

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中小學生課堂故事博覽

巡天遙看一千河

— 天文學的故事

 **eBOOK**
內置資料 串流服務

巡天遥看一千河 天文学的故事

天圆地方

公元前 600 年，亚述帝国刚刚衰亡。在它的鼎盛时期，版图曾经从埃及延伸到巴比伦，两端相距 2200 公里。接着代之而起的是波斯帝国，它的版图西起今日的利比亚东部，东到克什米尔，横跨 4800 公里。

毫无疑问，这些帝国的普通老百姓对于整个国家的范围只有极模糊的观念，他们仅仅满足于在自己那一小片乡土上生老病死，再大不了就是偶尔到邻近的村子去旅行一趟。不过，当时的经商者和士兵们对于帝国疆土的辽阔，以及疆域之外还有那更加遥远的地方，一定是会有所认识的。

在这些古代王国里，想必有一些人曾思索过：大地有尽头吗？这可以说是学者们面临的第一个宇宙学问题了。

当然，没有一个古代人到过大地真正的尽头，不管他曾经旅行得多么远，他充其量是到达了某一处的海岸上，而天涯海角似乎还在那地平线以外呢。就算他登上一条船，向外驶去，也是永远到不了尽头的。

这么说，大地是不是就没有尽头了呢？这个问题的答案如何，要看你认为大地的整个形状是怎样的。

在古希腊时代之前，所有的人都认为大地是平的。真的，它看起来确实就是那样，只不过有一些山丘、河谷的小起伏罢了。可是，如果大地确实是平的，几乎立即可以断定，它非得有个什么样的尽头才行。要不然，它就是个没完没了地向外延伸的平面——换句话说，它的范围是有限的，这是个叫人最不舒服的概念。在历史上，不论对空间或者时间，人们总是力求避免“无限”这个概念，因为这样的东西似乎既不能认识，又无法理解，所以也就无从进行研究和推理了。

另一方面，如果大地确实有个边缘，就是它是有限的，这又会造成另一些困难。人们要是走得太靠边了，不是要掉下去吗？

当然，也许干的陆地四周都有海洋环绕，因此人们是靠近不了那个边的，除非有谁故意乘船向外航行，远远地离开陆地，一直到看不见的地方。事实上，直到哥伦布那个时代，还有许多水手真的害怕发生这样的事情呢。

不过，要是认为人类由一圈水保护着，这又造成了另一个问题，是什么东西挡住了海水，使它不致从大地的边缘流出去呢？

要解决这个问题，一个办法是假设我们头顶的天空是一个坚固的盖子，从四面八方往下罩住了大地。这就是所说的“天圆地方”。真的，天空看起来不就是这样吗？这样一来，可以把整个宇宙想象成一个盒子，天空构成了弯曲的盒盖和盒边，而海水和干的陆地则是平坦的盒底，人和万物都在这个盒底上面生长、活动。

在这么一个“盒子宇宙”里，大地的形状和大小又是怎样的呢？

许多人曾觉得大地像一块长方形的板。说来也很有趣，由于历史上和地理上的巧合，尼罗河、底格里斯河和幼发拉底河、印度河这一系列最早的人类文明发祥地是从西到东，而不是由北向南分布。还有，地中海也是东西走向的，所以古代文明人的那一点模模糊糊的地理知识，似乎在东西方向上来得丰富一些，因而他们也就理所当然地把“盒子宇宙”想象成东西方向长，南北方向短了。

希腊人似乎具有比较强烈的几何学的均衡与对称的观念，他们倾向于把大地想象成一块圆板。不消说，希腊正位于这圆板的中心。这块平板上大部

分是陆地，周围环绕着一圈水，地中海就是从那儿一直向内延伸到陆地中央。

到了公元前 500 年，希腊第一位科学的地理学家喜卡塔乌斯认为，这块圆板的直径最多是 8000 公里左右。就是说，平坦的大地面积大约为 5000 万平方公里。在他那个时代的人看来，这个数字已经够大，大得都有点吓人了。其实它只有陆地实际面积的 1/10。

我们暂且不谈这个“盒子宇宙”的大小和形状，先来问一问是什么东西使它保持自己的位置的？在上面所说的这种扁平的大地看来，有一个特殊的方向叫做“下”，一切重的、实的东西都要“往下掉”，那么，大地本身为什么不会“掉下去”呢？

当然，可以假定构成大地的材料，是一直往下延伸的。但这样一来，又得面临“无限”这个概念。为了避免这一点，我们可以说大地本身立在其他东西上面。例如，古印度人就认为，大地是由四根柱子支撑住的。

可是这只不过把困境推迟了一点而已，这四根柱子又是立在哪儿呢？立在四头大象背上！大象呢？站在一只巨大的乌龟背上！乌龟呢？浮在大海上！那么大海呢？……

总而言之，只要假定大地是扁平的，不管这样的假定似乎是多么“符合常识”，都不可避免地会引起最严重的哲学上的困难。

其实，要是人们能恰当地使用自己的眼睛，那么，这种“扁平的大地”是连常识也不符合的。如果大地真是平的，那么在地面上所有的地方应当能看到同样的星星。但是所有的旅行者都知道，如果向北走去，一些星星会消失在南方的地平线下，另一些星星却出现在北方的地平线上；要是朝南走，情况就恰好相反。而只要认为大地是南北弯曲的，就能毫不费力地解释这种现象。

所以希腊学者阿纳克西曼德就提出，人类生活在一个南北方向弯曲的圆柱面上。就我们今天所知，是他头一个提出了地面的形状不是平面，时间大约在公元前 550 年左右。

但是圆柱形的大地还是解决不了问题。住在海边，经常注意观察海船的人都有这样的经验，朝大海驶去的船只并不是变得越来越小，一直小到只剩下一点，然后才消失的。如果大地是平的，情况本来应当是这样。但事实上，船到消失的时候看上去还相当大，它们像是翻越到了山背后一样，船身首先隐没，然后才是船帆。如果大地是弯曲的，情况就必然是这样。而且，不管船是朝着罗盘上的哪个方向驶去，消失时的情形都是相同的。所以，大地并不只是在南北方向弯曲，而是朝所有方向都同样的弯曲。而在一切方向上弯曲程度相同的表面只有一种，这就是球面。

古希腊的天文学家还发现，对于月食的成因，最好的解释就是：由于月亮和太阳正处于大地两侧相对之处，大地的阴影（由太阳所投下的）落到月亮上，从而造成月食。不管月亮和太阳相对地面的位置如何，月食时可以看到这种阴影的断面总是圆形的。只有一种物体能朝所有的方向都投下断面为圆形的影子，这就是球。

总之，仔细地观察就可以发现，大地并不是平的，而是球形的。但你平时看来，它很像个平面，因为整个大地是这么一个巨大的球体，在它的表面上，用眼睛所能看到的只是一小部分，其弯曲程度是小得难以觉察的。

