

# 天文学基础知识

天文学是一门既古老而又现代的一级学科。它随着人类社会的进步而不断地发展。作为世界文明古国的中国，古代天文学的研究和应用曾经是世界领先的，不少有关天文的记载成为现代天文学研究的珍贵资料。但是，在我们现今的基础教育中，天文学一直没有得到应有的重视。21 世纪将是人类着眼太空的时代，世界科技飞速发展，人类开始开发宇宙太空。地球的能源在不断地耗尽，新的能源也许要向太空寻找，太阳能当然是最直接的。当地球上的环境不再适合人类的生存时，新的居住地肯定也只能是其他的星球。我们在宇宙中是否孤独？为了适应世界航天事业发展的时代需要，加强素质教育，普及天文知识是一项重要内容，特别是在文理分开的大学教育中，文科学生对于基础科学的知识了解得不够全面。同时，由于人们对天文发现的广泛兴趣，天文学在教育 and 科普领域也起着十分独特的作用。

广州大学准备在文科学生中开设这部分课程是一个很好的尝试。编者本着使学生能在比较短的时间内对天文学的研究内容、研究方法、新进展有一个大致的了解的出发点而编写了本部分内容。

本部分内容包括六个方面：天文学简史；天体的基本参量和测量；太阳系；星系；宇宙学；20 世纪 60 年代后的重要发现和对新世纪天文学发展的展望。由于时间仓促，错误在所难免，望读者予以指出，编者不胜感谢！

## 第一节 天文学简介

### 1.1 天文学研究的对象和内容

#### 1.1.1 天文学研究的对象

天文学所研究的对象是地球以外的宇宙空间的各种星星和物体，包括月球、太阳、行星、恒星、银河系、河外星系、行星际、星际、星系际物质以至整个宇宙。这些星星和物体统称为天体。从而，人造卫星、宇宙飞船、空间站等人造飞行器的运动性质也属于天文学的研究范围，被称为人造天体。不过，尽管天文与天气都与“天”有关，但是天文和气象是有区别的。有的人却不知道，以为天文与负责天气预报的气象就是一回事，电话打到天文台来问天气情况是常有的事。

实质上，天文学上的“天”是指宇宙空间，气象学上的“天”是地球大气层。预报日食、月食的发生和流星雨等天象是天文学家的事，而预报台风、高温、寒潮则是气象学家的工作。

### 1.1.2 天文学研究的内容

天文学研究的内容涉及宇宙中所有的天体，他们由近及远分类为几个层次：

(1) 太阳系天体：包括太阳、行星（其中包括地球）、行星的卫星（其中包括月球）、小行星、彗星、流星体及行星际介质等。

(2) 银河系天体：包括恒星（其中包括太阳）、变星、双星、聚星、星团、星云和星际介质。

(3) 河外星系：简称星系，指银河系之外与银河系相似的庞大的恒星系统，双星系、多重星系、星系团、超星系团以及星系际介质等等。

(4) 总星系：目前我们所观测到的范围的物质的总体。

天文学按照其发展历史及研究方法可分为天体测量学、天体力学和天体物理学三个分支学科。

天体测量学是天文学中最早发展起来的。以研究和测定各类天体的位置和运动，建立天球参考系等作为它的主要内容。利用天体测量方法取得的观测资料，不仅可以用于天体力学和天体物理研究，而且具有应用价值，比如用以确定地面点的位置。目前，天体测量的手段已从早期单一的可见光波段，发展到射电、红外等其它电磁波段，精度也不断提高，并且从地面扩展到空间，这就是空间天体测量。天体测量学按照研究方法的差别又可以分为 4 个分支，即球面天文学、方位天文学、实用天文学和天文地球动力学等。

天体力学主要研究天体的相互作用、运动和形状，其中运动应包括天体的自转。早期的研究对象是太阳系天体，目前已扩展到恒星、星团和星系。牛顿万有引力定律和运动三定律的建立奠定了天体力学的基础，使研究工作从运动学发展到动力学。如今准确地预报日食、月食等天象，和天体力学的发展是分不开的。天体力学按照研究的对象、范围和方法可以分为 6 个分支，即摄动理论、天体力学定性理论、天体力学数值方法、历书天文学、天体的形状和自转理论以及天体动力学等。

天体物理学是天文学中最年轻的一门分支学科，它运用物理学的理论、方法和技术研究各类天体的形态、结构、分布、化学组成、物理性质和状态以及演化规律等。18 世纪恒星天文学的创建孕育了天体物理学。而 19 世纪中叶，随着天文观测技术的发展，天体物理学发展成为天文学一个独立的分支学科，并促使天文观测和研究不断取得新发现和新成果。天体物理学就研究的对象不同可以分为几个分支，即有太阳物理学、太阳系物理学、恒星物理学、银河系天文学、

星系天文学、宇宙化学、天体演化学、高能天体物理学、射电天文学、空间天文学及宇宙学等。就其研究方法而言又可分为实测天体物理和理论天体物理。

## 1.2 天文学发展简史

天文学的起源可以追溯到人类文化的萌芽时代。远古时候，人们为了农牧业生产活动的需要，必须要知道季节的变更，就自然会观察太阳、月亮和星星在天空中的位置，找出它的随时间变化的规律，并在此基础上编制历法。可以说，天文学是最古老的自然科学学科之一。早期天文学的内容就其本质来说就是天体测量学。

从 6 世纪中哥白尼 (Nicolaus Copernicus) 提出日心体系学说开始，天文学的发展进入了全新的阶段。在这之前的罗马时代 (或称为“中世纪”，公元 476 年至 15 世纪中叶)，托勒密 (Claudius Ptolemy) 的地心学说被教皇统治阶级所利用，包括天文学在内的自然科学，受到教皇严重控制，所有的科学都属于教皇。科学发展很慢，很多科学家受到了严厉的摧残，甚至迫害致死。15 世纪以后，欧洲资本主义开始兴起，海上交通发展很快，对于天文学要求很高，促进了天文学的发展。新的天文观测对旧的理论提出了严重的挑战。哥白尼经过多年的精心观测和研究发现地球中心无法解释行星的运动，但是如果太阳是宇宙的中心的话 (即地动日心学说)，行星的运动就好解释了。他完成了在天文学史上具有里程碑意义的巨著《天体运行论》，他的学说使天文学摆脱宗教的束缚，解决了天文学中的基本问题，改变了人们的宇宙观，为天文学的正确发展奠定了基础。18、19 世纪，经典天体力学达到了鼎盛时期。同时，由于分光学、光度学和照相术的在天文学上的广泛应用导致了天体物理学的诞生。20 世纪现代物理学和尖端技术的发展，新的天文发现和成果不断涌现，使天体物理学成为天文学中的主流学科，与此同时经典的天体测量学和天体力学也有了新的发展，人们对宇宙及宇宙中各类天体的认识不断地深入。

天文学是一门以观测为基础的科学。天文学上的每一项发现都离不开天文观测工具——望远镜和望远镜后端的接收设备。望远镜发明以前，人们尽管已制作了不少天文观测仪器，如在中国有浑仪、简仪等，但观测工作只能靠人的肉眼。从 1609 年伽里略制成第一架天文望远镜以后的近 400 年中，人们对望远镜的性能不断加以改进。目前世界上最大光学望远镜的口径已达到 10 米。

世界大战后，废弃的雷达有了新的用武之地，理由它们观测天空时发现了射电波源，大大地扩大了人们了解天体的信息，从而开创了射电天文学。也使得天文研究从光学扩展到射电波段。随着射电望远镜在口径和接收波长、灵敏度等性能上的不断扩展、提高，射电天文

观测技术为天文学的发展作出了重要的贡献。天文上的几次 Nobel 奖的获得都与射电天文密切相关。目前，世界上最大的全可动射电望远镜直径为 100 米，最大固定式射电望远镜直径达 300 米。我国将有一个直径达 500 米固定式射电望远镜安装在贵州省。

由于地球大气对天体辐射的吸收、反射和折射效应影响了观测结果、限制了观测的范围，摆脱地球大气影响的观测成为了天文学家梦寐以求的事情。1957 年 10 月 4 日，前苏联成功地发射了第一颗人造地球卫星，揭开了空间天文的序幕。20 世纪后 50 年中，随着探测器和空间技术的发展以及研究工作的深入，天文观测进一步扩展到包括红外、紫外、X 射线和  $\gamma$  射线在内的电磁波各个波段，形成了全波段天文学，新的天文现象和研究成果不断涌现，天文学发展到了一个新的阶段。

## 第二节 天体的基本物理参数及测量

对天体的认识就要了解它的基本参数，如质量、距离、温度、化学组成、物理状态等等，这些可以通过以下的方法来了解。

### 2.1 天体的光度及测量

#### 2.1.1 星等

##### (1) 视星等

晴朗的夜晚，当我们仰望繁星满天的苍穹时，会看到无数的闪烁的星星。这些星星的明暗各有千秋，它们明亮程度叫做亮度，用视星等表示。星等是天文学史上传统形成的表示天体亮度的一套特殊方法。古希腊天文学家根据恒星的明亮程度把它们分成六等。最亮的星为一等星，肉眼刚好能看到的星为六等星，恒星越亮，星等数越小。星等相差一级，亮度相差 2.512 倍，即五等星比六等星亮 2.512 倍。

望远镜发明以后，可以看到肉眼所不能看到的很暗的星星，如 7 等星、8 等星……。现代大口径望远镜能观测到 25 等的暗星。比 1 等星更亮的天体可向 0 值和负值扩展。并且不限于是整数。如全天最亮的恒星天狼星为 -1.45 等，金星最亮时为 -4.22 等，月亮满月时的亮度为 -12.73 等，太阳的亮度达到 -26.74 等。

##### (2) 绝对星等

由于天体的视星等与距离有关，天体的亮度并不能完全表示它们的发光本领。为了比较不同恒星的真实发光本领，必须设想把它们放到相同的距离上。天文学上把这个标准距离定为 10 个秒差距 (pc)，相当于 32.6 光年 ( $1 \text{ 光年} = 9.46 \times 10^{12} \text{ 千米}$ )。

恒星在标准距离处的亮度称为绝对亮度（或叫真亮度），其星等称为绝对星等。一个视星等  $m$  位于距离  $d$  的恒星的绝对星等  $M$  可以根据下列式子来计算：

$$M=m+5-5\log d$$

上式是天文学的一个重要公式。若已知某星的距离  $d$  (秒差距  $\text{Pc}$ ) 及视星等  $m$ ，则可求出其绝对星等  $M$ （例如，太阳的绝对星等是 4.75）。反之，若已知某星的绝对星等和视星等，也可求出它的距离。

### 2.1.2 天体测光与星等

光度测定是指测量来自有限波段范围内的辐射流，简称测光，由望远镜和辐射接收器完成，一般以星等表示。测光的基本原理是，在相同条件下，等同的辐射流能使探测装置产生等同的“响应”。据此，将待测星与已知星等的星作比较，根据探测装置对它们的“响应”，可求出待测天体的亮度或光度，再推算待测星的星等。天体亮度的测定方法很多，常见的有：目视测光、照相测光和光电测光，响应的星等称为：目视星等、照相星等和光电星等。三种测光中，精度较低的是目视测光（0.2 至 0.02 星等），精度较高的是光电测光（0.01 至 0.005 星等）。光电测光的优点显而易见，是目前应用最广泛的测光方法。

## 2.2 天体的光谱分析

### 2.2.1 光谱及其种类

牛顿早在 17 世纪发现，阳光经过三棱镜会分出七种色彩，并称它为光谱。光谱分析在天体物理的研究上有着相当重要的地位，人们可以通过光谱了解天体的化学组成及其许多物理性质。

光谱可分为三种类型，即连续光谱、明线光谱和吸收光谱。

**连续光谱** 炽热的固体、液体或高温高压下的气体都发射各种波长的光波，因而形成不间断的连续光谱。如钨丝灯。

**明线光谱** 在低压条件下，稀薄炽热的气体或蒸汽不能产生连续的全部谱线，只能产生单色的、分离的明线状光谱，即明线光谱。每种化学元素都有它独特的、在光谱区有固定波长位置的一组明线。如钠的蒸气。

**吸收光谱** 由产生连续光谱的光源发射的光，穿过低压下稀薄气体或蒸气，就有吸收线（即暗线）迭加在连续光谱上。这些吸收线就是这些气体和蒸气，从连续光谱的全部谱线中，有选择地吸收了它自己在低压高温状态下所发射的明线谱线，即它对应波长的光线。这种连续光谱背景上具有黑色吸收线的光谱，叫做吸收光谱。

