第三章　地球的宇宙环境

§3.1 恒星和星系

宇宙是物质的。宇宙间的物质，有的聚集成天体，有的弥漫在广漠无垠的星际空间（星际物质）。宇宙间最重要的天体是恒星。太阳就是恒星的一个典型代表。从属于太阳的有行星、卫星、彗星和流星体；由它们组成的天体系统叫做太阳系。星际物质包括星际气体和星际尘埃，以及它们的密集形态—星云。恒星和星云都拥有极其巨大的质量；相比之下，太阳系内的行星、卫星、流星体的质量微不足道。由大量恒星和星云构成的巨大天体系统叫做星系。地球和整个太阳系所属的星系，叫做银河系；银河系以外的其它星系统称河外星系。

§3.1.1 恒星（fixed star）

恒星是由炽热气体组成的，能够自身发光的球形或类似球形的天体。在无月的晴夜，满天繁星，除了为数不多的几个行星外，都是恒星。人们花费了多外世纪的时间，才了解到恒星就是一颗颗遥远的太阳。它们之所以是炽热的气体和能自身发光，是因为它们具有巨大的质量。正是由于巨大的质量，聚集成类似球形天体。恒星都是极遥远的。直到 150 年前，才有人测出它们的距离，离我们最近的恒星是半人马座的南门二（特别是其中的比邻星），它发出的光到达地球需要经过 4.3 年（太阳光到达地球只需 8 分钟）。由于距离遥远，恒星都是天空中的光点。

“恒星”的本意是“固定的星”，即它们在天球上的相对位置几乎没有变化。恒星彼此间是相对不断运动的，且速度很高，只是距离太远，短期不能被肉眼所见。

恒星的空间速度可以分成二个分量，视向速度和切向速度。切向速度表现为恒星在天球上的位置移动，被叫做“自行”。

自行最快的恒星是巴纳德星，它在天球上每年移动 10"3；天文学家们已发现，有 330 颗恒星的自行超过每年 1"。

为了便于辩认恒星，古代天文学把天球的恒星分成许多群落，每一群落中的恒星都构成可以相互区别的图形。这样的恒星群落，以及它们各自的图形和所在的天空区域叫星座。星座多半以古希腊神话中的人（神）和动物命名，例如仙后、御夫、大熊座等。由于历史的原因，星座的排列很不规则，大小也十分悬殊。

每一颗恒星都从属于一定的星座。天文学上就以星座名+字母（或号码）的办法，给恒

星命名。通常把每个星座中的恒星，按其亮度顺序，标以小写希腊字母α、β、γ……而成。例如金牛座α，猎户座β。

恒星的亮度表示其明暗程度；恒星的光度表示其发光程度。它们都用“星等”来表示。表示亮度等级的叫视星等（m）；表示光度等级的叫绝对星等（M）。恒星的视星等和亮度之间存在着一定的数量关系，即若星等按等差级数增大，亮度便成等比级数减小。

星等相差 1 等，恒星的亮度相差 2.512 倍（二千年前，希腊天文学家把肉眼可见的恒星分成 6 等，他们把所能看到的最亮的 15 颗恒星叫一等星，肉眼刚能见到的最暗的星为六等星）。

为了比较恒星光度的大小，必须把恒星“移”到相同的位置（距离）上，才能对比出它们的真正亮度来。天文学上把这个“标准距离”定为 32.6 光年。选择这个距离是有特殊理由的。因为当恒星的周年视差为 1 弧秒时，其距离为 3.26 光年，叫 1 秒差距，32.6 光年为 10 秒差距。当距离因素被消除以后，经绝对星等仅同恒星的光度相联系。如果某恒星的距离正好是 32.6 光年，那么它的视星等和绝对星等便相同。

32.6 光年是很小的，如果把太阳移到这个距离，那么它的星等为 4.75，将是一颗不起眼的星。

为什么恒星能有很高的温度？一是质量大小的问题。恒星有巨大的质量，因此它有很高的中心温度，这样才能引起热核反应而释放大量热能。二是发展阶段问题，恒星不是从来就发光，只是在它生命的某个阶段才有发光现象，而且在不同的演化阶段，它们的温度和光度也是不同的。

成双成对的星，被称为双星，占恒星的 1/3。双星可以分为光学双星和物理双星，光学双量在天球上的位置很靠近，但实际上在视线方向相距很远，叫做视双星。物理双星由于相互吸引而相互绕转，是真正的双星。若双星绕转的轨道平面平行于视线方向，还会发生周期性的互相掩敝，从而发生亮度的变化，叫做食双星。

在恒星世界中，还有许多恒星集中分布在一个较小的空间，彼此有物理联系，形成稠密的恒星集团。例如，金牛座的昴星团，俗称“七姊妹”（事实上肉眼只能看到 6 颗），其实它的成员达 280 个。

按照恒星的物理性质和特点还有变星、新星、超新星、巨星、超巨星、白矮星、脉冲星和中子星等类型。

§3.1.2 星系（galaxy）

一、银河和银河系（the milky way and milky way galaxy）

夏秋季节，在无月的晴夜里，人们可以看到天空中有一条淡云薄纱般的白色光带，叫做银河（milky way“牛奶色的道路”）。“银汉横空万象秋”组成密密麻麻的繁星。银河系是恒星和星际物质的巨大积聚体，它拥有一、二千亿颗恒星及大量星际物质，恒星占 90%，星际物质占 10%。银河系是以银河命名的星系，银河是银河系在天球上的投影。

二、太阳在银河系中的位置和运动（sun location and motion in the milky way galaxy）

太阳是银河系无数恒星中的普通一员，它位于银河系的赤道面附近，只有这样银河系在天球上的投影才能成为一个圆环。另外，太阳并不位于银河系的中心，而是偏居银盘的一侧，距银盘边缘 8 万光年。据测定，太阳相对于银心的绕转速度为 250 公里/秒。

三、总星系（metagalaxy）

象银河系这样包含大量恒星的天体系统叫星系，除银河系外，所有的星系称河外星系，一些相互邻近的星系星系结合成星系群，比星系群更加庞大的天体系统叫星系团，比星系团更高一级的天空世界叫总星系，它是人类认识的天空世界，但它只是宇宙的一部分。

四、识星（identify star）

识星在地理教学中普遍被认为是一个难点，许多人视它为畏途，其实，星空并非那么深奥莫测，而是具有无比诱人的魅力。这里介绍的是一个新的，完整的识星方案。

（1）星空分区

星海茫茫，天空中没有可辨的自然界线和任何其它标志，这是识星的一大困难。对初学者来说，一个行之有效的办法就是“化整为零”，把整个天空划分为若干星区，并简化星座，熟悉每一个星区内主要星座的图形及其亮星的分布，脑中有图形，然后按图索骥，认识星则容易了。

如同按经线划分全世界的时区一样，全天恒星可按赤经划分四大星区。每一星区跨赤经 6 时（90°），各区的中央赤经分别为 0 时）（春分圈 ）、6^{h}（夏时圈 ）、12^{h}（秋分圈）、18^{h}（冬至圈）；星区的界线为 3^{h}、9^{h}、15^{h}、21^{h}。

每个星区各以其主要拱极星座命名，即仙后星区，御夫星座区、大熊星区和天琴星区，简称后、御、熊、琴（图 17）。

中央时圈和天赤道又把各个星区划分为四部分：东北、西北、西南、东南，用来表示各个星区内主要星座和亮星的相对位置。

各个星区的主要星座和亮星分述如下：

仙后星区

仙后座—五颗亮星构成字母 W，俗称“仙后座 W”。

仙女座—三颗亮星排成一条直线。

飞马座—呈一个大四边形，即“飞马座四边形”（东北角是仙妇座）。

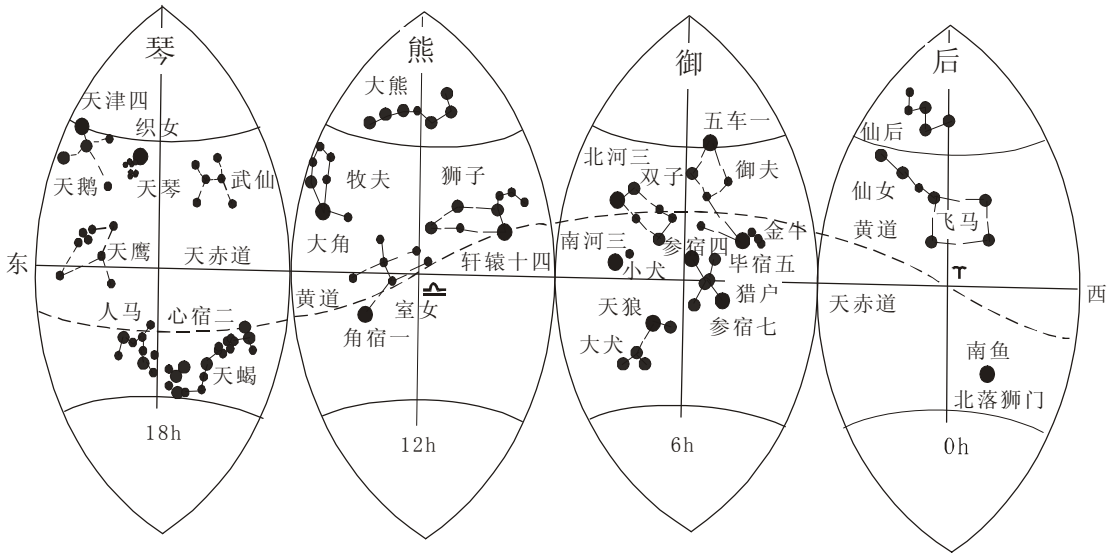

图 17　分区星图

Figure 17　Partition starmap

本区亮星最少，唯一的一颗一等星是南鱼座α（中名北落师门），位置偏南，离地平较低，西方称它为“海角孤星”。沿飞马座四边形西边向南延伸，即可找到。

御夫星区

御夫座呈相当明显的五边形。我国古时称“五车”。主星α（五车二）是北天主要亮星。

金牛座是黄道十二座之一。呈 V 字形，俗称“金牛座 V”，其主星α（毕宿五）是红色亮星。V 字西北有著名的昴星团（俗称“七姊妹”）。

猎户座是全天最壮丽的星座，包括二颗一等星（参宿四和参宿七）和五颗二等星。“参宿七星明烛宵，两肩两足三为腰”，四边形中间的三颗星，合称“参宿三星”。

大犬座形如砍刀。主要α（天狼星）是全天最明亮的恒星。

小犬座星数很小，主要星α（南河三）是著名一等星。

双子座是黄道星座，成两行排列，亮星有α（北河二）和β（北河三），后者是一等星。

本区有七颗一等星，几乎集中了北半球天空亮星的半数，那里群英荟萃，明星灿烂，是全天最壮丽的星区。

大熊星区

大熊座的七颗亮星排列整齐，形如熨斗，故称北斗或北斗七星。用它来辨认北极星最方

便。民彦“识得北斗，天下好走”，“众星之有北斗，犹百谷之有黍粟也”。

牧夫座形如风筝，也像一条例挂的领带。主星α（大角）是北天第一颗亮星，它位于斗柄的自然延伸线上。

狮子座是著名的黄道星座，形状很像一头雄狮。主星α（本干辕十四）是一等星，几在黄道上。

室女座是黄道星座，大体上成一个不规则的“士”字，主星α（角宿一）是一等星。

天琴星区

天琴座的范围很小，主星α（织女星）是北天头等明星。近旁有四颗小星，组成一个菱形，是传说中的织女的梭机。

天鹰座的主星α（牛郎星）与两旁的两颗小星组成“牛郎三星”，俗称“扁担星”。

天鹅座呈明显的十字形，俗称“天鹅座十字”。整个星座位于银河中。主星天津四为一等星。

天蝎座的主星α（心宿二）是红色大星，古称“大火”《诗经》“七月流火”，即指心宿二。心宿二与其两侧的二颗小星合称“心宿三星”。

（2）星空的变化

整个天空被地平圈等分为两部分，半个天空显露在地平以上，半个天空隐没在地平以下。可见的半个天空和不可见的半个天空是不断地交替变化的。任何时刻四大星区总是有一半在地平之上，另一半是不可见的，下一步要探求问题是如何推知特定时刻的可见星区。