球形大地的概念立即清除了关于大地“尽头”的问题，而又不必引进“无限”这个概念。球的表面有确定的面积，但却没有尽头；它是有限的，但却

没有边。

到了公元前 350 年，地球的观念就已经牢固地确立了。从那以后，西方世界受过教育的人全部都承认这种观念。

这种观念显得如此理想而又完美，尽管没有直接的证明，人们还是承认它。直到公元 1522 年，由葡萄牙航海家麦哲伦率领的一支探险船队里幸存的一条船驶回了港口，人类这才第一次成功地环绕地球航行一周，因而直接地证实了大地不是扁平的。

现在，我们对于大地这个圆球的认识真正达到了“眼见为实”的程度。发射到高空的火箭和卫星拍下来的图像都向我们展示了地球的真实面貌。

地球是宇宙的中心吗

自古以来，人们都亲眼看到日月星辰是环绕着人类所居住的大地在运动，而大地又是这样的平静和安稳，所以在人们的头脑中就自然产生所谓大地处于宇宙中心的概念。在这个基础上就产生了古代希腊的地心说，以及在地心说有相似之处的中国的浑天说。

我国古代，提出过与地心说相似的浑天说，浑天说始于战国时代，而我国东汉初期的天文学家张衡是浑天说的代表人物。他把天和地比做蛋壳和蛋黄的关系。这就揭示了大地是悬于宇宙空间的一个圆球，而且宇宙是以地球为中心。可见，我国古代浑天说的宇宙体系，同古代希腊的地心体系是十分相似的。

古希腊的毕达哥拉斯学派认为，一切立体图形中最美好的是球形，一切平面图形中最美好的是圆形，而宇宙是一种和谐的代表物，所以一切天体的形状都应是球形，一切天体的运动都应是匀速圆周运动。但实际观察的结果并非如此，行星的运动速度很不均匀。在柏拉图看来，这只是一种表面现象，可以用匀速圆周运动的组合来解释。于是他就提出了一种以地球为中心的同心球壳结构模型。每个天体都处在各自的球壳上，各同心球之间是由正多面体联接着。

柏拉图的学生欧多克斯发展了他的观点，按照欧多克斯的设想，地球是万物的中心，日、月、行星都是在同心的透明球体上绕地球转动的。他认为所有的恒星都在同一个球面上，而这个球的半径最大，它围绕着通过地心的轴线每天旋转一周。其他天体则由几个同心球结合成一组以及另一组等等。

亚里士多德在欧多克斯同心球理论的基础上，把这些转动的同心球，不但看成是实际存在的物质的实体，而且还把它们看成是一个透明的“水晶球”，各组都成了一个连续的相互接触的系统。在亚里士多德的体系中，各天体离地球由近到远的排列顺序为：月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星和恒星天，在恒星天之外还有一层“宗教天”。亚里士多德认为，一个物体需要另一个物体的推动才能运动，这个“宗教天”的运动，是由不动的神来推动的。当神一旦推动了“宗教天”的运动，“宗教天”就把运动逐次传递到恒星、太阳、月亮和行星上去。亚里士多德就这样把神是第一推动力的唯心思想，第一次塞进了宇宙论中来。这就成为亚里士多德体系中致命的弱点。

以地球为中心的宇宙理论由喜帕恰斯给出了几何模型。从地球上观测到的行星运动相当复杂，它们有时由西向东行，有时逆行，有时又似乎在群星

中不动。为了解释这种复杂的运动，喜帕恰斯提出了本轮均轮的思想。他认为行星在本轮上围绕着一个假想的中心运动，而这个假想中心又绕地球在均轮上运行。

在喜帕恰斯以后 300 年间，希腊天文学没什么新的进展。到了公元 2 世纪，古希腊著名天文学家托勒玫继承了亚里士多德的地球位于宇宙中心静止不动的思想，全面总结了希腊罗马时期的天文学，创立了托勒玫的地心体系，也叫托勒玫的地球中心说。他提出：以地球为中心，外边围绕着月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星，然后是恒星天和最高天，共有九重天。所有行星和太阳、月亮都有本轮和均轮，而且均轮都是偏心圆。这样他就能让实测的天体运动分解成很多简单的圆运动来满足宇宙的和谐。

公元 5 到 10 世纪，是欧洲历史上的黑暗时期，基督教神学占统治地位，按照基督教的教义。上帝是世界的最高主宰，宇宙间的万物是上帝为满足人的需要而创造出来的。基督教还把宇宙的模样也纳于宗教的教义。亚里士多德—托勒玫的地球是宇宙的中心见解，以及神是第一推动力的思想也被教会利用了。在黑暗的中世纪，地心说的宇宙体系统治了西方 1000 多年。

那么，地球真的是宇宙的中心吗？

随着观测仪器的改进和观测水平的不断提高，用托勒玫体系计算出来的行星位置，与实际观测的偏差越来越大。尽管托勒玫的继承者已经把本轮的总数增加到 80 个，但所得的结果仍与实际的星位不相符。在这种情况下，科学家们对托勒玫的宇宙体系越来越产生怀疑。到后来，由于自然科学的迅速发展，自然科学与神学之间的矛盾越来越尖锐，甚至发展到科学起来反叛教会了。于是，科学和神学的这场斗争，首先从对宗教神学宇宙观的基础——地球中心说的批判开始。

从哥白尼到牛顿

哥白尼出生在波兰维斯杜拉河畔的托伦城。他所处的时代，正是欧洲黑暗的中世纪的末期，亚里士多德—托勒玫的地心说早已被基督教篡改为基督教义的支柱。但由于天文观测技术的提高，即使在托勒玫的地心体系中已增加到 80 个左右的本轮和均轮，也难以获得与观测相合的结果，而且这类本轮的数目还在继续增加。这就使当时一些具有进步思想的哲学家、天文学家们，对托勒玫的复杂的地心体系发生了怀疑，甚至感到不满。而哥白尼接受了这种进步的思想，由于受到古希腊阿里斯塔克的地球绕太阳转动的学说的影响和启发，哥白尼分析了托勒玫体系中的行星运动，发现每个行星都有一日一周、一年一周和相当于岁差的三种共同的周期运动，但又无法对此作出合理的解释。他认为，如果把这三种运动都归到被托勒玫视为静止不动的地球上，就可消除他的体系里不必要的复杂性。因此，哥白尼认为地球不是宇宙的中心，而是一颗普通的行星，建立了一个以太阳为中心的日心体系。

在哥白尼看来，月亮是地球的卫星，它在以地球为中心的圆轨道上每月绕地球公转一周。与此同时，月亮也伴随地球一起绕太阳公转。地球每天自转一周，天穹实际并不转动，是由于地球自转才出现日月星辰每天的东升西落现象。恒星同太阳的距离十分遥远，它们在离太阳很远的一个天体上。行星和地球一样，都在圆形的轨道上匀速地绕太阳公转。就这样，哥白尼把统率宇宙的力量都归于太阳。

哥白尼花费了 40 年的心血，以严格的科学态度进行反复的观测、研究和计算，完善了他的学说，终于写成了阐述日心说的不朽巨著《天体运行论》。他在这本书里全面讨论了当时天文学的所有问题，使很多过去莫名其妙的问题都得到了合理的解释。