1858 年德国物理学家基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff) 发现产生这三种光谱的原因后于 1859 年提出了两条定律：

(1) 每一种元素都有自己的光谱；

(2)每一种元素都能吸收它能够发射的谱线。这两条定律成为分光学的基础。

### 2.2.2 光谱在天文研究中的应用

人类一直想了解天体的物理、化学性状。这种愿望只有在光谱分析应用于天文后才成为可能并由此而导致了天体物理学的诞生和发展。通过光谱分析可以：(1)确定天体的化学组成；(2)确定恒星的温度；(3)确定恒星的压力；(4)测定恒星的磁场；(5)确定天体的视向速度和自转等等。

## 2.3 天体距离的测定

人们总希望知道天体离我们有多远，天体距离的测量也一直是天文学家们的任务。不同远近的天体可以采不同的测量方法。随着科学技术的发展，测定天体距离的手段也越来越先进。由于天空的广袤无垠，所使用测量距离单位也特别。天文距离单位通常有天文单位(AU)、光年(ly)和秒差距(pc)三种。

### 2.3.1 月球与地球的距离

月球是距离我们最近的天体，天文学家们想了很多的办法测量它的远近，但都没有得到满意的结果。科学的测量直到18世纪(1715年至1753年)才由法国天文学家拉卡伊(N. L. Lacaille)和他的学生拉朗德(Laland)用三角视差法得以实现。他们的结果是月球与地球之间的平均距离大约为地球半径的60倍，这与现代测定的数值(384401千米)很接近。

雷达技术诞生后，人们又用雷达测定月球距离。激光技术问世后，人们利用激光的方向性好，光束集中，单色性强等特点来测量月球的距离。测量精度可以达到厘米量级。

### 2.3.2 太阳和行星的距离

地球绕太阳公转的轨道是椭圆，地球到太阳的距离是随时间不断变化的。通常所说的日地距离，是指地球轨道的半长轴，即为日地平均距离。天文学中把这个距离叫做一个“天文单位”(1AU)。1976年国际天文学联合会把一个天文单位的数值定为 $1.49597870 \times 10^{11}$ 米，近似1.496亿千米。

太阳是一个炽热的气体球，测定太阳的距离不能像测定月球距离那样直接用三角视差法。早期测定太阳的距离是借助于离地球较近的火星或小行星。先用三角视差法测定火星或小行星的距离，再根据开普勒第三定律求太阳距离。1673年法国天文学家卡西尼(Dominique Cassini)首次利用火星大冲的机会测出了太阳的距离。

许多行星的距离也是由开普勒第三定律求得的，若以1AU为日地距离，“恒星年”为单位作为地球公转周期，便有： $T^2=a^3$ 。若一个

行星的公转周期被测出,就可以算出行星到太阳的距离。如水星的公转周期为 0.241 恒星年,则水星到太阳的距离为 0.387 天文单位(AU)。

### 2.2.3 恒星的距离

由于恒星距离我们非常遥远,它们的距离测定非常困难。对不同远近的恒星,要用不同的方法测定。目前,已有很多种测定恒星距离的方法:

#### (1)三角视差法

河内天体的距离又称为视差,恒星对日地平均距离(a)的张角叫做恒星的三角视差( $\pi$ ),则较近的恒星的距离 D 可表示为:

$$\sin \pi = a/D$$

若  $\pi$  很小,  $\pi$  以角秒表示,且单位取秒差距(pc),则有:  $D=1/\pi$

用周年视差法测定恒星距离,有一定的局限性,因为恒星离我们愈远,  $\pi$  就愈小,实际观测中很难测定。三角视差是一切天体距离测量的基础,至今用这种方法测量了约 10,000 多颗恒星。

天文学上的距离单位除天文单位(AU)、秒差距(pc)外,还有光年(ly),即光在真空中一年所走过的距离,相当 94605 亿千米。三种距离单位的关系是:

1 秒差距(pc) = 206265 天文单位(AU) = 3.26 光年 =  $3.09 \times 10^{13}$  千米

1 光年(ly) = 0.307 秒差距(pc) = 63240 天文单位(Au) =  $0.95 \times 10^{13}$  千米。

#### (2)分光视差法

对于距离更遥远的恒星,比如距离超过 110pc 的恒星,由于周年视差非常小,无法用三角视差法测出。于是,又发展了另外一种比较方便的方法—分光视差法。该方法的核心是根据恒星的谱线强度去确定恒星的光度,知道了光度(绝对星等 M),由观测得到的视星等(m)就可以得到距离。

$$m - M = -5 + 5 \log D.$$

#### (3)造父周光关系测距法

大质量的恒星,当演化到晚期时,会呈现出不稳定的脉动现象,形成脉动变星。在这些脉动变星中,有一类脉动周期非常规则,中文名叫造父。造父是中国古代的星官名称。仙王座  $\delta$  星中有一颗名为造父一,它是一颗亮度会发生变化的“变星”。变星的光变原因很多。造父一属于脉动变星一类。当它的星体膨胀时就显得亮些,体积缩小时就显得暗些。造父一的这种亮度变化很有规律,它的变化周期是 5 天 8 小时 46 分 38 秒钟,称为“光变周期”。在恒星世界里,凡跟造父一有相同变化的变星,统称“造父变星”。

1912 年美国一位女天文学家勒维特 (Leavitt 1868--1921) 研究小麦哲伦星系内的造父变星的星等与光变周期时发现: 光变周期越长的恒星, 其亮度就越大。这就是对后来测定恒星距离很有用的“周光关系”。目前在银河系内共发现了 700 多颗造父变星。许多河外星系的距离都是靠这个量天尺测量的。

#### (4) 谱线红移测距法

20 世纪初, 光谱研究发现几乎所有星系的都有红移现象。所谓红移是指观测到的谱线的波长 ( $\lambda$ ) 比相应的实验室测知的谱线的波长 ( $\lambda_0$ ) 要长, 而在光谱中红光的波长较长, 因而把谱线向波长较长的方向的移动叫做光谱的红移,  $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ 。1929 年哈勃用 2.5 米大型望远镜观测到更多的河外星系, 又发现星系距我们越远, 其谱线红移量越大。

谱线红移的流行解释是大爆炸宇宙学说。哈勃指出天体红移与距离有关:  $Z = H \cdot d / c$ , 这就是著名的哈勃定律, 式中  $Z$  为红移量;  $c$  为光速;  $d$  为距离;  $H$  为哈勃常数, 其值为 50~80 千米 / (秒 · 兆秒差距)。根据这个定律, 只要测出河外星系谱线的红移量  $Z$ , 便可算出星系的距离  $D$ 。用谱线红移法可以测定远达百亿光年计的距离。

### 2.4 天体大小的测定

#### 2.4.1 地球的大小

最早实测地球大小的是希腊天文学家厄拉多塞内 (Eratosthene)。公元前 200 多年, 他认定地球为正球体, 他那时推算的地球周长合 39500 千米, 与今值 (赤道周长 40075.13 千米) 十分接近。

20 世纪 50 年代以后, 用人造地球卫星测得的有关地球数据越来越精确。利用对人造卫星的观测数据, 便可求得地球的平均半径。具体计算时还必须考虑月球和太阳引力的影响, 需要加以订正。同时, 由于地球并非正球体, 其内部物质分布也不均匀, 因此, 它对人造卫星的绕转运动产生摄动力。这样, 需根据大量不同倾角的人造卫星及其轨道变化的速度, 才能归算出地球的基本形状和大小。

#### 2.4.2 太阳、月球的大小

对于距离已知的天体, 只要测出它们的视圆面直径的张角, 即可以求出它们的大小。对太阳、月球和行星的线直径都是这样测量的。在地球上用测角仪器很容易测得太阳的角直径  $31' 59'' .3$ 。根据已知的日地平均距离  $a$  就可算出太阳的线半径为:

$$R = a \cdot \sin (31' 59'' .3 / 2) = 6.96 \times 10^5 \text{ 千米}$$

大概 70 万千米, 约相当于地球半径的 109 倍。

同理可测得月球的平均角半径为  $15' 32'' .6$ , 略小于太阳角半径。所以, 从地球上看去, 它们的大小相差不多, 但是, 月地距离比日地距离小得多。月球的线半径也比太阳小得多, 仅有 1738 千米。



### 2.4.3 恒星的大小

对于太遥远恒星，其角直径很小，用望远镜所无法测量的，上面的方法不适用。于是，只能采用间接的方法测定它们的大小，例如光度法。

由物理学中的斯忒藩—波尔兹曼黑体辐射定律知道，如果恒星的辐射可以用黑体辐射来描述，那么温度为  $T$ ，半径为  $R$  的恒星在单位时间内所发出的总辐射能，即恒星的光度  $L$  为：

$$L=4\pi R^2\sigma T^4$$

上式中的  $T$  及光度量可根据其它办法得到，于是  $R$  就可以算出来。

### 2.5 天体质量的测定

天体的质量，不仅支配着天体的运动状况，而且还决定天体演化进程。研究天体质量，是现代天文学的一个重要内容，对不同天体质量的测定，可采用不同的方法。

#### 2.5.1 地球质量

对人类生息繁衍的地球的质量大小的估算直到牛顿发现万有引力定律建立之后才成为可能。

测定地球质量的原理很简单，从万有引力定律知道，任何两个物体之间的引力的大小与两物体的质量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比。假设地球为一质量为  $M_e$  理想球体，且质量都集中在地球中心，地球半径为  $R_e$ 。那么根据地球表面的物体受到的地球的吸引力便可以测量地球的质量。但是地球质量的测量还涉及到万有引力常数  $G$  的大小。直到 1928 年才由美国的海尔确定为  $G=6.67\times 10^{-8}$  达因·厘米<sup>2</sup>/克<sup>2</sup>。于是，得到地球质量  $M_e=5.977\times 10^{27}$  克。很显然，地球并不是一个正球体，现代用人造地球卫星测定地球质量。

#### 2.5.2 恒星质量

太阳质量：太阳是太阳系的中心天体，其质量可由地球对其绕转运动来求得。我们把地球公转近似地看作圆周运动，那么就可以根据地球绕太阳做圆周运动求出太阳的质量为  $M_s=1.988\times 10^{30}$  千克。

对于恒星，只对某些物理双星的质量根据其轨道运动（利用开普勒第三定律）进行过直接测定。对其它恒星的质量，只能根据它们的光度进行间接测定。20 世纪以后，通过大量的观测表明，发现主序星的质量与光度存在较好的正相关。光度越大，质量也越大，即著名的质光关系图。所以可以根据恒星的光度由质光关系图估算出它的质量。

#### 2.5.3 星系的质量

星系的质量是星系的重要基本参量，它对构成星系总光度各类型恒星的分布也是一个制约，星系质量分布也影响星系的类型。目前发展了多种方法来确定星系质量：

- 1) 由星系的旋转曲线确定质量（对扁平型的轴对称星系）。
- 2) 双星系质量（利用测定双星的方法估计双星系的质量）。
- 3) 维里质量（利用维里定律（Virial theorem）求出星系团的质量）。

星系质量的测量结果表明，不同类型的星系的质量分布为：

椭圆星系： $10^5$   $10^{13}M$

旋涡星系： $10^9$   $10^{11}M$

不规则星系： $10^8$   $10^{10}M$

## 2.6 恒星的年龄

恒星的一生经历了产生、发展到死亡的过程。不同恒星是什么时候形成的？它们已经存在多久了？它们处于演化的哪个阶段等问题都涉及到恒星的年龄和演化龄的问题。大多数天文学家认为，恒星是由低密度的星云物质聚集而成。它们由于自身的引力而收缩，使得其内部温度升高。当恒星中心的温度升高到 700 万摄氏度时，就会开始氢聚变成氦的核反应。在恒星的一生中，有 90% 的时间处于主星序阶段，这个阶段是恒星最稳定的阶段，好比人的中年时期。当氢逐步耗尽时，氦核越来越大，当氦的质量占恒星质量的 12% 时，氦核就要收缩，恒星外层就膨胀，体积急剧增大，表面温度降低，这时的恒星就要脱离主星序，进入红巨星阶段，相当于人进入了老年阶段。恒星演化到晚期要经历一次爆发，抛出大量的物质，而中心的残核会形成一个致密的天体——白矮星、中子星或者黑洞。要确定各种各样的恒星的年龄可以用赫罗图法和利用放射性同位素测定恒星年龄。