由于地球自转，星空有周日运动。“斗转星移”，日行一周，这是众所周知的。与此同时，由于地球公转，星空又有季节变化，“物换星移几度秋”，在每晚的同一时刻，星空形象因季节而迥异。下面要着重说明的就是星空的这种变化。

地球每年绕太阳一周，从公转的地球上看太阳在恒星间也以相同的方向（向东）每年巡天一周，每日移动约 1°，天文学上称为太阳周年运动，其视行路线便是黄道。这样，相对于太阳来说，恒星每天晚上都比前一天晚上同一时刻偏西约 1°（时刻提早 4 分钟）逐晚向西移动。一年后，又于同一时刻回到原来的位置。日转一周（360°）和逐晚偏西（1°），这就是星空运动的基本规律。例如：黄昏时看猎户座，秋季位于东方地平附近，冬季位于南方，春季位于西方地平附近。

太阳每年沿黄道巡天一周。它分别于春、夏、秋、冬四季穿越后、御、熊、琴四大星区。太阳到达的星区就成为当时的不可见星区，因为那时该星区在周日运动中与太阳同时出没，白天淹没在阳光中，晚上随太阳落入地平。反之，与太阳相对（赤经相差 12^{h}）的那个星区

是可见星区，因为它与太阳此起彼落，夜半中天。同理可知，太阳东面的星区，上半夜见于西方天空；太阳西面的星区，下半夜见于东方天空。

据此，各个季节的可见和不可见星区列于表 2。

表 2　不同季节可见和不可见星区

Table 2　Visible and invisible constellation at different seasons

季节 / 星区	春季	夏季	秋季	冬季
不可见星区	仙后	御夫	大熊	天琴
可见星区	大熊	天琴	仙后	御夫
上半夜可见	御夫	大熊	天琴	仙后
下半夜可见	天琴	仙后	御夫	大熊

由上表可见，每个季节都有特定的可见和不可见星区；每一个星区总是在特定的季节和时刻显露（或隐没在天空）。

星空的周日运动和它的季节变化，可以归结为一种变化，即随恒星时而变化。

恒星时是相对于太阳来说的，太阳时（严格地说应该是平太阳时）就是我们平时所言的钟表时间。

钟表的设计，基本上是太阳周日运动的翻版。若把钟面当作天空，那么时针就可以代替太阳，两者都以同样的方向和周期轮转。所不同的是，太阳在天空中日行一周，而时针在钟面上每天扫过二圈（那是为了提高读数的精确性）。因此，钟面时刻总是同太阳在天空中的位置相对应。人们只要一看钟点，便知道此刻太阳在哪里，例如正午 12^h，太阳正南方……。

根据同样的设计，如果把时钟针由太阳改为恒星，那么按照恒星周日运动定出的时刻（这种时刻每日比太阳时加快 4 分钟）便是恒星时。其时刻应同特定恒星在天空中的位置相对应。只要掌握恒星时，便同样可知当时恒星在天空中的位置。

有一点须要特别提出，天文学上用来指示恒星时的，不是具体哪一个恒星，而是春分点（按天文学术语，恒星时就是春分点的时角）。这是因为它对恒星时的测定带来一种特殊的方便。我们知道，春分点犹如天球上的格林威治，是赤经的起算点（四大星区的划分也是以它为基准，春分点所在第一星区–仙后星区）。春分圈的赤经为 0 时，沿天赤道向东，各时圈的赤经顺序为 1 时、2 时、3 时……23 时。恒星时以春分点上中天为 0^h；一个恒星小时后，春分圈时角增长 15°，恒星时为 1^h，赤经 1 时的时圈中天；2 个恒星小时后，春分圈时角增长为 30°，恒星时为 2 时，赤经 2^h 的时圈中天，……照此类推，恒星时的钟点，总是同正

在中天的那条时圈的赤经相同。反过来说，只要知道恒星，便可知此刻越过我们头顶的是哪一条时圈，恒星时的这一特点，为识星提供了很大的方便，它的钟点直接指示了中天的星区。

现在，剩下的问题在于如何得到恒星时？一个简单的办法是，根据太阳时、钟表时刻进行推算。恒星时和太阳时之间，存在着如下的差异和联系。

①二者的零点位置不同。恒星时以春分点上中天（过午圈）为零时，太阳时以太阳下中天（过子圈）为零时。即二者的零点位置相差 12^h。

②由于太阳的周年运动，恒星时比太阳时逐日提早 4 分钟，逐月超前 2 小时；一年后，二者复归相同。

根据以上两条我们可知，每年春分（3 月 21 日），太阳位于春分点，两者同时中天，太阳时 12^h（正午）=恒星时零时，即这一天的恒星时，等于下午时数。例如，晚上 21 时为恒星时 9 时；夜半零时（24 时）为恒星时 12^h。

每年秋分（9 月 23 日），太阳移到了秋分点与春分点相隔 12 时（180°），这一天，恒星时与太阳时同。

同理可知，夏至（6 月 22 日）时，恒星时比太阳时迟 6 小时；冬至（12 月 22 日），恒星时比太阳时早 6 小时；其余类推……。

根据恒星时的这种季节差异，可以归纳出一个求恒星时的极简单的法则，即自秋分次日起，逐日把钟表拨快 4 分钟，就可得到任何日期和时刻的恒星时。

例：求 6 月 22 日晚上 9 时的可见星区。若观测日期改在 4 月 22 日。问：同样的星空状况将在什么时刻出现？

解：6 月 22 日是夏至日，晚上 9 时为 21 时。

（1）夏至月的恒星时比太阳时迟 6 小时，故当时的恒星时为 $21-6=15$ 时。当时中天时圈的赤经为 15 时，可知西部天空为大熊星区，东部天空为天琴星区。

（2）4 月 22 日在夏至前 2 个月，是日的恒星时刻，夏至迟 4 小时 $[(-10)-(-6)=-4]$（迟 4 小时）同样的星空状况将出现在 21^h+4^h，即凌晨 1^h。

（3）四季星空图

下面的四幅星图，分别表示春分（3 月 21 日，图 18），夏至（6 月 22 日，图 19），秋分（9 月 23 日，图 20）和冬至（12 月 22 日，图 21）21^h（地方时）所见的星空。在上述的日期和时刻可见星空主要是由两个星区组成。另外两个星区只占可见星空的北部。

星图中包含两套座标。一套是地平座标用来表示天空分区，圆周表示地平圈，地平圈上有东、南、西、北四正点；圆面表示可见的半个天球。天球上通过天顶、连接南点和北点的

圆圈叫子午圈。通过天顶，连接东点和西点的圆圈叫卯酉圈。它们投影在圆面上就成了相互垂直的两条直线，其交点是天顶，位于圈心。有了地平圈和天顶、子午圈和卯酉圈（分天空为东北、东南、西北和西南四个象限），就可以用来度量天体的高度、方位；另一套是赤道