哥白尼的日心体系从根本上动摇了中世纪宗教神学的基础，认为宇宙是可以认识的，有一定规律可供人类研究探寻。从此自然科学便开始从神学中解放出来，大踏步前进了。

但是哥白尼的革命并不够彻底。他还保留了行星作匀速圆周运动的概念，因此对一些天体的不均匀运动还要保持一些本轮。此外，他还保存着固定不动的恒星天球的概念，让太阳成为宇宙中心。这些都要等到天文学进一步发展才陆续得到解决。

在哥白尼之后，意大利的修道士布鲁诺由于善于接受新事物，在学习了哥白尼《天体运行论》以后，他认识到宗教神学宇宙观是虚假的，是没有科学根据的，而科学才是真理，并决心为探求科学真理奋斗终生。由于布鲁诺的“离经叛道”，他不得不离开他的祖国，过着长期流亡的生活。在流亡的过程中，他大力宣传科学真理，还写了大量文章，热烈宣传和颂扬哥白尼的学说，猛烈地抨击了官方经院哲学的教条。

布鲁诺不但捍卫了哥白尼的学说，还充实、发展了这一学说。他认为：宇宙是统一的、物质的、无限的和永恒的；在太阳系以外，还有数不清的世界，我们所认识的世界，是无限宇宙中非常渺小的一部分，而地球又是无限宇宙中一粒小小的尘埃；无数颗恒星，都像太阳一样巨大、炽热，并以极大的速度向各个方向疾驰着……

布鲁诺的宇宙无穷无尽的思想，使几千年来在人们头脑里难以突破的天球硬壳，一下被布鲁诺砸碎了。美丽的天空豁然开朗，伸向漫无边际的远方。由于布鲁诺广泛宣传和捍卫了哥白尼的学说，以及他对哥白尼学说的发展，轰动了整个欧洲，气极败坏的罗马教廷用诡计将他骗回意大利并逮捕了他。他们用尽了一切威胁、利诱和恐怖的手段，但丝毫没有动摇布鲁诺对真理的信仰和捍卫。到 1600 年 2 月 17 日，布鲁诺被烧死在罗马的百花广场上。

真理是不能用火烧尽的。布鲁诺虽然被罗马教廷烧死了，但唯物主义的宇宙观已日益深入人心。

继布鲁诺之后，意大利的天文学家和近代实验科学的创始人伽利略由于受到当时的一种玩具“光管”的启发，制出了望远镜并用它来观察天空，从此获得了一系列新的科学发现，在天文学方面做出了重大贡献，也进一步证实和发展了哥白尼学说。

伽利略发现在望远镜的视野里，行星不再是一个光点，却显出月亮一般的圆面。他惊异地发现金星甚至露出月亮一样的圆缺变化，他还清楚地看到有四颗卫星环绕木星运行。他看到了月亮表面的起伏不平，发现了大量环形山。土星的光环他也观测到了，但当时没有确认。在欧洲，他第一个借助望远镜看到太阳黑子，并发现太阳的黑子在日面上移动，从而得出太阳有自转的结论。他发现随着望远镜口径的增加，可见到的恒星数目大为增加。可是，即使在望远镜里，恒星仍然只是一个光点。因此他断定它们一定无比遥远。他还发现银河实际上是由无数颗恒星组成的。

所有这些发现都是过去闻所未闻的，震动了欧洲的学术界，这些发现都有利于哥白尼的日心学说。他的观测结果，强有力地论证了哥白尼的学说，

使罗马教廷大为震怒。最后教廷把他拘禁起来。他在完成了最后一本论述力学与运动的书并偷运出意大利之后，孤独地死去。

与伽利略同时代的丹麦天文学家第谷创制了许多大型精密的天文仪器，并坚持进行 20 多年的认真观测。根据他对 1572 年在仙后座发现的超新星距离的测定以及对 1577 年一颗明亮彗星运动情况的测算，他也怀疑托勒玫体系，但他并没有接受哥白尼的体系，他认为其它行星都是围绕太阳运行的，可是地球仍然是宇宙的中心，月亮和太阳及其率领的行星队伍则是围绕地球运转的，第谷的功绩主要在于他创制了不少仪器并且详尽地记录了他多年精密观测行星运动的资料。此外，他还非常幸运地在临终前一年接受了一位很好的助手和接班人，德国的天文学家开普勒。

开普勒用了很长的时间，对第谷遗留下来的观测资料进行综合分析和研究。后来，开普勒发现“行星是沿椭圆轨道绕太阳运行的，太阳在这个椭圆的两个焦点之一的位置上”的定律。这就是开普勒的行星运动第一定律，也叫轨道定律。这个发现，把哥白尼学说向前推进了一大步。

接着，开普勒又发现，虽然火星运行的速度是不均匀的，但是从任何一点开始，在单位时间向径（行星和太阳的连线）所扫过的面积却是不变的。这样开普勒又推出了“火星的向径，在相等时间内扫过相等的面积”的行星运动第二定律，又称为面积定律。

到 1609 年，开普勒出版了《新天文学》一书，在这本书里发表了他的轨道定律和面积定律。并且在书中指出：“这两条定律也适用于其他行星和月亮的运动。”

后来，开普勒经过长期繁杂重复的计算和无数次的失败，又发现了“所有行星公转周期的平方与椭圆轨道半长轴的立方的比值都相等”的行星运动第三定律。这是一个十分重要的自然定律。因为不仅行星遵循着它，就是围绕行星运动的卫星，以及太阳周围的其他天体也都如此。这就可以确定，太阳和它周围的所有天体，构成了一个有秩序的行星系统，这个系统就是太阳系。

行星运动三定律的发现，具有划时代的意义，它不但为经典天文学奠定了基础，而且还导致了数十年后牛顿的万有引力定律的发现。

正是伽利略不幸逝世的 1642 年，在英国诞生了伟大的科学家牛顿，牛顿对自然科学的贡献是多方面的，不仅在天文学方面，更主要的还是在数学、力学和物理学，而这些又直接影响到天文学的发展。狭义地说，他在天文学方面的直接贡献之一是发现万有引力定律，并由此建立起天体力学。另一项贡献则是发明反射式望远镜和棱镜分光的天文光学。

在开普勒的三大定律发表之后半个多世纪，牛顿总结了前人特别是伽利略所发展起来的力学理论，提出了三大运动定律，具备了归纳提高开普勒三大定律的条件。牛顿同时总结和发展了前人的数学成就，创立了微积分方法。在这两方面的理论基础上，牛顿首先用数学方法根据力学原理从开普勒三大定律推导出太阳对行星的引力定律，其要点就是太阳对行星的引力与行星的质量成正比，而与行星对太阳距离的平方成反比。他并且证明只要有这种距离平方反比的引力，开普勒三大定律就是必然的推论，而且是在行星质量远比太阳质量为小的条件下粗略近似。著名的苹果落地故事里说：他由此悟出重力是地球对它表面物体的引力，并且把地球半径、地月间距离、地面物体重量和下落加速度以及月亮绕地球的运行周期相结合，得出任意两个物体之