# 第三节 太阳系

## 3.1 太阳系的起源和演化

太阳亘古不变还是有始有终？它的来龙去脉究竟如何？实际上，任何天体都和人一样，要经历诞生、发展和衰亡的过程，这就是天体的演化过程。太阳是离我们最近的一颗恒星，也是人类赖以在地球上生存的一切资源的源泉，是我们最关心的天体。太阳及其整个系统是怎样形成的，将来会如何消逝呢？根据恒星演化理论，太阳形成于星云。星云假说认为：宇宙空间存在着许多巨大的星际云，大约在 46 亿年前，在银盘上，离开银河中心大约 25 亿亿千米的地方，存在着一个大小约等于现在太阳直径 500 万倍的云团。这个云团在内部物质自身的引力作用，开始迅速收缩。在大约 40 多万年之后，在云团中心形成了一个高温、高压、高密度的气体球，并点燃了氢聚变成氦核

的核反应，释放出大量的热和光。这就是我们的太阳。在太阳形成以后不久，太阳周围的一些气体和尘埃，形成了围绕太阳旋转的行星和诸多小行星和彗星等其它太阳系天体。早在十八世纪，德国哲学家康德(Immanuel Kant) (1755 年) 和法国数学家拉普拉斯(Pierre Simon Laplace) (1796 年) 分别独立提出了星云说，他们开辟了人类对宇宙认识的一个划时代的变革，即研究宇宙的演化。太阳的寿命约有 100 亿年，正是它的“壮年”时期。再过 50 多亿年以后，太阳将耗尽它的氢气储备，氢核增大，内部温度进一步升高，导致氢聚变的发生。之后太阳进入“红巨星”阶段，体积会膨胀，光亮度将增至如今的 100 倍，并把靠它最近的行星如水星、金星吞噬掉，地球也会被“烤焦”，生命将无法继续生存。当太阳耗尽它的全部核能燃料时，就会塌缩成一颗黯淡的白矮星。白矮星没有核反应，它靠收缩自己的体积来继续辐射出微弱的能量。最后，太阳将成为一个无光无热的“褐矮星”，消逝在茫茫的宇宙之中，它辉煌灿烂的一生就从此划上句号。

## 3.2 太阳系的组成

### 3.2.1 太阳概况

对于人类而言，光辉灿烂的太阳是我们的衣食父母，她无疑是宇宙中最重要的天体。太阳的光芒孕育了地球上千姿百态的生命形式。地球绕太阳运转造成了白天黑夜和春夏秋冬季节的变更和地球冷暖的变化。在人类历史上，太阳一直是许多人顶礼膜拜的对象。太阳是由什么物质所组成，它的内部结构又是怎样的呢？在浩瀚的星星世界里，太阳是一颗非常不起眼的恒星，她的亮度、大小和物质密度都处于中等水平。只是因为她离地球最近，所以看上去是天空中最大最亮的天体。组成太阳的物质主要是氢（约占 71%），其次是氦（约占 27%），其它元素占 2%。太阳从中心向外可分为核反应区、辐射区和对流区、太阳大气。太阳的大气层又可按不同的高度和不同的性质分成光球、色球和日冕三层。

太阳的核心区域是太阳那巨大能量的真正源头。太阳核心处于高密、高温、高压状态，密度达到  $160\text{g}/\text{cm}^3$ ，温度高达 1500 万摄氏度，压力达到  $3.4 \times 10^{12}\text{dyn}/\text{cm}^2$ 。中心区域进行剧烈的氢聚变为氦的热核反应，释放出大量的能量通过辐射层和对流层中物质的传递送到达太阳光球的底部，并通过光球向外辐射出去。

太阳光球层就是人们通常所看到的太阳圆面，是太阳大气的最下层，太阳半径也是指光球的半径。光球的表面是气态的，其平均密度只有水的几亿分之一。我们接受到的太阳辐射几乎都是由这一层发射的。光球层的大气中存在着激烈的活动，用望远镜可以看到光球表面有许多密密麻麻的斑点状结构，象一颗颗米粒，故称之为米粒组织。米粒结构是对流层里上升的热气团冲击太阳表面形成的，它们极不稳

定，持续时间仅为几分钟，但温度要比光球的平均温度高出 300~400 度。在光球的活动区，有太阳黑子和光斑。

太阳黑子是光球表面另一种著名的活动现象。黑子是光球层上的巨大气流旋涡，由较暗的核（本影）和围绕他们较亮的部分（半影）构成，大多呈现近椭圆形。在明亮的光球背景反衬下显得比较暗黑，实际上它们的温度高达 4000℃左右。日面上黑子出现的情况不断变化，黑子的多少反映了太阳活动的程度。黑子的寿命从几小时到几个月不等。太阳黑子的变化存在复杂的周期现象，平均活动周期为 11.2 年（最长 13.6 年，最短为 9 年）。

光斑是与黑子相反的一种光球现象，具有各种不同形式的纤维结构，比光球的温度高 100 度，在日面边缘。光斑与黑子相互伴随，比黑子先出现，平均寿命为 15 天左右。

紧贴光球以上的一层大气称为色球层，厚度为 2,000 至 10,000 千米。其亮度只有光球的万分之一，平时不易被观测到，过去这一区域只是在日全食时才能被看到。当月亮遮掩了光球明亮光辉的一瞬间，人们能发现日轮边缘上有一层玫瑰红的绚丽光彩，那就是色球。色球层的化学组成与光球基本上相同，但色球层内的物质密度和压力要比光球低得多。日常生活中，离热源越远处温度越低，而太阳大气的情况却截然相反，光球顶部接近色球处的温度差不多是 4600K，到了色球顶部温度竟高达几万度，再往上，到了日冕区温度陡然升至上百万度。人们对这种反常增温现象感到疑惑不解，至今也没有找到确切的原因。由于磁场的不稳定性，色球经常产生激烈的耀斑爆发。

在色球上人们还能够看到许多腾起的明亮突出物。它的形状千姿百态，有的如浮云烟雾，有的似飞瀑喷泉，有的好似一弯拱桥，也有的酷似团团草丛，真是不胜枚举，这就是天文上所谓的“日珥”。日珥是迅速变化着的活动现象，一次完整的日珥过程一般为几十分钟。天文学家根据形态变化规模的大小和变化速度的快慢将日珥分成宁静日珥、活动日珥和爆发日珥三大类。最为壮观的要属爆发日珥，本来宁静或活动的日珥，有时会突然“怒火冲天”，把气体物质拼命往上抛射，然后回转着返回太阳表面，形成一个环状，所以又称环状日珥。

在日全食时的短暂瞬间，常常可以看到太阳周围除了绚丽的色球外，还有一大片白里透蓝，柔和美丽的晕光，这就是太阳大气的最外层——日冕。日冕的范围在色球之上，一直延伸到好几个太阳半径的地方。日冕里的物质更加稀薄，主要由高度电离和高速的自由电子组成，它还会以很高的速度向外膨胀运动，并使得热电离气体粒子连续地从太阳向外流出而形成太阳风。

太阳看起来很平静，实际上每时每刻都在发生剧烈的活动。太阳表面和大气层中的活动现象，诸如太阳黑子、耀斑和日冕物质喷发等，会使太阳风大大增强，造成许多地球物理现象——例如极光增多、大气电离层和地磁的变化。

太阳基本物理参数

半径:	696295 千米.
质量:	$1.989 \times 10^{30}$ 千克
温度:	5800 °C (表面) 1560 万°C (核心)
总辐射功率:	$3.83 \times 10^{26}$ 焦耳/秒
平均密度:	1.409 千克/立方米
日地平均距离:	1 亿 5 千万 千米
年龄:	约 50 亿年

3.2.2 行星、卫星和行星环

太阳系的中心天体是太阳，除此以外是围绕太阳旋转的九大行星，小行星，彗星和流星体等。行星本身一般不发光，以表面反射太阳光而展示各自的面貌。在主要由恒星组成的天空背景上，行星有明显的相对移动。按照离太阳的距离的远近依次是水星，金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。他们的总质量是太阳的 1/718，总体积是太阳的 1/600。九大行星的划分有几种方法：

- 1、以地球轨道为界，以内的叫地内行星，以外的叫地外行星。
- 2、以小行星带为界，以内的叫内行星，以外的叫外行星。
- 3、以行星的各种性质分，类地行星（水星，金星，地球和火星）；类木行星（包括木星，土星，天王星和海王星），而对冥王星属于哪一类有不同看法。
- 4、从行星起源于不同形态的物质出发，类地行星(包括水、金、地、火)、巨行星(木、土)及远日行星(天王、海王、冥王)。

行星环绕太阳的运动称为公转，行星公转的轨道具有共面性、同向性和近圆性三大特点。所谓共面性，是指九大行星的公转轨道面几

乎在同一平面上；同向性，是指它们朝同一方向绕太阳公转；而近圆性是指它们的轨道和圆相当接近。

行星还有围绕自己运转的卫星，有的是一个围绕行星运转的物质环，由大量小块物体(如岩石，冰块等)构成，因反射太阳光而发亮，称为行星环。土星、木星、天王星都有光环。太阳系中，除了水星和金星以外，其它的行星各自都有数目不等的卫星。

在火星与木星之间分布着数十万颗大小不等、形状各异的小行星，沿着椭圆轨道绕太阳运行，这个区域称之为小行星带。此外，太阳系中还有数量众多的彗星，至于飘浮在行星际空间的流星体就更是无法计数了。

尽管太阳系内天体品种很多，但它们都无法和太阳相比。太阳是太阳系光和能量的源泉。也是太阳系中最庞大的天体，其半径差不多是地球半径的 109 倍。太阳的质量比地球大 33 万倍，占到太阳系总质量的 99.8%，是整个太阳系的质量中心，它以自己强大的引力将太阳系里的所有天体牢牢控制在其势力周围，使它们井然有序地绕自己旋转。同时，太阳作为银河系里的一颗普通恒星，带领它的成员绕银河系的中心运动。

#### (1) 类地行星：水星，金星，地球，火星

类地行星的许多特性与地球相接近，它们离太阳相对较近，质量和半径都较小，平均密度较大。类地行星的表面都有一层硅酸盐类岩石组成的坚硬壳层，有着类似地球的各种地貌特征。

##### 水星：

水星，又叫辰星，它是太阳系中离太阳最近的大行星，与太阳的距离为 0.387 天文单位 (AU)，约 5791 千米，它经常被黎明或黄昏的太阳光辉所淹没，很难被看到，有的天文学家竟一生中都没有看到水星。水星以较扁的椭圆轨道绕太阳运转，轨道偏心率  $e = 0.206$ ，其轨道面与黄道面的夹角约为  $7^\circ$ ，公转周期为 87.969 天，自转周期为 58.64 天。所以在水星上的三天与两年一样长。水星轨道有每世纪快  $43''$  的反常进动。

水星的半径为 2440 千米，它的质量为  $3.33 \times 10^{26}$  克，是地球质量的 5%。水星的大小在九大行星中排在倒数第二，仅比冥王星大些。水星的平均密度为 5.44 克 / 厘米<sup>3</sup>，比地球的平均密度 5.52 克 / 厘米<sup>3</sup>略小些。水星上有极稀薄的大气，还不到地球表面大气压的一千亿分之一。原因是水星的重力小，只有地球的 1 / 5。白天温度很高，可达到 430℃。水星表面温度差很大，夜晚降至 -180℃。水星大气没有水汽已得到公认，但近来有人报道观测到水星上有冰山的存在，水是水星原来就有的？还是后来由陨星和彗星带来的？看法不一。1990 年，天文学家从设在地球上的射电望远镜向水星发射了电波。据电波

