature increases, slowly.

A new phenomenon occurs when the temperature at the center reaches 10^8K. At this temperature, $3\ ^4He \Rightarrow\ ^{12}C + \gamma$; three helium nuclei can fuse into one carbon nucleus, with a fraction of the mass converted into heat. Thus the helium, left over from hydrogen fusion, becomes a new nuclear fuel. It gives the Sun a brief new life. The solar luminosity rises to $L \sim 10^4$ Lo. This much radiation can escape from the Sun only if the outer parts of the Sun become much larger, R ~ 100Ro. The Sun becomes a red giant, as shown in the L-T diagram. At that time, the Sun will be so large that Mercury is inside the Sun. All water will evaporate and escape from Earth. No life will exist on Earth. A moon of Saturn may be habitable. [Question B2.]

The helium available for fusion is used up rapidly. The Sun lasts as a giant only about 10^8 years, about 1% of the Sun's lifetime. Then the Sun ejects a shell of gas. We see these shells of gas around other old, Sun-like stars. The photograph of the Ring Nebula, Figure VIII.6, is an example. Roughly 10^4 years ago, this gas was blown into space by the star now seen at the center of the nebula. If we look again 10^4 years from now, the nebula will be twice as large and very much fainter.

Once the Sun has lost its outer layers, all that is left over are He and C, the remains of the nuclear fusion. These gases lose their remaining heat by radiation. The Sun contracts to $R \sim 10^{-2}$ Ro, about the size of Earth, in roughly 10^4 years. This time is very short ! If we look at the Ring Nebula 10^4 years from now, the central star will be nearly invisible.

Hình VIII.6: (Xem cuối chương)

Tinh vân Chiếc nhẫn: khi được bắn bởi một ngôi sao già xuất hiện ở giữa vành. Các ngôi sao khác không liên quan tới tinh vân. Hầu hết ánh sáng từ Tinh vân là ánh sáng đỏ, với bước sóng 656,3 nm đặc trưng cho hiđrô nóng (Ảnh: Hale Observatories).

Cái chết:

Khi Mặt Trời trở nên nhỏ vào cỡ R ~ 10^{-2} Ro, một áp suất mới trở nên quan trọng. Áp suất này được cung cấp bởi các electron và được giải thích bởi lí thuyết lượng tử. Vào năm 1930, S. Chandrasekhar, một sinh viên 20 tuổi người Ấn Độ đã chứng tỏ rằng áp suất electron này có thể nâng ngôi sao thắng lực hấp dẫn. Một ngôi sao được nâng đỡ bởi áp suất electron này là một sao trắt trắng (câu hỏi B3).

Mặt Trời sẽ duy trì như là một ngôi sao trắt trắng mãi mãi. Nó sẽ chiếu sáng ra xa một cách từ từ nhiệt bên trong còn lại của nó và nó sẽ nguội dần. Nó sẽ không co lại nữa. Nếu có hành tinh tồn tại xung quanh Mặt Trời, chúng sẽ bị đóng băng.

SỰ TIẾN HOÁ CỦA SAO

Chúng ta không biết tại sao một số ngôi sao, khi chúng tạo thành, tập hợp nhiều khối lượng hơn so với Mặt Trời. Nhưng có nhiều ngôi sao có khối lượng lớn hơn Mặt Trời, thậm chí một số ngôi sao có khối lượng gấp 100 lần khối lượng Mặt Trời. Khối lượng lớn hơn so với Mặt Trời nghĩa là lực hấp dẫn bên trong phải lớn hơn. Điều này có nghĩa rằng ngôi sao cần áp suất bên trong lớn hơn. Điều này có nghĩa là ở gần tâm của ngôi sao phải nóng hơn so với ở gần tâm của Mặt Trời. Bởi vậy hiđrô tổng hợp thành He nhanh hơn nhiều (Quá trình tổng hợp hơi khác so với quá trình được miêu tả đối với Mặt Trời). Các ngôi sao có khối lượng lớn có độ trưng rất lớn. Chúng hiện ra như những ngôi sao có màu xanh lam ở phần trên của dải chính.

Độ trưng lớn có nghĩa rằng các ngôi sao có khối lượng lớn tiêu thụ năng lượng hạt nhân của chúng rất nhanh và có cuộc đời ngắn hơn nhiều so với Mặt Trời. Trong thực tế, các quá trình diễn ra nhanh hơn ở trong các ngôi sao có khối lượng lớn so với ở trong Mặt Trời. Ở giai đoạn tuổi trẻ dưới dạng một tiền sao, thời gian để co lại có thể chỉ là 10^5 năm. Chúng trải qua cuộc đời chính của chúng như một ngôi sao có màu xanh lam ở phía trên của dải chính. Cuộc đời của chúng ở dải chính, với sự tổng hợp hiđrô cung cấp độ trưng, có thể chỉ ngắn cỡ 10^6 năm. Thời gian như một ngôi sao đỏ, chiếu sáng bởi sự tổng hợp He có thể chỉ 10^5 năm. Để cho phép nhiều năng lượng thoát ra ngoài nhanh như vậy, những ngôi sao này thường phải khá lớn. Một vết tiến hoá đã được đơn giản hoá rất nhiều của một ngôi sao với khối lượng khoảng 20 lần khối lượng Mặt Trời được chỉ trên giản đồ L - T.

Nhiều ngôi sao tạo thành với khối lượng bé hơn Mặt Trời. Chúng tiến hoá giống như Mặt Trời, nhưng chậm hơn. Khối lượng càng bé, nhiệt độ tại tâm càng thấp, quá trình tổng hợp hiđrô càng chậm, L càng bé, ngôi sao càng có màu gần với màu đỏ và ngôi sao hiện ra càng ở phía dưới của dải chính. Với M < 0,1 Mo, nhiệt độ tại tâm không bao giờ đủ để phản ứng tổng hợp hạt nhân diễn ra. Những ngôi sao này chỉ đơn giản tiếp tục co lại, rất chậm chạp. Những thiên thể như vậy đã thực sự được quan sát thấy! Một số thiên thể có thể được phát hiện ra trong quá trình tìm kiếm các hành tinh như những bạn đồng hành với quỹ đạo e líp cao độ (xem phần trên).

Figure VIII.6

The Ring Nebula, gases ejected by the aging star appearing in the middle of the ring. The other stars are not related to the nebula. Most of the light from the nebula is red light, with wavelength 656.3 nm characteristic of hot hydrogen (Hale Observatories)

Death.

When the Sun becomes as small as R ~ 10^{-2} Ro, a new pressure becomes important. The pressure is provided by electrons and is explained by quantum theory. In 1930, a 20-year old Indian student, S. Chandrasekhar, showed that this electron pressure can support the star against gravity. A star supported by this electron pressure is a white dwarf. [Question B3.]

The Sun will remain a white dwarf forever. It will slowly shine away its remaining internal heat and it will gradually cool. It no longer contracts. If any planets remain around the Sun, they freeze.

STELLAR EVOLUTION.

We do not know why some stars, when they form, collect more mass than the Sun does. But many stars have a mass larger than Mo, some even M = 100 Mo. The higher mass, compared to the Sun, means the internal gravity must be higher. That means the star needs greater internal pressure. That means the star must be hotter near the center than the Sun is. Therefore, hydrogen fuses to helium much more rapidly. (The fusion process is somewhat different than described for the Sun). Massive stars have a very high luminosity. They appear as blue stars on the upper end of the main sequence.

The high luminosity means that massive stars use up their nuclear fuel very rapidly and have a much shorter life than the Sun does. In fact, massive stars do everything faster than the Sun. In their youth as a proto-star, the time of contraction may take only 10^5 years. They spend their main life as blue stars on the upper main sequence. Their lifetime on the main sequence, with hydrogen fusion providing the luminosity, may be only as short as 10^6 years. The time as a red giant, shining by helium fusion, may be only 10^5 years. In order to let so much energy escape so quickly, these stars must always be quite large. A very much simplified evolutionary track of a star with about 20 solar masses is shown in the L-T diagram.

Many stars form with less mass than the Sun. They evolve like the Sun does, but more slowly. The lower the mass, the lower the central temperature, the slower the fusion of hydrogen, the lower L, the more nearly red the color, and the lower on the main sequence these stars appear. For M < 0.1 Mo, the central temperature is never sufficient for nuclear reactions. These stars simply continue to contract, very slowly. Such objects have actually been observed! Some may be detected during the search for planets as companions with highly elliptical orbits (see above).

Dải chính đặc trưng một dải khối lượng của các ngôi sao, tất cả ở trong giai đoạn chính, tổng hợp hiđrô của cuộc đời chúng. Độ trưng của các ngôi sao ở dải chính quan sát được gần như tỉ lệ với $M^{3,3}$. Sử dụng Mặt Trời như một vật định cỡ, $L/Lo = (M/Mo)^{3,3}$. Vì tất cả những ngôi sao này, giống như Mặt Trời, sử dụng khoảng 1/10 lượng hiđrô của chúng trong khi nằm ở dải chính, cuộc đời của chúng ở dải chính tỉ lệ với M/L, nghĩa là $M^{-2,3}$. Sử dụng Mặt Trời như một vật định cỡ, chúng ta có

$$\text{thời gian sống} = 10^{10} (M/M_0)^{-2,3} \text{ năm} \qquad (8.9)$$

Các ngôi sao ở dải chính có khối lượng nhẹ nhất, sống lâu gấp 10^7 lần so với các ngôi sao ở dải chính có khối lượng nặng nhất!

Sự giải thích giản đồ L–T trong chương VIIIA

Nếu chúng ta nhìn vào vài ngàn ngôi sao trong phạm vi 100 pc, chúng ta phải giả sử rằng chúng đã sinh ra tại những thời điểm ngẫu nhiên trong quá khứ. Các ngôi sao giống như Mặt Trời có thể đã được tạo thành 10, hoặc 8, hoặc 6, hoặc 4, hoặc 2 x 10^9 năm về trước. Chúng ta ít bắt gặp các ngôi sao giống như Mặt Trời như một tiền sao được tạo thành trong vòng 10^8 năm qua, hoặc trong giai đoạn già của chúng, như các ngôi sao kềnh đỏ được tạo thành giữa 10,0 và 10,1 x 10^9 năm về trước. Bởi vậy, chúng ta bắt gặp hầu hết các ngôi sao giống như Mặt Trời trong giai đoạn chính của cuộc đời của chúng, như các ngôi sao ở dải chính.

Đối với các ngôi sao có khối lượng lớn, tất cả các giai đoạn của cuộc đời đều ngắn hơn. Kết quả cũng tương tự: Dường như chúng ta luôn luôn bắt gặp chúng ở giai đoạn chính của cuộc đời, như những ngôi sao ở dải chính. Quả vậy, giản đồ L–T của những ngôi sao gần nhất (những hình tròn đặc) chỉ gồm chủ yếu những ngôi sao ở dải chính.

Khi chúng ta nhìn vào những ngôi sao ở gần Mặt Trời, có lẽ điều khá chắc chắn là chúng ta nhìn vào các ngôi sao có khối lượng bé và sống lâu hơn là các ngôi sao có khối lượng lớn và sống ngắn. Quả vậy giản đồ L – T của những ngôi sao ở gần chúng ta nhất cho thấy rằng hầu hết các ngôi sao nằm trên dải chính, ở phía dưới. Mặt Trời thường được xem như một ngôi sao điển hình, nhưng các ngôi sao có khối lượng bé là điển hình hơn.

Bây giờ chúng ta có thể giải thích hiệu ứng lựa chọn được miêu tả ở chương VIII.A liên quan tới giản đồ L – T. Các ngôi sao sáng nhất hiện ra rất sáng; chúng có thể chiếu sáng như vậy chỉ trong một khoảng thời gian tương đối ngắn; bởi vậy chúng là hiếm ở trong một thể tích xác định, nhưng vì chúng là rất sáng, nên chúng ta quan sát thấy chúng ngay cả khi chúng ở khá xa, nằm trong một thể tích rất lớn.

Hình VIII.7 : (Xem cuối chương)

Tinh vân Lạp Hộ, một đám mây khí bị nung nóng bởi các ngôi sao trẻ và nóng được tạo thành từ khí trong đám mây này khoảng năm $2x10^4$ về trước (Ảnh: Hale Observatories).

Tuổi của các ngôi sao: Các ngôi sao ở dải chính có ánh sáng màu xanh lam cần phải có cuộc đời ngắn. Bởi vậy chúng phải được tạo thành khá gần đây, một số chúng được tạo thành chỉ khoảng 10^6 năm về trước. Nếu chúng ta nhìn lên bầu trời để nhìn các ngôi sao sáng, có màu xanh lam, thì có lẽ chúng ta nhìn vào những nơi mà hiện nay các ngôi sao đang hình thành. Một ví dụ hiện ra trong phạm vi một tinh vân khí theo hướng của chòm sao Lạp Hộ. Nó được gọi là Tinh vân Lạp Hộ và chứa vài ngôi sao rất nóng, rất xanh lam, khoảng 10^6 năm tuổi. Chuyển động của khí cho chúng ta biết rằng nó bị nung nóng bởi một ngôi sao mới chỉ trong vòng $2x10^4$ năm qua. Bởi vậy ngôi sao nóng trẻ nhất ở bên trong tinh vân có tuổi chỉ $2x10^4$ năm.

The main sequence represents a sequence of masses of stars, all in their main life stage of hydrogen fusion. The luminosity of stars on the main sequence is observed to be roughly proportional to $M^{3.3}$. Using the Sun as calibration, $L/Lo = (M/Mo)^{3.3}$. Since all these stars, like the Sun, use about one tenth of their hydrogen while on the main sequence, their lifetime on the main sequence is proportional to M/L, that is, to $M^{-2.3}$. Using the Sun as calibration, we have

$$\text{lifetime} = 10^{10}(M/Mo)^{-2.3} \text{ years.} \qquad (8.9)$$

The least massive main-sequence stars live 10^7 times longer than the most massive main sequence stars!

Interpretation of the L-T diagram in Chapter VIIIA:

If we look at the several thousand stars within 100 parsecs, we must assume that they were born at random times in the past. Stars like the Sun might have been formed perhaps 10, or perhaps 8, or 6, or 4, or 2×10^9 years ago. It is unlikely that we catch stars like the Sun as proto-stars, formed within the last 10^8 years, or in their senility, as red giants formed between 10.0 and 10.1×10^9 years years ago. Therefore, we catch most stars like the Sun in their main life, as main sequence stars.

For massive stars, all the life stages are shorter. The result is the same : we are most likely to catch them in their main life, as main sequence stars. Indeed, the L-T diagram of the nearest stars (the filled circles) shows mainly main sequence stars.

As we look at the stars near the Sun, it is much more probable that we see long-lived low-mass stars than short-lived massive stars. Indeed, the L-T diagram of the nearest stars shows that most are on the lower main sequence. The Sun is usually considered a common star, but low-mass stars are more common.

We can now explain the selection effect described in Chapter VIIIA regarding the L-T diagram : the apparently brightest stars are very luminous; they can shine like this only for a relatively short time; therefore, they are rare in any given volume but, because they are very luminous, we observe them even if they are quite far away, dispersed over a very large volume.

Figure VIII.7

The Orion Nebula, a cloud of gas heated by hot young stars which have been formed out of gases in this cloud as recently as $2x10^4$ years ago. (Hale Observatories)

Ages of stars. Luminous blue main sequence stars necessarily have short lifetimes. Therefore, they must have formed rather recently, some of them only 10^6 years ago. If we look in the sky for luminous blue stars, then we are probably looking at a place where stars are forming even now. An example occurs within a gaseous nebula in the direction of the star constellation Orion. It is called the Orion Nebula and contains several very blue, very hot stars, merely about 10^6 years old. The motions of the gas tell us that it has been heated by a new star only in the last $2x10^4$ years. Thus the youngest hot star inside the nebula has an age of only $2x10^4$ years.

Hình VIII.8 : (Xem cuối chương)

Một cặp đám sao trẻ trong chòm sao Perseus được nhìn qua các kính thiên văn nhỏ (Ảnh: Lick Observatory)

Hình VIII.9 : (Xem cuối chương)

Một đám sao hình cầu mang tên M13 trong chòm sao Hercules. Từ "hình cầu" liên quan tới hình dạng cầu của đám sao. Đám sao này chứa nhiều ngàn ngôi sao, tất cả chúng đều khá già và được đặc trưng bởi một độ phổ cập rất bé của các nguyên tố nặng hơn He. (Ảnh: Hale Observatories).

Nhiều ngôi sao xuất hiện trong các đám sao - tập hợp của hàng trăm hoặc hàng ngàn ngôi sao, liên kết với nhau bởi lực hấp dẫn của chúng. Tất cả các ngôi sao ở trong một đám hình thành vào cùng một thời điểm. Một số đám hình thành gần đây, một số đám hình thành từ rất lâu. Kiểu của các ngôi sao trong các đám này cho chúng ta biết về lịch sử của các ngôi sao và thậm chí của Dải Ngân Hà của chúng ta (chương IX).

1) Các đám sao với những ngôi sao rất xanh lam phải có tuổi ít hơn 10^7 năm. Ví dụ hai đám sao trong hình VIII.8 khoảng $3x10^6$ năm tuổi. Các đám sao với những ngôi sao nóng trung bình hơi già hơn. Pleiades (hình IX.4) khoảng 10^8 năm tuổi.

2) Các đám sao hiện nay không có các ngôi sao ở dải chính như Mặt Trời phải đủ già để cho các ngôi sao như Mặt Trời trở nên sao trắt trắng và rất mờ, không quan sát được. Những đám sao này phải già hơn 10^{10} năm. Các đám sao già nhất, được gọi là các đám sao hình cầu bởi vì chúng trông có dạng tròn (hình VIII.9), vào khoảng $1,3 \times 10^{10}$ năm tuổi. Khoảng cách, và bởi vậy, độ trưng và tuổi của các ngôi sao trong các đám sao hình cầu thu được dựa trên cơ sở số liệu thu được bởi vệ tinh nhân tạo của Trái Đất HIPPARCOS có độ chính xác rất cao. Ngoài ra, tuổi thu được có sai số tối thiểu vào cỡ 10^9 năm. Sai số này sẽ quan trọng khi chúng ta thảo luận về tuổi của Vũ trụ (chương XI).

Sự tận cùng của các ngôi sao có khối lượng lớn

Mặt Trời và các ngôi sao có khối lượng lớn có cuộc đời khá giống nhau cho đến khi chúng trở thành những ngôi sao kềnh và siêu kềnh, thu được năng lượng của chúng nhờ sự tổng hợp He thành C. Sau đó Mặt Trời trở thành một sao trắt trắng. S. Chandrasekhar, bằng cách sử dụng thuyết tương đối tổng quát đã phát hiện ra rằng một sao trắt trắng có thể thắng lực hấp dẫn bởi áp suất của electron chỉ với khối lượng $M < 1,4$ Mo. Bởi vậy các ngôi sao có khối lượng lớn không thể chết như là những ngôi sao trắt trắng. Điều gì xảy ra đối với ngôi sao có khối lượng lớn?

Đối với một ngôi sao có khối lượng lớn, mỗi khi He tại tâm đã được sử dụng hết và biến đổi thành C, C trở thành nhiên liệu hạt nhân mới. Nó biến đổi thành O bằng cách cộng với một hạt nhân He: $^{12}C + {}^4He \Rightarrow {}^{16}O + \gamma$. Phản ứng này tạo ra một nguồn năng lượng nhiệt mới, nhưng nó không tồn tại lâu dài. Sau đó, trong khi các khí ở tâm co lại và nhiệt độ tăng lên, thêm nhiều hạt nhân He được bổ sung để tạo thành các hạt nhân nặng hơn, cho đến khi cuối cùng phần trung tâm của ngôi sao là ^{56}Fe, ở nhiệt độ khoảng 3×10^9 K. Sắt là nguyên tố với năng lượng hạt nhân cực tiểu. Khi nhân được tạo bởi sắt, sự tổng hợp hạt nhân phải dừng lại. Ở thời điểm này, ngôi sao được tạo bởi nhiều lớp vỏ khí được tạo bởi những nguyên tố khác nhau. Lớp bên ngoài nhất là hiđrô ban đầu, vào trong một chút là lớp vỏ He, tiếp đó là lớp vỏ C, tiếp đến là lớp vỏ O... cho tới phần trung tâm là Fe.

Figure VIII.8

A pair of young star clusters in the constellation Perseus, visible in small telescopes. (Lick Observatory)

Figure VIII.9

A globular star cluster named M13 in the constellation of Hercules. The word globular refers to the round shape. This cluster contains many thousands of stars, all of which are quite old and characterized by a very low abundance of the elements heavier than helium. (Hale Observatories)

Many stars occur in star clusters, groups of a few hundred or a few thousands stars, kept together by their common gravity. All stars within one cluster formed at the same time. Some clusters formed recently, some a long time ago. The kinds of stars in these clusters tell us about the history of the stars and even of our Milky Way Galaxy (Chapter IX).

1) Star clusters with very blue stars must be less than 10^7 years old. For example, the two star clusters in Figure VIII.8 are about $3x10^6$ years old. Star clusters with only modestly hot stars are somewhat older. The Pleiades (fig. IX.4) are about 10^8 years old.

2) Star clusters that now have no main-sequence stars like the Sun must be old enough so stars like the Sun have become white dwarfs and are too faint to see. These star clusters must be older than 10^{10} years. The oldest star clusters, called the globular star clusters because they look round (Figure VIII.9), are about $1.3x10^{10}$ years old. The distances and, therefore, the luminosities and ages of stars in the globular star clusters are based on data obtained by the remarkably accurate Earth satellite HIPPARCOS. Nevertheless, the derived age is still uncertain by at least 10^9 years. This uncertainty will be important when we discuss the age of the Universe (ChapterXI).

The fate of massive stars.

The Sun and massive stars have fairly similar lives until they are giants or supergiants, deriving their energy by helium fusing to carbon. Then the Sun becomes a white dwarf. S. Chandrasekhar, using the theory of special relativity, discovered that a white dwarf can be supported against gravity by the pressure of electrons only for a mass $M < 1.4Mo$. Therefore, massive stars cannot die as white dwarfs. What happens to massive stars ?

For a massive star, once the helium at the center is used up and converted into carbon, the carbon becomes a new nuclear fuel. It is converted into oxygen by the addition of a helium nucleus : $^{12}C + {}^4He \Rightarrow {}^{16}O + \gamma$. The reaction produces a new source of thermal energy, but it does not last long. Then, while the central gases shrink and the temperature rises, even more He nuclei are added to make even heavier nuclei, until finally the center of the star is ^{56}Fe, at a temperature of about $3x10^9$ K. Iron is the element with the least nuclear energy. When the center is made of Fe, fusion must stop. At this time, the star is made of many shells of gases of different elements. Outermost is the original hydrogen, somewhat further inside is a shell of helium, then a shell of carbon, then comes oxygen and so on until, at the center, there is iron.

Điều gì xảy ra khi không có năng lượng được tạo thành bởi phản ứng hạt nhân nữa? Vì không có nhiên liệu hạt nhân nữa, và nhiệt thoát đi nên áp suất giảm xuống, khí tại tâm co lại. Nhưng, vì không có nhiên liệu hạt nhân mới xuất hiện nên nhiệt tạo ra do sự nén không cung cấp đủ sự nâng thắng lực hấp dẫn. Kết quả là áp suất biến mất một cách khá đột ngột. Tất cả khí của ngôi sao lúc này chỉ chịu tác dụng của lực hấp dẫn và rơi vào tâm. Sự suy sụp này cần chỉ vài giây hoặc vài phút (câu hỏi B4). Khi nào sự suy sụp sẽ dừng lại?

VỤ NỔ SAO SIÊU MỚI, SỰ TẠO THÀNH CÁC NGUYÊN TỐ, CÁC SAO NEUTRON VÀ PULSAR

Một khả năng : Sự suy sụp dừng lại khi các hạt nhân tại tâm chạm vào nhau

Nhân đang suy sụp trở nên quá nhỏ và tất cả các hạt chuyển động tới gần nhau đến nỗi các hạt nhân sắt vỡ ra thành các neutron và proton và các electron ép vào các proton để trở thành các neutron. Kết quả là, nhân sao chỉ gồm neutron. Các neutron riêng lẻ đóng vai trò như những quả bóng bé xíu, rất cứng, với bán kính khoảng 10^{-15} m. Khi các neutron chạm vào nhau, sự suy sụp của nhân sao dừng lại một cách đột ngột. Toàn bộ nhân sao trở thành một quả cầu rất cứng. Mọi thứ khác (H, He, C, O) rơi vào nhân. Khi khí đang rơi bị làm dừng lại bởi nhân cứng, khí này bị nung nóng tới nhiệt độ khổng lồ, khoảng 5×10^9 K. Kết quả là có một vụ nổ hạt nhân khổng lồ mà chúng ta nhìn thấy như một vụ nổ sao siêu mới (từ "nova" tiếng La-tinh có nghĩa là mới, nghĩa là một ngôi sao mới được nhìn thấy). Liệu đây chỉ là hoàn toàn lí thuyết hay chúng ta đã có bằng chứng tốt? Đúng là chúng ta đã có bằng chứng tốt.

Hình VIII.10 : (Xem cuối chương)

Tinh vân Con cua, tàn dư khí của vụ nổ sao siêu mới được ghi chép lại bởi người Trung Hoa vào năm 1054 sau C.N. Ngôi sao đã bùng nổ hiện nay có thể được nhận ra ở gần tâm vì phổ rất khác thường của nó. Ngôi sao này là một pulsar.(Ảnh: Hale Observatories).

i) Bằng chứng về vụ nổ sao siêu mới từ tàn dư vụ nổ sao siêu mới: Một ngôi sao mới đã được quan sát bởi người Trung Hoa vào năm 1054 sau C.N. Nó đã có thể được nhìn thấy ngay cả vào ban ngày. Tại vị trí mà nó đã từng xuất hiện trên bầu trời, hiện nay chúng ta thấy một đám mây khí đang giãn nở xung quanh một thiên thể kì lạ, có dạng một ngôi sao. Đám mây này được gọi là Tinh vân Con cua (hình VIII.10). Các cạnh của nó đang giãn nở với tốc độ khoảng 10^3 km/s. Đường kính của tinh vân hiện nay vào khoảng 4,4 năm ánh sáng. Vì $4,4 \times 10^{13}$ km / 10^3 km/s = $4,4 \times 10^{10}$ s = $1,3 \times 10^3$ năm nên bằng chứng này là tốt, nói lên rằng tinh vân này là tàn dư của một vụ nổ tại tâm của Tinh vân Con cua vào năm 1054 sau C.N. (Có lẽ lúc ban đầu, tinh vân này giãn nở nhanh hơn hiện nay). Có nhiều tàn dư vụ nổ sao siêu mới nữa, nhưng hầu hết lại mờ trong ánh sáng khả kiến và thường có ích nếu quan sát chúng bởi sóng vô tuyến và tia X.

ii) Bằng chứng rằng SN1987A đã từng là một vụ nổ hạt nhân khổng lồ: Một sản phẩm của các phản ứng hạt nhân trong suốt vụ nổ sao siêu mới là các neutrino. Một vụ nổ sao siêu mới phát xạ một luồng neutrino. Vào năm 1987 một vụ nổ sao siêu mới diễn ra khá gần chúng ta, cách chúng ta khoảng $1,5 \times 10^5$ năm ánh sáng trong thiên hà ở phương nam được gọi là Đám mây Magellan lớn. Các thiết bị quan sát hiện đại đã sẵn sàng để quan sát vụ nổ sao siêu mới mang tên SN1987A này. Đặc biệt, hai máy thu neutrino đã quan sát được 20 neutrino trong một khoảng thời gian 13 giây. Để so sánh, nhớ rằng chỉ khoảng 1 neutrino đến từ Mặt Trời

What happens when no more energy can be produced by nuclear fusion? Since there is no more nuclear fuel, and heat escapes, the pressure decreases, the central gases shrink. But, since no new nuclear fuel turns on, the heat from compression does not provide enough support against gravity. In effect, the pressure disappears quite suddenly. All the stellar gases now feel only gravity and fall toward the center. This collapse needs only a few seconds or minutes. [Question B4.] When will the collapse stop ?

SUPERNOVAE, ELEMENT CREATION, NEUTRON STARS AND PULSARS.

One possibility : the collapse stops when nuclei at the center touch each other.

The collapsing core becomes so small and all the particles move so close together, that the iron nuclei break up into neutrons and protons, and the electrons are squeezed into the protons to become neutrons. As a result, the core consists of only neutrons. Individual neutrons behave like tiny, very hard balls, with a radius of about 10^{-15}m. When the neutrons touch each other, the collapse of the core stops instantly. The entire core becomes a very hard ball. Everything else (hydrogen, helium, carbon, oxygen) falls onto the core. When the falling gas is stopped by the hard core, that gas is heated up to a huge temperature, about $5x10^9$ K. The result is a giant nuclear explosion, which we see as a supernova. (The word nova is the Latin for new, as in a newly seen star.) Is this all theory, or do we have any good evidence? Indeed, we have much good evidence.

Figure VIII.10

The Crab Nebula, the gaseous remnant of the supernova recorded by the Chinese in the year 1054 A.D. The star that exploded is now recognizable near the center because of its very unusual spectrum. The star is a pulsar. (Hale Observatories)

i) Evidence about supernovae from supernova remnants: A new star was seen by the Chinese in the year 1054 AD. It could be seen even in daytime. In that position in the sky, now, we see a cloud of gas expanding around a strange, star-like object. The cloud is called the Crab Nebula (Figure VIII.10). Its edges expand at about 10^3 km/s. The diameter of the nebula now is about 4.4 light years. Since $4.4x10^{13}$km / 10^3km/s = $4.4x10^{10}$s = $1.3x10^3$years, the evidence is good that this nebula is the remnant of an explosion at the center of the Nebula in the year 1054 A.D. (The nebula at first probably expanded somewhat more rapidly than it does now.) There are many more supernova remnants, but most are faint in visible light and are more usefully detected and observed by radio and x-ray investigations.

ii) Evidence that SN1987A was a huge nuclear explosion: One product of nuclear reactions during the supernova explosion are neutrinos. A supernova emits a brief burst of neutrinos. In 1987, a supernova occurred relatively nearby, merely $1.5x10^5$ light years away in the southern galaxy called the Large Magellanic Cloud. Modern observing equipment was ready to observe this supernova, which was given the name SN1987A. In particular, two neutrino detectors observed 20 neutrinos during an interval of 13 seconds. For comparison, only about one neutrino from the Sun

16- TVVÄTLI

được phát hiện trong một ngày. Luồng tia khoảng 20 neutrino này chắc chắn đến từ vụ nổ sao siêu mới. Số neutrino rất phù hợp với sự tiên đoán lí thuyết về một vụ nổ sao siêu mới! Sự phù hợp này ủng hộ mạnh mẽ giả thuyết về vụ nổ sao siêu mới.

Một vụ nổ sao siêu mới duy trì ở trạng thái sáng trong nhiều tháng vì khí của nó bị nung nóng bởi hạt nhân bức xạ được tạo ra trong suốt vụ nổ hạt nhân. Lượng vật liệu bức xạ giảm theo thời gian theo hàm mũ (chương V). Trong khoảng 2 năm, cường độ của SN1987A giảm theo hàm mũ với cùng chu kì bán rã như sự phân rã đồng vị $^{56}Co \Rightarrow {}^{56}Fe + e^{+} + \nu$. Liệu có phải sự phân rã của ^{56}Co làm nung nóng lớp nhìn thấy của ngôi sao bùng nổ? Một sự tiên đoán được đưa ra: Các tia gamma có thể được quan sát ở hai năng lượng đặc biệt liên quan với sự phân rã của ^{56}Co. SN1987A là vụ nổ sao siêu mới đầu tiên ở gần chúng ta đến nỗi tia gamma có thể quan sát được. Kết quả: tia gamma được tiên đoán thực sự đã quan sát được. Các lớp nhìn thấy của vụ nổ sao siêu mới thực sự bị nung nóng bởi sự phân rã của ^{56}Co. Rõ ràng là tất cả hạt nhân Co phân rã thành hạt nhân Fe, và những hạt nhân này phân tán vào không gian giữa các ngôi sao.

iii) Bằng chứng từ các đám sao hình cầu rằng các phản ứng hạt nhân diễn ra trong vụ nổ siêu sao mới :

Các ngôi sao trong các đám sao hình cầu (như ở hình VIII.9) không chỉ là những ngôi sao già nhất với tuổi khoảng $1,3 \times 10^{10}$ năm, mà chúng còn có phổ khác với hầu hết các ngôi sao khác. Phổ của chúng chứa chủ yếu các vạch phổ của H và He, và một phần bé hơn rất nhiều so với phổ của Mặt Trời các vạch phổ của các nguyên tố khác như C, N, O, Fe... Chúng ta có thể giải thích như thế nào việc các ngôi sao như Mặt Trời có khoảng 2% C, N, O, Fe, trong khi các ngôi sao già hơn có ít hơn nhiều ?

Vũ trụ bắt đầu với Vụ nổ lớn (xem chương XI) và giãn nở từ đó. Trong suốt 3 phút đầu tiên của nó, Vũ trụ chứa toàn hiđrô. Khoảng 3 phút sau Vụ nổ lớn, một số hiđrô biến thành He. Sau đó, trong một khoảng thời gian dài, Vũ trụ chỉ chứa hiđrô và He. Tất cả vật chất đều ở dạng khí. Vào thời kì đó chưa có một ngôi sao nào cả. Sau khoảng 10^9 năm, một số khí tập hợp thành các đám mây lớn. Khi các đám mây bắt đầu co lại, các đám mây nhỏ hơn tạo thành ở bên trong. Những ngôi sao đầu tiên tạo thành từ những đám mây nhỏ hơn này, chỉ chứa H và He. Những ngôi sao có khối lượng lớn nhất trong số những ngôi sao này trải qua giai đoạn chính của cuộc đời của chúng bằng cách tổng hợp H thành He. Sau đó chúng bùng nổ như những sao siêu mới. Những vụ nổ sao siêu mới tạo ra các hạt nhân C, N, O, Fe... đầu tiên. Những hạt nhân này bị đẩy vào không gian cùng với H và He. (Chúng ta biết rằng Fe đã được tạo ra và bị đẩy đi từ vụ nổ sao siêu mới 1987A, như đã được trình bày ở trên). Đầu tiên, những khí này có thể trông giống Tinh vân Con cua nhưng sau khoảng 10^6 năm, chúng bị trộn lẫn với đám mây khí ban đầu. Lúc đó đám mây khí này vẫn chứa chủ yếu H và He, nhưng nó cũng chứa một lượng nhỏ C, N, O, Fe... Khi có thêm hàng ngàn ngôi sao mới được tạo thành trong đám mây, những ngôi sao này chứa chủ yếu H và He, nhưng chúng cũng chứa một lượng nhỏ C, N, O, Fe... Những ngôi sao này được tạo thành từng nhóm, lực hấp dẫn chung giữ chúng lại với nhau. Ngày nay chúng ta gọi những nhóm này là những đám sao hình cầu. Hiện nay, chúng khoảng $1,3 \times 10^{10}$ năm tuổi và chỉ những ngôi sao với khối lượng bé hơn khối lượng của Mặt Trời sống sót. Nếu chúng ta thu phổ của những ngôi sao sống sót này, chúng ta thấy rằng chúng chứa chủ yếu H và He và chỉ một phần rất nhỏ C, N, O, Fe...

is detected in a day. This burst of 20 neutrinos certainly came from the supernova. The number of neutrinos closely matched the theoretical expectations for a supernova! This agreement provided strong support for the theory of supernovae.

A supernova remains bright for many months, because its gases are heated by radioactive nuclei created during the nuclear explosion. The amount of radioactive materials decreases exponentially with time (Chapter V). For about two years, the intensity of SN1987A decreased exponentially with the same half life as that of the decay of the radioactive isotope $^{56}Co \Rightarrow {}^{56}Fe + e^{+} + \nu$. Is the decay of ^{56}Co heating the visible layers of the exploded star? A prediction was made : gamma rays should be observed at two particular energies that are associated with the decay of ^{56}Co . SN1987A was the first supernova so near to us that gamma rays could be observed. The result : the predicted gamma rays were indeed observed. The visible layers of the supernova are indeed heated by the decay of ^{56}Co. Ultimately, all the Co nuclei decay to Fe nuclei, and these are dispersed into the space between the stars.

iii) Evidence from globular star clusters that nuclear reactions occur in supernovae:

Stars in globular star clusters (such as fig. VIII.9) are not only the oldest stars, with ages of about 1.3×10^{10} years, but they also have different spectra than most stars. Their spectra show almost only H and He, and a much smaller fraction than in the Sun of the other elements such as C, N, O, Fe etc. How can we explain that stars like the Sun have about 2 % of C, N, O, Fe while the oldest stars have much less ?

The Universe started with the Big Bang (see Chapter XI) and has been expanding ever since. During its first three minutes, the Universe consisted of pure hydrogen. About three minutes after the Big Bang, some H was converted to He. Then, for a long time, the Universe consisted of only H and He. All matter was gaseous. No stars existed at that time. After roughly 10^{9} years, some of the gas collected into a large cloud. As the cloud started to contract, smaller clouds formed inside. The first stars formed out of these smaller clouds, consisting of pure H and He. The most massive of these stars spent their main life fusing H into He. Then they exploded as supernovae. The supernova explosions created the first nuclei of C, N, O, Fe etc. These nuclei were expelled into space together with H and He. (We know that Fe was made and expelled from the supernova 1987A, described above.) At first, these gases may have looked somewhat like the Crab Nebula, but after some 10^{6} years they were mixed into the original gas cloud. Now this gas cloud still consisted mostly of H and He, but it also contained a small amount of C, N, O, Fe, etc. When thousands of additional new stars formed within this cloud, these stars consisted mostly of H and He, but they also contained a small amount of C, N, O, Fe, etc. These stars formed in groups, their common gravity holding them together. Today we call these groups the globular star clusters. Now, they are about 1.3×10^{10} years old, and only those stars with a mass M < Mo survive . If we take spectra of these surviving stars, we find that they consist mostly of H and He and only very small amount of C, N, O, Fe, etc..

Chúng ta là bụi sao

Những ngôi sao có khối lượng lớn hơn ở trong các đám sao hình cầu đã bùng nổ từ rất lâu, trong vòng 10^7 năm kể từ khi chúng được hình thành. Những vụ nổ sao siêu mới này gửi thêm nhiều C, N, O, Fe vào không gian. Những nguyên tố này trộn lẫn với đám mây khí còn lại đang bao bọc xung quanh các ngôi sao. Lần đầu tiên, đã có đủ C, Fe và các nguyên tố khác trong khí này, bởi vậy các hạt bụi có thể hình thành trong khí! Khí và bụi lắng đọng vào một đĩa quay mà hiện nay chúng ta thấy như Dải Ngân Hà của chúng ta (chương IX). Các ngôi sao mới đã hình thành trong đĩa này. Các ngôi sao mới tạo bởi H, He và khoảng từ 1% đến 2% C, N, O, Fe... Khoảng 4,6 x 10^9 năm về trước, một ngôi sao khá điển hình hình thành từ bụi và khí như thế này. Chúng ta gọi ngôi sao này là Mặt Trời. Mặt Trời chứa khoảng 75% hiđrô, 23% He và 2% C, N, O, Fe... Một đĩa khí và bụi tạo thành xung quanh Mặt Trời. Ở gần Mặt Trời, bụi tập hợp thành các tảng đá. Các tảng đá tập hợp thành các hành tinh kiểu Trái Đất, trong đó có Trái Đất. Bởi vậy Trái Đất và mọi thứ ở trên Trái Đất đã được tạo thành từ C, N, O, Fe... được tạo thành từ rất lâu trong các sao siêu mới. Câu chuyện này là quá đơn giản nhưng nó nói với các bạn rằng:

Oxi mà chúng ta thở đã được tạo thành trong một ngôi sao từng sống cách đây rất lâu và đã bùng nổ.

Sắt trong máu của chúng ta đã được tạo thành trong một ngôi sao từng sống cách đây rất lâu và đã bùng nổ.

Nói một cách nôm na, chúng ta là "bụi sao"!

*iv) **Pun-xa: Bằng chứng của những gì còn lại sau vụ nổ sao siêu mới:*** Theo lí thuyết, vụ nổ sao siêu mới đã diễn ra vì khí đang rơi đã bị dừng lại bởi nhân ở tâm cứng được tạo bởi neutron. Liệu có bằng chứng nào nói lên rằng nhân này vẫn còn tồn tại hay không? Nếu nó tồn tại, nó tạo chủ yếu bởi neutron và do đó chúng ta gọi nó là sao neutron. Nếu nó tồn tại, nó phải có những tính chất rất khác thường. Bạn có thể nêu ra những tiên đoán của chính mình bằng cách trả lời câu hỏi B5.

Để có cảm nhận về những điều kiện cực điểm trên bề mặt của một sao neutron, hãy nghĩ tới năng lượng mà một người cần có để leo lên đỉnh núi Everest, cao khoảng 8 km. Cùng một lượng năng lượng như thế được tiêu tốn trong một sao neutron bằng cách trèo lên một đỉnh núi cao $3x10^{-8}$ m, bé hơn một bước sóng của ánh sáng khả kiến. Nếu bạn không thích sống trên bề mặt của một sao neutron, bạn phải nhảy dường như với tốc độ của ánh sáng để thoát từ ngôi sao này. Quả vậy, bất cứ một cư dân nào của Trái Đất chắc chắn cũng sẽ không thích sống ở đó bởi vì sự chênh lệch về lực hấp dẫn giữa chân của chúng ta ở bề mặt sao và cánh tay của chúng ta, cao hơn chân 1 m, là $5x10^7$ lần lực hấp dẫn của Trái Đất. Một con người như chúng ta biết sẽ bị xé nát ngay lập tức.

Hình VIII.11:

Mô hình một pulsar: Một ngôi sao neutron quay nhanh mang theo nó một từ trường mạnh. Trục của từ trường không trùng với trục quay.

We are star dust.

The more massive stars within the globular star clusters exploded long ago, within 10^7 years of their formation. These supernovae sent still more C, N, O, Fe, etc. into space. These elements mixed with the remaining cloud of gas that still surrounded the stars. For the first time, there was enough C, Fe and other elements in that gas so that dust grains could form in the gas! The gas and dust settled into a revolving disk which we now see as our Milky Way Galaxy (Chapter IX). New stars formed in this disk. The new stars consisted of H, He, and also about 1% to 2% of C, N, O, Fe etc. About 4.6×10^9 years ago, a rather common star formed out of such gas and dust. We call this star the Sun. The Sun contains about 75% hydrogen, 23% helium, and 2 % C, N, O, Fe, etc. A disk of gas and dust formed around the Sun. Near the Sun, the dust collected into rocks which collected into the terrestrial planets, including the Earth. Therefore, the Earth and everything on the Earth was made from C, N, O, Fe, etc. created long ago in supernovae. This story is oversimplified, but it should tell you:

The oxygen you breathe was made in a star that lived long ago and exploded.

The iron in your blood was made in a star that lived long ago and exploded.

We are literally "star dust" !

iv) Pulsars: Evidence of what remains after a supernova explosion. According to theory, the supernova explosion occurred because infalling gases were stopped by the hard central core of neutrons. Is there any evidence that this core still exists? If it exists, it consists mostly of neutrons, and so we call it a neutron star. If it exists, it must have some very strange properties. You may make some predictions yourself by answering Question B5.

To gain some feeling for the extreme conditions on the surface of a neutron star, think of the energy a man needs to climb Mt. Everest, about 8 km high. The same energy is expended on a neutron star by climbing a mountain 3×10^{-8} meters high, less than a wavelength of visible light. If you do not like living on the surface of a neutron star, you must jump almost at the speed of light to escape from the star. Indeed, any Earth person will certainly not like living there, because the difference in gravity between our feet at the surface and our arms 1 meter higher is 5×10^7 times Earth's gravity. Any human being as we know it would be torn apart instantly.

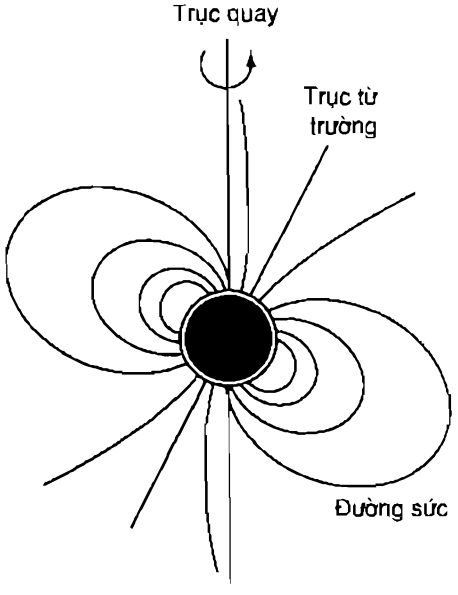


Figure VIII.11

Model for a pulsar. A rapidly rotating neutron star carries with it a strong magnetic field. The magnetic axis is different from the rotation axis.

Các pun-xa đã quan sát được

Các sao neutron được tiên đoán về mặt lí thuyết, nhưng liệu chúng ta có thực sự quan sát được các sao neutron nào không? Có, nhưng thường là không trực tiếp.

Khoảng 30 năm về trước, Jocelyn Bell, một nữ sinh viên cao học ở Anh, sử dụng một kính thiên văn vô tuyến lớn với những thiết bị điện tử mới có thể đo tín hiệu vô tuyến từ bầu trời trong khoảng 0,01 s, rất nhanh ở thời điểm ấy. Với kính thiên văn vô tuyến được hướng theo một hướng đặc biệt trên bầu trời, Jocelyn Bell đã ghi được các xung của sóng vô tuyến lặp đi lặp lại rất nhanh. Nếu chuyển sang tín hiệu âm thanh, tín hiệu nghe như ts, ts, ts, ts... Tín hiệu lặp lại một cách đều đặn, vài lần trong một giây, trong nhiều ngày và nhiều năm. Nguồn của tín hiệu xuất hiện trên bầu trời sớm hơn hai giờ mỗi tháng, giống như các ngôi sao. Nguồn phải là một thiên thể trên bầu trời.

Sự đều đặn một cách kì lạ của tín hiệu vô tuyến có thể được giải thích chỉ bởi một ngôi sao quay và mang theo nguồn tín hiệu sóng vô tuyến. Chúng ta nhận một xung vô tuyến mỗi khi nguồn tín hiệu quét qua chúng ta.

Ngôi sao này thuộc loại nào? Một pulsar được quan sát thấy tại tâm của Tinh vân Con cua. Chúng ta quan sát thấy một xung vô tuyến phát ra từ nó 30 lần mỗi giây. Bất cứ một ngôi sao bình thường hoặc một ngôi sao trắt trắng nào quay 30 lần trong một giây đều bị xé ra bởi lực hướng tâm. Chỉ có sao neutron là đủ nhỏ và có lực hấp dẫn đủ lớn để có thể sống sót. Kết luận là: Chúng ta đã quan sát được một nguồn tín hiệu vô tuyến gắn với một sao neutron. Bởi vậy chúng ta có bằng chứng gián tiếp rất tốt, cho thấy rằng các sao neutron tồn tại.

Thực tế, bằng chứng còn tốt hơn nữa: Tinh vân Con cua bức xạ mạnh ở tất cả các dải sóng, từ vô tuyến và hồng ngoại qua khả kiến tới tia X và thậm chí tia gamma. Từ vô tuyến qua tia X, bức xạ là synchrotron (chương IV), cần phải có từ trường vào cỡ 10^{-9} tesla trong khắp Tinh vân. Năng lượng là cần thiết để duy trì từ trường này với tốc độ vào khoảng 10^5 Lo. Năng lượng này đến từ đâu? Một bằng chứng quan sát cho thấy tốc độ phát xung chậm lại một cách từ từ qua nhiều năm. Điều này có nghĩa rằng sự quay của sao neutron dần dần chậm lại. Sao neutron mất năng lượng quay với tốc độ khoảng 10^5 Lo. Sự phù hợp một cách tuyệt vời với công suất cần có của Tinh vân Con cua chỉ diễn ra khi vật thể ở tâm quả thực là một sao neutron (câu hỏi B6).

Vài trăm pun xa đã được quan sát. Bây giờ chúng ta có thể làm một phép dự đoán liên quan tới sự quay của chúng: các sao neutron sẽ bị xé ra xa nếu chúng quay với tốc độ 2500 lần/s hoặc nhanh hơn (câu hỏi B7). Bởi vậy, để khẳng định lí thuyết, chúng ta phải không quan sát được các pulsar quay với tốc độ lớn hơn 2500 lần/s. Điều này là đúng. Các pulsar quay nhanh nhất đã được phát hiện cho tới nay quay với tốc độ 642 lần/s, khá gần nhưng không trùng với tốc độ cực đại. Đây là một bằng chứng tốt hơn nói lên rằng những vật thể này là các sao neutron.

Người ta thấy rằng các pulsar quay nhanh nhất thường có một bạn đồng hành - một ngôi sao khá bình thường hơn. Các sao neutron quay nhanh như vậy bởi vì chúng có khí bị hút tới từ một ngôi sao bình thường, và những khí này tới với mô-men xung lượng lớn. Nếu một ngôi sao neutron trong quá khứ thu được nhiều mô-men xung lượng như vậy để cho nó quay với tốc độ lớn hơn 2500 lần/s thì nó sẽ bị vỡ và chúng ta sẽ không quan sát thấy chúng.

Pulsars observed.

Neutron stars are predicted theoretically, but can we actually observe any neutron stars ? Yes, but usually only indirectly.

About thirty years ago, a woman graduate student in England, Jocelyn Bell, used a large radio telescope with new electronics that could measure a radio signal from the sky in about 0.01 sec, very rapidly for that time. With the radio telescope aimed at one particular direction of the sky, she recorded rapidly repeating pulses of radio waves. If converted to sound, the signal sounds like ts, ts, ts, ts, and so on. The signal repeats regularly, several times a second, for many days and years. The source of the signal appears in the sky earlier by two hours every month, just like the stars do. The source must be an object in the sky.

The extreme regularity of the radio signal can be explained only by a star which rotates and carries a beacon of radio waves. We receive a radio pulse every time the beacon sweeps past us.

What kind of star is it? A pulsar is observed at the center of the Crab Nebula. We observe a radio pulse from it 30 times per second. Any ordinary star or white dwarf rotating 30 times a second flies apart from the huge centrifugal forces. Only a neutron star is small enough and has sufficient gravity to survive. The conclusion is : we have detected a radio beacon that must be attached to a neutron star. Therefore, we have good indirect evidence that neutron stars exist.

In fact, the evidence is still better: The Crab Nebula radiates powerfully in all radiation bands from radio and infrared through visible to the x-rays and even gamma rays. From radio through x-rays, the radiation is synchrotron radiation (Chapter IV) which requires a magnetic field of about 10^{-9} Tesla throughout the nebula. Energy is needed to maintain this magnetic field, at the rate of about 10^{5} Lo. Where does this energy come from? An observational clue : The pulse rate is observed to slow down slightly over many years. That means the neutron star's rotation is gradually slowing down. The neutron star loses rotational energy at the rate of about 10^{5} Lo. This nice match to the required power of the Crab Nebula works only if the central object is indeed a neutron star. [Question B6.]

Several hundred pulsars have been observed. We can now make a prediction regarding their rotations : Neutron stars will fly apart if they rotate about 2500 or more times per second [question B7]. Therefore, to confirm the theory we must observe no pulsars rotating faster than 2500 times per second. This is true. The fastest pulsar detected at present rotates 642 times per second, reasonably near but not at the maximum rate. This is more good evidence that these objects are neutron stars.

The fastest pulsars, it turns out, usually have a binary companion, a more nearly ordinary star. The neutron stars spin so fast because they have attracted gases from the ordinary star, and these gases arrive with high angular momentum. If any neutron stars in the past gained so much angular momentum so as to rotate more than 2500 times per second, then they broke up and we cannot see them.

Pulsar thách thức kiến thức vật lí của chúng ta

Các pulsar có chu kì quay chính xác hơn nhiều so với các đồng hồ nguyên tử do con người chế tạo. Do sự xác định thời gian chính xác này, một cặp pulsar đôi cho chúng ta một vật kiểm chứng chính xác nhất về thuyết tương đối rộng của Einstein.

Các pulsar đã được quan sát không chỉ ở giải sóng vô tuyến mà cả ở ánh sáng khả kiến, tia X và thậm chí cả tia gamma. Tại sao chúng bức xạ các photon có năng lượng lớn như vậy? Người ta đã chỉ ra rằng các sao neutron là những nam châm điện khổng lồ, với từ trường tại bề mặt ngôi sao lên tới $2x10^9$ tesla. Chúng là những nam châm lớn nhất mà chúng ta từng biết. Hình ảnh của từ trường được chỉ trên hình VIII.11. Các khí ở gần sao neutron có lẽ sắp xếp dọc theo các vòng bị từ hoá, giống như các khí ở trên các vết đen mặt trời (chương VII). Bằng một cách nào đó (và chúng ta chưa hoàn toàn chấp nhận lí thuyết để giải thích điều này), các electron được gia tốc dọc theo một vòng bị từ hoá. Các electron phát xạ một nón bức xạ khổng lồ khi chúng ở gần chân của vòng bị từ hoá. Nón bức xạ quay cùng với ngôi sao. Chúng ta nhìn thấy một xung bức xạ khi hình nón này quét qua chúng ta. Từ trường nở rộng từ pulsar tới Tinh vân, mặc dầu với một giá trị ở trong Tinh vân chỉ vào khoảng 10^{-9} tesla. Ở đó chúng thu thêm năng lượng bức xạ từ Tinh vân.

Tại sao các sao neutron quay nhanh ngay cả khi chúng không có sao đồng hành và tại sao chúng lại có từ trường mạnh như vậy? Chúng ta chỉ biết câu trả lời gần đúng. Mặt Trời hiện nay quay xung quanh nó một vòng trong 30 ngày ~ $2,5x10^6$ s. Hãy tưởng tượng rằng toàn bộ Mặt Trời co lại một cách chậm chạp. Khi nó co lại, mô-men xung lượng $MR^2\omega$ không đổi, trong đó $\omega = 2\pi/P$ là vận tốc góc của sự quay. Bởi vậy, khi R giảm, chu kì quay giảm tỷ lệ với R^2. Nếu Mặt Trời với bán kính ban đầu Ro = $0,7x10^6$ km co tới kích cỡ của một sao neutron, R = 10 km thì chu kì quay giảm $(Ro/R)^2 = 0,5x10^{10}$ lần, từ 30 ngày tới khoảng $5x10^{-4}$ s, gần với chu kì ngắn nhất có thể có trước khi ngôi sao bị xé ra. Thực tế, một mô hình sẽ không bắt đầu với toàn bộ Mặt Trời mà với phần bên trong của một ngôi sao có khối lượng lớn đã mất các lớp ngoài của nó. Nhưng chưa tồn tại một lí thuyết chi tiết. Chúng ta chỉ có thể kết luận rằng khá dễ để cho một sao neutron quay nhanh như đã quan sát được. Một cách tương tự, các dòng điện trong một ngôi sao chạy sao cho từ trường thoả mãn BR^2 = hằng số. Nếu chúng ta bắt đầu với một giá trị ước tính B = 10 tesla ở bên trong Mặt Trời, chúng ta thu được giá trị $5x10^{10}$ tesla trong sao neutron. Bởi vậy, dường như là có thể để đạt được từ trường quan sát được trong các pulsar, nhưng lại vẫn chưa có một lí thuyết nào giải thích giá trị thực tế.

Bây giờ chúng ta trở lại với giả thuyết ban đầu liên quan tới độ cứng của các sao neutron. Các neutron không phải là những quả cầu cứng thực sự, mà chúng được tạo bởi các hạt cơ bản hơn. Nếu bị nén với nhau với lực đủ mạnh, neutron có thể trở nên nhỏ hơn. Các chuyên gia tính toán rằng một sao neutron với khối lượng lớn hơn 3 lần khối lượng Mặt Trời không thể tồn tại bởi vì lực hấp dẫn của ngôi sao không thể cân bằng với lực áp suất của các neutron. Nếu nhân trung tâm của một vụ nổ sao siêu mới có khối lượng lớn hơn 3 lần khối lượng Mặt Trời thì nó sẽ không dừng sự suy sụp của nó như một sao neutron. Vậy thì điều gì sẽ xảy ra?

Pulsars stretch our physics.

Pulsars have a rotation period that is far more accurate than any man-made atomic clocks. Because of the precise timing, one binary pulsar has provided the most accurate test of Einstein's general theory of relativity.

Pulsars are observed not only in the radio range but also in visible light, x-rays, and even gamma rays. Why do they radiate such energetic photons? It turns out that neutron stars are powerful electromagnets, with magnetic fields at the star surface up to $2x10^9$ Tesla. They are the most powerful magnets we know. The pattern of the magnetic field is shown in fig.VIII.11. Gases near the neutron star are probably arranged along magnetized loops, much like the gases above sunspots (Chapter VII). Somehow (and we have no fully accepted theory to explain it), electrons are accelerated along a magnetic loop. The electrons emit a powerful cone of radiation when they are near the feet of the loop. The cone of radiation rotates with the star. We see a pulse of radiation when the cone sweeps past us. The magnetic fields extend from the pulsar into the Nebula, though with a value in the Nebula of only about 10^{-9} Tesla. There they power the radiation from the nebula.

Why do neutron stars rotate rapidly even if they have no companion star, and why are they so magnetic? We know the answer only in order of magnitude. The Sun now rotates once in about 30 days ~ $2.5x10^6$ s. Imagine that the entire Sun shrinks slowly. As it shrinks, the angular momentum $MR^2\omega$ stays constant, where $\omega = 2\pi/P$ is the angular rate of rotation. Therefore, as R decreases, the rotation period decreases in proportion to R^2. If the Sun with original Ro = $0.7x10^6$ km shrinks to the size of a neutron star, R = 10 km, the rotation period decreases by a factor $(Ro/R)^2 = 0.5x10^{10}$, from 30 days to about $5x10^{-4}$ s, nearly the shortest possible period before the star flies fly apart. Actually, a model should not start with the whole Sun but with the interior of a massive star that lost its outer layers. But no detailed theory exists. We can conclude only that it is rather easy for a neutron star to rotate as rapidly as observed. Similarly, the electrical currents in a star run such that the magnetic field satisfies BR^2 = constant. If one starts with an estimate of B = 10 Tesla inside the Sun, one gets $5x10^{10}$ Tesla in the neutron star. Thus it seems quite possible to obtain the observed magnetic field on pulsars, but again no theory exists to explain the actual value.

Now we return to the earlier assumption regarding the hardness of neutrons. Neutrons are not really hard balls, but they are made of more fundamental particles. If pushed together with sufficient force, the neutron can become smaller. The experts compute that a neutron star with more than about 3Mo cannot exist because the gravity of the star cannot be balanced by the pressure forces of the neutrons. If the central core of a supernova contains more mass than about 3Mo, it will not stop its collapse as a neutron star. What happens then?

Một khả năng thứ hai:

Sự suy sụp không hoàn toàn dừng lại! Lực hấp dẫn tại bề mặt của nhân đang suy sụp tăng lên. Vận tốc thoát tăng lên. Khi bán kính trở nên đủ nhỏ, vận tốc thoát vượt quá tốc độ ánh sáng. Ngay cả ánh sáng cũng không thể thoát ra được. Khi ấy ngôi sao trở thành một hốc đen.

Ngôi sao có bán kính bằng bao nhiêu khi nó biến mất khỏi sự quan sát? Câu trả lời là $r_S = 2GM/c^2$. Giá trị này được gọi là bán kính Schwarzschild vì Karl Schwarzschild đã tính ra giá trị này dựa theo thuyết tương đối rộng vào năm 1916. Chúng ta có thể suy ra bán kính Schwarzschild một cách thuận tiện, mặc dầu không chính xác, như sau: Đối với một vật thể có khối lượng nhỏ m nào đó, tốc độ thoát cổ điển từ một vật thể có khối lượng M, bán kính R được cho bởi công thức $1/2\ mv^2 = GmM/R$. Bây giờ đặt v = c đối với một photon và chúng ta thu được bán kính Schwarzschild.

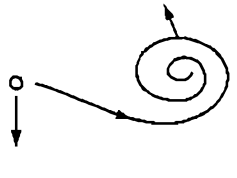
Nếu M = Mo thì r_S = 3 km. Một nhân đang sụp đổ của một vụ nổ sao siêu mới thực sự gần tới giá trị r_S khi nó có kích cỡ của một sao neutron, khoảng 10 km. Khi nó tiếp tục suy sụp để trở nên bé hơn r_S, liệu nhân có thực sự biến mất khỏi tầm quan sát của chúng ta hay không? Không. Giả sử rằng vật chất đang rơi ở một khoảng cách r kể từ hốc đen chứng kiến một số sự kiện tồn tại trong một khoảng thời gian Δt, ví dụ khoảng thời gian cần thiết để vật chất tại bề mặt của nhân rơi vào trong, từ r = 3,4 km tới 3,3 km. Chúng ta sẽ đo được một khoảng thời gian như thế nào? Thuyết tương đối tổng quát tiên đoán rằng chúng ta, đang nhìn từ xa, đo cùng sự kiện này trong một khoảng thời gian $\Delta t' = \Delta t/(1-r_S/r)^{1/2} > \Delta t'$. Theo quan điểm của chúng ta, khi r giảm tới r_S thì $\Delta t'$ tăng. Theo quan điểm của chúng ta, bề mặt của nhân cần một khoảng thời gian vô cực để đạt tới giá trị r_S.