间都存在相互引力，这种引力和两物体质量成正比，与两者距离的平方成反比，而且比例常数不论天上地下都完全一致。这就是有名的万有引力定律。这条定律的重要意义不仅因为它至今还广泛应用于众多方面，更值得强调的是它第一次证明宇宙间的自然规律可以认识，地面和天空是统一的。后者实际上是人类认识宇宙、研究天文学的基本出发点。由于万有引力定律的广泛应用和重要性，下面把它的数学形式写出来：

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

其中 F 为两物体之间相互的引力， M_1 和 M_2 分别为它们的质量， R 为两者质心的距离， G 为比例常数，称为万有引力常数，数值为 6.67×10^{-11} 米³/（秒²·千克）。

牛顿以他的三大运动定律和万有引力定律为基础建立起一个机械力学体系。他于 1687 年发表的不朽杰作《自然哲学的数学原理》一书，全面阐述了他的发现和理论。三百年来经过众多的后继者的发展和补充，牛顿的体系已经十分完整，现在通称为牛顿力学。牛顿力学开始形成植根于天文学，又反过来为天文学开辟崭新的领域，建立起天体力学这个天文学的分支。天体力学的建立标志着历来单纯观测统计的天文学走上了引用物理方法进行研究的新道路。

牛顿在天文光学方面还有两种创造，一种是反射式望远镜，另一种是棱镜分光，对天文学的深刻影响不容低估。反射式望远镜的口径比用透镜构成的折射望远镜更容易做得大些，可以收集到更多的星光，便于观测更暗弱的天体，使人类探测宇宙的深度大为增加。此外，星光不经过透镜的折射就不会产生不同颜色成分发散开的问题，出来的图像更加清晰。因此，现代的大型望远镜无一例外都是反射式，几乎全部遥远的河外天体都是由反射式望远镜发现并观测研究的。至于棱镜分光术对于天文学的影响更是特别深远，甚至可以说它为建立天文学里最活跃、发展最快、成果最大的分支——天体物理学打下了重要基础。

牛顿用万有引力定律解决和说明了一系列宇宙间的重大问题，从而奠定了天体力学这一门新科学的基础，从此天体力学便从它的幼年时期进入到成年时期。到了这个时候，哥白尼的日心说经过布鲁诺、伽利略、开普勒和牛顿等人的宣传、捍卫和发展，已被公认为阐明太阳系实际结构的学说，再很少有人否认了。

又由于天王星、海王星的发现，证实了牛顿万有引力定律能十分准确的推算出行星的位置，也因新的发现而充实了哥白尼学说。

从哥白尼的《天体运行论》于 1543 年公开发表起，直到 1846 年加勒观测到海王星，经历了三百余年的时间，经过无数次曲折和斗争，冲破了宗教和传统观念、习惯势力的重重阻力，克服了哥白尼学说本身存在的缺陷，哥白尼的日心说终于由海王星的发现而取得了最后的胜利。

到 1930 年 1 月 21 日，美国天文学家汤博发现了冥王星。冥王星的发现，再次扩大了太阳系的范围。

地球和月亮

地球

地球是一个略为扁平，半径约为 6370 千米，质量为 6×10^{24} 千克，平均密度为 5.5 克/厘米³ 的椭圆球体。它的南北向的半径并不相同，因此称它为椭圆球体。但它和一个理想的圆球体差别相当小。

地球表面极不规则，在陆地有崇山峻岭，在海底有深沟大壑，为了便于实际测量应用，往往把海水的平均表面作为地球表面，在陆地上则以海面的延伸部分为基础。

地球内部的基本构造分为地核、地幔和地壳。地核和地幔还各自可以分为两部分。在地球最核心的部位，半径为 1255 千米的区域是内地核，呈固态，它外面是熔融状态的外地核。地核为铁镍物质所构成，据认为地球的磁场和这种铁镍物质在外地核里流动有关。而地幔完全是石质的，密度比地表岩石大，但因温度高刚度却不如地表的岩石，只有与地壳相连并包括地壳在内厚度不超过 80 千米的表层比较坚硬，叫做岩石圈。在它下面距地面总计不超过 200 至 400 千米的上地幔，岩石所受的压力和温度相比不算高，使其处于接近熔融状态，被称为软流圈。在岩石圈有裂缝或缺陷处，软流圈里的物质失去了压力就会成为流动性较好的岩浆或熔岩，甚至可能流到地表来。

地幔以上是地壳，构成地壳的原始岩石和地幔物质全都是硅酸盐矿物质。硅酸盐的主要成分是硅和氧两种元素，它们都是恒星演化过程中核反应合成的重要产物。地壳的厚度很不均匀，海洋下面地壳厚度只有 5 至 8 千米，大陆地壳厚度 16 到 60 千米不等。

地球表面以上是大气层，大气层没有明显的边界，只是愈向上愈稀薄。流星的光迹从 160 千米高处就会出现，太阳的高能粒子在稀薄空气中所产生的极光则可以在高达 1000 千米的地方辉耀，不过通常所说的大气层则指的是 50 多千米以内空气比较浓密的范围。在这范围以上的高层大气只占总质量的 2%。这部分较浓密的大气层还可以细分为对流层和平流层。平流层往上为中间层。自 80 千米以上称为热成层。在高层大气里从大约 100 千米到 350 千米的高度范围里有一系列电离层，含有较多电离气体。电离层可以反射无线电波，有助于越洋的短波无线电通信，并受太阳活动性的影响。

地球各处普遍存在的磁场称为地磁场，一般的磁感应强度为 5×10^{-5} 特。在中低纬度区地磁场的方向基本是南北向。地球磁场的真实起源目前还不太清楚，一般认为是地核里液态铁质流动所引起的，但还没有令人信服的说明。

月亮，地球的卫星

洁白光明的月亮是天空中除太阳以外最引人注目的天体，又是除流星以外距我们最近的天体，也是人类首先登临的地外天体。月亮诞生的过程大致和地球相差不太多，只不过因为它比较小，内部热量和重力都比地球小得多，才使月亮内部和表面的情况和地球大不相同。

月亮与地球的距离根据雷达探测资料，平均为 38401 ± 1000 米。1969 年 7 月 20 日美国宇航员登上月球后在月面上安放了激光反射器，现在用激光测距精度可以达 7 米。月亮的半径为地球半径的 0.27 倍，即约为 1740 千米。月亮的质量为地球质量的 1/81，即约为 7.35×10^{25} 千克。由月亮的半径和它的质量算得的平均密度为 3.3 克/厘米³。在太阳系所有的行星卫星组合中，它是与所归属的行星大小最接近的卫星，因此不少人认为它原来也是一颗行