从水星南、北两极区域反射回来的信息判断，那里可能隐藏着冰。不过，水星有水的说法还有待证实。

金星：

金星，古称“太白”、“长庚”或“启明”。因为它有时出现在日落后的西方，有时出现在日出前的东方，因此就有东有“启明”，西有“长庚”之说。金星是肉眼所能见到的最亮的行星，最大亮度可达-4.4等。

离太阳第二近的行星，与太阳的平均距离为 0.723 天文单位，即 1 亿 8 百多千米，公转周期为 224.7 天。金星是太阳系内唯一逆向自转的大行星，它的自转周期为 243 天，在金星上一天比一年的时间还长。金星自转慢而且逆向，从金星上看太阳，太阳从西方升起，在东方落下。

金星的大小、质量和平均密度都与地球接近，其半径为 6070 千米，只比地球小一点，质量为  $4.87 \times 10^{27}$  克，是地球质量的 82%。

金星的大气富含二氧化碳而造成强烈的“温室效应”，就是太阳的可见光和紫外线可以穿透二氧化碳和水汽而加热行星，而行星向外辐射的热能（主要是红外辐射）则因二氧化碳和水汽的吸收和阻挡不能辐射出去，这就使行星表面的温度升高。好象玻璃暖房能使室内达到较高的温度一样。金星表面温度高达  $500^{\circ}\text{C}$ ，达到了熔化铅的温度，金星表面的大气压力是地球海平面大气压力的 90 倍。

地球：

地球是人类的家园，是太阳系的一颗普通行星，按距太阳远近的顺序，它是第三颗行星。从宇宙飞船上看到的地球悬在空中，是一个大气包裹着的蓝色星球。在九大行星中，唯独地球现在是一个繁荣昌盛、生机勃勃的有生命的世界。“阿波罗 8 号”的宇航员说：“地球是混沌广袤的宇宙中一片壮丽的绿洲。”直到今天据我们所知，地球是太阳系中唯一有生命的星球，这与地球在太阳系中有一些独特的优越条件有关。地球的半径 6378 千米，质量为  $5.976 \times 10^{24}$  千克，密度是水的 5 倍半。地球大气含 77% 的氮，21% 的氧，1% 水蒸汽和 0.9% 的氩及少量的其他气体。地球是太阳系中一个既普通又特殊的行星，它是太阳系的绿洲，人类的摇篮。

火星：

火星，中国古代叫“荧惑”，是地球的又一颗近邻行星。离太阳第四远的大行星（1.38—1.67AU）。火星比地球小，半径为 3395 千米，是地球的 53%；质量为  $6.42 \times 10^{26}$  克，是地球的 1/10。火星公转周期 686.98 天。火星自转周期为 24 小时 37 分 22.6 秒。

火星是一颗荒凉的行星，有稀薄的大气，大气主要成分是二氧化碳，其次有氮、氩、一氧化碳和氧，共占 0.1%，水汽只占 0.1%，因此

火星表面上是十分干燥的。

火星单位面积上接受到的太阳辐射仅及地球的 43%，因此表面温度比地球低 30 多摄氏度，而且昼夜温差变化很大。赤道附近最高温度约 20℃，极区的最低温度可达 -120℃，因此，火星两极地区具有白色的覆盖物，称为极冠。极冠随季节而变化，冬季可扩展到北纬 50°，夏季缩小甚至完全消失。

火星表面的平坦区布满了沙尘和岩块，沙尘由红色硅酸盐、赤铁矿等铁的氧化物组成，因而显出明显的橙红色。火星表面也有许多环形山、大河床和它的支流系统结合，形成脉络分明的水道系统。还可以看到呈泪滴状的岛、沙洲和辫状花纹。这些都给人们留下很多的幻想。当然，人类最关心的是火星上是否有生命，这个问题曾引起很多争论。1877 年，意大利天文学家斯基帕雷利首先注意到火星表面的“运河”，从此关于火星运河和生命的问题就展开了议论。但据最新探测结果表明，火星上大气稀薄，严重缺氧，非常寒冷，又没有液态水，火星上存在巨大的沙尘暴，基本没有磁场和磁层，处于紫外线、太阳高能粒子和陨星的轰击下，这样的环境，显然不适于生命的存在和发展。“海盗号探测器”两次在估计水分较多、最大可能存在生命的地区着陆，从火星取出样品进行实验研究，结果不能肯定有生命的痕迹。因此火星上存在生命的可能性是很小的。

## (2) 带光环的巨行星和遥远的远日行星

木星和土星是行星世界的巨人，称为巨行星。它们拥有浓密的大气层，在大气之下却并没有坚实的表面，而是一片沸腾着的氢组成的“汪洋大海”。所以它们实质上是液态行星。

### 木星

木星，我国古代也叫“岁星”，距太阳第五近的行星，离太阳约 5.2 个天文单位，公转周期约为 11.86 年。它的体积和质量都是九大行星中最大的，它同它的 16 颗卫星构成了一个小型的“太阳系”。

木星的质量是地球的 318 倍，超过太阳系其他行星质量的总和。体积是地球的 1316 倍，平均密度只有 1.33 克 / 厘米<sup>3</sup>。它自转速度快，赤道部分自转周期为 9 小时 50 分 30 秒，两极地区自转周期稍长一些。

根据现代最新的观测资料研究，确认木星没有固体表面，是一个流体行星。木星的主要化学成分是氢和氦，类似于太阳大气中这两种元素的比例。木星的中心有一个由铁和硅组成的固体核，中心温度可达 30000K。

近年来的研究确定了木星自己的辐射能源，木星辐射(主要是红外)的能量约为它接受太阳能量的 2 倍。有人认为木星不是严格意义上的行星，更不是严格意义上的恒星，而是处在两者之间的特殊天体。或



者是一颗演化失败的恒星。

木星有浓密的大气，主要成分是氢和氦，还有氨和甲烷。木星一个最显著特征是大红斑，早在 1665 年，意大利天文学家卡西尼就发现了它、至今已有 300 多年，大红斑长 2 万千米，宽约 1.1 万千米。木星大气平均温度是 130K，暗带比亮带高，赤道区比极区高。最近宇宙飞船发现，在木星的背阳面，有 3 万千米长的极光，这表明木星大气受到很多高能粒子的轰击。木星具有比地球更强的磁场和辐射带。木星磁场比地球磁场约强 10 倍。

1994 年 7 月 17 日至 22 日，太阳系发生了一次人类亲眼目睹彗星撞击行星的天文事件——彗木相撞。科学家估计撞击木星的总能量相当与 40 万吨 TNT 炸药的能量。

### 土星

土星，我国古代叫“镇星”或“填星”，是太阳系的第二大行星。在天王星发现以前，人们一直认为它就是太阳系的边疆。它的最显著特点是具有一个特别引人注目的美丽光环，土星与木星有许多相似之处。

土星的体积是地球的 745 倍，质量是地球的 95.18 倍，土星的平均密度最小，为水的 70%。土星公转轨道半径 9.54 天文单位，公转周期为 29.46 年。土星赤道区的自转周期为 10 小时 14 分，中纬度地带为 10 小时 38 分。

土星大气以氢、氦为主，并含有甲烷及其它气体，大气中飘浮着由晶体组成的云。它们像木星的云一样，排成彩色的亮带和暗纹。土星的化学组成像木星，只是比木星含氢量少。土星内部也有热源，它辐射出的能量是它接收到太阳能量的 2 倍。土星至少有 20 颗卫星。

天王星、海王星、冥王星这三颗遥远的行星称为远日行星，是在望远镜发明以后才被发现的。它们拥有主要由分子氢组成的大气，通常有一层非常厚的甲烷冰、氨冰之类的冰物质覆盖在其表面上，再以下就是坚硬的岩核。

### 天王星

天王星是人们早就观测到的一个天体，因显得很黯淡，人们一直把它当作恒星，直到 1781 年被天文爱好者威廉·赫歇尔(Frederick William Herschel)发现为太阳系的一颗大行星。

天王星的直径为 51,200 千米，体积为地球的 65 倍，质量为  $8.74 \times 10^{25}$  千克，相当于地球的 14.63 倍，密度较小，为 1.24 克/厘米<sup>3</sup>。公转轨道半长轴为 19.18 天文单位，公转一周需 84 年。天王星的赤道面与轨道面夹角是  $97^{\circ}55'$ ，因此，它是躺着旋转，横着打滚。这个与众不同的现象很可能是很久以前一个大彗星与天王星相撞造成的后果。

天王星存在浓密的大气，由甲烷分子、氢分子，大量的氨分子、水分子和氯等组成。据推测，天王星有一个岩石和金属铁的核。核外是一个很厚的冰幔，主要由水冰组成，冰幔外面是分子氢气氢层，再向外就是很厚的大气。天王星已发现有 21 颗卫星。

1977 年我国天文学家和国外的天文学家同时发现天王星有环带，现在确认有 9 个环。

### 海王星

天王星是偶然发现的，海王星却是由亚当斯(John Couch Adams)和勒威耶(Urbain Leverrier)根据天体力学预报并于 1846 年发现的。海王星最亮时只有 8 等星那么亮，肉眼看不到它，在大望远镜里，它也不过是个淡绿色的小小圆盘状，视直径不到 4"。但是，伽利略可能在 1613 年看到它并有所记述，只不过他未曾意识到它是一颗行星。

海王星公转轨道半长径为 30.06 天文单位，公转周期 164.8 年，自转周期为  $22 \pm 4$  小时。海王星体积是地球体积的 57 倍，质量为  $1.029 \times 10^{26}$  千克，是地球的 17.22 倍，平均密度为 1.66 克 / 厘米<sup>3</sup>。

海王星也被浓云包围，大气中有氢、甲烷和氨。一般认为它有一个和地球差不多的核，由岩石组成，核外是质量较大的冰包层，外面是分子氢。海王星温度很低，在 -200°C 以下。

海王星有 8 颗卫星和光环。

### 冥王星

海王星的发现鼓舞人们去寻找第九颗大行星，经过努力，这颗行星终于 1930 年 2 月 18 日由汤博(Clyde Tombaugh)找到了。冥王星公转轨道的长半径为 39.44 天文单位，太阳光要经过大约 7 小时才能到达它。它的轨道把它带到海王星的轨道以内(比如：在 1979 年~1999 年就是处于这种情况)。它是九大行星中最小的一颗行星。冥王星的公转周期为 248 年，它从发现到现在还未走完 1 / 4 圈。亮度为 14 等，须用巨型望远镜观测。

冥王星的质量直到 1978 年发现冥卫后才被确定出，约为地球质量的 0.0024 倍，1994 年 Hubble 望远镜观测表明冥王星的直径值为 2320 千米，平均密度为 2.5~1.936 克/厘米<sup>3</sup>，估计其日照表面温度为 50K 左右，背面为 20K 左右。在如此低温下，绝大多数物质已经冻结为固态或液态。。

1978 年发现的那颗冥王星卫星，取名为卡戎。直径约为冥王星的 1 / 3，质量为冥王星的 3% 左右。卡戎绕冥王星转动的周期与冥王星自转周期相同，即为 6.3867 天，是颗天然同步卫星。

由于冥王星的特征又有一些类似彗星，所以它现在是颗最有争议的行星。

### 3.2.3 小行星

在太阳系中，除了九大行星以外，在红色的火星和巨大的木星轨道之间，还有成千上万颗肉眼看不见的小天体，沿着椭圆轨道不停地围绕太阳公转。与九大行星相比，它们好象微不足道的碎石头。这些小天体就是太阳系中的小行星。大多数小行星的体积都很小，是些形状不规则的石块。最早发现的“谷神星”（1801）、“智神星”（1802）、“婚神星”（1803）和“灶神星”（1807）是小行星中最大的四颗。其中“谷神星”直径约为1000千米，位居老大，老四“婚神星”直径约200千米。除去这“四大金刚”外，其余的小行星就更小了，最小的直径还不足1千米。自从1801年发现第一颗小行星，到20世纪90年代末，已登记在册和编了号的小行星已超过8000颗。据统计，小行星的总数当在50万颗左右。它们中的绝大多数分布在火星和木星轨道之间，与太阳的距离约2.06—3.65的天文单位。这部分区域被称为小行星带。