Chúng ta có thể phát hiện ra hốc đen hay không ?

Theo định nghĩa, chúng ta không thể quan sát được hốc đen. Nhưng chúng ta có thể quan sát nó một cách gián tiếp nếu hốc đen là một thành viên của một cặp sao đôi, với ngôi sao còn lại là một ngôi sao khá bình thường.

a) Nếu chúng ta có thể nhìn thấy một ngôi sao chuyển động xung quanh một vật thể không nhìn thấy, thì vật thể ấy có thể là một sao trắt trắng rất già, một sao neutron đã chết, hoặc một hốc đen. Nếu vật thể không nhìn thấy có khối lượng lớn, lớn hơn khoảng 3 lần khối lượng Mặt Trời, thì nó chỉ có thể là một hốc đen.

b) Nếu ngôi sao nhìn thấy phát ra gió (mạnh hơn nhiều gió Mặt Trời) thì một số khí của gió chuyển động về phía hốc đen. Khi khí chạm tới hốc đen, chúng chịu tác dụng chủ yếu của lực hấp dẫn của hốc đen và bắt đầu rơi vào hốc đen. Nhưng vì khí tới từ một ngôi sao đang quay, chúng có mô men xung lượng lớn. Chúng không thể rơi thẳng vào hốc đen. Thay vào đó, chúng bắt đầu xoắn xung quanh hốc đen. Chúng bị nung nóng trong khi quay chậm vào phía trong. Khi chúng đủ nóng, chúng phát xạ tia X. Cuối cùng, dưới ảnh hưởng của lực ma sát, các dòng điện và tương đối tính, các khí rơi vào hốc đen. Tại mỗi thời điểm, hốc đen bị bao bọc bởi một đĩa khí đang phát xạ tia X. Chúng ta có thể quan sát đĩa này bởi bức xạ tia X của nó. Cường độ tia X thay đổi rất nhanh, theo thang thời gian bé hơn 1 s bởi vì khí rơi vào hốc đen một cách bất thường.



Hình VIII.12

BLACK HOLES.

A second possibility :

The collapse does not stop at all! Gravity at the surface of the collapsing core increases. The escape velocity increases. When the radius has become sufficiently small, the escape velocity exceeds the speed of light. Not even light can escape. Then the star has become a black hole.

What radius does the star have when it disappears from view? The answer is $r_S = 2GM/c^2$. This is called the Schwarzschild radius because Karl Schwarzschild calculated it from general relativity in 1916. One can derive the Schwarzschild radius conveniently, even though incorrectly, as follows. For an object of some small mass m, the classical escape speed from an object of mass M, radius R, is given by $\frac{1}{2} mv^2 = GmM/R$. Now set v = c for a photon and you get the Schwarzschild radius.

If M = Mo, then r_s = 3 km. A collapsing core of a supernova is already close to r_s when it has the size of a neutron star, about 10 km. When it collapses further to become smaller than r_s, does the core actually disappear from our view ? No. Suppose that the infalling matter at a distance r from the black hole experiences some event lasting a time interval Δt, for instance the time needed for the matter at the surface of the core to fall inwards from r = 3.4 km to 3.3 km. What time interval will we measure? General relativity predicts that we, looking from far away, measure for the same event a time interval $\Delta t' = \Delta t/(1-r_s/r)^{1/2} > \Delta t'$. From our point of view, as r decreases toward r_s, $\Delta t'$ increases. From our point of view, it will take forever for the surface of the core to reach r_s.

Can we detect a black hole?

By definition, we cannot see a black hole. But we may detect it indirectly if the black hole is one member of a binary, with the other star some fairly normal star.

a) If we can see one star move around an unseen object, that object may be a very old white dwarf, a dead neutron star, or a black hole. If the unseen object has a large mass, larger than about 3Mo, then it can only be a black hole.

b) If the visible star emits a wind (more powerful than the solar wind), then some of the gases of the wind move toward the black hole. As the gases approach the black hole, they feel mainly the gravity of the black hole and begin to fall toward the black hole. But, because the gases came from an orbiting star, they have much angular momentum. They cannot fall straight into the hole. Instead, they begin to swirl around the black hole. They heat up while slowly swirling inward. When they are hot enough, they emit x-rays. Finally, under the influence of friction, electrical currents, and relativity, the gases fall into the black hole. At any one time, the black hole is surrounded by a disk of x-ray emitting gas. We can observe this disk by its x-radiation. The x-ray intensity changes rapidly, on time scales less than one second, because the gas falls into the black hole irregularly.

Figure VIII.12

Cygnus X-1. Ứng cử viên tốt đầu tiên như một hốc đen là nguồn tia X sáng nhất trong chòm sao Cygnus, được gọi là Cyg X-1. Một mình máy thu tia X không thể đo được một cách chính xác vị trí của nguồn tia X trên bầu trời. Nhưng vào năm 1971, các nhà thiên văn vô tuyến đã phát hiện được các xung vô tuyến được giả thiết là tới từ cùng nguồn. Vị trí vô tuyến đã được đo một cách đủ chính xác để chỉ ra rằng nguồn vô tuyến nằm cùng vị trí như một sao siêu kềnh (R ~ 20 Ro) nóng (T ~ $3x10^4$ K) quay xung quanh một bạn đồng hành không nhìn thấy. Liệu bạn đồng hành là một sao neutron hay là một hốc đen? Vào thời kì ấy, lí thuyết cho rằng các sao neutron có thể có khối lượng không lớn hơn khoảng 5Mo, nếu không, chúng suy sụp để trở thành hốc đen. Nếu chúng ta có thể chỉ ra rằng khối lượng của vật thể không nhìn thấy vượt quá 5Mo thì bạn đồng hành không nhìn thấy được là một hốc đen.

Sau đây là cách tính toán khối lượng của vật thể không nhìn thấy. Khối lượng của ngôi sao nhìn thấy có lẽ vào khoảng M_1 = 33 Mo. Nhưng bề mặt của ngôi sao bị ảnh hưởng bởi bức xạ tia X từ khí đang cuộn xoáy xung quanh vật thể không nhìn thấy. Khó giải thích phổ của ngôi sao. Sự phân tích một cách chi tiết chỉ ra rằng khối lượng của ngôi sao nhìn thấy có thể nhỏ vào cỡ 24Mo hoặc lớn vào cỡ 42Mo. Chúng ta chọn M_1 = 24Mo đối với trường hợp xấu nhất. Vận tốc xuyên tâm của ngôi sao nhìn thấy thay đổi khi ngôi sao nhìn thấy quay xung quanh vật thể không nhìn thấy. Chu kì quỹ đạo là P = 5,6 ngày. Biên độ của vận tốc xuyên tâm là v_1 = 76 km/s. Chúng ta giả thiết rằng, đối với trường hợp xấu nhất, mặt phẳng quỹ đạo song song với tia nhìn của chúng ta. Khi đó biên độ của vận tốc xuyên tâm bằng vận tốc quỹ đạo thực. Chúng ta giả sử quỹ đạo là tròn. Chúng ta bắt đầu với phương trình 8.4 cho định luật thứ 3 của Kepler liên quan tới khối lượng của cả hai ngôi sao, nhưng được chuyển sang dạng chứa các vận tốc chứ không phải chứa các bán trục chính

$$M_1 + M_2 = (v_1 + v_2)^3 (P/2\pi G) \quad (8.10)$$

Ngôi sao không nhìn thấy là ngôi sao 2. Chúng ta khử ẩn v_2 bởi $v_2 = v_1 M_1/M_2$ (xung lượng bảo toàn trong hệ quy chiếu khối tâm). Chúng ta thu được:

$$v_1^3 (P/2\pi G) = M_2^3/(M_1+M_2)^2 \quad (8.11)$$

vế trái là quan sát được. Với P =5,6 ngày và v_1 = 76 km/s, vế trái trở thành 0,25Mo. Với M_1 = $24M_o$, chúng ta thu được $M_2 = 6M_o$. Giá trị này vượt quá giá trị cực tiểu $5M_o$. Đối với $M_1 > 24M_o$ thì M_2 lớn hơn. Nếu mặt phẳng quỹ đạo không nằm dọc theo tia nhìn của chúng ta thì M_2 thậm chí còn lớn hơn (câu hỏi B8). Lập luận này làm hài lòng hầu hết (chứ không phải tất cả) các nhà thiên văn rằng vật thể không nhìn thấy trong Cyg X-1 là một hốc đen. Trong nhiều năm, kể từ khi phát hiện ra Cyg X-1, lí thuyết đã tiến bộ rất nhiều. Hiện nay người ta tin rằng khối lượng cực đại của một sao neutron chỉ là 3Mo. Hiện nay, tất cả mọi người chấp nhận rằng Cyg X-1 là một hốc đen.

Hiện nay có những vật thể sao khác với những bằng chứng rất tốt nói lên rằng chúng là hốc đen và bởi vậy sự tồn tại của những hốc đen có khối lượng của sao không còn gây nghi ngờ gì nữa.

Cygnus X-1. The first good candidate as a black hole was the brightest x-ray source in the star constellation Cygnus, called Cyg X-1. The x-ray detector alone could not accurately measure the position of the x-ray source in the sky. But in 1971, radio astronomers detected radio bursts that presumably came from the same source. The radio position was measured sufficiently precisely to show that the radio source is in the same position as a hot ($T \sim 3 \times 10^4$ K) supergiant ($R \sim 20$ Ro) which orbits about an invisible companion. Is the companion a neutron star or a black hole? At that time, theory claimed that neutron stars can have a mass no greater than about 5Mo, for otherwise they collapse to become a black hole. If one could show that the mass of the invisible object exceeds 5Mo, then the invisible companion is a black hole.

Here is the computation of the mass of the invisible object. The mass of the visible star is probably about $M_1 = 33$ Mo. But the star's surface is influenced by the x-radiation from the gas swirling around the invisible object. The star's spectrum is difficult to interpret. Detailed analysis showed that the mass of the visible star might be as small as 24Mo or as large as 42 Mo. We adopt $M_1 = 24$Mo for the worst possible case. The radial velocity of the visible star changes as the visible star orbits the invisible object. The orbital period is P = 5.6 days. The amplitude of the radial velocity is $v_1 = 76$ km/s. We assume, for the worst possible case, that the orbital plane is parallel to our line of sight. Then the radial velocity amplitude equals the actual orbital velocity. We assume a circular orbit. We start with equation (8.4) for Kepler's third law that involves the masses of both stars, but convert into a form containing the velocities rather than the semi-major axis :

$$M_1 + M_2 = (v_1 + v_2)^3 (P/2\pi G). \qquad (8.10)$$

The invisible star is star 2. We eliminate the unknown v_2 by $v_2 = v_1 M_1 / M_2$ (constant momentum in the center-of-mass frame of reference). We obtain:

$$v_1^3 (P/2\pi G) = M_2^3 / (M_1 + M_2)^2 . \qquad (8.11)$$

The left side is observed. With P = 5.6 days and $v_1 = 76$km/s, the left side becomes 0.25Mo. For $M_1 = 24$ Mo, one gets $M_2 = 6$ Mo. This exceeds the minimum 5Mo. For $M_1 > 24$ Mo, M_2 is larger. If the orbital plane is not along our line of sight, M_2 is even larger. [Question B8.] This argument convinced most (but not all) astronomers that the invisible object in Cyg X-1 is a black hole. In the years since the discovery of Cyg X-1, theory has progressed. Now the maximum mass of a neutron star is believed to be only 3 Mo. Now, everybody accepts that Cyg X-1 is a black hole.

There are now other stellar objects for which the evidence for a black hole is very good, and so the existence of stellar-mass black holes is no longer in doubt.

CÂU HỎI

B1) Phân tích thứ nguyên: Tìm thời gian cần thiết để Mặt Trời co tới độ trưng Lo và bán kính Ro hiện nay của nó bằng cách sử dụng Lo và một sự ước tính về năng lượng hấp dẫn $-GMo^2/Ro$ của nó. Hãy tính thời gian này theo triệu năm.

B2) Trong tương lai xa, khi bán kính Mặt Trời đạt gía trị 100 Ro, Mặt Trời sẽ choán một góc bao nhiêu độ nếu nhìn từ Trái Đất, vẫn ở cách tâm Mặt Trời 1 đ.v.t.v? Cũng câu hỏi như trên, nếu nhìn từ một vệ tinh của Thổ Tinh ở cách tâm Mặt Trời 10 đ.v.t.v? Nếu lúc đó độ trưng của Mặt Trời là 100 Lo thì thông lượng tới Thổ Tinh bằng bao nhiêu lần thông lượng tới Trái Đất hiện nay.

B3) Hãy tính mật độ trung bình trong một sao trắt trắng, so sánh với nước ở thể lỏng trên Trái Đất. Lấy $R = 10^{-2}Ro$ và $M = Mo$. Tính gia tốc trọng trường tại bề mặt sao trắt trắng, so với gia tốc trọng trường ở trên Trái Đất.

B4) Trong câu hỏi 3, chương VI, chúng ta ước tính thời gian rơi tự do của một đám mây có mật độ ban đầu ρ vào khoảng $(G\rho)^{-1/2}$. Hãy ước tính thời gian rơi tự do đối với mật độ trong lòng một ngôi sao vừa sử dụng hết nhiên liệu hạt nhân cuối cùng của nó, $\rho = 10^8$ kg/m^3.

B5) Hãy ước tính mật độ của một sao neutron, giả sử rằng ngôi sao này chứa các neutron lí tưởng, tức là những quả cầu rắn có bán kính khoảng 7.10^{-15} m. Hãy tính khối lượng của một mặt bàn có kích cỡ 0,01 m x 1 m x 1 m được tạo bởi vật chất có mật độ bằng mật độ của sao neutron. So sánh khối lượng của mặt bàn này với kết quả ước tính của bạn về khối lượng của núi Everest trong dãy núi Himalaya (mật độ đá là 4.10^3 kg/m^3).

Nếu khối lượng của ngôi sao này là 2Mo, hãy tính bán kính của nó (so sánh với kích thước của thủ đô Hà Nội), hãy tính gia tốc hấp dẫn trên bề mặt sao neutron này (so sánh với gia tốc hấp dẫn của Trái Đất) và hãy tính vận tốc thoát của sao neutron này (so sánh với tốc độ ánh sáng c, bỏ qua các hiệu ứng tương đối tính).

B6) Hãy viết biểu thức của động năng E ứng với chuyển động quay của một sao neutron theo khối lượng M, bán kính R và chu kì quay P của nó. Giả sử rằng mật độ đồng đều. Tiếp đó, hãy viết phương trình diễn tả tốc độ biến đổi của động năng, dE/dt ứng với chuyển động quay đó theo M, R, P và dP/dt, trong đó dP/dt đo sự giảm của sự quay (với $dE/dt << E/P$), giữ M và R không đổi. Xác định dE/dt đối với pulsar trong Tinh vân Con cua, sử dụng các giá trị quan sát được P = 0,0333 s và $dP/dt = 4{,}21.10^{-13}$ s/s và các giá trị lí thuyết đối với một sao neutron R = 10 km và M = 1,4Mo. So sánh dE/dt với công suất cần thiết để cung cấp năng lượng cho Tinh vân Con cua.

B7) Hãy ước tính chu kì quay ngắn nhất có thể có của một sao nơtron: cân bằng v^2/r ở bề mặt sao với gia tốc hấp dẫn ở bề mặt. Hãy biểu diễn thời gian thu được theo G và mật độ của sao neutron. So sánh với các thang thời gian thu được từ phương trình (3) của chương VI và phương trình (5) của chương VIIIA. Hãy đánh giá mật độ của một sao neutron.

B8) Từ phương trình (8.11) hãy chỉ ra rằng việc chọn một giá trị M_1 lớn hơn dẫn tới một giá trị M_2 lớn hơn. Vì một quỹ đạo không nằm trong mặt phẳng làm cho giá trị thực của v_t lớn hơn giá trị đo được của nó, hãy chỉ ra rằng sự tăng của v_t trong phương trình (8.11) dẫn tới một giá trị M_2 lớn hơn.

QUESTIONS

Question B1: Dimensional analysis: Write down the time needed for the Sun to shrink to its present luminosity Lo and present radius Ro, using Lo and an estimate of its gravitational energy - GMo^2/Ro. Evaluate this time in millions of years.

Question B2 : When, far in the future, the Sun's radius is 100 Ro, how many degrees in angle will it occupy as seen from Earth, still at 1 A.U. from Sun's center? From a moon of Saturn at 10 A.U.? If at that time the Sun's luminosity is 100 Lo, what is the flux of energy reaching Saturn compared to the flux of energy reaching Earth now?

Question B3: Compute the mean density in a white dwarf, compared to liquid water on Earth. Use $R = 10^{-2}$ Ro and M = Mo. Compute the surface gravity relative to that on Earth.

Question B4: In question (3) of Chapter VI, we estimated the free-fall time for a cloud of initial density ρ to be roughly $(G\rho)^{-1/2}$. Evaluate the free-fall time for the density inside a star that has just used up its last nuclear fuel, $\rho = 10^8 kg/m^3$.

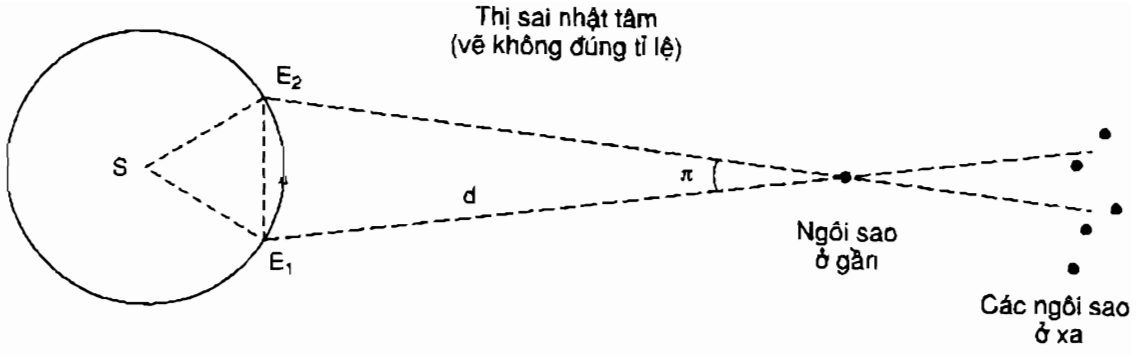
Question B5: Estimate the density of a neutron star assuming that it consists of idealized neutrons that are hard balls with radius of about $0.7 \times 10^{-15} m$. Compute the mass of the top of a table, 0.01 m x 1 m x 1m, made out of matter at the density of a neutron star, and compare to your estimate of the mass of Mount Everest in the Himalayan mountains (rock density $4 \times 10^3 kg/m^3$).

If the mass of this star is 2Mo, compute its radius (compare to the size of Hanoi), compute the gravity on the surface (compare to that on Earth), and compute the escape velocity (compare to the speed of light, c, and ignore relativistic effects).

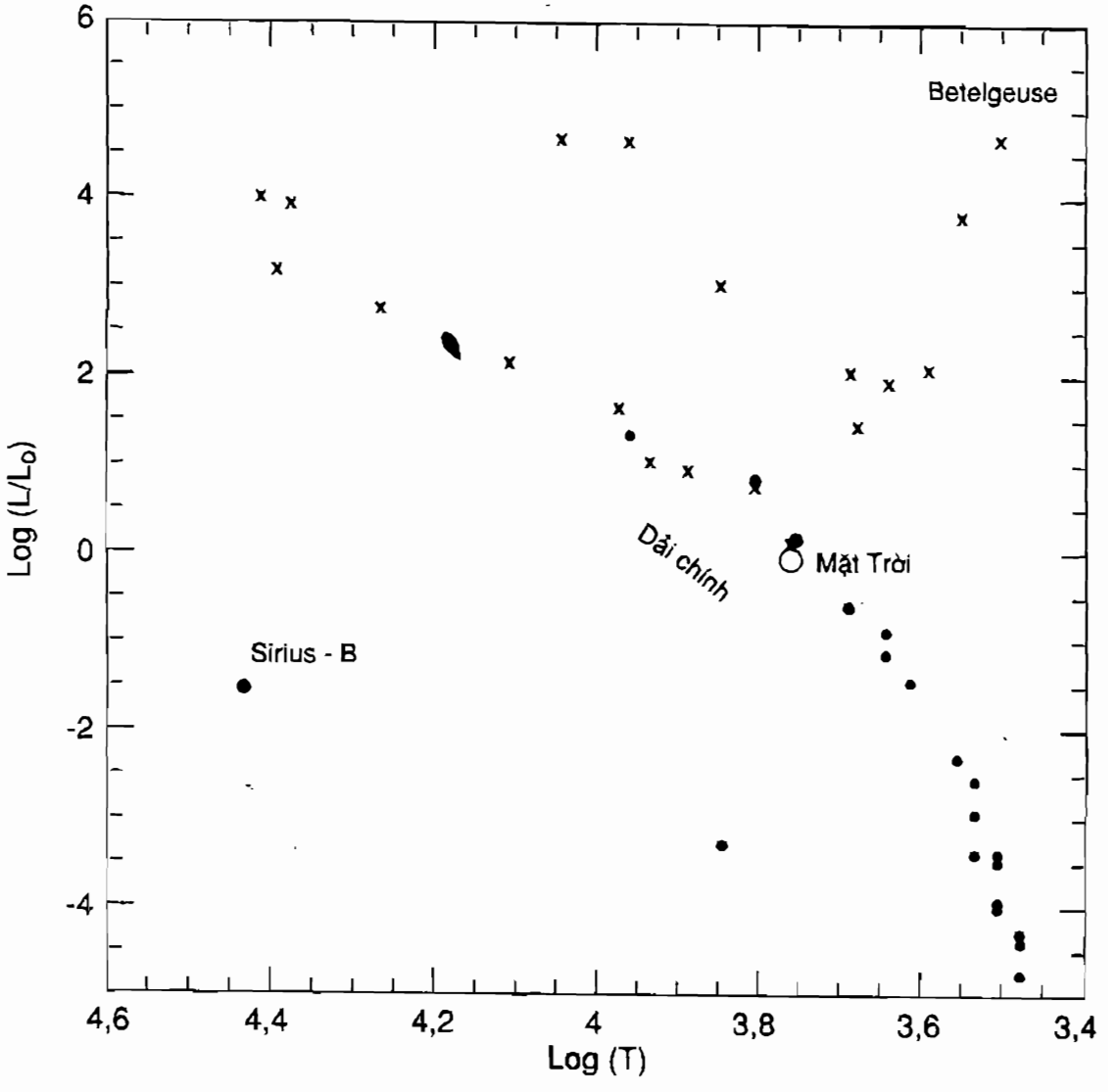
Question B6: Write down the kinetic energy of rotation, E, of a neutron star in terms of M, R, and the rotational period P. Assume uniform density. Then write an equation for the rate of change of rotational kinetic energy, dE/dt, in terms of M, R, P, and dP/dt, where dP/dt measures the slow-down of the rotation (with $dE/dt << E/P$), keeping M and R constant. Evaluate dE/dt for the pulsar in the Crab Nebula using observed values P = 0.0333 s and $dP/dt = 4.21 \times 10^{-13}$ s/s, and theoretical values for a neutron star R = 10 km and M = 1.4Mo. Compare dE/dt to the power needed to energize the Crab Nebula.

Question B7: Estimate the shortest period of rotation possible for a neutron star : equate v^2/r at the surface to the surface gravity. Express the resulting time in terms of G and the density of the neutron star. Compare to the time scales derived in question (3) of Chapter VI and in equation (5) of Chapter VIIIA. Evaluate for the density of a neutron star.

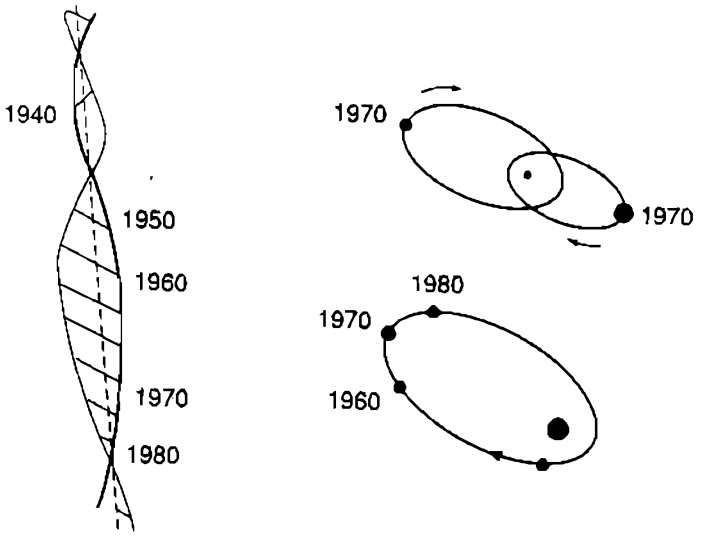
Question B8: Show from equation (8.11) that a larger choice of M_1 yields a larger M_2. Since an orbit not in the plane of the sky makes the actual v_1 larger than the measured value, show that increasing v_1 in equation (8.11) yields a larger M_2.



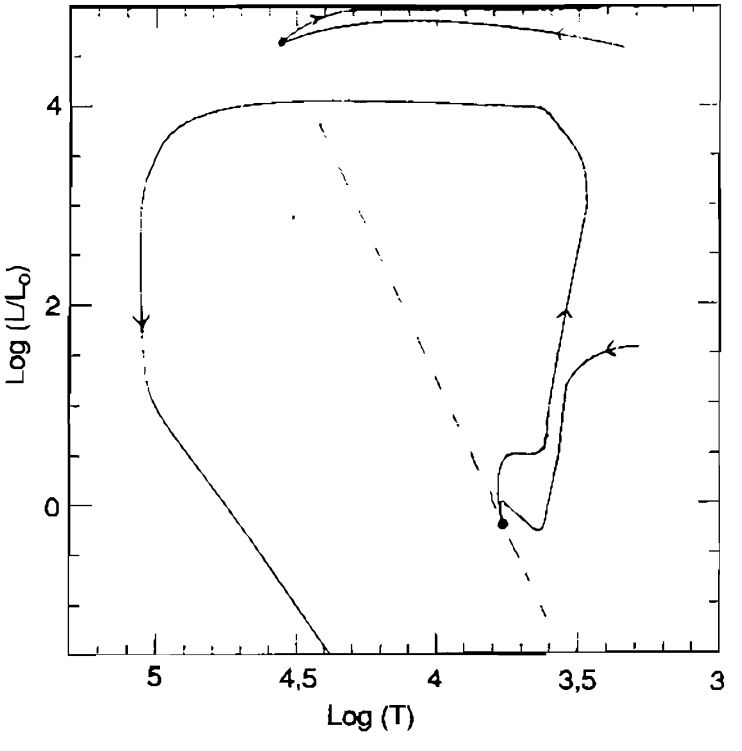
Hình VIII.1



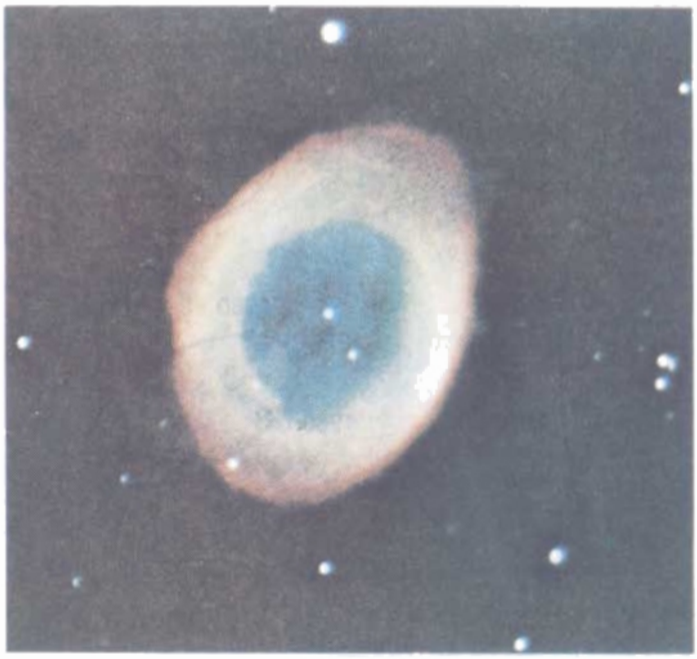
Hình VIII.2



Hình VIII.3



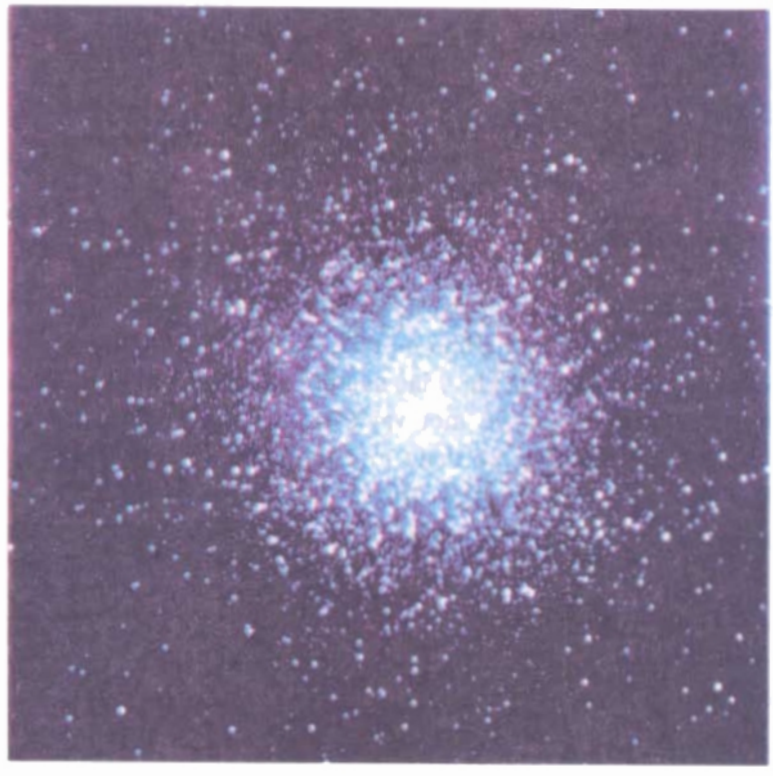
Hình VIII.5



Hình VIII.6

Hình VIII.7

Hình VIII.8



Hình VIII.9

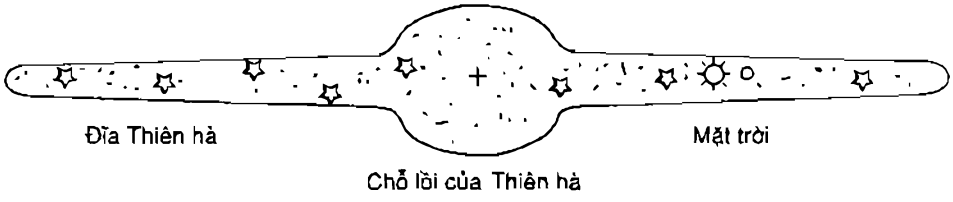
Hình VIII.10

Chương IX

THIÊN HÀ CỦA CHÚNG TA

HÌNH DẠNG CỦA THIÊN HÀ

Thiên Hà của chúng ta (thường được viết hoa - Thiên Hà) là một trong số hàng trăm tỉ thiên hà trong Vũ trụ. Nó là một hệ phẳng giống như một cái đĩa chứa vài trăm tỉ ngôi sao, trong đó có Hệ Mặt Trời. Giữa các ngôi sao có bụi và khí. Mặc dầu bụi và khí, thành phần tạo nên môi trường giữa các sao, rất thưa thớt nhưng chúng có một vai trò quan trọng trong các quá trình lí hoá của Thiên Hà. Phần trung tâm Thiên Hà, có dạng một hình cầu dẹt, được gọi là vùng lồi trung tâm (hình IX. 1). Mặt Trời không nằm ở một vị trí đặc biệt nào đó trong Thiên Hà. Nó ở cách tâm Thiên Hà khoảng 8 kpc, tức là gần một nửa khoảng cách từ tâm đến bờ của mặt phẳng Thiên Hà.



Hình IX. 1:

Mô hình phác hoạ Thiên Hà (nhìn ngang)

Vùng trung tâm Thiên Hà

Trung tâm Thiên Hà ở xa Mặt Trời và vì vậy chúng ta nhìn thấy nó rất mờ do có nhiều bụi ở giữa các sao. Việc quan sát ở các bước sóng dài, như vô tuyến và hồng ngoại, cho phép các nhà thiên văn nghiên cứu sâu vào vùng trung tâm Thiên Hà. Vùng này, được gọi là vùng lồi của Thiên Hà, gồm một đám mây có hình phồng cầu dẹt, được tạo bởi các ngôi sao già, khí và bụi, có bán kính ~ 1 kpc và có độ dày ~ 400 pc.

Ngay ở trung tâm Thiên Hà có một nguồn phát xạ hồng ngoại sáng và cũng là nguồn phát xạ vô tuyến synchrotron mang tên Sagittarius A*. Mặc dầu có mật độ vật chất rất lớn, với kích thước vào cỡ quỹ đạo của Hoả Tinh (~ 3 đơn vị thiên văn, tức là 450 triệu km), nguồn này phát ra năng lượng tương đương với độ trưng của chừng 20 triệu ngôi sao như Mặt Trời và phóng ra một luồng gió mạnh. Căn cứ vào các dữ liệu quan sát này, các nhà thiên văn tin rằng nguồn này trùng với nhân của Thiên Hà và họ suy luận rằng nó có thể được cung cấp năng lượng bởi một hốc đen có khối lượng ít nhất cũng bằng một trăm lần khối lượng Mặt Trời và có thể bằng một triệu lần khối lượng Mặt Trời.

Các sợi tạo bởi khí tạo thành một cung trải ra xa mặt phẳng Thiên Hà cũng được phát hiện ở khu vực trung tâm Thiên Hà. Có thể đã từng có một số vụ nổ ở nhân, phóng ra vật chất. Vật chất này đang rơi trở lại trên mặt phẳng Thiên Hà.

Thành phần dạng đĩa và cấu trúc xoắn ốc

Đĩa Thiên Hà lớn, có đường kính khoảng 30 kpc, nhưng rất mỏng. Đĩa khí chỉ dày khoảng 100 pc và đĩa sao chứa các sao trẻ chỉ dày khoảng 500 pc. Vì chúng ta đứng ở bên trong Thiên Hà nên chúng ta thấy nhiều sao mà không thể có được một khái niệm về hình dạng của Thiên Hà.

Chapter IX

OUR GALAXY

THE SHAPE OF THE GALAXY.

Our Galaxy (usually written with capital G) is one among hundreds of billions of galaxies in the Universe. It is a flat system like a disc containing a few hundred billion stars including the solar system. Gas and dust exist between the stars. Although it is very tenuous, the gas and dust component, which constitutes the interstellar medium, plays an important role in the physio-chemical processes in the Galaxy. The central region of the Galaxy has the shape of a flattened sphere called the central bulge (Fig. IX.1). The Sun does not occupy an exceptional position in the Galaxy. It is at about 8 kpc from the center of the Galaxy, that is approximately at half distance between the center and the edge of the galactic plane.

Figure IX.1

Sketch of the Galaxy seen edge-on

The galactic center region

The center region of the Galaxy is far from the Sun and is therefore highly obscured in the visible by a large amount of interstellar dust. Observations at longer wavelengths, namely radio and infrared observations, permit astronomers to penetrate more deeply into the galactic center region. This region consists of an oblate spheroidal cloud of old stars, gas and dust, the galactic bulge, with a radius of ~ 1 kpc and a thickness of ~ 400 pc.

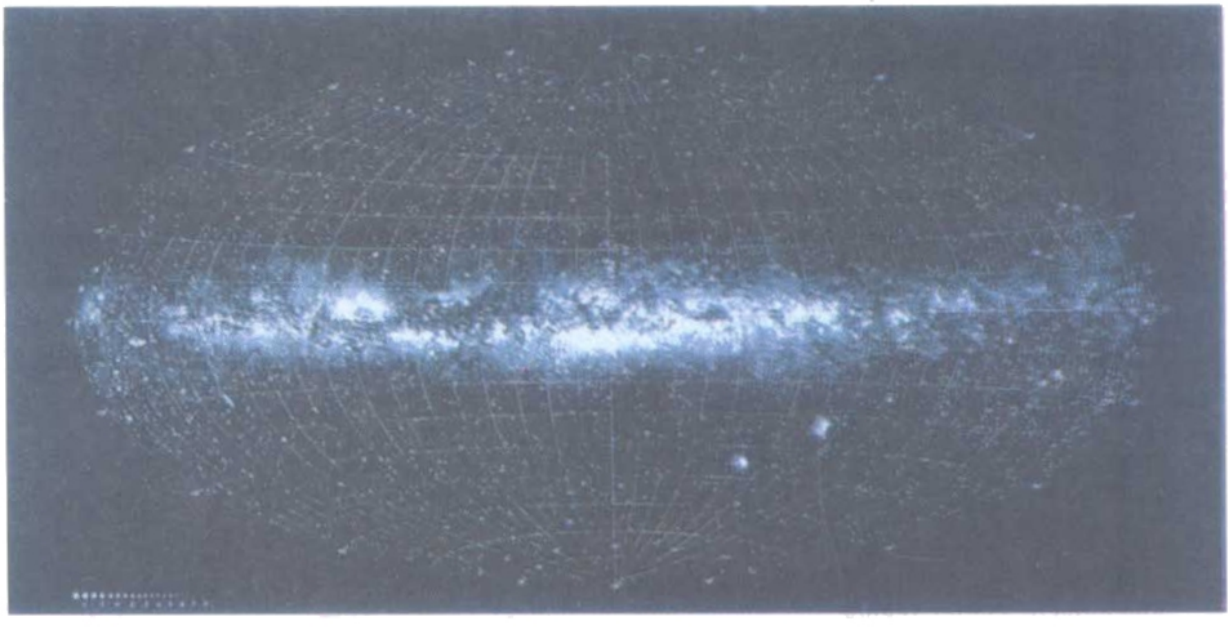
Right at the center of the Galaxy there is a bright infrared source which is also a synchrotron radio source named Sagittarius A*. Though very compact, with a size similar to that of the orbit of Mars (~ 3 astronomical units, i.e. 450 million km), this source emits an energy equivalent to the luminosity of 20 million stars like the Sun and blows a strong wind. Based on these observational facts, astronomers believe that this source coincides with the nucleus of the Galaxy and speculate that it may be powered by a black hole having a mass of at least 100 solar masses, even perhaps as massive as a million solar masses.

Filaments of gas forming an arc running out of the galactic plane are also detected in the center region of the Galaxy. There may have been some explosion in the nucleus, ejecting matter, which is falling back onto the plane.

The disc component and the spiral structure

The galactic disc is large, with a diameter of about 30 kpc, but it is very thin. The gaseous disc is only about 100 pc and the stellar disc within which the youngest stars are contained is about 500 pc thick. Since we are inside our Galaxy, we see a lot of stars, but they give us no idea about its shape.

Tình trạng của chúng ta thường được ví như tình trạng của một người ở giữa một khu rừng. Người đó chỉ thấy cây mà không thể biết được khu rừng có hình dạng như thế nào. Từ Trái đất chúng ta nhìn thấy hình chiếu của Thiên Hà trên thiên cầu như một dải sáng trải ra trên bầu trời đêm, thường được gọi là Dải Ngân Hà (hình IX. 2). Mặt phẳng trung tâm của Dải Ngân Hà trở nên tối do một làn bụi dài.



Hình IX.2:

Toàn cảnh Dải Ngân Hà (Thiên Hà của chúng ta) được vẽ với hàng ngàn sao với các vùng sáng HII và các vùng bụi tối (Ảnh: Đài quan sát thiên văn Lund, Thụy Điển).

Tuy nhiên chúng ta có thể cho rằng Thiên Hà có cấu trúc xoắn ốc, vì qua kính thiên văn, chúng ta quan sát thấy cấu trúc như vậy trong các thiên hà khác, có cùng tính chất như Thiên Hà của chúng ta. Sự tồn tại của những cánh tay xoắn ốc trong Thiên Hà của chúng ta được khẳng định bởi kết quả nghiên cứu các sao nóng và sáng loại O và B xếp thành những vệt sáng liên tục có dạng các cánh tay xoắn ốc. Các vùng ion hiđrô HII trong đó có chứa các sao nóng sáng bị tán xạ dọc theo các nhánh xoắn. Trong Thiên Hà của chúng ta, việc quan sát vùng HII được tiến hành theo vạch phát xạ Hα khả kiến của nguyên tử H. Do sự quan sát ở vùng sóng khả kiến thường bị cản trở bởi bụi giữa các sao nên chúng được bổ sung bằng quan sát theo sóng vô tuyến. Việc khảo sát sự phân bố của các vùng HII trong Thiên Hà của chúng ta theo các vạch phổ quang học và các vạch phổ vô tuyến đã cho chúng ta biết rằng Thiên Hà có bốn cánh tay xoắn ốc chính toả ra quanh tâm Thiên Hà. Mặt Trời ở trên một đoạn của một cánh tay mang tên Lạp Hộ (Orion), nằm giữa hai cánh tay xoắn ốc ngoài. Tên của các cánh tay xoắn ốc của Thiên Hà được bắt nguồn từ tên các chòm sao mà cánh tay in hình lên (hình IX.3).

Hình IX.3

Hình mô phỏng cấu trúc xoắn ốc của Thiên Hà. Những vòng trắng là những vùng sáng HII được quan sát ở các bước sóng khả kiến và vô tuyến.

Quầng Thiên Hà

Những sao già nhất tích tụ thành những đám dày đặc được gọi là đám sao hình cầu (hình VIII. 9). Các đám sao này phân bố theo một quầng xung quanh đĩa Thiên Hà. Khí và bụi trong quầng thưa thớt hơn trong đĩa. Đường kính quầng thiên hà vào khoảng 40 kpc.

Our situation is usually compared to that of someone in the middle of a forest. He sees a lot of trees, but totally ignores what the forest actually looks like. We observe from the Earth the projection of the Galaxy on the celestial sphere, a bright band of light running across the night sky commonly known as the Milky Way (Fig. IX.2). The central plane of the Milky Way is darkened by a long dust lane.

Figure IX.2

Panorama of the Milky Way (our Galaxy) drawn with thousands of stars together with bright HII regions and dust patches (Lund Observatory, Sweden)

We however suspect that our Galaxy should have a spiral structure, since through telescopes we observe such structure in other galaxies which have the same properties as ours. The existence of spiral arms in our Galaxy is confirmed by the study of hot and bright O, B stars which trace bright continuous structures reminiscent of the spiral arms. Regions of hydrogen ions (HII regions) in which bright hot stars are embedded are also scattered along the spiral arms. In our Galaxy, the observations of HII regions are made in the visible Hα line of the hydrogen atom. Since the observations in the visible suffer from interstellar extinction, they are complemented by radio observations. The investigation of the distribution of the HII regions in our Galaxy in both the optical and radio lines has revealed that our Galaxy has four main spiral arms winding around the galactic center. The Sun lies in a portion of an arm, the Orion arm, between two external spiral arms. The names of the galactic arms originate from the constellations in which the arms appear (Fig. IX.3).

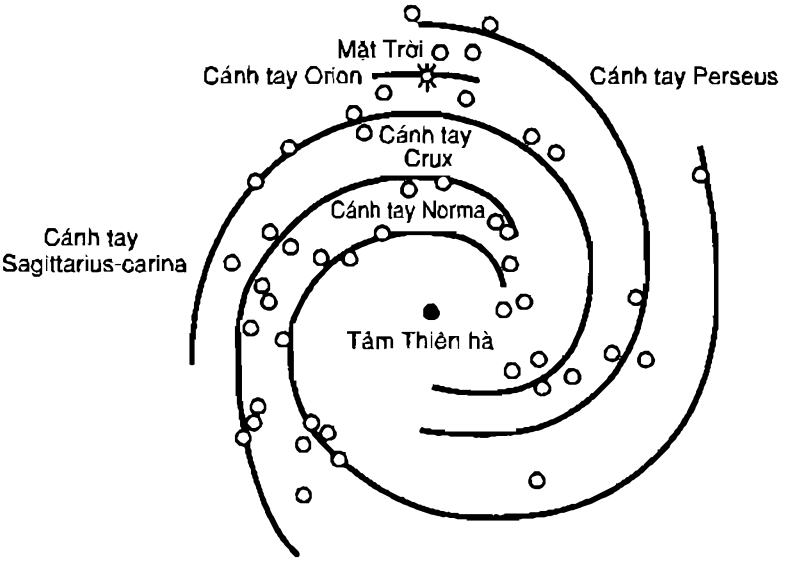


Figure IX.3

Sketch of the spiral structure of our Galaxy. White dots are bright HII regions observed in the visible and at radio wavelengths.

The galactic halo

The oldest stars are gathered together into compact clusters called globular clusters (see Fig. VIII.9) which are scattered throughout a halo around the galactic disc. Gas and dust in the halo is much more tenuous than in the disc. The diameter of the galactic halo is as large as about 40 kpc.

Những kết quả nghiên cứu gần đây về chuyển động quay của các thiên hà đã gợi ra ý nghĩ rằng quầng thiên hà có chứa những loại vật chất không thể được phát hiện ở bất cứ một loại sóng nào, bên cạnh vật chất được phát hiện qua sóng khả kiến, hồng ngoại và vô tuyến hay qua các vùng khác của phổ điện từ. Điều ngạc nhiên là khối lượng của vật chất "không nhìn thấy" này ít nhất là năm lần nhiều hơn tổng khối lượng phát xạ mà các nhà thiên văn đã phát hiện được trong toàn bộ Thiên Hà. Các nhà thiên văn và các nhà khoa học thuộc lĩnh vực vật lí hạt cơ bản đang tích cực tìm cách giải thích bản chất của "sự hụt khối lượng" này (xem chương XI).

XỨ SỞ CỦA CÁC TINH VÂN

Đĩa của Thiên Hà chứa các tinh vân, những đám mây bụi được rọi sáng bởi các sao ở gần chúng hay những đám mây khí bị ion hoá sáng trong đó có các sao trẻ và nóng. Những tinh vân khác là tàn dư của các sao đang hấp hối. Như vậy, các tinh vân thiên hà là nơi có chứa các sao ở các độ tuổi khác nhau. Chúng là đối tượng ưu tiên của các nhà thiên văn nghiên cứu sự tiến hoá của các sao, sự trao đổi vật chất giữa các sao và môi trường giữa các sao. Chúng còn có thể được sử dụng như là dấu hiệu của cấu trúc thiên hà, vì chúng nằm trên các cánh tay xoắn ốc. Các nhà thiên văn quan sát các tinh vân ở các bước sóng quang học, hồng ngoại và vô tuyến.

Tinh vân phản xạ

Khí và bụi trong Thiên Hà có thể tích tụ để tạo thành các đám mây giữa các sao chứa chủ yếu là hiđrô. Thành phần khí trong đám mây đặc là hiđrô ở dạng phân tử. Có cả các phân tử đa nguyên tử khác, nhưng với số lượng ít hơn nhiều. Những đám mây phân tử này, là những đám mây bụi, lạnh, xuất hiện dưới dạng tinh vân tối tỏa rộng trên nền của Dải Ngân Hà. Nếu đám mây bụi được chiếu sáng bởi một sao sáng hay một nhóm sao sáng ở chung quanh thì nó phản chiếu và làm tán xạ ánh sáng của các sao. Do ánh sáng xanh bị tán xạ mạnh hơn ánh sáng đỏ nên tinh vân hiện ra như một tinh vân phản xạ màu xanh.

Hình IX.4: (Xem cuối chương)

Tinh vân phản xạ cùng với các sao của đám Tua-rua (Pleides).
(Ảnh: Đài quan sát thiên văn Hale, Viện kỹ thuật California)

Các vùng khí bị ion hoá HII

Nếu một đám mây giữa các sao chứa một nhóm sao nóng loại O và B bức xạ mạnh ở miền tử ngoại thì khí của nó bị ion hoá (vùng HII). Thành phần chính của khí loãng giữa các sao là hiđrô nguyên tử. Phổ của vùng HII bao gồm một chuỗi các vạch phát xạ, đặc biệt là vạch Hα ở bước sóng 0,6563 μm, được quan sát dưới dạng một vạch màu đỏ (hình IV.5). Các phôton đi ion hoá giữa các sao kích thích các nguyên tử hiđrô đến trạng thái ion hoá, từ đây nguyên tử bị ion hoá tái hợp với các electron tạo thành nguyên tử trung hoà. Quá trình tái hợp dẫn các nguyên tử trung hoà vừa được tạo thành đến trạng thái năng lượng kích thích, từ đó chúng nhảy xuống những mức năng lượng thấp hơn làm phát xạ các phôton ở mỗi lần chuyển mức, đặc biệt là vạch Hα tương ứng. Các vùng HII được quan sát theo vạch phổ này xuất hiện dưới dạng những tinh vân khí sáng đẹp tựa như Tinh vân Lạp Hộ (Orion) (xem hình VIII.7). Các vạch phát xạ từ các vùng HII cũng được phát hiện ở các bước sóng hồng ngoại và vô tuyến. Các vạch hồng ngoại và vô tuyến là rất hữu ích trong việc nghiên cứu các vùng HII ở xa vì so với vạch quang học Hα thì chúng ít bị môi trường giữa các sao hấp thụ hơn.

Recent studies of the rotation motion of galaxies strongly suggest that the halo should harbor, apart from matter detectable in the visible, infrared and in radio waves or in other regions of the electromagnetic spectrum, matter which is undetectable at any wavelength. Surprisingly, the mass of this "invisible" matter appears to be at least 5 times larger than the total radiating mass that astronomers have detected in the whole Galaxy. Astronomers and scientists in the field of particle physics are trying actively to elucidate the nature of this "missing mass" (see Chapter XI).

THE REALM OF THE NEBULAE.

The disc of the Galaxy contains nebulae which are dust clouds illuminated by nearby stars or bright ionized gas clouds in which young and hot stars are embedded. Others are the remnants of dying stars. Galactic nebulae are, therefore, the site of stars of different ages. They are favorite targets for astronomers who investigate the stellar evolution and the exchange of matter between stars and the interstellar medium. They can also be used as tracers of the galactic structure, since they are located in the spiral arms. Astronomers observe nebulae at optical, infrared and radio wavelengths.

Reflection nebulae

Gas and dust in the Galaxy can condense to form interstellar clouds which contain principally hydrogen. The gaseous content of the densest clouds consists of hydrogen in molecular form. There are also other polyatomic molecules but in much lower quantity. These molecular clouds, which are cold and dusty, appear as extended patchy dark nebulae in the map of the Milky Way. If the dust cloud is illuminated by a bright star or a group of bright stars in the surroundings, the cloud reflects and scatters the starlight. Since blue light is more strongly scattered than red light, the nebula appears as a blue reflection nebula (Fig.IX.4).

Figure IX.4

Reflection nebulae associated with stars of the Pleiades cluster
(Photograph from Hale Observatories. California Institute of Technology)

HII regions of ionized gas

If an interstellar cloud contains a group of hot O and B type stars emitting a large ultraviolet flux, its gas becomes ionized (HII region). The main constituent of the diffuse interstellar gas is atomic hydrogen. The spectrum of a HII region consists of a series of emission lines, in particular the Hα line at 0.6563 μm which is observed as a red line (see Fig. IV.5). The ionizing stellar photons excite hydrogen atoms to an ionized state, whence ionized atoms recombine with electrons to form neutral atoms. The recombination process leaves the resultant neutral atoms in an excited energy state from where they cascade down to lower energy states emitting photons at each transition, in particular the corresponding Hα line. HII regions observed in this line appear as beautiful bright gaseous nebulae like the Orion Nebula (see Fig.VIII.7). Emission lines from HII regions are also detected at infrared and radio wavelengths. Infrared and radio lines are particularly useful to study distant HII regions, since they are much less affected by interstellar extinction than the optical Hα line.

Các vùng HII phát bức xạ nhiệt liên tục gây ra bởi các electron tự do tương tác với ion (chương IV). Các hạt bụi nóng tích tụ trong khí bị ion hoá được hun nóng bằng cách hấp thụ bức xạ của các sao, cũng phát bức xạ liên tục. Tinh vân Orion, tinh vân khí sáng ở gần ta nhất, là một trong những đối tượng quan sát được ưa thích của các nhà thiên văn quang học và các nhà thiên văn vô tuyến. Nó bao gồm một số nguồn hồng ngoại, là các sao đang trong giai đoạn hình thành. Các sao rất trẻ này ở trạng thái những phôi sao là nhân của các đám mây dày đặc giữa các sao đang co nén và cuối cùng sụp đổ do hấp dẫn do trọng lượng của chúng. Quá trình hình thành sao này được gọi là sự suy sụp hấp dẫn. Những sao trẻ này được bọc trong một cái bọng bụi chưa đủ nóng để phát xạ ở vùng phổ khả kiến nhưng phát xạ bức xạ hồng ngoại mạnh.

Tinh vân hành tinh

Khi một ngôi sao có kích thước như Mặt Trời tiến hoá, nó phóng khí và bụi vào môi trường giữa các sao để tạo thành một vỏ bao quanh các sao. Ở giai đoạn tiến hoá cuối cùng, sau khi đã cạn kiệt nhiên liệu hạt nhân và trước khi kết liễu, ngôi sao đang hấp hối ion hoá vỏ của nó. Vỏ này trở thành một tinh vân sáng, được gọi là tinh vân hành tinh, đôi khi có dạng một cái vòng (hình VIII.6). Tên gọi tinh vân hành tinh có thể gây hiểu nhầm và có một nguồn gốc lịch sử vì loại đối tượng này có hình dạng trung gian giữa một tinh vân nhỏ hình tròn và một số hành tinh.

Tàn dư của các vụ nổ sao siêu mới

Một số tinh vân là tàn dư của vụ nổ sao siêu mới. Vào cuối đời, các sao có khối lượng lớn trải qua một vụ nổ cực mạnh được gọi là vụ nổ sao siêu mới (chương VIII.B). Khí phóng ra bị ion hoá bởi ngôi sao đang bùng nổ và bởi sóng xung kích. Vật chất phóng ra (khí và bụi) quyện với khí giữa các sao tạo thành một tinh vân sáng. Một thí dụ điển hình là Tinh vân Con cua - tàn dư của vụ nổ sao siêu mới được quan sát vào năm 1054. Nhìn qua kính thiên văn, các nhà thiên văn có thể thấy các sợi khí sáng phóng ra với tốc độ hàng ngàn km mỗi giây (hình VIII.10). Bụi khí sáng của tàn dư vụ nổ sao siêu mới là một nguồn phát xạ mạnh bức xạ synchrotron ở bước sóng vô tuyến. Phần trung tâm vẫn hoạt động cực mạnh như một pulsar. Nó là một kho chứa các electron tương đối tính bị bẫy bởi từ trường ở chung quanh, gây ra bức xạ phi nhiệt mạnh ở các bước sóng khả kiến và vô tuyến.

Trong nhiều trường hợp, sóng xung kích của vụ nổ sao siêu mới cuốn theo các mảnh vụn được tạo ra từ vụ nổ, tạo ra khoảng rỗng quanh ngôi sao đang nổ, hình thành nên một lớp vỏ rỗng dày nhiều hoặc ít. Các đối tượng này nói chung thuộc thế hệ già, tương tự như Cygnus Loop (Lưới Thiên Nga) là tàn dư của một vụ nổ sao siêu mới khác. Lớp vỏ của nó, bao quanh sao mẹ, có bán kính trải rộng đến 15 pc. Từ các phép đo quang phổ về tốc độ giãn nở người ta ước tính vụ nổ sao siêu mới này đã xảy ra cách đây khoảng 50 ngàn năm. Vỏ của tàn dư tương đối lâu đời này hiện đang giãn nở với tốc độ chỉ khoảng vài trăm kilomet một giây. Nó sẽ tiếp tục giãn nở với tốc độ giảm dần và cuối cùng sẽ biến mất trong môi trường giữa các sao, sau hàng trăm ngàn năm.

Từ cuộc đời của các tàn dư vụ nổ sao siêu mới trong Thiên Hà của chúng ta và của một số tàn dư đã quan sát được, người ta ước tính tốc độ của các vụ nổ sao siêu mới vào khoảng một lần sau một trăm năm. Con số này là không chính xác vì việc xác nhận một nguồn vô tuyến như là một tàn dư vụ nổ sao siêu mới là không chắc chắn. Một số vùng HII có thể bị xác định nhầm như là tàn dư của vụ nổ sao siêu mới. Việc các nhà thiên văn chỉ quan sát được bốn vụ nổ ở vùng sóng khả kiến trong thiên niên kỉ thứ hai có thể được giải thích bởi sự có mặt của bụi giữa các sao làm che lấp một số hiện tượng đã xảy ra ở rất xa chúng ta trong Dải Ngân Hà.

The HII regions emit thermal continuum radiation produced by free electrons interacting with ions (see Chapter IV). Warm dust grains embedded in the ionized gas, heated by absorbing stellar radiation, also show a continuum emission. The Orion Nebula, which is the nearest bright gaseous nebula, is one of the favorite objects observed by astronomers and radio astronomers. It contains several infrared sources which are stars still in formation. These very young stars in the state of stellar embryos are the cores of dense interstellar clouds, which contract and eventually collapse due to their own weight. This process of star formation is called gravitational collapse. Such young stars are wrapped in a dust cocoon, which is not hot enough to radiate in the visible but emits strong infrared radiation.

Planetary nebulae

As a star of the size of the Sun evolves, it sheds gas and dust into the interstellar medium to form an envelope around the star. At the ultimate stage of evolution, after burning all its nuclear fuel and before fading out for ever, the dying star ionizes its envelope which becomes a bright nebula called a planetary nebula, sometimes in the form of a ring (see Fig.VIII.6). The designation of planetary nebula is somewhat misleading and has a historical origin, since this kind of object has a visual aspect between a small roundish nebula and some planets.

Supernova remnants

Several nebulae are supernova remnants. At the end of their life, massive stars undergo gigantic explosions called supernovae (see Chapter VIIIB). The ejected gas is ionized by the exploding star and by shock waves. The ejected material (gas and dust) is mingled with the interstellar gas to form a bright nebula. A famous example is the Crab Nebula, remnant of the supernova explosion which was observed in the year 1054. Through telescopes, astronomers can see bright filaments of gas ejected at thousands of kilometers per second (see Fig.VIII.10). The bright gaseous supernova remnant is a powerful synchrotron radio source. The central object is still very active as a pulsar. It is a reservoir of relativistic electrons, which are trapped in the surrounding magnetic field, resulting in a strong non-thermal radiation in the visible and at radio wavelengths.

In many cases, the blast waves of supernovae sweep away the debris of the explosion, produce a void around the exploding star, and build up a more or less thick hollow shell. These objects are generally old, like the Cygnus Loop, another remnant of a supernova explosion. Its shell, surrouding the parent star, has since expanded to a radius of 15 pc. From spectroscopic measurements of the expansion velocity, this supernova explosion was estimated to have occured some 50 thousands years ago. The shell of this relatively old remnant is currently expanding at only a few hundreds of kilometers per second. It will slow down and ultimately will be dispersed in the interstellar medium after hundreds of thousands of years.

From the lifetime of the supernova remnants in our Galaxy and the number of the observed remnants, one can estimate the rate of supernova explosions to be about one every hundred years. This value is not accurate because the identification of a radio source as a supernova remnant is not certain. Some HII regions may be misidentified as supernova remnants. The fact that astronomers observed only four explosions in the visible during the last millenium can be explained by the presence of interstellar dust, which obscurs some events occurring far away in the Milky Way.

Sự phát xạ tia X đã được phát hiện từ các tàn dư vụ nổ sao siêu mới nhờ các kính thiên văn đặt trên các vệ tinh. Nguồn gốc của tia X chưa được xác định rõ. Trong nhiều trường hợp, bức xạ tia X có thể là loại bức xạ nhiệt phát ra từ các khí cực nóng bị nung nóng đến hàng chục triệu độ - hậu quả của sự va chạm giữa lớp vỏ đang giãn nở của vụ nổ sao siêu mới và khí ở môi trường giữa các sao chung quanh. Trong Tinh vân Con Cua, nơi có chứa một pulsar, các electron có thể bị gia tốc liên tục đến tốc độ tương đối tính bởi pulsar của nó (chương VIIIB). Vì vậy, bức xạ tia X của Tinh vân Con cua có thể là bức xạ phi nhiệt synchrotron. Tinh vân Con cua cũng phát xạ tia gamma - loại bức xạ đòi hỏi các electron có năng lượng cao hơn nhiều so với tia X. Song vấn đề gia tốc cho các electron đến năng lượng cao như thế còn chưa được lí giải.