星，后来被地球引力俘获才形成共同围绕它们的质量中心转动并绕太阳公转的姐妹行星。月亮总是用同一个面对着地球。这种情况称为同步自转。

月亮表面最显著的特点就是相当崎岖不平，布满各种山脉、裂谷和大小不一的月坑，另外也有几大块平原称为月海。月坑又称为环形山，小的只有几十厘米或更小，大的直径有 200 千米以上。大月坑底部很平坦，中央有一些尖锥状的小山。绝大部分月坑是陨星撞击而成的，裂谷和断崖则是月面坍塌的结果。月亮上没有水，所谓月海实际是由熔岩流布而成的平原，有的月海四周有一圈山脉，好像原先也是大月坑，但后来被熔岩淹没掉。空间探测器飞越月亮时发现好几个月海下面有大块密度较高的物质，这些物质被认为是巨大高密度陨星撞进月面，撞击产生的大量热能熔化了周围的岩石，可能再加上由月亮内部深处冲破薄弱月面流出来的熔岩，淹没掉原来的洞穴，最后就形成了月海。虽然月亮内部可能不像地球那样完全熔化过，也没有形成铁质的月核，但从登月过程中做的月震波实验来看，月亮内部也分为核、幔和壳三部分。月核半径约为 700 千米，是软流状固态硅酸盐矿物质构成的，温度只有 1000 开左右，远比地核低。月幔和月壳组成刚性的岩石层。月幔厚 1000 千米，月亮的厚度在正面约为 65 千米，而在它的背面却可能要厚上一倍。

1969 年宇航员登月后不仅进行了月震波试验，还作了一系列的“月质”考察。月面的岩石主要是玄武岩，是由熔岩凝固而成的，因此至少月亮表面原来曾经处于熔融状态。月亮上最古老的岩石已有 44 亿年以上的历史，但月面上普遍覆盖的粉尘的年龄却达 46 亿年，这些粉尘估计都是从月亮凝固出的第一批岩石剥落下来的。在月亮上没有明显的磁场，这很可能与月亮内部不存在可流动的铁质核有关。

由于内部热量不足，坚硬的岩石圈厚达上千千米，所以月亮上不存在板块活动，也没有板块撞击的造山运动。然而使历史陈迹原样保存到现代的主要原因是没有大气和水流，不存在风化和水蚀作用。不过月面仍受到另一些因素的剥蚀，一是昼夜温差使岩石表面剧烈热胀冷缩而破裂和剥落；二是大量陨星的撞击，每次陨星撞击都会有崩裂的碎屑，在高温下熔成玻璃珠状的细微颗粒；三是太阳风粒子和其它高能辐射以及宇宙线对岩石分子组的破坏。而最主要的是在行星际空间随处存在的细微尘埃颗粒的冲刷，这些颗粒未受大气阻拦以高速直冲月面，严重磨蚀月面岩石，结果使月面普遍散布着一层粉尘。

地球和月亮的运动

由于地球绕日公转，太阳看起来好像是在天穹的繁星之间由西向东运行，它所走的路线夏天在赤道以北，冬天在赤道以南，这种表现的太阳轨道就是黄道。因为太阳和地球都永远在地球轨道面上，所以地球轨道面和黄道面是同一个平面，两种叫法可以互换使用。黄道在天穹上和天赤道有两个交点：一点是视太阳由南向北穿过赤道的春分点；另一点是秋分点。太阳在一年里先后穿行于黄道十二个星座，它们好像是太阳的行宫，所以又称黄道十二宫。

地球轨道的偏心率虽然只有 0.017，地球在轨道上运行的速度仍然有明显变化，反映出来是太阳在黄道上走得快慢不同。每年春分到秋分地球在远

日点一侧，运行较慢，共约需 185 天；而由秋分到第二年春分则在近日点一侧，运行较快，只需约 180 天。这正是开普勒第二定律的反映。

月亮绕地球运行的公转是产生月相变化和形成日月食的原因。月亮与地球的平均距离是 38.4 万千米，绕地一周需用 27.3 天。这个周期不是两次满月的间隔，而是以天空的恒星为背景所观测到的周期，因此叫恒星月。在这期间地球在自己的公转轨道上向前运行了一段，月亮、地球和太阳的相对位置有了变化。例如原来月亮在太阳和地球当中，经过一个恒星月之后，以遥远的恒星为准，月地的相对位置已经和上次一样，但是月亮却还没有来得及第二次走到太阳和地球中间，大约还差 27° ，需要再过一段时间才能到达。月亮先后两次到达太阳和地球当中所间隔的时间叫做朔望月，长度是 29.5 天。

月相变化是因为太阳、地球和月亮相互位置的变化，使我们看到被太阳照亮的月亮部位不同而形成的。当月亮处在日地之间时，面对地球的是阴暗面，称为朔，即农历初一；月亮转到日地连线对面时是满月，称为望，即农历十五。中间还有娥眉月和上弦、下弦。两次朔日或两次望日之间所经历的时间就是朔望月。

在朔日如果月亮刚好穿过地球的轨道面或在附近，它就会把影子投到地球上形成日食，月影经过的地带就是日食带。由于太阳整个圆面都发光，所以月亮投射出的影子分本影和半影两部分。在本影区内月亮完全把太阳遮挡住，而半影区只部分遮挡住太阳。月亮的本影投射到地球上就会发生日全食。在锥形本影经过的地带可以看到日全食，在锥形半影扫过的区域，太阳不会被月亮全部遮挡，只能看到日偏食。在一次日全食中可以看到偏食的地带远比能够看到全食的地带为大。月亮在椭圆轨道运行，距地时近时远，因此有时月亮即使正好处在太阳和地球当中，本影的锥尖却不够长无法投射到地球上，这时月亮距地较远，它的盘面比太阳圆面小，就会形成日环食。本影的锥尖未达到地面，在锥尖的延长线所指位置附近可以看到日环食，半影区内其它地方只能看到偏食，如果在望的时候月亮刚好穿过地球轨道面，月亮就会走到地球的本影里面而接受不到阳光，这样就会形成月食。

很明显，并不是每个月的朔望日都会发生日月食，只有在朔望时月亮凑巧十分靠近或穿过地球轨道面时才会发生日月食。月亮绕地运行的轨道面即通常称为白道面的平面，既不和黄道面重合又不和地球的赤道面重合，所以月亮的运动看起来显得特别复杂。

发生日食的机会比发生月食的机会多。每年都至少会发生两次日食，两次之间大约相隔半年。最多一年之内可以发生五次日食，它们分为三组，其中两组连续两个月都发生日食，另外相隔约半年还有一次单独日食。日食的发生次数虽多，但月影特别是月亮本影锥尖在地球上扫过的面积每次都极为有限，所以对任何一个具体地点平均经过二百年才能遇见一次日食。月食每年最多只有三次，有些年份甚至一次月食也不发生。但是每次发生月食在夜间的半个地球上都能见到，所以看到月食的机会反而较多。每年日月食总数不会超过七次。

月亮绕地运行还影响海水和潮汐。月亮对地球上各点的距离不同，对地球各部分的引力也不相同。面对月亮的部分距离最近引力最强，地心处次之，背着月亮的一面距离最远引力最小。如果地球完全是刚性固体不会变形，各部分受到的引力差别从整体上起不了什么作用，合起来相当于加在地心处的