至于小行星带形成的原因，迄今还没有公认的定论。有一种叫“爆炸说”的理论认为：小行星带内原先有一颗与地球、火星不相上下的大行星，后来由于某种现在尚不清楚的原因，这颗大行星发生了爆炸，炸裂的碎片就成了现在的小行星。此外，还有所谓的碰撞说等等。这些假说都从某些方面假说了小行星的起源，但又都存在许多问题难以自圆其说。现在，越来越多的天文学家认为，小行星记载着太阳系行星形成初期的信息，小行星的起源是太阳系起源问题中不可分割的一环。

### 3.2.4 彗星

彗星是天空中非常引人注目的一种天体。在那井然有序的星空里，彗星好像是位外貌奇特的不速之客，拖着一条长长的象扫帚的尾巴，在繁星点缀的天幕上缓步挪移。由于彗星形状怪异，行踪不定，它的出现常常使人感到惊慌和恐怖，以至于人们把它与战争、饥荒、洪水和瘟疫等灾难联系在一起，所以彗星在人们心目中的形象不好，它成了“灾难”的征兆。其实，彗星的出现是一种自然现象，跟地球上的天灾人祸没有任何关系。

彗星是太阳系里的一族特殊成员，它们的轨道形状通常不外乎三种：椭圆、抛物线和双曲线。轨道为抛物线或双曲线的彗星，在途经太阳附近之后，便远遁深空，一去不复返。而那些运行在椭圆轨道上的彗星，则每隔一段时间定期回到太阳身边，称之为周期彗星。

彗星的与众不同之处在于它的大小和形态是随其离太阳的距离而变化的。离太阳很远时，彗星看上去只是一个朦胧的星状亮斑（称为彗头）。彗头由中心部分较亮的彗核和外围的云雾状包层——彗发组成。当彗星接近太阳时在太阳的辐射作用下，彗头的形状也在逐渐改变，

彗发变得越来越大，越来越亮。当彗星来到火星轨道附近时，由于受到更强的太阳辐射作用，从彗核蒸发出的物质越来越多，这些蒸发物在太阳的辐射压力和太阳风的作用之下，被“吹”向背着太阳的方向，形成著名的“彗尾”现象。彗星越走近太阳，彗尾就越长。过了近日点后，彗星渐渐远离太阳，其形态的改变则与接近太阳时相反。

尽管彗星在接近太阳时体积变得十分巨大，有的彗尾最长可达 3.2 亿多千米，但是它们的质量也不及地球质量的几十万分之一。彗星的质量主要集中在彗核部分，彗发和彗尾由极为稀薄的物质组成。至于彗核，人们推断认为它是由凝结成冰的水加上干冰（二氧化碳）、氨和尘埃微粒混杂而成，科学家形象地把它比喻作“脏雪球”（该模型是 1949 年由 Fred Whipple 提出的）。

光临太阳的众多彗星中知名度最高的，也是第一颗被算出正确轨道并按预言准时回归的彗星便是哈雷彗星（Halley's Comet），它平均每隔 76 年左右就会回归地球一次。哈雷彗星在我国历史上有丰富的记录，从春秋战国（公元前 613 年）直到清末的二千多年间，它的每次回归，我国史书中都有记载。

#### 哈雷彗星

哈雷（Edmund Halley）认为 1531，1607 和 1682 年出现的三颗彗星是回归到太阳系内区的同一颗彗星，并正确预言它将在 1758 年再次出现。1910 年 5 月哈雷彗星回归，当它从太阳和地球之间通过时，离地球只有 2400 千米，而它长长的彗尾足有 2 亿千米。当彗尾扫过地球时，曾有许多人惊惶失措，以为世界末日将临，而实际地球上并没有发现任何特殊现象。哈雷彗星最近一次回归是在 1985 年底和 1986 年初，下一次回归要到 2061 年左右。

#### 3.2.5 流星体

在太阳系有很多独立绕太阳公转的小天体，除已发现的小行星和彗星之外，其余的统称“流星体”。大多数流星体只是很小的体颗粒，流星体的质量一般小于 100 吨。有些流星体是成群地沿着相似轨道绕太阳公转，有些流星体则单个绕太阳公转。当流星体在轨道运行中经过地球附近时，由于受到地球引力的影响，就会高速进入地球大气，产生摩擦使流星体燃烧发光，呈现为“流星”现象。这就是我们有时会看到的一道亮光划破夜空。若是成群的流星体闯入地球大气，则呈现“流星雨”。在地球上观测流星雨好似从一辐射点射出，这个辐射点位于某一星座，我们就以这个星座给流星雨命名。比如狮子座流星雨就是辐射点在狮子座里。天文学家观测研究表明，约 90% 以上流星体来自彗星，也有小部分是行星碎屑。观测资料已经证实，猎户、宝瓶流星雨与哈雷彗星有关，英仙座流星雨与斯威夫特—塔特尔彗星有关，仙女座流星雨与比拉彗星有关，狮子座流星雨与坦布尔—塔特

尔营星有关，等等。

### 3.3 日食和月食

我们所见到的天空中的天体，最亮的是太阳，其次就是月亮。尽管月亮比太阳小得多，但是太阳和月亮离我们的距离不同，所以它们看起来就像差不多大小。地球上月球和地球共同绕着公共质心旋转，地球又带着月亮绕太阳运转。由于太阳、地球和月亮三者所处的特殊位置，太阳的光会被地球或者月亮挡住而出现月蚀或者日食。有时在骄阳当空，光辉灿烂的太阳会突然蒙上一块黑影，黑影逐步扩大，甚至把整个日面遮住，白天一下变成了黑夜，天空繁星闪烁，地上夜色朦胧，几分钟后，太阳又恢复了灿烂，这就是日食。有时皓月当空，圆圆的月亮会慢慢地残缺一块，并且越缺越多，经过一、两个小时后，月亮又有恢复了光辉，这就是月食。古代人由于对月食和日食的成因不清楚，曾有过很多的传说，比如用“天狗食日”、“蟾蜍食月”来解释日食和月食，把这天象看成是不祥之兆。现今人们不仅解释了日、月食的道理，而且还能准确地推算出每次日、月食发生的时刻、食分大小和见食地区。

为了把日、月食原理弄清，先介绍天体投影。阳光照射到地球或月球上，其身后会有一个投影，影子的结构可分为三部分：本影、半影和伪本影。其投影的主体是顶端背向太阳的会聚圆锥，这叫本影；本影延伸，是一个与本影同轴而方向相反的发射圆锥，这叫伪本影；在本影和伪本影的周围是一个空心发散圆锥，这叫半影。在本影中，阳光全部被遮；伪本影中，太阳中间部分的光辉被遮；而半影中，部分阳光被遮。当地球上部分地区进入月影时或月球的影子落在地球部分区域时，那里的人就可以看到日食；当月球进入地影时或地球的影子遮掩月球时，地球上向月半球的人就会看到月食。以日期来说，农历初一才有可能发生日食，而农历十六或十五左右可能发生月食。当然并非每月都发生日、月食，要发生日、月食，必定还有更严格的条件。总之，日食发生条件是日、月相合于黄白交点或其附近；月食发生条件是日、月相冲于黄白交点或其附近。在日、月食的过程中，全食最为完整。一次全食，它必然经过初亏、食既、食甚、生光和复圆5个阶段。常见日、月食每年各两次。

#### 3.3.1 日、月食的种类

##### 1、日食的种类

日食可分日全食、日偏食和日环食三种。不同类型日食的产生，主要与太阳、月球、地球三者的位置有关。

**日全食** 月球的本影在地球上扫过的地带称全食带，在全食带内，可见整个日轮被月轮遮掩，发生日全食。一次日全食所经历的时间仅2-7分钟。这是因为月影在地球上扫过的速度很快。

日偏食 地球上被月球的半影所扫过的地带称偏食带。偏食带比全食带宽，在偏食带内，可见日轮的一部分被月轮遮掩，发生日偏食。

日环食 地球上被月球的伪本影扫过的地带称环食带。当地球近日和月球远地时，环食带最宽。在环食带内，可见较小的月轮遮掩了日轮的中间部分，而日轮的边缘仍可见到。

日食总是从月轮的东缘遮掩日轮的西缘开始，被遮部分总是逐渐向东推移。所以，日全食的 5 个环节是在日轮上自西向东出现的：

初亏——月轮东缘与日轮西缘相外切，即日食开始。

食既——月轮东缘与日轮东缘相内切，即日全食开始。

食甚——月轮中心与日轮中心最接近率重合。

生光——月轮西缘与日轮西缘相内切，即日全食结束。

复圆——月轮西缘与日轮东缘相外切，日食结束。

## 2、月食的种类

如前所述，月球不可能进入地球的伪本影，月球进入地球半影叫半影月食，还可见到月，不是真正的食，所以月食只有月全食和月偏食两种。

月全食 月球进入地球本影，这时，地球上向月球上的人几乎都见到月轮整个被地影遮掩，产生月全食。一次月全食所经历的时间最长可达 1 小时 40 分钟。

月偏食 月球部分进入地球本影，可见月轮的一部分被遮，产生月偏食。因月色本来有明有暗，故月偏食不为人所注意。

月全食的 5 个环节是在月轮上自东向西出现的。月全食过程：

初亏——月轮东缘与地本影截面西缘相外切，即月偏食开始。

食既——月轮西缘与地本影截面西缘相内切，即月全食开始。

食甚——月轮中心与地本影截面中心最接近或重合。

生光——月轮东缘与地本影截面的东缘相内切，即月全食结束。

复圆——月轮西缘与地本影东缘相外切，月食结束。

## 3、日食和月食的区别：

(1) 日食有环食，月食无环食。

(2) 日食从日轮的西缘开始，在日轮的东缘结束；月食从月轮的东缘开始，在月轮的西缘结束。

(3) 一次日全食所经历的时间短，仅 2—7 分钟；月全食时间长，最长的一次月食可经历 1 小时 40 多分钟。

(4) 日、月食时，看到的月面光不同(因大气的折光作用)，日全食有贝利珠现象，月全食时月面呈古铜色。

(5) 日偏食时，各地所见食分不一样，也就是不同地方看到不同的日食景象。而月偏食时，各地所见食分一样，就是说半个地球上的人见到的月食情景是一样的。

(6) 日食时，见食的地区窄，见的时刻也不同，较西地区先于较东地区；月食时，见食的地区广，面向着月亮的那半个地球上的人可以同时看到月食。由于日食带的范围不大，日食时地球上只有局部地区可见。对于全球范围，日食次数多于月食；对于具体观测地点，所见到的月食次数多于日食。

## 第四节 星系

由几十亿到数千亿颗恒星、星际气体和尘埃物质等构成，占据几千光年到几十万光年空间的天体系统称为星系。包括太阳在内的由上千亿颗恒星组成的银河系就是一个普通的星系。可以说星系是宇宙的基本单位。

### 4.1 银河系

在不受城市灯光影响的地方，当你仰望夜空时，可以看到有一条相当宽的绵延天空的光带。我们肉眼能见的和因为太暗而肉眼看不见所有恒星，包括我们的太阳和太阳系在内，都属于这个光带，它就是银河系。我国古代称它为“天河”或“银河”，在欧洲则被称为乳白色的道路（Milk Way）。银河系中还包括许多星团、星际介质和星云。在银河中还可以看到许多暗带，说明在银河的方向上有大量的星际介质和暗星云存在。

#### 银河系的结构、大小和运动

河外星系的发现，使得我们可以通过它们来认识我们的银河系。

银河系的中心有一个突起的核球，半径有一万多光年，里面的物质非常密集，充满了浓厚的星际介质和星云。银河系还有一个扁平的盘，称为银盘。银盘中恒星很密集，还有各种星际介质和星云及星团。银盘的中心平面叫银道面，银盘的直径有 8 多万光年（早期值是 10 万光年），厚度只有几千光年。银盘一个非常引人注目的结构是有漩涡状的旋臂，因此银河系属于漩涡星系。