TIA VŨ TRỤ

Sao siêu mới phóng vào môi trường giữa các sao các hạt năng lượng cao như các proton, electron và hạt nhân nguyên tử, là những hạt thành phần của tia vũ trụ. Các hạt vũ trụ có vai trò quan trọng trong sự hun nóng và làm ion hoá môi trường giữa các sao. Với tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng, chúng đến Trái đất sau vài ngàn năm nếu truyền theo đường thẳng. Thực tế thì các hạt của tia vũ trụ chuyển động một cách hỗn độn theo từ trường xoắn của Thiên Hà của chúng ta và vì vậy phải mất đến hàng triệu năm mới tới được phạm vi Hệ Mặt Trời. Các electron của tia vũ trụ gây ra nền bức xạ synchrotron. Nó đóng góp vào bức xạ nền của toàn Thiên Hà mà bức xạ này cũng có một thành phần bức xạ nhiệt loãng của các khí ion hoá giữa các sao.

Dưới đây chúng ta sẽ biết rằng môi trường giữa các sao là một phòng thí nghiệm giàu các hạt và các phân tử đủ loại, trước hết tồn tại trong các đám mây giữa các sao hay được phóng ra từ các sao đang hấp hối.

Môi trường giữa các sao

Các sao và các tinh vân sáng hiện ra trước mắt chúng ta như những đối tượng cô lập. Thực ra không gian giữa các sao - môi trường giữa các sao - không phải là hoàn toàn trống rỗng. Nó là một môi trường loãng chứa khí và bụi có mật độ rất thấp. Thành phần cơ bản của môi trường giữa các sao là hiđrô nguyên tử. Tuy nhiên, ở một số nơi, bụi và khí có mật độ tương đối lớn để hình thành các đám mây riêng rẽ trong không gian giữa các sao, trong đó các nguyên tử hiđrô có thể kết hợp thành các phân tử hiđrô. Các phân tử phức tạp hơn tồn tại trong các đám mây giữa các sao nhưng với số lượng bé hơn.

Thành phần bụi

Pha trộn vào khí có các hạt bụi vi mô, đặc biệt là các hạt silicate và graphite kích thước khoảng 0,1 μm và những tinh thể nước đóng băng. Thành phần khí chi phối thành phần bụi tính theo khối lượng khoảng 200 : 1. Bụi giữa các sao tán xạ và hấp thụ ánh sáng của các sao, do đó ta không thể quan sát được quá sâu vào trong Thiên Hà ở ánh sáng khả kiến.

Quá trình làm giảm ánh sáng do bụi trong môi trường giữa các sao hấp thụ thay đổi từ nơi này đến nơi khác. Bụi giữa các sao có thể làm giảm ánh sáng của các ngôi sao từ 2 đến 50 cấp sao. Môi trường giữa các sao trong suốt ở các bước sóng dài hơn là ở các bước sóng ngắn. Thí dụ, sự dập tắt do bụi giữa các sao giảm hơn 10 lần đối với bức xạ hồng ngoại gần ở bước sóng 2 μm so với ánh sáng khả kiến. Sóng vô tuyến truyền tự do trong không gian giữa các sao. Do đó các nhà thiên văn khảo sát phần trong cùng của Thiên Hà ở các bước sóng hồng ngoại và vô tuyến.

X-ray emission has been detected from supernova remnants by the use of telescopes on board satellites. The origin of the X-rays is not well established. In most cases, the X-radiation is probably thermal emission from very hot gas heated to temperatures of ten million degrees, as a result of the shock between the expanding supernova shell and the ambient interstellar gas. In the Crab Nebula, which harbors a pulsar, electrons can be continuously accelerated to relativistic velocities by its pulsar (see Chapter VIIIB). Therefore, the X-radiation of the Crab Nebula may be non-thermal synchrotron emission. The Crab Nebula emits even gamma-rays which require electrons more energetic than in the case of X-rays. However, the problem of the acceleration of the electrons at such high energies is still to be elucidated.

COSMIC RAYS.

Supernovae eject into the interstellar medium highly energetic particles, namely protons, electrons and atomic nuclei, which are the constituents of cosmic rays. These cosmic particles play a major role in the heating and ionization of the interstellar medium. With velocities close to the velocity of light, they would take typically a few thousand years to reach the Earth if they travel along a straight line. In fact, particles of cosmic rays follow the twisted magnetic field of our Galaxy in a random walk and, therefore, take millions of years to get to the solar neighborhood. The electrons of cosmic rays produce a background of synchrotron radiation. It contributes to the total galactic background emission which has also a diffuse thermal component coming from the interstellar ionized gas.

We shall see later that the interstellar medium is a laboratory rich in particles and molecules of all kinds initially present in the interstellar clouds or ejected by dying stars.

The interstellar medium

The stars and bright nebulae appear to us as isolated objects. But the space between the stars, the interstellar medium, is far from being completely void of matter. It is a tenuous medium containing gas and dust of lower density. The main constituent of the interstellar medium is atomic hydrogen. However, in some places, gas and dust are sufficiently dense to form individual interstellar clouds in which hydrogen atoms can combine to hydrogen molecules. More complex molecules exist in interstellar clouds, but in a lower quantity.

The dust component

Mixed with the gas are microscopic dust particles, especially silicate grains and graphite particles of the size of ~ 0.1 μm, as well as ice crystals. The gas component dominates with a gas to dust ratio of about 200:1 by mass. The interstellar dust scatters and absorbs starlight, so that from the Earth we cannot observe very far inside the Galaxy in the visible light.

The dimming process which is responsible for the interstellar extinction varies from place to place. Interstellar dust can attenuate starlight by 2 to 50 magnitudes. The interstellar medium is more transparent at long wavelengths than at short wavelengths. For example, the extinction caused by interstellar dust is reduced by a factor of more than ten for near infrared radiation at 2 μm than for visible light. Radio waves propagate freely in the interstellar space. Astronomers therefore observe at infrared and radio wavelengths to probe the innermost part of the Galaxy.

Hiệu ứng đỏ hoá được gọi là sự đỏ hoá giữa các sao. Nó được gây ra do bức xạ màu xanh lam bị tán xạ ra mọi phương mạnh hơn bức xạ màu đỏ và do đó có nhiều ánh sáng đỏ của các sao truyền đến người quan sát hơn. Hiệu ứng này dẫn tới sự đổi màu của ánh sáng sao. Ánh sáng sao trở nên đỏ hơn mỗi khi nó truyền qua môi trường giữa các sao.

Thành phần khí

Nhiệt độ trung bình và mật độ của môi trường giữa các sao tương ứng vào khoảng vài chục độ Kenvin và vài chục triệu hạt (chủ yếu là nguyên tử hiđrô) trong mỗi m^3. Đó là những giá trị rất bé so với các trị số chuẩn ở trên Trái Đất, nơi có nhiệt độ thường cao hơn 273 K và mật độ khí ta thở vào khoảng 10^{25} nguyên tử và phân tử trong mỗi m^3. Chân không thực hiện được trong phòng thí nghiệm trên Trái Đất cũng vẫn tương ứng với vài ngàn tỉ phân tử trong mỗi m^3. Tuy nhiên, thể tích và khối lượng vật chất giữa các sao rất lớn. Khối lượng vật chất giữa các sao vào khoảng 10 tỉ lần khối lượng Mặt Trời. Giá trị này tương ứng với khoảng 10 phần trăm tổng khối lượng Thiên Hà của chúng ta. Môi trường giữa các sao chìm đắm trong một từ trường yếu, vào khoảng vài phần triệu gauss (10^{-10} tesla).

Sự làm giàu thành phần hoá học trong môi trường giữa các sao

Chúng ta đã biết rằng Mặt Trời và các sao sống và chết như thế nào (chương VII và VIII). Trong các phần tiếp theo, chúng ta sẽ bàn về tác động của giai đoạn cuối của cuộc đời của các sao đến môi trường giữa các sao cũng như nhiều hiện tượng vật lí lí thú diễn ra trong giai đoạn này. Đặc biệt, thông qua quá trình làm mất khối lượng tạo ra gió sao, các sao đã tiến hoá ở giai đoạn kềnh đỏ phóng vào môi trường giữa các sao vật chất đã được tái sinh trước đó ở phần bên trong của sao. Các sao có khối lượng ban đầu nằm trên dải chính bé hơn 8 lần khối lượng Mặt Trời kết thúc cuộc đời của chúng ở dạng sao kềnh đỏ. Chừng nào nhiên liệu hiđrô chưa cạn kiệt hết ở trong nhân, ngôi sao vẫn còn toả sáng, trong khi nó dần dần thổi các lớp ngoài cùng dưới dạng các luồng gió sao với tốc độ vài chục kilômét trong mỗi giây. Gió được gây ra bởi sự phát xạ của sao tạo áp suất lên khí và bụi ở vỏ bao quanh sao. Cứ mỗi năm khối lượng giảm từ 10^{-7} đến 10^{-5} khối lượng Mặt Trời. Phần lớn các phân tử phức tạp được quan sát trong pha kềnh đỏ này. Các sao kềnh đỏ là sao sáng nhất trên bầu trời ở vùng phổ hồng ngoại với bước sóng λ vào cỡ 2 μm.

Sự làm giàu thành phần hoá học của môi trường giữa các sao bởi các vụ nổ sao siêu mới cũng rất quan trọng. Vật chất làm giàu được sử dụng để hình thành các thế hệ sao mới tương đối giàu các nguyên tố nặng. Người ta thấy rằng các thế hệ sao trẻ nằm trong đĩa của Thiên Hà có các vạch phổ hấp thụ mạnh, đặc trưng cho các nguyên tố nặng được tái sinh như các bon và sắt.

CÁC PHÂN TỬ GIỮA CÁC SAO

Các hạt nhân nguyên tử nhẹ như hêli và một lượng nào đó đơtêri được tổng hợp từ hiđrô ngay sau Big Bang - vụ nổ lớn ban đầu tạo ra vũ trụ (chương XI). Các nguyên tố khác, nặng hơn hêli, được tạo ra sau đó trong các nhân sao, đặc biệt là trong nhân của các sao già hay trong các vụ nổ sao siêu mới. Môi trường giàu khí và bụi này cũng thuận lợi cho sự tổng hợp các phân tử. Các phân tử này được phóng vào không gian giữa các sao, nơi sẽ diễn ra các phản ứng hoá học tạo ra các phân tử khác. Các sao mới, các hành tinh và sự sống trên Trái Đất được hình thành từ khí phân tử. Chu trình tạo ra vật chất phổ biến trong vũ trụ là hoàn chỉnh.

The reddening effect is called interstellar reddening. This is due to the fact that blue radiation is scattered more efficiently in every direction than red radiation, and more red starlight reaches the observer. This effect results in a change of the color of the starlight, which becomes redder while it propagates through the interstellar medium.

The gas component

The average temperature and density of the interstellar medium are about a few tens of Kelvin, and a few tens of millions of particles (mostly hydrogen atoms) per m^3, respectively. They are very low compared to the standard values on Earth where the temperature is usually above 273 K and the density of the air we breathe is a few 10^{25} atoms and molecules per m^3. The vacuum achieved in terrestrial laboratories still corresponds to a few thousand billion of molecules per m^3. The volume and quantity of interstellar material are, however, very large. The mass amounts to about ten billion times the mass of our Sun. This value corresponds to some ten percent of the total mass of our Galaxy. The interstellar medium is embedded in a weak magnetic field of the order of a few 10^{-6} gauss (10^{-10} Tesla).

Chemical enrichment of the interstellar medium

We have learnt how the Sun and stars live and die (see Chapters VII and VIII). In the following sections, we shall discuss the impact of the late stage of the life of stars on the interstellar medium as well as many exciting physical phenomena which occur in this stage. In particular, through the mass loss process leading to a stellar wind, evolved stars in the stage of red giant expel into the interstellar medium the matter recycled beforehand in the interior of stars. Stars whose initial mass on the main sequence is less than ~ 8 Solar masses, end their lives as red giants. As long as the hydrogen fuel is not completely exhausted in the core, the star shines, while it expels gradually the outer layers in the form of a stellar wind blowing at several tens kilometers per second. The wind is caused by the stellar radiation exerting a pressure on the dust and the gas of the circumstellar envelope. The mass loss amounts to 10^{-7} to 10^{-5} solar masses per year. Most of complex molecules are observed during this red giant phase. Red giant stars are the brightest stars in the infrared sky at $\lambda \sim 2$ μm.

The contribution of supernova explosions is also very important in the chemical enrichment of the interstellar medium. The enriched material will be used to form new generations of stars which are relatively rich in heavy elements. Young disk populations of stars are found to exhibit strong absorption lines typical of reprocessed heavy elements such as carbon and iron.

INTERSTELLAR MOLECULES.

Light atomic nuclei, namely helium and to some extent deuterium, were synthesized from hydrogen just after the Big Bang, which is the primordial explosion creating the Universe (see Chapter XI). Other elements heavier than helium have been manufactured later in the stellar furnaces, notably in the cores of evolved stars or in supernovae. These environments rich in gas and dust also favor the synthesis of molecules, which are injected into the interstellar medium where further chemical reactions proceed to manufacture other molecules. New stars, planets and life on Earth are formed from the molecular gas. The cycle of production of common materials in the Universe is thus completed.

Sự phát hiện các phân tử trong vũ trụ cho phép chúng ta nghiên cứu phần vũ trụ lạnh và tối mà trước đó chúng ta chưa tiếp cận được. Sỡ dĩ có điều này là do trong các đám mây tối và đậm đặc giữa các sao này, khí tồn tại chủ yếu dưới dạng phân tử và trong thực tế không có nguyên tử hiđrô. Nhiều đám mây khí như vậy, được gọi là các đám mây phân tử khổng lồ, là những tổ hợp lớn tạo bởi khí phân tử đậm đặc, có kích thước vài parsec, chứa tới 10^{12} phân tử hiđrô (H_2) trong mỗi mét khối. Mật độ này vào khoảng 10^5 lần mật độ trung bình của khí giữa các sao. Đây là lí do hiđrô tồn tại ở trạng thái phân tử nhiều hơn là nguyên tử. Kết quả là các đám mây phân tử không phát bức xạ vạch 21 cm của nguyên tử hiđrô. Vạch này thường quan sát được trong môi trường loãng hơn. Ngoài ra, các đám mây phân tử chứa một lượng lớn bụi ngăn chặn ánh sáng từ các sao nằm trong các đám mây (nếu có) thoát ra ngoài và phá huỷ các phân tử. Các vạch phân tử được sử dụng để nghiên cứu các điều kiện vật lí của các khí lạnh và đậm đặc giữa các sao pha trộn với bụi. Thành phần bụi có thể được phát hiện qua phổ bức xạ hồng ngoại liên tục của nó. Đối với bụi giữa các sao ở nhiệt độ 10 K thì định luật dịch chuyển Wien (chương IV) cho biết rằng loại bụi lạnh này phát xạ chủ yếu xung quanh bước sóng $\lambda = 290$ μm. Bức xạ hồng ngoại xa không thể phát hiện được từ mặt đất mà chỉ có thể phát hiện được nhờ các kính thiên văn đặt trên các khí cầu, máy bay hay tàu vũ trụ.

Sự phát hiện các phân tử giữa các sao

Cùng với phần thiên văn quang học cho phép các nhà thiên văn phát hiện các vạch nguyên tử cơ bản ở vùng sóng khả kiến, thiên văn vô tuyến giúp chúng ta phát hiện các phân tử trong không gian giữa các sao. Trong khi sự kích thích các vạch phổ quang học cần có các photon tử ngoại năng lượng cao thì các vạch vô tuyến lại được tạo ra một cách dễ dàng bởi sự va chạm với các phân tử hiđrô hay bởi bức xạ năng lượng thấp như bức xạ hồng ngoại từ các sao già và các hạt bụi. Điều này là do các vạch phổ quang học phát sinh từ sự chuyển giữa các mức năng lượng cao của electron trong khi các vạch phổ vô tuyến nói chung tương ứng với sự chuyển giữa các mức quay nằm ở các trạng thái năng lượng thấp của phân tử. Phần lớn các sự dịch chuyển mức quay của phân tử diễn ra trong dải sóng milimet.

Sau nhiều lần tìm kiếm không thành công, phân tử OH, hợp chất lưỡng nguyên tử đầu tiên - đã được phát hiện trong môi trường giữa các sao ở bước sóng 18 cm vào năm 1963. Mô-nô-xít cacbon (CO), amoniac (NH_3) và hơi nước (H_2O) đã được phát hiện ra ít năm sau đó. Số lượng các phân tử trong môi trường giữa các sao được phát hiện tăng một cách đều đặn kể từ năm 1970 nhờ có kính thiên văn vô tuyến hoạt động ở giải sóng milimet được trang bị máy thu nhạy được chế tạo bằng kĩ thuật hiện đại (chương XII). Sự phát hiện các phân tử giữa các sao mở ra một ngành khoa học mới của hoá học trong vũ trụ, được gọi là hoá thiên văn.

Một phòng thí nghiệm hoá học vũ trụ

Người ta dự đoán rằng các phân tử được hình thành trong các vùng nơi khí và bụi có mật độ cao. Mật độ khí cao làm tăng khả năng va chạm lẫn nhau giữa các nguyên tử tạo thành phân tử. Các hạt bụi che cho các phân tử khỏi bị bắn phá bởi các photon có năng lượng cao.

Môi trường giữa các sao rất loãng và lạnh. Do vậy mà người ta dự đoán rằng một môi trường như thế, nơi độ hoạt động hoá học khá yếu, chứa chủ yếu là các nguyên tử. Tuy nhiên, không gian giữa các sao không đồng nhất. Sự hình thành các phân tử phức tạp diễn ra trong các đám mây phân tử khổng lồ. Môi trường bao quanh các sao rất trẻ đang được hình thành có mật độ vật chất rất lớn là nơi bức xạ phân tử mạnh. Các sao ở giai đoạn cuối của quá trình tiến hoá của chúng được bao quanh bởi một lớp vỏ khí và bụi chứa nhiều phân tử.

The discovery of molecules in space makes it possible to investigate the cold and dark part of the Universe so far inaccessible. This is because, in dense dark interstellar clouds, the gas is rather in molecular form and has practically no hydrogen atoms. Many of these clouds, called giant molecular clouds, are large complexes of dense molecular gas, a few parsecs in size, containing up to some 10^{12} hydrogen molecules (H_2) per cubic meter. This density corresponds to about 10^5 times the average density of the interstellar gas. This is the reason why hydrogen exists as molecules rather than atoms. As a result, molecular clouds do not emit the 21 cm atomic hydrogen line usually observed in the more diffuse medium. Moreover, molecular clouds contain a large amount of dust which does not permit the light from embedded stars, if any, to escape and to destroy molecules. Molecular lines serve as diagnostic probes to investigate the physical conditions of the cold and dense interstellar gas intimately mingled with dust. The dust component can be detected through its infrared continuum radiation. For an interstellar dust temperature of 10 K, the Wien's dislacement law (see Chapter IV) shows that such cold dust radiates primarily around a wavelength $\lambda = 290$ μm. Far-infrared radiation cannot be detected from the ground, but by using telescopes installed on board balloons, airplanes or spacecraft.

The discovery of interstellar molecules

In addition to optical astronomy which has allowed astronomers to detect fundamental atomic lines in the visible, radio astronomy has contributed to detect most of the molecular compounds in the interstellar space. While the excitation of optical lines necessitates high energy ultraviolet photons, radio lines are quite easily produced by collisions with molecular hydrogen or by low energy radiation like infrared radiation from evolved stars and dust grains. This is because optical lines arise from transitions between electronic high energy levels, whereas radio lines correspond generally to transitions between rotational levels lying at low molecular energy states. Most of molecular rotational transitions occur in the millimeter wave band.

After many unsuccessful searches, the first diatomic species, the OH molecule, was detected in the interstellar medium at the wavelength of 18 cm, in 1963. Carbon monoxide (CO), ammonia (NH_3) and water vapor (H_2O) were found a few years later. The number of detected interstellar molecules has increased steadily since 1970, thanks to the advent of millimeter-wave radio telescopes equipped with sensitive receivers built with advanced technology (see Chapter XII). The discovery of interstellar molecules opens a new branch of chemistry in space, called astrochemistry.

A cosmic laboratory of chemistry

It is expected that molecules are formed in a region where the density of gas and dust is high. A high gas density increases the chance for atoms to collide with one another to form molecules. Dust grains preserve molecules from being destroyed by energetic photons.

The interstellar medium is extremely dilute and cold. It is therefore expected that such an environment, in which the chemistry activity would be rather low, contains essentially only atoms. The interstellar space is, however, far from homogeneous. The formation of complex molecular species should occur in giant molecular clouds. The immediate environs of very young stars still in formation, which are very dense and compact, are also the sites of strong molecular emission. Stars at the late stage of their evolution are surrounded by envelopes of gas and dust, which are also rich in molecules.

Các phân tử được phát hiện trong Dải Ngân Hà

Đến nay, khoảng một trăm phân tử và nhiều đồng vị của chúng đã được phát hiện trong Thiên Hà của chúng ta và trong một số thiên hà khác (bảng 1). Tuy nhiên, độ phổ cập của chúng rất thấp, vào cỡ 10^{-5} - 10^{-9} lần độ phổ cập của hiđrô. Một số phân tử giữa các sao như CO, H_2O và NH_3 là rất phổ biến trên Trái Đất. Các phân tử quen thuộc, có cấu tạo phức tạp hơn như ethanol (CH_3CH_2OH) và formaldehyde (H_2CO) cũng đã được phát hiện trong môi trường giữa các sao.

Bảng 1

Danh sách (không đầy đủ) các phân tử giữa các sao

2 nguyên tử: H_2, C_2, CH+, CH, OH, CO, CN, CS, NO, NS, NH, SO, SO+, SiO, SiN, PN, PC, HCl, NaCl, KCl, AlCl, SiS, SiC

3 nguyên tử: C_3, H_2O, C_2H, HCN, HNC, HCO, HCO+, HOC+, N_2H+, H_2S, HNO, OCS, SO_2, HCS+, SiC_2, C_2O, C_2S

4 nguyên tử: NH_3, C_2H_2, H_2CO, HNCO, HCO+, H_2CS, HNCS, C_3N, C_3H, C_3O, C_3S, HCNH+, H_3O+

5 nguyên tử: C_5, CH_4, CH_2NH, H_2C_2O, NH_2CN, HCO_2H, C_4H, HC_3N, SiH_4, C_3H_2, CH_2CN, SiC_4

6 nguyên tử: CH_3OH, CH_3CN, NH_2CHO, CH_3SH, C_2H_4, C_4H_2, C_5H, HC_2CHO

7 nguyên tử: CH_3NH_2, CH_3C_2H, CH_3CHO, HC_5N, C_6H

8 nguyên tử: HCO_2CH_3, CH_3C_3N

9 nguyên tử: CH_3CH_2OH, CH_3OCH_3, CH_3C_4H, CH_3CH_2CN, HC_7N

10 nguyên tử: CH_3COCH_3,

11 nguyên tử: HC_9N,

13 nguyên tử: $HC_{11}N$

Nhiều phân tử trong số các phân tử được phát hiện là những phân tử hữu cơ, tức là hợp chất của cácbon. Một số lớn vạch phổ phân tử còn chưa được xác định. Phân tử nặng nhất trong Thiên Hà của chúng ta được phát hiện cho đến nay là $HC_{11}N$ (cyano-deca-penta-yne) với công thức cấu trúc H-C≡C-C≡C-C≡C-C≡C-C≡C-C≡N. Phân tử này thuộc họ các phân tử có chuỗi các bon dài $HC_{2n+1}N$ với n = 1, 2, 3...), gọi là cyanopolyynes. Nó được phát hiện trong lớp vỏ của các sao già giầu cácbon. Một số loại phân tử như hiđrô cácbon C_3H và C_3H_2 là những phân tử vòng. Cấu trúc phân tử của chúng bao gồm 3 nguyên tử các bon nằm ở các đỉnh của một tam giác mà ở đó các nguyên tử hiđrô gắn vào.

Các phân tử giữa các sao tồn tại chủ yếu ở pha khí. Tuy nhiên, một số lớn phức chất phân tử lớn đã được phát hiện và được coi là các hạt bụi giữa các sao, trong đó các nguyên tử hiđrô gắn chặt trong các mặt phẳng đồ hoạ ở phía ngoài. Các đặc trưng phát xạ giữa các sao này, quan sát được ở vùng hồng ngoại gần và giữa đã được coi là thuộc về các phân tử hữu cơ vòng lớn, gọi là hiđrô cácbon thơm đa chu trình (PAHs) chứa tới 50 nguyên tử hay nhiều hơn nữa.

Molecules detected in the Milky Way

About a hundred molecules and many of their isotopes have been discovered to date, in our Galaxy and some in other galaxies as well (see Table 1). Their abundance is however very low, of the order of 10^{-5} - 10^{-9} times lower than the abundance of hydrogen. Several interstellar molecules like CO, H_2O and NH_3 are very common on Earth. More well-known complex molecules like ethanol (CH_3CH_2OH) and formaldehyde (H_2CO) are also detected in the interstellar medium.

Table 1

List (not exhaustive) of interstellar molecules

2 atoms: H_2, C_2, CH^+, CH, OH, CO, CN, CS, NO, NS, NH, SO, SO^+, SiO, SiN, PN, PC, HCl, NaCl, KCl, AlCl, SiS, SiC

3 atoms: C_3, H_2O, C_2H, HCN, HNC, HCO, $HOCO^+$, HOC^+, N_2H^+, H_2S, HNO, OCS, SO_2, HCS^+, SiC_2, C_2O, C_2S

4 atoms: NH_3, C_2H_2, H_2CO, HNCO, HCO^+, H_2CS, HNCS, C_3N, C_3H, C_3O, C_3S, $HCNH^+$, H_3O^+

5 atoms: C_5, CH_4, CH_2NH, H_2C_2O, NH_2CN, HCO_2H, C_4H, HC_3N, SiH_4, C_3H_2, CH_2CN, SiC_4

6 atoms: CH_3OH, CH_3CN, NH_2CHO, CH_3SH, C_2H_4, C_4H_2, C_5H, HC_2CHO

7 atoms: CH_3NH_2, CH_3C_2H, CH_3CHO, HC_5N, C_6H

8 atoms: HCO_2CH_3, CH_3C_3N

9 atoms: CH_3CH_2OH, CH_3OCH_3, CH_3C_4H, CH_3CH_2CN, HC_7N

10 atoms: CH_3COCH_3,

11 atoms: HC_9N,

13 atoms: $HC_{11}N$

Many of the molecules are organic, that is, they are carbon compounds. A large number of molecular lines still remain unidentified. The heaviest molecule so far detected unexpectedly in our Galaxy is $HC_{11}N$ (cyano-deca-penta-yne) with the structural formula H-C≡C-C≡C-C≡C-C≡C-C≡C-C≡N. This molecule belongs to the family of long carbon chain molecules $HC_{2n+1}N$ (with n= 1, 2, 3...), the cyanopolyynes. It is found in the envelope of an evolved star rich in carbon. Some molecular species like the hydrocarbons, C_3H and C_3H_2, are ring molecules. Their molecular geometry consists of three carbon atoms located at the vertices of a triangle where hydrogen atoms are attached.

The interstellar molecules exist mainly in the gaseous phase. However, some large molecular complexes are detected and believed to be interstellar dust grains in which hydrogen atoms are tied up in the graphitic planes at the periphery. These interstellar emission features observed in the near and mid infrared have been attributed to large organic ring molecules called Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) containing up to 50 atoms or more.

Sự tìm kiếm các phân tử giữa các sao vì mục tiêu sinh học

Gần đây, việc tìm kiếm sự sống trên các hệ hành tinh khác thúc đẩy các nhà thiên văn phát hiện các phân tử vì mục tiêu sinh học như các phân tử aminô axit. Aminô axit đơn giản nhất có khả năng tồn tại trong môi trường giữa các sao trong Thiên Hà của chúng ta là glyxin NH_2CH_2COOH. Glyxin, giống như các aminô axit khác, được cấu tạo bởi nhóm chức a min NH_2 và nhóm chức a xít COOH. Vì các phân tử như CH_3NH_2 và HCOOH đã được phát hiện trong vũ trụ (bảng 1) nên sự có mặt của glyxin là có nhiều hi vọng. Song nhiều cố gắng của nhiều nhóm các nhà thiên văn vô tuyến khác nhau nhằm phát hiện glyxin trong các vùng như Tinh vân Lạp Hộ (Orion), một tinh vân được biết là giầu các hệ sao trẻ, với những phân tử phức tạp, đã không thu được kết quả khả quan (hình IX.5). Một số vạch phổ của các phân tử hữu cơ đã được phát hiện song hình như không có các vạch glyxin hiện lên tại những tần số mà chúng ta mong đợi.

Điều đó không có nghĩa là không có mầm mống của sự sống nguyên thuỷ trong Thiên Hà của chúng ta. Việc tìm kiếm dấu tích của sự sống dưới dạng vi khuẩn đang được tiến hành qua việc khảo sát các thiên thạch từ vũ trụ rơi xuống Trái Đất. Phương án nghiên cứu ở trên Trái Đất các hòn đá có nguồn gốc từ các hành tinh khác của Hệ Mặt Trời đang được xúc tiến. Sự tồn tại của sự sống trong vũ trụ đang được các nhà thiên văn học và các nhà sinh vật học thảo luận.

Hình IX.5: (Xem cuối chương)

Phổ vô tuyến xung quanh tần số $\nu = 110,8$ GHz ($\lambda = 2,7$ mm) được thu bởi kính thiên văn vô tuyến 30 m của IRAM (Viện nghiên cứu thiên văn vô tuyến millimet) cho thấy không có vạch glyxin trong khi nhiều vạch hữu cơ khác lại hiện rõ trên phổ. Tần số mong đợi của glyxin được đánh dấu bởi các vạch thẳng đứng.

Mục tiêu của công việc tìm kiếm các phân tử giữa các sao

Chiến lược tìm kiếm các phân tử giữa các sao đòi hỏi phải có kiến thức về tần số của các vạch phổ phân tử và các vị trí mà các phân tử có thể được phát hiện.

Việc tìm kiếm các phân tử giữa các sao có thể được thực hiện bằng cách quan sát các sự dịch chuyển phân tử mà tần số của chúng đã được biết bởi các kết quả đo đạc trong phòng thí nghiệm hay qua các phép tính lí thuyết theo cơ học lượng tử. Phương pháp thứ hai là quan sát một cách hệ thống một dải tần số để phát hiện các vạch rồi đem so với các vạch đã được biết trong phòng thí nghiệm. Phương pháp thứ hai này có ưu điểm là khám phá được các phân tử lạ không dự đoán trước được.

Các phân tử tập trung vào vùng trung tâm của Thiên Hà của chúng ta và các thiên hà khác. Các đám mây khổng lồ, tối và lạnh, môi trường của các tiền sao và lớp vỏ bao quanh các sao già cũng là những đối tượng được yêu thích cho việc tìm kiếm các phân tử. Gần đây, bằng cách sử dụng các kính thiên văn vô tuyến hoạt động ở dải sóng milimet và các kính thiên văn hoạt động ở dải sóng hồng ngoại đặt trên các vệ tinh nhân tạo, các nhà thiên văn đã phát hiện ra được nhiều phân tử hữu cơ trong các sao chổi. Tuy nhiên, hơi nước lại là thành phần chủ yếu trong khí sao chổi. Việc quan sát các phân tử có trong sao chổi cho ta những thông tin bổ ích về thành phần hoá học của Hệ Mặt Trời nguyên thuỷ.

Search for interstellar molecules of biological interest

Recently, the search for life in other planetary systems prompts astronomers to seek to detect molecules of biological interest, such as the amino-acids. The simplest amino-acid susceptible to exist in the interstellar medium of our Galaxy is glycine, NH_2CH_2COOH. Glycine, like other amino-acids, is made up of the amine functional group NH_2 and the acid functional group COOH. Since molecules like CH_3NH_2 and HCOOH were detected in space (see Table 1), the presence of glycine is expected. However, many attempts by different groups of radio astronomers to detect glycine in regions like the Orion nebula, known to be rich in young stellar systems with complex molecules, did not yield positive results (Fig. IX.5). Several lines of organic molecules are detected but no glycine lines seem to show up at the frequencies they are expected to appear.

This does not mean that there are no seeds of primitive life in our Galaxy. Searches for traces of life in the form of bacteria are currently done in meteorites that have fallen onto the Earth from outer space. Projects to examine, on Earth, rocks from other planets of our solar system are under way. The question of the existence of a form of life in space is still debated among astronomers and biologists.

Fig.IX.5

Radio spectrum around $\nu = 110.8$ GHz ($\lambda = 2.7$ mm) obtained with the 30 m radio telescope of IRAM (Institut de Radio Astronomie Millimetrique) illustrating the non-detection of glycine lines, while the signatures of many other organic lines are clearly present in the spectrum. Frequencies expected for glycine are marked by vertical lines.

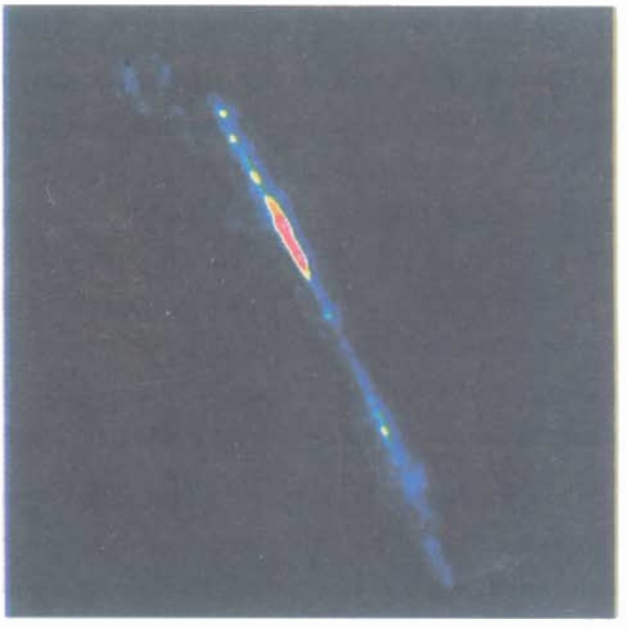
Targets for the search of interstellar molecules

The strategy for the search for interstellar molecules requires the knowledge of the frequencies of the molecular lines and the places where molecules are probably detectable.

The search for interstellar molecules can be performed by observing molecular transitions whose frequencies are known from laboratory measurements or from theoretical quantum mechanical calculations. A second method consists in observing systematically a band of frequencies to detect any line, which will be identified subsequently in the laboratory. The second procedure has the advantage of discovering unsuspected "exotic" species.

Molecules are concentrated in the central regions of our Galaxy and of other galaxies. The giant cold dark clouds, the environment of protostars and the circumstellar envelopes of evolved stars are also favorite targets for molecular searches. Recently, using large radio telescopes functioning at millimeter waves and infrared telescopes on board satellites, astronomers have detected a large number of organic molecules in comets. Water vapor is, however, the main constituent of the cometary gas. The observations of cometary molecules give useful information on the chemical composition of the primitive solar system.

Một sự phát hiện lí thú khác đã thu được từ quan sát phân tử là sự phát hiện ra hiện tượng dòng lưỡng cực. Bằng cách sử dụng vạch mônôxit các bon (CO) ở bước sóng 2,6 mm để nghiên cứu các vùng trong đó các sao đang được hình hành, các nhà thiên văn phát hiện thấy rằng các sao rất trẻ phóng ra một luồng gió được chuẩn trực trong hai tia hẹp tạo bởi các phân tử khí. Hình IX.6 là hình ảnh của một phôi sao như thế cùng với cặp tia của nó được quan sát theo vạch CO. Hệ gồm hai tia gần như đối xứng, tạo bởi khí phân tử, được quan sát trong các tiền sao là một hiện tượng phổ biến, là đối tượng được yêu thích của các nhà lí thuyết đang cố gắng lí giải về động lực học của những đối tượng này.



Hình IX.6:

Hình ảnh một tiền sao thu ở vạch bức xạ vô tuyến của CO. Tiền sao phóng ra một luồng gió sao gồm hai tia hẹp đối xứng. (Màu của hình ảnh không phải là màu thực). Hình ảnh được thu bởi Gueth và Guilloteau, dùng kính giao thoa vô tuyến của Viện nghiên cứu thiên văn vô tuyến milimet (Pháp - Đức).

Hoá học thiên văn của các phân tử

Ở điều kiện nhiệt độ và áp suất bình thường, các phân tử mà chúng ta biết ở trên Trái Đất có thể tồn tại ở thể lỏng hoặc thể khí. Dưới các điều kiện của khí quyển, nước mà chúng ta uống ở thể lỏng, trong khi ôxi mà chúng ta thở ở thể khí. Trong không gian giữa các sao, hầu hết các phân tử giữa các sao đã được phát hiện ở thể khí. Bởi vậy người ta tin rằng hoá học của các phân tử giữa các sao hoạt động ở pha khí. Các phản ứng dường như được bắt đầu từ phản ứng giữa các ion với các hạt trung hoà. Các ion được tạo ra từ các nguyên tử trung hoà và các phân tử trung hoà do sự ion hoá bởi các tia vũ trụ và ánh sáng tử ngoại. Thí dụ, phản ứng dẫn đến sự tạo thành các phân tử có chứa cácbon như CH và C_2H có thể bắt đầu bởi quá trình:

$$C^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+$$

Tiếp theo, CH và CH_2, được tạo thành sau đó thông qua phản ứng phân tử - ion và sự tái kết hợp với electron, tái phản ứng tiếp với một ion C^+ để tạo thành C_2 và C_2H. Tổng quát hơn, một phản ứng thuộc loại :

$$AX^+ + BY \rightarrow AB^+ + XY$$

tạo thành ion phức tạp hơn, AB^+, có thể được sử dụng để tổng hợp thành các phân tử nặng hơn. Ví dụ, phân tử cyanopolyyne HC_3N được xem là thành quả của phản ứng giữa $C_3H_3^+$ và nitơ N tạo thành $H_2C_3N^+$, được tiếp theo bởi sự tái hợp với một electron và sự phân li thành HC_3N và một nguyên tử hiđrô. Sự nghiên cứu hoá học về những hoá chất phức tạp hơn còn đang gặp trở ngại do thiếu một số thông số chi phối các phản ứng hoá học.

Các hạt bụi cũng có vai trò quan trọng trong hoá học giữa các sao. Chúng che chở cho các phân tử khỏi bị quang phân li bởi các tia tử ngoại. Ngoài ra, phân tử hiđrô dường như được hình thành trên bề mặt của các hạt bụi, khác với hầu hết các phân tử được tạo ra trong pha khí.

Another interesting discovery obtained from molecular observations is the detection of the so-called bipolar flow phenomenon. Using the carbon monoxide (CO) line at wavelength 2.6 mm to investigate regions where stars are being formed, astronomers detected that very young stars blow away a wind that is collimated in two narrow jets made of molecular gas. Figure IX.6 shows the image of such a stellar embryo with its twin-jet observed in the CO line. The system of two almost symmetrical jets of molecular gas observed in protostars is a common phenomenon which is a favorite subject for theoreticians trying to explain the dynamics of these objects.

Figure IX.6

Image of a protostar (stellar embryo) taken in the CO radio line. The protostar blows away a stellar wind consisting of two symmetrical narrow jets. (The colors are not real). The image was obtained with the radio interferometer of the Institut de Radio Astronomie Millimetrique (France-Germany) by Gueth and Guilloteau.

Astrochemistry of molecules

Under normal conditions of temperature and pressure, molecules that we know on Earth can exist in the form of a liquid or a gas. Under atmospheric conditions, water that we drink is liquid while oxygen that we breathe is in the gas phase. In the interstellar space, almost all the interstellar molecules have been detected in the gas phase. Therefore, the chemistry of interstellar molecules is widely believed to proceed in the gas phase. Reactions seem to start from ions reacting with neutral species. Ions are produced from neutral atoms and neutral molecules by ionization by cosmic rays and ultraviolet starlight. For example, the reactions leading to molecules containing carbon, such as CH and C_2H can start with:

$$C^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+$$

Subsequently CH and CH_2, which are formed via further ion-molecule reactions and recombination with electrons, react in turn with an ion C^+ to produce C_2 and C_2H. More generally, a reaction of the type:

$$AX^+ + BY \rightarrow AB^+ + XY$$

leads to a more complex ion, AB^+, which can be used to synthesize still heavier molecules. For example, the cyanopolyyne, HC_3N, is thought to be created by the reaction between $C_3H_3^+$ and nitrogen N to give $H_2C_3N^+$, followed by a recombination with an electron and a dissociation into HC_3N and a hydrogen atom. The chemical study of more complex species still suffers from the lack of a number of parameters which govern the chemical reactions.

Dust grains also play an important role in interstellar chemistry. They protect the molecules from photodestruction by ultraviolet radiation. Furthermore, molecular hydrogen is likely to be formed on surfaces of grains, unlike most molecules which are created in the gas phase.

SỰ KHUẾCH ĐẠI MASER VŨ TRỤ

Nhiệt độ chói của sự phát xạ vạch phân tử từ các đám mây giữa các sao đôi khi vượt quá 10^{10} K. Điều này phải được lí giải theo hiện tượng maser, là khả năng của các đám mây phân tử làm khuếch đại bức xạ vào ở một số tần số đặc biệt nào đó. Maser vũ trụ này (khuếch đại sóng viba bởi sự phát bức xạ kích thích) hoạt động tương tự như laser và các thiết bị khuếch đại maser nhân tạo). Trường bức xạ truyền đến có thể từ một nguồn bên ngoài hay từ một bức xạ tự phát nào đó diễn ra ngay trong đám mây. Bức xạ truyền ra ngoài là bức xạ kích thích cực mạnh, nó là bức xạ maser. Nhiệt độ chói và tần số của maser phụ thuộc vào thành phần phân tử và vào các tính chất vật lí của đám mây. Các đám mây hơi nước tại các khu vực có sự hình thành sao mạnh và trong các lớp vỏ sao bao quanh các sao kềnh đỏ có thể khuếch đại tín hiệu vào đến từ các thiên thể lên tới 10^{14} lần ở tần số 22 GHz. Khái niệm về khuếch đại maser có thể được mô tả như sau:

Hãy xem xét tình huống có nhiều khách tham quan đang đứng xếp hàng ở mặt đất để trèo lên tháp Eiffel ở Paris bằng cầu thang. Tháp Eiffel có 3 tầng, cao 320 m. Thông thường thì số du khách ở tầng dưới nhiều hơn ở tầng trên bởi vì chỉ có những người đủ khoẻ mới có thể trèo cầu thang để lên tới tầng ba. Song tháp còn có thang máy. Trong trường hợp này tất cả các du khách đều muốn dùng thang máy để lên tầng cao nhất để ngắm phong cảnh, vì vậy tầng trên cùng có rất đông người. Có một sự đảo ngược mật độ nhờ có thang máy "bơm" mật độ từ mặt đất lên các tầng cao hơn. Bây giờ hãy hình dung: trong tình trạng khẩn cấp, tất cả khách tham quan đều quyết định đi xuống đất thật nhanh, dường như là vào cùng một lúc. Lúc đó thông lượng khách đi xuống là lớn.

Tình trạng ở trong đám mây maser (và trong trường hợp laser và maser nhân tạo) cũng giống như thế. Năng lượng quay và dao động của các nguyên tử và phân tử trong một đám mây giữa các sao là không liên tục mà bị lượng tử hoá thành một số mức năng lượng rời rạc, tương tự như những bậc thang (hình IX.7). Bình thường, mật độ phân tử ở các mức năng lượng thấp thì lớn hơn ở các mức năng lượng cao (hình IX.7a). Nếu mật độ được bơm bởi các photon hay bởi sự va chạm với các hạt khác, thí dụ như với hiđrô phân tử, thì sẽ có một sự đảo ngược mật độ, nghĩa là các mức cao hơn có mật độ lớn hơn do sự bơm các mức thấp hơn, đặc biệt là từ mức cơ bản (hình IX.7b). Sau đó, các phân tử ở các mức năng lượng cao có thể rơi xuống mức cơ bản, làm tăng mật độ ở vài mức trung gian một cách có chọn lọc. Ở giai đoạn này, đám mây phân tử đóng vai trò một máy khuếch đại có khả năng khuếch đại tín hiệu vô tuyến truyền đến. Đám mây phân tử tạo ra bức xạ maser mạnh (bị kích thích) ở các tần số tương ứng với những sự chuyển mà các mức năng lượng cao hơn của chúng có mật độ phân tử lớn hơn ở các mức thấp hơn.

Hình IX.7: (Xem cuối chương)

a) Mật độ phân tử ở điều kiện vật lí bình thường.

b) Các phân tử được bơm từ các mức năng lượng thấp lên các mức năng lượng cao tạo ra sự đảo ngược mật độ gây ra bức xạ maser.

Khái niệm maser hai mức

Trong các điều kiện vật lí bình thường, được gọi là trạng thái "cân bằng nhiệt động lực cục bộ" (L.T. E), thì sự phân bố mật độ của các phân tử trong đám mây khí tuân theo định luật Boltzmann:

COSMIC MASER AMPLIFICATION.

The brightness temperature of the molecular line emission from interstellar clouds is sometimes in excess of 10^{10} K. It must be explained in terms of the maser phenomenon, that is the ability for molecular clouds to amplify input radiations of some specific frequencies. These cosmic masers (microwave amplification by stimulated emission of radiation) operate like the man-made lasers and maser amplifiers. The input radiation field can originate from an external source or from spontaneous emission generated inside the cloud itself. The output radiation is an intense stimulated emission, that is the maser emission. The brightness temperatures and the frequencies of the maser depend on the molecular content and on the physical properties of the cloud. Water vapor clouds in regions where star formation is active and in the circumstellar envelopes of red giant stars can amplify as much as 10^{14} times the celestial input signals at the frequency of 22 GHz. The concept of the maser amplification can be described as follows.

Consider the situation of a lot of visitors standing in line at the ground to climb up the Eiffel tower in Paris, using the staircase. The Eiffel tower with its three floors is 320 m high. Normally the population of visitors is certainly larger at the lower floor than at the upper floors, because only those people who have enough energy are able to climb the staircase to reach the third floor. But the Eiffel tower has elevators. In this case every visitor wishes to take the elevator to be at the highest floor to admire the landscape, so that the top floor is crowded. There is a population inversion thanks to the elevators which "pump" the population from the ground to the upper levels. Imagine now that in the case of emergency, all these people decide to go down to the ground quickly, at about the same time. Then, there should be a high flux of visitors downward.

The situation in a maser cloud (and in man-made lasers and masers) is somewhat comparable. The energies of rotation and vibration of atoms and molecules in an interstellar cloud are not continuous but are quantized in several discrete energy levels, like the steps of a staircase (see Fig. IX.7). Normally, the population of molecules is higher at low energy levels than at high energy levels (Fig.IX.7a). If the population is "pumped" by photons or by collisions with other particles like molecular hydrogen, then there is a population inversion, that is, the upper levels are more populated at the expense of the lower levels, especially the ground state level (Fig.IX.7b). Molecules at high energy levels are then able to fall all the way down to the ground level, populating selectively some intermediate levels. At this stage, the molecular cloud behaves like an amplifier capable of amplifying incident radio signals. The molecular cloud then produces powerful maser (stimulated) emissions at the frequencies corresponding to the transitions whose upper levels are more populated than the lower levels.

Fig. IX.7

a) Population of molecules in normal physical conditions.

b) Molecules are pumped from low energy levels to high energy levels creating a population inversion leading to a maser emission.

The concept of a two-level maser

In normal physical conditions called "local thermodynamic equilibrium" (LTE) state, the population distribution of molecules in a gas cloud is governed by the Boltzmann law:

$$\frac{n_u}{n_l} = \exp\left[\frac{-\Delta E}{kT}\right]$$

Trong đó n_u và n_l tương ứng là mật độ ở các trạng thái cao hơn và thấp hơn. ΔE là hiệu năng lượng giữa hai mức phân tử và T là nhiệt độ của khí. Khi một sự chuyển mức diễn ra giữa hai mức năng lượng có hiệu số năng lượng ΔE thì tần số ν tương ứng của các bức xạ được phát ra được tính theo công thức: $h\nu = \Delta E$.

Chúng ta có thể dễ dàng nhận thấy từ định luật Boltzmann rằng ở nhiệt độ T bất kì, mật độ n_u ở mức năng lượng cao hơn bé hơn mật độ n_l ở mức thấp hơn (hình IX. 7a). Các phân tử ở trong hầu hết các đám mây phân tử dường như ở trong trạng thái này. Nguyên lí hoạt động của maser là làm đảo ngược trạng thái LTE bằng cách "bơm" mật độ phân tử từ các mức năng lượng thấp lên các mức cao hơn để tạo ra trạng thái không LTE (hình IX.7b). Nếu sự bơm là đủ mạnh thì n_u trở nên thậm chí lớn hơn n_l. Sự đảo ngược mật độ này được tạo ra trong đám mây khí do sự va chạm với các phân tử hiđrô (quá trình va chạm), hoặc bởi các photon hồng ngoại được phát ra bởi các ngôi sao và bụi (quá trình bức xạ). Chú ý rằng phương trình Boltzmann cho biết rằng khi sự đảo ngược mật độ diễn ra ($n_u > n_l$), thì nhiệt độ T của khí trở nên âm. Khái niệm nhiệt độ âm không có ý nghĩa vật lí, nhưng các nhà thiên văn thường tận dụng thông số vĩ mô T này và sử dụng nó như là chỉ số thuận lợi cho hiện tượng đảo ngược mật độ vi mô.

Các quan sát thiên văn vô tuyến kết hợp với việc xử lí bằng lí thuyết sự truyền bức xạ qua đám mây phân tử cho phép các nhà thiên văn nghiên cứu maser, và do đó, nghiên cứu các quá trình vật lí và hoá học diễn ra trong các đám mây. Bây giờ, chúng ta hãy nghiên cứu đặc trưng của cường độ maser I như là hàm của độ dài lan truyền x. Chúng ta hãy giới hạn xét trường hợp một chiều đơn giản. Trong trường hợp này chúng ta chỉ việc viết rằng cường độ bị hấp thụ trên một đơn vị dài tỉ lệ với cường độ I:

$$dI/dx = -kI$$

Chúng ta dễ dàng suy ra nghiệm của phương trình trên dưới dạng:

$$I = I_o\exp(-kx)$$

Hệ số hấp thụ k tỉ lệ với $\Delta n = n_l - n_u$. Trong trường hợp có bức xạ maser, có sự đảo ngược mật độ, bởi vậy $n_u > n_l$ và Δn âm và hệ số hấp thụ k cũng âm. Cường độ I, đáng lẽ giảm khi bức xạ truyền đi thì lại tăng theo hàm mũ với độ lợi (gain) dương (–kx) của maser.

Đặc trưng nổi bật nhất của bức xạ maser là nhiệt độ chói rất cao và sự biến đổi theo thời gian của nó. Hệ số hấp thụ k, và do đó, độ lợi – kx của maser phụ thuộc một cách cơ bản vào các điều kiện bơm. Chẳng hạn, cường độ phát xạ maser của hyđrôxyl (OH) ở tần số 1,612 GHz từ các vỏ bao quanh các sao già biến thiên cùng với sự biến thiên theo thời gian của bức xạ phát ra từ ngôi sao trung tâm. Sở dĩ như vậy là do maser hyđrôxyl được bơm bởi bức xạ hồng ngoại xa từ các hạt bụi có cường độ phụ thuộc vào sự bức xạ giữa các sao.

Kích thước tối thiểu của maser vũ trụ là vài đơn vị thiên văn (đơn vị thiên văn, $\sim 1{,}5\times10^{11}$ m, là khoảng cách giữa Mặt Trời và Trái đất). Rõ ràng kích thước này là rất lớn so với kích thước khiêm tốn nhất của maser nhân tạo. Maser và laser trong phòng thí nghiệm sử dụng một hệ gương để làm tăng đường truyền tới vài mét.

$$\frac{n_u}{n_l} = exp\left[\frac{-\Delta E}{kT}\right]$$

where n_u and n_l are the populations of the upper and lower states, respectively, ΔE is the energy difference between two molecular levels and T is the gas temperature. When a transition occurs between two energy levels which have an energy difference ΔE, the corresponding frequency ν of the emitted radiation is given by the relation $h\nu = \Delta E$.

We can easily notice from the Boltzmann law that, at any temperature T, the population of any upper energy level n_u is smaller than that of any lower level n_l (Fig.IX.7a). The molecules in most molecular clouds are almost in this situation. The principle of the maser action is to upset the LTE state by "pumping " the population of molecules from lower to higher levels in order to create a non-LTE state (Fig.IX.7b). If the pumping is efficient enough, n_u becomes even greater than n_l. This population inversion is produced in the gas cloud by collisions with molecular hydrogen (collisional process) or by infrared photons radiated by stars and dust (radiative process). Note that the Boltzmann equation indicates that, when the inversion of population occurs ($n_u > n_l$), the gas temperature T becomes negative. The notion of negative temperature has no physical meaning, but astronomers often plot this macroscopic parameter T and use it as a convenient indicator of the microscopic phenomenon of population inversion.

Radio astronomical observations, combined with a theoretical treatment of the propagation of radiation through the molecular cloud, allow astronomers to study the masers and hence the physics and chemistry at work inside the cloud. We now investigate the behavior of the maser intensity, I, as a function of the propagation length, x. Let us confine ourselves to the simple one-dimensional case in which we just write that the intensity per unit length is absorbed in proportion to the intensity I :

$$dI/dx = - kI$$

It is easy to find the solution of the above equation as:

$$I = I_0 exp(-kx)$$

The absorption coefficient k is proportional to $\Delta n = n_l - n_u$. In the case of a maser emission, there is a population inversion so that $n_u > n_l$, and Δn is negative and the absorption coefficient k is also negative. The intensity I, instead of being absorbed as the radiation propagates, rather increases exponentially with the positive maser gain (–kx).

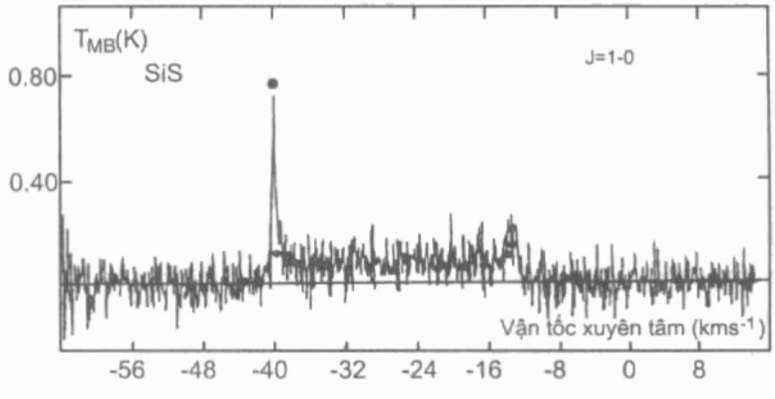
The most conspicuous features of the maser emission are its very large brightness temperature and its variability in time. The absorption coefficient k, and hence the maser gain – kx, depend critically on the pumping conditions. For instance, the intensity of the hydroxyl (OH) maser emission, at the frequency 1.612 GHz, from the circumstellar envelopes of evolved stars, follows the temporal variation of the radiation from the central star. This is because the hydroxyl maser is pumped by far-infrared radiation from dust grains whose intensity depends on the stellar radiation.

The size of the cosmic masers is at least a few astronomical units ($\approx 1.5 \times 10^{11}$m, the distance between the Sun and the Earth). This size is indeed very large in comparison with the modest dimension of man-made masers. The masers and lasers in the laboratory use a system of mirrors to increase somewhat the path lengths to several meters.

Cần chú ý rằng các phân tử giữa các sao phát bức xạ maser ở các tần số vô tuyến vì các vạch phổ vô tuyến phát sinh từ các mức năng lượng thấp hơn (chương IV, hình IV.6). Bởi vậy, chúng tương đối dễ bị kích thích. Nếu năng lượng của bơm đủ cao để đảo ngược mật độ electron trong các mức năng lượng của phân tử và nguyên tử thì chúng ta sẽ quan sát được bức xạ mạnh trong vùng sóng khả kiến – bức xạ laser. Song laser vũ trụ (sự khuếch đại ánh sáng bởi sự phát bức xạ kích thích) đã không được phát hiện.

Nguồn maser vũ trụ

Bức xạ maser vũ trụ thường được phát hiện trong các vùng hình thành sao, cũng như trong vỏ của các sao kềnh và siêu kềnh đỏ già. Các điều kiện vật lí của các môi trường này, với nhiệt độ khí và bụi cao ($T > 10^3 K$) và mật độ khí lớn ($> 10^{11}\ m^{-3}$), là khá thích hợp để maser phân tử được bơm lên. Các phát xạ maser mạnh từ hydrôxyl (OH) ở 1,612 GHz và 1,665 GHz, hơi nước (H_2O) ở 22 GHz, methanol (CH_3OH) ở 25 GHz và monoxít si líc (SiO) ở 43 GHz và 86 GHz đã được phát hiện một cách phổ biến. Hydrôcyanit (HCN) và silicon monosulfit (SiS) cũng có thể có phát xạ maser yếu.



Hình IX.8:

Mũi nhọn hẹp ở bên trái ở tốc độ xuyên tâm -40 km/s là một sự phát xạ maser từ một lớp vỏ bao quanh sao của sao cacbon già IRC + 10216 được quan sát qua vạch silicon monosulfit (SiS) ở tần số 18 GHz bởi kính thiên văn vô tuyến 140 foot của Đài quan sát thiên văn vô tuyến quốc gia (Mĩ).

Một thí dụ về sự phát xạ maser trong vỏ của sao cácbon IRC + 10216 được chỉ ra ở hình IX.8.

Mũi nhọn hẹp tại vị trí - 40 km/s trong phổ SiS là một vạch maser xuất hiện từ đám mây bao quanh sao, đám mây này khuếch đại bức xạ của sao trung tâm nằm kín ở bên trong lớp vỏ sao dày bao quanh nó. Vạch phổ này tương ứng với sự chuyển ở 18 GHz giữa hai mức năng lượng quay thấp nhất (số lượng tử quay J = 1 và J = 0) ở trạng thái dao động cơ bản (số lượng tử dao động v = 0) của phân tử SiS (xem chương IV và hình IV.6). Maser SiS xảy ra hiếm hơn và tương đối yếu hơn maser hydroxyl và maser hơi nước, thường quan sát được trong các vỏ bao quanh sao.

VẠCH PHỔ 21 CM - DẤU HIỆU CỦA CẤU TRÚC XOẮN ỐC CỦA THIÊN HÀ CỦA CHÚNG TA

Hình ảnh quang học của các thiên hà thường có dạng những cánh tay xoắn ốc sáng chói có chứa các sao và các tinh vân sáng. Bên trong Thiên Hà của chúng ta, ánh sáng từ các vùng có nhiều sao và tinh vân ở xa Mặt Trời bị hấp thụ bởi vật chất đen rất dày đặc ở trong mặt phẳng Thiên Hà. Các quan sát sự phát xạ vô tuyến truyền tự do trong vũ trụ đã tỏ ra là có ích trong việc phát hiện cấu trúc của Thiên Hà của chúng ta trong quy mô rộng lớn.

It is worth mentioning that interstellar molecules exhibit maser emission which occurs at radio frequencies, because radio lines arise from lower energy levels (see Chapter IV, Fig.IV.6). They are, therefore, relatively easy to excite. If the energy of the pump were high enough to invert the populations of electrons in the energy levels of molecules or atoms, we would observe strong radiation in the visible, the laser emission. However, cosmic lasers (light amplification by stimulated emission of radiation) have not been detected.

Cosmic maser sources

Cosmic maser emission is often detected in regions of star formation as well as in the envelopes of evolved red giant and supergiant stars. The physical conditions of these environments, with high gas and dust temperatures ($T > 10^3$ K) and gas densities ($>10^{11}$ m^{-3}), are quite appropriate for molecular masers to be pumped. Powerful maser emissions from hydroxyl (OH) at 1.612 GHz and 1.665 GHz, water vapor (H_2O) at 22 GHz, methanol (CH_3OH) at 25 GHz, and silicon monoxide (SiO) at 43 GHz and 86 GHz are commonly detected. Hydrogen cyanide (HCN) and silicon monosulfide (SiS) can also exhibit weak maser emission.

Figure IX.8

The narrow spike on the left at radial velocity of -40 km/s is a maser emission from a circumstellar envelope of an evolved carbon star, IRC+10216, observed in the silicon monosulfide (SiS) line at the frequency 18 GHz, with the 140 foot radio telescope of the National Radio Astronomy Observatory (USA)

An example of a maser emission in the envelope of a carbon star, IRC+10216, is shown in Figure IX.8.

The narrow spike at -40 km/s in the SiS spectrum is a maser line arising from the circumstellar cloud which amplifies the radiation of the central star concealed in the thick circumstellar envelope. This spectrum corresponds to the transition at 18 GHz, between the two lowest rotational levels (rotational quantum number J=1 and J=0) in the ground vibrational state (vibrational quantum number v=0) of the molecule SiS (see Chapter IV and Fig.IV.6). The SiS maser is rare and relatively weak in comparison with the hydroxyl and water vapor masers commonly observed in the circumstellar envelopes.