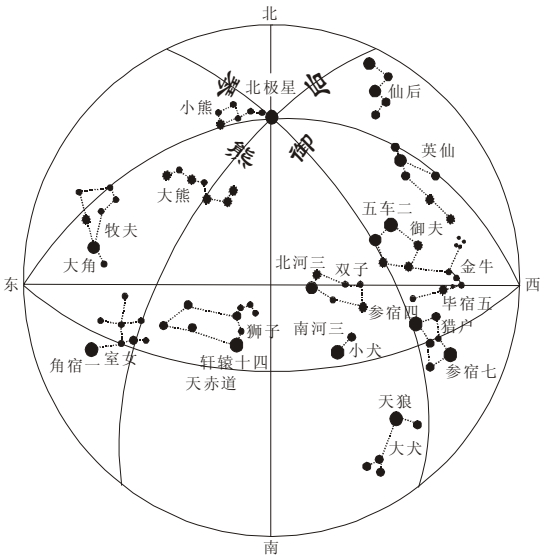

图 18 春夜星空

Figure 18　Starry sky at spring night

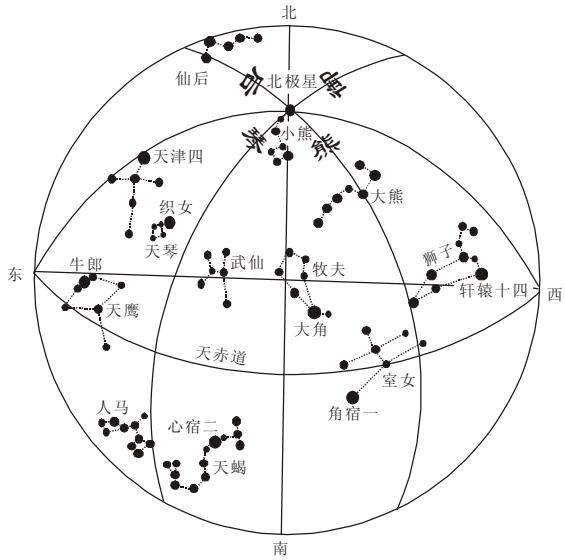

图 19 夏夜星空

Figure 19　Starry sky at summer night

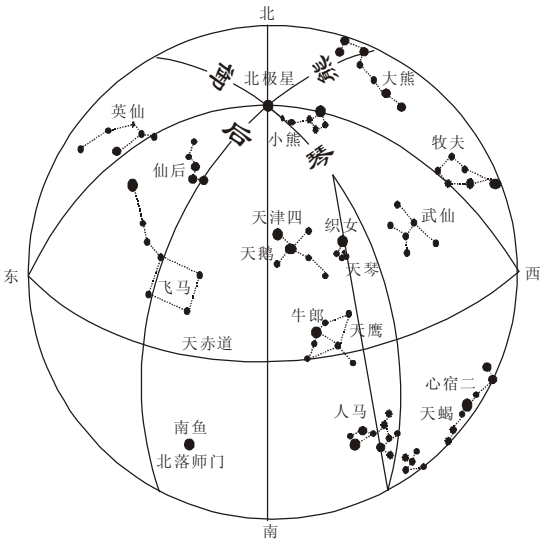

图 20 秋夜星空

Figure 20　Starry sky at autumn night

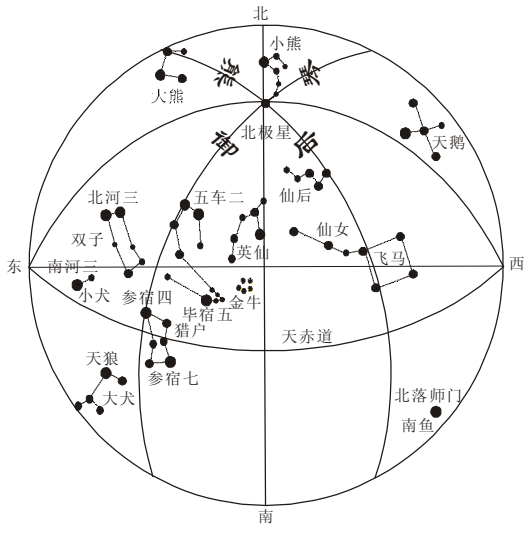

图 21 冬夜星空

Figure 21　Starry sky at winter night

座标，用来表示星区的划分，由于投影的关系，除子午圈（即中天的那条时圈）是直线外，

其它时圈和天赤道皆为弧线图上的天赤道交地平圈于东点和西点，北极星距北方地平、天顶距天赤道均为 30°（仰极高度=天顶赤纬=当地纬度）。

（4）行星的辨认

行星和地球都绕太阳运动。在地球上看行星，行星在天空中的位置飘忽无定，亮度也因距离而变化。太阳系的九大行星中，通常只有金星、火星、木星和土星是肉眼可见的。水星虽然明亮，但因离太阳近，肉眼不可见。

天空中的行星，可以从以下几个方面识别：①行星的轨道平面都接近黄道面，所以行星总是出现在黄道带内，也就是日月运行路线的附近。②行星都很明亮，通常亮度超过 1 等星，它们的一个明显特征是光芒稳定，没有恒星那种闪烁（俗称星星“眨眼”）。③根据行星各自特征来识别：金星特别明亮，亮度最大时可达-4.4 等，自古有“太白”之称。它是地内行星，同太阳的距角不超过 48°，所以，总是以晨星和昏星的姿态出现，《诗经》中云“东有启明星，西有长庚”，出现在黄昏后的西方叫“长庚星”，出现在黎明前的东方叫“启明星”。火星的明显特征是带红色。在黄道带中，除天蝎座的心宿二和金牛座的毕宿五以外，没有别的红色亮星。木星色青白，除金星外，它是天空中最亮的星。土星微带黄白，亮度近 1 等星，特征不明显。④要知道行星的详细动态，可查当年的《天文普及年历》及《天文爱好者》月刊的“每月天象”。

§3.2 太阳和太阳系

§3.2.1 太阳（sloar）

太阳是一颗恒星，具有巨大的质量和很高的温度。它的质量相当于地球质量的 33 万余倍，太阳系九大行星质量总和的 700 余倍，这使得它以强大的引力控制着它周围的行星系统。巨大的质量使得太阳具有很高的中心温度，是地球和整个太阳系光明和热量的源泉。

在银河系浩瀚的恒星世界里，太阳只是其中的普通一员。它的各种物理参数，诸如质量、体积、密度、光度和温度，以及它的化学组成，都没有什么与众不同的地方。

在太阳系的范畴内，太阳居于“中心”地位，它是这个体系的中心天体，有别于其它恒星：（1）太阳是地球所绕转的恒星，故与别的“恒”星不同，它在天球上没有固定位置。“日月经天”，太阳在恒星间有周天巡行。（2）和其他恒星相比，太阳离地球最近，距离上的悬殊，使其它恒星在天球上都成为光点，唯有太阳具有视直径约半度的日轮，因而显得特别明亮。（3）距离近，太阳赋予地球的热量特别多，除可见光外，还发射无线电波，宇宙射线和

微粒流等，以致日地关系非常密切。一切别的恒星的辐射，根本不能引起任何可察觉的地球物理效应。

太阳和地球的平均距离约为 1.49 亿 km。在太阳系范围内，常用它作为计量距离的单位，并且被称为“天文单位”。

太阳是地球和整个太阳系光和热的主要源泉。日地处于平均距离，太阳光垂直照射并排除大气影响的条件下，地面上得到的太阳辐射热量 1.97 卡/cm^2 • m，称太阳常数。从而推算太阳每分钟内辐射热能总量为 5.58×10^{27} 卡/分。

太阳具有 1500 万度的中心温度和每分钟 5.58×10^{27} 卡的能量输出。如此巨大的能量从何而来？人们曾提出不少假说，如重力收缩，陨星假说，天然放射性……。但计算表明，它们都不能信服地说明太阳能量的来源。直到本世纪初，爱国斯坦（1897~1955）创立相对论以后，太阳的能源才找到正确的答案：它来自太阳内部的热核反应。

太阳大气不同于地球大气（分子组成）。这里所说的太阳大气，是指它可以直接观测的外部层次，至于太阳内部的情况，由于太阳上原子的吸光本领很强，太阳内部产生的辐射能，全部被它自己的物质吸收，因而无法被观测到。太阳的大气可分为三层，即光球、色球、日冕。（一）光球是太阳大气的底层，厚度约 500km，光球，是由于它的明亮，视觉上成为明亮的太阳光盘。由于太阳上的原子吸光本领很强，太阳内部产生的辐射能，通过原子的反复吸收和发射才能到达太阳表面，只有从光球发射的光才能透过这一薄层向空间传播。（二）色球是太阳大气的中层。厚度约 2000km。色球的亮度仅及光球的 1/1000，它的微弱光辉总是被光球所掩没。只有在日全食的短暂时间，太阳光球被月球遮蔽，色球才表现为阴暗圆而周围的玫瑰色的花边，色泽鲜艳，故称为色球。温度约 10000 度。（三）日冕是太阳大气的外层，它延伸的范围很广，可达太阳半径的几倍，甚至十几倍，没有明确上界。日冕物质是以极高的速度在运动着，平均可达每秒 220km，以致一部分粒子能够摆脱太阳重力，奔向广漠的行星际空间。这种现象叫做日冕膨胀。

由于日冕的高速膨胀，行星际空间不断地得到从太阳喷发出来的高速粒子流，叫做太阳风，整个太阳系都处于太阳风的劲吹之中。在太阳风的作用下，面向太阳的半个地球磁场，被压缩在一个较小范围内，而背向太阳的半个地球磁场，被延伸到遥远的星际空间，形成很长的磁尾。

太阳辐射能量的变化，是由于太阳各式各样的复杂变化引起的，它直接影响到地球，这样的变化，总称太阳活动。

太阳活动本身的强弱不同，如同地球上大气一样，有时风和日丽，叫做宁静太阳，有时

风暴猛烈，叫扰动太阳。

扰动太阳的一个明显标志是太阳黑子，黑子是出现在光球上的暗色斑块，大小不等。形状各异。黑子其实并不黑，也是炽热明亮的气体，其温度 4500K，低于光球。因此，比起明亮的光球背景来，相形见绌，显得暗黑了。黑子由盛转衰，再从衰到盛，大致以 11 年为周期轮回，称为一个太阳活动周期。黑子生成的机制和它 11 年活动周期，均未得到一个公认的回答。

除黑子以外，扰动太阳还表现为光球上出现的光斑、色球中的日珥和耀斑等，常出现在日面的边缘。

扰动太阳的形形色色的表现，大体上都与黑子的变化同步，即它们都随太阳活动的总趋势而共同起落。扰动太阳的各种活动现象中，最强烈对地球影响最大的当推耀斑。它的特征是来势猛、能量大，一个大的耀斑，一般只经历一、二十分钟，但释放的能量达 10^{32}~10^{33} 尔格，相当于 100 亿颗百万吨级氢弹爆炸的威力。

它的另一特征是辐射品种繁多，除可见光外，有紫外线和红外线，X 射线、γ 射线，还有高能粒子甚至宇宙线。它们到达地球时，便引起异常的地球物理现象。例如，强烈的短波辐射和微粒辐射会破坏上层大气中电离层的结构，使电离层部分地或全部地丧失反射无线电波的能力，以致使无线电通讯中断。又例，太阳活动强烈时，地球磁场也会爱到干扰，这时，磁针不再指向南北，而是动荡不定，叫做磁暴，还有，极地和高纬地区出现绚丽多彩、变幻无穷的极光。

由此看来，耀斑的出现是扰动太阳的更加直接和重要的标志，它已成为当前太阳研究主题之一。

§3.2.2 太阳系（solar system）

人类发现太阳系，是从观测日月和行星的运行开始的。

太阳和月亮，是天空中最明亮的两个天体。“日月经天”，它们除了参与天球的周日运动（向西）以外，还有各自的向东运动，太阳每年“巡天一周”月亮随着晦朔弦望的变化，每月绕地一周。

行星没有固定的相对位置，而是在众星间不停地游荡：或见或伏，忽东忽西，变幻莫测，行踪无定。肉眼可见的行星有五颗，它们就是水星（辰星）、金星、火星、木星、土星，合称“五星”。古人把日月和五星合称“七曜”，即七个明亮而移动着的天体。

“日月合壁”、“五星联体”，它们明显地不同于恒星，而且它们走的都是同一条空中大道—黄道带。这是早期的天空探索者所瞩目的天文现象。

作为一门科学的天文学，其首要任务就是对七曜、特别是行星的令人眼花缭乱的运动，作出合理的解释。

波兰天文学家哥白尼（1473~1543）摒弃古代陈腐的托勒密“地心”体系，创立崭新的“日心”体系。他改宇宙体系的“地心”为“日心”，改“天动”为“地动”。从此，七曜擢升为太阳系。这个体系认为，宇宙的中心是太阳，地球是绕太阳运动的行星之一，所有上述运动，都可以用地球的运动作出简单而合理的解释。它以地球的绕轴自转，解释天球的周日运动；并以地球（和行星）的绕太阳公转，解释太阳的周年运动和行星的更为复杂的环状运动，月球则是唯一绕地球运动的卫星