银河系除了核球和银盘以外，还有一个很大的晕，称为银晕。银晕直径约为 10 多万光年，银晕中的恒星很稀少，还有为数不多的球状星团。

银河系具有自转运动，但不像我们地球这样整体转动。银河系自转的速度，起先随离开银河系中心的距离增大而增大，但达到几十万光年后就停止增加，直到银晕中很远处都大致保持不变。

#### 河外星系 M100

太阳在银河系中位于银盘之内，离开银河系中心约 2.4 万光年。

太阳附近的银盘厚度约为 3000 光年。太阳参加银河系自转的速度每秒 220 千米(早期为 250 千米/秒)，太阳在大致正圆的轨道上绕银心转一周需要 2.5 亿年（也称为宇宙年）。假定银河系中的恒星质量都与太阳相同(这并不是事实)，那么可以推算出，在银河系中，大约有 1000 多亿颗恒星。

## 4.2 河外星系

### 4.2.1 什么是河外星系？

如果说银河系是一个巨大的“星城”，那么宇宙间是否仅此一个“孤城”呢？不是的。在广袤无垠、浩瀚辽阔的宇宙空间，还有许许多多象我们银河系一样的“星城”，我们把银河系以外的星系统称河外星系。估计河外星系的总数在千亿个以上，它们如同辽阔海洋中星罗棋布的岛屿，故也被称为“宇宙岛”。

### 4.2.2 河外星系是怎样被发现的？

河外星系的发现过程可以追溯到两百多年前。当时法国天文学家梅西耶( Messier Charles )为星云编制的星表中，编号为 M31 的星云在天文学史上有着重要的地位。初冬的夜晚，人们可以在仙女座内用肉眼找到一个模糊的斑点，俗称仙女座大星云，它就是 M31。从 1885 年起，人们就在仙女座大星云里陆陆续续地发现了许多新星，从而推断出仙女座星云不是一团通常的尘埃气体云，而是由许许多多恒星构成的系统，而且恒星的数目一定极大，这样才有可能在它们中间出现那么多的新星。1924 年，美国天文学家哈勃(E. P. Hubble)用当时世界上最大的望远镜在仙女座大星云的边缘找到了被称为“量天尺”的造父变星，利用造父变星的光变周期和光度的对应关系才定出仙女座星云的准确距离，证明它确实是在银河系之外，也像银河系一样，是一个巨大、独立的恒星集团。因此，仙女星云应改称为仙女星系。

从河外星系的发现，可以反观我们的银河系。银河系仅仅是一个普通的星系，是千亿星系家族中的一员，是宇宙海洋中的一个小岛，是无限宇宙中很小很小的一部分。

### 4.2.3 星系的分类

河外星系的大小不一，外观和结构也显得多种多样。按形态可以把星系分为三大类：椭圆星系、旋涡星系和不规则星系。

在星系世界中，大量的成员与我们的银河系一样，外观呈旋涡结构，其核心部分表现为球形隆起(称为核球)，核球外则为薄薄的盘状结构，从星系盘的中央向外缠卷有数条长长的旋臂，这就是所谓的旋涡星系。

有的星系呈现椭圆形或正圆形，没有旋涡结构，称为椭圆星系，它们中有许多是步入垂暮之年的“老龄”星系。一般来说，在椭圆星系内不再有新的恒星诞生。



有些介于旋涡星系和椭圆星系之间的星系，有明亮的核球和扁盘，但没有旋臂，形似透镜，称为透镜星系。

还有一类星系既没有旋涡结构，形状也不对称，无从辨认其核心，有的甚至好象碎裂成几部分，称之为不规则星系，在其内部仍有恒星在不断形成之中。

河外星系常用它们所在的星座命名；另外，人们也习惯用它们在一种星表中的序号命名。如《梅西耶(C. Messier)星表》和《星云星团新总表》，前者用 M 表示，后者用 NGC 表示，它是该表名的英文缩写。

#### 4.2.4 星系的大小、质量、光度及距离

##### 1、星系大小、质量、光度

假若知道星系的距离  $r$ ，并通过观测能定出河外星系的角半径  $a$ ，那么利用三角学算式  $d=r \sin a$ ，就可计算出星系的真半径  $d$ 。但是由于星系的亮度从中心向外逐渐减小，其边缘很难和星空背景分开，使得确定星系边界并不容易，所以这种方法实际上并不容易。尽管如此，天文学家还是想出一些办法测定出了河外星系的大小。结果表明，星系之间大小相差很悬殊，最大的椭圆星系的直径达 100 千秒差距，即超过 30 万光年；最小星系的直径在 0.1~1 千秒差距之间，较小的星系一般都是椭圆星系。旋涡星系一般在 5~20 千秒差距范围内。在星系外围还存在由中性氢原子组成的物质，叫做星系晕，星系晕的直径通常为星系直径的 1.5~2 倍大。

星系的大小相差很大，星系的质量和光度也各有千秋。旋涡星系的质量为  $10^9$ — $10^{11}$  太阳质量，即太阳质量的 10 亿~1000 亿倍。不规则星系的质量比旋涡星系的质量普遍要小一些。至于椭圆星系，有的很大，比旋涡星系的质量要大 100~10000 倍，称为巨椭圆星系；有的椭圆星系质量较小，只有太阳质量的百万倍，称为矮椭圆星系。

星系的质量是怎样测定的呢？测定星系质量的方法有两种：一种是根据星系自转速度，另一种是利用双重星系。不同类型的星系，其光度的差别非常大，旋涡星系的光度在  $10^8$ ~ $10^{10}$  太阳光度之间，用绝对星等表示为-15 等~-21 等；椭圆星系的光度彼此相差很大，矮椭圆星系的光度为  $10^6$  太阳光度，绝对星等为-9 等，巨椭圆星系的光度为  $10^{11}$  L，绝对星等为-23 等；不规则星系的光度介于  $10^7$  L 和  $2 \times 10^9$  L 之间，绝对星等为-13 等~-18 等。

##### 2、怎样测定星系距离

星系是在我们银河系之外的恒星系统。银河系本身的尺度已达 10 万光年，河外星系距离的尺度要大得多。这么遥远的距离是怎样测定的呢？

天文学家想出了许多方法来测定星系的距离。人们发现，利用造

父变星的光度和周期关系可以测定出造父变星的距离。这种方法也能用来测定星系的距离。只要在河外星系中找出造父变星，求出造父变星的距离就可以认为是它所在的河外星系的距离。不过造父变星的光度不够大，星系再远些，用这种方法就不能用了。

在有些星系中可以观测到超新星、明亮的 O 型星和 B 型星，它们的光度都很大，假定星系中的这些星的光度和银河系中的同类恒星的光度是相同的，那么根据超新星和 O 型星、B 型星的光度和视亮度，利用光度、视亮度和距离的关系，也能求出它们的距离，这一距离也就是它们所在星系的距离。用这种方法测量的星系距离可达 820 万光年。

对于更为遥远的星系，可根据谱线红移的大小来测定星系的距离。20 世纪初，天文学家发现绝大多数河外星系的光谱线都有红移现象，根据哈勃定律便可测定出星系的距离  $r$ 。

### 3、最近和最远的星系

距离银河系最近的星系是 1994 年发现的一个暗弱的矮椭圆星系，它位于人马座中，距离我们地球约 8 万光年，它与银河系中心的距离大约 5 万光年。这个矮星系的大小约 10000 光年，是正常的矮星系直径的 10 倍。

最远的星系是 1996 年发现的位于室女座中的一个无名星系，距离在 80 亿~120 亿光年之间，天文学家们认为这一星系是非常年轻的，年龄可能只有 1 亿年，它正以每年 30 个太阳质量的速率将气体转化为恒星。

### 4.3 活动星系

多数星系中心部分都有密集的称为星系核，星系核的质量约为  $10^8$  个太阳质量，星系核中包含恒星以及电离气体、磁场和高能粒子。正常星系的核，通常是“宁静”的。星系核有明显活动的星系约占总数的 5%，叫活动星系。这个活动的星系核叫做“活动星系核—Active Galactic Nuclei (AGNs)”。活动星系核研究是当今天体物理界非常流行和活跃的研究领域。活动星系核有一些共同的特性：高光度，总光度  $10^{43\sim 48}$  erg/s；小尺度，大小小于 0.1pc；物质高度密集（在 0.1pc 的范围内有  $10^{5\sim 10}$  M 物质）；非热辐射；光变；超光速现象。20 世纪末 GRO 上的 EGRET 发现 60 多个活动星系核有伽玛辐射。活动星系核很可能是认识其他星系的突破口，它们对于研究星系的能源，演化，甚至宇宙的起源和演化都有极其重要的作用。

## 第五节 宇宙学

### 5.1 宇宙学研究简史

宇宙是有限的还是无限的？有没有中心？有没有边？有没有生老病死？有没有年龄？这些恐怕是自从有人类的活动以来一直被关心的问题。宇宙学——它是从整体角度探讨宇宙结构和演化的天文学分支学科。其主要目的是利用已有的物理定律，或利用一些局部成立的定律，合乎逻辑地对宇宙作出推论。研究宇宙的演化的历史。

#### 1、20 世纪以前的宇宙说

##### (1) 西方的宇宙论

可分为四个发展时期。第一个时期是启蒙时期，主要是远古时代关于宇宙的神话传说。第二个时期是从公元前 6 世纪到公元 1 世纪，以至到中世纪(15 世纪)为止，古希腊，罗马在宇宙的本源和结构上曾出现过唯物论、唯心论两派的激烈斗争，此后西方进入中世纪，宇宙学沦入经院哲学的神学深渊，地心学主宰宇宙学。第三时期是从 16 世纪到 17 世纪，16 世纪哥白尼倡导日心说，开始把宇宙学从神学中解放出来，到 17 世纪，牛顿开辟了以力学方法研究宇宙学的新途径，形成了经典宇宙学。第四时期，18 世纪到 19 世纪，自康德-拉普拉斯的星云说问世以后，确立了天体演化学科，赫歇尔父子对恒星进行了大量的观测，把以前只局限于太阳系的研究扩大到银河系和河外星系，在此期间，已经有分光方法应用于天文学，这一时期的发展为现代宇宙学的发展奠定了基础。

##### (2) 我国的宇宙理论

作为世界上四大文明古国的中国，在天文学方面有着灿烂的历史，在天象记载、天文仪器制作和宇宙理论方面都为我们留下了珍贵的记录。最近，何香涛先生（2002，科学出版社）对此作了详细的叙述。中国古代有三种比较系统的宇宙学说，《晋书·天文志》中写道“古言天者有三家，一曰盖天，二曰宣夜，三曰浑天”。

**盖天说** 盖天说可以追溯到殷周时代，主张“天圆如张盖，地方如棋局”的天圆地方说。它认为大地是一个正方形，天如一个圆盖罩着大地；但圆盖型的天与方形大地无法衔接，于是又设想有 8 根大柱支撑着。共工怒触不周山和女娲氏炼石补天的神话便是从盖天说的图像编造的。天圆地方的主张存在着不能自圆其说的地方，对此，春秋时代孔夫子的弟子曾参就持怀疑态度。有人问他：“天圆而地方，诚有之乎？”他回答：“如诚天圆而地方，则是四角之不掩”。战国时期的著名诗人屈原在其长诗《天问》中也对天圆地方说提出过质疑。后来，盖天说又进一步发展，出现第二次盖天说。新的盖天说不仅认

为天是拱形的，而且地也是拱形的。天地如同心球穹，两个球穹的间距是八万里，日月星辰的出没是由于远近所致。太阳则统一个所谓“七衡六间图”运行，七衡指七个同心圆，春夏秋冬太阳在不同的衡上运动。冬至在最外的一个圆“外衡”上运动，夏至则在最内的一个圆“内衡”上运动，其他季节则在“中衡”上运动。