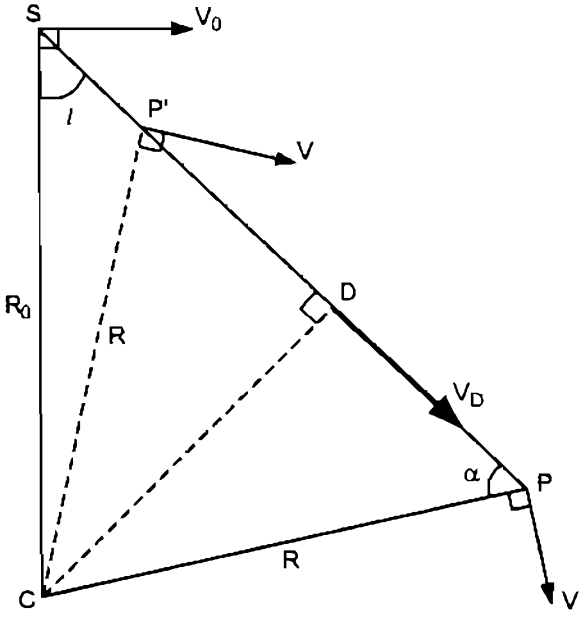
THE 21 CM LINE, A TRACER OF THE SPIRAL STRUCTURE OF OUR GALAXY.

Optical images of galaxies often show conspicuous bright spiral arms in which stars and bright nebulae are embedded. Inside our Galaxy, light from regions rich in stars and nebulae far away from the Sun is absorbed by dark material particularly dense in the galactic plane. The observations of radio emission which propagates freely in space have proved to be helpful in probing the structure of our Galaxy on a very large scale.

Sự phân bố khối lượng và khối lượng tổng cộng của Thiên Hà của chúng ta có liên quan với cách thức quay của Thiên Hà. Bởi vậy việc xác định đường cong quay, nghĩa là tốc độ quay như là một hàm của khoảng cách tính từ tâm Thiên Hà, là cần thiết để biết về cấu trúc của Thiên Hà. Bản đồ đầu tiên cho thấy sự tồn tại của các cánh tay xoắn ốc trong Thiên Hà của chúng ta đã được thực hiện ở bước sóng vô tuyến bởi các nhà thiên văn vô tuyến vào năm 1957, bằng cách quan sát vạch phổ 21 cm (tần số nghỉ $\nu = 1420$ MHz) của nguyên tử hiđrô trung hoà – thành phần chủ yếu của khí giữa các sao. Theo hiệu ứng Doppler thì chuyển động của toàn bộ đám mây đối với xung quanh làm dịch vạch phổ một lượng $\Delta\nu = \nu(v_r/c)$, trong đó ν là tần số quan sát, c là tốc độ ánh sáng và v_r là vận tốc xuyên tâm (thành phần vận tốc được chiếu xuống đường ngắm của người quan sát) của đám mây. Khi nguồn tiến lại gần người quan sát, vạch phổ dịch về phía tần số cao hơn (bước sóng ngắn hơn). Khi nguồn rời xa người quan sát thì vạch phổ dịch về phía tần số thấp hơn (bước sóng dài hơn). Các nhà thiên văn vô tuyến hướng kính thiên văn vô tuyến theo phương Thiên Hà của chúng ta và dùng phổ kế vô tuyến để thu phổ. Phổ biểu diễn cường độ vô tuyến như là một hàm của tần số. Do chúng ta đã biết tần số tĩnh ν và chúng ta đo độ dịch $\Delta\nu$ trong phổ, chúng ta có thể áp dụng công thức Doppler để đổi từ tần số ra vận tốc xuyên tâm v_r. Chúng ta sẽ tìm hiểu phương pháp xác định đường cong quay của Thiên Hà.

Đường cong quay của Thiên Hà

Đến gần đúng bậc nhất, chúng ta có thể coi Thiên Hà của chúng ta như một đĩa phẳng đang quay. Từ Mặt Trời S cách tâm C của Thiên Hà một khoảng cách R_0, chúng ta quan sát vùng P phát bức xạ vạch 21 cm của nguyên tử hiđrô, cách tâm C của Thiên Hà một khoảng PC = R (hình IX.9). Vùng P quay quanh tâm C của Thiên Hà với tốc độ v và Mặt Trời S quay quanh C với tốc độ v_0. Một người quan sát đứng ở S đo được vận tốc xuyên tâm v_r (là vận tốc xuyên tâm của khu vực P đối với người quan sát ở S) chiếu xuống phương tia nhìn SP; $v_r = v\sin\alpha - v_0\sin l$. Góc l là độ kinh Thiên Hà (độ kinh Thiên Hà l được xác định, trong mặt phẳng của Thiên Hà, đối với phương SC của tâm Thiên Hà).



Hình IX.9:

Nguyên tắc xác định đường cong quay của Thiên Hà của chúng ta.

Dễ dàng thấy rằng cả vùng P và vùng đối xứng P' đối với P qua D (DP' = DP) có cùng tốc độ xuyên tâm v_r. Tình huống này xảy ra đối với bất cứ khu vực P nào ở gần tâm C của Thiên Hà hơn Mặt Trời ($R < R_0$). Trong trường hợp này sẽ có hai vị trí của vùng phát xạ được tính theo cùng một giá trị của tốc độ xuyên tâm đo được. Song dọc theo cùng phương tia nhìn SP'P, có một vùng D có thể được xác định một cách tin cậy. Vùng này có tốc độ quay v_D lớn nhất vì D ở gần C nhất và cũng vì véc-tơ vận tốc v_D của nó định hướng theo phương tia nhìn. Do đó, tại D, tốc độ tia $v_r = v_D - v_0 \sin l$ cũng có giá trị lớn nhất.

The mass distribution and the total mass of the Galaxy are connected with the way the Galaxy rotates. Therefore, the determination of the rotation curve, that is the rotation velocity as a function of the distance from the galactic center, is crucial to know about the galactic structure. The first maps revealing the existence of spiral arms in our Galaxy were made at radio wavelength by radio astronomers in 1957, using the observations of the 21 cm radio line (rest frequency ν = 1420 MHz) of neutral atomic hydrogen, which is the main constituent of the interstellar gas. According to the Doppler effect, the motion of the whole cloud with respect to the surrounding shifts the spectral line by an amount $\Delta\nu = \nu(v_r/c)$, ν is the observing frequency, c is the velocity of light and v_r is the radial velocity of the cloud (velocity component projected along the line of sight of the observer). When the source is approaching the observer, the spectral line is displaced toward a higher frequency (shorter wavelength). When it is receding from the observer, the spectral line shifts toward a lower frequency (longer wavelength). Radio astronomers point their radio telescope in a direction of the Galaxy and use a radio spectrometer to obtain a spectrum which shows the radio intensity as a function of frequency. Since we know the rest frequency ν and we measure the frequency shift $\Delta\nu$ in the spectrum, we can use the Doppler formula to convert the frequency into the radial velocity v_r. We shall see how to determine the rotation curve of the Galaxy.

The rotation curve of the Galaxy

To a first approximation, we can consider the Galaxy as a flat rotating disc. From the Sun S whose distance from the center C of the Galaxy is R_0, let us observe a region P emitting the 21 cm hydrogen line at a distance R from C (Fig. IX.9). Region P rotates about the galactic center C with a velocity v and the Sun S rotates with a velocity v_0. An observer at S measures a radial velocity v_r (that is the radial velocity of region P relative to the observer at S) projected along the line of sight SP, $v_r = v \sin \alpha - v_0 \sin l$. The angle l is the galactic longitude. (The galactic longitude l is determined, in the plane of the Galaxy, relative to the direction SC of the galactic center).

Figure IX.9

Principle of the determination of the rotation curve of our Galaxy

It is easy to show that both region P and its symmetrical counterpart P' with respect to D (DP' = DP) have the same radial velocity v_r. This situation happens for any region P closer to the galactic center C than the Sun ($R < R_0$). In this case, there is an ambiguity in the determination of the location of the emitting region for a given measured value of the radial velocity. Along the same line of sight S P'P, there is, however, the region D which can be determined without any ambiguity. This region has the highest rotation velocity v_D, because D is closest to C and also because its velocity vector v_D is oriented along the line of sight. Therefore, at D the radial velocity $v_r = v_D - v_0 \sin l$ is also the highest.

Sự tính toán hình học trên đây cho chúng ta một phương pháp xác định đường cong quay của Thiên Hà. Đầu tiên, các nhà thiên văn vô tuyến quan sát vạch phát xạ 21 cm theo một số phương có độ kinh thiên hà l khác nhau. Tiếp theo, họ tính tốc độ xuyên tâm theo vạch phổ 21 cm và theo công thức Doppler của đám mây đang chuyển động nhanh nhất đối với mỗi phương tia nhìn. Đối với mỗi phương tia nhìn, tốc độ xuyên tâm này đúng là tốc độ quay của đám mây khí nằm tại vị trí có khoảng cách ngắn nhất đến tâm Thiên Hà, tương ứng với một vùng nào đó giống như vùng D.

Như vậy, đường cong quay được thiết lập cho toàn vùng ở giữa Mặt Trời và tâm Thiên Hà ($R<R_0$). Thực ra, chúng ta thấy (hình IX.10) rằng các điểm số liệu không nhất thiết nằm trên một đường cong quay trơn, tương ứng với các đám mây chuyển động nhanh nằm ở các khu vực tương tự như khu vực D. Nếu như tại D không tồn tại nhiều hiđrô nguyên tử trung hoà thì tốc độ cực đại quan sát được tương ứng với vùng ở gần hay xa hơn vùng D dọc theo phương tia nhìn. Trong trường hợp này, tốc độ đo được nhỏ hơn tốc độ tại D. Điều này giải thích tại sao một số điểm số liệu nằm phía dưới đường cong quay thông thường.

Đối với những vùng bên ngoài ($R > R_0$) thì phương pháp xác định đường cong quay nói trên không còn phù hợp. Đường cong quay phải được ngoại suy bằng cách áp dụng các mô hình lí thuyết. Cũng cần lưu ý rằng các vùng nằm trên phương đến tâm Thiên Hà và theo phương ngược lại (khu vực đối tâm) có các độ kinh Thiên Hà tương ứng l = 0 và l = 180° có véc-tơ vận tốc quay vuông góc với phương tia nhìn SC. Phương pháp ở trên không thể áp dụng được nữa bởi vì tất cả các vùng này đều có tốc độ tia bằng không.

Hình IX.10 : (Xem cuối chương)

Đường cong quay của Thiên Hà của chúng ta. Các chấm biểu diễn các điểm số liệu. Ở những khoảng cách lớn hơn khoảng cách của Mặt Trời, đường cong quay được tính theo mô hình lí thuyết.

Tốc độ quay biến thiên như là một hàm số của khoảng cách tính từ tâm thiên hà. Trong Thiên Hà của chúng ta, tốc độ quay tăng rất nhanh ở khu vực bên trong với bán kính khoảng 600 pc (2000 năm ánh sáng), và sau đó tiếp tục tăng một cách chậm hơn. Tuy nhiên, nó tăng không theo tỉ lệ thuận với bán kính như trường hợp một vật rắn, trừ vùng trong của Thiên Hà. Đường cong quay nghiêng một cách từ từ ở ngoài phạm vi khoảng cách của Mặt Trời, nơi có tốc độ vào khoảng 200 km/s (hình IX.10).

Động lực học Thiên Hà

Chuyển động theo quỹ đạo của mỗi hành tinh trong Hệ Mặt Trời chủ yếu bị chi phối bởi lực hút hấp dẫn của Mặt Trời. Sự tương tác giữa hai vật thể - Mặt Trời và một hành tinh, có thể được mô tả bởi các định luật Kepler, là định luật nói rằng tốc độ quay của hành tinh giảm theo nghịch đảo căn bậc hai của khoảng cách từ nó đến Mặt Trời. Động lực học của một thiên hà tương tự như Thiên Hà của chúng ta thì phức tạp hơn nhiều. Thiên Hà của chúng ta quay quanh tâm của nó cùng với các ngôi sao. Mỗi ngôi sao quay do trường lực hấp dẫn gây ra bởi tất cả các sao khác và bởi khí. Khối lượng của các sao và khí phân bố không đều. Mật độ các sao ở vùng trung tâm Thiên Hà cao hơn rất nhiều so với vùng xung quanh Mặt Trời. Chỉ ở vùng bên trong thì tốc độ quay mới tăng tỉ lệ thuận với khoảng cách kể từ tâm Thiên Hà. Hầu như toàn bộ Thiên Hà của chúng ta quay không như một vật rắn mà là một kiểu quay có tính vi phân.

The above geometric consideration gives us a recipe to determine the galactic rotation curve. Firstly, radio astronomers have to observe the 21 cm line emission in a number of directions of different galactic longitudes l. Secondly, from the 21 cm spectrum and the Doppler formula, they determine the radial velocity of the fastest-moving cloud along every line of sight. For each line of sight, this radial velocity is precisely the rotation velocity of the gas cloud located at the shortest distance from the galactic center, corresponding to such a region like region D.

The rotation curve is thus obtained for all regions between the Sun and the galactic center ($R < R_0$). In fact, we can see (Fig.IX.10), that the data points do not lie necessarily on the smooth rotation curve, which corresponds to the fast-moving clouds located at regions like region D. If there is indeed not much neutral atomic hydrogen at D, the observed maximum velocity corresponds to a region closer or farther than D along the line of sight. In this case, the measured velocity is smaller than the velocity at D. This explains why several data points lie below the regular rotation curve.

For external regions ($R > R_0$), the above method of determination of the rotation curve is no longer valid. The rotation curve must be extrapolated by using theoretical models. It should also be noted that regions in the direction of the galactic center and in the opposite direction (the anticenter region), which lie at galactic longitudes, $l = 0$ degree and $l = 180$ degrees, respectively, have their rotation velocity vector perpendicular to the line of sight SC. The above method cannot be used any longer since these regions all have zero radial velocity.

Figure IX.10

The rotation curve of our Galaxy. Dots represent data points. Beyond the distance of the Sun, the rotation curve is calculated, using a theoretical model.

The rotation velocity changes as a function of the distance from the galactic center. In our Galaxy, the rotation velocity increases very fast in the inner region within a radius of ~ 600 pc (~ 2000 light years) and then continues to increase more slowly. It does not increase, however, in direct proportion of the radius like in the case of a solid body, except in the inner part of the Galaxy. The rotation curve declines gently beyond about the distance of the Sun whose velocity is ~ 200 km/s (Fig.IX.10).

Dynamics of the Galaxy

The orbital motion of every planet in the solar system is principally governed by the gravitational attraction of the Sun. The interaction between two bodies, the Sun and a planet, can be described by Kepler's laws, which indicate that the rotation velocity of the planet decreases as the inverse square root of its distance from the Sun. The dynamics of a galaxy like ours is more complicated. Our Galaxy rotates about its center, carrying stars along. Each star orbits according to the gravitation field caused by all the other stars and the gas. The mass of the stars and the gas is not distributed uniformly. The density of the stars is much higher in the galactic center region than in the vicinity of the Sun. The rotation velocity increases in proportion with the distance from the galactic center only in the inner region. Most of our Galaxy does not rotate like a solid body. It undergoes a differential rotation.

Như một ngoại lệ, người ta thấy rằng thực tế sự quay của Thiên Hà không hoàn toàn tròn ở vùng trung tâm Thiên Hà, nơi có chuyển động giãn nở xuyên tâm, có lẽ được gây ra bởi một vụ nổ từng xảy ra vài chục triệu năm về trước.

Khối lượng của Thiên Hà

Sự phân bố khối lượng của Thiên Hà của chúng ta có thể được suy ra từ đường cong quay của nó. Sự chênh lệch về tốc độ quay trên hai quỹ đạo của hạt đã cho phản ánh một cách gần đúng sự chênh lệch về khối lượng chứa bên trong hai quỹ đạo đó. Các nhà thiên văn xây dựng các mô hình về sự phân bố khối lượng bằng cách phân chia Thiên Hà thành nhiều lớp. Tiếp theo, họ tính đường cong quay lí thuyết và hiệu chỉnh nó dần dần cho đến khi nó trở nên giống với đường cong quay quan sát được. Song sự hiệu chỉnh hình dạng của đường cong quay và do đó, của sự phân bố khối lượng phụ thuộc vào loại hình học áp dụng cho Thiên Hà. Có thể tính theo mô hình phẳng hay cầu. Sự phân bố khối lượng thực có lẽ ở giữa hai trường hợp tới hạn ấy. Tổng khối lượng tính toán được của Thiên Hà vào khoảng $1,5.10^{11}$ khối lượng Mặt Trời.

Tại sao cấu trúc xoắn ốc được hình thành?

Đường cong quay của Thiên Hà của chúng ta cho phép chúng ta xác định khoảng cách của đám mây giữa các sao khi biết tốc độ xuyên tâm của nó bởi các phép đo quang phổ ở các vạch phổ vô tuyến của nguyên tử hiđrô hay phân tử các bon mô nô xít.

Việc quan sát theo mọi kinh độ Thiên Hà cho thấy rằng khí trong đĩa Thiên Hà được phân bố theo các cấu trúc phù hợp với mô hình cấu trúc cánh tay xoắn ốc. Các cánh tay xoắn ốc được cách li bởi các vùng có mật độ thấp hơn, được gọi là các vùng xen giữa các cánh tay. Cấu trúc xoắn ốc cũng được phát hiện bởi quan sát các phân tử CO là phân tử phát xạ những vạch tương đối mạnh ở bước sóng $\lambda = 2,6$ mm. Quan sát vô tuyến còn được bổ sung bởi quan sát quang học đối với các vùng ở gần Mặt Trời bằng cách dùng vạch Hα (xem hình IX.3 và phần giải thích).

Theo một thuyết được gọi là thuyết sóng mật độ thì cấu trúc xoắn ốc được tạo ra bởi một sự sắp xếp hấp dẫn (chồng chất hấp dẫn của toàn bộ Thiên Hà). Sóng có dạng xoắn và quay xung quanh tâm của Thiên Hà. Các quan sát và tính toán mô phỏng cho thấy rằng vật chất ở vùng bên trong của Thiên Hà chuyển động nhanh hơn sóng xoắn ốc, trong khi đó sóng xoắn ốc lan truyền nhanh hơn vật chất ở khu vực bên ngoài. Mỗi khi vật chất cắt ngang qua sóng thì nó bị nén và hiện ra dưới dạng những đường xoắn ốc lớn. Loại sóng nén này được gọi là sóng mật độ. Sự mô phỏng máy tính đòi hỏi phải kiểm tra chi tiết sự hình thành và tiến hoá của đường xoắn ốc trong các thiên hà.

Quỹ đạo của các sao chỉ hơi bị lệch bởi trường hấp dẫn của sóng xoắn ốc. Tuy nhiên, khí bị nén ở đó và bụi giữa các sao kết hợp với khí tạo nên những dải dài và tối. Như vậy, sự có mặt của các dải bụi này là minh chứng cho sự tồn tại của sóng mật độ có hình xoắn ốc. Vì các sao đã được hình thành trong các vùng khí dày đặc giữa các sao nên các sao nóng, trẻ và có khối lượng lớn được tìm thấy trong các cánh tay xoắn ốc. Bức xạ tử ngoại của chúng làm ion hoá các đám mây khí chung quanh để trở thành các tinh vân khí sáng. Vì thế, các sao sáng và các tinh vân được sử dụng để tìm kiếm các cánh tay xoắn ốc.

As an exception, it appears that the galactic rotation is in fact not purely circular in the galactic center region, where a radial expansion motion exists, due possibly to an explosion having occurred some ten million years ago.

Mass of the Galaxy

The mass distribution of our Galaxy can be derived from its rotation curve. The difference of the rotation velocities on two given particle orbits reflects approximately the difference in mass contained inside these orbits. Astronomers build models of mass distribution by decomposing the Galaxy into a series of layers. They then calculate the theoretical rotation curve and adjust it until it becomes similar to the observed rotation curve. However, the adjustment of the shape of the rotation curve and hence of the mass distribution depends on the geometry adopted for the Galaxy. A flat model and a spherical model can be calculated; the actual mass distribution is probably between these two extreme cases. The total derived mass of the Galaxy is $\sim 1.5 \times 10^{11}$ solar masses.

Why is a spiral structure formed?

The rotation curve of our Galaxy allows us to know the distance of an interstellar cloud, if we know its radial velocity by spectroscopic measurements in the radio lines of atomic hydrogen or of the carbon monoxide molecule.

The observations at all galactic longitudes show that the gas in the galactic disc is distributed in structures consistent with those derived from a spiral-arm model. The spiral arms are separated by regions with lower density called the interarm regions. The spiral structure is also revealed by the observations of CO molecules which emit a relatively strong line at wavelength $\lambda = 2.6$ mm. Radio observations have been complemented by optical observations of regions near the Sun by use of the Hα line (see Fig. IX.3 and its discussion).

According to the so-called density wave theory, the spiral structure is produced by a pattern of gravity (superposed on the gravity of the entire Galaxy), a wave which has a spiral shape and rotates rigidly about the center of the Galaxy. Observations together with simulation calculations show that the matter in the inner region of the Galaxy moves faster than the spiral wave, while the latter moves faster than the matter in the external region. Whenever the matter crosses the wave, it is compressed and is displayed in a grand design spiral pattern. This compression wave is called the density wave. Computer modelling is required to investigate in detail the formation and the evolution of the spiral pattern in galaxies.

The orbits of the stars are only slightly deflected by the gravitational field of the spiral wave. The gas, however, is compressed there and the interstellar dust associated with the gas traces long dark lanes. Therefore, the presence of these dust lanes is evocative of the existence of a spiral density wave. Since stars are formed in regions of dense interstellar gas, young and massive hot stars are found in spiral arms. Their ultraviolet radiation ionizes the ambient gas clouds, which become bright gaseous nebulae. Therefore, bright stars and nebulae are used to trace the spiral arms.

CÂU HỎI

1) Những thành phần cấu tạo chính của Thiên Hà của chúng ta là gì? Dải sóng tốt nhất được dùng để quan sát tâm Thiên Hà của chúng ta là gì? Tại sao?

2) Vạch Hα là gì? Vạch này được quan sát thấy ở những đối tượng nào?

3) Bức xạ nào được phát ra từ tàn dư vụ nổ sao siêu mới? Sự phát xạ xảy ra trong vùng nào của phổ điện từ ?

4) Vòng Thiên nga (Cygnus Loop), tàn dư của một vụ nổ sao siêu mới lâu đời, đang giãn nở với tốc độ 150 km/s. Hiện nay đường kính của nó vào khoảng 30 ps. Tính tuổi của nó với giả thiết rằng tốc độ giãn nở không đổi. Một dự đoán khác cho rằng Vòng Thiên nga là kết quả của một vụ nổ sao siêu mới diễn ra cách đây khoảng 50000 năm. Vậy chúng ta có thể rút ra kết luận gì?

5) So sánh mật độ của không khí mà chúng ta thở với mật độ môi trường giữa các sao?

6) Từ khi hình thành, Mặt Trời (và Hệ Mặt Trời) đã chuyển động quanh tâm Thiên Hà bao nhiêu lần?

7) Các ngôi sao có khối lượng bé hơn khoảng 8 lần khối lượng Mặt Trời, ở gần cuối cuộc đời của chúng, có một sự mất mát khối lượng thông qua sự phát ra gió sao ở giai đoạn sao kềnh đỏ. Hãy tính tốc độ mất mát khối lượng M' (theo khối lượng Mặt Trời/năm) tại khoảng cách r bằng 10 lần bán kính của sao. Lấy bán kính của sao $r = 10^{11}$ m, tốc độ gió sao v = 10 km/s, mật độ hạt (chủ yếu là hiđrô phân tử) $n_{H_2} = 10^{18}$ phân tử/m^3, khối lượng hiđrô nguyên tử $m_{H_2} = 1{,}66.10^{-27}$ kg và khối lượng Mặt Trời $M_o = 2 \times 10^{30}$kg.

8) Tính tần số ν của sự chuyển mức quay thấp nhất J = 1 – 0 ở trạng thái dao động cơ bản v = 0 (xem hình IV.6) của phân tử mô nô xít các bon (CO). Năng lượng quay của CO là E = BJ(J + 1) với hằng số quay B = 57,897 GHz. Sự chuyển mức này diễn ra ở vùng bước sóng nào?

QUESTIONS

Question 1: What are the main components of our Galaxy? What is the best range of wavelengths used to observe the center of our Galaxy? Why?

Question 2 : What is the Hα line? In what kind of objects is this line observed?

Question 3 : What is the radiation emitted by supernova remnants? In what domain of the electromagnetic spectrum does the emission occur?

Question 4 : The Cygnus Loop, an old supernova remnant, is currently expanding at 150 km/s. Its diameter is now about 30 pc. Calculate its age by assuming a constant expansion velocity. Another estimate suggests that the Cygnus Loop is actually the result of a supernova explosion which took place some 50 000 years ago. What conclusion can we derive?

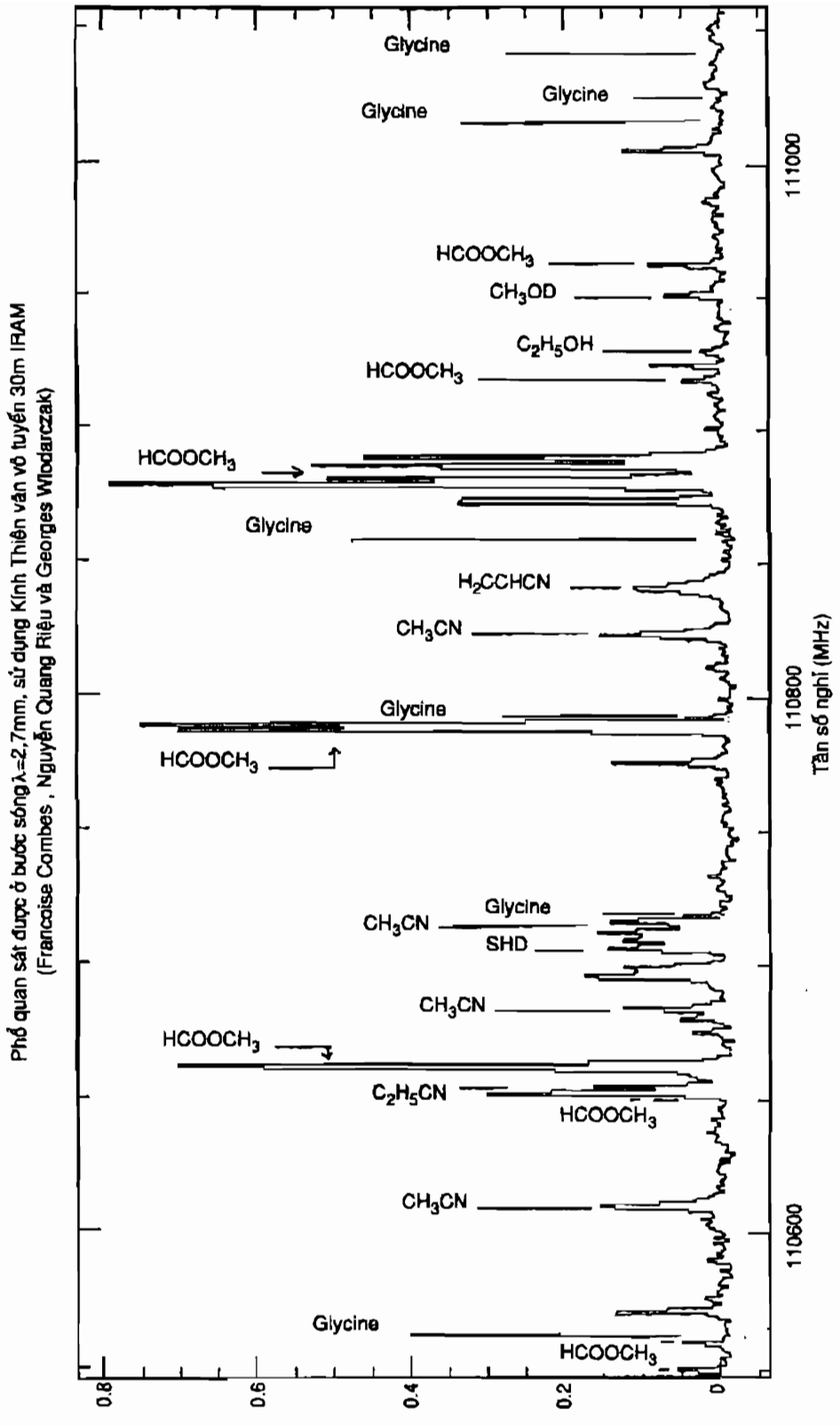
Question 5 : Compare the density of the air we breathe with the density of the interstellar medium.

Question 6 : Since its creation, how many times did the Sun (and the solar system) go around the galactic center?

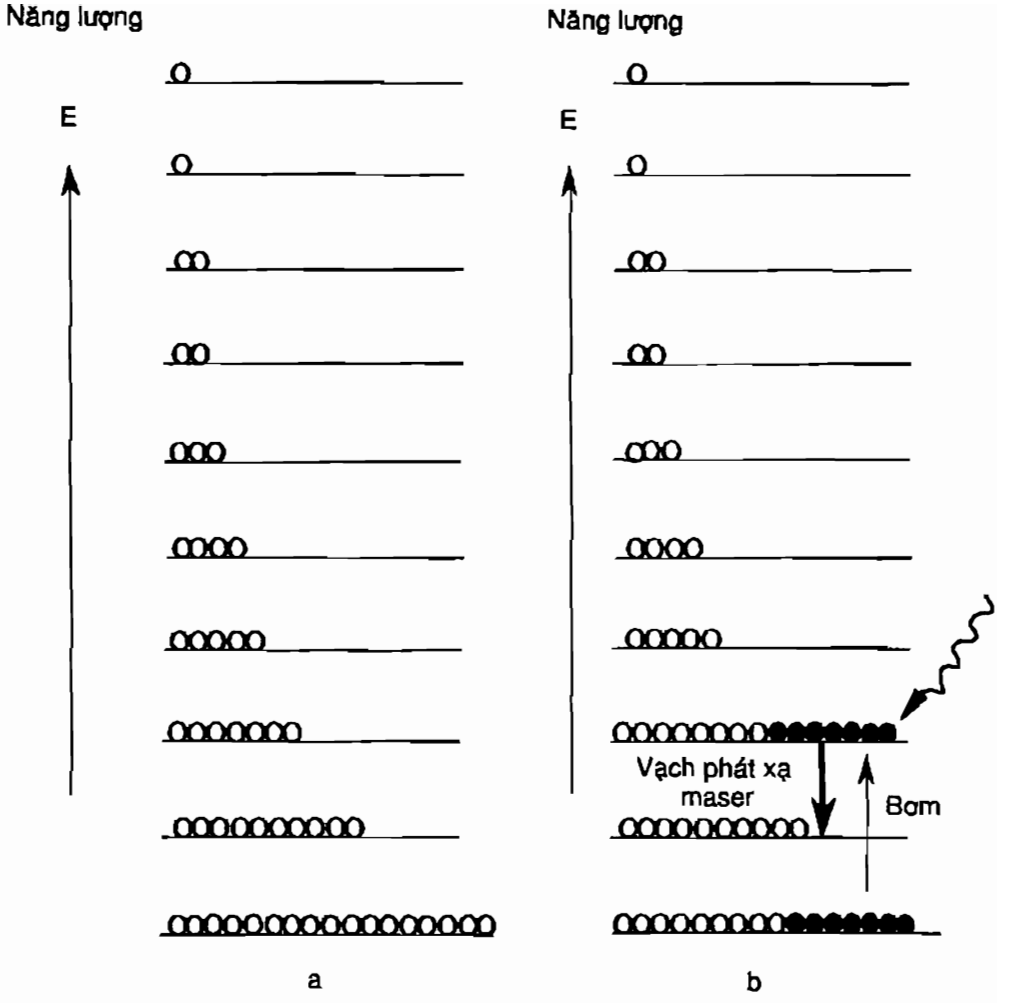
Question 7 : Stars whose mass is less than about 8 $M_\odot$ near the end of their life experience a mass loss through the stellar wind in the red giant stage. Calculate the mass loss rate $\dot{M}$ (in solar masses per year) at a distance r of 10 stellar radii. Take the stellar radius $r = 10^{11}$ m, the velocity of the stellar wind V=10 km/s, the density of particles (essentially molecular hydrogen) $n_{H2} = 10^{18}$ molecules/m^3, the mass of atomic hydrogen $m_H = 1.66 \times 10^{-27}$ kg, and the solar mass $M_\odot = 2 \times 10^{30}$ kg.

Question 8 : Calculate the frequency ν of the lowest rotational transition J=1-0 in the ground vibrational state v=0 (see Fig.IV.6) of the carbon monoxide molecule (CO). The rotational energy of CO is E = BJ(J+1) with the rotational constant B = 57.897 GHz. In what domain of wavelength is this transition?

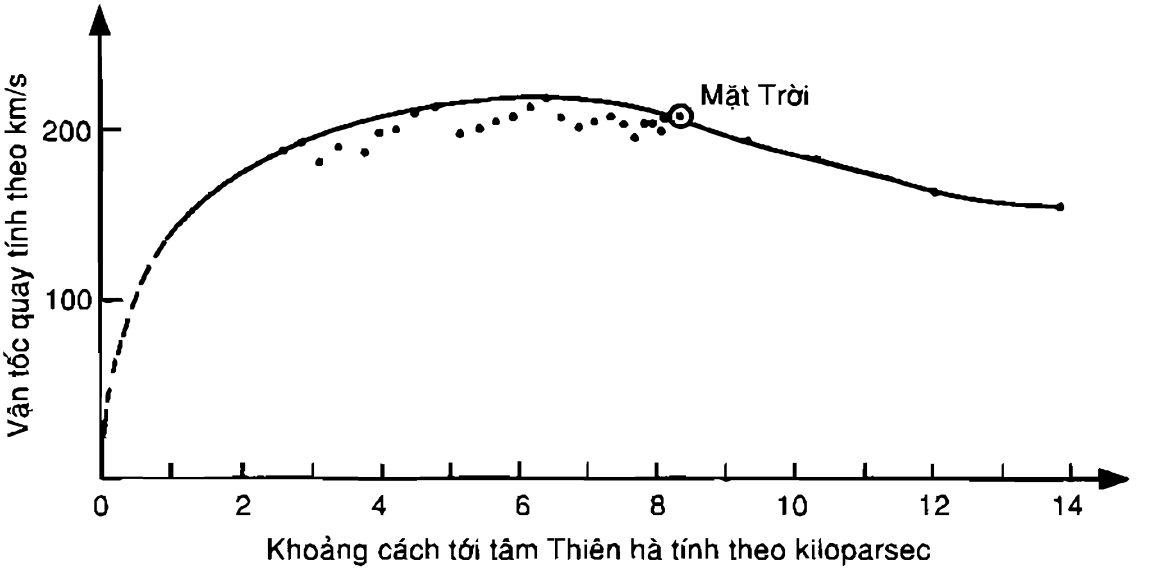
Hình IX.4


Phổ quan sát được ở bước sóng λ=2,7mm, sử dụng Kính Thiên văn vô tuyến 30m IRAM
(Francoise Combes , Nguyễn Quang Riệu và Georges Wlodarczak)
Glycine
Glycine
Glycine
HCOOCH3
CH3OD
C2H5OH
HCOOCH3
HCOOCH3
Glycine
H2CCHCN
CH3CN
Glycine
HCOOCH3
CH3CN
Glycine
SHD
CH3CN
HCOOCH3
C2H5CN
HCOOCH3
CH3CN
Glycine
HCOOCH3
0.8
0.6
0.4
0.2
0
110600
110800
111000
Tần số nghỉ (MHz)

Hình IX.5



Hình IX.7


Vận tốc quay tính theo km/s
200
100
Mặt Trời
0
2
4
6
8
10
12
14
Khoảng cách tới tâm Thiên hà tính theo kiloparsec

Hình IX.10

Chương X

CÁC THIÊN HÀ VÀ CÁC QUASAR

Kính thiên văn 2,5m ở Mount Wilson (Mỹ), kính thiên văn lớn nhất thế giới ở thời điểm nó được lắp đặt, bắt đầu hoạt động từ năm 1918. Dùng thiết bị này, Hubble đã khám phá ra cả một lớp mới các tinh vân ở bên ngoài Dải Ngân Hà, được gọi là các tinh vân ngoài thiên hà, giống như Thiên Hà của chúng ta. Cửa sổ này đã mở vào Vũ trụ và cho phép Hubble khám phá ra rằng Vũ trụ đang giãn nở. Vũ trụ chứa hàng trăm tỉ thiên hà. Vào đầu những năm 1960, một loại mới các thiên thể đã được phát hiện, được gọi là các thiên thể chuẩn sao, hay quasar, nằm ở xa bên ngoài Thiên Hà của chúng ta. Các quasar có mật độ vật chất rất lớn và tự phát sáng. Các quasar và các thiên hà e líp khổng lồ là những nguồn vô tuyến rất mạnh. Chúng là những vật thể xa nhất có thể được phát hiện để thăm dò Vũ trụ sâu ở giai đoạn ban đầu của nó. Về phương diện này, các quasar đóng vai trò quan trọng trong Vũ trụ học.

THẾ GIỚI CÁC THIÊN HÀ

Qua các kính thiên văn quang học, các thiên hà hiện ra dưới nhiều dạng. Một số hiện ra như những hình phỏng cầu dẹt nhiều hoặc ít và được gọi là các thiên hà e líp, trong khi đó các thiên hà khác có hình xoắn ốc rất dẹt (Hình X.1). Một số khác vô định hình và có dạng bất thường.

Hình X.1 : (Xem cuối chương)

a) Thiên hà e líp Sombrero (ảnh của Đài quan sát thiên văn Nam Châu Âu) ; b) Thiên hà xoắn ốc (Messier 51) với bạn đồng hành có dạng bất thường của nó (Ảnh: Hale Observatories).

Các thiên hà e líp chứa ít khí và có khối lượng trải ra trên một dải rộng, từ vài nghìn lần khối lượng Mặt Trời đối với các thiên hà e líp lùn cho tới khoảng 10^{13} lần khối lượng Mặt Trời đối với các thiên hà e líp siêu kềnh. Các thiên hà e líp lùn phổ biến hơn các thiên hà e líp siêu kềnh, thường là những nguồn vô tuyến rất mạnh.

Các thiên hà xoắn ốc chứa nhiều khí và có các cánh tay sáng, mở ra nhiều hay ít và uốn ra phía ngoài kể từ tâm. Khối lượng trung bình của các thiên hà xoắn ốc ~10^{11} khối lượng Mặt Trời. Các sao nóng, trẻ và các vùng HII bị ion hóa sáng liên đới nằm trong các cánh tay xoắn ốc. Các thiên hà xoắn ốc quay giống như Thiên Hà của chúng ta. Một số thiên hà xoắn ốc có cấu trúc kiểu thanh, có trọng tâm nằm ở tâm của chúng. Các thiên hà có dạng bất thường có hàm lượng khí lớn nhất. Khối lượng của chúng, vào cỡ 10^{10} khối lượng Mặt Trời, nhỏ hơn khối lượng của một thiên hà xoắn ốc điển hình.

Hai thiên hà ở gần chúng ta nhất, các Đám mây Magellan lớn và bé (LMC và SMC), có thể được nhìn thấy bằng mắt thường trên bầu trời Nam Bán Cầu. Ở cách chúng ta tương ứng 50 và 60 kpc, chúng là các vệ tinh của Thiên Hà của chúng ta và có dạng bất thường. Một thiên hà láng giềng khác, ở cách Thiên Hà của chúng ta 690 kpc, Tinh vân Tiên nữ (Andromeda), còn được gọi là Messier 31, là một thiên hà xoắn ốc khổng lồ nhìn thấy được ở Bắc Bán Cầu. Khoảng cách của các thiên hà ở khá gần nhau này được xác định bằng cách quan sát một lớp sao, được gọi là các sao Cepheid, ở trong các thiên hà này. Độ chói của các sao Cepheid

Chapter X

GALAXIES AND QUASARS

The 2.5 m telescope at Mount Wilson (USA), which then was the largest telescope in the world, started operating in 1918. Using this instrument, Hubble discovered the realm of a new class of nebulae outside the Milky Way, the extragalactic nebulae similar to our own Galaxy. This window opened the Universe and allowed Hubble to discover that the Universe is in expansion. The Universe contains hundreds of billions of galaxies. In the early 1960's, a new category of objects was discovered, the quasi-stellar objects, or quasars, which lie far beyond our Galaxy. Quasars are very compact and intrinsically luminous. Quasars and giant elliptical galaxies are powerful radio sources. They are the most remote objects that can be detected to probe the deep Universe at its early stage. In this respect, quasars play an important role in Cosmology.

THE REALM OF THE GALAXIES.

Through optical telescopes, galaxies exhibit a variety of shapes. Some appear as more or less flattened spheroids and are called elliptical galaxies, while others are highly flattened spirals (Fig.X.1). Some others are amorphous and have an irregular shape.

Figure X.1

a) Elliptical galaxy, the Sombrero (photo European Southern Observatory) ;
b) Spiral galaxy (Messier 51) with its irregular companion (photo Hale Observatories).

Elliptical galaxies are poor in gas and have masses spanning a wide range, from only a few thousand solar masses for dwarf ellipticals to about 10^{13} solar masses for supergiant ellipticals. Dwarf ellipticals are more common than giant and supergiant ellipticals, which are usually powerful radio sources.

Spiral galaxies are rich in gas and exhibit more or less open luminous arms winding outwards from their center. Their mass is ~ 10^{11} solar masses on the average. Young hot stars and the associated bright ionized HII regions lie in the spiral arms. Spiral galaxies rotate like our own Galaxy. Several spiral galaxies have a bar-like structure centered on their nuclei. Irregular galaxies have the largest gas content. Their mass, of the order of 10^{10} solar masses, is lower than that of a typical spiral.

The two closest galaxies, the Large and the Small Magellanic Clouds (LMC and SMC), are visible to the naked eye in the sky of the southern hemisphere. At distances of 50 and 60 kpc, respectively, they are satellites of our Galaxy and have an irregular shape. Another nearby galaxy at a distance of 690 kpc, the Andromeda Nebula also known as Messier 31, is a giant spiral galaxy visible in the northern hemisphere. The distances of these relatively close galaxies are determined by observations of a class of stars, the Cepheids, in these galaxies. The brightness of the Cepheids

19- TVVÀTLI

thay đổi một cách tuần hoàn và độ sáng nội tại của chúng có thể được suy ra từ chu kì biến thiên của chúng. Khi đó, khoảng cách của chúng và khoảng cách của thiên hà mẹ có thể thu được từ thông lượng của chúng, được đo ở Trái Đất (phương trình 8.2 và phần "Các sao biến quang" - Chương VIII).

Các đám thiên hà

Các thiên hà có xu hướng hợp lại với nhau thành nhóm. Thiên Hà của chúng ta và các thiên hà lân cận khác thuộc về Nhóm địa phương gồm khoảng 20 thành viên, chiếm một thể tích không gian có đường kính vài mê ga parsec. Nhóm này bị chi phối chủ yếu bởi ba thiên hà xoắn ốc lớn. Tinh vân Tiên nữ, thành viên có khối lượng lớn nhất của nhóm, có khối lượng ~ 300 tỉ khối lượng Mặt Trời, trong khi đó Thiên Hà của chúng ta, với khối lượng nhỏ hơn hai lần, đứng thứ hai. Thiên hà xoắn ốc đáng chú ý thứ ba là Tinh vân Tam giác, còn được gọi là Messier 33. Các thành viên còn lại của Nhóm là các thiên hà e líp và các thiên hà có dạng bất thường với khối lượng nhỏ hơn nhiều. Một số thiên hà của Nhóm địa phương đã được phát hiện bởi sự phát xạ vô tuyến của chúng vì chúng nằm trong mặt phẳng của Thiên Hà của chúng ta và bức xạ của chúng trong vùng sóng khả kiến bị hấp thụ bởi bụi thiên hà.

Khoảng năm chục nhóm nhỏ các thiên hà đã được tìm thấy xung quanh Nhóm địa phương. Ở xa hơn, ở khoảng cách khoảng 15 mê ga parsec, là đám Xử nữ (Virgo) chứa hàng nghìn thiên hà, và trải ra trên 12 độ trên bầu trời trong chòm sao Virgo. Bản thân các đám thiên hà lại tập hợp thành các siêu đám như Siêu đám địa phương có tâm nằm ở đám Virgo và chứa tất cả các nhóm bao quanh, trong đó có Nhóm địa phương.

Nói chung, việc xác định sự phân bố của các thiên hà trong Vũ trụ được dựa trên khoảng cách thu được từ các phép đo tốc độ xuyên tâm của chúng, và từ việc áp dụng định luật Hubble (xem Chương XI). Các thiên hà dường như tập hợp trong không gian trên bề mặt những cái bọng khổng lồ tiếp giáp nhau. Các đám thiên hà không chỉ là những nguồn phát xạ vô tuyến mà còn phát ra tia X. Điều đó nói lên rằng chúng chứa khí ở nhiệt độ từ hàng chục đến hàng trăm triệu độ. Sự kiện các đám thiên hà rất sáng và phát xạ sóng vô tuyến đã khiến cho chúng có thể được phát hiện ở những khoảng cách lớn. Chúng được sử dụng để nghiên cứu cấu trúc quy mô lớn của Vũ trụ.

Kính thiên văn vũ trụ Hubble đã được sử dụng để phát hiện các thiên hà xa nhất, một số nằm ở khoảng cách hơn 10 tỉ năm ánh sáng. Điều này có nghĩa là chúng ta đang thăm dò Vũ trụ ở giai đoạn rất sớm trong quá trình tiến hóa của nó.

Tương tác giữa các thiên hà

Một thiên hà có thể va chạm với thiên hà láng giềng. Vì khoảng cách giữa các thiên hà lớn cho nên xác suất tương tác giữa các thiên hà khá bé. Nếu tương tác yếu, thiên hà có khối lượng lớn hơn sẽ có xu hướng lấy khí ở các lớp ngoài của bạn đồng hành có khối lượng bé hơn của nó. Chứng cớ mạnh mẽ về một tương tác hấp dẫn như vậy là việc các nhà thiên văn vô tuyến phát hiện ra Dòng Magellan, một cầu nối tạo bởi hi đrô nguyên tử trung hòa chảy ra từ hai bạn đồng hành của Thiên Hà của chúng ta - các Đám mây Magellan - và kết thúc ở gần Thiên Hà của chúng ta. Các quan sát về phát xạ 21 cm của hi đrô trung hòa cũng cho thấy rằng mặt phẳng của Thiên Hà của chúng ta bị vênh lên ở phần ngoài do tương tác hấp dẫn với các Đám mây Magellan.

changes periodically and their intrinsic luminosity can be derived from their period of variation. Their distance and that of the parent galaxy can then be obtained from their flux measured at Earth (equ. 8.2 and section "Pulsating stars" - Chapter VIII).

Clusters of galaxies

Galaxies tend to be grouped together. Our Galaxy and other nearby galaxies belong to the Local Group of about 20 members occupying a volume of space of a few megaparsecs in diameter. The Group is dominated by three large spiral galaxies. Andromeda, the most massive member of the Group, has a mass of ~ 300 billion $M_{\odot}$, while our Galaxy with a mass two times smaller ranks second. The third conspicuous spiral is the Triangulum Nebula also designated as Messier 33. The remaining members of the Group are elliptical and irregular galaxies with much smaller masses. Some galaxies of the Group were detected by means of their radio emission, since they lie in the plane of our Galaxy and their radiation in the visible is absorbed by the galactic dust.

About fifty small groups of galaxies are found around the Local Group. Farther on, at about 15 megaparsecs, lies the Virgo Cluster containing thousands of galaxies, and extending over 12 degrees in the sky in the Virgo star constellation. Clusters of galaxies themselves are grouped in superclusters like the Local Supercluster centered on the Virgo cluster and containing all the surrounding groups including the Local Group.

The distribution of galaxies in the Universe is generally based on the distances of the galaxies derived from the measurements of their radial velocities and from use of Hubble's law (see Chapter XI). Galaxies seem to gather in space on the surfaces of giant contiguous bubbles. Clusters of galaxies are not only the sources of radio emission but they also emit X-rays, suggesting that they contain gas at temperature of tens to hundreds of millions of degrees. The fact that clusters of galaxies are very luminous and exhibit radio emission enables them to be detected at large distances. They are used to investigate the large scale structure of the Universe.

The Hubble Space telescope has been used to detect the farthest galaxies, some of them at distances more than 10 billion light-years. This means that we are probing the Universe in its very early stage of evolution.

Interaction between galaxies

A galaxy can undergo a collision with a neighbor. Since the intergalactic distances are large, the probability of interaction between galaxies is rather low. If the interaction is weak, the more massive galaxy tends to strip the gas in the outer layers of its less massive companion. Strong evidence for such gravitational interaction is the detection by radio astronomers of the Magellanic Stream, a bridge of neutral atomic hydrogen streaming off the two companions of our Galaxy, the Magellanic clouds, to end near our Galaxy. Observations of the 21 cm emission of neutral hydrogen also reveal that the plane of our Galaxy is warped in its outer part due to the gravitational interaction with the Magellanic Clouds.

Hình X.2 : (Xem cuối chương)

Tàn dư của một vụ va chạm trực diện giữa các thiên hà (bên trái). Một trong hai thiên hà (bên phải) đã chạy xuyên qua thiên hà bên trái. (Ảnh: Kính thiên văn vũ trụ Hubble PRC95-02 STScI ESA và NASA; K Borne).

Một va chạm trực diện có thể xảy ra (hình X.2). Biến cố này khởi tạo một vụ nổ của sự tạo thành sao ở trung tâm thiên hà mới được tạo thành. Một thiên thể như vậy với một nhân cực sáng trở thành một thiên hà bùng sáng sao. Các thiên hà e líp khổng lồ thường được tìm thấy ở gần tâm các đám thiên hà. Các quan sát vừa mới được tiến hành với kính thiên văn vũ trụ Hubble cho thấy rằng các đám thiên hà trẻ ở xa đường như có nhiều thiên hà xoắn ốc, điều này ủng hộ ý tưởng cho rằng các thiên hà e líp có thể được tạo thành muộn hơn bởi sự kết nhập của các thiên hà xoắn ốc. Các nhà thiên văn đã xây dựng các mô hình dựa trên tương tác hấp dẫn bằng cách sử dụng máy tính để mô phỏng các hậu quả của sự va chạm và tái tạo các hình ảnh mà họ đã thực sự quan sát được.

Sự tạo thành thiên hà

Khí trong Thiên Hà của chúng ta phân bố một cách có thứ bậc trên quy mô trải rộng từ kích thước của Hệ Mặt Trời (3.10^{-4} pc) cho đến kích thước của các đám mây giữa các sao (vài chục pc). Tương tự, Vũ trụ có cấu trúc có thứ bậc trong đó các thiên hà tập hợp thành các nhóm, các đám và các siêu đám. Các thiên hà được tạo thành từ những bất đồng nhất về mật độ ở quy mô lớn trong Vũ trụ phôi thai. Do đó, sự tạo thành thiên hà có liên quan trực tiếp với các lí thuyết về Vũ trụ học đã được trình bày trong chương XI. Vấn đề các thiên hà hình thành như thế nào vẫn còn đang gây tranh cãi. Chúng ta hãy đưa ra một kịch bản được đơn giản hóa tương tự như kịch bản dẫn đến sự tạo thành các ngôi sao trong Thiên Hà.

Bất kì một thăng giáng về mật độ ban đầu nào cũng chịu tác dụng của hai lực chính, lực hút hấp dẫn do khối lượng của chính nó và lực do áp suất khí chống lại sự co. Một thăng giáng có thể tăng lên do vật chất bồi tụ ở xung quanh. Sau đó nó suy sụp và ngưng tụ lại thành những phức hợp khí lớn. Khi sự suy sụp của một phức hợp khí tiếp diễn, nó sẽ vỡ ra thành những mảnh, những mảnh này trở thành tiền thân của các thiên hà. Các đám mây tạo thành thiên hà, hay còn được gọi là các đám mây tiền thiên hà, chia thành những mảnh nhỏ hơn. Đến lượt mình, những mảnh này sẽ ngưng tụ lại thành các sao.

Nguồn gốc của những thăng giáng ban đầu, hiện vẫn còn là một vấn đề chưa được biết rõ, là một trong những chủ đề nghiên cứu được ưa thích đối với một số nhà vũ trụ học.

CÁC QUASAR

Các nhà thiên văn đã khám phá ra một loại thiên thể mà hình ảnh của chúng không trải rộng ra như hình ảnh của một thiên hà mà có dạng gần tròn và hữu hạn, làm ta nhớ tới các ngôi sao thông thường trong Dải Ngân Hà. Tuy nhiên, các phép đo phổ lại cho thấy rằng phổ của chúng bị dịch chuyển mạnh về phía bước sóng dài, gợi lên rằng các vật thể này phải ở xa bên ngoài Thiên Hà của chúng ta. Vì Vũ trụ đang giãn nở, tất cả các thiên hà đều chạy ra xa chúng ta và các vạch phổ của chúng dịch chuyển về phía đỏ của phổ theo định luật Doppler. Các vật thể ở càng xa dịch chuyển ra xa chúng ta với tốc độ càng lớn và có độ dịch chuyển về phía đỏ càng lớn (xem chương XI). Mối liên hệ này cũng áp dụng cho các quasar. Dó đó, các quasar ở cách chúng ta rất xa.

Fig.X.2

The remnant of a head-on collision between galaxies (left). One of the two galaxies (right) ran through the galaxy on the left. (Photo Hubble Space Telescope PRC95-02 STScI ESA and NASA; K Borne).

A head-on encounter can happen (Fig.X.2). This event triggers a burst of star formation in the center of the newly formed galaxy. Such an object with an abnormally luminous nucleus becomes a starburst galaxy. Giant elliptical galaxies are often found near the center of clusters of galaxies. Recent observations with the Hubble Space Telescope indicate that distant young clusters of galaxies seem to be rich in spirals, tending to support the idea that ellipticals may be formed later by the merging of spirals. Astronomers build models based on the gravitational interaction, using computers to simulate the effects of the collision and to reproduce the images that they actually observed.

Galaxy formation

The gas in our Galaxy is distributed hierarchically, in a scale spanning from the dimension of the solar system ($3\ 10^{-4}$ pc) to the size of the interstellar clouds (a few tens of pc). Likewise, the Universe has a hierarchic structure in which galaxies gather in groups, clusters and superclusters. Galaxies are formed from the large scale inhomogeneities in density in the early epoch of the Universe. Therefore, galaxy formation is directly connected with the theories of cosmology, discussed in Chapter XI. The problem of how galaxies form is still being debated. Let us give a simplified scenario which is similar to that leading to the formation of stars in the Galaxy.

Any initial density fluctuation is subject to two main forces, the gravitational attractive force due to its own mass and the force due to the gas pressure which acts against the contraction. A fluctuation can grow by accreting surrounding matter. Then it collapses and condenses into large complexes of gas. As the collapse of a gas complex proceeds, it breaks up into fragments which become the precursors of galaxies. These galaxy-forming clouds, the protogalactic clouds, subdivide into smaller fragments, which in turn condense into stars.

The origin of the initial fluctuations, which remains largely unknown, is one of the favorite topics of research for a number of cosmologists.

QUASARS.

Astronomers discovered a category of astronomical objects whose image is not extended like that of a galaxy, but has instead a finite roundish shape reminiscent of ordinary stars in the Milky Way. However, spectroscopic measurements reveal that their spectrum is highly shifted toward long wavelengths, suggesting that these objects should be far beyond our Galaxy. Because the Universe is expanding, all galaxies are rushing away from us and their spectral lines shift toward the red end of the spectrum according to the Doppler law. The farther the objects are, the faster they recede from us and the larger are their redshifts (see Chapter XI). This relation also applies to the quasars. Therefore, quasars are very distant.

Bản chất của quasar là gì ?

Thực chất, quasar sáng gấp hàng ngàn lần các thiên hà sáng nhất mặc dầu các quasar hiện ra như những vật thể rất mờ trên bầu trời vì chúng ở xa. Quasar thuộc vào những loại thiên thể sáng nhất trong Vũ trụ. Các nghiên cứu quang phổ đã cho thấy rằng bức xạ của quasar được phát ra bởi các khí nóng tương tự như các khí được tìm thấy ở trung tâm các thiên hà có dạng bất thường có nhân rất hoạt động và rất sáng. Các vạch phát xạ của chúng trải rộng ra. Điều đó cho thấy rằng các đám mây khí nóng trong các quasar chuyển động với tốc độ hàng trăm ki-lô-mét mỗi giây. Các quasar cũng là những nguồn phát xạ tia X và vô tuyến rất mạnh. Điều khá kì lạ là tất cả năng lượng này được giữ trong một thể tích có đường kính chỉ vài năm ánh sáng - một thể tích cực kì nhỏ so với kích thước của thiên hà, khoảng 100000 năm ánh sáng.

Làm sao chúng ta biết được rằng các quasar có mật độ vật chất lớn như vậy? Chúng ta không đễ gì đo được một cách trực tiếp kích thước của các vật thể này vì chúng nằm xa trong Vũ trụ đến mức đường kính biểu kiến của chúng quá nhỏ, không thể phân giải được dù với những kính thiên văn lớn nhất. Các nhà thiên văn sử dụng một trong những đặc tính quan trọng nhất của các quasar - sự biến thiên cường độ ánh sáng và sự bức xạ vô tuyến của chúng để ước tính kích thước của các quasar. Đặc biệt, độ chói biểu kiến của các quasar biến thiên, thay đổi nhiều bậc trong thời gian vài năm. Những vụ nổ sản sinh ra các đám mây chứa các electron năng lượng cao mới được tạo thành. Những đám mây này phát bức xạ vô tuyến synchrotron. Dù cho các mảnh vỡ còn lại của các vụ nổ này lan truyền với tốc độ ánh sáng c thì cũng phải có một độ trễ về thời gian giữa bức xạ đi tới Trái Đất từ phía sau của quasar so với bức xạ đi tới Trái Đất từ phía trước của quasar, ở gần người quan sát hơn. Như vậy, từ thang thời gian biến thiên t đo được, chúng ta có thể xác định được khoảng lan truyền của ánh sáng ct, khoảng này phải tương ứng với đường kính cực đại của nguồn. Kết quả vào cỡ hàng năm ánh sáng. Kích thước thực tế đương nhiên nhỏ hơn vì chúng ta đã giả sử rằng các vụ nổ lan truyền với tốc độ ánh sáng c.

Các quan sát cho thấy rằng trong Vũ trụ, ở các khoảng cách lớn hơn có nhiều quasar hơn so với ở các khoảng cách bé hơn. Điều này có nghĩa là ở trong Vũ trụ ban đầu đã có nhiều quasar hơn. Kết quả này phù hợp với lí thuyết về Vụ nổ lớn tạo ra một Vũ trụ tiến hoá (xem chương XI).

Động cơ trung tâm

Bản chất của động cơ cung cấp cho quasar một năng lượng lớn như vậy là gì? Sự ra đời của các kính thiên văn quang học và các kính thiên văn vô tuyến lớn và sự tiến bộ trong vật lí các vật thể khối lượng lớn và có mật độ vật chất lớn đã cho phép các nhà thiên văn đề xuất một vài lí thuyết. Một trong những lí thuyết này cho rằng các quasar có liên quan với nhân hoạt động mạnh của một số thiên hà. Một tập hợp các sao có khối lượng lớn va chạm với một tập hợp khác trong vùng nhân của một thiên hà gây ra những vụ nổ sao siêu mới có thể cung cấp năng lượng cho một quasar. Một lí thuyết khác, phổ cập hơn, cho rằng bản thân quasar là một hốc đen "ăn thịt" khổng lồ có khối lượng bằng hàng trăm triệu khối lượng Mặt Trời, tích trữ vật chất xung quanh trong một đĩa bồi tụ. Vật chất bồi tụ nóng đến mức nó phát ra bức xạ X. Người ta cho rằng một hốc đen có khối lượng siêu lớn như vậy có thể được hình thành do sự kết nhập của các hốc đen riêng rẽ, có khối lượng bé hơn, là tàn dư của các sao có khối lượng lớn. Các va chạm của các thiên hà với các quasar có thể cung cấp khí làm nhiên liệu cho các hốc đen trung tâm. Đám sáng mờ xung quanh lõi một số quasar đã được phân giải thành một dây tạo bởi các đám sao. Dây này có thể được tạo thành sau vụ va chạm với một thiên hà đồng hành. Nhờ có độ phân giải không gian đặc biệt cao của kính thiên văn vũ trụ Hubble, chúng ta mới có thể phát hiện ra cấu trúc tinh tế đó trong các quasar.

What is the nature of quasars ?

Quasars are intrinsically thousands of times more luminous than the brightest galaxies, yet they appear as very faint objects in the sky because of their large distance. They are among the most luminous objects in the Universe. Spectroscopic studies have shown that the radiation of quasars is emitted by hot gas similar to that found in the center of unusual galaxies which exhibit very active bright nuclei. Their emission lines are furthermore broad, suggesting that the hot gas clouds in quasars move at velocities of hundreds of kilometers per second. Quasars are also powerful sources of X-ray emission and radio emission. Surprisingly enough, all this energy is confined within a volume with a diameter of only a few light-years, a volume extremely small compared to the dimension of a galaxy of about 100 000 light years.