把地球排除宇宙中心而代之的太阳以后，乍看好象杂乱无章的行星世界，但显出惊人的统一性。哥白尼体系的提出，不仅在天文学上掀起一场划时代的翻天覆地的革命，而且对人类的哲学思想产生深远的影响。

但是，受时代的影响和局限，哥白尼体系本身是存在缺陷的。它仍然保留着固体的恒星球层，不动的中心天体和匀速的圆周运动这些根深蒂固的陈旧观念。

竟哥白尼事业之功，揭示太阳系行星运动的真实规律的，是德国天文学家克普勒。他提出著名的行星运动定律。（一）轨道定律。所有行星在不同的椭圆轨道绕太阳运动，太阳位于轨道椭圆的二个焦点之一。（二）面积定律。面速度不变，在同样的时间内，行星向径在其轨道平面上扫过的面积相等。（三）任何二行星绕太阳公转的周期的平方之比，等于它们与太阳的距离的立方之比。设 T_1、T_2 分别表示二行星的公转周期，a_1、a_2 分别表示它们与太阳的平均距离，便有 $T_1^2 / T_2^2 = a_1^3 / a_2^3$，如 T 以恒星年为单位，a 以天文单位为单位，则上式可改写为 $T^2 = a^3$。

上述的行星运行三定律，被称为克普勒定律。它表明，太阳和它周围的天体，不是偶然的没有秩序的“乌合之众”，而是一个有严密组织的天体系统—太阳系。克普勒因他的成就被世界学者称为“天空立法者”。

克普勒定律讲清了行星轨道的几何特征，但这些定律是凭数据分析得出的经验定律，用严密的数学分析推出它的结果，解释行星运动的物理原因，则是牛顿运用物质的一般运动规律的观点，对克普勒定律进行概括，更精确地确定和发展了克普勒定律：（一）牛顿扩展了克普勒第一定律，天体轨道不仅限于克普勒的椭圆，而可以是任何一种圆锥曲线（包括抛物线和双曲线）决定轨道形状的必要条件，仅限于物体的初始速度。（二）牛顿论证了克普勒第二定律，在引力作用下，行星保持它的面速度相同。（三）对克普勒三定律的修正，

$T_1^2(M+m_2)/T_2^2(M+m_2)=a_1^3/a_2^3$ （式中 M 为中心天体太阳的质量；m_1、m_2 分别表示二个被比较的行星质量）。

克普勒定律指出了“行星怎样运动”，牛顿则用万有引力定律回答了“行星为什么这样运动”。他证明，在引力作用下，行星必然遵循克普勒定律而运动。“牛顿由于发现了万有引力定律而创立了科学的天文学”—恩格斯。

自本世纪 30 年代初，太阳系的第九颗行星—冥王星被发现以来，太阳系天文学再没有重大突破。但近 20 多年来，随着空间探测技术的兴起，遂使冷落了多年的太阳系天文学重放异彩，成为当前科学研究的前沿领域之一。

太阳系是一个以太阳为中心的天体系统。组成这个系统的成员，除太阳外主要是行星和它们的卫星，此外还有小行星，彗星和流星体。太阳系的行星共有九颗，按照同太阳平均距离的大小，由近及远，它们分别是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星。水、金、火、木、土五颗行星，在地球上看起来是天空中游动着的“明星”，自古被称为“五行”或“五星”，并同太阳和月亮合称“七曜”，其余的“三王”因距离遥远，肉眼无法见到，它们是望远镜问世后陆续被发现的。太阳系中还有数以万计的小行星，它们都按一定的轨道环绕太阳运动。轨道大多集中在火星和木星轨道之间，在那里形成一个小行星带。九大行星，除近太阳的水星和金星外都伴有各自的卫星。例如地球的卫星则是月球。

九大行星按照各自的物理性质不同，可以分为两大类：类地行星包括水星、金星、地球、火星。类木行星有木星、土星、天王星、海王星。位于太阳系边缘的冥王星是例外，远日行星。

由于距太阳距离上的巨大差异，在很大程度上影响它们物理性质和化学组成的不同。

首先，类地行星的质量较小，而类木行星大。由于质量太小，水星没有大气，酷似月球世界；火星只有极微弱的大气，是一个极其荒凉的世界，水星和火星表面都有环形山分布。其次，类地行星的平均密度高，而类木行星的密度较低。第三，从化学组成看，类地行星主要由重物质组成，有固体表面；类木行星则以轻物质为主，因而没有固体表面。木星和土星是流体球，由于流体收缩产生能量，以致它们放出的能量远超过吸收太阳辐射的能量。第四，类地行星接近太阳，因而它们有较高的温度；反之，类木行星的温度很低，就这个条件而论，太阳系的生命圈限于类地行星（水星除外）。从理论上说，金星和火星可能有生命。金星的大小、质量和逃逸速度同地球相似，是地球的姐妹星，表面有一层浓厚的大气，密度是地球大气的 50 倍，表面气压高达 90 大气压，主要成份为二氧化碳（占 97%）。由于二氧化碳的

温室效应，金星的表面温度高达 465~485℃，甚至铅和锡都可熔化，是一个非常炎热的世界。火星比地球小得多，大气十分稀薄，气压仅 7.5mb，相当于地面 40~45km 高空的大气压强，主要成分是二氧化碳，水汽更少得可怜。证实金星和火星都不存在生命。

彗星（comet），俗称“扫帚星”，天空中并不常见，古人见它来无影、去无踪，加上它的外貌奇特，拖着一条长长的尾巴。在相当长的时期里，对它怀有恐惧心里。彗星的质量很小，大体上是由固体颗粒掺杂着尘埃以及冻结的水汽，甲烷、氨、二氧化碳等组成，叫做彗核。

彗星有特殊的运行轨道和周期，因而它有着壮观的景象。大多数彗星的轨道几乎接近于抛物线，远远地延伸到冥王星的轨道之外，因此，有史以来，它们只出现过一次，何时再来杳无定期，故被叫做非周期彗星。彗星的特征是同它们的轨道形状相关的。在大部分时间里，彗星在远离太阳的寒冷空间运行。以致它们的物质总是处于冰冻状态，个体很小，默默无闻。而当彗星在轨道上逐渐接近它的近日点，距太阳足够近的时候，太阳的热力使彗核中一部分冻结的气体开始蒸发，形成一个云雾状的包层，称为彗发。以后彗星继续接近太阳，彗发中的一部分气体和尘埃，被太阳风和光压推向一旁（对很小的微粒来说，太阳风和光对微粒的压力会有效地超过太阳对它们的引力）， 漂向远方，形成长长的彗尾。这时的彗星就成为壮观的天体。太阳风和光压来自太阳，所以，彗尾总是背向太阳。《晋书·天文志》载“彗本无光，反日而为光，故夕见则东指，晨见则西指”。黄昏时出现在西方天空，彗尾向东。黎明时出现在东方天空，彗尾向西。特别明亮的彗星，甚至在白昼也清晰可见。过了近日点，随着彗星离太阳远去，彗尾和彗发渐次消失，恢复彗核原状。总之，彗星在本质上就是在偏心率很大的轨道上绕太阳运动的冰冻物质，它们的奇特外貌是其通过近日点前后的暂时现象。比较起来，彗星是一种“短命”的天体。最著名也是最早被发现的周期彗星是哈雷彗星。

流星体（meteoroid）是存在于太阳系中的微小颗粒，环绕太阳运动。在经过地球附近时，因受地球引力的摄动，便改变轨道，向地球接近。当它们闯入地球大气时，同气体分子发生猛烈摩擦而燃烧发光。在天空中划出一道闪亮的余迹，叫做流星。亮度超过-5 等的特别明亮的流星，又叫火流星（bolide）。

通常下半夜的流星比上半夜多而且明亮。其原因是下半夜的流星是和地球迎面相遇（速度高），或地球赶上流星（出现频率高）；而上半夜出现的只是追上地球的流星。有时候，人们在一定的天空区域，在特定的季节，会看到一大群流星象雨滴一般密集，从天空某处辐射出来，这叫做流星雨。这种现象通常是因为彗星消解后形成流星体群，它们的共同轨道在一定的宇宙空间同地球轨道相交。地球一年一度经过这里，便在这一区域形成流星雨。

流星体在大气中未及全部熔化而落到地面，叫陨星（meteorite）。按陨星的化学成分不同分为陨石、陨铁和铁石陨星。世界上最大的陨石是我国吉林 1 号陨石，重 1770 千克。最大的陨铁是非洲纳米尔比亚的戈巴陨铁，重约 60 吨。

由于没有人能够目睹行星的形成。迄今为止，人们能够直接观测到的行星系统只有我们自己的太阳系，而且了解到的主要是它的现状，缺乏它早期的历史资料。关于太阳系起源的理论，至今还是一种假说。哥白尼创立日心体系后，他的后继者克普勒发现行星运动定律，完满地廓清了行星轨道的几何性质；牛顿继而以他的运动定律和万有引力定律，成功地解释了行星运动的物理原因。至此，太阳系的结构完全搞清楚了，人们很自然地就会探索这种结构的成因，即太阳系如何起源。太阳系结构的特征可概括为：（1）共面性。行星绕太阳运动的轨道平面，都很接近黄道平面；卫星的轨道平面，也都接近各自行星的赤道平面。就整体来说，太阳系是很“扁”的。（2）同向性。太阳系的天体大致朝同一方向运动。行星绕太阳运动，概无例外地都与地球公转的方向相同；卫星除极个别的外，也是如此；行星绕轴自转，除金星和天王星例外，也都同地球绕轴自转的方向一致；还有，太阳本身也作同样方向的自转。（3）近圆性。行星轨道形状都接近圆形，根据这些特征，天文学上最合理的推测是行星系统是由同一薄层物质所形成的。如果否认太阳系天体有共同的起源，那么，这些统一性的特征便令人无法思议了。

鉴于这样的认识，1775 年，德国哲学家康德（1724~1804）根据牛顿的万有引力理论第一个提出了太阳系起源的星云假说。假说的基本论点是太阳系是由星云物质（大团的气体和尘埃）演化而来；形成太阳系的动力是自引力（即星云各部分之间相互吸引的力）。1796 年，法国天文学家拉普拉斯（1749~1827）独立地提出另一个星云假说，两者大同小异，人们通常把它们合称为康德—拉普拉斯星云假说。