总引力。但是地球并不是理想的刚体，更何况表面还有广阔的海洋，能流动的海水是可以随受力情况而变形的。其结果是受引力最强处向月亮移动的加速度最大，地心次之，背着月亮的一面引力最弱加速度也最小。这些力总合的作用是维持地球和月亮相互绕行，但是由地球本身来看，面向月亮的部分向月亮靠拢的趋势强，而背着月亮的部分却跟不上整体的行动。结果不论面对或背向月亮的部分都有离开地心的趋势，也就是说它们都受到向外拉的力，海水受这种力的作用在两个方向上都会凸起来形成海潮。这种引起海水潮汐的力就叫做潮汐力或引潮力。一个天体的质量越大或者和周围物体距离越近，它所施加给周围物体的潮汐力就越大。在中子星或黑洞附近潮汐力可能会大到任何物体都要被撕扯碎裂的地步。潮汐力虽然是万有引力的一种表现，但它是不同距离上引力的差值，所以不再与距离的平方成反比而是与距离的三次方成反比。太阳对地球的潮汐力就因为它的距离比月亮远得多，不像月亮对地球的潮汐力那么强。

所谓潮汐原是指在朝朝夕夕的昼夜周期里，日月潮汐力使海水涨落的变化。太阳和月亮的引潮力还以朔望月为周期。在朔日或望日，太阳、地球和月亮在一条线上，日月潮汐力方向相同，形成大潮。中秋钱塘江大潮就如万马奔腾蔚为壮观。

地球反过来自然会向月亮施加更为强大的潮汐力。月亮早期表面由熔岩覆盖的时候，潮汐力会使熔岩发生涨落的流动。由于熔岩粘滞性很大，流动起来摩擦阻力很大，就使月亮转慢起来，最后达到自转周期和公转周期相等为止。这时月亮固定用一个稍微向外突起的面对着地球，不再有熔岩的流动和涨落，这就是月亮以及已测得自转周期的卫星全部是同步自转的原因。再反过来看地球，地球上海水的潮汐也同样有摩擦力。虽然比熔岩流动给月亮的阻力小，却同样能使地球自转减慢。现在已经测出，地球的自转周期每 100 年大约延长 1 毫秒的样子。有很多证据证明在远古时代地球每年自转 400 多次，而不是现在这样 365 次多一点。

太阳系

光辉的太阳

太阳是太阳系中唯一自己发光的天体，是一颗稳定的恒星。它光焰夺目，光芒四射，以巨大的光和热哺育着大地，给人间带来了温暖。对于人类来说，地球上万物的生长，气候的变化，江河湖海的出现，各类矿产的形成，直到人们的日常生活，都离不开太阳，所以在宇宙的众星球中，没有一个能比得上太阳更为重要。可以说，没有太阳就没有人类居住的地球，也就没有人类。从这个意义上说，太阳好比是“大地的母亲”。

在我国辽阔的土地上，从很早的古代起，就居住着许多部族，各个部族都有自己奉祀的上帝、鬼神和有关太阳的神话传说。据传说，我国东方殷商人信奉的上帝是帝俊（又称帝誉），西方的周人所奉祀的上帝是黄帝，而且这往往又与太阳的神话传说有关。

传说帝俊长着鸟的头，头上有两只角，称猴的身子，只有一只脚，手里常常拿着一根拐杖，弓着背，一拐一拐地走路。说帝俊有三个妻子，一个叫做娥皇，另外两个一个叫羲和，另一个叫常羲。羲和是太阳的女神，生了十

个太阳。常羲是月亮的女神，生了十二个月亮。

相传，在东海外的汤谷，有一棵大树生长在海水中，这个大树名叫“扶桑”，扶桑有几千丈高，一千多围粗，这十个太阳就住在这扶桑树上，经常有一个太阳住在上面的树枝上，其余九个都住在下面的树枝上。他们轮流出现在天空中，一个太阳回来了，另一个太阳才出去值班，所以虽然有十个太阳，但经常和人们会面的却只有一个。

据说到帝尧当政的时候，十个太阳不再认真地轮流出来值班，却一齐跑出来玩耍。习惯一经养成，就天天都结伴出来，这便给大地上的人们带来了沉重的灾难。十个太阳发出的光和热，把禾苗晒得枯干了，把土地烤焦了，铜铁沙石也快要晒熔化了，血液差一点要沸腾，怪禽猛兽纷纷从火焰似的森林、沸汤般的江湖里跑出来残害人们，人们处在垂死挣扎的边缘，就连帝尧也无法活下去了。

在天廷的帝俊见到这般光景，觉得再也不能让孩子们胡闹下去了，于是就决定派擅长射箭的名叫后羿的天神到人间去严厉地教训他们一番。据说后羿的箭法相当高明，即使一只小雀从他面前飞过，准会把它射下来。在后羿离开天廷的那天，帝俊赐给了他一张红色的弓和一口袋白色的箭，这箭不但华美而且坚固锋利。帝俊对后羿还叮嘱一番。后羿领了帝俊的使命后，就带着妻子天神嫦娥降到了人间。

后羿在茅草屋里见到了愁苦的帝尧，又亲眼目睹了人们受难的情景，勾起了他怜悯人们、痛恨太阳的怒火，这时已顾不上帝俊的嘱咐了，便弯弓对准太阳射出一箭，嗖的一声上去，隔了片刻，只见天空中一团火球无声地爆裂，流火乱飞，黑色的羽毛纷纷四散，坠落到地面上一团黑色的东西。人们跑去一看，原来是一只带着箭的硕大无比的三脚乌鸦，它就是太阳精魂的化身。天上果然少了一个太阳。后羿见大祸既已闯下来了，索性一不做二不休，把箭一支接一支地射向太阳，三脚乌鸦一只接一只地落下来。站在一旁看射箭的帝尧，想到一个太阳出来的时候，太阳对人们有很大的好处，不能全射下来，便急忙命人暗中从后羿装满十支箭的箭袋里抽出一支，所以最后天空中只剩下了一个太阳。

后羿虽为人们除了害，但由于射下了九个太阳而闯下大祸，就再没回到天廷，嫦娥也因此受到了连累。后羿为了永远生活在人间，就引出了后羿向西王母讨药，以及嫦娥奔月的故事。

我国是最早观测和研究太阳的国家之一，早就注意对太阳黑子和日食现象进行观测，并留下了大量的资料。据《汉书·五行志》记载，在西汉成帝河平元年（公元前 28 年）“三月乙未，日出黄，有黑气大如钱，居日中央”，这是世界有名的公元前 28 年 5 月 10 日的太阳黑子记录（据考证，“乙未”应为“己未”）。后来在我国的史籍上，不断出现类似的记载，对科学家们研究黑子周期有很大的参考价值。

但首先用仪器观测太阳的要算是伽利略了。在 1609 年，伽利略第一次用望远镜观测太阳黑子。1826~1843 年，法国有位药剂师，名叫施瓦布，是个天文爱好者。他对太阳黑子连续观测 17 年后，发现黑子有 10 或 11 年的周期变化。1848 年，瑞士的 R·沃尔夫提出黑子相对数的概念，并利用历史上望远镜观测积累下来的黑子资料，推算出上溯到 1700 年的黑子相对数的年平均值，进一步证明太阳黑子活动确实存在着明显的周期性变化，周期平均长为 11.1 年，这就是大家所知道的太阳黑子 11 年周期。