How do we know that quasars are so compact? It is not easy to measure directly the size of these objects, because they are so remote in the Universe that their diameter appears too small to be resolved even with the largest telescopes. Astronomers use one of the most interesting characteristics of quasars, the variability of the intensity of their light and of their radio emission, to estimate the size of quasars. In particular, the visible brightness of quasars varies, changing by several magnitudes during periods of a few years. Explosions produce fresh energetic electron clouds emitting synchrotron radio radiation. Even if the debris of these explosions propagate at the velocity of light c, there should be a time lag for radiation to reach the Earth from the back side of the quasar relative to its front side which is closer to the observer. Thus, from the measured variability time scale t, we can determine the "light travel distance" ct, which should correspond to the maximum diameter of the source. The result is of the order of light years. The actual size is indeed smaller since we have assumed that the explosions propagate at the speed of light c.

The observations show that quasars seem to be more numerous at larger distance in the Universe than at closer distance. This would mean that more quasars existed in the early Universe. This result is consistent with the theory of the Big Bang creating an evolving Universe (see Chapter XI).

The central engine

What is the nature of the engine which supplies so much energy to quasars ? The advent of large telescopes and radio telescopes and the progress in the physics of massive and compact objects have allowed astronomers to propose several theories. One of these suggests that quasars are related to the active nuclei of some galaxies. A concentration of massive stars colliding with one another in the nuclear region of a galaxy would trigger supernova explosions which can provide the amount of energy of a quasar. Another more popular theory suggests that the quasar is itself a giant cannibal black hole of hundreds of millions of solar masses, storing ambient matter in an accretion disk. The accreting matter is so hot that it emits X-radiation. It has been suggested that the origin of such a supermassive blackhole may be found in the merging process of individual smaller black holes, which are the remnants of massive stars. Encounters of galaxies with quasars may provide gas which is used as fuel for the central black holes. The nebulosity around the cores of some quasars has been resolved as a string of star clusters, which may be formed after the encounter with a galaxy companion. The detection of such fine structure in quasars has been made possible by the use of the exceptionally high spatial resolution of the Hubble Space Telescope.

CÁC NGUỒN VÔ TUYẾN NGOÀI THIÊN HÀ

Các thiên hà với nhân hoạt động và các quasar là những nguồn phát xạ sóng vô tuyến synchrotron mạnh. Vì chúng ở rất xa chúng ta nên cần có các quan sát với độ phân giải góc lớn để phân biệt các chi tiết bên trong các thiên thể này. Kỹ thuật đo giao thoa vô tuyến được sử dụng để tăng độ phân giải (xem chương XII).

Cấu trúc của các thiên hà vô tuyến và các quasar

Các nguồn vô tuyến liên đới với các thiên hà và các quasar, gồm chủ yếu ba thành phần: i) một nguồn có mật độ vật chất lớn ở trung tâm, gọi là nhân; ii) hai "búp" khuếch tán phân bố ở hai bên nhân; iii) hai tia nối nhân với các búp.

Hình X.3 cho chúng ta thấy ảnh vô tuyến của một thiên hà vô tuyến, mang tên 3C 111, thu được ở tần số 1612 MHz (bước sóng 18 cm) nhờ kỹ thuật giao thoa.

Hình X.3 : (Xem cuối chương)

Ảnh của thiên hà vô tuyến 3C 111 ở tần số vô tuyến 1612 MHz. (Các màu không đúng như thật). Các electron được phát ra với tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng từ lõi trung tâm và bị bắt giữ trong hai búp vô tuyến. Cũng có một tia hẹp và một quầng mờ. (Ảnh vô tuyến được chụp bởi Nguyễn Quang Riệu và Anders Winnberg dùng Hệ giao thoa rất lớn của Đài quan sát thiên văn vô tuyến quốc gia, Mỹ).

Độ phân giải góc 4 giây cung, khá cao đối với một dụng cụ hoạt động ở bước sóng cm, cho phép các nhà thiên văn phân giải cấu trúc của nguồn vô tuyến này. Khoảng cách của nguồn vô tuyến, được ước tính từ độ dịch chuyển về phía đỏ z = 0,0485 của nó (xem chương XI) là ~ 200 Mpc. Lõi trung tâm, không phân giải được, trùng với vị trí của thiên hà quang học rất mờ (không nhìn thấy trên hình X.3). Nó là động cơ năng lượng trung tâm. Có thể nhìn thấy rõ một tia có độ chuẩn trực cao nối lõi với một trong các búp vô tuyến. Tuy nhiên, tia đối xứng khác bị thiếu. Có một quầng vô tuyến có dạng giả e líp bao quanh toàn bộ tổ hợp. Các hạt tương đối tính được phun vào các búp trong đó có từ trường từ nhân qua các tia siêu âm cao độ, đi vào môi trường giữa các thiên hà với tốc độ hàng nghìn ki lô mét mỗi giây.

Cấu trúc vô tuyến đó là điển hình cho cả các thiên hà vô tuyến và các quasar. Các thiên hà vô tuyến nói chung tương ứng với các thiên hà e líp khổng lồ có nhân sáng, còn các đối thể quang học của các quasar là những thiên thể ở xa, có dạng giống như các ngôi sao.

SỰ TẠO THẤU KÍNH HẤP DẪN

Thuyết tương đối tổng quát của Einstein tiên đoán rằng quỹ đạo của ánh sáng cũng như của bất kì bức xạ nào phát ra từ một ngôi sao, một thiên hà, hoặc một quasar ở xa đều bị lệch bởi trường hấp dẫn của một vật thể G có khối lượng lớn nằm ngẫu nhiên giữa một vật thể Q ở xa và người quan sát O (hình X.4). Độ lệch tỉ lệ với cường độ trường hấp dẫn G.

EXTRAGALACTIC RADIO SOURCES.

Galaxies with active nuclei and quasars are powerful synchrotron radio sources. Since they are very far from us, observations with high angular resolution are required to distinguish the details inside these objects. Radio interferometric technique is used to increase the resolution (see Chapter XII).

Structure of radio galaxies and quasars

The radio sources associated with galaxies and quasars consist typically of three components: i) a central compact source, the nucleus; ii) two diffuse "lobes" distributed on either side of the nucleus ; iii) two jets joining the nucleus to the lobes.

Figure X.3 shows the radio image of a radio galaxy, 3C 111, obtained at the frequency 1612 MHz (wavelength 18 cm) by interferometric technique.

Figure X.3

Image of the radio galaxy 3C 111 at the radio frequency 1612 MHz. (The colors are not real). Electrons are ejected at nearly the velocity of light from the central core and trapped in two radio lobes. There also exist a narrow jet and a faint halo. (Radio photograph obtained by Nguyen Quang Rieu and Anders Winnberg with the Very Large Array of the National Radio Astronomy Observatory, USA).

The angular resolution of 4 arcseconds, quite high for such an instrument working at centimeter wavelengths, allows astronomers to resolve the structure of this radio source. The distance of the radio source estimated from its redshift z=0.0485 (see Chapter XI) is ~ 200 Mpc. The central core, which is not resolved, coincides with the position of the very faint optical galaxy (not visible in Fig.X.3). It is the central energy engine. A highly collimated jet connecting the core with one of the radio lobes is clearly seen. The other symmetrical jet is however missing. There exists a pseudo-elliptical radio halo surrounding the whole complex. Relativistic particles are injected into the magnetized lobes from the core via the highly supersonic jets, which impinge on the intergalactic medium at a velocity of thousands of kilometers per second.

This radio structure is typical of both radio galaxies and quasars. Radio galaxies correspond generally to giant elliptical galaxies with bright nuclei, whereas the optical counterparts of quasars are faint remote starlike objects.

GRAVITATIONAL LENSING.

Einstein's theory of general relativity predicts that both light and any other radiation from a star or a remote galaxy or a quasar are deflected by the gravitational field of an intervening massive object G which is located by chance between the remote object Q and the observer O (Fig.X.4). The amount of deflection is proportional to the strength of the gravitational field of G.

Hình X.4 : (Xem cuối chương)

Các tia sáng từ một nguồn bức xạ ở đằng sau, chẳng hạn một quasar Q, bị uốn cong bởi một vật thể G có khối lượng là nằm giữa quasar Q và người quan sát O, trước khi tới người quan sát O để tạo ra một ảnh.

Thiên thể G nằm xen giữa có thể là một ngôi sao, một thiên hà hay một đám thiên hà. Hiệu ứ này làm ta nhớ tới độ tụ của một thấu kính quang học được gọi là sự tạo thấu kính hấp dẫn. G lệch α thay đổi theo khoảng cách xuyên tâm r của tia tới tính từ thấu kính hấp dẫn và khối lượng của nó: $\alpha = 8GM/c^2r$; G là hằng số hấp dẫn.

Thí nghiệm đầu tiên để kiểm tra sự lệch của ánh sáng của ngôi sao bởi trường hấp dẫn của m thiên thể được thực hiện vào năm 1919 trong suốt một nhật thực toàn phần. Vị trí của các sao ở g mép Mặt Trời, xuất hiện trên bầu trời tối trong thời gian nhật thực, bị dịch chuyển so với vị thường được quan sát thấy của chúng khi không có nhật thực, do hiệu ứng uốn cong tia sáng. H dịch chuyển góc của các sao là cực nhỏ, chỉ 1,75 giây cung, đo khối lượng vừa phải (theo ti chuẩn thiên văn) của Mặt Trời. Giá trị này hoàn toàn phù hợp với giá trị tiên đoán theo thuyết tươ đối tổng quát của Einstein.

Quasar sinh đôi

Việc khám phá ra quasar kép 0957 + 561 phát xạ ở các bước sóng khả kiến và vô tuyến, v năm 1979, đã làm xuất hiện câu hỏi lí thú về nguồn gốc cuả nó. Hai thành phần của quasar, ph cách nhau chỉ có 6 giây cung trên bầu trời, có cùng độ dịch chuyển về phía đỏ cho thấy rằng chú ở cùng khoảng cách. Chúng cũng có các tính chất giống nhau và trông rất giống một cặp thiên t sinh đôi. Chúng quả thực là các hình ảnh của cùng một quasar mẹ rất yếu và ở rất xa, khoảng 10 năm ánh sáng. Trường hấp dẫn của một thiên hà xen giữa đóng vai trò một thấu kính hấp dẫn tạo hai hình ảnh. Quasar ở xa đôi khi nằm gần như thẳng hàng với thiên hà phía trước dọc theo đườ ngắm kể từ người quan sát. Các hình ảnh thậm chí còn sáng hơn bản thân quasar. Thấu kính h dẫn là một thiên hà mờ nằm gần đúng ở giữa đường (~ 5 tỉ năm ánh sáng) nối chúng ta và quasar.

Ảo ảnh vũ trụ

Sự tạo thấu kính hấp dẫn không những làm tăng cường độ của vật thể ở đằng sau mà còn là biến dạng nó. Bản chất của các ảnh phụ thuộc vào mức độ thẳng hàng của nguồn ở đằng sau, thí như một quasar, và vật thể làm lệch nằm ở phía trước. Nếu hai vật thể hoàn toàn thẳng hàng thì ả là một vành tròn, gọi là "vành Einstein", bao quanh các vật thể. Bán kính của vành là r $(4GMd/c^2)^{1/2}$, M là khối lượng của vật làm lệch và d là khoảng cách sao cho $1/d = 1/d_1 + 1/d_2$; d_1 khoảng cách từ vật làm lệch đến người quan sát và d_2 là khoảng cách từ vật làm lệch đến nguồn đằng sau.

Trên thực tế, ánh sáng từ các quasar ở xa phải mất hàng tỉ năm để đi tới kính thiên văn. Trên đườ đi về phía Trái Đất, ánh sáng đi qua một màn ảnh tạo bởi các thiên hà, thí dụ như một đám thiên Đám này đóng vai trò như một thấu kính có khả năng làm biến dạng ảnh của quasar ở đằng s Trong trường hợp này, sự tạo thấu kính hấp dẫn dẫn tới một hệ nhiều ảnh và cung ánh sáng có phức tạp ít hoặc nhiều. Hình ảnh của ảo tượng vũ trụ này phụ thuộc vào sự phân bố của các thiên

Figure X.4

Light rays from a background source, for instance a quasar Q, are bent by an intervening massive object G before reaching the observer O, to form an image.

The intervening astronomical object G can be a star, a galaxy or a cluster of galaxies. This effect, reminiscent of the focusing power of an optical lens, is called gravitational lensing. The deflection angle α varies with the radial distance r of the incident ray from the gravitational lens and its mass M as $\alpha = 8\ GM/c^2r$; G is the gravitational constant.

The first experiment to test the deflection of the star light by the gravitational field of an astronomical object was performed in 1919 during a total solar eclipse. The position of the stars near the solar rim, which appear in the dark sky during the eclipse, is displaced with respect to their position usually observed when there is no eclipse, because of the effect of the light bending. The angular displacement of stars is minuscule, only 1.75 arcsecond, because of the modest mass (by astronomical standards) of the Sun. This value is quite consistent with that predicted by the theory of Einstein's general relativity.

A twin quasar

The discovery in 1979 of the double quasar 0957+561, emitting in the visible and at radio wavelengths, has raised the interesting question about its origin. The two components of the quasar, separated from each other by only 6 arcseconds in the sky, have the same redshift, which indicates that they are at the same distance. They also have identical properties and look very much like a twin object. They are in fact the images of single very weak and distant parent quasar, at about 10 billion light-years. The gravitational field of an intervening galaxy plays the role of a gravitational lens to form the two images. The remote quasar happens to be almost aligned with the foreground galaxy along the line of sight of the observer. The images are even brighter than the quasar itself. The gravitational lens is a faint galaxy located approximately half way (~ 5 billion light-years) between us and the quasar.

The cosmic mirage

The gravitational lensing not only amplifies the intensity of the background object but distorts it. The nature of the images depends on the degree of alignment of the background source, such as a quasar, with the foreground deflector. If the two objects are perfectly aligned, the image is a ring, called the "Einstein's ring", around the objects. The radius of the ring is $r = (4GMd/c^2)^{1/2}$, M is the mass of the deflector and d is a distance such that $1/d=1/d_1+1/d_2$; d_1 is the distance of the deflector to the observer and d_2 is the distance of the deflector to the background source.

In practice, light from remote quasars takes billions of years to reach the telescope. On the way toward the Earth, the light passes through a screen of galaxies, such as a cluster of galaxies. The cluster acts like a lens capable of distorting the image of the background quasar. In this case, the gravitational lensing results in a system of more or less complicated multiple images and arcs of light. The image of this cosmic mirage depends on the distribution of the galaxies

trong đám thiên hà nằm ở phía trước (hình X.5). Sự tạo thấu kính hấp dẫn là một công cụ hữu hiệu để phát hiện các đám thiên hà hoặc thậm chí các phôi thai của các thiên hà (các tiền thiên hà) nằm ở phía trước. Các vật thể có khối lượng lớn này còn trẻ, chứa chủ yếu khí và bụi, và không phát ra nhiều bức xạ. Hiệu ứng tạo thấu kính hấp dẫn được sử dụng để phát hiện những chỗ tập trung vật chất đen không nhìn thấy được, đóng vai trò thấu kính hấp dẫn. Vật chất đen, thành phần chính của vật chất, có vai trò chủ chốt trong Vũ trụ học, ngành khoa học nghiên cứu sự tiến hoá của Vũ trụ (chương XI). Tương tự, các thiên hà và quasar nằm ở đằng sau, ở xa nhất có thể được phát hiện nhờ hiệu ứng tạo thấu kính hấp dẫn vì ánh sáng của chúng được khuếch đại.

Hình X.5 : (Xem cuối chương)

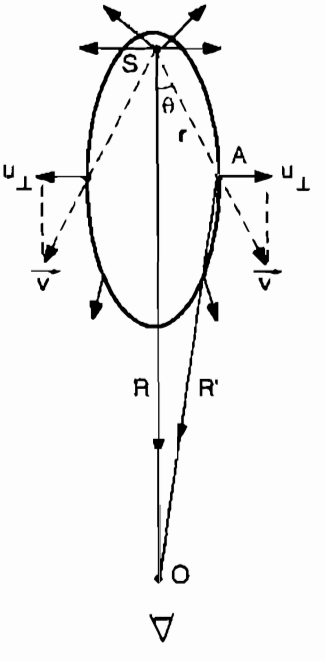
Thấu kính hấp dẫn trong đám thiên hà Abell 2218 tạo ra trên bầu trời một ảo ảnh vũ trụ gồm các ảnh, vành và cung, đặc biệt là các cung gần như tạo ra một đường tròn xung quanh thiên hà sáng nhất ở bên phải.

(Ảnh: Kính thiên văn vũ trụ Hubble PF95-14 STScI OPO, W. Couch, UNSW, NASA).

CHUYỂN ĐỘNG NHANH HƠN ÁNH SÁNG

Chúng ta biết rằng một số máy bay có thể bay với tốc độ lớn hơn tốc độ của âm thanh. Tuy nhiên, một vật thể không thể chuyển động với tốc độ lớn hơn tốc độ ánh sáng. Theo thuyết tương đối hẹp, mọi hạt vật lí, dù có khối lượng ra sao cũng không thể lan truyền nhanh hơn ánh sáng. Ấy thế mà dường như trong Thiên văn học người ta đã quan sát được những vật thể siêu ánh sáng.

Cường độ phát xạ vô tuyến synchrotron của các thiên hà và quasar thay đổi trên một thang thời gian cỡ vài năm, do những bùng nổ chuẩn tuần hoàn, phóng ra những đám mây electron tương đối tính. Việc theo dõi dài hạn các nguồn vô tuyến sáng ở xa sử dụng những độ phân giải không gian cao nhờ kỹ thuật đo giao thoa đã phát hiện ra rằng vị trí của các đám mây electron phát bức xạ synchrotron này thay đổi trên bầu trời. Nếu chúng ta đo khoảng cách góc đo một đám mây chuyển động trong một năm vạch ra, và vì chúng ta biết khoảng cách của nó từ độ dịch chuyển về phía đỏ của nguồn vô tuyến mẹ, chúng ta có thể xác định được tốc độ của đám mây trên bầu trời. Trong nhiều trường hợp, hoá ra tốc độ quan sát được của các nhóm phát xạ vô tuyến này vượt quá tốc độ của ánh sáng c (chuyển động siêu ánh sáng)!



Hình X.6:
Giải thích các tốc độ siêu ánh sáng.

Nghịch lí chuyển động siêu ánh sáng

Nghịch lí chuyển động siêu ánh sáng (vận tốc > c) của các thiên hà vô tuyến và các quasar được giải quyết như là một ảo ảnh quang học. Tốc độ mà chúng ta đo không phải là tốc độ thực của đám mây khí phát xạ. Nó là tốc độ được chiếu xuống mặt phẳng của bầu trời và trở thành siêu ánh sáng. Mỗi đám mây riêng lẻ chuyển động trong không gian với tốc độ rất lớn (tốc độ tương đối tính), tuy gần bằng, song vẫn bé hơn tốc độ ánh sáng. Ảo tượng quang học này có thể được giải thích như sau:

in the foreground cluster (Fig.X.5). Gravitational lensing is a powerful tool to detect foreground clusters of galaxies or even embryos of galaxies (protogalaxies). These massive objects are young, contain essentially gas and dust, and do not emit much radiation. The lensing effect is used to reveal the concentrations of invisible dark matter, which behave as gravitational lenses. Dark matter which is the major component of the matter plays a key role in cosmology which investigates the evolution of the Universe (see Chapter XI). Likewise, the most distant background galaxies and quasars can be detected by the gravitational lensing effect, because their light is amplified.

Figure X.5

Gravitational lens in the cluster of galaxies Abell 2218, producing in the sky a cosmic mirage composed of images, rings and arcs, especially the arcs that nearly outline a circle around the brightest galaxy on the right. Photo Hubble Space Telescope PF95-14 STScI OPO, W. Couch, UNSW, NASA).

MOTION FASTER THAN LIGHT.

We know that certain aircraft can fly with a speed which exceeds the speed of sound. However, it is not possible for an object to move with a speed higher than the speed of light. According to the special theory of relativity, any physical particle, whatever its mass, cannot propagate faster than light. Yet, apparently superluminal objects have been observed in astronomy.

The intensity of the synchrotron radio emission of galaxies and quasars varies over a time scale of the order of years, due to quasi-periodic outbursts, which eject clouds of relativistic electrons. Long term monitorings of bright remote radio sources, using high spatial resolutions offered by the radio interferometry technique, have revealed that the positions of these electron clouds, radiating synchrotron emission, change in the sky. If we measure the angle by which a cloud moves in a year or so, and since we know its distance from the redshift of the parent radio source, we can determine the velocity of the cloud across the sky. It turns out that, in many instances, the observed velocities of these clumps of radio emission exceed the speed of light c (superluminal motion)!

Paradox of superluminal motion

The paradox of superluminal motion (velocity $v > c$) of radio galaxies and quasars is resolved in terms of an optical illusion. The velocity that we measure is not the actual velocity of the emitting gas cloud. It is the velocity projected on the plane of the sky which turns out to be superluminal. Each individual cloud moves in space at a very high velocity (relativistic velocity), close to but less than the velocity of light. This optical illusion can be explained as follows.

Figure X.6

The explanation of the superluminal velocities.

Chúng ta hãy xem xét một vụ nổ xảy ra ở một điểm S trên bầu trời và vào thời điểm t_e. Một người quan sát đứng ở vị trí O trên Trái Đất phát hiện ra một tín hiệu vô tuyến ở thời điểm t = 0 (hình X.6). Vì tín hiệu vô tuyến lan truyền với tốc độ ánh sáng c nên thời điểm nổ là: $t_e = -R/c$ (R là khoảng cách SO của nguồn).

Các mảnh vỡ còn lại của vụ nổ phát bức xạ synchrotron, phân bố trên một bề mặt bao quanh tâm nổ S. Chúng được giả định là được phóng ra một cách đẳng hướng với tốc độ đều v. Trên bề mặt phát xạ, ở một điểm A có các toạ độ r, θ và khoảng cách R' tính từ người quan sát, một tín hiệu phát ra ở thời điểm t'_e được ghi bởi người quan sát ở thời điểm t, bởi vậy:

$$t'_e = t - (R'/c) \approx t - (R - r\cos\theta)/c \qquad (10.1)$$

(với r << R và R')

Vì bán kính r tăng lên theo v:

$$t'_e - t_e = t'_e + (R/c) = r/v \qquad (10.2)$$

Từ phương trình (10.2) ta có:

$$t'_e = r/v - R/c \qquad (10.3)$$

Kết hợp các phương trình (10.1) và (10.3), chúng ta suy ra:

$$r = vt / [1 - (v/c)\cos\theta] \qquad (10.4)$$

Nếu tốc độ phóng là bé (v << c), phương trình (10.4) cho thấy r = vt và bề mặt phát xạ là một hình cầu có tâm ở S. Nếu v là tương đối tính (v ≈ c) thì bề mặt này trở thành một hình phỏng cầu thon giãn dài ra theo phương của đường ngắm SO. Người quan sát đo được một tốc độ biểu kiến $u_\perp$ được chiếu xuống mặt phẳng của bầu trời. Từ phương trình (10.4), chúng ta suy ra:

$$u_\perp = (dr/dt)\sin\theta = (v\sin\theta)/[1 - (v/c)\cos\theta] \qquad (10.5)$$

Phương trình này cho thấy rằng tốc độ biểu kiến quan sát được $u_\perp$ phụ thuộc vào góc θ giữa phương chuyển động và đường ngắm. Giá trị cực đại $u_{\perp\,max}$ thu được bằng cách đặt $du_\perp / d\theta = 0$ trong phương trình (10.5) để có $\cos\theta_{max} = v/c$; và bằng cách thay thế θ bởi θ_{max} trong phương trình (10.5):

$$u_\perp max = v / [1 - (v^2/c^2)]^{1/2} \qquad (10.6)$$

Đối với một tốc độ phóng tương đối tính, v = 0,995c, phương trình (10.6) cho tốc độ giãn nở biểu kiến mười lần lớn hơn tốc độ ánh sáng.

Các phép đo giao thoa vô tuyến dài hạn với các đường cơ sở xuyên lục địa được xây dựng trong nhiều năm đã được tiến hành để phát hiện các chuyển động siêu ánh sáng.

Let us consider an explosion occurring at a point S in the sky and at a time t_e . A terrestrial observer located at O detects a radio signal at time t = 0 (Fig.X.6). Since the radio signal propagates with the velocity of light, c, the explosion time is: t_e = - R/c (R being the distance SO of the source).

The debris of the explosion, which emit synchrotron radiation, are distributed on a surface surrounding the explosion center S. They are assumed to be ejected isotropically with a uniform velocity v. On the emitting surface, at a point A of coordinates r, θ, and of distance R' from the observer, a signal emitted at time t'_e is recorded by the observer at time t, such that:

$$t'_e = t-(R'/c) \approx t-(R-r\cos\theta)/c \qquad (10.1)$$

(with r << R and R')

Since the radius r increases with v:

$$t'_e - t_e = t'_e + (R/c) = r/v \qquad (10.2)$$

From equation (10.2) we get:

$$t'_e = r/v - R/c \qquad (10.3)$$

Combining equations (10.1) and (10.3) we derive:

$$r = vt/[\,1-(v/c)\cos\theta] \qquad (10.4)$$

If the ejection velocity is weak (v<<c), equation (10.4) shows that r = vt and the emitting surface is a sphere centered on S. If v is relativistic (v ≈ c), this surface becomes an oblong spheroid elongated in the direction of the line of sight SO. The observer measures an apparent velocity $u_\perp$ projected onto the plane of the sky. From equation (10.4), we derive:

$$u_\perp = (dr/dt)\sin\theta = (v\sin\theta)/[1-(v/c)\cos\theta] \qquad (10.5)$$

This equation shows that the observed apparent velocity $u_\perp$ depends on the angle θ between the direction of the motion and the line of sight. The maximum value, $u_{\perp max}$, is obtained by setting $du_\perp/d\theta = 0$ in Equation (10.5) to get $\cos\theta_{max} = v/c$; and by replacing θ by θ_{max} in equation (10.5):

$$u_{\perp\,max} = v/[1 - (v^2/c^2)]^{1/2} \qquad (10.6)$$

For a relativistic ejection velocity, v=0.995c, equation (10. 6) gives an apparent expansion velocity ten times larger than the velocity of light.

Long term radio interferometry measurements with transcontinental baselines made over periods of years are used to detect superluminal motions.

CÂU HỎI

1) Một thiên hà lùn chuyển động với tốc độ 100 km/s ở khoảng cách 50 kpc kể từ một thiên hà khổng lồ có khối lượng bằng 10^{11} khối lượng Mặt Trời có thể thoát khỏi lực hút hấp dẫn của thiên hà khổng lồ hay không ?

2) Các quan sát đã cho thấy rằng độ chói của một số quasar biến thiên với chu kì ngắn chỉ một ngày. Chúng ta có thể nói gì về kích thước của các quasar như vậy ?

3) Một nhà thiên văn quan sát một ảo tượng vũ trụ gồm một vành ánh sáng (vành Einstein) xung quanh một vật thể G có khối lượng bằng khối lượng Mặt Trời ở khoảng cách 10 kpc từ Mặt Trời. Nguồn S ở đằng sau nằm cách G 40 kpc. Kích thước của vành Einstein mà người quan sát đo được là bao nhiêu? (Khối lượng Mặt Trời = $1,989 \times 10^{30}$ kg; 1 pc = $3,0856 \times 10^{16}$ m).

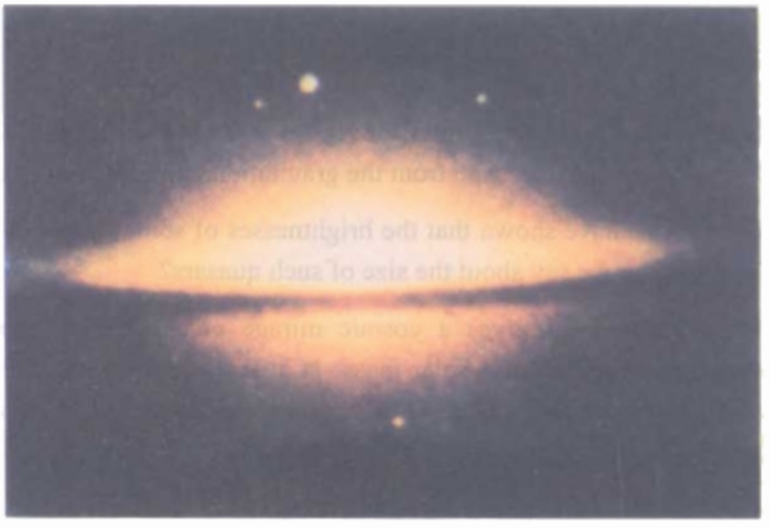
QUESTIONS

Question 1: Is it possible for a dwarf galaxy moving at 100 km/s at a distance of 50 kpc from a giant galaxy of 10^{11} solar masses to escape from the gravitational attraction of the latter galaxy ?

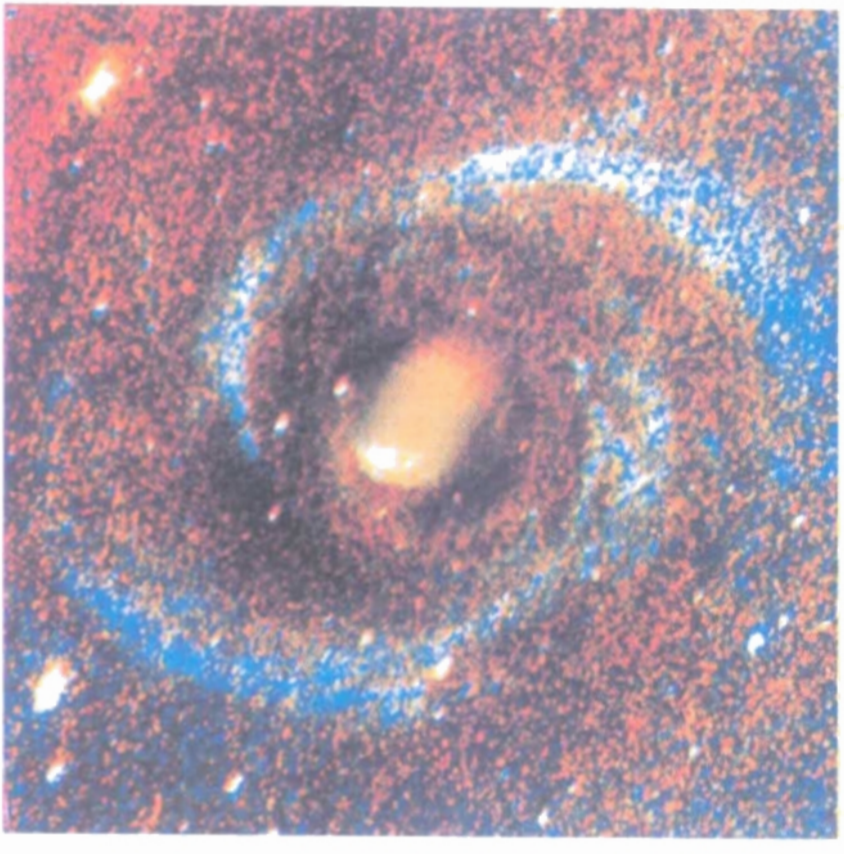
Question 2: Observations have shown that the brightnesses of some quasars vary with a period as short as one day. What can we say about the size of such quasars?

Question 3: An astronomer observes a cosmic mirage consisting of a ring of light (the Einstein's ring) around an object G of 1 solar mass at a distance of 10 kpc from the Sun. The background source S is 40 kpc away from G. What is the size of the Einstein's ring that the observer shoud measure ?

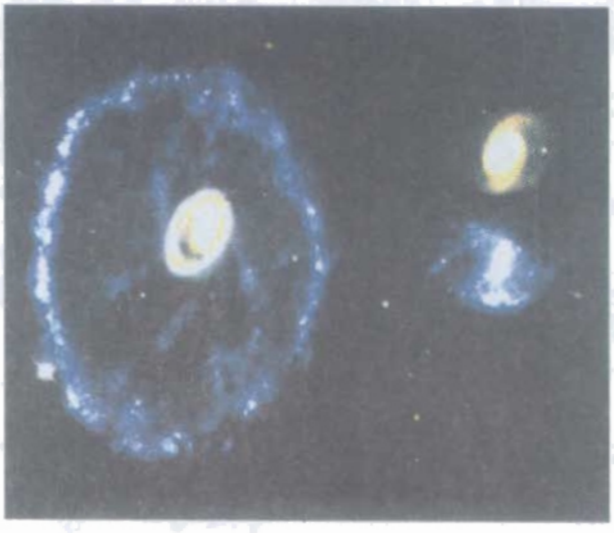
(Solar mass = 1.989×10^{30} kg; 1 pc = 3.0856×10^{16} m).



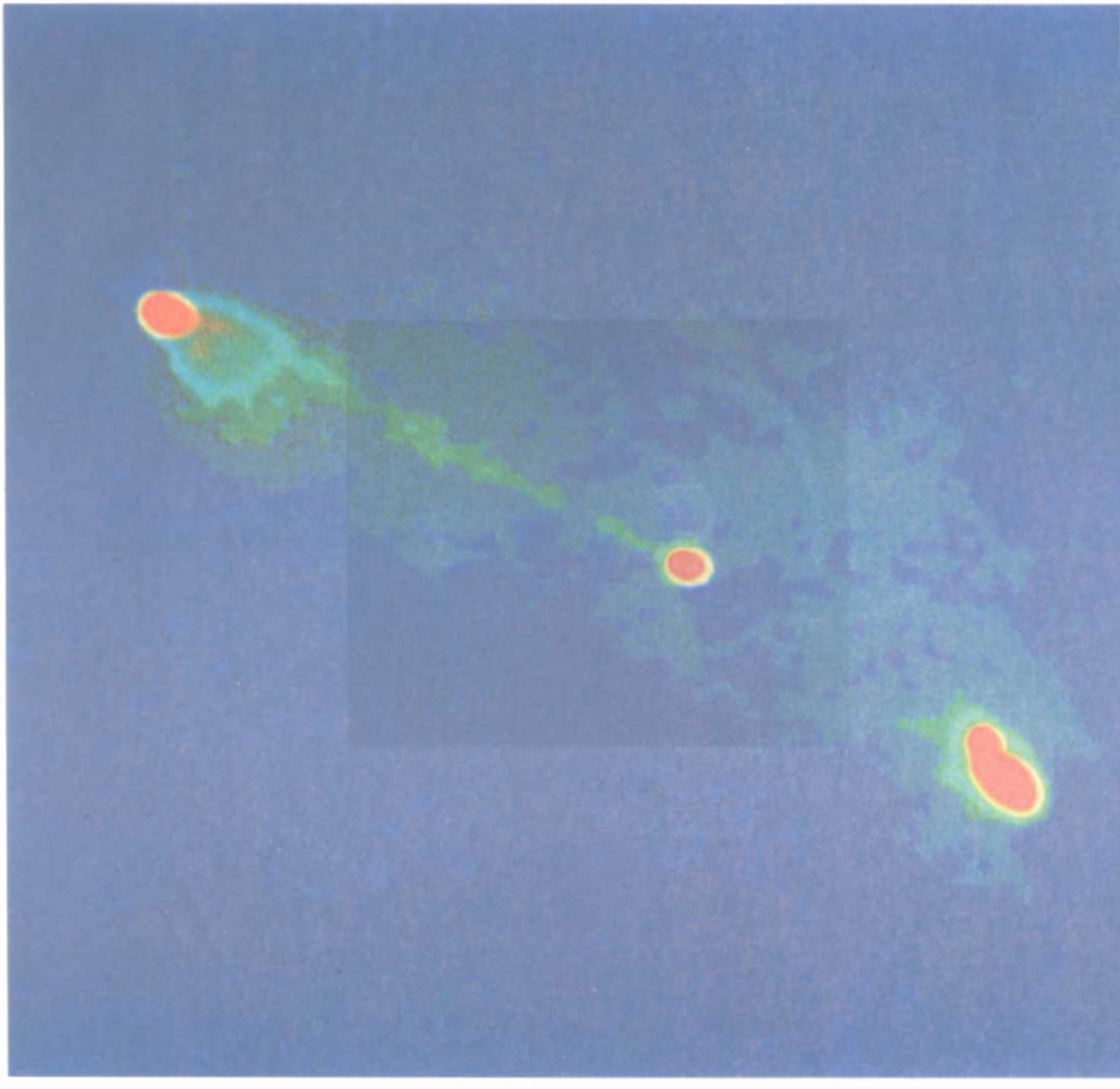
Hình X.1a



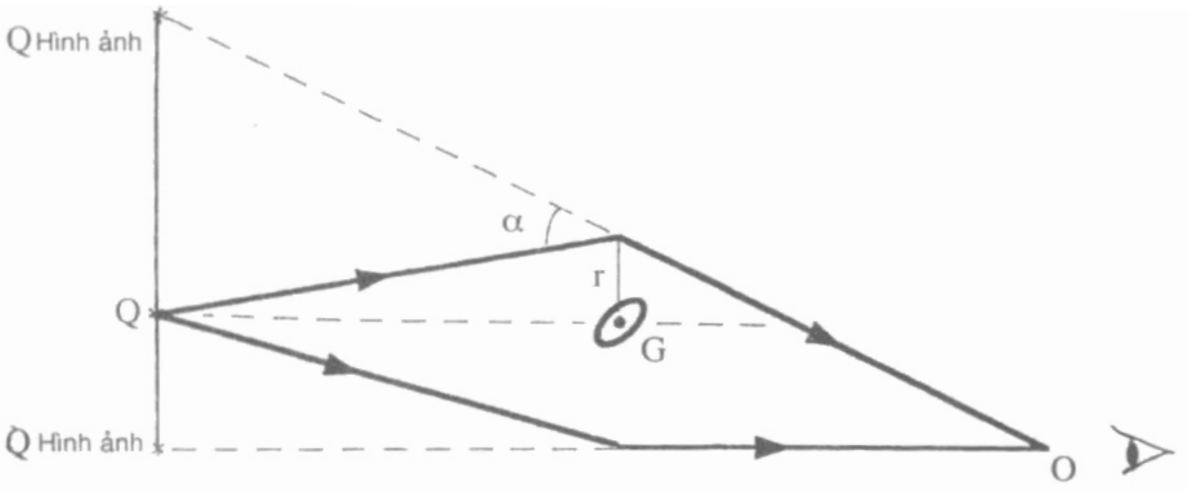
Hình X.1b



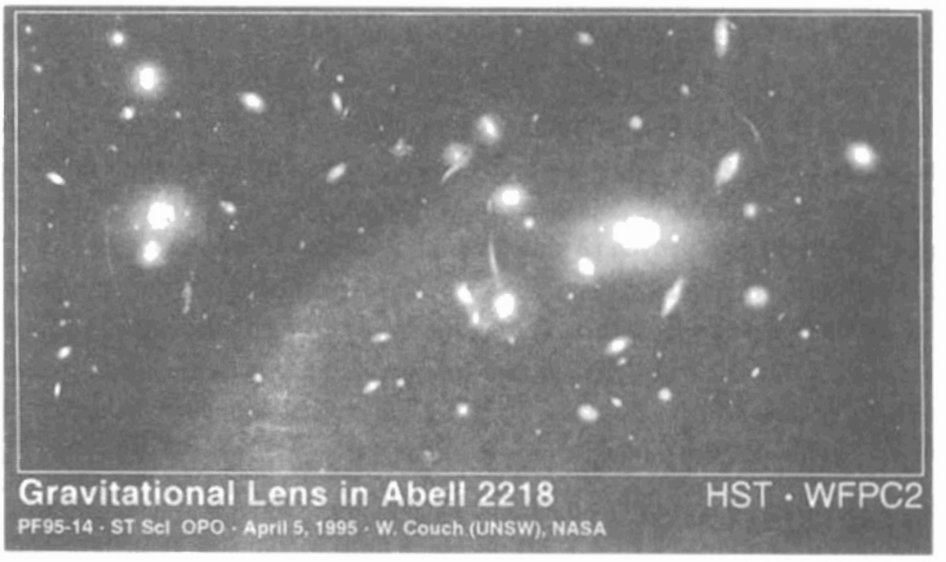
Hình X.2



Hình X.3



Hình X.4



Hình X.5

Chương XI

VŨ TRỤ HỌC

Vũ trụ học là một bộ phận của Vật lí Thiên văn nghiên cứu sự tiến hóa của Vũ trụ từ lúc nó bắt đầu hình thành cho đến tương lai vô tận. Vũ trụ đã được tạo thành như thế nào và vào lúc nào? Liệu Vũ trụ sẽ tiếp tục giãn nở mãi mãi như nó đang giãn nở hiện nay hay nó sẽ tái suy sụp trong một tương lai gần hoặc xa?

Tốc độ của ánh sáng không phải là vô hạn cho nên bức xạ từ các sao và các thiên hà phải mất một thời gian nào đó để đi đến Trái Đất. Ánh sáng từ ngôi sao ở gần chúng ta nhất đi tới mắt chúng ta sau khi đã truyền đi hơn 4 năm trong khoảng không gian giữa các sao. Mọi biến cố được quan sát hiện nay trên bầu trời, thí dụ như các vụ nổ sao siêu mới, đều xảy ra trong quá khứ. Hình ảnh các thiên hà xa xôi mà chúng ta nhìn thấy hiện nay qua các kính thiên văn chính là hình ảnh của chúng mấy tỉ năm về trước. Chúng ta luôn luôn nhìn ngược vào quá khứ, với mức độ nhiều hay ít, khi chúng ta quan sát các vật thể trong Vũ trụ.

SỰ CHUYỂN DỊCH VỀ PHÍA ĐỎ CỦA CÁC VẠCH PHỔ

Các phép đo phổ cho thấy rằng phổ của các thiên hà bị chuyển dịch về phía đỏ của chúng, chứng tỏ các thiên hà xa xôi đang dịch chuyển ra xa chúng ta. Bước sóng λ của một vật thể đang chuyển động ra xa người quan sát trở nên dài hơn và bằng $\lambda + \Delta\lambda$. Bước sóng nghỉ λ là bước sóng của bức xạ được phát ra bởi một vật thể đứng yên. Ánh sáng từ một vật thể chuyển động trở nên "đỏ hơn" khi nó dịch chuyển tới gần người quan sát. Độ dịch chuyển về phía đỏ được đo theo bước sóng $\Delta\lambda$ liên hệ với tốc độ xuyên tâm v theo công thức Doppler $\Delta\lambda/\lambda = v/c$. Các nhà thiên văn thường sử dụng khái niệm độ dịch chuyển về phía đỏ z để chỉ tỉ số v/c giữa tốc độ dịch chuyển ra xa v và tốc độ ánh sáng c. Do đó độ dịch chuyển về phía đỏ đã cho z có nghĩa là ánh sáng bị dịch từ bước sóng nghỉ λ của nó tới bước sóng quan sát được $(1 + z)\lambda$. Theo quy ước, $v > 0$ đối với nguồn chạy ra xa chúng ta, và $v < 0$ khi nguồn tiến lại gần. (Trong trường $v < 0$, vạch phổ dịch chuyển về phía xanh, $\Delta\lambda < 0$. Vì tất cả các thiên hà ở xa đều dịch chuyển ra xa chúng ta cho nên ánh sáng của chúng luôn luôn dịch chuyển về phía đỏ). Quasar đầu tiên, 3C 273, được phát hiện vào giữa những năm 1960 có độ dịch chuyển về phía đỏ bình thường, $z = 0,16$.

Đối với các vận tốc dịch chuyển ra xa lớn hơn khoảng 0,4c, chúng ta cần phải sử dụng công thức tương đối tính: $z = [(c + v)/(c - v)]^{1/2} - 1$. Đã phát hiện được một quasar có độ dịch chuyển về phía đỏ lớn xấp xỉ 5. Một độ dịch chuyển về phía đỏ cao như vậy có nghĩa là ánh sáng từ quasar đi đến có bước sóng dài hơn bước sóng nghỉ 6 lần. Tốc độ chạy xa của quasar bằng 95% tốc độ ánh sáng.

ĐỊNH LUẬT HUBBLE

Tiếp theo khám phá về tinh vân ngoài thiên hà, công trình mở đường của Edwin Hubble vào những năm 1920 về thang khoảng cách ngoài thiên hà đã mở ra kỉ nguyên của Vũ trụ học hiện đại. Hubble đã sử dụng quan hệ chu kì - độ sáng của các sao biến quang Cepheid để xác định khoảng cách

Chapter XI

COSMOLOGY

Cosmology is a branch of astrophysics which investigates the evolution of the Universe from its beginning to the infinite future. How and when was created the Universe ? Will the Universe continue to expand indefinitely as it does at the present time or will it recollapse in a more or less far future ?

The velocity of light is not infinite, so that radiation from stars and galaxies takes some time to reach the Earth. Light from the nearest star falls on our eyes after travelling more than 4 years in the interstellar space. Any event observed nowadays in the sky, such as the explosions of supernovae, belongs to the past. The images of distant galaxies that we now see through the telescopes date back to several billion years ago. We are always looking more or less back in time when we observe objects in the Universe.

THE REDSHIFTS OF SPECTRAL LINES.

Spectroscopic measurements show that the spectra of galaxies are shifted toward their red end, indicating that remote galaxies are receding from us. The wavelength λ of an object, moving away from the observer, appears longer and becomes $\lambda+\Delta\lambda$. The rest wavelength λ is the wavelength of a radiation emitted by an object at rest. The light from a moving object becomes "redder" when it reaches the observer. The amount of redshift, measured in wavelength $\Delta\lambda$, is related to the radial velocity v by the Doppler formula $\Delta\lambda/\lambda = v/c$. Astronomers often use the notion of redshift, z, which designates the ratio v/c of the recession velocity, v, to the velocity of light, c. Therefore, a given redshift z means that the light is shifted from its rest wavelength λ to an observed wavelength $(1+z)\lambda$. By convention, v is positive for a source which recedes from us, and negative when the source is approaching. (In the latter case, the line is blueshifted, $\Delta\lambda < 0$. Since distant galaxies are all receding from us, their light is always redshifted). The first quasar, 3C 273, detected in the mid-1960s has a modest redshift $z = 0.16$.

For recession velocities larger than about 0.4c, we must use a relativistic formula: $z=[(c+v)/(c-v)]^{1/2} -1$. A quasar with redshift as high as about 5 has been detected. Such a high redshift implies that the light coming from the quasar has wavelengths 6 times longer than the rest wavelengths. The recession velocity of the quasar is 95 percent the speed of light.

THE HUBBLE LAW.

Following the discovery of extragalactic nebulae, the pioneering work by Edwin Hubble in the 1920s on the extragalactic distance scale opened the era of modern cosmology. Hubble used the period-luminosity relation of Cepheid variable stars to determine the distances

của các thiên hà ở gần. Các vùng hiđrô ion hóa (các vùng HII) lớn và sáng cũng có thể dùng để xác định khoảng cách của các thiên hà này. Khoảng cách của các thiên hà ở xa hơn có thể được suy ra bằng cách so sánh độ sáng biểu kiến của chúng với độ sáng biểu kiến của các thiên hà ở gần. Sự ước tính khoảng cách này là gần đúng đối với các khoảng cách tới vài chục mê ga parsec. Đối với các thiên hà ở các khoảng cách lớn hơn, chúng ta có thể dựa vào các đám thiên hà mà các thành viên sáng nhất của chúng có thể được dùng làm những vật chỉ thị về khoảng cách.

Hubble đã khám phá ra rằng Vũ trụ đang giãn nở, khi ông nhận thấy rằng các điểm số liệu được vẽ trên giản đồ vận tốc - khoảng cách nằm trên một đường thẳng. Khoảng cách tới một thiên hà càng lớn thì tốc độ dịch chuyển ra xa của nó càng lớn. Hubble đã thiết lập mối quan hệ đơn giản giữa vận tốc dịch chuyển ra xa quan sát được v và khoảng cách D, được gọi là định luật Hubble: v = H x D. Đại lượng H là hằng số Hubble. Định luật Hubble chỉ ra rằng Vũ trụ đang giãn nở, một khám phá cơ bản trong Vũ trụ học.

Hằng số Hubble H được suy ra bằng cách đo khoảng cách của các thiên hà ở xa và vận tốc dịch chuyển ra xa của chúng. Có thể thu được vận tốc dịch chuyển ra xa một cách dễ dàng từ độ dịch chuyển về phía đỏ của các thiên hà được đo bởi các phổ kế. Độ bất định về giá trị của H là do việc khó xác định khoảng cách của các thiên hà. Các giá trị hiện nay của H, vẫn đang được tranh cãi, nằm trong khoảng giữa 50 và 80 km/s/Mpc. Nếu ta lấy giá trị trung bình 65km/s/Mpc thì các thiên hà trong đám Virgo, đang dịch chuyển ra xa với tốc độ ~1000 km/s ở cách xa chúng ta khoảng 15 Mpc. Sự giãn nở của Vũ trụ ngày nay được quan sát ở những khoảng cách rất lớn bằng cách đo độ dịch chuyển về phía đỏ của vạch phổ 21 cm của nguyên tử hiđrô trung hòa trong các thiên hà hay của các vạch phổ quang học sáng phát ra từ các quasar. Bức xạ từ các thiên hà và các quasar ở xa phải mất khoảng 10 tỉ năm để đi tới chúng ta.

CÁC MÔ HÌNH VŨ TRỤ HỌC

Có hai quan điểm chính, cạnh tranh nhau trong việc mô tả Vũ trụ : lí thuyết trạng thái dừng và lí thuyết Vụ nổ lớn. Cả hai lí thuyết đều thừa nhận rằng Vũ trụ đang giãn nở chống lại sự hút hấp dẫn.

Mô hình trạng thái dừng cho rằng Vũ trụ không thay đổi theo thời gian vì vật chất có thể được tạo ra một cách tự phát sao cho tỉ lệ tạo ra cân bằng với sự giảm của mật độ do giãn nở. Mật độ của Vũ trụ không thay đổi theo thời gian. Vũ trụ, theo lí thuyết trạng thái dừng, là vĩnh cửu, không có sự khởi đầu, không có sự kết thúc.

Mô hình Vụ nổ lớn cho rằng vật chất trong Vũ trụ không thể được tạo ra cũng không thể bị hủy đi một cách tự phát. Vũ trụ ít nhất cũng có một sự khởi đầu. Khoảng 15 tỉ năm về trước, khi Vũ trụ được tạo thành, vật chất được tập trung trong một trạng thái có nhiệt độ và mật độ vô hạn. Nó nguội dần và trở thành loãng do nó giãn nở. Một số nhà thiên văn vật lí đã miễn cưỡng chấp nhận khái niệm về một sự kì dị ban đầu, khái niệm này gợi lên ý niệm tôn giáo về Đấng sáng tạo.

Những chứng cớ ủng hộ mô hình Vụ nổ lớn

Trên quan điểm khoa học, lí thuyết Vụ nổ lớn chống chịu được tốt hơn khi phải đối mặt với các sự kiện quan sát. Các công trình liên quan đến việc đếm các nguồn vô tuyến cho thấy rằng số lượng các quasar và thiên hà vô tuyến trong quá khứ lớn hơn hiện tại. Kết quả này nói lên một cách mạnh mẽ

of nearby galaxies. Large and bright regions of ionized hydrogen (HII regions) can also serve to determine the distance of these galaxies. The distances of more remote galaxies can be derived by comparing their apparent luminosities with those of nearby galaxies. This distance estimation is approximately valid to distances up to a few tens of megaparsecs. For galaxies at greater distances, we can use clusters of galaxies whose brightest members can be used as distance indicators.

Hubble discovered that the Universe is in expansion when he realized that the data points plotted in the velocity-distance diagram were aligned on a straight line. The greater is the distance to a galaxy, the larger is its recession velocity. Hubble established a simple relation between the observed recession velocity v and the distance D, known as Hubble's law: $v = H \times D$. The quantity H is the Hubble constant. Hubble's law shows that the Universe is expanding, a fundamental discovery in cosmology.

The Hubble constant H is derived by measuring both the distances of remote galaxies and their recession velocities. The latter quantity is easily obtained from the redshifts of galaxies measured by spectrometers. The uncertainties on the value of H come from the distances of galaxies, which are more difficult to obtain. Current values of H, still subject to discussion, are between 50 and 80 km/s/Mpc. If we adopt a mean value of 65 km/s/Mpc, galaxies in the Virgo cluster, which are receding at velocities of ~ 1000 km/sec, are at about 15 Mpc. The expansion of the Universe nowadays has been observed to very large distances by measuring the redshifts of the 21 cm line of neutral atomic hydrogen in galaxies or of the bright optical lines from quasars. Radiation from remote galaxies and quasars takes about 10 billion years to reach us.

COSMOLOGICAL MODELS.

There are two main competing concepts to describe the Universe: the steady-state and the Big Bang theories. They both recognize that the Universe is expanding against the attraction of the gravitation.

The steady-state model suggests that the Universe remains the same as a function of time, because matter might be spontaneously created so that the creation rate balances the decrease of density due to the expansion. The density of the Universe would be unchanged with time. The steady-state Universe would be eternal with no beginning or end.

The Big Bang model advocates that matter in the Universe cannot be created or destroyed spontaneously. The Universe has at least a beginning. About 15 billion years ago, when the Universe was created, matter was concentrated in a state of infinite temperature and density. It cooled down and became dilute because it was expanding. Some astrophysicists are reluctant to accept the concept of an initial singularity which evokes the religious notion of Creation.

Proofs in favor of the Big Bang model

From the scientific standpoint, the Big Bang theory resists better the confrontation with the observational facts. Works consisting in counting radio sources show that the number of quasars and radio galaxies were larger in the past than now. This result strongly suggests that

rằng Vũ trụ đã tiến hóa và đã trở thành ít đậm đặc hơn. Độ phổ cập Vũ trụ phổ biến về khối lượng của hê-li bằng 25% tổng khối lượng của vật chất trong Vũ trụ đã được chứng tỏ là phù hợp với kết quả tiên đoán theo mô hình Vụ nổ lớn. Chứng cớ dễ thấy nhất về giả thiết Vụ nổ lớn là việc các nhà thiên văn vô tuyến khám phá ra bức xạ phông Vũ trụ đẳng hướng vào năm 1965. Bức xạ vô tuyến nhiệt yếu nhưng có mặt ở khắp mọi nơi này có phổ bức xạ của vật đen với nhiệt độ chỉ 2,7 K. Toàn bộ Vũ trụ chìm đắm trong bức xạ này. Bức xạ này là tàn dư của vụ nổ nguyên thủy cực lớn, gọi là Vụ nổ lớn. Vũ trụ trước đây vô cùng nóng nay trở nên rất lạnh do sự giãn nở. Lí thuyết Vụ nổ lớn, như nó đang tồn tại, không thể giải thích được tất cả các sự kiện quan sát được trong Vũ trụ, song nó được hoàn thiện và được điều chỉnh dần dần cho phù hợp với các quan sát.

Một sự kiện quan sát khác có thể được giải thích như là hệ quả của một Vũ trụ đang giãn nở là bầu trời vào ban đêm, ở xa Dải Ngân Hà, là tối. Olberg, một nhà thiên văn ở đầu thế kỉ 19, trên cơ sở một Vũ trụ tĩnh và vô hạn trong đó các sao phân bố đều, đã nhận xét rằng bất kì đường ngắm nào từ Trái Đất cũng sẽ gặp một ngôi sao. Do đó bầu trời ban đêm phải sáng như bề mặt của một ngôi sao điển hình như Mặt Trời. Lập luận này dẫn đến một kết luận rõ ràng là mâu thuẫn với điều mà chúng ta quan sát được. Bầu trời ban đêm quả thật là rất tối! Nghịch lí này, được gọi là nghịch lí Olberg có thể được giải thích một phần bằng sự giãn nở của Vũ trụ. Các sao trong các thiên hà ở xa đang chạy rất nhanh ra xa chúng ta do sự giãn nở của Vũ trụ. Điều này dẫn đến sự giảm năng lượng của các photon nhận được từ bề mặt các sao hay thiên hà ở xa. Hiệu ứng này góp phần làm mờ ánh sáng phông. Ngoài ra, thời gian sống của các sao không phải là vô hạn. Theo một sự ước tính, bầu trời ban đêm sẽ sáng đều nếu các sao có thể sống khoảng 10^{24} năm! Một giá trị như vậy là cao một cách quá đáng vì nó vượt xa tuổi hiện nay của Vũ trụ – chỉ vào khoảng $1,5 \times 10^{10}$ năm.

Chúng ta hãy giới hạn ở việc mô tả Vũ trụ trong khuôn khổ mô hình Vụ nổ lớn.

VŨ TRỤ NGUYÊN THỦY

Việc tránh điểm kì dị ban đầu

Theo mô hình Vụ nổ lớn, Vũ trụ được tạo ra ở một điểm kì dị về không gian và thời gian. Sự tồn tại kì dị này trong không - thời gian có thể được xem là một trở ngại của lí thuyết Vụ nổ lớn. Giống như kì dị trong toán học, các tính chất vật lí của Vũ trụ không xác định ở kì dị này. Chúng ta không biết điều gì xảy ra một cách chính xác ở Vụ nổ lớn và càng không biết về trước thời điểm đó. Vật lí lí thuyết hiện đại cho phép các nhà thiên văn đi ngược trở lại theo thời gian và trong không gian không phải tới Vụ nổ lớn một cách chính xác mà chỉ cho phép họ đi ngược tới 10^{-43} giây sau Vụ nổ lớn, song như thế cũng đáng kể lắm rồi. Trước thời điểm đó, được gọi là thời điểm Planck, Vũ trụ ở trong một trạng thái hỗn mang trong đó nó có những thăng giáng lượng tử. Lí thuyết cơ học lượng tử được sử dụng để mô tả cấu trúc vi mô sâu xa của vật chất. Vì chưa có một lí thuyết đầy đủ về hấp dẫn lượng tử, bất kì nỗ lực nào nhằm mô tả các biến cố xảy ra trong kỉ nguyên Planck (sớm hơn 10^{-43} giây) đều là suy đoán. Ở thời điểm Planck, Vũ trụ đậm đặc, vào khoảng 10^{96} kilogam trên mỗi mét khối, đến mức toàn bộ vật chất của nó được chứa trong một thể tích có đường kính chỉ vài micromet. Nhiệt độ của Vũ trụ khi đó cũng cực cao, đạt tới giá trị 10^{31} K. Thời điểm Planck, khi mà giá trị của các điều kiện vật lí không phân biệt được với vô hạn, có thể được xem như là gốc của thời gian trong các mô hình Vũ trụ học.

the Universe has evolved and has become less dense. A universal cosmic abundance in mass of helium of 25 percent of the total mass of matter in the Universe has been found to be consistent with that predicted by the model of Big Bang. The most conspicuous evidence for the Big Bang hypothesis is the discovery by radio astronomers, in 1965, of the isotropic cosmic background radiation. This weak but ubiquitous thermal radio emission has a black-body spectrum with a temperature of only 2.7 K. The entire Universe is bathed in this radiation. It is the remnant of the tremendous primordial explosion, the Big Bang. The Universe which was previously infinitely hot has become now very cool because of the expansion. The Big Bang theory, as it stands, cannot explain all the facts observed in the Universe, but it is perfectible and gradually adjusted to fit the observations.

Another observational fact which can be explained as a consequence of an expanding Universe is that the night sky away from the Milky Way is dark. Olberg, an astronomer in the early 19th century, on the basis of a static and infinite Universe in which stars are distributed uniformly, noted that any line of sight from the Earth should intersect a star. The night sky would therefore be as bright as the surface of a typical star like the Sun. This reasoning leads to a conclusion which obviously contradicts what we observe. The night sky is indeed very dark ! This paradox called Olberg's paradox can be partly explained in terms of the expansion of the Universe. Stars in remote galaxies are rushing away very fast from us because of the expansion. This results in a decrease of the energy of the photons received from the surface of a remote star or galaxy. This effect contributes to dim the background light. Furthermore, the lifetimes of stars are not infinite. According to an estimation, the night sky would appear uniformly bright if stars could survive some 10^{24} years ! Such a value is exaggeratedly high for it exceeds by far the current age of the Universe, which is only about 1.5×10^{10} years old.

We shall confine ourselves to describing the Universe in the context of the Big Bang model.

THE PRIMORDIAL UNIVERSE.

Avoiding the initial singularity

According to the Big Bang model, the Universe was created at a singularity in space and time. The existence of this singularity in the space-time may be considered as a drawback of the Big Bang theory. As for a singularity in mathematics, the physical properties of the Universe tend to infinity at this singularity. We do not know what happened exactly at the Big Bang and a fortiori before this time. Modern theoretical physics allows astronomers to go back in time and space not exactly to the Big Bang, but only 10^{-43} second right after the Big Bang, which is already remarkable. Before this time, called the Planck time, the Universe was in a state of chaos in which it was subject to quantum fluctuations. The theory of quantum mechanics is used to describe the intimate microscopic structure of matter. Since a complete theory of quantum gravitation is not available, any attempt to describe events occurring during the Planck era (earlier than 10^{-43} second) would remain speculative. At the Planck time, the Universe was so dense, about 10^{96} kilograms per cubic meter, that all its matter was contained in a volume of diameter equal to only a few microns. The temperature of the Universe was then also extreme, reaching a value of 10^{31} K. The Planck time, when the values of the physical conditions are indistinguishable from infinite, can be considered as the origin of time in cosmological models.