§3.3 月球和地月系

§3.3.1 月球（moon）

月球，俗称月亮。它在天空中和太阳有同样的视大小，所以长期以来，人们总是日月并提。月球是地球唯一的天然卫星，和地球构成一个天体系统—地月系。

明月的光辉对原始人类是一种特殊的恩惠。古人称它为“夜晚的明灯”。它时而一钩斜挂，时而冰轮圆涌；残月消逝以后，新月总是如约而来，从不违约。月亮圆缺变化，比四季循环更为简单和明显，曾经被当作一种天然的历法；月球还造成地球上的日食现象，对地球

的潮汐现象也起主导作用。总之，对于地球来说，月球是唯一属于我们的天体，也是一个十分重要的天体（celestial body）。

在大地测量工作中，常常要测定那些由于某种自然障碍而无法直接到达的目标的距离。设 A、C 两地为大河所隔，要测定它们之间的距离，观测者可以在河的这一岸另择一点 B，以 AB 为基线（基线的长度是可以直接测定的），它的二端用测角仪分别测定三角形 ABC 中 A、B 两角的大小，于是在三角形 ABC 中，已知两角的大小和它们所夹的边（基线）长，可以求解三角形得出。用这个方法可以求得到无法到达的目标的距离。

天文学中在测定太阳系内较近天体的距离时，通常采用地球半径作为基线。从天体到基线二端连线的夹角，叫该天体的视差（parallax），即地球半径对该天体所张的角度。当天体位于天顶时，视差为零；当天体位于地平时，视差最大。这个最大的视差值，叫做天体的地平视差。根据测定，月球的地平视差为 57'，约地球半径的 60 倍。在地球半径已经知道的条件下，求得月地距离约为 384400km。

按牛顿的万有引力定律，可以根据天体的绕转来测定中心天体的质量，但不能用此方法测定绕转天体的质量。所以，月球质量的测定曾是个复杂的问题。月球和地球环绕它们的共同质量中心—地月系质心运动。从这个共同质心分别至地球和月球质心的距离之比，等于二者质量的反比率。这是从前测定月球质量的依据。地球的轨道是一个椭圆，严格地说是地月系质心的轨道，而非地球质心的轨道。在绕太阳公转的过程中。因月球的干扰，地球以一月为周期，在椭圆轨道两侧“波浪式”地徘徊前进。这种微小的摆动，必然会在太阳的视运动中反映出来。通过对太阳视运动的精密观测，确定地月系质心距地球质心为 4671km，（由月地距离可知，它距月球质心为 379729km）。由此，推得月球质量为地球质量的 1/81.3，然后根据地球质量，推出月球质量。

月球表面有同地面相似的结构。月海是比较阴暗部分，没有任何形态的水，而是广阔的平原。由于大范围的熔岩流，反照率（反射太阳光的能力）低，因而显得阴暗。反射率较高，因而显得明亮的部分称月陆。

月球和地球迥然不同，月球的微弱重力，使它不能保持大气，只有极微量气体，主要成份是 H_e 和 A_r。在一个没有大气的世界里，那里充满着寂寞和荒凉，声、光和热等物理效应与地面迥然不同。声音得不到传播，月球世界万籁俱寂，听不到一点声音。没有“蔚兰色的”天空，也没有迷人的晨昏蒙影，即使在白天，天空也是一片漆黑。星星不会闪烁，但不分昼夜出现在天空。没有风云变幻，不见雨、露、霜、雪，也不会出现雷电和彩虹。昼夜漫长，温度变化十分剧烈。没有任何证据表明存在有生命能力的有机体。

§3.3.2 地月系（earth-moon system）

月球和地球构成一个天体系统—地月系。由于地球的质量远大于月球，所以，这个系统的中心天体是地球。一般把地月系的共同运动，看作月球绕转地球的单纯运动。地月系的运动，是地球和月球对于它们的共同质心的绕转。但地球的质量是月球质量的 81 倍，前面已论，二者的质量之比等于各自质心至共同质心的距离的反比率。经计算地月系质心十分接近地球质心，二者相距仅 4671km，以致地月系质心仍然位于地球内部（地球的平均半径为 6371km）。月球绕地球公转的轨道是一个椭圆。月球轨道在天体上的投影叫白道。

月球绕地球的周期是一个月。按照参考点的不同，天文上月的长度有四种，恒星月、交点月、近点月和朔望月。其中，恒星月是月球绕转地球的真正周期。

恒星月以恒星为参考点，即月球在白道上连续二次经过同一恒星（没有明显的自行）的时间间隔，其长度为 27.3217 日，即 27 日 7 时 43 分 12 秒。

根据月球绕转地球的恒星周期，推出它的平均角速度为每日 13°10'或每小时 33'。这个角度大体上同月球的视直径相当，所以，月亮每小时在天空中移动的距离，约等于月轮的圆面，月球的线速度平均为每小时 3672km 或 1km/s。

月球亦有自转。月球的自转和它绕地球的公转，有相同的方向（自西向东）和相等的周期（恒星月）。这样的自转叫做同步自转，正是由于这个原因，地球上的看到的月球，大体上是相同的半个月面。

月球本身不发光，明月的光辉是它反射的太阳光。月球同地球一样，在太阳照射下，总是被分为光明和黑暗两个半球，它们是月球上的昼半球和夜半球。但从地球上看起来，这明暗二部分的比例因日、月和地三者的相对位置不同而变化，有时它以光明半球向着地球，人们看到的是一轮满月；如果它以黑暗半球对着地球，这时候天空中不见月亮的影子。在一个时候，月轮的光明部分不断扩大，黑暗部分持续缩小；而在另一时候，它的光明部分逐渐缩小，黑暗部分不断扩大。当它以明暗二部分各一半朝向地球时，这便成了弦月。月球的这种圆缺变化，叫做月相（moonphase）。

月球绕太阳公转的轨道和月球绕转地球的轨道，几乎在同一平面上。当月球位于太阳和地球中间时，日月相合，也叫合朔，面向地球的是月球的黑暗部分。这时期叫做新月，它偕日同升，又一起西落，夜晚的天空看不到月亮。这就是旧历的每月初一。

半个月以后，即旧历的月半，月球运行到地球的背太阳一侧，叫做日月相冲，也叫相望，月球几乎全部是明亮的。这时的月相叫满月，它同太阳此起彼落，通宵达旦照亮大地。

在由新月变为满月的过程中，当月球绕转轨道的 1/4 行程时，即旧历上半月初八，叫做

上弦。月球的明暗各半，这时的月相叫做上弦月（first-quarter moon）。它在天空中距太阳东90°，比太阳迟升后落，上半夜出现在天空中。同理，在由满月变为新月的过程中，当月球绕转其轨道的3/4行程时，即旧历下半月廿三，是下弦月（last quarter moon），它在天空中距太阳西90°，比太阳早升先落，后半夜耀辉在天空。民谚有“初八廿三半夜月”。上弦月和下弦月的差别在于前者位于太阳之东，因而西部是明亮的，后者位于太阳之西，因而东部是明亮的。

新月（crescent）和满月（plenilune），上弦月和下弦月，周期性地轮番出现。从这一次新月到下一次新月（或两次满月）这一段时间，是月相变化周期，叫做朔望月，其长度为29.5306日，或29日12时44分3秒。它比恒星月（27.3217日）长2.2089日。这是因为，月球绕转地球的同时，地球本身也在绕太阳公转。恒星月是月球绕转地球的恒星周期，而朔望月则是月球同太阳的会合周期。

月相的变化，随月球在天球上同太阳的角距离（距角）而定，月亮的出没及中天时刻，也随月相变化而不同。以上述的朔望和上、下弦为例，将月亮的出没和中天时刻，列于表3。

表3　月相的出没和中天时刻

Table 3　The appear and dispappear of moonphase and the time of transit

月相	同太阳的距离	同太阳出没时刻比较	月出	中天	月没	夜晚可见情形
新月	0°	同升同落	清晨	中午	黄昏	彻夜不见
满月	180°	此起彼落	黄昏	半夜	清晨	彻夜可见
上弦月	90°	迟升后落	中午	黄昏	半夜	上半夜可见
下弦月	270°	早升先落	半夜	清晨	中午	下半夜可见

由上表不难看出，夜晚见到月亮的时间，同月相圆缺存在着一个简单的关系，即月亮愈圆，夜晚可见的时间愈长；月牙愈窄，夜晚可见的时间愈短。

但这样一个极为简单的关系，却常常为人们习而不察。最常见的一个例子是峨眉月的滥用。新月初见后的峨眉月，以其月相的妩媚动人而惹人偏爱。于是，它充斥于银幕、布景、广告、插图、漫画和小说家的笔下，几乎垄断了夜晚的天空。其实峨眉月只是黄昏后短暂的时间出现在西方天空，它的凸面向着西方地平（不同于黎明前出现在东方天空的残月）。

§3.3.3 日食和月食（sloar eclipse and lunar eclipse）

一、日月食现象（sloar eclipse and lunar eclipse phenomena）

日食和月食是一种瑰丽的天文现象，如同昼夜交替一样，有它的发生和终止，有它自己的规律。这种引人瞩目的天文现象，同月球和地球本身的影子有关。

在太阳光照射下，月球和地球都在背太阳方向拖着一条长长的影子（图 22）。

地球和月球远比太阳小，所以，它们的影子的主要部分，是一个以其顶点背向太阳的会聚圆锥。在这个影区内，照不到太阳光，因而是黑暗的，叫做“本影”（严格地说，由于地球大气的折光作用，地球本影内并不是完全黑暗的）。本影周围还有一个黑暗和光明的过渡地带。那里太阳圆面只是部分地被遮蔽，因而并不完全黑暗，叫做“半影”。半影是一个比本影大得多的发散圆锥。它的各部分明暗程度不一，愈接近本影，日轮被遮蔽的面积愈大，愈阴暗；反之，愈明亮。本影影锥的延伸部分，是一种特殊的半影。那里，被遮蔽的是日轮的中央部分，太阳的边缘仍然明亮。这个部分则称伪本影（因为它是本影的延伸），那里不是完全黑暗的。

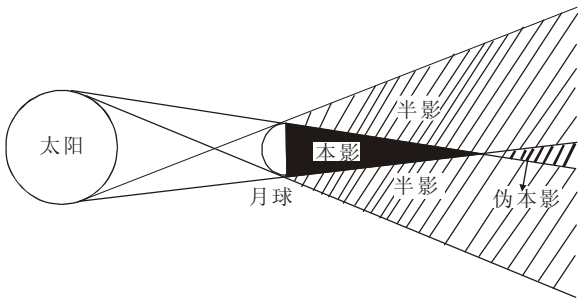

图 22　本影、半影、伪本影

Figure 22　Umbra，penumbra and false umbra

本影的长度，因天体的大小和天体对于太阳的距离而不同。天体的半径愈大，本影愈长；天体距太阳愈远，其本影愈长。

根据太阳、地球和月球的半径，以及日地和月地的平均距离可知，地球本影的平均长度是 1,377,000 公里，约为月球本影的 3.5 倍。新月时月球本影的平均长度为 374,500km，略小于月地平均距离 1384400km。所以，月影到达地球时，可以是本影的顶端，也可以是伪本影。