**浑天说** 浑天说主张天如球形，地球位于其中心。浑天说大约始于战国时期。到了汉代，浑天说亦颇具影响，西汉末的杨熊曾深入研究过浑天说，指出浑天说优于盖天说。据说当时有人便根据浑天说的概念制造了浑仪，并用以测量天体。浑天说最全面的表述是东汉的张衡，他在其《浑天仪图注》中写道“浑天如鸡子，天体圆如弹丸，地如鸡子中黄，孤居于内，天大而地小。天表里有水，天之包地，犹壳之裹黄。天地各乘气而立，载水而浮。周天三百六十五度又四分之一，又中分之，则半一百八十二度八分之五覆地上，半绕地下，故二十八宿半见半隐。其两端谓之南北极。北极乃天之中也，在正北，出地上三十六度。然则北极上规经七十二度，常见不隐。南极乃地之中也，在正南，入地三十六度，南归七十二度常伏不见。两极相去一百八十二度强半，天转如车之运也，周旋无端，其形浑浑，故曰浑天也”。浑天说认为天是一个球形，比之盖天说的半球形是进了一步，而且，浑天说对天球的运转给出了一个定量的描述，它与近代天球概念的视运动相当接近。

最早的浑天说认为地球浮在水中，后来又发展为浮在气中，日月都是附在天球上运动。因此，浑天说不仅是一种宇宙理论，而且在实际测量天体的运行方面也具有实用价值。

浑天说产生之后，在相当长的一段历史时期内，形成浑天说和盖天说并存的局面，且两种学说常常相互驳斥。后来，浑天说在解释天体运动方面渐渐占了优势。根据浑天说制造的浑仪可以演示日、月、星辰的视运动，因此，浑天说逐渐占据了主导地位。

**宣夜说** 宣夜说是中国古代的另一种颇具哲理的宇宙学说。宣夜说认为天是没有形质的，不存在固体的“天穹”，而只是无边无际的气体，日月星辰漂浮在无限的气体之中，游来游去。这是一种朴素的无限宇宙论的观念，它否认了神的存在，认为宇宙的一切都是自然的。在古代所有的宇宙论中朗提倡无限宇宙和无神思想是难能可贵的。宣夜说产生之后，有人提出不少质疑，“杞人忧天”的故事便是其一。

《列子·天瑞篇》中记述“杞国有人忧天地崩坠，身无所寄……，晓之者曰：日月星宿亦积气中之有光耀者，只使坠，亦不能有所中伤”。回答者的解释更进一步认为天体也是由气组成的，只不过是发光的气而已。后代的一些学者，曾不断地对宣夜说的观点加以阐述和发挥。如三国时代的杨泉，在其《物理论》中进一步发挥道“夫天，之气也，

皓然而已，无他物焉”。他并且认为，银河也是运动着的气体，恒星就是从这些气体中诞生的。

## 5.2 现代宇宙学的发展

现代宇宙学是从爱因斯坦 1917 年发表的论文《对广义相对论的宇宙学的考察》开始的，1922~1927 年，原苏联数学家弗里德曼 (A. Friedmann)、比利时科学家勒梅特 (A. G. Lemaitre) 提出和发展了宇宙膨胀模型。1948 年，邦迪 (Bondi, H.)、戈尔德 (Gold, T.)、霍伊尔 (Hoyle, F.) 提出完善的宇宙学原理与稳恒态宇宙模型。还有一些宇宙论研究者，把总星系的膨胀同万有引力常数  $G$  联系起来，1975 年美国范弗兰登认为  $G$  正以每年百亿分之一速度减小。有人提出了引力常数  $G$  的减小是总星系膨胀的原因。

哈勃膨胀、微波背景辐射、轻元素的合成以及宇宙年龄的测量被认为是现代宇宙学的四大基石。今天的宇宙学研究更依赖于观测技术以及科学水平的提高。这些观测事实都支持了目前流行的大爆炸宇宙学的理论观点。

现代宇宙学认为宇宙没有中心，但宇宙的过去历史和将来命运究竟如何是当代宇宙学的前沿课题。

## 5.3 现代宇宙学的建立和发展

现代宇宙学是建立在大尺度观测特征基础上的各种宇宙模型。宇宙学模型就是根据观测宇宙的主要特征，对宇宙结构给出简化的数学描述。任何一个宇宙学模型都必须涉及到目前观测到的宇宙的各种特征或性质。然而一个模型往往只容许多这样的物理量之观测值以某种特定的方式互相配合，于是，模型和真实宇宙之间的兼容性就可以对照观测事实而予以检验。

### 5.3.1 宇宙学原理

近代宇宙学的基本出发点是认为宇宙是均匀的，各向同性的，这个宇宙均匀性与各向同性的假说称为宇宙学原理。

宇宙学原理就是宇宙学家研究宇宙学的前提条件，或称之为假设。这个假设有如下的观测事实与其相符：

- (1) 星系团的空间分布基本上是均匀的，各向同性的；
- (2) 射电源的空间分布也是均匀各向同性的；
- (3) 宇宙背景辐射几乎严格各向同性

宇宙均匀性和各向同性的基本结论是，不存在任何意义上的宇宙中心，任何地方在总星系中本质上是等价的。银河系并不是一个特殊的系统。因此，当我们从其它天体上观测到的宇宙发展史也应与地球上看到的一样。在同一时刻，宇宙间的各点(星系团)看到的宇宙图像是一样的。这个时间叫做宇宙时，当讨论宇宙发展史时，就是讨论在各个宇宙时的一幅幅图像。在理解宇宙的均匀性时必须像理解气体的

均匀性一样，它不等同于宇宙的细节，而只适应于对直径为  $10^{8\sim 9}$  光年的区域平均后得到的“抹匀的”宇宙，这些区域大到足以包括许多星系团。下面我们介绍一些重要的宇宙模型。

### 5.3.2 重要宇宙模型：

#### 1、牛顿无限、静止宇宙模型

19 世纪末以前，牛顿的经典力学体系在物理学和天文学上取得了辉煌的成就。以牛顿万有引力定律为基础，哈雷准确的预报了哈雷彗星的回归；通过对天王星轨道的研究，英国天文学家亚当斯和法国天文学家同时根据牛顿力学算出了海王星。牛顿万有引力定律很好的解决了太阳系里的各种运动情况。在宇宙学问题的研究上，牛顿认为宇宙存在于欧几里得平直空间。如果宇宙是有限的，就有边界和中心，由于各种部分之间的相互吸引，物质必然落向中心，并形成中心巨大的物质球，显然这与现代观测事实不符。

在一个无限的宇宙中，无边界也无中心，不存在某一个特殊的方向。在绝对的时空中每一团物质都受到来自各方向的引力作用，这些引力的作用在各个方向上是大小相等的，于是该团物质便处于平衡状态而停留在原地。不过对于宇宙的局部物质可以各自聚集成团，各个团物质彼此相隔很大的距离，散布在无限的空间内。在总体上宇宙是稳定的，而在有限的局部区域内是不稳定的，天体有生有灭，形成丰富而多样的天体。这就是牛顿的无限、静止宇宙模型。牛顿这一体系是建立在绝对时空观的基础上的。该模型无法克服奥伯斯佯谬，也与星系红移观测事实相矛盾，因而早已被放弃。

#### 2、爱因斯坦静态宇宙模型

爱因斯坦(Albert Einstein)于 1915 年建立了广义相对论后，他运用非欧几里得几何学（黎曼几何）把引力解释为空间弯曲的效应，而空间弯曲是由物质存在决定的。后来他于 1917 年发表了题为《对广义相对论的宇宙学的考察》的论文。他将广义相对论的引力方程用于整个宇宙，并试图求得一个宇宙不随时间变化的宇宙静态解，为此，他引入一个所谓“宇宙常数”项，作为斥力作用因子，从而得出了一个有限无边的静态宇宙。爱因斯坦弯曲的宇宙模型可看成是四维空间的一个三维超球面。球面的面积是有限的，但沿着球面没有边界，也没有中心，球面保持静止状态。这个有限的宇宙，不存在奥伯斯佯谬。

1930 年爱丁顿(Arthur Stanley Eddington)证明这个模型是不稳定的，只要有小扰动，就会膨胀或收缩，因而实质上不可能保持静态。不过，爱因斯坦的那篇论文还是被人们认为是现代宇宙学的开端，而他本人被誉为相对论宇宙学的前驱者。

#### 3、弗里德曼宇宙模型

1922 年，原苏联数学家弗里德曼(A. Friedmann, 1888~1925)求

得了爱因斯坦场方程的解，建立了弗里德曼宇宙模型，证明了宇宙并非必须静止，从而为宇宙模型研究的进展打下了基础，这个模型也称为标准宇宙学模型。当宇宙常数  $\Lambda=0$  时，根据所选择的  $K$  值的不同，分出三种宇宙类型：

$K=+1$  为封闭宇宙， $K=0$  或  $K=-1$  为开放式宇宙。在目前时刻，三种模型都得到膨胀的宇宙。对于  $K=0$  或  $K=-1$  的情形，宇宙会无限膨胀下去；对于  $K=+1$  的情形，宇宙膨胀到最大程度后，又会开始收缩，最后所有的星系又都挤在一起。从大爆炸到大挤压大约要 500 亿年，天文学家推测宇宙年龄约 150 亿年，因此，目前的观测还无法说明我们的宇宙属于那种情形的。根据弗里德曼宇宙模型，上面三种情形的宇宙也可以由另外一个参量，即宇宙平均物质密度（ $\rho$ ）来描述：如果宇宙平均物质密度小于临界密度，物质的引力不够大，宇宙将无限膨胀下去，最后星系以稳恒的速度相互离开；若平均物质密度等于临界密度，宇宙的膨胀快到足以刚好避免坍缩，宇宙虽然也是无限膨胀，但星系分开的速度越来越慢，趋向于零，而永远不为零；若宇宙平均物质密度大于临界密度，物质的引力能够阻止宇宙继续膨胀，最后转为收缩。弗里德曼给出的宇宙发展的三种模式，预示了宇宙可能的动态变化，为大爆炸学说以及暴胀宇宙学说的建立打下了理论基础。

#### 4、稳恒态宇宙模型

稳恒态宇宙学是 1948 年英国天文学家赫尔曼·邦迪、托马斯·戈尔德和弗雷德·霍伊尔共同提出的。模型以哈勃定律的发现和宇宙膨胀的观测事实为支撑。他们提出了所谓完全宇宙学原理。完全宇宙学原理是指宇宙除了在空间上均匀及各向同性外，在时间上是稳恒的，即在宇宙的大尺度特征下任何时候都一样。为了使宇宙保持稳恒，必须要求在宇宙各处不断地有物质创造出来。他们还算出，每 2000 亿年在一升体积内创造出一个氢原子。稳恒态宇宙论认为物质可以从虚无中产生出来，这就违背了物质守恒定律，是唯心主义的东西。尽管稳恒态模型有很多吸引人的特点，但由于它所预言的星系分布情况和射电源计数都与实际观测不符，另外它难以解释 1965 年宇宙微波背景辐射而未能被广泛接受。

#### 5、大爆炸宇宙模型

1922 年，弗里德曼改进了爱因斯坦描述宇宙本性的方程，并导出了这些方程的动态解。五年后，比利时天文学家勒梅特也得到了同样的解并提出了一个大胆而明确的概念，认为“空间要随时间而膨胀”，这正是爱因斯坦方程的动态意义。1929 年，埃德温·哈勃发现了一个具有里程碑意义的观测结果，即远处的星系总是远离我们而去。也就是说宇宙正在不断膨胀。这意味着，在早先星体相互之间更加靠近。所以哈勃的发现暗示存在一个叫做大爆炸的时刻，当时宇宙

无限紧密。

1946 年，乌克兰裔美国物理学家伽莫夫（Gamov, George, 1904--1968）与他的学生阿尔菲和赫尔曼共同研究，建立了热大爆炸的观念。这个创生宇宙的大爆炸不是习见于地球上发生在一个确定的点，然后向四周的空气传播开去的那种爆炸，而是应该理解为空间的急剧膨胀。根据大爆炸宇宙论，甚早期的宇宙是一大片由微观粒子构成的均匀气体，温度极高，密度极大，且以很大的速率膨胀着。这些气体在热平衡下有均匀的温度。这统一的温度是当时宇宙状态的重要标志，因而称宇宙温度。气体的绝热膨胀将使温度降低，使得原子核、原子乃至恒星系统得以相继出现。