Vũ trụ ban đầu như một máy gia tốc hạt khổng lồ

Vũ trụ nguyên thủy chìm đắm trong một biển bức xạ mạnh và các hạt sơ cấp mang năng lượng cao. Bức xạ dưới dạng tia gamma (các photon có năng lượng cao hơn tia X) được tạo ra khi một hạt (ví dụ electron) hủy hoàn toàn với phản hạt của nó (ví dụ positron). Một phản hạt giống hệt hạt của nó nhưng có điện tích ngược dấu. Ngược lại, khi nhiệt độ của bức xạ cao hơn nhiệt độ tương ứng với năng lượng của một cặp hạt - phản hạt thì cặp hạt - phản hạt có thể được tạo ra từ bức xạ. Để một cặp electron - positron được tạo ra, năng lượng tối thiểu cần có là một triệu electron-von (1 MeV), tương đương nhiệt độ 10^{10} K. Trong khi Vũ trụ còn nóng hơn 10^{10} K, nó là một hỗn hợp gồm các photon, các hạt và phản hạt. Nhưng vài giây sau Vụ nổ lớn, nhiệt độ của bức xạ không còn đủ cao để sinh ra các hạt và phản hạt. Các hạt và phản hạt tiếp tục sự huỷ. Vũ trụ khi đó gồm chủ yếu là các photon. Tuy nhiên, vì số lượng các hạt hơi lớn hơn số lượng các phản hạt cho nên các hạt sống sót sau quá trình hủy vẫn còn lại để tạo ra Vũ trụ mà ngày nay chúng ta quan sát. Vấn đề tại sao lại có một bất đối xứng nhẹ trong Vũ trụ ban đầu mà kết quả là một sự dôi thừa vật chất so với phản vật chất vẫn còn là một vấn đề chưa được giải quyết. Không một máy gia tốc khổng lồ nào có thể tạo ra các điều kiện vật lí cực điểm như các điều kiện vật lí tồn tại trong Vũ trụ ban đầu. Về phương diện này, Vũ trụ ban đầu là một phòng thí nghiệm được ưa thích đối với các nhà vật lí làm việc trong lĩnh vực hạt sơ cấp.

Một phút sau Vụ nổ lớn, khi nhiệt độ giảm xuống tới 10^9 K, các phản ứng tổng hợp nhiệt hạch sẽ bắt đầu. Trong kỉ nguyên tổng hợp hạt nhân này, các neutron bắt giữ các proton để tạo ra các hạt nhân của hiđrô nặng - đơ tê ri, các hạt nhân này đến lượt nó lại bắt giữ các neutron khác để tạo ra các hạt nhân của tritium. Các sản phẩm cuối cùng của quá trình này là các hạt nhân hê li, mỗi hạt nhân có hai neutron và hai proton.

Bức xạ có một vai trò quan trọng trong động lực học của Vũ trụ nguyên thủy. Đó là vì mật độ năng lượng của bức xạ lớn hơn mật độ năng lượng của vật chất. Ngoài ra, nhiệt độ cao đến mức làm cho vật chất bị ion hóa. Trong chất khí ion hóa này - gọi là plasma - các photon không thể lan truyền một cách tự do mà không tương tác với các electron. Môi trường ion hóa là không trong suốt. Khi Vũ trụ giãn nở, nó trở nên nguội hơn. Ở tuổi vào khoảng 300000 năm, nhiệt độ giảm xuống tới khoảng 4000 K. Ở nhiệt độ đó, các electron bắt đầu tái hợp với các ion để tạo ra các nguyên tử trung hòa, đặc biệt là các nguyên tử hiđrô. Kỉ nguyên tái hợp này kết thúc khi Vũ trụ đã được khoảng một triệu năm tuổi. Vào lúc đó, có quá ít electron tự do còn lại để ngăn cản sự lan truyền của bức xạ đến nỗi Vũ trụ trở nên trong suốt và ánh sáng có thể lan truyền tự do trong khắp Vũ trụ.

Nguồn gốc của bức xạ phông Vũ trụ

Năm 1965, các nhà thiên văn vô tuyến, khi quan sát ở bước sóng 7 cm, đã phát hiện ra một bức xạ phông đẳng hướng tới từ mọi phương trên bầu trời. Các quan sát trên một dải rộng của phổ vô tuyến, từ các bước sóng mét đến các bước sóng dưới milimet, đã được tiến hành sau đó để nghiên cứu bản chất của bức xạ Vũ trụ này. Các kết quả cho thấy các điểm số liệu rất khớp với đường cong Planck ở nhiệt độ 2,726 ± 0,010 K. Các số liệu này bao gồm các số liệu thu được với vệ tinh *COBE (Cosmic Background Explorer = Người thăm dò phông Vũ trụ)* của NASA được phóng vào năm 1989 và được thiết kế riêng cho công trình nghiên cứu này ở các bước sóng mi li mét và dưới mi li mét.

The early Universe as a giant accelerator of particles

The primordial Universe was bathed in a sea of intense radiation and energetic elementary particles. Radiation in the form of gamma rays (photons more energetic than X rays) is created when a particle (e.g. an electron) totally annihilates with its antiparticle counterpart (e.g. a positron). An antiparticle is identical to its particle but has an opposite electric charge. Conversely, when the temperature of the radiation is higher than that corresponding to the energy of the particle-antiparticle pair, the latter can be created from the radiation. For an electron-positron pair to be created, the minimum energy required is one million electron-volts (1 Mev), equivalent to a temperature of 10^{10} K. While the Universe was hotter than 10^{10} K, it consisted of a mixture of photons, particles and antiparticles. But a few seconds after the Big Bang, the radiation temperature was not high enough to produce particles and antiparticles, which continued to annihilate. The Universe was then dominated by photons. However, there was a slight excess of particles over antiparticles so that the particles which survived the annihilation process remained to create the Universe that we now observe. The question of why there was a slight asymmetry in the early Universe, resulting in an excess of matter over antimatter, remains an unresolved issue. No giant accelerators can reproduce physical conditions as extreme as those existing in the early Universe. In this respect, the early Universe is a favorite laboratory for physicists working in the field of elementary particles.

One minute after the Big Bang when the temperature decreased to 10^9 K, thermonuclear fusion reactions started. In this era of nucleosynthesis, neutrons captured protons to produce the nuclei of heavy hydrogen, the deuterium, which in turn captured other neutrons to make the nuclei of tritium. The end products of this process are helium nuclei, which contain two neutrons and two protons each.

Radiation plays an important role in the dynamics of the primordial Universe. This is because the energy density of radiation was larger than that of matter. Furthermore, the temperature was so high that matter was ionized. In this ionized gas called plasma, photons could not propagate freely without interacting with electrons. The ionized medium appeared opaque. As the Universe was expanding, it became cooler. At the age of about 300 000 years, the temperature decreased to about 4000 K. At that temperature, electrons started recombining with ions to produce neutral atoms, especially hydrogen atoms. This recombination era ended when the Universe was about one million years old. At that time, there were so few free electrons left to hinder the propagation of radiation that the Universe became transparent, and light could travel freely throughout the Universe.

Origin of the cosmic background radiation

In 1965, radio astronomers, observing at the wavelength of 7 cm, discovered an isotropic background radiation, which comes from all directions in the sky. Observations over a wide range of the radio spectrum, from meter to submillimeter wavelengths, were performed later to investigate the nature of this cosmic radiation. It turned out that the data points fit closely to a Planck curve at a temperature of 2.726 ± 0.010 K. These data include those obtained with the NASA satellite COBE (Cosmic Background Explorer), launched in 1989 and specially designed for this study at millimeter and submillimeter wavelengths.

Bức xạ phông Vũ trụ đến từ Vũ trụ, khi nó đã trở nên trong suốt ở cuối kỉ nguyên tái hợp. Khi Vũ trụ giãn nở, bức xạ giữ nguyên dạng của phổ Planck, ngay cả khi nhiệt độ đã sụt từ khoảng 3000K xuống 2,7K như đã quan sát được hiện nay, sau 15 tỉ năm hoặc muộn hơn. Theo định luật dịch chuyển Wien, λT = hằng số, bước sóng của bức xạ với cường độ cực đại đã tăng khoảng 1000 lần. Phổ bức xạ của phông Vũ trụ ở tuổi một triệu năm đã dịch chuyển về phía đỏ khoảng 1000 lần. Người ta cho rằng kỉ nguyên tái hợp xảy ra ở độ dịch chuyển về phía đỏ $z \sim 1000$. Để so sánh, các quasar xa nhất mà các nhà thiên văn đã phát hiện được có độ dịch chuyển về phía đỏ chỉ vào khoảng 5. Do đó, các quan sát về bức xạ vật đen vũ trụ 2,7K cung cấp một cơ hội có một không hai để nghiên cứu Vũ trụ ban đầu khi nó mới chỉ khoảng một triệu năm. Các quan sát bức xạ vật đen vũ trụ cho phép chúng ta đi ngược theo thời gian xa hơn rất nhiều so với các quan sát về bất kì thiên thể nào khác hiện có trong Vũ trụ. Bức xạ phông phải chứa mầm mống của các thiên hà mà chúng ta quan sát được hiện nay trong Vũ trụ. Các dụng cụ đặt trên vệ tinh COBE quả thực đã phát hiện được trong phông Vũ trụ những thăng giáng rất yếu về cường độ tương ứng với trạng thái của các thiên hà và các đám thiên hà đang phôi thai.

Một Vũ trụ nguyên thủy hơi không đồng nhất

Vấn đề các thiên hà được hình thành như thế nào là một vấn đề quan trọng song đang còn gây tranh cãi (xem thêm chương X). Người ta tin rằng các thiên hà đã xuất hiện từ các thăng giáng mật độ ở quy mô lớn có trong Vũ trụ nguyên thủy. Nếu Vũ trụ quả thật là không đồng nhất thì dấu vết của những sự không đồng nhất này phải thể hiện như là những thăng giáng nhiệt độ trong bức xạ phông Vũ trụ. Mặc dầu có một số nỗ lực quan sát, nhưng trong thực tế bức xạ phông Vũ trụ thể hiện dường như đồng nhất. Chúng ta đã phải đợi đến năm 1992 khi các nhà thiên văn quan sát với vệ tinh COBE phát hiện ra những thăng giáng nhiệt độ rất yếu trong bức xạ phông vi ba. Các thăng giáng này chỉ vào cỡ 30 μK (3.10^{-5} K). Có một thứ bậc các thăng giáng về nhiệt độ với các quy mô khác nhau và các thăng giáng về mật độ tương ứng. Các nghiên cứu lí thuyết cho rằng các thăng giáng này chứa từ 10^5 đến 10^{12} khối lượng Mặt Trời, tương ứng với khối lượng của các đám sao và thiên hà. Các thăng giáng này là mầm mống của các thiên hà và các cấu trúc quy mô lớn khác mà chúng ta quan sát hiện nay.

HẤP DẪN TƯƠNG ĐỐI TÍNH

Cơ sở vật lí đơn giản của hấp dẫn do Newton phát triển đủ để mô tả phần lớn các hiện tượng trong Vũ trụ. Tuy nhiên, nó không giải thích được các hiện tượng quy mô lớn như sự lệch của tia sáng ở lân cận các thiên thể có khối lượng lớn như các sao và thiên hà. Đối với các hiện tượng như vậy, các nhà Vũ trụ học sử dụng thuyết tương đối tổng quát do Einstein phát triển lần đầu tiên.

Khái niệm không - thời gian

Theo thuyết tương đối hẹp, tốc độ của ánh sáng là một hằng số không phụ thuộc thời gian và không gian. Chuyển động của ánh sáng với tốc độ c = 299792,458 km/s cho phép chúng ta nhận biết môi trường gần chúng ta hầu như tức thời. Tuy nhiên, trên quy mô Vũ trụ, tốc độ đó - giới hạn cuối cùng của bất kì vật thể chuyển động nào - trở nên quá bé. Phải mất hơn một giây để ánh sáng từ Mặt Trăng đi tới Trái Đất. Bức xạ từ các thiên hà và quasar ở xa lan truyền qua khoảng không gian giữa các thiên hà trong hàng tỉ năm trước khi đi tới các kính thiên văn của chúng ta.

The cosmic background radiation comes from the Universe, when it became transparent at the end of the recombination era. As the Universe expands, the radiation maintains the shape of a Planck spectrum, even while the temperature has fallen from about 3000 K to 2.7 K, observed now, 15 billion years or so later. According to the Wien's displacement law, λT = constant, the wavelength of the radiation of maximum intensity should have since increased by a factor of ~ 1000. The radiation spectrum of the cosmic background at the age of one million years has been redshifted by a factor of ~1000. It is said that the recombination era occurred at a redshift of z ~ 1000. By comparison, the most remote quasars that astronomers detected have redshifts only about 5. Therefore, the observations of the 2.7 K cosmic black-body radiation offer a unique opportunity to investigate the early Universe, when it was only about one million years old. The observations of the cosmic black-body radiation allow us to go back in time much farther than the observations of any other astronomical objects present in the Universe. The background radiation should contain the seeds of the galaxies which we observe now in the Universe. The instruments on board the satellite COBE have indeed detected in the cosmic background very weak intensity fluctuations, which correspond to the signature of incipient galaxies and clusters of galaxies.

A slightly inhomogeneous primordial Universe

The problem of how galaxies are formed is important but still remains a controversial issue (see also Chapter X). Galaxies are believed to arise from the large scale density fluctuations existing in the primordial Universe. If the Universe was indeed inhomogeneous, the trace of these inhomogeneities should appear as the temperature fluctuations in the cosmic background radiation. Despite several observational attempts, the cosmic background appeared to be practically uniform. We had to wait until 1992 when astronomers observing with the satellite COBE detected very weak temperature fluctuations in the microwave background radiation. These fluctuations are only of the order of 30 μK (3 10^{-5} K). There is a hierarchy of temperature fluctuations with different scales, and corresponding density fluctuations. Theoretical studies suggest that these fluctuations contain 10^5 to 10^{12} solar masses, corresponding to the masses of clusters of stars and galaxies. These are the seeds of the galaxies and other large scale structures that we now observe.

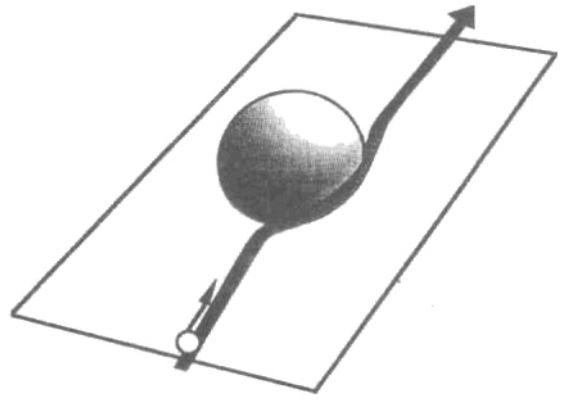
RELATIVISTIC GRAVITATION.

The simple physics of gravity developed by Newton suffices to describe most of the phenomena in the Universe. It fails however for large scale phenomena such as the deflection of light rays in the vicinity of massive astronomical objects like stars and galaxies. For this purpose, cosmologists use the general theory of relativity first developed by Einstein.

Notion of space-time

According to the special theory of relativity, the velocity of light is a constant independent of time and space. Light moving with a velocity c=299792.458 km s^{-1} allows us to perceive our close environment almost instantaneously. On a cosmic scale, however, this velocity, which is the ultimate limit for any moving object, becomes pathetically slow. It takes more than a second for the light from the Moon to reach the Earth. Radiation from remote galaxies and quasars propagates through the intergalactic space for billions of years before falling on our telescopes.

Không thể quan sát được Vũ trụ tức thời. Chúng ta luôn luôn nhìn ngược theo thời gian và những gì mà các nhà thiên văn nhìn thấy hiện nay đều tương ứng với các biến cố đã xảy ra trong Vũ trụ ở một thời điểm nào đó trong quá khứ. Họ quan sát một vị trí trong không gian tương ứng với một thời điểm nhất định. Toàn bộ Vũ trụ là một không - thời gian.



Hình XI.1:

Biểu diễn hai chiều của không gian. Không gian bị cong do có mặt một vật thể khối lượng lớn.

Thực thể không - thời gian đã được đưa vào trong thuyết tương đối, ở đó ba chiều của không gian được tổ hợp với thời gian, được xem như chiều thứ tư. Theo thuyết tương đối tổng quát, tác dụng của hấp dẫn là làm cong không - thời gian. Ta hãy xét một không gian chỉ có hai chiều để minh họa tác dụng của hấp dẫn. Sự có mặt của một vật thể có khối lượng lớn làm biến dạng không gian một cách cục bộ giống như một quả cam đặt lên một tấm vải căng nằm ngang tạo ra một chỗ lõm trên bề mặt tấm vải (hình XI.1). Một hòn bi nhỏ lúc đầu ở xa quả cam chuyển động dọc theo một đường thẳng trên bề mặt phẳng của tấm vải. Khi hòn bi đến gần quả cam, nó bị hút về phía quả cam trong khi rơi dần vào chỗ lõm. Nó tự nhiên đi theo vết lõm do quả cam gây ra trên tấm vải mà không có biểu hiện là chịu tác dụng của một lực nào đó.

Tương tác hấp dẫn trong thuyết tương đối

Quan niệm tương đối tính trên đây về tương tác hấp dẫn tương đương với sự mô tả cổ điển về chuyển động cuả một vật thể như Trái Đất quay xung quanh một vật thể khối lượng lớn như Mặt Trời dưới tác dụng của trường hấp dẫn của vật thể có khối lượng lớn này. Nói cách khác, trong thuyết tương đối, độ cong của không - thời gian phản ánh tác dụng của trường hấp dẫn. Đó là lí do vì sao ánh sáng từ một ngôi sao bị uốn cong khi nó đi gần một vật thể khối lượng lớn như Mặt Trời, như đã đề cập trong chương X. Tương tự, bức xạ từ các thiên hà và quasar ở xa cũng bị lệch đi bởi các đám thiên hà ở phía trước, dẫn đến hiệu ứng thấu kính hấp dẫn.

Sự biến dạng của không - thời gian do có một thiên thể khối lượng lớn, cũng dẫn đến một sự dịch chuyển của phổ phát xạ về phía bước sóng dài. Độ dịch chuyển z về phía đỏ do hấp dẫn, được gọi là hiệu ứng Einstein, phụ thuộc vào khối lượng M và bán kính R của vật thể, $z = \Delta\lambda/\lambda = GM/Rc^2$, G là hằng số hấp dẫn. Vật thể có khối lượng càng lớn và có mật độ vật chất càng lớn thì phổ càng dịch chuyển nhiều hơn về phía đỏ. Trong trường hợp Mặt Trời, phổ của nó bị dịch chuyển, với $z = 2x10^{-6}$. Điều này có nghĩa là nếu ta quan sát một vạch hiđrô ở $\lambda = 6563$ ăng-strom ($0{,}6563x10^{-6}$ m) thì vạch bị dịch chuyển khỏi giá trị của nó khi không có lực hấp dẫn với một lượng nhỏ 0,01 A°. Hiệu ứng Einstein mạnh hơn nhiều ở lân cận một sao lùn trắng, là tàn dư của một ngôi sao thuộc loại Mặt Trời. Sao lùn trắng có khối lượng xấp xỉ khối lượng Mặt Trời nhưng bán kính chỉ vào khoảng 7000 km (~ 1/100 bán kính của Mặt Trời). Độ dịch chuyển về phía đỏ 100 lần cao hơn, và bước sóng của vạch hiđrô bây giờ tăng thêm 1A°. Hiện tượng này quả thực đã được các nhà thiên văn quan sát thành công. Đối với một ngôi sao có khối lượng lớn hơn Mặt Trời

The instantaneous Universe cannot be observed. We are always looking back in time and what astronomers see now corresponds to events which already happened in the Universe in the more or less distant past. They observe a position in space corresponding to a given time. The whole Universe is a space-time.

Figure XI.1

A two dimensional representation of space, which is curved in the presence of a massive object.

The entity of space-time is introduced in the theory of relativity, where the three dimensions of space are combined with time which is considered as a fourth dimension. According to the general theory of relativity, the effect of gravity is to curve the space-time. Let us consider only a two-dimension space to illustrate the effect of gravity. The presence of a massive object locally distorts the space like an orange laid on a cloth hung horizontally creates a depression on its surface (Fig.XI.1). A small marble initially far from the orange moves along a straight line on the flat surface of the cloth. When the marble comes near the orange, it gravitates round the orange when falling into the depression. It naturally follows the geometrical hollow imprint due to the orange on the surface of the cloth, without being apparently subject to any force.

Gravitational interaction in relativity

The above relativistic conception of gravitational interaction is equivalent to the classical description of the motion of a body like the Earth orbiting around a massive object like the Sun, under the gravitational field of the latter. In other words, in the theory of relativity, the curvature of the space-time reflects the effect of the gravitational field. This is the reason why light from a star is bent when it comes close to a massive object like the Sun, as mentioned previously in Chapter X. Likewise, radiation from remote galaxies and quasars is also deflected by foreground clusters of galaxies, leading to the gravitational lensing effect.

The distortion of the space-time due to the presence of a massive astronomical object also results in a shift of the emitted spectrum toward long wavelengths. This gravitational redshift z, called Einstein effect, depends on the mass M and the radius R of the object, $z = \Delta\lambda/\lambda = GM/Rc^2$, G is the constant of gravitation. The more massive and the more compact the object is, the more the spectrum shifts toward the red. In the case of the Sun, its spectrum is shifted by $z = 2 \times 10^{-6}$. This means that if we observe a hydrogen line at $\lambda = 6563$ Angstrom (0.6563×10^{-6} m), the line is shifted by a tiny amount of 0.01 Angstrom from its value at zero gravity. The Einstein effect is much stronger in the vicinity of a white dwarf, which is the remnant of a star of solar type. The white dwarf has about the same mass as the Sun but a radius of only about 7000 km (~ 1/100 the radius of the Sun). The redshift is 100 times higher, and the wavelength of the hydrogen line now increases by 1 Angstrom. This phenomenon was indeed observed successfully by astronomers. For a star several times more massive than the Sun,

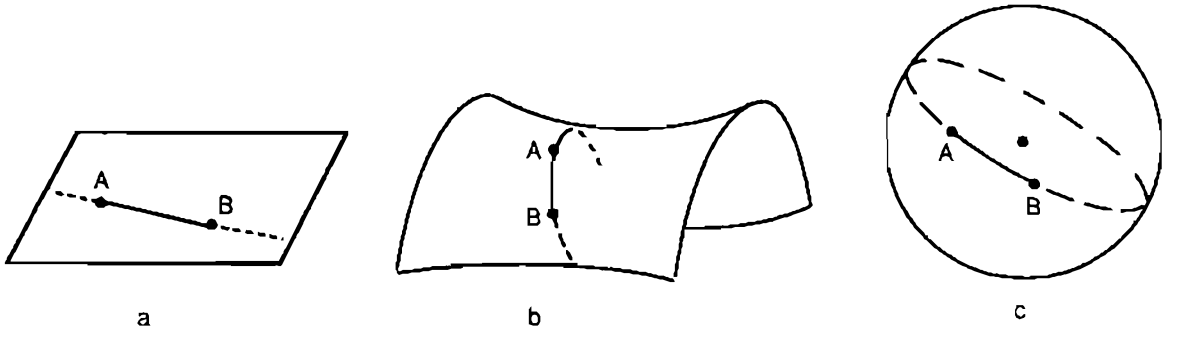
một số lần thì sự suy sụp bởi lực hấp dẫn ở cuối giai đoạn siêu kềnh đỏ có thể tiếp diễn cho tới khi sao có mật độ vật chất lớn đến mức độ dịch chuyển của phổ sao về phía bước sóng dài trở thành vô hạn. Sao sẽ biến mất khỏi tầm nhìn của người quan sát và trở thành một hốc đen (xem chương VIII.B).

SỐ PHẬN CỦA VŨ TRỤ

Số phận của Vũ trụ phụ thuộc vào các giá trị cạnh tranh nhau của tốc độ giãn nở và của sự hút do hấp dẫn. Nếu mật độ trung bình của vật chất thấp, lực hấp dẫn yếu và Vũ trụ sẽ giãn nở mãi mãi; trái lại, nếu mật độ trung bình của vật chất cao thì Vũ trụ sẽ tái suy sụp để cuối cùng chập lại thành một điểm kì dị giống như vào lúc bắt đầu Vụ nổ lớn.

Hình học của Vũ trụ

Chúng ta không biết về hình học của Vũ trụ. Có ba mô hình Vũ trụ. Trong không gian hai chiều, Vũ trụ có thể được biểu diễn bởi một không gian phẳng, một không gian kiểu yên ngựa và một không gian cầu (hình XI.2). Vũ trụ phẳng giống như không gian Euclid thông thường mà trong đó chúng ta sống. Khoảng cách ngắn nhất giữa hai điểm A và B là đoạn thẳng nối hai điểm này. Đường thẳng nối A và B không có giới hạn và dẫn tới vô hạn. Trong Vũ trụ kiểu yên ngựa, đường cong ngắn nhất nối A và B cũng dẫn tới vô hạn. Cả Vũ trụ phẳng và Vũ trụ kiểu yên ngựa đều mở. Trong Vũ trụ cầu, khoảng cách ngắn nhất giữa A và B nằm trên vòng tròn lớn chứa A và B. Nếu chúng ta đi theo vòng tròn này, chúng ta lại gặp A và B. Vũ trụ cầu là đóng.



Hình XI.2:

Ba mô hình Vũ trụ : a) Vũ trụ phẳng; b) Vũ trụ kiểu yên ngựa; c) Vũ trụ cầu.

Hình học của Vũ trụ được xác định bởi vật chất chứa trong nó. Nó tuân theo các phương trình tương đối tổng quát của Einstein, chứa cả các số hạng năng lượng (mật độ, áp suất của vật chất ở mỗi điểm) và các số hạng phụ thuộc vào bán kính cong (hấp dẫn) của Vũ trụ. Các phương trình này cho phép chúng ta nghiên cứu sự tiến hoá của Vũ trụ như là một hàm số của thời gian. Tuy nhiên, chúng chỉ có thể giải được trong khuôn khổ một số mô hình Vũ trụ đã được đơn giản hoá. Các mô hình này trong tính toán có một tham số R(t) là thừa số tỉ lệ, tỉ lệ với bán kính của Vũ trụ như là một hàm số của t. Các mô hình này giả định có một vụ nổ nguyên thuỷ theo đúng lí thuyết Vụ nổ lớn. Một trong những mô hình cơ bản nhất và đơn giản nhất của Vũ trụ học theo thuyết Vụ nổ lớn đã được đưa ra vào những năm 1920 bởi nhà Vũ trụ học người Nga tên là Friedmann. Mô hình này áp dụng định luật bảo toàn năng lượng (động năng và hấp dẫn) cho chuyển động của một vỏ vật chất đang nở cùng với Vũ trụ.

the gravitational collapse at the end of the redsupergiant stage may proceed until the star is so compact that the shift of the stellar spectrum toward long wavelengths turns out to be infinite. The star disappears out of the sight of the observer and becomes a black hole (see Chapter VIIIB) .

THE FATE OF THE UNIVERSE.

The fate of the Universe depends on the competitive values of the expansion rate and of the gravitational pull. If the averaged density of matter is low, gravity is weak and the Universe will expand forever, otherwise it will recollapse to be eventually crushed into a singularity like at the beginning of the Big Bang.

Geometry of the Universe

The geometry of the Universe is not known. There are three models of the Universe. In a two dimensional space, the Universe can be represented by a flat space, a saddle-like space and a spherical space (Fig.XI.2). The flat Universe is like ordinary Euclidian space in which we live. The shortest distance between two points A and B is the straight line passing through these points. The line joining A and B has no limit and leads to infinity. In the saddle-like Universe, the shortest curve joining A and B also leads to infinity. Both the flat Universe and the saddle-like Universe are open. In the spherical Universe, the shortest distance between A and B is on the great circle containing A and B. If we follow this circle we meet A and B again. The spherical Universe is closed.

Figure XI.2

The three models of the Universe: a) a flat Universe; b) a saddle-like Universe ; c) a spherical Universe

The geometry of the Universe is determined by its content of matter. It is governed by Einstein's equations of general relativity, which contain both the energy terms (density, pressure of matter at each point) and terms involving the radius of curvature (gravity) of the Universe. These equations allow us to investigate the evolution of the Universe as a function of time. However, they can only be solved in the framework of some simplified cosmological models. These models consist in calculating a parameter R(t), which is a scale factor proportional to the radius of the Universe, as a function of time t. They assume a primordial explosion in accordance with the Big Bang theory. One of the most fundamental and simplified models of Big Bang cosmology was given in the 1920s by the Russian cosmologist Friedmann. It applies the law of conservation of energy (kinetic and gravitational) to the motion of a shell of matter expanding with the Universe.

Hình XI.3 : (Xem cuối chương)

Sự tiến hoá của Vũ trụ theo một mô hình Vũ trụ học. Vũ trụ mở giãn nở mãi mãi, trong khi đó Vũ trụ đóng có thể co lại (Vũ trụ dao động). Vũ trụ phẳng là một Vũ trụ trung gian và không bao giờ suy sụp.

Trên giản đồ của Friedmann, biểu diễn R(t) như là một hàm số của thời gian, chúng ta có thể nghiên cứu sự tiến hoá của Vũ trụ theo hình học của nó (hình XI.3). Trong một trường hợp, R(t) tăng vô hạn theo thời gian, Vũ trụ giãn nở mãi mãi và mở. Trong một trường hợp khác, R(t) lúc đầu tăng theo thời gian nhưng sau đó giảm. Vũ trụ đóng kín. Vũ trụ này có thể bắt đầu một chu trình tái giãn nở và co lại khác và do đó nó dao động. Biên giới giữa Vũ trụ đóng và Vũ trụ mở có tốc độ giản nở dần tới 0 song Vũ trụ này không bao giờ suy sụp. Nó tương ứng với Vũ trụ phẳng.

Vũ trụ mở hay Vũ trụ đóng ?

Vũ trụ sẽ diễn biến như thế nào trong tương lai theo các kịch bản trên đây? Nếu chúng ta sống trong một Vũ trụ mở và do đó giản nở mãi mãi thì các thiên hà sẽ dần dần tan rã, các ngôi sao cuối cùng sẽ tắt và toàn bộ Vũ trụ sẽ là một không gian cực kì lạnh, tối đen và trống rỗng toả ra vô hạn. Trái lại, nếu Vũ trụ đóng, sẽ có đủ vật chất để sản sinh ra một lực hấp dẫn có thể chống lại sự giãn nở và cuối cùng đảo ngược chuyển động thành một sự suy sụp. Vũ trụ sẽ đậm đặc hơn và ấm áp hơn tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành những ngôi sao và thiên hà mới. Trong giai đoạn suy sụp, các thiên hà và các sao sẽ ngày càng gần lại nhau hơn và thường xuyên va chạm với nhau. Cuối cùng, Vũ trụ sẽ không là cái gì khác ngoài một khoảng không gian vô cùng nóng và nhỏ bé của vật chất bị nén rất mạnh. Pha cuối cùng này của Vũ trụ đóng thường được gọi là Vụ áp lớn. Nó tương tự như kì dị trước đây – Vụ nổ lớn. Ở giai đoạn này, Vũ trụ có thể bật trở lại và tiến triển từ kì dị thành một dãy chu trình. Một Vũ trụ dao động như vậy có thể tồn tại, ít nhất là trên lí thuyết, như đã được chỉ ra trên giản đồ của Friedmann. Trong bất kể trường hợp nào, cả hai kịch bản về số phận của Vũ trụ, mở hay đóng, đều không có lợi cho nhân loại. Song chúng sẽ chưa thể xảy ra trong hàng chục tỉ năm tới!

Tuổi của Vũ trụ

Lí thuyết Vụ nổ lớn không thể giải thích được điều gì đã xảy ra trước khi xảy ra Vụ nổ lớn và ngay lúc xảy ra Vụ nổ lớn, song nó có thể trả lời câu hỏi Vụ nổ lớn đã xuất hiện và tạo ra Vũ trụ cách đây bao lâu. Việc xác định tuổi của Vũ trụ phụ thuộc vào các mô hình của Vũ trụ.

Nếu chúng ta giả thiết có một tốc độ giãn nở không đổi thì tỉ số quan sát được D/v giữa khoảng cách và tốc độ dịch chuyển ra xa của các thiên hà biểu thị thời gian đã trôi qua kể từ khi bắt đầu sự giãn nở của Vũ trụ. Chúng ta có thể định nghĩa 1/H = D/v. Tham số 1/H là một gần đúng tốt về tuổi của một Vũ trụ mở, tiếp tục giãn nở mãi mãi. Tuổi của Vũ trụ phẳng bằng (2/3) x1/H. Như đã thảo luận trong mục nói về định luật Hubble, giá trị của hằng số Hubble, còn là vấn đề đang gây tranh cãi, nằm trong khoảng từ 50 đến 80 km/s/Mpc. Giá trị trung bình H = 65 km/s/Mpc dẫn đến tuổi của Vũ trụ trong khoảng từ 10 đến 15 tỉ năm, tuỳ thuộc vào mô hình.

Figure XI.3

The evolution of the Universe according to a cosmological model. An open Universe expands for ever, while a closed Universe can recontract (oscillating Universe). A flat Universe is in between and never collapses.

In Friedmann's diagram, plotting R(t) as a function of time, we can investigate the evolution of the Universe according to its geometry (Fig.XI.3). In one case, R(t) increases indefinitely with time. The Universe expands for ever and is open. In another case, R(t) starts increasing with time but later decreases. The Universe is closed. This Universe could begin another cycle of reexpansion and recontraction and would therefore oscillate. The boundary between the closed Universe and the open Universe has a rate of expansion tending toward zero, but it never collapses. It corresponds to the flat Universe.

An open or closed Universe ?

How will the Universe behave in the future according to the above scenarios ? If we are living in an open Universe and therefore in perpetual expansion, galaxies will gradually disintegrate, stars will eventually vanish and the whole Universe will be an extremely cold, dark and void space extending to infinity. On the contrary, if the Universe is closed, there is enough matter to generate a gravitational force capable of resisting the expansion and eventually reversing the motion into a collapse. The Universe is denser and warmer favoring new stars and galaxies to form. During the collapse phase, galaxies and stars get closer to one another and undergo frequent collisions. Finally, the Universe is nothing but an infinitely hot and tiny space of highly compressed matter. This ultimate phase of a closed Universe is commonly called the Big Squeeze. It is similar to the earlier singularity, the Big Bang. At this stage, the Universe can bounce again and evolve from the singularity in a series of cycles. Such an oscillating Universe can exist, at least theoretically, as shown in Friedmann's diagram. In any case both scenarios for the fate of the Universe, open or closed, are not promising for mankind. But they will not occur until tens of billions of years from now !

The age of the Universe

The Big Bang theory cannot explain what happened before and at the time of the explosion, but it can answer the question how long ago the Big Bang occurred and created the Universe. The determination of the age of the Universe depends on the models of the Universe.

If we assume a constant expansion speed, the observed ratio D/v of the distance to the recession velocity of galaxies, represents the time elapsed since the beginning of the expansion of the Universe. We can define 1/H = D/v. The parameter 1/H is a good approximation of the age of an open Universe which will continue to expand forever. The age of the flat Universe is equal to (2/3)x1/H. As discussed in the section concerning Hubble's law, the value of the Hubble constant H, still subject to discussion, is between 50 and 80 km/s/Mpc. The mean value of H= 65 km/s/Mpc would result in an age of the Universe between 10 and 15 billion years, depending on the models.

Các phép đo độc lập về các đám sao hình cầu, được xem là các hệ sao lâu đời nhất trong Thiên Hà của chúng ta, cho giá trị ~ 13 tỉ năm đối với tuổi của các vật thể này (xem chương VIII.B). Kết quả này cho giá trị của H = 75 km/s/Mpc đối với Vũ trụ mở, nằm trong dải các giá trị có thể có của H. Các nhà thiên văn hi vọng rằng các phép đo chính xác hơn sẽ được thực hiện trong tương lai gần với một thế hệ các dụng cụ thiên văn mới. Các quan sát mới được tiến hành đối với một số sao biến quang Cepheid trong một số thiên hà ở gần nhờ Kính thiên văn Vũ trụ Hubble đã cho giá trị tuổi của Vũ trụ chỉ 10 tỉ năm. Giá trị này mâu thuẫn với ước tính về tuổi của Vũ trụ dựa trên các đám hình cầu. Các quan sát với Kính thiên văn Vũ trụ Hubble về các thiên hà khác ở xa hơn có thể làm rõ hơn vấn đề này.

Để nắm được lịch sử vấn đề, chúng ta cần lưu ý rằng giá trị của hằng số Hubble do chính Hubble xác định là 540 km/s/Mpc, với giá trị này thì tuổi của Vũ trụ là 2 tỉ năm! Cần lưu ý rằng vào lúc đó, khoảng cách giữa các thiên hà không được xác định tốt và thường bị đánh giá bé hơn giá trị thực rất nhiều.

VẤN ĐỀ KHỐI LƯỢNG ẨN TRONG VŨ TRỤ

Mật độ của Vũ trụ

Lực hấp dẫn là lực phổ biến điều khiển sự tiến hoá của Vũ trụ. Lực này tăng lên theo mật độ của vật chất trong Vũ trụ. Nếu, theo mô hình của Friedmann, mật độ vượt quá mật độ tới hạn $\rho_c \sim 10^{-26}$ kg m^{-3} (đối với giá trị của H = 65 km/s/Mpc), thì lực hút hấp dẫn sẽ áp đảo và Vũ trụ là đóng. Nếu mật độ của vật chất bằng hay thấp hơn ρ_c thì Vũ trụ là mở. Mật độ tới hạn tương ứng với chỉ 6 nguyên tử hiđrô trong một mét khối!

Các nhà thiên văn xác định mật độ của vật chất trong Vũ trụ như thế nào? Các sao, các hành tinh, khí và bụi giữa các sao tạo thành vật chất trong các thiên hà và có thể được phát hiện bởi các kính thiên văn quang học và kính thiên văn vô tuyến. Các nhà thiên văn trước hết ước tính số lượng thiên hà (trong đơn vị thể tích trong không gian) mà họ biết khoảng cách bằng cách sử dụng định luật Hubble. Mặt khác, khối lượng của các thiên hà có thể được suy ra từ độ sáng của chúng. Mật độ của vật chất chứa trong các thiên hà, đặc trưng cho vật chất có thể phát hiện được trong Vũ trụ, vào cỡ 10^{-28} kgm^{-3}, thấp hơn hàng trăm lần so với giá trị ước tính được $\rho_c \sim 10^{-26}$ kgm^{-3} của mật độ tới hạn. Chúng ta có thể kết luận rằng Vũ trụ là mở, toả ra vô hạn và sẽ giãn nở mãi mãi.

Vật chất không nhìn thấy

Các nhà thiên văn nghi ngờ rằng Vũ trụ có thể chứa những vật thể không thể phát hiện được bởi các kính thiên văn quang học và kính thiên văn vô tuyến trong toàn bộ dải phổ điện từ, từ sóng vô tuyến đến tia γ. Chứng cớ gián tiếp về sự có mặt của vật chất đen không nhìn thấy đó được đưa ra từ sự nghiên cứu về động lực học của các thiên hà và các đám thiên hà.

Các thiên hà riêng lẻ chuyển động một cách ngẫu nhiên với tốc độ cao trong các đám thiên hà, song cuối cùng chúng vẫn không phân tán. Các đám này có khối lượng lớn đủ để giữ các thiên hà liên kết với nhau bằng lực hấp dẫn. Hiển nhiên, khối lượng tổng cộng của tất cả các thiên hà trong mỗi đám tính ra từ các đường cong quay của chúng là quá ít để có thể thực hiện được điều đó. Phải có một số vật chất giữa các thiên hà không nhìn thấy được gây ra lực hấp dẫn đủ để giữ các thiên hà với nhau.

Independent measurements of globular star clusters, which are considered as the oldest stellar systems in our Galaxy, suggest a value of ~13 billion years for the age of these objects (see Chapter VIIIb). This result, which would give a value of H = 75 km/s/Mpc for an open Universe, is in the range of the uncertainties of the values of H. Astronomers expect that more accurate measurements will be performed in the near future with a new generation of astronomical instruments. Recent observations of a number of Cepheid variables in a few nearby galaxies with the Hubble Space Telescope yield a value of only 10 billion years for the age of the Universe. This value apparently contradicts the estimation of the age based on globular clusters. Observations with the Hubble Space Telescope of other farther galaxies may shed some light on this issue.

We may just mention for historical purpose that the value determined for the Hubble constant by Hubble himself was 540 km/s/Mpc, which would result in an age of the Universe of 2 billion years ! It should be noted that at that time the distances of galaxies were not well determined and were often dramatically underestimated.

THE PROBLEM OF THE HIDDEN MASS IN THE UNIVERSE.

Density of the Universe

Gravitation is the universal force which controls the evolution of the Universe. This force increases with the density of matter in the Universe. If, according to Friedmann's model, the density exceeds a critical density $\rho_c \sim 10^{-26}$ kg m^{-3} (for a value of H = 65 km/s/Mpc), gravitational pull is overwhelming and the Universe is closed. If the density of matter is equal to or lower than ρ_c , the Universe is open . The critical density is equivalent to only 6 hydrogen atoms per cubic meter !

How do astronomers determine the density of matter in the Universe ? Stars, planets and interstellar gas and dust which constitute the matter in galaxies can be detected in the telescopes and radio telescopes. Astronomers first estimate the number of galaxies (per unit volume in space) for which they know the distance using Hubble's law. On the other hand, the mass of galaxies can be derived from their luminosity. The density of matter contained in galaxies, representing the matter detectable in the Universe, turns out to be of the order of a few 10^{-28} kg m^{-3} , which is almost two orders of magnitude lower than the value of $\rho_c \sim 10^{-26}$ kg m^{-3} found for the critical density. We might conclude that the Universe is open, infinitely extended and will expand for ever.

Invisible matter

Astronomers suspect that the Universe may contain objects which are undetectable in telescopes and radio telescopes, in the entire range of the electromagnetic spectrum, from radio waves to γ-rays. Circumstantial evidence for the presence of such invisible dark matter is given by the investigation of the dynamics of galaxies and clusters of galaxies.

Individual galaxies move randomly at high velocities in clusters of galaxies, yet they do not eventually disperse. These clusters should be massive enough to keep the galaxies gravitationally bound. Apparently the total mass of all galaxies in each cluster derived from their rotation curves is largely insufficient for this purpose. There should be some invisible intergalactic matter which causes enough gravity to hold galaxies together.

Các quan sát về các thiên hà riêng rẽ cũng chỉ ra sự có mặt của vật chất không nhìn thấy được trong các quầng của các thiên hà. Ở xa phía ngoài mặt phẳng thiên hà, nơi dường như không có vật chất, đường cong quay phải giảm theo nghịch đảo của căn bậc hai của khoảng cách từ tâm của thiên hà theo định luật Kepler. Song đường cong quay của một số thiên hà vẫn phẳng ở bên ngoài giới hạn nhìn thấy rất nhiều. Phần này của đường cong quay đã được các nhà thiên văn vô tuyến đo bằng cách sử dụng sự phát xạ của vạch vô tuyến của hiđrô nguyên tử trung hoà ở bước sóng 21 cm. Các quan sát gợi lên rằng không phải chỉ có hiđrô trung hoà và, ở mức độ nào đó, các phân tử như CO toả ra ngoài đĩa thiên hà nhìn thấy được, mà một lượng đáng kể vật chất không nhìn thấy cũng tồn tại trong các quầng xung quanh các thiên hà.

Các hạt ngoại lai mới?

Khối lượng tổng cộng trong mọi thiên hà và đám thiên hà có thể tương đương với mười lần khối lượng nhìn thấy. Nói cách khác, 90% khối lượng trong Vũ trụ ở dưới dạng vật chất đen. Bản chất của vật chất đen là gì? Đó là một vấn đề còn gây tranh cãi song khá hấp dẫn, vì vật chất đen là một đối tượng gây ra sự tò mò không chỉ đối với các nhà Vũ trụ học mà còn cả các nhà vật lí làm việc trong lĩnh vực vật lí hạt.

Chúng ta biết rằng các ngôi sao có khối lượng lớn suy sụp và có thể trở thành những hốc đen không nhìn thấy. Nhân của các thiên hà là nơi ẩn náu của các hốc đen khổng lồ. Các vật thể này được xem là các động cơ trung tâm sản sinh ra năng lượng khổng lồ của các quasar. Một lớp các vật thể lạnh được gọi là sao lùn nâu, nằm trong vùng quầng của các thiên hà giống như Thiên hà của chúng ta, chỉ phát ra bức xạ rất yếu ớt trong miền hồng ngoại. Chúng cũng là ứng cử viên đầy triển vọng của vật chất đen. Các sao lùn nâu, có khối lượng bé hơn một phần mười khối lượng của Mặt Trời, không đủ lớn về khối lượng để mồi các phản ứng tổng hợp hạt nhân để có thể phát ra bức xạ như những ngôi sao. Chúng là những ngôi sao không thành và có thể tương tự như các hành tinh khổng lồ như Mộc tinh trong Hệ Mặt trời. Các hốc đen cũng như sao lùn nâu thể hiện sự có mặt của chúng bằng tác dụng của chúng đến môi trường. Đĩa vật chất bồi tụ xung quanh một hốc đen có nhiệt độ hàng triệu độ và do đó phát ra tia X. Một sao lùn nâu trong quầng của Thiên Hà của chúng ta có thể khuếch đại ánh sáng của một ngôi sao ở đằng sau trong thời gian gặp nhau ngắn ngủi, theo hiệu ứng thấu kính hấp dẫn (xem chương X).

Tuy nhiên, tất cả các khối lượng, kể cả khối lượng nhìn thấy và khối lượng ẩn, chỉ chiếm 20% mật độ tới hạn cần thiết để đóng kín Vũ trụ. Do đó, có lẽ Vũ trụ là vô hạn và giãn nở mãi mãi. Tuy nhiên, các nhà Vũ trụ học và các nhà vật lí hạt không thiếu lập luận để chứng tỏ điều ngược lại. Các hạt như neutrino có thể góp phần đóng kín Vũ trụ vì chúng được coi là có khối lượng và chúng lan truyền rất nhanh, gần bằng tốc độ ánh sáng. Các nhà lí thuyết cũng lập luận rằng Vũ trụ có thể bao gồm không chỉ vật chất cấu thành từ các proton, nơtron và các hạt nhân nguyên tử mà chúng ta quan sát. Họ cho rằng Vũ trụ có thể bao gồm về chủ yếu một lớp mới các hạt ngoại lai nhỏ hơn nguyên tử, hiện còn chưa được biết tới, gọi là hạt có khối lượng lớn, tương tác yếu *(Weak Interacting Massive Particles, WIMP)*

Các quan sát vừa mới được tiến hành về độ sáng của các vụ nổ sao siêu mới sáng trong các thiên hà xa bằng kính thiên văn Vũ trụ Hubble và kính thiên văn lớn Keck 10 m trên mặt đất dường như đã gợi ra rằng Vũ trụ cuối cùng sẽ không tái suy sụp mà sẽ giãn nở mãi mãi.

The observations of individual galaxies also indicate the presence of invisible matter in the halos of galaxies. Far outside the galactic plane where there is apparently no matter, the rotation curve should decrease as the inverse square root of the distance to the center of the galaxy, according to Kepler's law. Instead, the rotation curves of several galaxies remain flat well beyond the visible limit. This part of the rotation curve has been measured by radio astronomers using the emission of the radio line of neutral atomic hydrogen at 21-cm wavelength. The observations suggest that not only neutral hydrogen and to some extent molecules like carbon monoxyde (CO) extends beyond the visible galaxy disc, but also a significant amount of invisible matter exists in the halos surrounding galaxies.

Exotic new particles ?

The total mass in every galaxy and cluster of galaxies may be equivalent to ten times the visible mass. In other words, 90 percent of the mass in the Universe would be in the form of dark matter. What is the nature of the dark matter ? It still remains a controversial but rather fascinating issue, since it is an object of curiosity not only to cosmologists but also to physicists working in the field of particle physics.

We know that massive stars collapse and may become invisible black holes. The nuclei of galaxies are the sites of giant black holes. These objects are considered as the central engines producing the tremendous energy of quasars. A class of cold objects called brown dwarfs, populating the halo of galaxies like ours, emits only very faint radiation, in the infrared. They are also potential candidates for dark matter. Brown dwarfs, whose mass is less than one tenth of that of the Sun, are not massive enough to ignite nuclear fusion reactions in order to radiate like stars. They are in a way failed stars and could be similar to giant planets like Jupiter in the solar system. Both black holes and brown dwarfs reveal themselves by their effect on the environment. The accretion disk of matter around a black hole has a temperature of millions of degrees and therefore emits X rays. A brown dwarf in the halo of our Galaxy can amplify the light of a background star during a short encounter, according to the gravitational lensing effect (see Chapter X).

Nevertheless, all the mass, visible mass and hidden mass included, would represent only 20 percent of the critical density necessary to close the Universe. Therefore, it seems that the Universe would be infinite and in perpetual expansion. Cosmologists and particle physicists are, however, not short of arguments in proving the contrary. Particles like the neutrinos could contribute to close the Universe since they have been thought to have a mass and they travel very rapidly at almost the speed of light. Theoreticians also argue that the Universe would not consist only of matter made up of protons, neutrons and atomic nuclei that we observe. They suggest that the Universe may be dominated by a new class of exotic subatomic particles still unknown called WIMPs (Weak Interacting Massive Particles).

Recent observations of the luminosities of bright supernovae in distant galaxies with the Hubble Space Telescope and the large, ground based Keck 10-m Telescope seem to suggest that the Universe does not recollapse eventually, but expands forever.

CÁC PULSAR VÀ THUYẾT TƯƠNG ĐỐI TỔNG QUÁT CỦA EINSTEIN

Các pulsar quay nhanh

Người ta biết rằng các pulsar được tạo thành trong những vụ nổ sao siêu mới có tính chất tai biến (xem chương VIII). Theo kịch bản cổ điển, một vụ nổ xảy ra do suy sụp hấp dẫn và tạo ra một lõi vật chất siêu đậm đặc gồm các neutron (sao neutron), trong khi các mảnh vỡ tung ra khoảng không gian giữa các sao. Sao neutron quay có một trường lưỡng cực từ mạnh ~ 10^4 – 10^8 Tesla có trục nghiêng đối với trục quay. Các hạt tương đối tính mang điện được gia tốc trong một trường như vậy phát ra bức xạ vô tuyến phi nhiệt bất đẳng hướng nằm trong một hình nón có trục trùng với trục từ. Vì ngôi sao tự quay, thường với chu kì ~ 0,2 – 2 giây, nên có sự phát xạ xung dẫn đến hiệu ứng "hải đăng". Đa số pulsar có tuổi vài triệu năm và tương ứng với một lớp các vật thể trẻ trên thang thời gian thiên văn. Trong quá trình tiến hoá của chúng, cả từ trường và tốc độ tự quay giảm đi.

Gần đây, một lớp mới các pulsar có chu kì quay cực ngắn, cỡ vài mi li giây đã được phát hiện. Các pulsar mi li giây nhanh nhất có chu kì 1,558 mi li giây. Sao neutron liên đới của nó, với khối lượng điển hình tương tự khối lượng của Mặt trời của chúng ta song kích thước chỉ ~ 10 km, tự quay với tốc độ cực lớn, 642 vòng quay trong một giây (xem phần VIII. B). Người ta tin rằng các vật thể này già hơn (~ 10^8 năm) các pulsar có tần số tự quay trung bình, song từ trường của chúng yếu hơn (~ 10^5 tesla). Tần số quay lớn có thể được giải thích nếu pulsar thuộc về một hệ đôi. Sao neutron liên đới có thể bắt vật chất từ khí quyển của sao đồng hành. Sự bồi tụ khối lượng làm tăng mô men xung lượng và sao neutron quay chậm có thể được gia tốc để trở thành một pulsar mi li giây.

Các pulsar mì-li giây - những chuẩn thời gian thiên nhiên

Thời gian tới của các xung vô tuyến được ghi bởi các nhà thiên văn vô tuyến phụ thuộc vào một số yếu tố trong quá trình lan truyền của chúng tới Trái Đất. Môi trường bị ion hoá một phần nằm giữa các sao gây ra một sự chậm trễ trong thời gian tới. Sự chậm trễ này phụ thuộc vào tần số quan sát. Chuyển động của Trái Đất trong Hệ Mặt Trời cũng có ảnh hưởng đến thời gian tới của tín hiệu vô tuyến. Sau khi tính đến các hiệu ứng này để suy ra chu kì thực của các pulsar , người ta thấy rằng chu kì thực của các pulsar mi li giây cực kì ổn định. Việc sử dụng một mạng lưới các đồng hồ nguyên tử tốt nhất trên thế giới làm hệ quy chiếu thời gian – sự định thời pulsar , tức là việc đo thời gian tới của các xung, cho thấy rằng chu kì của các pulsar mi li giây đạt độ chính xác tới 10^{-14} giây/giây. Nếu các xung vô tuyến của một pulsar mi li giây được sử dụng làm các tích tắc của một đồng hồ thì sai số của đồng hồ thiên nhiên này sẽ bé hơn ~ 0,3 mi-crô giây trong thời gian một năm. Để so sánh, trong cùng thời gian như vậy, sai số của một chiếc đồng hồ đeo tay thạch anh vào khoảng 10 giây. Lưu ý rằng độ chính xác đo được của các pulsar mi li giây bị giới hạn bởi độ chính xác của các đồng hồ nguyên tử tốt nhất được sử dụng trong các thí nghiệm định thời. Các pulsar mi li giây có thể được xem là những chuẩn thời gian thiên nhiên tuyệt vời, ít nhất cũng chính xác bằng các đồng hồ nhân tạo tốt nhất có được cho tới nay.

Thăm dò sóng hấp dẫn Vũ trụ

Theo tiên đoán của thuyết tương đối tổng quát của Einstein, sóng hấp dẫn lan truyền với tốc độ ánh sáng và được sản sinh ra trong những vùng có trường hấp dẫn mạnh và

PULSARS AND EINSTEIN'S GENERAL RELATIVITY.

Rapidly rotating pulsars

Pulsars are known to be formed in catastrophic supernova explosions (see Chapter VIII). According to the classical scenario, an implosion occurs due to the gravitational collapse and creates a core of ultra-dense matter consisting of neutrons (neutron star), while the debris flow into the interstellar space. The rotating neutron star has a strong magnetic dipole field, ~ 10^4-10^8 Tesla, whose axis is tilted with respect to the rotation axis. Relativistic charged particles accelerated in such a field radiate an anisotropic non-thermal radio emission confined in a cone whose axis coincides with the magnetic axis. Since the star is spinning, usually with a period of ~ 0.2-2 seconds, a pulsed emission is produced, resulting in a "lighthouse" effect. Most pulsars are a few million years old, and correspond to a class of young objects on the astronomical time scale. During their evolution both the magnetic field and the spin rate decrease.

Recently, a new class of pulsars with extremely short rotation periods, of the order of a few milliseconds, has been discovered. The fastest millisecond pulsar has a period of 1.558 millisecond. Its associated neutron star with a typical mass similar to that of our Sun but a size of only ~ 10 km rotates with an extraordinary rate of 642 turns per second (see also Chapter VIIIb). These objects are believed to be older (~ 10^8 years) than pulsars with moderate spin frequencies, but their magnetic field is weaker (~ 10^5 Tesla). The high rotation frequency can be explained if the pulsar belongs to a binary system. The associated neutron star can capture material from the atmosphere of the companion. The mass accretion increases the angular momentum and the slowly rotating neutron star can be accelerated to become a millisecond pulsar.

Millisecond pulsars as natural time standards

The arrival times of radio pulses recorded by radio astronomers are affected by several factors in their propagation to the Earth. The partially ionized intervening interstellar medium produces a delay in the arrival times, depending on the observing frequency. The motion of the Earth in the solar system also affects the arrival time of the radio signal. When these effects are taken into account to derive the actual periods of the pulsars, it turns out that the periods of millisecond pulsars are extremely stable. Using a network of the world's best atomic clocks as time reference, the pulsar timing, that is the measurement of the arrival times of the pulses, shows that the periods of millisecond pulsars are accurate to 10^{-14} second/second. If the radio pulses of a millisecond pulsar were used as the ticking of a clock, the accuracy of this natural clock would be better than ~ 0.3 microsecond over a period of a year. For comparison, over the same period, the accuracy of a quartz wrist watch is about 10 seconds. It should be noted that the measured accuracy of millisecond pulsars is limited by the accuracy of the best atomic clocks used in the timing experiments. Millisecond pulsars can be considered as excellent natural time standards, which are at least as accurate as the best man-made clocks so far available.

Probes of the cosmic gravitational waves

According to the prediction of Einstein's general theory of relativity, gravitational waves travel with the speed of light and are produced in regions where the gravitational field is strong and

các vật thể chuyển động nhanh. Môi trường của các vật thể có khối lượng lớn như các hốc đen hay các sao neutron đôi bồi tụ vật chất là một nguồn của các sóng hấp dẫn. Các sóng này cũng có thể được sản sinh ra bởi các dây Vũ trụ. Dây Vũ trụ được tin là những bất đồng nhất trong cấu trúc của Vũ trụ nguyên thuỷ. Các dây Vũ trụ được xem là các thành phần cơ bản của sự tạo thành các thiên hà. Tuy nhiên, sóng hấp dẫn Vũ trụ yếu đến mức cho tới nay nó vẫn không được phát hiện bởi bất kì dụng cụ tinh vi nào được chế tạo trong phòng thí nghiệm. Việc khám phá ra lớp các pulsar mili giây với chu kì cực ngắn và cực kì ổn định đã cung cấp cho chúng ta một phòng thí nghiệm Vũ trụ mới và đầy hứa hẹn để đạt được mục đích sâu xa này. Về nguyên tắc, khi một sóng hấp dẫn đi tới pulsar hay Trái Đất, một sự thay đổi trong thời gian tới của xung có thể được phát hiện. Để rút ra thông tin này, cần phải giảm bớt các sai số hệ thống do các yếu tố khác gây ra. Cụ thể hơn, độ chính xác của chuẩn thời gian, có vai trò to lớn trong thí nghiệm này, là có thể nâng cao được. Hiện đang có một nỗ lực quốc tế nhằm kết hợp các đồng hồ nguyên tử tốt nhất để tạo ra một hệ quy chiếu thời gian tốt hơn.

where the motion of the bodies is high. The environment of massive objects, like black holes or binary neutron stars, which accrete matter is a source of gravitational waves. These waves can also be generated by cosmic strings, which are believed to be the inhomogeneities in the structure of the primordial Universe. Cosmic strings are considered as the fundamental constituents for the formation of galaxies. Cosmic gravitational radiation is, however, so weak that it has not been detected so far by any sophisticated devices built in the laboratory. The discovery of the class of millisecond pulsars with ultra short and extremely stable periods offers a new and promising cosmic laboratory to achieve this ultimate aim. In principle, when a gravitational wave reaches the pulsar or the Earth, a change can be detected in the pulse arrival time. In order to extract this information, systematic uncertainties due to other factors should be reduced. More specifically, the accuracy of the time standards which play a major role in this experiment appears to be improvable. An international effort is under way to combine the best atomic clocks in order to create a better time reference.

CÂU HỎI

1) Tính tốc độ dịch chuyển ra xa v và khoảng cách d của một quasar có: a) độ dịch chuyển về phía đỏ z = 0,158; b) độ dịch chuyển về phía đỏ z = 5. Lấy giá trị của H = 65 km/s/Mpc.

2) Chúng ta có thể đi ngược thời gian cho tới Vụ nổ lớn được hay không? Giới hạn được xem như gốc thời gian là gì?

3) Chúng ta có thể biết được gì từ các quan sát của COBE? Bức xạ phông Vũ trụ là gì?

4) Sự tiến hoá của Vũ trụ bị chi phối bởi sự cạnh tranh giữa lực hấp dẫn và động năng do sự giãn nở. Lực hấp dẫn tác dụng lên một lớp vỏ hình cầu bán kính R được cắt ra từ Vũ trụ tỉ lệ với mật độ trung bình của vật chất ρ. Mặt khác, giá trị của hằng số Hubble H cho phép chúng ta tính động năng của vỏ đang giãn nở. Hãy tính thế hấp dẫn và động năng. Tiếp theo, giả định rằng chúng cân bằng (trường hợp Vũ trụ phẳng), hãy tính mật độ của Vũ trụ (Lấy H = 65 km/s/Mpc; G = 6,67 x 10^{-11} $Nm^2 kg^{-2}$).

5) Vũ trụ sẽ giãn nở hay suy sụp?

6) Pulsar mi li giây là gì và chúng có thể được sử dụng vào mục đích gì?

QUESTIONS

Question 1: Calculate the recession velocity v and the distance d of a quasar which has: a) a redshift z = 0.158 ; b) a redshift z = 5. Take a value of H = 65 km/s/Mpc.