“形影不离”，月球拖着它的影子绕地球运动。当它来到地球的向太阳一侧，其影子有时会掠过地球表面。这时，在月影扫过的地区，人们看到太阳被月球遮蔽，叫做日食。当月球绕行到地球的背太阳一侧，碰巧它本身也会隐入地球的本影。这时，在地球上的人们看来，满月从天空中消失，这便是月食（当时月球的天空中则看到日食）。日食有三种情形，即日

全食、日偏食、日环食。它们的不同，取决于月球影子的哪一部分到达地面。当月球本影落到地面，那部分地区看起来，太阳光盘整个被月轮遮蔽，天昏地暗，日色无光，如同黑夜猝然到来一样，这便是日全食。如果落到地面的不是月球本影，而是它的半影，则在这部分影区内看来，太阳光盘部分地被月轮遮蔽。这叫做日偏食。另外一种情形是，如果当时的月球本影不够长（短于月地距离），以致同地面接触的是它的伪本影，那么，在这个影区内看来，月轮只遮蔽了日轮的中央部分，太阳的边缘仍然光芒四射，这叫日环食。

不言而喻，当月球的本影或伪本影落到地面时，其半影必同时到达（只是月影笼罩的地区是地球上一小块地方，因为比起地球来，月球本影截面不大，影锥尖端更小），又由于月球的绕转地球和地球本身的自转，日食地区在地面上移动而成日食带。它的中部是全食（或环食）带，南北两侧为偏食带。这样，在同一时间，日全（环）食和日偏食发生在地球上不同地区，在同一地区，发生日全（环）食前后，总是伴有日偏食阶段（图 23）。

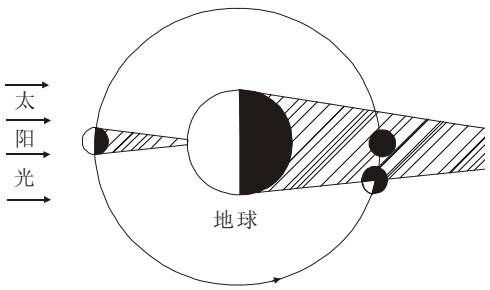

图 23　日食和月食的成因

Figure 23　Formation causes of solar eclipse and lunar eclipse

月食的情形比较简单，它只分月全食和月偏食，没有月环食。月全食和月偏食的不同，仅取决于月球是否全部或部分地进入地球本影。

当月球全部隐入地球本影时，月轮整个变暗，这是月全食；若月球只是部分地进入地球本影，月轮残缺，叫做月偏食。自然，在月全食前后，必同时有月偏食阶段。无论是发生月全食还是月偏食，全球（夜半球）各地同时看到同类的月食。

日全食和月全食的全过程，可分为三个阶段：偏食—全食—偏食。划分这三个阶段的是四种食相：初亏（first contact）、食既（second contact）、生光（third contact）和复圆（last contact）。

月球和太阳都在天球上向东运行。前者以恒星月为周期，速度为每日约 13°10'；后者以恒星年为周期，速度为每日约 59'。月球的运行比太阳快，每日以约 12°11'的速度，自西向东追赶并超越太阳（和地球本影截面）。因此，日食的过程，就是月球在天球上自西向东赶上和超过太阳，从而遮蔽太阳的过程。所以，日食总是从日轮的西缘开始，于东缘结束。月食的过程，就是月球以同样方式赶上和超过地球本影截面，从而被掩蔽的过程。所以月食总是从月轮的东缘开始，于西缘结束。

月球在赶超太阳或地球本影的过程中，要发生两次外切和两次内切，即分别为上述的四

种食相。对于日全食过程来说，初亏是指月轮东缘同日轮西缘相外切，日偏食始。食既是指月轮、日轮东缘相内切，日全食开始。生光是指月轮、日轮西缘相内切，是日全食终了。复圆是指日轮西缘同日轮东缘相外切，日偏食终了。

日环食也有以上的食相，但没有全食阶段。因此，虽有月轮的东西二缘分别同日轮的东西二缘的内切，却没有真正的食既和生光。至于日偏食和月偏食，没有食既和生光。

二、日月食的规律性（regularity of solar eclipse and lunar eclipse）

日、月食的发生同月相变化相联系。日食只发生在朔，月食必发生在望。因为在一个朔望月内，只有朔日的地球才可能位于月影所在的方向；只有望日的月球才可能位于地影所在的方向。这样，日、月食的发生同月相联系。根据这一原理，我国古代就以日食来检验历法。如果日食不发生在初一，那么，历月推算必有问题。

月球和太阳必须同时靠近黄白交点。太阳在天空中周年视行的路线叫黄道，月球轨道在天球上的投影叫白道。黄白交角 5°9'。月轮、日轮的视半径都只有 16'左右。如果日月不在黄白交点附近相合和相望，那么，对于前者，月轮、日轮不能彼此迭合；对于后者，日轮不能进入地球本影。所以，只有在特定的朔望，即日、月同时靠近黄白交点的朔望，才有可能发生日、月食。概括地说，日食的条件是日、月相合于黄白交点或其附近；月食的条件是日、月相冲（望）于黄白交点或其附近。

日、月食的发生，要求日、月相合（或相冲）于黄白交点或其附近。这个“附近”有一定的限度，它就是食限。对日食来说，在这个限度上，月轮和日轮靠近到互相外切，二者中心的角距，等于它们的视半径之和，即约 32'。这时，从黄白交点到日轮中心的那段黄道的弧长，也就是日轮中心同黄白交点的黄经差，就是日食限。如以地影截面取代日轮，那么，这样的限度就是月食限。

日食限和月食限的大小，决定于黄白交角、月地距离和日地距离。但这三者都是有变化的。黄白交角变化于 4° 59’ 和 5° 18’ 之间；月地距离变化于 363,300km（近地点时）和 405,500km（远地点时）之间；日地距离变化于 147,100,000km（近日点时）和 152,100,000km（远日点时）之间。因此，日食限和月食限的大小也是在变化着的。具体变化情况如下：（1）黄白交角愈大，则日食限和月食限愈小；（2）月地距离愈大，则月轮视半径愈小，日食限和月食限也愈小；（3）日地距离愈大，则日轮视半径愈小，日食限也就愈小；地影截面的视半径愈大，月食限也愈大。由此可知，当黄白交角、月地距离和日地距离都最大时，日食限最小；反之，当三者都最小时，日食限最大；月食限的情形稍有不同。当黄白交角、月地距离最大，而日地距离最小时，月食限最小；反之，当黄白交角、月地距离最小，而日地距离最大时，

月食限最大。

兹将日食限（包括偏食和中心食）和月食限（包括半影食、偏食和全食）的大小列于表4。由表 4 可知，月食限稍大于日食限，但如不计半影月食，则日食限大于月食限。当太阳和月球同黄白交点的黄经差小于最小食限时，必然发生日（月）食；大于最大食限时，必不发生日（月）食；大于最小食限、而小于最大食限时，则可能发生日（月）食。

食季是可能发生日、月食的一段时间。因为日、月食必须同时兼备两个条件，并非所有朔、望日都是如此。因此，一年中只有特定的一段时间才能发生日、月食。我们知道，当日、月食发生的时候，太阳和月球必同时位于同一黄白交点（日食），或分居两个黄白交点（月食）或其附近。月球经过黄白交点大约是每年 24—25 次，可是，太阳经过黄白交点大体上每年只有两次。比较起来，月球是频繁地（每月二次）往来于黄白交点的，而太阳是间隔很久（半年一次）才来到黄白交点的。所以，当时是否会发生日、月食，主要取决于太阳是否位于黄白交点或其附近，而这一段时间叫做食季。大体上说，一年有两个食季，相隔约半年。

表 4　日食限和月食限比较

Table 4　Comparison of solar eclipse limit and lunar eclipse limit

种类 / 食限	日食		月食		
	偏食	中心食	半影食	偏食	全食
最大食限	17°9	11°5	18°3	11°9	6°0
最小食限	15°9	10.1°	16.2°	10.1°	4°1

食季的长短主要取决于食限的大小。食限愈大，食季愈长，根据食限的大小和太阳周年运动的速度（平均每月 59’），人们可以推算食季的约数。例如，食限为 15.9 度，那么，它的食季长度不会短于 32.2 日。这个长度已超过朔望月。这就是说，在这段时间里，月球必有一次来到交点。所以，一年中必有两次日食发生。碰巧的话，每个食季可能发生两次（首尾各一次）；这样，一年便有四次日食。

又如，月偏食的最大食限为 11°9，那么，它的食季长度不会超过 24.2 日。这个长度不是一个朔望月。也就是说，在这段时间里，月球不一定来到交点。所以，有的年份连一次月食也没有；即使有可能发生月食，每个食季也只能有一次，碰巧一年可以有两次月食。

日食和月食的条件，包含各种周期性的天文因素，因而具有严格和复杂的周期性。首先，日食必发生在朔，月食必发生在望。其次，发生日、月食时，太阳必位于黄白交点或其附近，太阳沿黄道连续两次经过同一黄白交点的时间间隔是交点年（食年），其周期是 346.62 日。再次，发生日、月食时，月球必位于黄白交点或其附近，月球在白道上连续两次经过同一黄

白交点所需的时间是交点月，其周期 27.2122 日。此外，月球在近地点时，运行速度快，远地点运行速度慢；月球沿白道连续两次经过近地点所需的时间是近点月，其周期为 27.5546 日。把上述四种周期（朔望月周期 29.5306 日，交点年（食年）346.62 日，交点月 27.2122 日，近点月 27.5546 日）组合成一种共同周期，即它们的最小公倍数，叫做“沙罗周期”，其长度为 6585.32 日—这个周期是古代巴比伦人发现的。“沙罗”意即“重复”之意。这个周期相当于 223 个朔望月，几乎相当于 242 个交点月（6585.35 日），约略相当于 19 个食年（6585.78 日）和 239 个近点月（6585.55 日）。