到了 19 世纪最后 10 年，美国的海耳和法国的德朗达尔分别发明太阳单色光相机和太阳谱线速度仪，从而开创了现代的太阳研究的新时期。他们通过单色光观察太阳光球和色球，发现了钙云（谱斑）。20 世纪初，在威尔逊山天文台安装了太阳塔和分光设备，广泛地巡视太阳，发现了黑子的磁性和 22 年的磁周期。1931 年，李奥制成了日冕仪，为人们平时观测日冕提供了条件。到 20 世纪 50 年代初，太阳光磁象仪研制成功，进一步推动了对太阳活动规律和活动区物理的探讨。

此外，在 20 世纪 30 年代，詹斯基等人发现了来自地球以外的无线电波。射电天文学的诞生，使人们可以用无线电方法接收并研究太阳的射电波，并取得越来越多的成果。

随着空间科学技术的发展，空间天文学也发展起来。在卫星上天以前，已开始利用飞机、气球、火箭进行探测。近年来，又发展到利用地球轨道太阳观测卫星、某些深空探测器和天空实验室上的阿波罗望远镜装置，从空间观测太阳，此外，许多地球物理探测卫星，也进行太阳观测。

美国在 1960 年 6 月～1976 年 3 月，发射了太阳辐射监测卫星（英文缩写为 SOLRAD）系列。这个系列共发射 13 颗，其中有三次发射失败，后发射的几颗成果较大。它们的任务是对太阳 X 射线进行连续监测。从 1961 年 1 月以来，利用这些卫星监测太阳 X 射线辐射，测定了这个黑子周期内的极小和极大的辐射流量，以及辐射流量随太阳活动的变化情况。

此外，美国从 1962 年 3 月～1975 年 6 月，还发射了轨道太阳观测台（英文缩写为 OSO）系列。它也是观测太阳的卫星系列。这个系列共发射八颗，主要任务是通过观测太阳的紫外线、X 射线和 γ 射线，系统而连续地研究太阳的结构、动力学过程、化学成分以及太阳活动的长期变化和快速变化。

除了美国以外，苏联、欧洲空间局、日本等国也先后发射了太阳观测卫星，进行对太阳的观测和研究。

1973 年，美国的“天空实验室”发射成功，使空间太阳观测发展到了空前的程度。天空实验室是美国实验性的大型载入轨道空间站。它上面的阿波罗望远镜是一组观测太阳的天文仪器，在远紫外线或 X 射线等不同波段，对太阳色球和日冕进行了电视或照相观测，拍摄了太阳活动景象的大量照片。而且，通过天空实验室的高分辨率成像观测表明，日冕不是宁静的均匀结构特征。科学家们还注意到，当太阳赤道有大冕洞时，地球附近就会观测到高速太阳风。为此，人们认为冕洞可能是高速太阳风的源泉。

可见，人类在漫长的岁月里，通过不同手段对太阳的观测，使人们知道了太阳上有着壮丽的景色，变幻的风云，甚至猛烈的爆发，太阳上是那样生气勃勃，丰富多采。这里，我们对太阳的知识只做简单的介绍。

太阳是太阳系的中心天体，它以巨大的引力控制着太阳系中的天体。地球自形成以来，已绕太阳运行过 46 亿年了。太阳是离我们最近的一颗恒星，它的直径为 139 万公里，比地球大 109 倍，体积相当于地球的 130 倍，质量是地球的 33 万倍。

太阳是一个炽热而发光的气体球，严格地说，它是一个高温的等离子体天体。太阳是由一系列类似同心圆的气层组成的。

我们肉眼看到的光芒夺目的太阳表面，通常称为“光球”。厚度约有 500 公里，表面温度达 6000 K。我们接受到的太阳能量基本上是从光球发出的。在光球上没有受到干扰的地方，布满了米粒组织，估计米粒组织的总数达 400

万颗。在光球活动区有太阳黑子、光斑，偶尔还有白光耀斑。

“米粒组织”是光球下面气体对流所引起的一种日面结构。它在高分辨率的光球照片上，呈现出米粒状的明亮斑点，它们的直径往往达 700 ~ 1400 公里。

在光球上出现的大小不等、形状不一的黑点，就是我们熟悉的太阳“黑子”。在太阳表面，黑子像一个不规则的洞，充分发展的黑子是由中心较暗的本影和周围较亮的半影构成的，它比光球低约 500 公里。温度比光球低，只有 4500 。黑子往往成对成群出现，黑子群几乎全都呈椭圆形。有的年份黑子出现得多，有的年份出现得少，通过长期观测和对观测资料的分析，发现黑子数的变化平均有 11 年左右的周期，人们把 11 年周期称为“太阳活动周”或“黑子周”。在一个太阳活动周里，黑子数升到最高的年份叫做“太阳活动峰年”（极大年）；黑子数降到最低的年份，称为“太阳宁静年”（极小年）。至于太阳黑子的成因，现在还不能确知，但是黑子与强大的磁场有关系，磁力现象一定与黑子的来源有密切关系，这是没有疑义的。

在太阳东西边缘部分的黑子周围，往往可以看到亮的条纹或小块，这就是“光斑”。光斑一般环绕着黑子，与黑子有着密切的关系。同黑子有关的光斑由明亮的纤维组成；同黑子无关的光斑出现在 70 度的高纬地区，面积小，略呈圆形。

光球上面的气层是“色球”。在日全食时，当月亮挡住了太阳的光球，就可以看到太阳边缘出现一圈明亮而狭窄的玫瑰色圆环，这就是色球。色球层的厚度各处不同，平均厚度约有 2500 公里。

用色球望远镜观测太阳圆面时，可以看到太阳单色象上有一些较明亮的区域，叫做“谱斑”。谱斑是在色球层中出现的类似光斑的亮区。

最好看的要算是从色球层喷出的“日珥”了。如果把太阳比做一团熊熊燃烧的火球，那么日珥就是从火球上冒出来的火焰。日珥的形状多种多样，有的像火焰，有的像半圆环，也有的像喷泉，有时一个巨大的“气柱”升腾而起，达到几万公里甚至一百多万公里的高度，然后再落回日面，有的便脱离太阳而去。日珥比日面的亮度小得多，所以它在日面上的投影是暗黑色的。在太阳单色光照片上，像是一条蜿蜒曲折的长蛇，称为“暗条”。

有时，一个亮斑点在黑子群的上空突然出现，在几分钟甚至几秒钟内，它的面积和亮度增到极大，以后又慢慢减弱以至消失，这种变化快而且比谱斑更明亮的亮斑，叫做“耀斑”，它可能是色球和日冕过渡层中的一种大气不稳定过程。耀斑的出现和黑子有密切关系，因为 95% 以上的耀斑都产生在黑子群范围内。一个耀斑发出的总能量相当于 100 亿个百万吨级的氢弹爆炸的威力。当耀斑出现时，除了发出很强的无线电波外，还发射大量的紫外辐射、X 射线、 γ 射线，抛出高能带电粒子。当它们到达地球时，有时会使短波无线电通讯受到干扰，产生磁暴和极光，有时也会间接地影响地球物理现象。

色球层向上是“日冕”，日冕是太阳最外层的大气，从色球层顶部一直向上延伸到几个太阳半径。日冕的光度比较暗弱，所以平时看不到，日全食时可以看到在圆轮周围有个银白色的圈，就是“日冕”。