从 1948 年伽莫夫建立热大爆炸的观念以来，通过几十年的努力，宇宙学家们为我们勾画出这样一部宇宙历史：

大爆炸开始时                      150~200 亿年前，极小体积，极高密度，极高温。

大爆炸后  $10^{-43}$  秒              宇宙从量子背景出现。

大爆炸后  $10^{-35}$  秒              同一场分解为强力、电弱力和引力。

大爆炸后  $10^{-5}$  秒                10 万亿度，质子和中子形成。

大爆炸后 0.01 秒                1000 亿度，光子、电子、中微子为主，质子中子仅 1/10 亿，热平衡态，体系急剧膨胀，温度和密度不断下降。

大爆炸后 0.1 秒后               300 亿度，中子质子比从 1.0 下降到 0.61。

大爆炸后 1 秒后                100 亿度，中微子向外逃逸，正负电子湮没反应出现，核力尚不足束缚中子和质子。

大爆炸后 13.8 秒后              30 亿度，氘、氦类稳定原子核（化学元素）形成。

大爆炸后 35 分钟后              3 亿度，核过程停止，尚不能形成中性原子。

大爆炸后 30 万年后              3000 度，化学结合作用使中性原子形成，宇宙主要成分为气态物质，并逐步在自引力作用下凝聚成密度较高的气体云块，直至恒星和恒星系统。

大爆炸理论模型得到若干重要观测事实的支持：

(1) 星系距离越远退行速度越大

大爆炸理论的科学性令人不得不信服。最直接的证据来自对遥远星系光线特征的研究。20 年代，天文学家埃德温·哈勃（Edwin Hubble）注意到，远星系的颜色比近星系的要稍红些。哈勃仔细测量了这种红化，并作了一张图。他发现，这种红化是系统性的，星系离我们越远，它就显得越红。哈勃认为，光波变长是由于宇宙正在膨胀的结果。哈勃的这个重大发现奠定了现代宇宙学的基础。

膨胀空间的基本概念可通过一项简单的模拟来加以理解。设想在



一个气球上点几个点，当气球被胀大时，对每个点而言，另外的点都是离开它而去的。它邻近的点似乎都在远离，而且这种膨胀是处处相同的，不存在特殊的中心。从任意一点来看，离它最近的钮扣以某种速度退行，且点离得越远，它退行得越快。因此这种膨胀意味着退行速度与距离成正比-这是一个极为重要的关系。借助这个图像，我们现在就可想象出光波是如何在膨胀空间中或星系间传播的。当空间伸长时，光波波长也跟着变长，这就解释了宇宙学红移现象。哈勃发现，红移量与距离成正比，同这个简单的图像模拟结果完全一致。

## (2) 3K 宇宙微波背景辐射 (1978 年诺贝尔物理奖)

20 世纪四十年代末，大爆炸宇宙论的鼻祖伽莫夫认为，我们的宇宙由于膨胀还有早期高温宇宙的温度，其温度约为 6K。这种辐射形成了宇宙中的一个背景，叫做微波背景辐射。微波背景辐射的发现，完全是一次偶然机会。1964 年，美国贝尔电话实验室的两位工程师彭齐亚斯(A. A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)安装了一台用以接收“回声”的卫星微波信号的羊角形巨型接收天线(20 英尺)，为了检测这台天线的低噪声性能，他们避开噪声源而将天线指向天空进行测量。在测量过程中他们发现，无论天线指向什么天区在波长 7.35cm 处，总会接收到一定的微波背景噪声，各个方向上信号的强度都一样。这种噪声的波长在微波波段，对应于有效温度为 3.5K 的黑体辐射出的电磁波。由于这种辐射和观测方向无关，它既不可能是来自太阳系也不可能来自银河系。微波背景辐射只可能来源于更为深广的宇宙。由于这种辐射相当于绝对温度在 2.5~4.5K 之间的黑体辐射，通常称为 3K 宇宙微波背景辐射。

这一发现，使许多从事大爆炸宇宙论研究的科学家们获得了极大的鼓舞。因为彭齐亚斯和威尔逊等人的观测竟与理论预言的温度如此接近，正是对宇宙大爆炸论的一个非常有力的支持！

宇宙微波背景辐射的发现，为观测宇宙开辟了一个新领域，也为各种宇宙模型提供了一个新的观测约束，这一发现大大促进了宇宙学的发展。彭齐亚斯(A. A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)因此而获得了 1978 年度的诺贝尔物理学奖。瑞典科学院在颁奖决定中指出：这一发现，使我们能够获得很久以前宇宙创生时期所发生的宇宙过程的信息。

## (3) 宇宙氦丰度

由热大爆炸理论预言宇宙应当由大约 75% 的氢和 25% 的氦组成，这与天文测量结果极为吻合。

把宇宙膨胀、宇宙背景热辐射和化学元素的相对丰度综合在一起，便成为支持大爆炸理论的强有力的证据。不过，还存在许多悬而未决的问题。例如，现在宇宙为什么恰恰以这样的速度在膨胀，换句话说，

大爆炸为什么如此之强？早期宇宙为什么如此均匀？空间各个方向和不同区域中的膨胀速度为什么这样相近？宇宙背景辐射探测卫星所发现的少量密度涨落对星系形成至关重要，而这又是如何起源的？等等。近年来为揭开这些奥秘，人们付出了并将付出巨大的努力。

### 5.3.3 宇宙可能的结局

宇宙膨胀过程是引力与膨胀初速度之争，谁胜谁负取决于宇宙物质密度。如果宇宙物质密度小于或等于某一临界密度（临界密度约为  $5 \times 10^{-30}$  克/厘米<sup>3</sup>），将没有足够的引力阻止膨胀，宇宙膨胀永无止境，我们称宇宙的膨胀是开放的，称为开宇宙；如果宇宙物质密度大于临界密度，巨大的引力会使得膨胀最终停止并接下来收缩，在这一情形下称宇宙的膨胀是封闭的，称为闭宇宙。所以讨论宇宙可能的演化结局与讨论宇宙的有限或无限是完全等价的！

根据广义相对论框架下的宇宙膨胀动力学方程，宇宙学家发展了三种判断有限还是无限也即推断其演化结局的方法：

- a) 以密度为判据
- b) 以膨胀的减速参量为判据
- c) 以宇宙年龄为判据

由于目前为止还不能在宇宙的两种可能结局间作出判断，我们不妨都看一看：

- a) 开宇宙（可能性比较大些）

随着恒星不断从气体中诞生，气体越来越少，直至无法再形成新的恒星。

$10^{14}$ 年后，恒星全部失去光辉，宇宙变暗，星系核处黑洞不断变大。

$10^{17}$ – $10^{18}$ 年后，只剩下黑洞和一些零星分布的死亡了的恒星。恒星中质子开始变得不稳定。

$10^{24}$ 年后，质子开始衰变成光子和各种轻子。

$10^{32}$ 年后，衰变过程结束，宇宙中只剩下光子、轻子和大黑洞。

$10^{100}$ 年后，黑洞完全蒸发，可称为世界末日。

- b) 闭宇宙

膨胀停止的早晚取决于宇宙物质密度的大小。

假设物质密度是临界密度的 2 倍，这膨胀过程经过约 500 亿年后停止，宇宙半径比现在大一倍。一旦自引力占上风，宇宙开始收缩，收缩过程几乎正好是膨胀过程的反演，1000 亿年后重新回复到大爆炸发生时的极高密度和极高温度状态。且收缩过程越来越快，最后称为“大暴缩”。

闭宇宙的结局似乎比开宇宙差得多，但我们不必杞人忧天。

到这里为止，本文开头提出的三个问题，除了第一个尚需更高精度的观测外，都可作出较明确的回答：宇宙没有中心没有边，不管它

是有限的还是无限的；宇宙在时间上有一个开端，有没有终结则要看其密度而定。

## 第六节 20 世纪六十年代后天文学的重要发现和展望

### 6.1 20 世纪六十年代的四大发现：

6.1.1 星际分子：1963 年温雷伯在仙后座发现波长为 18 厘米的羟基（OH）分子吸收谱线，1969 年发现甲醛分子，1974 年发现在人马座里有乙醇，这个星云里的酒精含量特别多，1978 年，已经发现 48 种，包括氰化氢分子，2001 年，100 多种。星际分子的发现也给科学家提出了问题，比如在星际空间如何形成分子（压力比地球上最好的真空低几十万倍）？如何发生化学反应（温度为-270 度）？分子如何存在（恒星的强辐射会破坏分子）？等等

6.1.2 微波背景辐射：1964--1965 年期间，贝尔电话公司的两位研究人员，彭齐亚斯和威尔逊在一个人造卫星跟踪站里进行着改进同卫星的通讯联系的工作。他们发现一种来自宇宙噪声（它的波长属于微波波段；它的强度很高；它在各个方向上分布均匀；弥漫在整个天空背景上；绝对温度三度左右）。当时美国的普林斯顿大学的一个以迪克为首的宇宙学研究小组正在研制一种望远镜测量伽莫夫等人的预言，大爆炸宇宙学还具体预言了现在宇宙背景辐射的温度应当大约是绝对温度五度。当他们得知彭齐亚斯和威尔逊的发现时非常敏感地意识到彭齐亚斯和威尔逊所发现的宇宙噪声就是微波背景辐射。理论和实际观测到的绝对温度三度非常接近。彭齐亚斯和威尔逊也由于这个重要发现而获得了 1978 年的诺贝尔物理学奖金。

6.1.3 中子星：1967 年 10 月，英国剑桥休伊什(Hewish, A)教授和他的研究生贝尔(Bell, S. J)（24 岁）在进行行星际闪烁的观测研究时，意外地发现了来自宇宙空间一个特殊的射电源，脉冲周期为 0.714 秒。由于当时在英国流行着外星人，所以有人曾经猜想是地球之外的高等智能动物发来的电报信号，天文学家还真的把最初发现的几个脉冲星取名为“小绿人”1, 2, 3, 4 号，后来发现不少这样的信号后人们就放弃了“小绿人”的看法。1968 年 2 月休伊什教授等人在《自然》杂志上发表文章：“观测到脉冲射电源”，他们的发现轰动全世界天文学界和物理学界，定名“脉冲星”。休伊什因此获得 1974 年 Nobel 奖。

6.1.4 类星体：1963 年，荷兰天文学家施米特（M. Schmidt）在 Willson 山天文台对射电源 3C273 进行了观测发现：它象但不是一颗恒星；距离 20 亿光年（远大于 10 万光年）；比恒星亮数亿倍；奇怪的发射线等等。仔细研究发现他们是实验室里发射线，只不过波长向红端有所移动。这个发现大大地推动了黑洞物理的研究。

## 6.2 20 世纪后 30 年天文学的发展：

随着新设备的投入使用，新的发现和新的成果不断出现：伽玛暴的发现，暗物质研究的发展，大型计算机的应用，新的高能卫星的观测发现 TeV 的辐射，同时观测越来越接近天体的中心（天体发动机的核心），大样本巡天观测，宇宙长城及宇宙空洞的发现，类太阳系的发现，太阳系外等等。这些新的发现和进展为天体物理的发展起到巨大的促进作用。同时，新能源、新的居住地、星外文明也是大家关心的问题。

## 6.3 新世纪天文学发展展望

在我们寻求理解人类在宇宙中位置的道路上，充满了许多秘密，如：宇宙是怎样产生、发展的？遍布宇宙的暗物质和暗能量的本质是什么？行星系统是如何形成和演化的？像人类所处的太阳系这样的行星系统在宇宙是普遍存在的吗？是否有任何太阳系外的行星系统栖息着生命？等等。

21 世纪将是人类着眼太空的时代，随着世界科技的飞速发展，以及对天文学研究的大量人力、财力的投入，更新一代望远镜的研制、使用，更先进的天文观测卫星的上天，相信人类将逐步科学地认识宇宙，从而最终为人类造福！

## 【参考文献】

- 《简明天文学教程》，余明主编，科学出版社，2001；
- 《观测宇宙学》，何香涛著，科学出版社，2002；
- 《大宇宙百科全书》，[英]约翰 格里宾/著，黄磷/译，海南出版社，2001；
- 《宇宙与人》忻迎一 著，中国电影出版社，2001；
- 《宇宙天体交响曲》曹盛林 编著，中国华侨出版社，1995