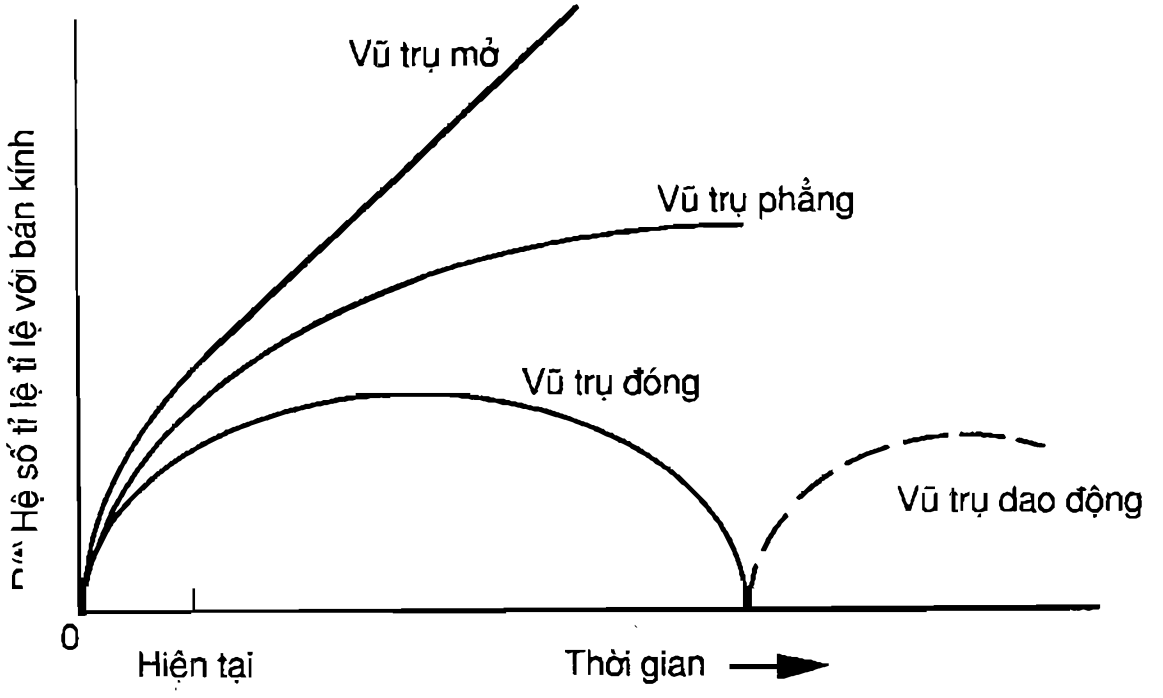
Question 2: Can we go back in time until the Big Bang ? What is the limit considered as the origin of time ?

Question 3: What can we learn from the COBE observations ? What is the cosmic background radiation ?

Question 4: The evolution of the Universe is governed by the competition between the gravitational attraction and the kinetic energy due to the expansion. The gravitational attraction exerted on a spherical shell of radius R cut out of the Universe, is proportional to the average density of matter ρ. On the other hand, the value of the Hubble constant H allows us to calculate the kinetic energy of the expanding shell. Calculate the gravitational potential and the kinetic energy. Then assuming that they are in equilibrium (case of a flat Universe), calculate the density of the Universe. (Take H = 65 km/s/Mpc; G = 6.67 x 10^{-11} Nm^2kg^{-2}.)

Question 5: Will the Universe expand or collapse ?

Question 6: What are millisecond pulsars and to what purpose are they possibly used ?



Hình XI.3

Chương XII

KĨ THUẬT THIÊN VĂN

Thiên văn vật lí không chỉ liên quan tới Thiên văn học mà còn liên quan tới nhiều ngành khoa học khác như Toán học, Vật lí học, Hoá học và Sinh vật học. Các nhà thiên văn vật lí coi Vũ trụ như một phòng thí nghiệm thiên nhiên vĩ đại, tại đấy họ có thể quan sát nhiều hiện tượng vật lí cơ bản. Ánh sáng phát ra từ các ngôi sao và các thiên hà thu được trên Trái Đất có thể yếu như ánh sáng phát ra từ một ngọn nến đặt trên Mặt Trăng được quan sát từ Trái Đất. Các tín hiệu vô tuyến phát ra từ các thiên thể được phát hiện bởi các kính thiên văn vô tuyến có thể yếu vào cỡ 10^{-20} W. Để phát hiện được bức xạ điện từ từ Vũ trụ yếu như vậy, các nhà thiên văn sử dụng công nghệ hiện đại nhất để chế tạo những gương quang học và những ăng ten khổng lồ nhằm thu nhận càng nhiều photon do các thiên thể phát ra càng tốt. Họ cũng sử dụng các vật liệu bán dẫn và siêu dẫn để tạo ra những máy thu cực nhạy để ghi các tín hiệu.

PHỔ ĐIỆN TỪ

Bầu trời đã được quan sát từ rất lâu trong vùng phổ khả kiến ở các bước sóng từ 0,4 μm đến 0,8 μm. Mắt người chỉ có thể cảm nhận bức xạ thuộc dải sóng này. Tuy nhiên việc xác định bản chất vật lí của các thiên thể đòi hỏi chúng ta phải tiến hành quan sát ở một số bước sóng trải dài trên một dải rộng của phổ điện từ.

Bề mặt của các sao và khí bị ion hoá giữa các sao phát bức xạ ở vùng sóng khả kiến. Những bọc bụi nóng bao quanh các phôi sao (hay còn gọi là tiền sao) tuy không phát xạ ở vùng sóng khả kiến nhưng lại là nguồn phát bức xạ hồng ngoại gần rất mạnh. Những hạt bụi ấm giữa các sao phát ra bức xạ hồng ngoại xa. Các electron tương đối tính chuyển động xoắn ốc trong từ trường của các thiên hà, các quasar và các tàn dư vụ nổ sao siêu mới phát bức xạ vô tuyến synchrotron ở các bước sóng mét và cm. Các phân tử nằm trong môi trường giữa các sao phát bức xạ ở bước sóng mi li mét. Những ngôi sao nóng và khí rất nóng ở vùng lân cận các hốc đen phát bức xạ ở vùng tử ngoại và tia X. Những bức xạ có bước sóng cực ngắn này cũng như những bức xạ hồng ngoại xa đến từ vũ trụ bị hấp thụ bởi khí quyển trái đất. Cùng với thiên văn quang học và thiên văn vô tuyến cổ truyền, những sự quan sát với các kính thiên văn vũ trụ được lắp đặt trên các vệ tinh nhân tạo được thực hiện nhằm tiến hành các nghiên cứu ở những vùng phổ không quan sát được từ mặt đất.

KÍNH THIÊN VĂN

Chất lượng của kính thiên văn được đặc trưng bởi khả năng của thiết bị có thể phát hiện các thiên thể mờ và có thể phân biệt các chi tiết càng bé càng tốt trên bầu trời. Muốn đồng thời đạt được hai yêu cầu đó, kính thiên văn phải có diện tích thu nhận bức xạ lớn. Lượng photon được thu bởi kính thiên văn tỉ lệ thuận với diện tích của gương của kính thiên văn. Độ phân giải góc của kính thiên văn (khoảng cách góc nhỏ nhất ngăn cách hai thiên thể ở cạnh nhau trên bầu trời để kính thiên văn vẫn còn có thể phân biệt được hai thiên thể này) là $1,2(\lambda/D)$, λ là bước sóng quan sát, D là đường kính của kính. Với một kính thiên văn có đường kính 10 m làm việc ở bước sóng $\lambda = 0,8$ μm,

Chapter XII

ASTRONOMICAL TECHNIQUES

Astrophysics is not only related to astronomy but also involves many other fields of science, from mathematics through physics and chemistry to biology. Astrophysicists consider the Universe as a giant natural laboratory where they can observe basic physical phenomena. Light received on Earth from stars and galaxies can be as faint as that from a candle placed on the Moon. Radio signals from celestial objects detected in radio telescopes can be as weak as $\sim 10^{-20}$ watt. In order to detect such faint cosmic electromagnetic radiation, astronomers use state-of-the-art technology to construct huge optical mirrors and antennae to collect as many photons as possible from celestial objects. They also use semiconductor and superconductor materials to build sensitive receivers in order to record the signals.

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM.

The sky has long been observed in the visible at wavelengths between 0.4 μm to 0.8 μm. Only the radiation in this range of wavelengtbs is perceptible to the eye. However, the determination of the physical nature of an astronomical object requires observations at several wavelengths spanning a wide range of the electromagnetic spectrum.

The surface of stars and the interstellar ionized gas emit in the visible. The cocoons of hot dust around embryos of stars (protostars), though not visible, are strong near-infrared sources. Warm interstellar dust grains emit in the far-infrared. Relativistic electrons spiralling in the magnetic field from galaxies, quasars and supernova remnants emit powerful synchrotron radio radiation at meter and centimeter wavelengths. Molecules in the interstellar medium radiate at millimeter wavelengths. Hot stars and very hot gas in the vicinity of black holes emit in the ultraviolet and X wavebands. These ultrashort-wavelength radiations as well as the far-infrared radiation coming from outer space are absorbed by the Earth's atmosphere. In addition to traditional optical astronomy and radio astronomy, observations with space telescopes on board satellites are carried out to explore these spectral domains unobservable from the ground.

TELESCOPES.

The quality of a telescope is characterized by the ability of the instrument to detect faint objects and to distinguish details as fine as possible in the sky. To achieve this doubleperformance, the telescope should have a large collecting area. The amount of photons collected by the telescope is proportional to the area of the mirror of the telescope. The angular resolution of the telescope (that is the smallest angular distance that separates two adjacent objects in the sky, so that they can be distinguished by the telescope) is equal to $1.2(\lambda/D)$, λ is the observing wavelength and D is the telescope diameter. For a telescope of 10 m diameter, operating at $\lambda \sim 0.8$ μm,

độ phân giải góc là 0,02". Tuy nhiên độ phân giải góc, ngay cả của kính thiên văn lớn đặt trên mặt đất, bị giới hạn bởi sự cuộn xoáy của khí quyển trái đất, làm giảm độ phân giải tới khoảng 1 giây cung. Độ phân giải góc 1" cho phép ta phân biệt được 2 chi tiết ở cách nhau 2 km ở trên Mặt Trăng. Độ phân giải góc này không đủ để phân biệt các vật thể có kích thước như các hòn đá ở trên Mặt Trăng.

Việc tạo ra các kính thiên văn hiện đại đòi hỏi phải có công nghệ mới nhằm đạt được trạng thái tối ưu của một quang hệ. Dưới tác dụng của lực hấp dẫn, bề mặt của gương thường có dạng parabol có xu hướng lệch khỏi hình dạng lí tưởng. Do đó, kính thiên văn không thể cho ảnh sắc nét. Nhằm khắc phục sự biến dạng bề mặt của kính thiên văn gây bởi lực hấp dẫn, các nhà thiên văn đã xây dựng các kính thiên văn lớn, hiện đại bằng cách ghép nhiều tấm gương nhỏ riêng biệt với nhau. Kính thiên văn Keck lớn có đường kính 10 m đặt trên đỉnh núi Mauna Kea ở Hawaii có 36 gương nhỏ hình lục giác (hình XII.1). Bề mặt của mỗi gương được điều khiển bởi máy tính sao cho bề mặt toàn bộ của kính thiên văn tự động giữ nguyên hình dạng lí tưởng của nó. Kĩ thuật này cho phép chúng ta thu được những hình ảnh thiên văn có chất lượng cao.

Hình XII.1 : (Xem cuối chương)

Sơ đồ một kính thiên văn quang học lớn, hiện đại được ghép bởi một số gương nhỏ riêng biệt (A) phản xạ ánh sáng tới một gương thứ cấp (B).

Sự cuộn xoáy của khí quyển trái đất làm biến dạng một cách ngẫu nhiên mặt đầu sóng của ánh sáng tới từ ngôi sao và làm nhoè hình ảnh của vật thể. Có một kĩ thuật cho phép đo độ sai lệch bởi một máy cảm biến mặt đầu sóng và bù lại gần như tức thời phần sai lệch mặt đầu sóng đó. Hầu hết các kính thiên văn hiện đại đều sử dụng kĩ thuật này. Độ phân giải góc đã được cải thiện rất nhiều cho phép các nhà thiên văn phát hiện các chi tiết nhỏ cỡ vài phần mười giây cung ở bước sóng khả kiến. Giá trị này vẫn còn lớn hơn giới hạn nhiễu xạ lí thuyết $1,2(\lambda/D)$ của các kính thiên văn lớn đặt trên mặt đất.

Kính thiên văn vũ trụ Hubble, được phóng lên quỹ đạo vào năm 1990, có một gương với đường kính 2,4 m. Vì kính thiên văn này cho ta những hình ảnh không bị ảnh hưởng bởi sự cuộn xoáy của khí quyển trái đất nên độ phân giải góc của nó ở các bước sóng quang học vào cỡ 0,05", tương ứng với giới hạn nhiễu xạ lí thuyết của thiết bị. Độ phân giải không gian cao này cho phép kính thiên văn vũ trụ Hubble phân giải các tinh vân ngoài thiên hà và phân biệt các sao biến quang riêng rẽ và các vụ nổ sao siêu mới trong các đám thiên hà xa xôi. Những quan sát này rất bổ ích đối với việc xác định thang khoảng cách vũ trụ.

Để minh hoạ, chúng tôi giới thiệu hình ảnh của một vật thể ngoài thiên hà thuộc Đám mây Magellan lớn được quan sát bởi kính thiên văn vũ trụ Hubble (hình XII.2). Thiên thể này cách ta 170000 năm ánh sáng, hiện ra như một chấm sáng nhỏ rất mờ khi nhìn qua kính thiên văn đặt trên mặt đất. Kính thiên văn vũ trụ Hubble có thể phân giải thiên thể này thành một tinh vân có hình một con bướm đẹp nên được gọi là "Tinh vân cánh bướm". Tinh vân này nằm trong miền HII mang tên N159 được coi là một vùng cuộn xoáy đang tạo ra một vụ nổ của các sao trẻ có khối lượng lớn.

the angular resolution is 0.02 arcsecond. However, the angular resolution, even for large ground-based telescopes, is limited by turbulence in the Earth's atmosphere, which deteriorates the resolution to about one arcsecond. At the distance of the Moon, a resolution of one arcsecond allows us to detect details of about 2 kilometers. This resolution is not sufficient to distinguish objects of the size of a lunar rock.

The building of modern telescopes requires new technology to achieve an optimum state of optical performance. The surface of the mirror, which should usually be a parabola, tends to deviate from this ideal shape under gravity. As a result, the telescope cannot provide sharp images. In order to remedy the deformation of the surface of the telescope by gravity, astronomers build modern large telescopes by assembling small segmented mirrors together. The large Keck telescope, of 10 m diameter on the mountain Mauna Kea in Hawaii, has 36 small hexagonal mirrors (Fig.XII.1). The surface of each individual mirror is computer controlled so that the overall surface of the telescope automatically keeps the ideal shape. This technique contributes to provide astronomical images of high quality.

Figure XII.1

A sketch of a modern large optical telescope built with a number of small segmented mirrors (A) which reflect light to a secondary mirror (B).

The presence of turbulence in the Earth's atmosphere randomly distorts the wavefront of incident star light and blurs the image of the object. A technique consists in measuring the degree of the distortions by a wavefront sensor and in compensating almost instantaneously for the wavefront distortions. Most modern telescopes are equipped for this technique. The greatly improved angular resolution allows astronomers to detect details as small as a few tenths of arcsecond at visible wavelengths. This value is still larger than the theoretical diffraction limit $1.2(\lambda/D)$ of large ground-based telescopes.

The Hubble Space Telescope, launched into orbit in 1990, has a mirror 2.4 m in diameter. Since this telescope gives images not affected by the atmospheric turbulence, its angular resolution at optical wavelengths is as good as 0.05 arcsecond, which corresponds to the theoretical diffraction limit of the instrument. This high spatial resolution permits the Hubble Space Telescope to resolve extragalactic nebulae and to distinguish individual variable stars and supernovae in distant clusters of galaxies. These observations are useful for the determination of the cosmic distance scale.

By way of illustration, we show the image of an extragalactic object in the Large Magellanic Cloud, observed with the Hubble Space Telescope (Fig. XII.2). This object, at a distance of 170000 light-years, appears as a tiny fuzzy bright spot when observed with ground-based telescopes. The Hubble Space Telescope was able to resolve this object into a nebula having the shape of a beautiful butterfly justly christened as the "Papillon Nebula". This nebula lies in an HII region (N159) believed to be a turbulent cauldron producing a burst of massive young stars.

Hình XII.2 : (Xem cuối chương)

Hình ảnh tinh vân N159-5 trong thiên hà láng giềng của chúng ta - Đám mây Magellan lớn. Độ phân giải cao (<0,1") của Kính thiên văn vũ trụ Hubble hoạt động bên ngoài khí quyển Trái Đất, cho phép các nhà thiên văn phân giải tinh vân này thành một tinh vân đẹp có hình cánh bướm (Ảnh: Heydari- Malayeri, Đài quan sát thiên văn Paris và NASA/ESA)

KÍNH THIÊN VĂN VÔ TUYẾN

Hình XII.3 : (Xem cuối chương)

Kính thiên văn vô tuyến được trang bị các bộ thu nhạy và phổ kế thu tín hiệu vô tuyến đến từ các thiên thể. Giống như kính thiên văn quang học, kính thiên văn vô tuyến gồm một ăng ten lớn (A) và một ăng ten thứ cấp nhỏ (B).

Các nhà thiên văn vô tuyến nghiên cứu một nguồn vô tuyến mở rộng bằng cách hướng kính thiên văn vô tuyến lên những khu vực khác nhau ở cạnh nhau có kích thước xấp xỉ độ phân giải góc (~λ/D) của thiết bị. Kính thiên văn vô tuyến gồm một ăng-ten giống như ăng ten ra đa khổng lồ, quy tụ sóng vô tuyến vào tiêu điểm của thiết bị (hình XII.3). Trong khi kính thiên văn quang học lớn nhất có đường kính 10 m, kích cỡ của kính thiên văn vô tuyến lớn hơn rất nhiều và có thể đạt tới hàng trăm mét. Các kính thiên văn quang học hoạt động ở dải bước sóng từ λ_{qh} ~ 0,4 μm đến vài μm. Kính thiên văn vô tuyến làm việc ở giải bước sóng từ λ_{vt} ~1 mm đến 3 m. Các bước sóng vô tuyến dài gấp từ hàng nghìn lần đến hàng triệu lần các bước sóng khả kiến và hồng ngoại. Để có độ phân giải góc tối ưu 1,2(λ/D) tương đương với độ phân giải góc đạt được trong thiên văn quang học và thiên văn hồng ngoại, các nhà thiên văn vô tuyến phải làm các ăng ten có kích cỡ lớn hơn kích cỡ của các kính thiên văn quang học $\lambda_{vt}/\lambda_{qh}$ lần. Điều này có nghĩa là muốn đạt được cùng độ phân giải góc (0,15") của một kính thiên văn quang học có đường kính 1,5 m làm việc ở bước sóng λ_{qh} = 1 μm, đường kính của kính thiên văn vô tuyến làm việc ở λ_{vt} = 3 mm phải bằng 1,5 m x $\lambda_{vt}/\lambda_{qh}$ = 1,5 m x 3000 = 4500 m! Việc lắp đặt một ăng-ten như vậy vượt ra ngoài khả năng của công nghệ hiện nay.

Trong thực tế các nhà thiên văn vô tuyến phải tự bằng lòng với những ăng ten có đường kính từ hàng chục tới hàng trăm mét, cho độ phân giải góc cỡ hàng chục giây cung. Họ cũng có thể lắp đặt một mạng gồm nhiều ăng-ten để thực hiện phép đo giao thoa. Nguyên tắc của phép đo giao thoa là: Sử dụng đồng thời một số (ít nhất là 2) ăng ten, và làm tương thích các tín hiệu thu được bởi tất cả các ăng ten với nhau (hình XII.4). Độ phân giải góc của hệ giao thoa cũng được xác định bởi 1,2(λ/D). Ở đây D không phải là đường kính của mỗi ăng ten mà là khoảng cách giữa các ăng ten (được gọi là đường căn cứ), có thể dài hàng chục, thậm chí hàng trăm km. Trong các thí nghiệm của phép đo giao thoa có đường căn cứ rất dài *(Very Long Baseline Interferometry VLBI)*, các ăng ten cách nhau hàng nghìn km. Mạng ăng-ten giữa các châu lục thường được sử dụng trong thiên văn vô tuyến nhằm thu được độ phân giải góc ~ $10^{-4} \div 10^{-5}$ giây cung. Ở khoảng cách Mặt trăng, độ phân giải này tương ứng với sự nhận ra các chi tiết của một hòn đá trên Mặt trăng.

Fig. XII.2

Image of the nebula N159-5 in our neighbor galaxy, the Large Magellanic Cloud. The high resolution < 0.1 arcsecond of the Hubble Space Telescope, which operates outside the Earth's atmosphere, permits astronomers to resolve the nebula into a nice butterfly-shaped nebula. (Photo by Heydari-Malayeri, Paris Observatory and NASA/ESA).

RADIO TELESCOPES.

Figure XII.3

A radio telescope equipped with sensitive receivers and spectrometer receives the radio signal coming from astronomical objects. As in an optical telescope, it consists of a huge antenna (A) and a small secondary antenna (B).

Radio astronomers study an extended radio source by pointing the radio telescope at different adjacent regions of the size of the order of the angular resolution (~λ/D) of the instrument. A radio telescope consists of an antenna similar to a huge radar antenna, concentrating radio waves at the focus of the instrument (Fig.XII.3.). While the largest optical telescope has a diameter of 10 meters, the size of radio telescopes is much larger and can reach hundreds of meters. Optical telescopes operate in the range of wavelengths $\lambda_{opt} \sim 0.4$ μm to a few microns. The working wavelength range of radio telescopes is between $\lambda_{radio} \sim$ 1 mm and 3 m. The radio wavelengths are thousands to millions times longer than the visible and infrared wavelengths. In order to obtain optimal angular resolutions 1.2 (λ/D) similar to those achieved in optical and infrared astronomy, radio astronomers would have to build antennae whose size should be larger than that of optical telescopes by a factor of $\lambda_{radio}/\lambda_{opt}$. This means that to obtain the same angular resolution (0.15 arcsecond) of a 1.5 m optical telescope working at $\lambda_{opt} = 1$ μm, the diameter of a radio telescope operating at λ_{radio}=3 mm should be equal to 1.5 m x $\lambda_{radio}/\lambda_{opt}$, that is 1.5 m x 3000 = 4500 m! Building such a huge antenna is beyond the scope of current technology.

In practice, radio astronomers have to content themselves with antennae of tens to hundreds of meters, which give angular resolutions of about a few 10 arcseconds. They can also build an array of several such antennae to perform interferometric measurements. The concept of interferometry consists in using several antennae (at least two) simultaneously, and correlating together the signals received by all the antennae (Fig.XII.4). The angular resolution of the interferometric system is also given by 1.2 (λ/D). Here, D is not the diameter of each antenna, but it is the distance between the antennae (called the baseline), which can be as long as several tens of kilometers, even several hundreds of kilometers. In the VLBI (Very Long Baseline Interferometry) experiments, the antennae are thousands of kilometers apart from each other. These intercontinental networks of antennae are commonly used in radio astronomy to achieve resolutions of ~ 10^{-4} – 10^{-5} arcsecond. At the distance of the Moon, this resolution corresponds to recognizing the details of a lunar rock.

Hình XII.4 : (Xem cuối chương)

Giao thoa kế làm việc ở giải sóng mi li met ở cao nguyên Bure (Pháp), gồm 5 ăng ten có đường kính 15 m, thuộc Viện nghiên cứu thiên văn vô tuyến mi li mét Pháp - Đức. Ăngten thứ 6 đang được lắp đặt.

CÁC MÁY THU TRONG THIÊN VĂN VÀ THIÊN VĂN VÔ TUYẾN

Hiện nay, thiên văn học đã thu được nhiều thành tựu lớn nhờ áp dụng vật lí chất rắn để phát triển các máy thu.

Trong thiên văn quang học, máy thu CCD *(viết tắt của thuật ngữ tiếng Anh: charge coupled device có nghĩa là thiết bị thu góp điện tích)* được chế tạo từ các chất bán dẫn đã thay thế hầu như toàn bộ kính ảnh. Máy thu CCD tương tự như các máy thu dùng để ghi hình ảnh trong các máy quay phim. Một tế bào quang dẫn gồm một đế Si, một lớp SiO_2 mỏng cách điện và một điện cực. Các photon tới bị hấp thụ bởi các bán dẫn như si líc và germani, tách các electron ra khỏi mối liên kết với nguyên tử bởi hiệu ứng quang điện. Một dòng điện được tạo thành, có cường độ tỉ lệ thuận với thông lượng ánh sáng tới. Dòng này được khuếch đại và được đo. Các máy thu quang điện được lắp đặt tại tiêu điểm của kính thiên văn. Ảnh của thiên thể được ghi lại theo phương pháp điện bằng cách sử dụng một máy thu 2 chiều được tạo bởi hàng nghìn tế bào như trên. Thiết bị điện tử này nhạy hơn kính ảnh 30 lần.

Trong thiên văn vô tuyến, các bộ ghép nối siêu dẫn - cách điện - siêu dẫn SIS *(viết tắt của thuật ngữ tiếng Anh: Superconductor - Insulator - Superconductor - SIS)* thường được dùng để phát hiện tín hiệu vô tuyến ở bước sóng mi li mét và dưới mi li mét. Bộ ghép nối SIS gồm một lớp mỏng chất cách điện bị kẹp giữa 2 lớp siêu dẫn. Khi sóng vô tuyến đập vào bộ ghép nối, các electron chứa trong một lớp siêu dẫn có thể xuyên qua lớp cách điện nhờ hiệu ứng đường hầm để đi vào lớp siêu dẫn kia, làm tăng dòng điện đi qua thiết bị. Lớp cách điện phải đủ mỏng (≤ 20 A°) để các electron có thể chui qua các điện cực. Dòng điện tạo thành chứa những thông tin về tín hiệu vô tuyến của các thiên thể. Ngày nay, thiết bị thu SIS được lắp đặt trong hầu hết các kính thiên văn vô tuyến hoạt động ở bước sóng milimét. Toàn bộ hệ thống thu được làm lạnh tới nhiệt độ rất thấp, ~ 4 K, trong buồng kín chứa He lỏng, nhằm giảm độ ồn do nhiệt độ bên ngoài gây ra.

Figure XII.4

The millimeter-wave interferometer at Plateau de Bure (France), with five 15 m antennae, belongs to the French-German Institut de Radio Astronomie Millimetrique. The sixth antenna is being built.

DETECTORS IN ASTRONOMY AND RADIO ASTRONOMY.

Nowadays, great progress has been made in astronomy with the application of solid-state physics to the development of detectors.

In optical astronomy, detectors called Charge Coupled Device (CCD) made of semiconductor substances have almost replaced photographic plates. The CCD detectors are similar to those used to record images in video cameras. A photoconducting cell consists of a silicon substrate, a thin insulating layer of silicon dioxide (SiO_2) and an electrode. The incident photons absorbed by the semiconductors, like silicon and germanium, detach electrons from the bonds to the atoms by the photoelectric effect. A current is created, proportional to the incident light flux. The current is amplified and measured. These photoconducting detectors are installed at the focus of the telescope. The image of the astronomical object is recorded electronically using a two-dimensional detector made of thousands of such cells. This electronic device is about 30 times more sensitive than photographic plates.

In radio astronomy, Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS) junctions are used to detect radio signals at millimeter and submillimeter wavelengths. The SIS junction is made of a thin layer of insulating material sandwiched between two superconductors. When radio waves are applied to the junction, electrons in one of the superconductors can tunnel through the insulator to the other superconductor, resulting in an increase of the flow of the current through the device. The insulator should be thin enough ($\leq$ 20 Angstrom) to make it possible for electrons to tunnel through the electrodes. The resulting electric current contains information on the radio signals of the astronomical objects. SIS detectors are nowadays mounted on most millimeter-wave radio telescopes. All of the receiving system is cooled to a very low temperature, $\sim$ 4 K, in a dewar containing liquid helium, in order to decrease the noise produced at ambient temperature.

CÂU HỎI

1) Một kính thiên văn vô tuyến lớn gồm một ăng ten có đường kính 100 m và một máy thu nhạy có thể phát hiện một tín hiệu vô tuyến 10^{-29} W/m^2/Hz đến từ một quasar xa xăm. Đây là thông lượng bức xạ đập vào ăng ten trên một đơn vị diện tích bề mặt cuả diện tích thu sóng và trên một đơn vị băng sóng. Hãy tính công suất thu được bởi kính thiên văn vô tuyến này trên dải sóng 1 MHz.

2) Hãy so sánh công suất vừa tính ở câu 1 với công suất đến từ một trạm phát thanh đẳng hướng, có công suất 2 Mw, được thu bởi một ăng ten có đường kính 10 m ở khoảng cách 1000 km kể từ trạm phát.

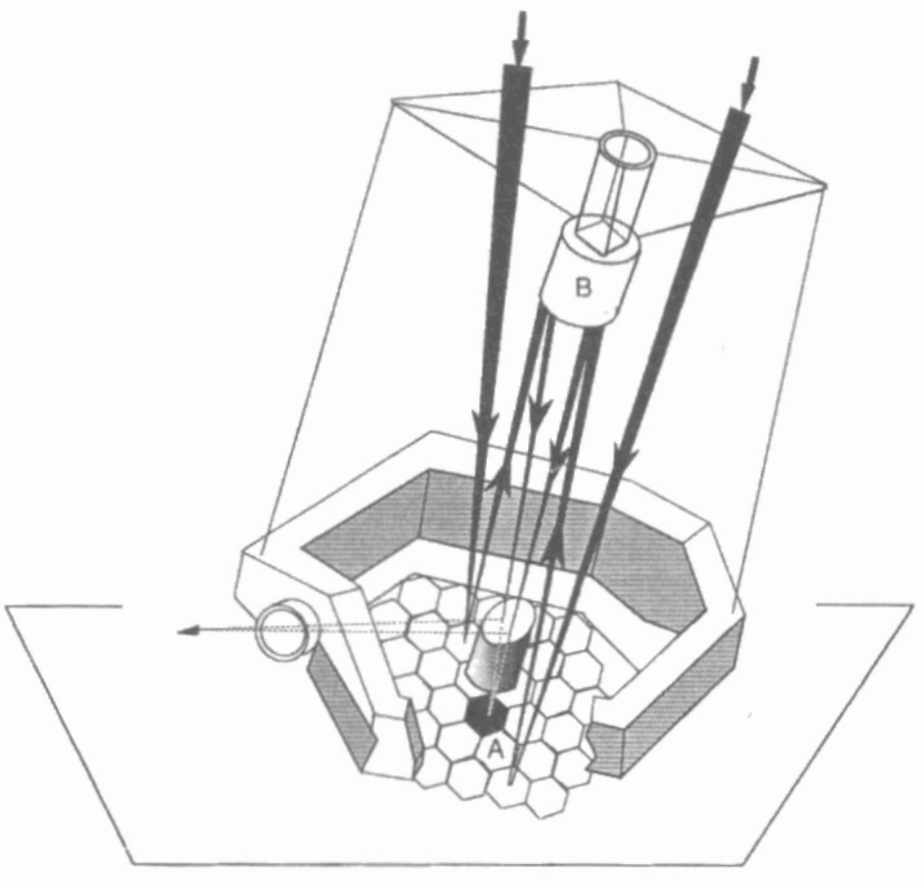
3) Hãy tính độ phân giải lí thuyết (giới hạn nhiễu xạ) của kính thiên văn vũ trụ Hubble có đường kính 2,4 m ở $\lambda = 0,5$ μm. Kính này thực sự có đạt tới độ phân giải ấy không? Nếu có, hãy giải thích tại sao.

QUESTIONS

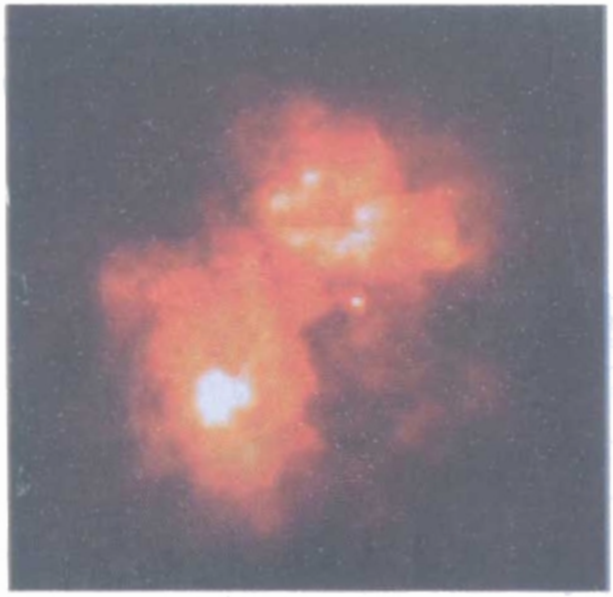
Question 1: A large radio telescope consisting of an antenna of 100 m of diameter and a sensitive receiver can detect a radio signal of 10^{-29} w/m^2/Hz coming from a remote quasar. This is the flux falling to the antenna per unit surface of collecting area and per unit (receiver) bandwidth. Calculate the power received by the radio telescope in a bandwidth of 1 MHz.

Question 2: Compare the above value of power to the power received from an isotropic 2 Mw broadcasting station by a radio telescope of 10 m diameter at a distance of 1000 km.

Question 3: Calculate the theoretical resolution (diffraction limit) of the 2.4 m Hubble Space Telescope at $\lambda = 0.5\mu m$. Is this resolution actually reached by this telescope? If yes, explain why?



Hình XII.1



Hình XII.2

B
A
Máy thu được làm lạnh trong bình (Hê-li lỏng)
Phổ kế
Máy vi tính
Trạm điều khiển kính thiên văn và xử lí số liệu

Hình XII.3

Hình XII.4

TRẢ LỜI CÂU HỎI

CHƯƠNG II :

1. $r_p = -\dfrac{v_a^2 r_a^2}{2K - r_a v_a}$ $\qquad$ $v_p = -\dfrac{2K - r_a v_a}{v_a r_a}$
2. 4664 km
3. $1{,}99.10^{30}$ kg
4. e = 0,05
5. 10,9 km/s
6. 35.800 km
7. 2,5 năm

CHƯƠNG III :

1. Khoảng cách giữa Hà Nội và Tokyo là 3677 km.
2. $h = 52^o27'$; $A = 0$
3. Khi điểm xuân phân nằm trên kinh tuyến của người quan sát ở Hà Nội, hướng của Vega ở gần chân trời phía Tây - Bắc. Góc giờ của nó là: $5^h\,26^m$.
4. Xuân phân: $h = 71^o20'$; $A = 0$

   Hạ chí: $h = 85^o13'$; $A = 180^o$

   Thu phân: $h = 71^o20'$; $A = 0$

   Đông chí: $h = 47^o53'$; $A = 0$
5. a. $T_m = T + \eta$;

   b. Nhanh $4^m\,26^s$

   c. $T_o = 5^h00^m34^s$

   d. $h = 48^o24'$; $A = 0$
6. $\lambda = 6^h22^m$
7. Sau 6585,32 ngày, Nhật thực lại xảy ra.

ANSWERS TO CHAPTERS

ANSWERS TO CHAPTER II

Answer to question 1. $r_p = -\dfrac{v_a^2 r_a^2}{2K - r_a v_a}$ $\quad v_p = -\dfrac{2K - r_a v_a}{v_a r_a}$

Answer to question 2. 4664 km

Answer to question 3. $1{,}99.10^{30}$ kg

Answer to question 4. e = 0,05

Answer to question 5. 10,9 km/s

Answer to question 6. 35.800 km

Answer to question 7. 2,5 years

ANSWERS TO CHAPTER III

Answer to question 1. The distance between Hanoi and Tokyo is 3.677 km.

Answer to question 2. $h = 52°27'$; $A = 0$

Answer to question 3. When the vernal equinox is on the meridian of an observer in Hanoi, Vega's direction is near the horizon, north-west side. Its hour angle is $5^h\ 26^m$

Answer to question 4.

Vernal equinox: $h = 71°20'$; $A = 0$

Summer solstice: $h = 85°13'$; $A = 180°$

Autumnal equinox: $h = 71°20'$; $A = 0$

Winter solstice: $h = 47°53'$; $A = 0$

Answer to question 5.

a. $T_m = T + \eta$;

b. It is fast: $4^m\ 26^s$

c. $T_o = 5^h00^m34^s$

d. $h = 48°24'$; $A = 0$

Answer to question 6. $\lambda = 6^h22^m$

Answer to question 7. After 6585.32 days, the same eclipses will arise.

CHƯƠNG IV:

1. Không phải tất cả mọi bức xạ; mô tả hai cửa sổ cho phép bức xạ vũ trụ tới mặt đất.
2. Liệt kê các quá trình phát xạ liên tục và phát xạ vạch.
3. Viết $B_\lambda d\lambda = B_\nu d\nu$ và thay thế ν và $d\nu$ như là một hàm của λ và $d\lambda$ trong 4.1.
4. Lấy đạo hàm của các công thức 4.1 (và 4.2), cân bằng chúng với 0 và giải mỗi phương trình.
5. Bức xạ phi nhiệt có nhiệt độ chói cao. Cường độ của nó tăng như là một hàm của bước sóng.
6. Nhiệt độ electron chính xác bằng 10^4 K trong trường hợp độ dày quang học lớn và cao hơn 10^4 K trong trường hợp độ dày quang học bé.
7. Ở vùng hồng ngoại gần ở bước sóng 1,9 μm
8. Năng lượng thay đổi theo J^2+J, bởi vậy khoảng cách giữa các mức tăng theo năng lượng.

CHƯƠNG V :

1. Một sự ước tính 4 x 10^3 km sau 2 x 10^8 năm cho giá trị 2 cm/năm, 20 km/triệu năm. Chuyển động này có thể được đo bởi các giao thoa kế vô tuyến và bởi các xung laser phản xạ từ Mặt Trăng.
2. Viết định luật thứ 3 của Kepler $r^3/P^2 = GM/4\pi^2$ một lần cho quỹ đạo xung quanh Trái Đất, một lần cho quỹ đạo xung quanh Mặt Trăng, từ đó:

   P^2(xung quanh Mặt Trăng) / P^2(xung quanh Trái Đất) = $(M_E/M_M).(r_M/r_E)^3 = 81/64$.

   Do đó, T (xung quanh Mặt Trăng) ≈ 110 phút. Một nửa thời gian này không liên lạc vô tuyến được với Trái Đất.

   Các nhà du hành vũ trụ dự kiến đổ bộ lên phần của Mặt Trăng đối diện với Trái Đất đã phải khởi động tàu đổ bộ của họ khi ở phía sau Mặt Trăng. Con người ở trên mặt đất đã khá hồi hộp trong suốt khoảng thời gian đó!
3. g = 1,63 m/s^2, 1/6 của Trái Đất, điều này có nghĩa là con người ở trên Mặt Trăng có thể nhảy cao gấp 6 lần so với ở trên Trái Đất. Tốc độ thoát chỉ 2,38 km/s.
4. Hồng ngoại và vô tuyến; vì sóng vô tuyến xuyên qua khí quyển trái đất, đo cường độ sóng vô tuyến.
5. O có khối lượng nguyên tử 16, bởi vậy m = $18m_p$ = 3 x 10^{-26} kg, kT = 5,2 x 10^{-21} J, tốc độ căn quân phương = 0,7 km/s. Các phân tử thoát.

ANSWERS TO CHAPTER IV

Answer to question 1. : Not all radiations; describe the two windows which allow cosmic radiation to reach the ground level.

Answer to question 2. Enumerate the processes of the continuum emission and the line emission.

Answer to question 3. Write $B_\lambda\, d\lambda = B_\nu d\nu$ and replace ν and $d\nu$ as a function of λ and $d\lambda$ in 4.1.

Answer to question 4. Take the derivative of formulae 4.1 (and 4.2), equate them to zero and solve each equation.

Answer to question 5. Non-thermal emission has a high brightness temperature. Its intensity increases as a function of wavelengths.

Answer to question 6. The electron temperature is precisely equal to 10^4 K in the optically thick case and higher than 10^4 K in the optically thin case.

Answer to question 7. In the near-infrared at 1.9 μm.

Answer to question 8. The energy varies as J^2+J , therefore, the spacing between the levels increases with energy.

ANSWERS FOR CHAPTER V:

Answer to question 1: An estimate of $4\text{x}10^3$ km over $2\text{x}10^8$ years gives 2 cm per year, 20 km per million years. This motion can be measured by radio interferometers and by laser pulses reflected from the Moon.

Answer to question 2: Write Kepler's third law $r^3/P^2 = GM/4\pi^2$ once for an orbit around the Earth, once for an orbit around the Moon. Then P^2(around Moon)/P^2(around Earth) = $(M_L/M_M)\ (r_M/r_E)^3 = 81/64$. Therefore, T(around Moon) ~ 110 minutes. Half of that time is out of radio contact with the Earth. Astronauts planning to land on the part of the Moon facing toward Earth had to start their landing maneuver while behind the Moon. Humans on Earth were rather nervous during that time!

Answer to question 3: g = 1.63 m/s^2 ,1/6 of Earth, which means humans on the Moon can jump six times as high as on Earth. The escape speed is only 2.38 km/s.

Answer to question 4: Infrared and radio; since radio penetrates the Earth's atmosphere, measure the radio intensity.

Answer to question 5: O has atomic weight 16, so $m = 18\ m_p = 3\text{x}10^{-26}$ kg, $kT = 5.2\text{x}10^{-21}$ j, rms speed = 0.7km/s. The molecules escape.

6. Già nhất là miệng núi lửa do va chạm c, bị phá huỷ một phần bởi một miệng núi lửa do va chạm trẻ hơn. Chính miệng núi lửa do va chạm trẻ hơn này lại bị phá huỷ một phần bởi một miệng núi lửa do va chạm trẻ hơn. Hoặc b hoặc d có thể là miệng núi lửa do va chạm trẻ nhất. Bức ảnh không cung cấp đủ thông tin để lựa chọn.

7. Tuổi bằng ba lần chu kì bán rã. 1/8 số nguyên tử ban đầu còn lại, 7/8 đã phân rã.

8. 395 K.

10. Khối lượng của 2 phân tử tương ứng là 18 và 19. Xác suất đối với H_2O là exp(-67). Xác suất đối với HDO là exp[- 67(1 + 1/18)]. Tỷ số là exp(- 67/18) = exp(- 3,7) ≈ 1/40.

11. So sánh với câu hỏi 8, nhiệt độ thấp hơn, với một hệ số $(1/4)^{1/4}$ vì diện tích phát xạ là $4\pi R^2$ trong khi diện tích của Trái Đất tiếp xúc với ánh sáng mặt trời chỉ là πR^2, và nó cũng bị thấp hơn với một hệ số $(0,65)^{1/4}$ vì 35% của năng lượng tới bị phản xạ vào vũ trụ. Kết quả: $395 \times (0,16)^{1/4} = 253$.

CHƯƠNG VI :

1. Nếu bạn có khoảng 500 m thay cho 10 m, mọi thứ có thể là 50 lần lớn hơn, Mặt trời như một quả bóng nhỏ.

2. Bạn phải quan sát 4 đại lượng. Bạn phải đo chu kỳ quỹ đạo của Mộc Tinh xung quanh Mặt Trời. Nó dịch chuyển giữa các ngôi sao khoảng 1/12 của một vòng tròn sau mỗi năm. Với định luật 3 Kepler bạn có thể tính khoảng cách tới Mộc Tinh theo km. Bạn phải đo khoảng cách góc của một trong số các vệ tinh tính từ Mộc Tinh: Cùng với khoảng cách của Mộc Tinh, bạn thu được khoảng cách của vệ tinh tính từ Mộc Tinh theo km. Bạn phải đo chu kì quỹ đạo của vệ tinh chuyển động xung quanh Mộc Tinh bằng cách quan sát nó chuyển động xung quanh Mộc tinh từ đêm này qua đêm khác. Nếu lúc bấy giờ bạn áp dụng định luật 3 Kepler đối với Trái Đất chuyển động xung quanh Mặt Trời và vệ tinh chuyển động xung quanh Mộc Tinh, bạn thu được tỉ số giữa khối lượng Mộc Tinh và khối lượng Mặt Trời, và do đó, khối lượng của Mộc Tinh. Bạn phải đo đường kính góc của Mộc Tinh. Cùng với khoảng cách tới Mộc Tinh, bạn thu được bán kính của Mộc Tinh và có thể tính được mật độ trung bình.

3a. Phương trình chuyển động là: $d^2r/dt^2 = GM/r^2$, trong đó r(t) là bán kính của đám mây và vế phải là lực hấp dẫn ở bề mặt. Từ phương trình này, chúng ta thấy rằng G có thứ nguyên (khoảng cách)^3/khối lượng/(thời gian)^2. GM/r^3 chỉ liên quan tới thứ nguyên của thời gian, cụ thể là 1/(thời gian)^2. Nếu chỉ một tham số có thể được sử dụng, thì $G\rho$ là đại lượng thích hợp, với thứ nguyên 1/(thời gian)^2. Bởi vậy, $(G\rho)^{-1/2}$ có đơn vị của thời gian. Chúng ta ước tính: thời gian suy sụp = $(G\rho)^{-1/2}$. Chú ý: việc phân tích thứ nguyên là quan trọng vì nghiệm giải tích của phương trình vi phân với điều kiện ban đầu dr/dt = 0 là khá phức tạp.

3b. 4×10^4 năm. Xét về mặt toán học, đây là một sự ước tính khá tốt so với kết quả chính xác. Nhưng xét về mặt vật lí, đây là một sự ước tính rất không chắc chắn. Chúng ta không biết bán kính và mật độ ban đầu của sự suy sụp, chúng ta không biết rằng lực hấp dẫn khá trội hơn một sự đẩy từ một vụ nổ sao siêu mới ở gần và chúng ta không biết các hiệu ứng của sự quay và của các dòng điện và từ trường.

Answer to question 6: The oldest is crater c, partially destroyed by a younger crater that itself was partially destroyed by a younger crater. Either crater b or d may be the youngest. The picture does not give enough information to choose.

Answer to question 7: the age equals three half lives. 1/8 of the original atoms remains, 7/8 have decayed.

Answer to question V8: 395 K.

Answer to question V10: The two molecular weights are 18 and 19, respectively. The probability for H_2O is exp(-67). The probability for HDO is exp[−67(1 + 1/18)]. The ratio is exp(-67/18) = exp(-3.7) ~ 1/40 .

Answer to question V11: compared to question 8, the temperature is lower by a factor $(1/4)^{1/4}$ because the area of emission is $4\pi R^2$ while the Earth's area presented to sunshine is only πR^2, and it is also lower by a factor $(0.65)^{1/4}$ because 35% of the incoming energy is reflected into space. The result : $395 \times (0.16)^{1/4} = 253$.

ANSWERS TO CHAPTER VI

Answer to question 1: If you have about 500 m rather than 10 m , everything can be 50 times larger, the Sun a small ball, etc.

Answer to question 2: You must observe four quantities. You must measure the orbital period of Jupiter around the Sun : it moves among the stars roughly 1/12 of a full circle per year. With Kepler's third law you can compute the distance to Jupiter in km. You must measure the angular separation of one of the moons from Jupiter : together with Jupiter's distance you get the distance of the moon from Jupiter in km. You must measure the orbital period of the moon moving around Jupiter by watching it move around Jupiter from night to night. If you now apply Kepler's third law to the Earth moving around the Sun and to the moon moving around Jupiter, you get the ratio of Jupiter's mass to the Sun's mass, and thus Jupiter's mass. You must measure the angular diameter of Jupiter. Together with the distance to Jupiter, you get Jupiter's radius and can compute the average density.

Answer to question 3a: The equation of motion is $d^2r/dt^2 = GM/r^2$, where r(t) is the radius of the cloud and the right side is the surface gravity. From the equation, one sees that G has the dimension $(\text{distance})^3/\text{mass}/(\text{time})^2$. GM/r^3 involves only the dimension of time, namely $1/(\text{time})^2$. If only one parameter may be used, then $G\rho$ is the appropriate quantity, with the dimension of $1/(\text{time})^2$. Therefore, $(G\rho)^{-1/2}$ has the unit of time. We estimate: collapse time = $(G\rho)^{-1/2}$. Note: dimensional analysis is important because the analytical solution of the differential equation with the initial condition dr/dt = 0 is quite complicated.

Answer to question 3b: 4×10^4 years. Mathematically, this is a fairly good estimate compared to the exact result. But physically it is a very uncertain estimate . We do not know the initial radius and density of collapse, we do not know that gravity dominates rather than a push from a nearby supernova, and we do not know the effects of rotation and electrical currents and magnetic fields.

4. Khối lượng Mặt Trăng $7x10^{22}$ kg, bán kính $1,7x10^{3}$ km, mật độ $3,3x10^{3}$ kg/m^{3}. Mật độ nước đá gần bằng mật độ nước ở thể lỏng ở trên Trái Đất, 10^{3} kg/m^{3}. Kết quả: khoảng 40% đá, 60% nước đá.

6. Khối lượng của các đồng vị là khác nhau. Điều này có nghĩa rằng vận tốc nhiệt là khác nhau, và bởi vậy sự khuếch tán, sự bay hơi, sự thẩm thấu và các quá trình tương tự diễn ra với các tốc độ khác nhau.

7. Khối lượng 1,6 x 10^{13} kg, năng lượng 3 x 10^{21} j, tương đương với hàng ngàn quả bom lớn nhất.

CHƯƠNG VII :

A1. $300/1.5x10^{8} = 2x10^{-6}$ rad = 0.4"; không phân giải được.

A2. $g = GM/R^{2} = 2,7 \times 10^{2}$ m/s^{2} (Nhưng không có bề mặt phẳng để chúng ta có thể đứng trên đó).

$(2GM/R)^{1/2} = 6x10^{5}$ m/s. Ở khoảng cách 2 lần bán kính kể từ tâm, tốc độ thoát giảm 1,4 lần.

A3. Chúng ta có $\rho = pm_{p}/kT$ bởi vậy $dp/dz = -p/H$. Trong đó: $H = kT/gm_{p} = 180$km.

A5. Các vết đen mặt trời có nhiệt độ thấp hơn 10^{4} K và phát xạ chủ yếu ở vùng phổ khả kiến, có thể bỏ qua sự phát xạ ở vùng tia X.

A6.

a) $4\pi (1.5x10^{11})^{2} \times 1367 = 4x20^{26}$ W.

b) Mật độ năng lượng ở khoảng cách 1 đ.v.t.v là $(1/2).nm_{p}v^{2} = 1.3x10^{-9}$ J/m^{3}; thông lượng năng lượng gấp v lần mật độ năng lượng, bằng 5 x 10^{-4} w/m^{2}, diện tích là $4\pi(1đ.v.t.v)^{2} = 3x10^{23}$ m^{2}, kết quả là 1,5 x 10^{20} W, bé hơn 10^{-6} L. Ngược lại, gió Mặt trời có ảnh hưởng quan trọng lên Trái Đất!

B1. Với tốc độ khoảng 1,6 x 10^{3} km/s. Ngay cả Thiên hà cũng không làm giảm tốc độ của ông ta một cách đáng kể.

B2. $dM/dt = L/c^{2} = 5x10^{9}$ kg/s. Sau một ít năm, khối lượng mất mát tương đương với khối lượng của một ngọn núi lớn ở trên Trái Đất.

CHƯƠNG VIII :

A1. Hiệu chỉnh cho hiệu suất và khí quyển thu được 10^{11} photon/s. Năng lượng trung bình của mỗi photon là $h\nu = hc/\lambda = 4 \times 10^{-19}$ J. Năng lượng được nhận bởi kính thiên văn là 4 x 10^{-8} J/s. Đây là năng lượng đi qua một vòng tròn có bán kính 1 m. Để biết năng lượng đi qua một quả cầu có bán kính d, chúng ta phải nhân với hệ số $4\pi d^{2}/\pi r^{2}$. Khi d = 1,5 pc = 5 x 10^{16} m và r = 1 m, chúng ta thu được một hệ số 10^{34}. Độ trưng của ngôi sao là 4 x 10^{26} J/s, cỡ Lo. Những giá trị này xấp xỉ những giá trị của ngôi sao sáng ở gần chúng ta nhất là αCenA. (Ngôi sao ở gần Trái Đất nhất không phải là αCenA mà là một trong những bạn đồng hành của nó, tên là Proxima Centauri).

Answer to question 4: Moon mass $7x10^{22}$ kg, radius $1.7x10^{3}$ km, density $3.3x10^{3}$ kg/m^3. Water ice density is close to that of liquid water on Earth, 10^{3} kg/m^3. Result : About 40% rock, 60% ice.

Answer to question 6: The mass of the isotopes is different. That means the thermal velocity is different and, therefore, diffusion, evaporation, osmosis, and similar processes occur at different rates.

Answer to question 7: Mass $1.6x10^{13}$ kg, energy $3x10^{21}$ j, equivalent to thousands of the largest bombs.

ANSWERS TO CHAPTER VII:

Answer to question VIIA1: $300/1.5x10^{8} = 2x10^{-6}$ rad = 0.4" ; not resolved

Answer to question VIIA2: $g = GM/R^2 = 2.7x10^{2}$ m/s^2 (but there is no solid surface on which we can stand). $(2GM/R)^{1/2} = 6x10^{5}$ m/s. At twice the distance from the center, the escape speed is lower by a factor 1.4.

Answer to question VIIA3: We have $\rho = pm_p/kT$, so that $dp/dz = -p/H$ where $H = kT/gm_p = 180$km

Answer to question VIIA5: Sunspots have temperatures less than 10^{4} K and radiate mostly in the visible range, negligibly in the x-ray range.

Answer to question VIIA6: a) $4\pi(1.5x10^{11})^2 \times 1367 = 4x20^{26}$ watts. b) the energy density at 1 A.U. is $\frac{1}{2} nm_p v^2 = 1.3x10^{-9}$ j/m^3 ; the energy flux is v times the energy density, or $5x10^{-4}$ w/m^2, the area is $4\pi(1A.U.)^2 = 3x10^{23}$ m^2, and the product is $1.5x10^{20}$ w, less than 10^{-6} L. Nevertheless, the wind is an important influence on Earth!

Answer to question VIIB1: At about $1.6x10^{3}$ km/s, not even the Galaxy will slow him down much.

Answer to question VIIB2: $dM/dt = L/c^2 = 5x10^{9}$ kg/s. This amounts to the mass of a large mountain on Earth every few years.

ANSWERS TO CHAPTER VIII

Answer to question VIIIA1: Correcting for efficiency and atmosphere yields 10^{11} photons/sec. The average energy per photon is $h\nu = hc/\lambda = 4x10^{-19}$ j . The energy received by the telescope is $4x10^{-8}$ j/sec. This is the energy passing a circle of radius 1m. To get the energy passing a sphere of radius d, we must multiply by the factor $4\pi d^2/\pi r^2$. When d = 1.5 pc = $5x10^{16}$ m and r = 1 meter, we get a factor 10^{34}. The luminosity of the star is $4x10^{26}$ j/s, about Lo. These numbers are approximately those of the nearest bright star αCenA. (The nearest star to Earth is not αCenA but one of its companions, Proxima Centauri.)

A2: Không. Quỹ đạo này phải thực sự là một đường tròn, nhưng bị co ngắn để hiện ra như một elíp vì các quỹ đạo bị nghiêng đối với mặt phẳng bầu trời.

A3. Có, vì sự chênh lệch về khoảng cách vào cỡ đ.v.t.v, cỡ 10^{-5} khoảng cách thực.

A4. Cả hai, hấp dẫn là lực chiếm ưu thế.

A5. Với Mộc Tinh, $v^* = v(m_j/Mo) = 12$ m/s, P = 12 năm, $M^* = Mo$, và kết quả thực sự là $m = m_j$, r = 5,2 đ.v.t.v.

B1. L có thứ nguyên năng lượng/thời gian. Thang thời gian gần đúng là $GMo^2/RoLo = 10^{15}$ s = 3×10^7 năm.

B2. Hiện nay, Mặt Trời chắn một góc 0,5 °. Lúc đó, nó sẽ chắn một góc 50°, một phần lớn của bầu trời. Từ Thổ Tinh, khoảng $5°.100/(10)^2 = 1$. Thông lượng tại Thổ Tinh lúc đó bằng thông lượng tại Trái Đất hiện nay.

B3. Từ $M = (4\pi/3)\rho R^3$, $\rho = 1{,}5 \times 10^9$ kg/m^3, gấp $1{,}5 \times 10^6$ lần nước ở thể lỏng. Một cm^3 vật chất của sao trắt trắng mang tới Trái Đất cần một xe tải để vận chuyển nó. Lực hấp dẫn ở bề mặt sao trắt trắng vào khoảng 4×10^5 lần lực hấp dẫn ở bề mặt Trái Đất. Một người có thể nhảy cao 1 m ở trên Trái đất tiêu tốn cùng một năng lượng khi nhảy cao chỉ khoảng 2×10^{-6} m ở trên một sao trắt trắng.

B4. 10 s.

B5. Thể tích của mỗi neutron là $(4\pi/3)\ r^3 = 1.5 \times 10^{-45}$m^3. Nếu chúng ta bỏ qua phần không gian bé giữa các neutron thì mật độ số hạt của neutron là $0{,}7 \times 10^{45}$ m^{-3} và mật độ khối lượng của nó là 10^{18} kg.m^{-3}. Khối lượng của mặt bàn, có thể tích 10^{-2} m^3, là 10^{16} kg. Chúng ta hãy xem núi Everest (cao khoảng 8 km) có kích cỡ lí tưởng $20 \times 20 \times 6$ km^3 = $2{,}4 \times 10^{12}$ m^3. Khối lượng của nó vào khoảng 10^{16} kg. Hai khối lượng như nhau. Biết mật độ và khối lượng, thể tích của sao neutron là 4×10^{12} m^3, và bán kính của nó là 10 km, tương tự Hà nội. Gia tốc hấp dẫn ở bề mặt là $GM/R^2 = 2{,}7 \times 10^{12}$ ms^{-2}, rất lớn so với giá trị 10 ms^{-2} ở trên Trái Đất. Việc leo 8000 m trên núi Everest tương đương với việc leo 8×10^3m x $(10 / 3 \times 10^{12}) = 3 \times 10^{-8}$ m trên sao neutron, một độ cao bé hơn bước sóng của ánh sáng khả kiến. Vận tốc thoát là $(2GM/R)^{1/2} = 2{,}3 \times 10^8$ m/s, khoảng 3/4 c,bỏ qua các hiệu ứng tương đối tính.

B6. Mô men quán tính của một vật thể hình cầu đồng nhất là $I = 2/5\ MR^2$. Năng lượng quay là $E = (1/2)I\omega^2 = 2\pi^2\ I/P^2$,và $dE/dt = -8/5\ \pi^2\ MR^2\ (dP/dt) / P^3 = 1.2 \times 10^5$ Lo, rất gần với giá trị cần thiết.

B7. $4\ \pi^2 r/P^2 = GM/r^2$, hay $P = 3\pi/(G\rho)^{-1/2}$; rất giống nhau vì lực hấp dẫn xác định thang thời gian; P~10^{-3} s.

B8. Gọi vế phải của phương trình(8.11) là K. Với chứng minh thứ nhất, giá trị đã biết = K. Lấy vi phân của K. Bạn tìm thấy $dK/dM_2 > 0$ với M_1 = const và $dK/dM_1 < 0$ với M_2 = const. Bởi vậy, việc giữ K không thay đổi cần cả hai khối lượng tăng (hoặc cả hai khối lượng giảm). Với chứng minh thứ hai, tăng v_1 nghĩa là tăng K. Với M_1 đã biết, K lớn hơn đòi hỏi M_2 lớn hơn.

Answer to question VIIIA2: No. This orbit must really be a circle, but foreshortened to appear as an ellipse because the orbits are inclined to the plane of the sky.

Answer to question VIIIA3 : Yes, because the difference in the distances is of the order of A.U., of the order of 10^{-5} of the actual distance.

Answer to question VIIIA4: In both, gravity is the dominant force.

Answer to question VIIIA5 :For Jupiter, $v^* = v (m_J/Mo) = 12$ meters/s, P = 12 years, $M^* =$ Mo, and the result is indeed $m = m_J$, r = 5.2 A.U.

Answer to question VIIIB1: L has the dimension energy/time. The appropriate time scale is $GMo^2/RoLo = 10^{15}$ s = $3x10^7$ years.

Answer to question VIIIB2 : The Sun now occupies 0.5°. Then it will occupy 50 °, much of the sky. From Saturn, about 5 ° degrees. $100/(10)^2 = 1$. The flux at Saturn, then, is the same as at Earth now.

Answer to question VIIIB3: from $M = (4\pi/3)\rho R^3$, $\rho = 1.5x10^9$ kg/m^3, $1.5x10^6$ times liquid water. One cubic centimeter of white dwarf material brought to Earth needs a truck to carry it. The surface gravity is about $4x10^5$ times that on Earth. A person who can jump 1 m high on Earth spends the same energy on a white dwarf jumping only about $2x10^{-6}$ m high.

Answer to question VIIIB4 : 10 s.

Answer to question VIIIB5: the volume per neutron is $(4\pi/3)\ r^3 = 1.5x10^{-45}$ m^3. If we ignore the small amount of space between the neutrons, their number density is $0.7x10^{45}$ m^{-3} and the mass density is 10^{18} kg m^{-3}. The mass of the table top, volume 10^{-2} m^3, is 10^{16} kg. Let us idealize Mount Everest (height about 8km) in the form 20 x 20 x 6 km^3 = $2.4x10^{12}$ m^3. Its mass is about 10^{16} kg. The two masses are similar.