根据沙罗周期，在连续的 6585.32 日期间，大体都有相等的日、月食次数和相同的日、月食种类；同时，每一次日食和月食，都要在一个沙罗周期后重现，但前后有所不同。首先，沙罗周期不是回归年的整数倍。因此，相互对应的日食和月食，并不发生在同一日期 。例如，1972 年 1 月的那次日环食，将要在 1990 年重复。但是，前者发生在 1 月 16 日，而后者将发生于 1 月 27 日。其次，沙罗周期并非太阳日的整数倍。因此，相互对应的日食和月食，并不发生在这一天的同一时刻。它的不足 1 日的尾数，0.32 日，即约 1/3 日，使相互对应的两次日、月食，在时刻上推退约 8 小时，在经度上西偏 120° 第三，沙罗周期并不严格地等于食年（近点月和交点月的整数倍，因此，相互对应的日食和月食，只是大同小异，不可能完全一样）。此外，沙罗周期并没有包含同日、月食有关的全部因素，因此，它不能代替日、月食的具体推算。

§3.3.4 天文潮汐（chronometer tide）

一、潮汐现象（tide phenomenon）

海水在一昼夜内有两次涨落。我国古时把早晨的一次涨落称为“潮”，晚上的一次涨落称为“汐”，合称“潮汐”。按字面上解释，“潮汐”意即朝（潮）夕（汐）。

从一地的潮汐现象来看，涨潮就是海面上升，落潮就是海面下降，涨潮和落潮相互交替；涨潮变为落潮时，水位最高，称为高潮；落潮转变为涨潮时，水位最低，称为低潮。涨潮和落潮，高潮和低潮，都是周期性地来临的，其周期是半太阳日，约 $12^{h}25^{m}$ 。因此，一般地说，一天有两次落潮和两次涨落，两次高潮和两次低潮。

每一次潮汐涨落，并不是前一次的简单重复。高潮不是同样地高，低潮也不是同样地低。高潮和低潮的水位差叫做潮差。潮差也有周期性的变化。在一个周期内，潮差由大变小，然后又由小变大。潮差最大时的潮汐叫大潮，潮差最小时的潮汐叫小潮，或从这一次大潮到一下次大潮的周期是半朔望月，约 14.77 日。因此，每月有两次大潮和两次小潮。

若从全球范围来考察潮汐现象，那么，一些地方发生涨潮，必在另外一些地方发生落潮；

反之，一些地方若是落潮，正好证明另外一些地方正在涨潮；这种此起彼落的海水运动，称为潮波。另外，潮汐涨落是通过海水的流动来实现的。海水的流入造成涨潮，海水的流出造成落潮。海水不断地从正在落潮的海域，流向正在涨潮的海域，这样的海水流动，叫做潮流。我国唐代学者宋道安在其所著《海潮图序》中就已指出：“潮之涨退，海非增减。盖月之所临，则水从往……此竭彼盛，往来不绝，皆系于月，不系于日。”

总之，从全球范围来看，潮汐现象实际上是海水的一种波动；它既有垂直的升降，也有水平的流动。

潮汐现象，许多世纪以来，对科学家和航海家们都是一个猜不透的迷。“海上明月共潮生”，他们虽然清楚地认识到潮汐涨落同月亮有关，譬如，高潮的时刻逐日延迟，与月亮中天时刻每日推迟一样；又如，潮差大小总是同月相盈亏相联系，大潮发生在朔望，小潮发生在上、下弦。但却总不解其间的关系到底何在？直到牛顿发现万有引力定律才解释清楚了潮汐现象。

从全球范围看，潮汐现象实质上是地球的变形现象。设想地球是一个正球体，并且表面被一层等深的水膜所覆盖。这样一个均匀的球体一旦受到一个强大的外力作用，它在发生位移的同时，沿着力的方向，被拉成一个长球体。这个力就是月球的引力；地球发生的位移，是落向地月系的质心（或太阳），拉成长球体，即海水向月球（和太阳）方向的两端隆起，这就是所谓的“潮汐变形”。

二、引潮力（tide-generating force）

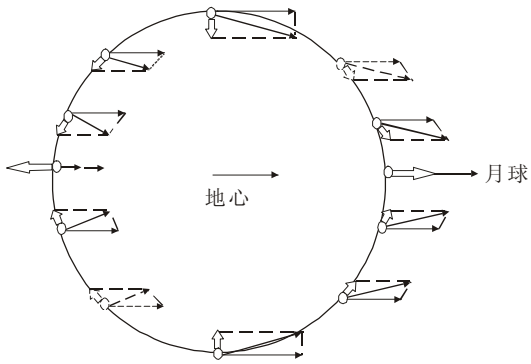

图 24 引潮力

Figure 24　Tide-generating force

地球上潮汐现象的发生，是由于天体的吸引。但是引起潮汐的力，不是各地所受天体引力的绝对值，而是一地所受的引力与整个地球所受引力的平均值的差值。

地球各部分受到太阳的不同大小和方向的吸引。其中地心所受的引力，无论方向和大小，无疑都是整个地球的平均值。各地所受太阳的引力，同这个值相比，有一个差值。这个力是潮汐涨落的直接原因，因而被称为“引潮力”，也叫“起潮力”或“涨潮力”（图 24）。由此可见，地球总体所受的太阳引力，使它地球绕太阳公转；而内部的引力差异，使它发生潮汐变形。引潮力因地点而不同，使地球发生变形。

太阳在地球上的直射点及其对跖点叫做垂点。离太阳近者叫正垂点，另一叫反垂点。在以正垂点为中心的半个地球上所受的太阳引力大于平均引力，那里的引潮力是向太阳的。因此，这个半球在落向太阳的过程中总是超前的。反之，在以反垂点为中心的半个地球上，所受的太阳引力小于平均引力，那里的引潮力是背向太阳的。因此，这个半球在落向太阳的过程中总是落后的。

向太阳的半个地球超前（向前突出），背太阳的半个地球落后（向后突出），于是，地球就由正球体变成了长球体。

在全球各地，正、反垂点的引潮力最大，其方向都是向上（对地面上的方向来说，下同）。离正、反垂点愈远，引潮力愈小，其方向则由向上逐渐趋近水平，直至变成向下。在距正、反垂点最远的地方，即以正、反垂点为两极的大圆，引潮力最小，方向向下。两端的引潮力向上，中间的引潮力向下，于是，地球必由正球体变为长球体（图 25)。

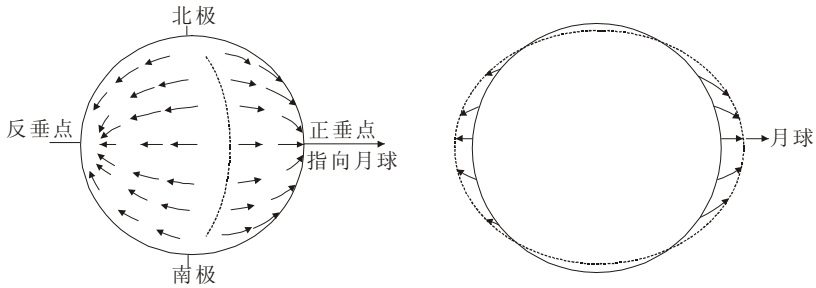

图 25 引潮力的分布

Figure 25　Distribution of tide-generating force

综上所述，太阳对地球各部分的差别吸引，也使地球在环绕地月系共同质心公转的同时，由正球体变成长球体。下面将证明，月球对地球的潮汐作用，要比太阳的潮汐作用大得多。

海水具有流动性，它对外来的变形力的反应特别敏感，而岩石圈则不然。地球由正球体变成长球体，被拉长的首先是覆盖在地表的水体。它意味着在正、反垂点的周围，形成两个水位特高的“潮汐隆起”，一个始终向着月球（或太阳）形成顺潮；另一个始终背向月球（或太阳）形成对潮。

对于正、反垂点来说，决定引潮力的大小，有如下几方面因素：天体的质量（m）、天体的距离（d）和地球半径（r）。按万有引力定律，地心单位质量所受天体的引力为：

$f = Gm/d^2$　(G 为常数)

正、反垂点所受的天体引力为 $f_1 = Gm/(d-r)^2$，$f_2 = Gm/(d+r)^2$。显然，$f_1 > f > f_2$，按引潮力定义可知：$F = f_1 - f = Gm/d^2$。

首先对 f_1 进行分析。

$f_1 = Gm/(d-r)^2 = Gm/(d^2-2dr+r^2)$，与 d 相比，r 是很小的，略去分母中 r^2，便有 $f_1 = Gm/(d^2-2dr) = Gm/(d^2*d^2/d^2-2dr) = Gm/d^2(1+2r/d-2r)$。为简单起见，根据同样理由，略去 $2r$，便有 $f_2 = Gm/d^2(1+1/d)$，则 $F = f_1 - f = Gm/d^2(1+r/d) - Gm/d = 2Gmr/d^3$。

同理，可得反垂点的引潮力为 $F = f - f_2 = -2Gmr/d^3$。

由上式可知引潮力的大小与天体的距离的三次方成反比。

对地球起引潮作用的天体是月球和太阳。月球引起的潮汐叫太阴潮；太阳引起的潮汐叫太阳潮。二者大小可以比较（从公式）：$F = f - f_2 = -2Gmr/d^3$。

该公式中，$2Gr$ 都是常数，所以，不同天体的引潮力的大小，仅决定于天体的质量和距离。

我们知道，太阳的质量是月球质量的 27,154,000 倍；又日地距离约为月地距离的 390 倍。因此，太阴潮和太阳潮之比为 $(390)^3/27154000 = 2.18$。即太阳潮是太阴潮的 2 倍多。故东汉学者王充说：“涛之起也，随月盛衰”。

三、海洋潮汐的规律性（regularity of ocean tide）

海洋潮汐有它的周期性(图 26)。基本周期有二，即太阴日周期和朔望月周期。太阴潮是海洋潮汐的主体。因此，潮汐的周期性首先是月球垂点向西运行的周期性（由于地球的自转性引起向西）。月球垂点的向西运动，主要是由于地球的向东自转，其次是月球本身的向东公转。前者使月球垂点每恒星日向西移动 360°；后者使月球垂点每太阴日向东移动 13°10′。二者联合结果，使月球垂点和它周围的潮汐隆起，以太阴日为周期，在地球上的中低纬度地带自东向西运行。这两个潮汐隆起向哪里接近，那里就涨潮；从哪里离开，那里就是落潮。同理，它们到哪里，那里就是高潮。这样，在同一地点，一个太阴日内，就有两次涨潮