Given the density and the mass, the volume of the neutron star is $4x10^{12}$ m^3, and the radius is 10 km, similar to Hanoi. The surface gravity is $GM/R^2 = 2.7x10^{12}$ m s^{-2}, huge compared to 10 m s^{-2} on Earth. A climb of 8000 meters on Mt. Everest is equivalent to climbing $8x10^3$ m x $(10 / 3x10^{12}) = 3x10^{-8}$ m on the neutron star, a height less than the wavelength of visible light. The escape velocity is $(2GM/R)^{1/2} = 2.3x10^8$ m/s, about 3/4 c, neglecting relativistic effects.

Answer to question VIIIB6: The moment of inertia of a homogeneous spherical object is I = 2/5 MR^2. The rotational energy is $E = \frac{1}{2} I \omega^2 = 2\pi^2 I/P^2$, and $dE/dt = -8/5\ \pi^2 MR^2\ (dP/dt) / P^3 = 1.2x10^5$ Lo, very close to the needed value.

Answer to question VIIIB7: $4\pi^2 r/P^2 = GM/r^2$, or $P = 3\pi/(G\rho)^{-1/2}$; very similar because gravity determines the time scale ; P ~ 10^{-3} s.

Answer to question VIIIB8: Call the right side of equation (8.11) K. For the first proof, known value = K. Differentiate K. You find $dK/d M_2 > 0$ for constant M_1, and $dK/d M_1 < 0$ for constant M_2. Therefore, keeping K constant needs both masses increasing (or both decreasing). For the second proof, increasing v_1 means increasing K. For known M_1, larger K requires a larger M_2.

CHƯƠNG IX:

1. Miêu tả đĩa, chỗ lồi trung tâm và quầng. Các quan sát ở các bước sóng hồng ngoại và vô tuyến. Vì các sóng này truyền qua bụi một cách tự do hơn.

2. Vạch phổ Hα của nguyên tử hiđrô tương ứng với sự dịch chuyển giữa các mức năng lượng thấp nhất trong dãy Balmer. Nó được quan sát trong các vùng HII bị ion hoá bởi nhiệt.

3. Bức xạ synchrotron phi nhiệt, được quan sát chủ yếu ở vùng vô tuyến; nhưng nó cũng có thể được phát hiện ở vùng phổ khả kiến và tia X.

4. Tuổi được ước tính từ kích cỡ hiện nay của sao siêu mới và từ vận tốc giãn nở của nó là 100000 năm. Kết luận: trong quá khứ, vận tốc giãn nở lớn hơn. Tốc độ này giảm do áp suất tác động bởi môi trường giữa các sao bao quanh.

5. Ở điều kiện vật lí bình thường, một thể tích 22,4 lít không khí chứa $6x10^{23}$ phân tử (số Avôgađrô). Bởi vậy, 1 m^3 không khí chứa $3x10^{25}$ phân tử (chủ yếu là O_2 và N_2) giá trị này ~10^{18} lần mật độ trung bình của môi trường giữa các sao.

6. Khoảng 19 lần . Chúng ta biết rằng Mặt Trời hình thành 4,6 tỉ năm về trước, nó nằm cách tâm Thiên hà 8 kpc và dịch chuyển xung quanh tâm Thiên hà với tốc độ 200 km/s.

7. Giả sử rằng vỏ bao quanh sao có dạng cầu, luồng vật chất trong một đơn vị thời gian, ở khoảng cách r kể từ tâm của ngôi sao là $M' = 4\pi r^2 V n_{H_2} m_{H_2}$. Tốc độ mất mát khối lượng sau mỗi năm là $M' = 0.007\ M_\odot$/ năm.

8. Tính độ chênh lệch năng lượng ΔE giữa mức J = 1 và J = 0 và tìm thấy rằng tần số ν = 115,794 GHz. Sự phát xạ vạch CO xảy ra ở vùng bước sóng mi li mét.

CHƯƠNG X:

1. Tính vận tốc thoát (~130 km/s) và kết luận rằng thiên hà lùn là một vệ tinh quay xung quanh thiên hà khổng lồ ($G = 6.67 \times 10^{-11}\ Nm^2kg^{-2}$).

2. Các quasar này quả thực có mật độ vật chất rất lớn! Sự biến đổi ngắn của chúng nói lên rằng ánh sáng chỉ cần một ngày để đi từ phía sau tới phía trước của quasar. Tính khoảng cách của ánh sáng truyền đi trong một ngày. Khoảng cách này tương ứng với kích cỡ của quasar: 170 đ.v.t.v (170 lần khoảng cách từ Trái Đất đến Mặt Trời).

3. Bán kính của vành: $r = 1,2 \times 10^9$ km (hoặc 10^{-3} giây cung).

CHƯƠNG XI:

1. Với trường hợp a) v = 47400 km/s ; d = 730 Mpc.

   Với trường hợp b) v = 0.946 c ; d = 4366 Mpc.

2. Không! Giới hạn là kỉ nguyên Planck.

ANSWERS TO CHAPTER IX

Answer to question 1. Describe the disc, the central bulge and the halo. Observations in the infrared and at radio wavelengths. Because these waves propagate more freely through dust.

Answer to question 2. The Hα line of atomic hydrogen corresponds to the transition between the lowest energy levels in the Balmer series. It is observed in thermal ionized HII regions.

Answer to question 3. Non-thermal synchrotron radiation which is observed mainly in the radio range; but it can also be detected in the visible and in the X-ray spectral domain.

Answer to question 4. The age estimated from the current size of the supernova and from its current expansion velocity is 100 000 years. Conclusion: the expansion velocity was higher in the past, has decreased as a result of the pressure exerted by the surrounding interstellar medium.

Answer to question 5. Under normal physical conditions, a volume of 22.4 liters of air contains 6 x 10^{23} molecules (Avogadro number). Therefore, one cubic meter of air contains 3 x 10^{25} molecules (mainly O_2 and N_2). This value is ~ 10^{18} times the averaged density of the interstellar medium.

Answer to question 6. About 19 times. We know that the Sun was born 4.6 billion years ago, it is located at 8 kpc from the galactic center and moves around with a velocity of 200 km/s.

Answer to question 7. Assuming that the circumstellar envelope is spherical, the flow of matter per unit time at a distance r from the star center is : $M' = 4\pi r^2 V n_{H2} m_{H2}$. The mass loss rate per year is found to be $M' = 0.007\ M_\odot/yr$.

Answer to question 8. Calculate the energy difference ΔE between level J = 1 and J = 0 and find that the frequency ν = 115.794 GHz. This CO line emission is in the millimeter wavelength range.

ANSWERS TO CHAPTER X

Answer to question 1: Calculate the escape velocity (~ 130 km/s) and conclude that the dwarf galaxy is a satellite orbiting around the giant galaxy ($G=6.67 \times 10^{-11}\ Nm^2kg^{-2}$).

Answer to question 2: These quasars are very compact indeed ! Their short variability indicates that light takes only one day to move from the back side to the front side of the quasar. Calculate the distance that light travels in one day. This distance corresponds to the size of the quasar: 170 astronomical units (170 times the distance of Earth to the Sun).

Answer to question 3: The radius of the ring r = 1.2×10^9 km (or 10^{-3} arcsecond).

ANSWERS TO CHAPTER XI

Answer to question 1: For case a) : v = 47400 km/s ; d = 730 Mpc. For case b) : v = 0.946 c ; d = 4366 Mpc.

Answer to question 2: No! The limit is the Planck time.

3. COBE chỉ ra rằng bức xạ phông vũ trụ 2,7 K là không đồng nhất. Sự không đồng nhất ở quy mô lớn này phản ánh cấu trúc của Vũ trụ ở cuối kỉ nguyên tái hợp với độ dịch chuyển về phía đỏ z = 1000. Chúng là mầm mống của các thiên hà và các đám thiên hà.

4. Động năng = $mv^2/2$; thế năng = $m(4/3)\pi R^3\rho G/R$, m là khối lượng của lớp vỏ. Ở trạng thái cân bằng: $v^2/R^2 = 8\pi G\rho/3$ (với $H = v/R$); do đó $\rho = 8 \times 10^{-27} kg/m^3$. Vì Vũ trụ phẳng là ranh giới giữa Vũ trụ mở và Vũ trụ đóng, nên giá trị này của mật độ là mật độ tới hạn đối với sự đóng của Vũ trụ.

5. Vấn đề này đang được tranh cãi. Nhưng các quan sát về các sao siêu mới trong các thiên hà ở xa với các thế hệ mới của kính thiên văn quang học có kích thước lớn và kính thiên văn vũ trụ Hubble có xu hướng nói lên rằng Vũ trụ sẽ giãn nở mãi mãi.

6. Các pulsar mi li giây có lẽ là những pulsar già, được gia tốc tới một tốc độ quay lớn nhờ sự bồi tụ vật chất từ khí quyển của một ngôi sao đồng hành. Chu kì của các xung của chúng cực kì ổn định. Các pulsar mi li giây có thể được sử dụng để phát hiện các sóng hấp dẫn rất yếu. Bất cứ một sự thay đổi không dự kiến nào trong chu kì của một pulsar có thể phản ánh sự truyền các sóng hấp dẫn ở gần pulsar.

CHƯƠNG XII:

1. 8×10^{-20} W.

2. Công suất thu được từ trạm phát thanh bởi một máy thu ở cách 1000 km: $1,2 \times 10^{-5}$ W, nghĩa là $1,5 \times 10^{14}$ lần mạnh hơn tín hiệu vô tuyến được phát hiện trong một kính thiên văn vô tuyến.

3. Giới hạn phân giải của một kính thiên văn là $1,2\ \lambda/D$, λ là bước sóng quan sát được và D là đường kính của kính thiên văn. Độ phân giải của kính thiên văn Hubble là 0,05 giây cung ở $\lambda = 0,5\ \mu m$. Giá trị này thực sự là giới hạn nhiễu xạ của thiết bị. Độ phân giải này thực sự đạt được vì kính thiên văn vũ trụ Hubble được phóng ra ngoài khí quyển trái đất.

Answer to question 3: COBE has shown that the 2.7 K cosmic background radiation is inhomogeneous. These large scale inhomogeneities reflect the structure of the Universe at the end of the recombination era at redshift z = 1000. They are the seeds of galaxies and clusters of galaxies.

Answer to question 4: Kinetic energy = $mv^2/2$; potential energy = $m(4/3)\pi R^3\rho G/R$, m is the mass of the shell. This gives at equilibrium : $v^2/R^2 = 8\pi G\rho/3$ (with $H = v/R$); then $\rho = 8 \times 10^{-27}$ kg/m^3. Since the flat Universe is the borderline case between the open Universe and the closed Universe, this value of density is the critical density for closure the Universe.

Answer to question 5: This issue is still debated. But observations of supernovae in distant galaxies with a new generation of large telescopes and the Hubble Space Telescope tend to suggest that the Universe will expand for ever.

Answer to question 6: Millisecond pulsars are probably old pulsars which are accelerated to a high rotation speed by accreting the matter from the atmosphere of a companion star. The periods of their pulses are extremely stable. Millisecond pulsars could be used to detect the very weak gravitational waves. Any unexpected change of the period of a pulsar may reflect the propagation of these waves near the pulsar.

ANSWERS TO CHAPTER XII

Answer to question 1: 8×10^{-20} w.

Answer to question 2: Power received from the broadcasting station by a receiver at 1000 km away: 1.2×10^{-5}w , that is 1.5×10^{14} times stronger than the radio signal detected in a radio telescope.

Answer to question 3: The resolution limit of a telescope is $1.2\ \lambda/D$, λ is the observed wavelength and D is the diameter of the telescope. The resolution of the Hubble Telescope is 0.05 arcsecond at $\lambda = 0.5$ μm. This value is actually the diffraction limit of the instrument. This resolution is actually achieved because the Hubble Space Telescope is launched outside the Earth's atmosphere.

CÁC PHỤ LỤC - APPENDIXS

Phụ lục 1 : Các hằng số thiên văn
Appendix 1 : Astronomical Constants

Astronomical Unit *	1 Au.	$= 1.49597870 \times 10^{11}$ m
Solar parallax *	$\pi_\odot$	= 8.794148 arc sec
Parsec	1 pc	$= 3.086 \times 10^{16}$ m
		= 206264.806 A.U.
		= 3.261633 ly
Light year	1 ly	$= (9.460530) \times 10^{15}$ m
		$= 6.324 \times 10^{4}$ A.U.
Tropical year (1900)* – (equinox to equinox)		= 365.24219878 ephemeris days
Julian century *		= 36525 days
Day*		= 86400 sec
Sidereal year		= 365.256366 ephemeris days
		$= (3.155815) \times 10^{7}$ sec
Mass of sun *	$M_\odot$	$= (1.9891) \times 10^{30}$ kg
Radius of sun *	$R_\odot$	= 696000 km
Luminosity of sun	$L_\odot$	$= 3.827 \times 10^{26}$ J/sec
Mass of earth *	M_E	$= (5.9742) \times 10^{24}$ kg
Equatorial radius of earth *	R_E	= 6,378.140 km
Center of earth to center of moon (mean)		= 384403 km
Radius of moon *	R_M	= 1738 km
Mass of moon *	M_M	$= 7.35 \times 10^{22}$ kg
Solar constant	S	$= 1368$ W/m^2
Direction of galactic center (2000.0 precession)	α	$= 17^h45.6^m$
	δ	$= -28^o56'.$

Phụ lục 2 : Các hành tinh

Appendix 2 : The Planets

Intrinsic and Rotational Properties

Name	Equatorial Radius *Km*	Equatorial Radius ÷ Earth's	Mass ÷ Earth's	Mean Density (g/cm^3)	Oblateness	Surface Gravity (Earth=1)	Sidereal Rotation Period	Inclination of Equator to Orbit	Apparent Magnitude During 1994
Mercury	2,439	0.3824	0.0553	5.43	0	0.378	58.646^d	0.0^o	–2.0 to +4.9
Venus	6,052	0.9489	0.8150	5.24	0	0.894	243.01^d R	177.3	–4.6 to –3.9
Earth	6,378.140	1	1	5.515	0.0034	1	$23^h56^m04.1^s$	23.45	–
Mars	3,393.4	0.5326	0.1074	3.94	0.005	0.379	$24^h37^m22.662^s$	25.19	–0.4 to +1.2
Jupiter	71,398	11.194	317.896	1.33	0.064	2.54	9^h50^m to> 9^h55^m	3.12	-2.5 to -1.7
Saturn	60,000	9.41	95.185	0.70	0.108	1.07	$10^h39.9^m$	26.73	+0.5 to +1.1
Uranus	25,559	4.0	14.537	1.30	0.03	0.8	7^h14^m	97.86	+5.6 to +5.8
Neptune	24,764	3.9	17.151	1.64	0.017	1.2	16^h7^m	29.56	+7.9 to +8.0
Pluto	1,150	0.2	0.0025	2.13	?	0.01	$6^d9^h17^m$	120	+13.7 to+13.8

Orbital Properties

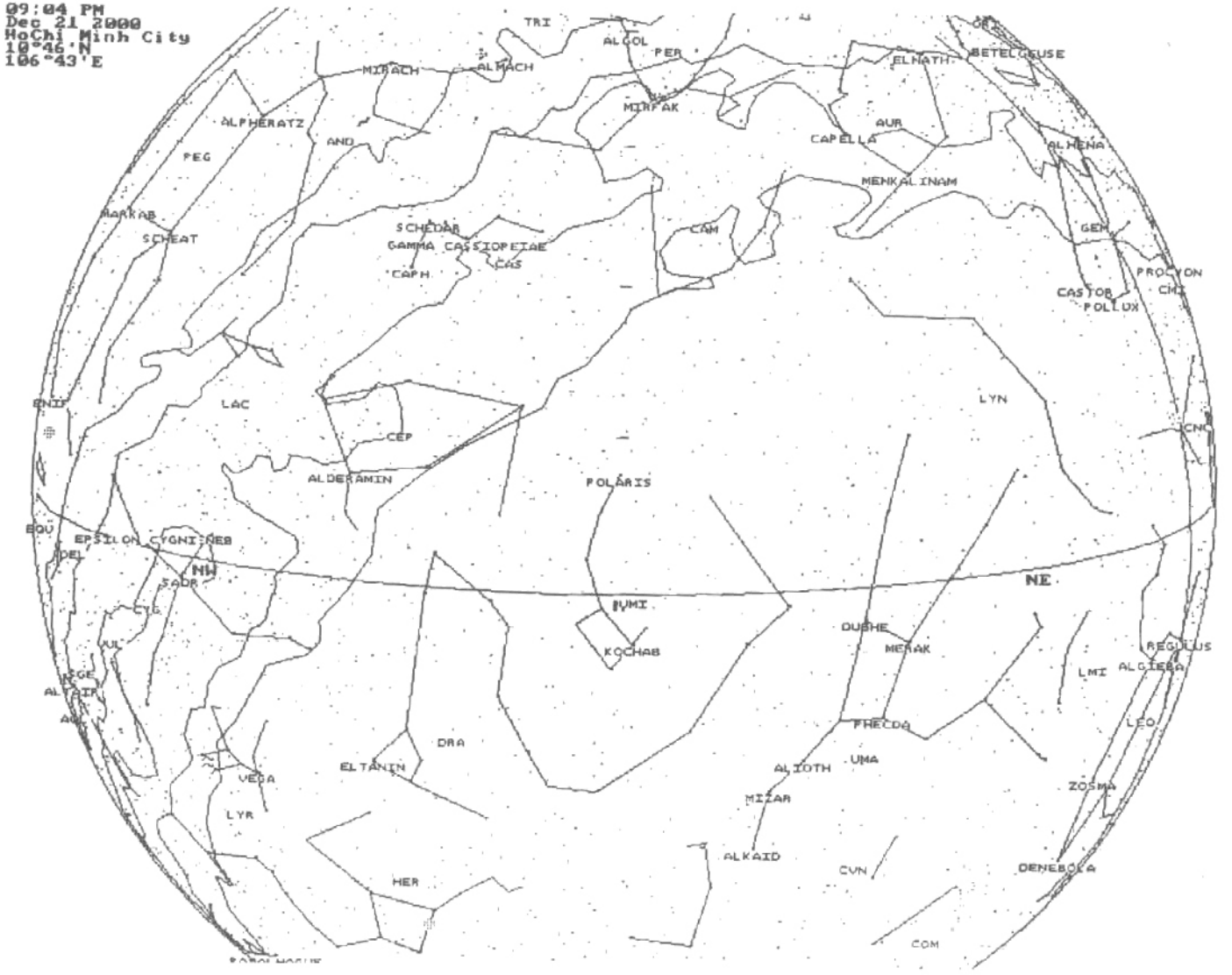
Name	Semimajor Axis		Sidereal Period		Synodic Period (Days)	Eccentricity	Inclination to Ecliptic
	A.U.	10^6 km	Years	Days			
Mercury	0.3871	57.9	0.24084	87.96	115.9	0.2056	7°00'26"
Venus	0.7233	108.2	0.61515	224.68	584.0	0.0068	3°23'40"
Earth	1	149.6	1.00004	365.25	–	0.0167	0°00'14"
Mars	1.5237	227.9	1.8808	686.95	779.9	0.0934	1°51'09"
Jupiter	5.2028	778.3	11.862	4,337	398.9	0.0483	1°18'29"
Saturn	9.5388	1427.0	29.456	10,760	378.1	0.0560	2°29'17'
Uranus	19.1914	2871.0	84.07	30,700	369.7	0.0461	0°48'26"
Neptune	30.0611	4497.1	164.81	60,200	367.5	0.0100	0°46'27"
Pluto	39.5294	5913.5	248.53	90,780	366.7	0.2484	17°09'03"

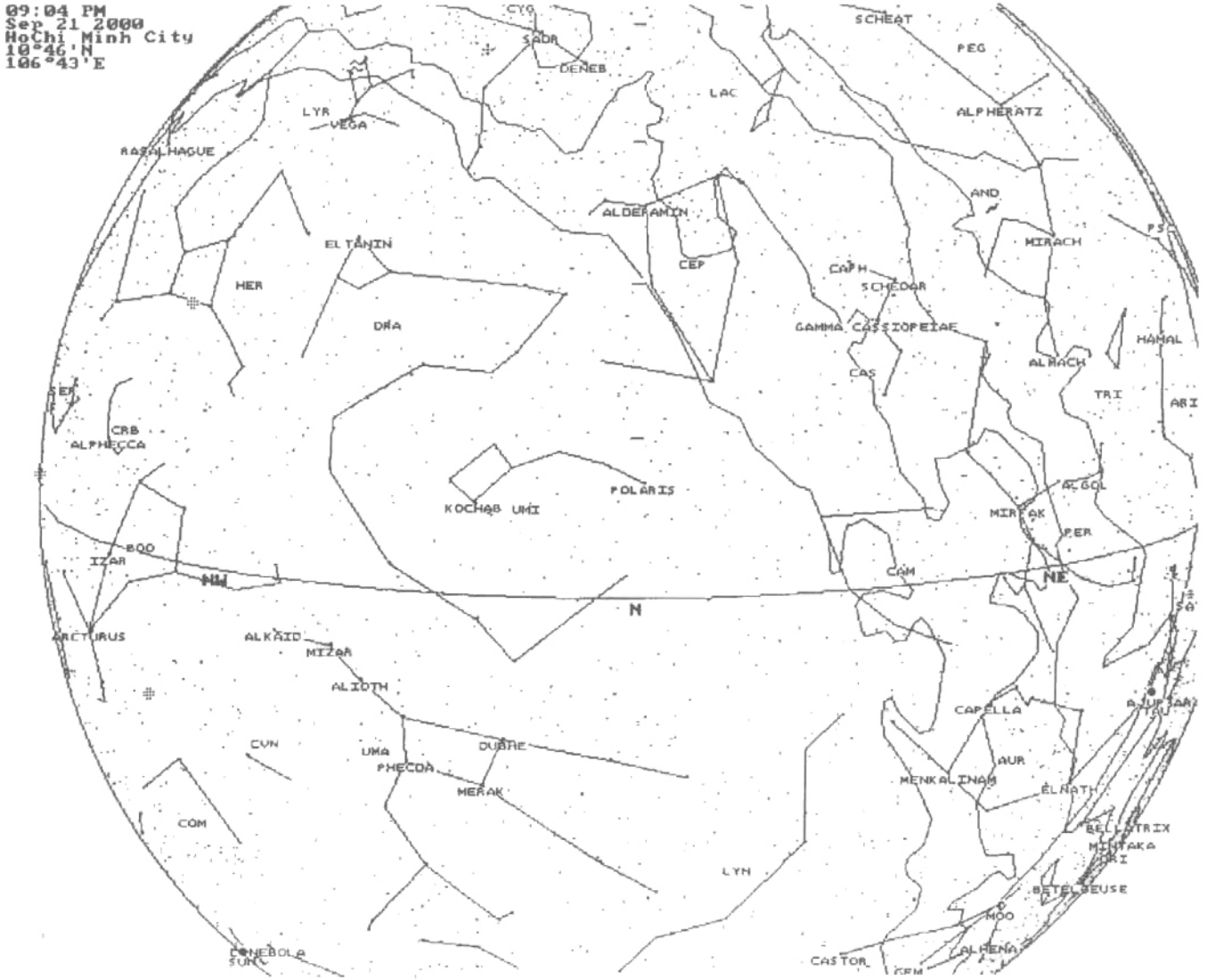
Phụ lục 3 : Các vệ tinh của hành tinh
Appendix 3 : Planetary Satellites

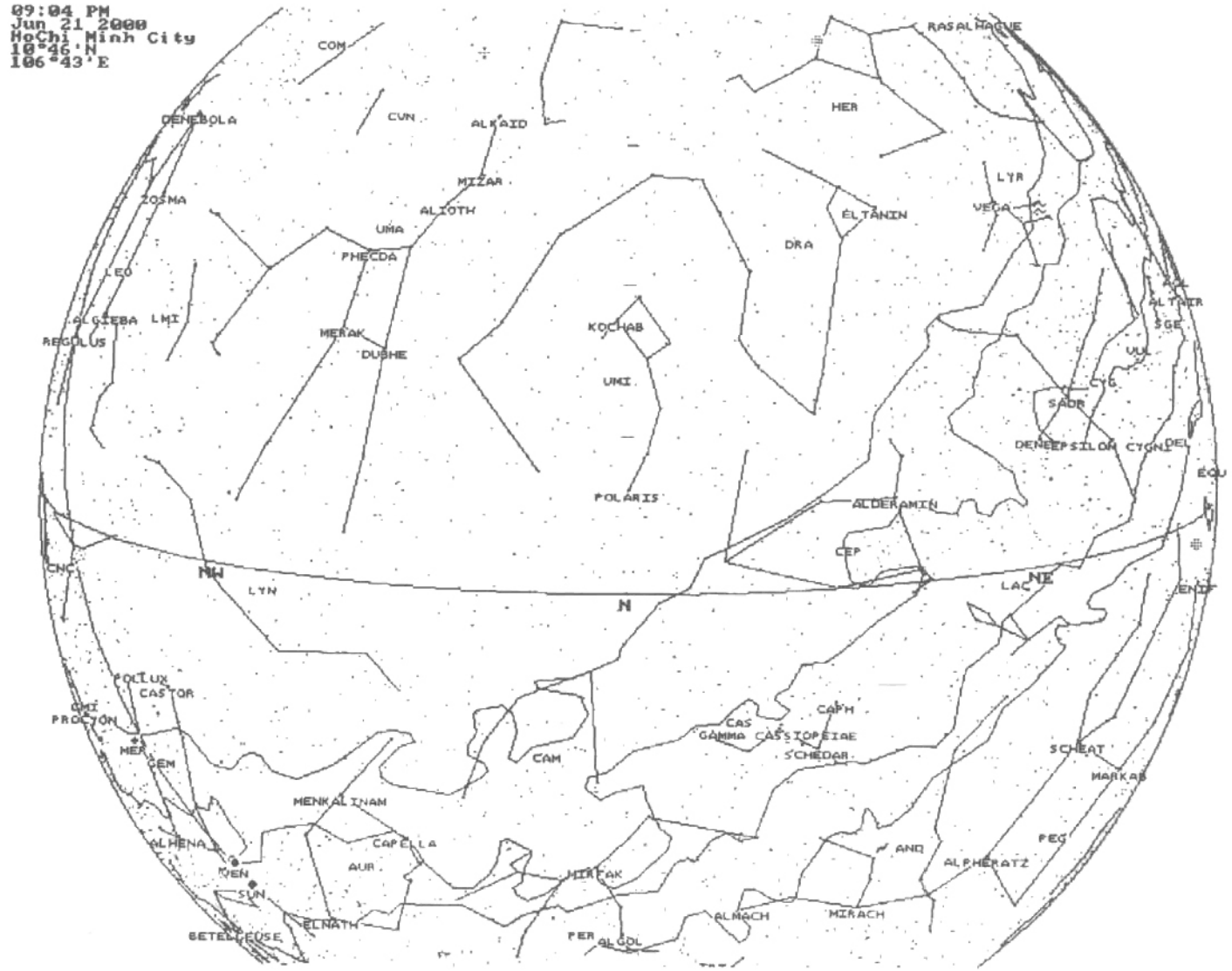
Satellite		Semimajor Axis of Orbit (*km*)	Sidereal Evolution Period (*d h m*)	Orbital Eccentricity	Orbital Inclination (°)	Radius (*km*)	Mass ÷ Mass of Planet	Mean Density (g/cm^3)	Discoverer	Visible Magnitude at Mean Opposition Distance
Satellite of the Earth										
	The Moon	384,400	27 07 43	0.055	18-29	1738	0.01230002	3.34	–	–12,7
Satellites of Mars										
1	Phobos	9,378	0 07 39	0.015	1.1	14 × 11 × 9	1.5×10^{-8}	1.95	Hall (1877)	11.8
2	Deimos	23,459	1 06 18	0.0005	0.9-2.7	8 × 6 × 6	3×10^{-8}	2	Hall (1877)	12.9
Satellites of Jupiter										
XVI	Metis	127,960	0 07 04			20	0.5×10^{-10}		Synnott/Voyager 2 (1980)	17.5
XV	Adrastea	128,980	0 07 06			13 × 10 × 8	0.1×10^{-10}		Jewett/Danielson(1979)	19.1
V	Amalthea	180,000	0 11 57	0.003	0.4	135 × 83 × 75	38×10^{-10}		Barnard (1892)	14.1
XIV	Thebe	222,000	0 16 11	0.015	0.8	55 × 45	4×10^{-10}		Synnott/Voyager 1 (1980)	15.6
I	Io	422,000	1 18 28	0.004	0.0	1815	4.68×10^{-5}	3.5	Galileo (1610)	5.0
II	Europa	671,000	3 13 14	0.009	0.5	1569	2.52×10^{-5}	3.0	Galileo (1610)	5.3
III	Ganymede	1,070,000	7 03 43	0.002	0.2	2631	7.80×10^{-5}	1.9	Galileo (1610)	4.6
IV	Callisto	1,883,000	16 16 32	0.007	0.5	2400	5.66×10^{-5}	1.8	Galileo (1610)	5.6
XIII	Leda	11,094,000	240	0.148	26.1	8	0.03×10^{-10}		Kowal (1974)	20
VI	Himalia	11,480,000	251	0.158	27.6	90	50×10^{-10}		Perrine (1904)	14.7
X	Lysithea	11,720,000	260	0.107	29.0	20	0.4×10^{-10}		Nicholson (1938)	14.8
VII	Elara	11,740,000	260	0.207	24.8	40	4×10^{-10}		Perrine (1905)	14.8
XII	Ananka	21,200,000	671R	0.169	147	15	0.2×10^{-10}		Nicholson (1951)	18.9
XI	Carme	22,600,000	692R	0.207	164	20	0.5×10^{-10}		Nicholson (1938)	18.0
VIII	Pasiphae	23,500,000	735R	0.378	145	20	1×10^{-10}		Melotte (1908)	17.0
IX	Sinope	23,700,000	758R	0.275	153	20	0.4×10^{-10}		Nicholson (1914)	18.3
									Kowal (1975)	20

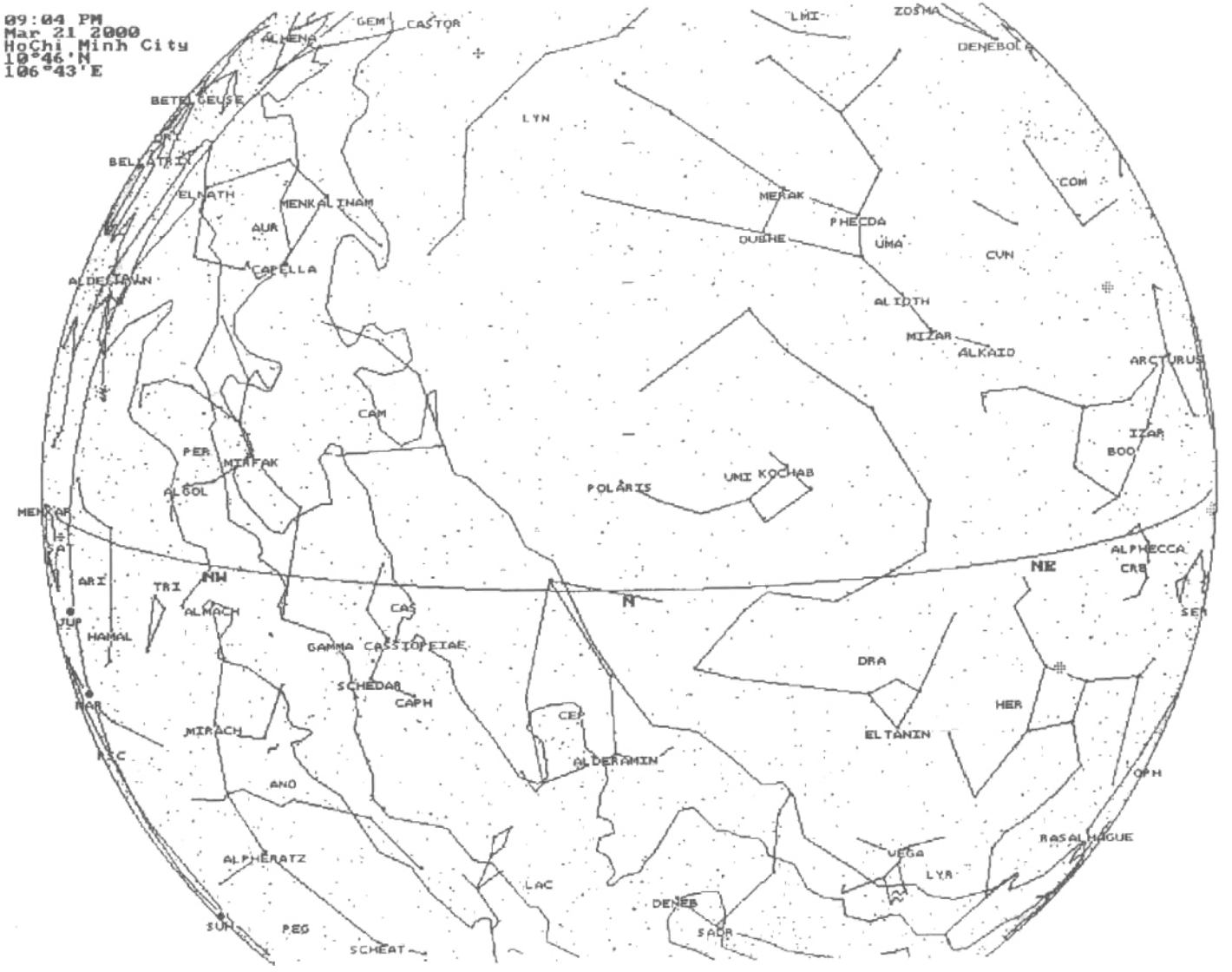
Satellites of Saturn												
	Pan	133,583		13	48			10	8×10^{-12}		Showalter/Voyager 2 (1990)	
15	Atlas	137,670		14	27	0.000	0.3	20×10			Terrile/Voyager 1	17
16	Prometheus	139,353		14	43	0.003	0.0	$70 \times 50 \times 40$			Collins/Voyager 1	16
17	Pandora	141,700		15	05	0.004	0.0	$55 \times 45 \times 35$			Collins/Voyager 1	16
11	Epimetheus	151,400		16	40	0.009	0.3	$70 \times 60 \times 50$			Fountain, Larson/ Reitsema/Smith	14
10	Janus	151,500		16	40	0.007	0.1	$110 \times 100 \times 80$			Dollfus (1966/80)	15
1	Mimas	185,500		22	37	0.020	1.5	195	8×10^{-8}	1.2	W.Herschel (1789)	12.9
2	Enceladus	238,000	1	08	32	0.005	0.0	250	1.3×10^{-7}	1.1	W.Herschel (1789)	11.7
3	Tethys	294,700	1	22	15	0.000	1.9	530	1.3×10^{-6}	1.0	Cassini (1684)	10.2
13	Telesto	294,700	1	22	15			$17 \times 14 \times 13$			Smith, Reitsema, Larson, Fountain (1980)	19
14	Calypso	294,700	1	22	15			$17 \times 11 \times 11$			Pascu, Seidelmann, Baum, Currie (1980)	19
4	Dione	377,400	2	17	36	0.002	0.0	560	19×10^{-6}	1.4	Cassini (1684)	10.4
12	Helene	377,400	2	17	45	0.005	0.0	$18 \times 16 \times 15$			Laques and Lecacheux (1980)	19
5	Rhea	527,000	4	12	16	0.001	0.4	765	4.4×10^{-6}	1.3	Cassini (1672)	9.7
6	Titan	1,221,800	15	21	51	0.029	0.3	2575	2.4×10^{-4}	1.9	Huyghen (1665)	8.3
7	Hyperion	1,481,000	21	06	45	0.104	0.4	$205 \times 130 \times 110$	3×10^{-8}	1.9	Bond, Bond, Lasell (1848)	14.2
8	Iapetus	3,561,300	79	03	43	0.028	14.7	730	3.3×10^{-6}	1.2	Cassini (1671)	11.1
9	Phoebe	12,952,000	549	03	33	0.163	177	110	7×10^{-10}		W.Pickering (1898)	16.5

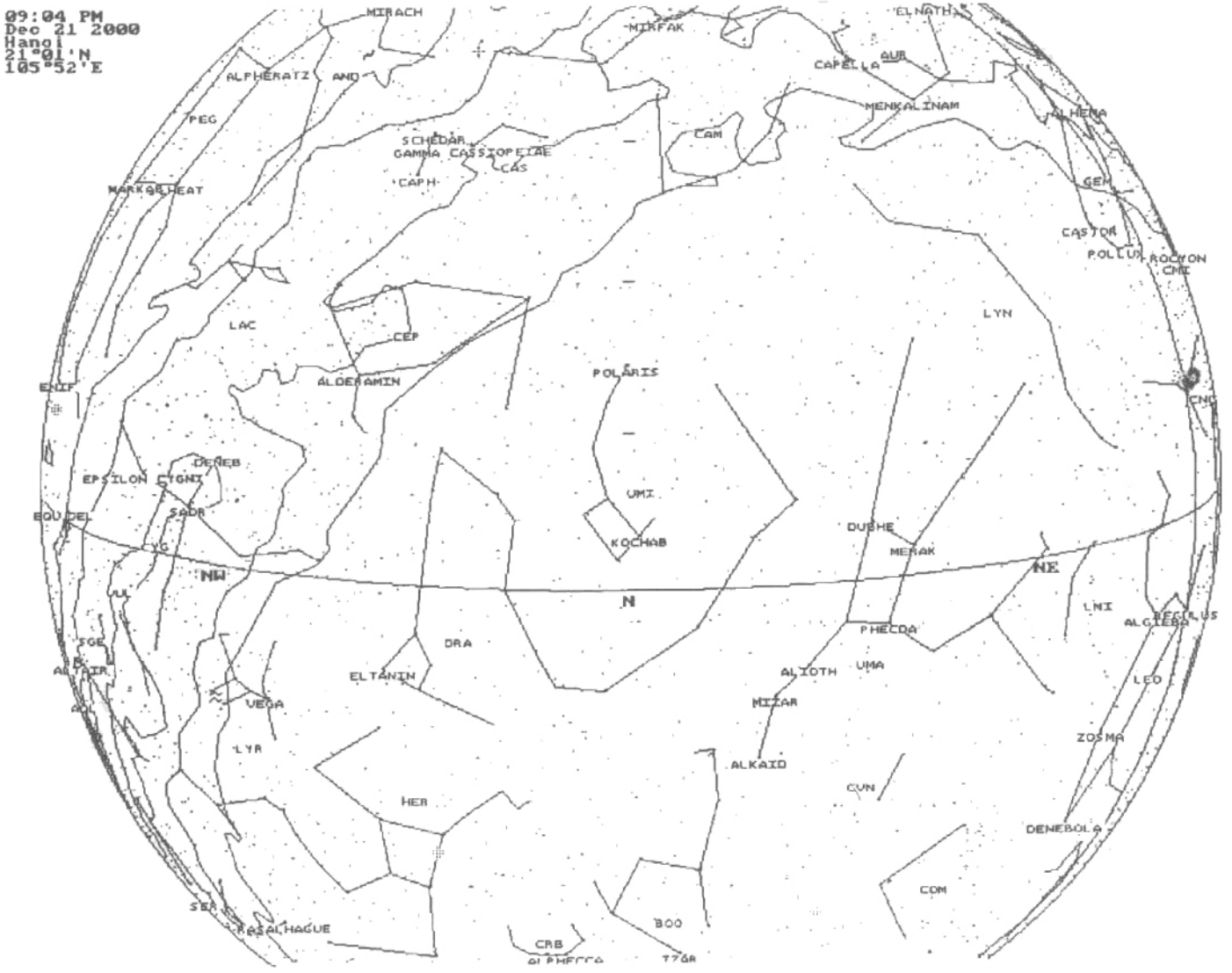
Satellites of Uranus												
	Cordelia	49,771		08	02	<0.001	0.3	25			Terrile/Voyager 2 (1986)	
	Ophelia	53,796		09	02	0.01	<0.5	25			Terrile/Voyager 2 (1986)	
	Bianca	59,173		10	25	<0.001	0.2	25			Voyager 2 (1986)	
	Cressida	61,777		11	07	<0.0001	0.2	30			Synnott/Voyager 2 (1986)	
	Desdemona	62,676		11	22	<0.0001	0.2	30			Synnott/Voyager 2 (1986)	
	Juliet	64,352		11	50	0.001	<0.2	40			Synnott/Voyager 2 (1986)	
	Portia	66,085		12	19	<0.005	<0.2	40			Synnott/Voyager 2 (1986)	
	Rosalind	69,942		11	54	<0.0005	0.4	30			Synnott/Voyager 2 (1986)	
	Belinda	75,258		14	57	<0.003	0.1	25			Synnott/Voyager 2 (1986)	
	Puck	86,000		18	17	<0.0003	0.3	85			Synnott/Voyager 2 (1985)	
5	Miranda	129,783	1	09	56	0.003	3.4	240	0.2×10^{-5}	1.26	Kuiper (1948)	16.5
1	Ariel	191,239	2	12	29	0.003	4.2	579	1.8×10^{-5}	1.65	Lassell (1851)	14.4
2	Umbriel	265,969	4	03	27	0.005	0.4	586	1.2×10^{-5}	1.44	Lassell (1851)	15.3
3	Titania	435,844	8	16	56	0.002	0.1	790	6.8×10^{-5}	1.59	W.Herchel (1787)	14.0
4	Oberon	582,596	13	11	07	0.001	0.1	762	6.9×10^{-5}	1.50	W. Herchel (1787)	14.2
Satellites of Neptune												
N6	Naiad	48,230		7				25			Voyager 2 (1989)	
N5	Thalassa	50,070		7	30			40			Synnott/Voyager 2 (1989)	
N3	Despina	52,530		8				75			Synnott/Voyager 2 (1989)	
N4	Galatea	61,950		10				90			Synnott/Voyager 2 (1989)	
N2	Larissa	73,550		13				95			Reisema, Hubbard/Lebofsky, Tholen/Voyager 2 (1989)	
N1	Proteur	117,640		27				200			Synnott/Voyager 2 (1989)	
	Triton	354,800	5	21	03R	10^{-5}	157	1350	1×10^{-3}	2.07	Lassell (1846)	13.7
	Nereid	5,513,400	360	5		0.75	7.2	170	2×10^{-7}	2.03	Kuiper (1949)	18.7
Ring and ring arcs of Neptune												
	Galle	41,900										
	Leverrier	53,200										
	Adams	62,900										
	Liberté	62,900										
	Egalié	62,900										
	Fraternié	62,900										
Satellite of Pluto												
	Charon	19,405	6	9	17R	0?	96.6	590	0.08		Christy 91978)	17

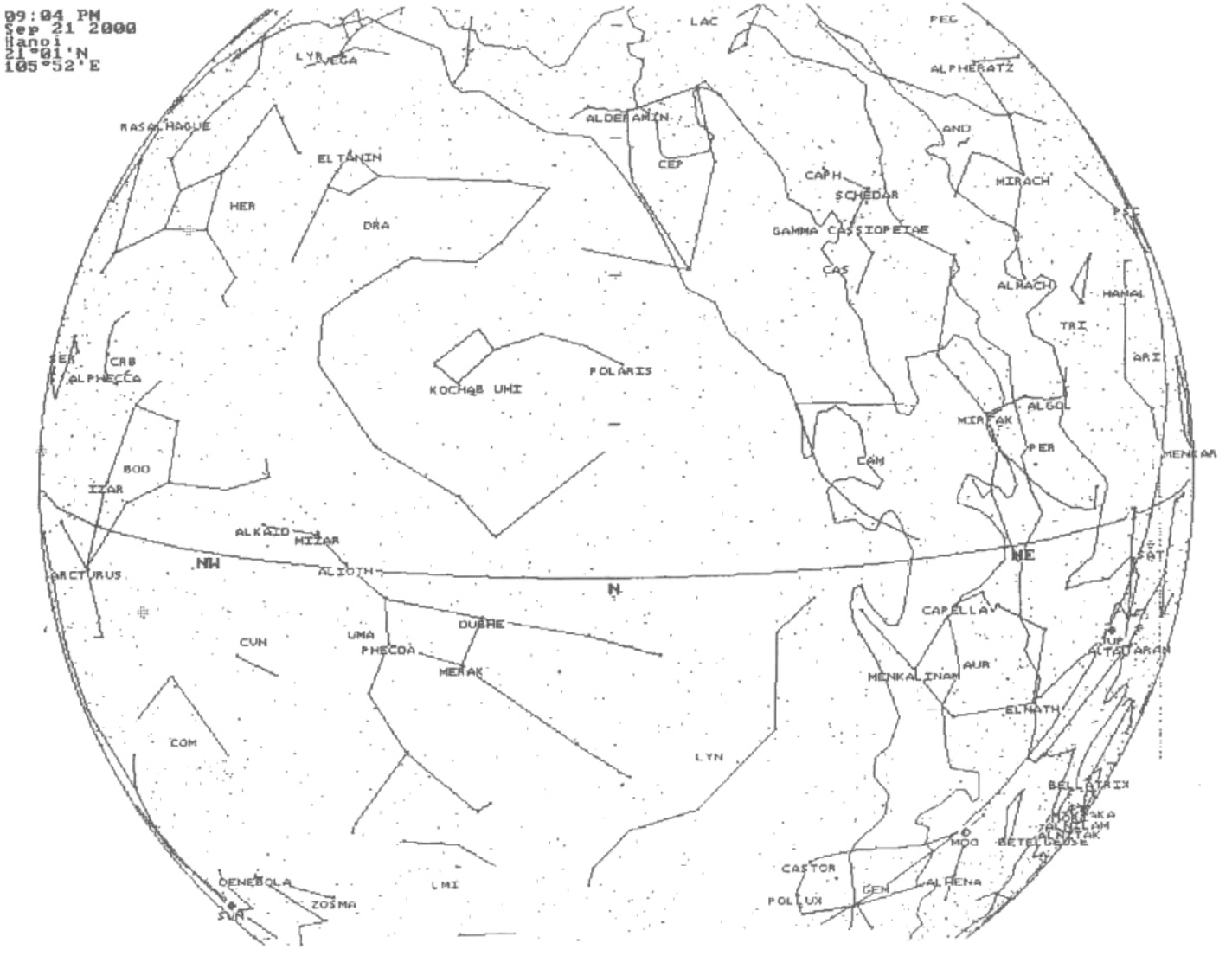

09:04 PM
Dec 21 2000
HoChi Minh City
10°46'N
106°43'E
TRI
ALGOL
PER
BETELGEUSE
ELNATH
MIRACH
ALMACH
MIRFAK
ALPHERATZ
AND
AUR
CAPELLA
ALHENA
PEG
MENKALINAM
MARKAB
SCHEAT
SCHEDAR
GAMMA CASSIOPEIAE
CAS
CAPH
CAM
GEM
PROCYON
CMI
CASTOR
POLLUX
LAC
LYN
CNC
CEP
ALDERAMIN
POLARIS
EQU
EPSILON CYGNI:NEB
DEL
NW
SADR
NE
CYG
UMI
DUBHE
MERAK
KOCHAB
REGULUS
ALGIEBA
LMI
LEO
PHECDA
DRA
ELTANIN
ALIOTH
UMA
VEGA
ZOSMA
MIZAR
LYR
ALKAID
CVN
DENEBOLA
HER
COM

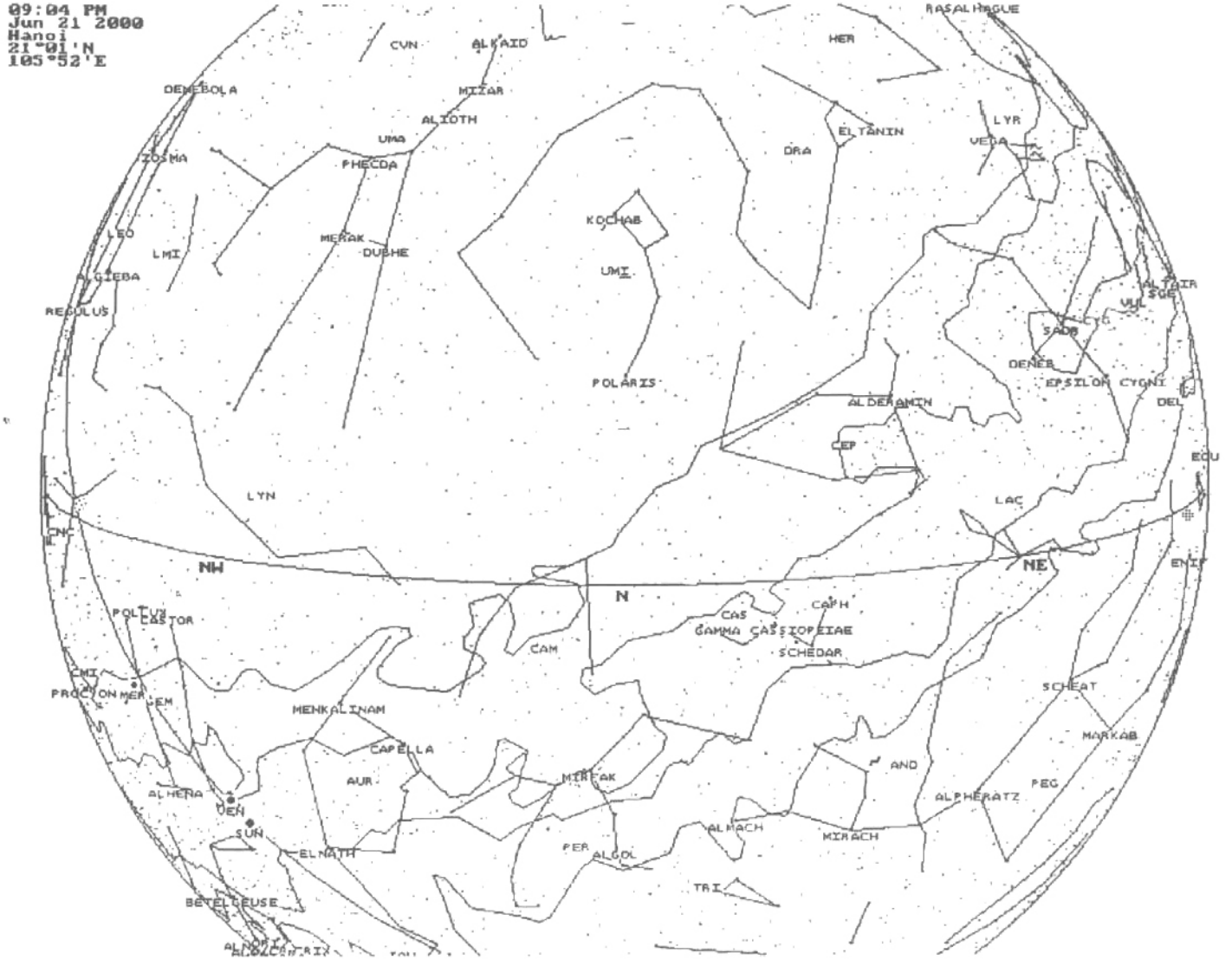

09:04 PM
Sep 21 2000
HoChi Minh City
10°46'N
106°43'E
CYG
SADR
DENEB
LAC
SCHEAT
PEG
ALPHERATZ
LYR
VEGA
RASALHAGUE
AND
ALDERAMIN
MIRACH
ELTANIN
CEP
CAPH
SCHEDAR
HER
DRA
GAMMA CASSIOPEIAE
HAMAL
ALMACH
CAS
TRI
ARI
CRB
ALPHECCA
KOCHAB UMI
POLARIS
ALGOL
MIRFAK
PER
BOO
IZAR
COM
NW
NE
N
ARCTURUS
ALKAID
MIZAR
ALIOTH
CAPELLA
CVN
UMA
DUBHE
PHECDA
MERAK
AUR
MENKALINAN
ELNATH
COM
LYN
BELLATRIX
MINTAKA
BETELGEUSE
MOO
CANEBOLA
CASTOR
ALHENA


09:04 PM
Jun 21 2000
HoChi Minh City
10°46'N
106°43'E
COM
CVN
DENEBOLA
ALKAID
HER
RASALHAGUE
MIZAR
ZOSMA
ALIOTH
LYR
VEGA
ELTANIN
UMA
DRA
PHECDA
LEO
ALGIEBA
LMI
REGULUS
MERAK
DUBHE
KOCHAB
UMI
ALTAIR
SGE
VUL
CYG
SADR
DENEBSILOR
CYGNI
DEL
EQU
POLARIS
ALDERAMIN
CEP
CNC
NW
LYN
N
LAC
NE
ENIF
POLLUX
CASTOR
GMI
PROCYON
MEB
GEM
CAPH
CAS
GAMMA CASSIOPEIAE
SCHEDAR
CAM
SCHEAT
MARKAB
MENKALINAN
ALHENA
CAPELLA
AUR
VEN
SUN
MIRFAK
AND
PEG
ALPHERATZ
ALMACH
MIRACH
ELNATH
BETELGEUSE
PER
ALGOL


09:04 PM
Mar 21 2000
HoChi Minh City
10°46'N
106°43'E
GEM
CASTOR
ALHENA
BETELGEUSE
ORI
BELLATRIX
ELNATH
MENKALINAN
AUR
CAPELLA
ALDEBARAN
LMI
ZOSMA
DENEBOLA
LYN
COM
MERAK
PHECDA
DUBHE
UMA
CVN
ALIOTH
MIZAR
ALKAID
ARCTURUS
IZAR
BOO
CAM
PER
MIRFAK
ALGOL
POLARIS
UMI
KOCHAB
MENKAR
CET
ARI
TRI
NW
N
NE
ALPHECCA
CRB
SER
ALMACH
CAS
JUP
HAMAL
GAMMA CASSIOPEIAE
SCHEDAR
CAPH
DRA
HER
MAR
MIRACH
ELTANIN
PSC
CEP
ALDERAMIN
OPH
ANO
RASALHAGUE
ALPHERATZ
VEGA
LYR
LAC
DENEB
SUH
PEG
SADR
SCHEAT


09:04 PM
Dec 21 2000
Hanoi
21°01'N
105°52'E
MIRACH
ALPHERATZ
AND
PEG
MARKAB
SCHEDAR
GAMMA CASSIOPEIAE
CAS
CAPH
MIRFAK
ELNATH
AUR
CAPELLA
MENKALINAN
ALHENA
CAM
GEM
CASTOR
POLLUX
PROCYON
CMI
LAC
CEP
ALDERAMIN
POLARIS
LYN
ENIF
CNC
DENEB
EPSILON CYGNI
SADR
EQU DEL
VG
NW
N
NE
UMI
KOCHAB
DUBHE
MERAK
VUL
LNI
ALGIEBA
REGULUS
PHECDA
SGE
DRA
ALTAIR
ELTANIN
ALIOTH
UMA
LEO
VEGA
MIZAR
LYR
ZOSMA
ALKAID
HER
CVN
DENEBOLA
COM
SER
RASALHAGUE
CRB
BOO
TYGA


09:04 PM
Sep 21 2000
Hanoi
21°01'N
105°52'E
LAC
PEG
ALPHERATZ
LYR
VEGA
RASALHAGUE
ALDERAMIN
AND
ELTANIN
CEP
CAPH
SCHEDAR
MIRACH
HER
DRA
GAMMA CASSIOPEIAE
CAS
ALRACH
HAMAL
TRI
ARI
SER
CRB
ALPHECCA
KOCHAB
UMI
POLARIS
ALGOL
MIRFAK
PER
CAM
MENKAR
BOO
IZAR
ALKAID
MIZAR
NW
NE
ARCTURUS
ALIOTH
N
CAPELLA
SAT
TUP
ALTAIR
AUR
MENKALINAN
ELNATH
DUBHE
UMA
CVN
PHECDA
MERAK
COM
LYN
BELLATRIX
MOO
BETELGEUSE
CASTOR
GEM
ALHENA
POLLUX
LMI
DENEBOLA
ZOSMA
SVA


09:04 PM
Jun 21 2000
Hanoi
21°01'N
105°52'E
CVN
ALKAID
HER
RASALHAGUE
DENEBOLA
MIZAR
ALIOTH
UMA
PHECDA
DRA
ELTANIN
LYR
VEGA
ZOSMA
LEO
LMI
MERAK
DUBHE
KOCHAB
UMI
POLARIS
GIEBA
REGULUS
ALTAIR
SGE
VUL
SADR
DENEB
EPSILON CYGNI
DEL
ALDERAMIN
CEP
ECU
LAC
LYN
CNC
NW
N
NE
ENIF
POLLUX
CASTOR
CAPH
CAS
GAMMA CASSIOPEIAE
SCHEDAR
CAM
PROCYON
MEN
GEM
MENKALINAN
SCHEAT
MARKAB
CAPELLA
AUR
AND
MIRFAK
ALPHERATZ
PEG
ALHENA
SUN
ALMACH
MIRACH
ELNATH
PER
ALGOL
TRI
BETELGEUSE

09:04 PM
Mar 21 2000
Hanoi
21°01'N
105°52'E
LYN
DENEBOLA
MERAK
DUBHE
PHECDA
UMA
COM
CVN
ALIOTH
MIZAR
ALKAID
MENKALINAN
ELNATH
AUR
CAPELLA
ALDEBARAN
CAM
PER
MIRFAK
ALGOL
POLARIS
UMI KOCHAB
ARCTURUS
BOOTES
MEN
TRI
ALMACH
ARI
CAS
GAMMA CASSIOPEIAE
ALPHECCA
CRB
JUP
HAMAL
NW
SCHEDAR
CAPH
N
CEP
DRA
NE
SER
ELTANIN
HER
MIRACH
ALDERAMIN
CETMAR
AND
PSC
OPH
VEGA
ALPHERATZ
LAC
LYR
RASALHAGUE
DENEB
SADR
PEG
SCHEAT
SUN
EPSILON CYGNI
CYG
SER
MARKAB
VUL

MỤC LỤC

		Trang
Chương I.	Lược sử thiên văn học	8
Chương II.	Chuyển động của các thiên thể trong trường lực hấp dẫn	32
Chương III.	Trái Đất và chuyển động của nó	56
Chương IV.	Bức xạ vũ trụ	92
Chương V.	Cuộc phiêu lưu tới Mặt Trăng, Hỏa Tinh, Kim Tinh và Trái Đất	116
Chương VI.	Những điều ngạc nhiên trong Hệ Mặt Trời	162
Chương VII.A	Khí quyển mặt trời	196
Chương VII.B	Bên trong Mặt Trời	222
Chương VIII.A	Các ngôi sao : Tính chất của chúng	242
Chương VIII.B	Các ngôi sao : Sự sống và sự tận cùng của chúng	262
Chương IX.	Thiên hà của chúng ta	292
Chương X.	Các thiên hà và các quasar	330
Chương XI.	Vũ trụ học	352
Chương XII.	Kĩ thuật thiên văn	378
CÁC PHỤ LỤC		406

THIÊN VĂN VẬT LÍ - ASTROPHYSICS

MS: 7K494T7 - DAI

In 2.000 bản, khổ 19 x 27 cm, tại Công ty CP In Phúc Yên.
Số xuất bản: 11 - 2007/CXB/268 - 2119/GD.
In xong nộp lưu chiểu tháng 1 năm 2007.

NGÔI SAO VÀNG
CHẤT LƯỢNG

TÌM ĐỌC SÁCH THAM KHẢO ĐẠI HỌC BỘ MÔN VẬT LÍ CỦA NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC

1. CƠ SỞ VẬT LÍ (6 tập)	*DAVID HALLIDAY và các tác giả (Ngô Quốc Quýnh và các dịch giả dịch)*
2. GIẢI BÀI TẬP VÀ BÀI TOÁN CƠ SỞ VẬT LÍ (5 tập)	*Nguyễn Quang Hậu - Lương Duyên Bình*
3. VẬT LÍ ĐIỆN TỬ	*Nguyễn Minh Hiến - Vũ Linh*
4. VẬT LÍ ĐẠI CƯƠNG (3 tập)	*Lương Duyên Bình và các tác giả*
5. BÀI TẬP VẬT LÍ ĐẠI CƯƠNG (3 tập)	*Lương Duyên Bình và các tác giả*
6. VẬT LÍ HIỆN ĐẠI (Lí thuyết và bài tập)	*RONALD GAUTREAU và các tác giả (Ngô Phú An - Lê Băng Sương, ...dịch)*
7. PHƯƠNG PHÁP TOÁN LÍ	*Đỗ Đình Thanh*
8. BÀI TẬP VẬT LÍ LÍ THUYẾT (2 tập)	*Nguyễn Hữu Mình và các tác giả*

Bạn đọc có thể mua tại các Công ti Sách và Thiết bị trường học ở địa phương hoặc các Cửa hàng giới thiệu sách của Nhà xuất bản Giáo dục : 81 Trần Hưng Đạo hoặc 57 Giảng Võ - Hà Nội; 15 Nguyễn Chí Thanh - TP. Đà Nẵng; 231 Nguyễn Văn Cừ (Quận 5) - TP. Hồ Chí Minh.

8 934980 759660

Giá : 55000 đ