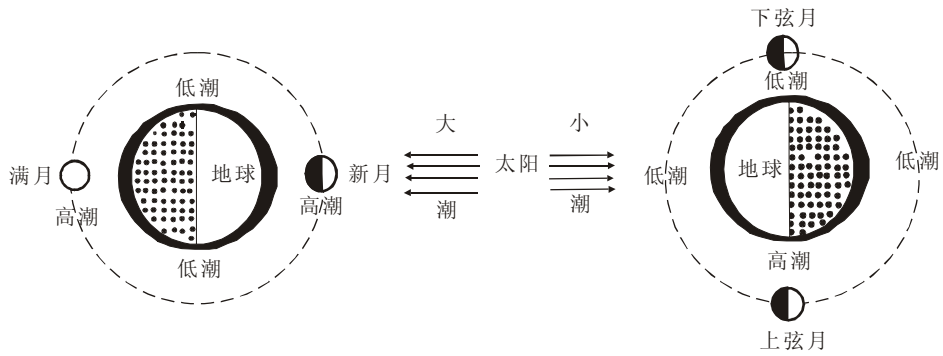

图 26　朔望月的潮汐变化（据文献[5]）

Figure 26　Tide-change of lunation（according to literature [5]）

和两次落潮，两次高潮和两次低潮。太阴日长度为 24^h50^m。因此，高潮和低潮到来的时刻，逐日推迟 50 分钟。

太阳潮和太阴潮同时存在。因此，地球上的潮汐现象必然是两者合成的结果。由于地球的自转和公转，太阳垂点以太阳日为周期，在地球上南北回归线之间的地带向西运行。太阳的引潮力远不及月球。因此，它的作用主要表现为对太阴潮的干扰。由于太阳日和太阴日长度不同，这种干扰同月球和太阳的会合运动有关，因而以半朔望月为周期。每逢朔望，太阳和月球的垂点最为接近，以致太阳潮最大地加强了太阴潮。高潮特高、低潮特低，潮差最大。因而称之为“大潮”。民谚有“初一月半见大潮”。反之，每逢上、下弦，太阳和月球的垂点相距最远，以致太阳潮最大地削弱了太阴潮，高潮不高，低潮不低，潮差最小，因而被称为“小潮”。民谚有“初八廿三到处见海滩”。

每太阴日的两次高潮和低潮，每朔望月的两次大潮和小潮，是海洋潮汐的基本周期。

每逢朔望为大潮，每逢上、下弦为小潮。据此，人们就可以推算和预告高潮的约略时刻和大潮的约略日期，其中特别是大潮间的高潮时刻。

每太阴日两次高潮和低潮，以及每朔望月两次大潮和小潮，体现了潮汐的基本规律。此外，影响海洋潮汐的还不许多次要的因素，这些次要的因素是对基本规律的复杂化。它有下列几方面原因。

（1）月球赤纬的变化，造成“日潮不等”。月球和太阳不仅都有周日运行，而且各有赤纬和距离的变化，月球赤纬的变化对海洋潮汐的影响尤为显著，造成“日潮不等”（图 27），指一日内的两次高潮的差异。因为月球的轨道面和地球的赤道面斜交。月球的正、反垂点通常分居南、北两半球，以致在同一纬度（赤道除外），它的顺潮和对潮总是有所不同。在月球直射的那个半球，顺潮的高度大于对潮；在非直射的那个半球，顺潮的高度小于对潮。月球的赤纬愈大，各地的日潮不等现象愈显著。

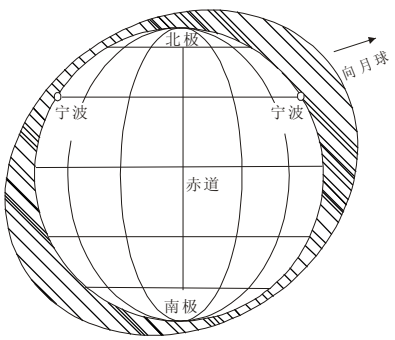

图 27 日潮不等（以宁波为例）

Figure 27 Declinational inequality（take Ningbo as a case）

一日内，只有一次高潮和一次低潮的潮汐称为“全日潮”。全日潮的范围，视月球的赤纬 δ 而定，$\theta \geqslant 90^\circ - \delta$。这种情形如同极昼（夜）地区的纬度范围，视太阳的赤纬而定一样。月球的赤纬有多种周期性变化，加上距离变化的因素，使日潮不等成为海洋潮汐中一个极为复杂的问题。（2）海洋潮汐的气象和水文因素。二者（气流和水流）都是非周期性的因素，是

不可以预先推算的。（3）海盆因素。包括海水深度和海盆形状。例举世闻名的我国钱塘潮，就同它的喇叭形河口和海盆条件有关。（4）海水的粘性，本身存在着内摩擦，同时，海底对潮流也有一定的摩擦作用。因此，高潮到来的时刻，一般都落后于月球中天的时刻，其差值称“高潮间隔”，具体的间隔时间因地而异。同理，大潮发生的日期，一般都落后于朔望的日期，其数值是 1—3 日。

§3.4 人类对宇宙的新探索

从古代起，人们就幻想穿过地球大气层，飞上太空。1957 年 10 月，原苏联用火箭把第一颗人造地球卫星送上了天，开创了太空观测、研究地球和整个宇宙的新时代。各种科学卫星和空间探测器上天后，发现了地球大气层外还有磁层；宇宙中存在着大量的 X 射线、γ 射线，还测量了许多行星表面的物理特性和化学成分。

20 世纪 60 年代以来，各种载人飞船、航天站、航天飞机先后进入太空，实现了在没有地球大气干扰的情况下对月球、大行星的逼近观测和直接取样观测，以及对宇宙空间环境的直接探测，极大地充实和丰富了人类关于太阳系和宇宙的知识。宇宙探测的发展，不仅使人们进一步了解到地球的宇宙环境，而且还影响和改变着人们的社会生活。例如，人们利用卫星进行军事侦察、空间通信、气象观测，以及寻找资源、为飞机导航等，从中获取了许多实际利益。

从 1957 年世界第一颗人造卫星上天，到 1981 年世界第一架航天飞机试验成功，在这短短的 24 年中，人类对宇宙空间的认识，已经从空间探索阶段，逐步进入到了空间开发利用的新阶段。

我国的航天事业起步于 20 世纪 50 年代中期，现在已经步入世界上航天技术先进国家的行列。

人类进入宇宙空间并开始适应、研究、认识、开发和利用空间环境，这是人类文明史上的一次伟大飞跃。宇宙环境中蕴藏着丰富的自然资源。

空间资源。利用极其辽阔的宇宙空间，人造地球卫星可以从距离地球数万千米的高度观测地球，迅速、大量地收集有关地球的各种信息；利用高真空、强辐射和失重等地面实验难以模拟的物理条件，可以在卫星上进行各种科学实验，例如在生物卫星上研究失重对昆虫、微生物、植物的生长、发育和代谢的影响。

太阳能资源。太阳能是地球最重要的能源。但是，其绝大部分能源不能透过地球大气层到达表面。如何最大限度地利用太阳能，是摆在科学家面前的科研课题。

矿产资源。科学家们对航天员从月球上带回的月岩标本进行了分析，发现月岩中含有地壳里的全部元素和 60 种矿藏，还富含地球上没有的能源 He^3，它是核聚变反应堆理想的燃料。此外，在火星和木星之间的轨道上运行着成千上万颗小行星，其中有不少小行星富含矿体。

宇宙开发活动，无论规模和技术，还是经济投入，都已不是一个国家所能独立完成的。因此，空间资源开发的一个趋向是日益走上国际合作的道路。

人类向宇宙空间发射的各种航天器，固然有十分重大的科研和应用价值，但是不可避免地会产生太空垃圾，例如工作寿命终止的航天器、因意外或有意爆炸产生的碎片，以及航天员扔出飞船舱外的垃圾等。这些空间垃圾大约以每年 10%的速度增加，而且体积越来越大。由于空间垃圾和航天器之间的相对速度很大，一般为几千米每秒至几十千米每秒，因此，即使轻微碰撞，也会造成航天器的重大损坏。面对这种情况，科学家们大声疾呼“保持太空清洁”！现在，航天专家们已经开始研究限制空间垃圾的生产，以及清除空间垃圾的办法。例如，将停止工作的卫星推进到其他轨道上去，以免同正常工作的卫星发生碰撞；用航天飞机把损坏的卫星带回地球，以减少空间的大件垃圾。

思 考 题

1. 比 5 等星亮 100 倍的恒星，其星等为几等？

2. 织女星（天琴座 a)的视星等为 0.1，若其距离增加为 10 倍，这时，它的星等将是几等？肉眼还能看到它吗”

3. 比较银河与银河系?什么是河外星系和总星系？

4. 行星如何分类？比较地内行星与地外行星、内行星与外行星的差别；比较类地行星与类木行星，它们的物理性质与化学组成有何差异？

5. 彗星的本质特征是什么？什么是流星体和流星？如果地球没有大气，地面上仍能看到彗星吗？仍能看到流星吗？

6. 康德“星云说”的基本论点和它的重要意义是什么？

7. 什么是恒星月？什么是朔望月？两者有何不同？

8. 上弦月何时中天？下弦月呢？半夜时，满月位于天空何方？

9.“月上柳梢头，人约黄昏后”（欧阳修《生查子》），该指何种月相？

10.“月落乌啼霜满天，江枫渔火对愁眠。姑苏城外寒山寺，夜半钟声到客船”（张继《枫桥夜泊》）。夜半月落，该是什么月相？

11.日全食、日偏食和日环食，分别与月球的本影、半影和伪本影有关；为何月食仅与地球的本影有关？为什么没有月环食？

12. 当地球上发生月偏食时，在月球天空将发生什么？

13. 在地球上，有可能在午夜观测到日食吗？在哪里？

14. 什么叫食限？食限的大小决定于什么？什么叫食季？食季的长短取决于什么？如果日偏食限为 17°，试求其食季的日数。

15. 发生日食的次数比月食多，为什么对一地来说，看到月食的次数反比日食要多？

16. 若今年 8 月发生月食，那么，明年 7 月可能发生另一次月食吗？今年 10 月有可能吗，为什么？

17. 如果黄白交点停止了移动，而黄白交角变得同黄赤交角一样，那么日、月食条件将有怎样的改变？

18. 什么是沙罗周期？为什么它取 6585.32 日，而不取 6585.35 日？为什么沙罗周期不能代替日、月食的具体推算？它的尾数 0.32 日在日、月食预告上有怎样的作用？

19. 什么是地球的潮汐变形？它是怎样发生的？

20. 什么是引潮力？引力的大小与距离的平方成反比，而引潮力的大小与天体距离的立方成反比，这是为什么？除距离因素外，引潮力的大小还有什么别的因素？

参 考 文 献

1. 金祖孟，陈自悟. 地球概论. 北京:高等教育出版社，1997.

2. 张钰哲等. 中国大百科全书·天文学. 北京:中国大百科全书出版社，1980.

3. 格拉斯著. 行星地质学导论. 北京: 地质出版社，1986.

4. 卡德培编著.万古奇观—彗木大碰撞及留给人类的思考.北京:科学普及出版社，1995.

5. 刘本培，蔡运龙. 地球科学导论. 北京:高等教育出版社，2002.