日冕是由很稀薄的、完全电离的等离子体所组成，其中主要是质子、高速电离的离子和高速的自由电子。温度很高，高达 100 多万度。

日冕的精细结构，有冕流和极羽、冕洞、日冕凝聚区等。日冕的形状和

太阳活动有关，在太阳活动极大年，日冕接近圆形，而在太阳宁静年则比较扁。

太阳发出的能量，99%是由内部产生的。关于太阳产能的秘密，直到20世纪30年代以后，才逐渐被人们所认识。在半径约为太阳1/4的日核部分，集中了1/2的太阳质量，温度高达1500万度，压力为 25×10^{10} 大气压。在那里进行着大规模的四个氢原子核(质子)聚变成一个氦原子核的热核反应。当四个氢原子核聚合成一个氦原子核的时候，我们会发现有质量的亏损，即一个氦原子核的质量比四个氢原子核的质量要少一些。这些亏损的物质则变成了光和热。产生的能量，主要以辐射形式稳定地向空间发射。

太阳是一颗平凡的恒星，它居于无数颗恒星之中，正由于这颗恒星离我们最近，人们就可以通过对太阳的仔细研究，为对遥远的恒星世界的研究提供了条件。

大行星和它们的卫星

早在几千年前人们已经把太阳、月亮和水、金、火、木、土五颗行星从大量恒星中区分出来了，因为它们都穿越恒星组成的星空背景运行。太阳和月亮又以其特殊外貌与另外五颗行星相区别。今天我们已经知道，它们全都属于远离星空背景诸星的太阳系。太阳系里还包括地球本身和后来陆续发现的三颗大行星、众多卫星、无数小行星，还有彗星、陨星以及大量尘埃物质和稀薄的气态物质等等。

现在一般把水星、金星、地球和火星归为一类，称为类地行星。它们的共同特点是其主要由石质和铁质构成，半径和质量较小但密度较高。把木星、土星、天王星和海王星归为一类，称为类木行星。它们的共同特点是其主要由氢、氦、冰、甲烷、氨等构成，石质和铁质只占极小的比例。它们的质量和半径都远大于地球，但密度却较低。冥王星是特殊的一个，虽然成分和天王星、海王星相似，但它比月亮还要小。另外还有一种分法把木星和土星归为一类，称为巨行星或类木行星；而把另外三颗归为一类，称为远日行星。其理由是木星和土星的成分与其余三颗不相同，特别是大气的成分有明显差别。前者保有较丰富的氢和氦，而后者则包含较多的冰、甲烷和氨。

大行星的公转轨道大多数是近乎正圆的椭圆形，只有水星和冥王星的偏心率比较大。

大多数卫星的公转轨道和大行星的轨道类似，也是近乎正圆形的椭圆形，行星围绕太阳和大部分卫星围绕行星都和地球的绕行方向一致。行星运行轨道所构成的平面都很接近，差别最大的冥王星轨道面和地球轨道面之间的夹角也只是 17° 多。大多数卫星的轨道面和行星轨道面之间的夹角也不大，最多 30° 左右，只有天王星的几颗卫星例外，它们的轨道面几乎和天王星的轨道面垂直。以上是行星与卫星运行的主要情况，总的来说，它们的轨道运行有近圆性、同向性和共面性。

有四颗行星的自转轴与它们的公转轴有20多度的夹角。水星、金星和木星的两轴夹角仅有几度。金星的夹角虽小，自转的方向却与公转方向相反。天王星和冥王星差不多是躺在轨道面上自转的，它们的自转轴接近与公转轴垂直。在卫星中只有少数几颗的自转周期已知，全部和它们围绕行星运行的公转周期相同，被称为同步自转。

轨道在地球以外的行星可以运行到与太阳完全相对的方向，地球正处于太阳与行星之间时称为冲，此时地球与该行星距离最近。太阳正处于地球与行星之间时称为合，此时地球与行星距离最远。行星的方向与太阳方向成 90° 时称为方照，按两者的关系分别为东方照和西方照。外行星在星空背景的视运动路径也有顺行、留和逆行的变化。

在人类进入空间时代以前已经知道地球有 1 颗卫星，火星有 2 颗，木星有 12 颗，土星有 10 颗，天王星有 5 颗，海王星有 2 颗卫星。近 30 年来随着空间技术的发展，特别是两个旅行者号空间探测器于 1979 年 3 月和 7 月飞临木星，又于 1980 年 11 月和 1981 年 8 月飞临土星，旅行者 2 号于 1980 年 1 月底飞越天王星，又于 1989 年 8 月飞越海王星，发现了许多过去不知道的卫星。

大行星的卫星大小差别很大，运动特性也很不一致。一般根据它们的轨道运动是否具有共面性、同向性和近圆性把它们分为规则卫星和不规则卫星。有许多卫星是逆行的，只要整组卫星都同向逆行，仍然算有同向性。

类地行星

类地行星距离太阳比较近，物理特性和化学成分都很接近，都是石铁为主的固态球体，球体表面上即使有液态海洋和气态大气层，在总质量和总体积上所占的比例也十分微小。四颗类地行星中以地球为最大，金星次之，火星又次之，水星最小。月亮只比水星稍小一点，且其它特点都很相似，所以有人把它也算作类地行星之一，和地球组成姐妹行星对。类地行星内部都有核、幔和壳之分，壳所占的厚度很小，主要是核和幔。

水星是最靠近太阳的行星，半径 2400 千米，自转周期 58.65 天。它的质量仅为地球的 5.5%，即约为 3.33×10^{23} 千克，密度和地球差不多，为 5.4 克/厘米³。由于它距太阳很近，在天空中和太阳之间的夹角永远不会超过 28° ，因此它经常受阳光影响难于见到。哥白尼临死前唯一深感遗憾的事，就是未亲眼看到过水星。1974 年和 1975 年水手 10 号空间探测器三次飞越水星，最靠近时曾达到距表面仅几百千米。现已查明水星表面非常像月亮，有大量陨星坑，也有类似月海的大平原，形成的年代可能也在 30 亿至 40 亿年以前。

水星表面和月面同样覆盖着一层尘埃，很难传热，加上没有大气环流，所以水星昼夜温差很大，正午时赤道温度可达 700 开，夜间则为 100 开。水星表面几乎没有大气。通过紫外摄谱仪发现水星表面有极微量的氦，可以算做逃逸之后剩余的一点大气成分。水星表面没有水。水星有磁场而且磁场结构和地球的磁层相似，迎太阳的一面有磁层顶，背向太阳的一面拖着长尾巴。不过水星的磁场很弱，约有 5×10^{-7} 特，仅为地球磁场的 1%。

1965 年发现水星的自转周期与公转周期准确之比等于 $2/3$ 。这种数学上的巧合当然决非偶然，是太阳潮汐力对它作用的结果。如果水星轨道接近于正圆，潮汐力作用的结果会形成同步自转。然而水星轨道的离心率达到 0.2，近日点和远日点与太阳距离之比为 0.8 : 1.2，所受潮汐力之比与距离之比的三次方成反比，达到 3.375 倍。近日点的潮汐力比远日点强很多，水星自转周期主要受近日点控制。根据开普勒定律，近日点附近水星的运动速度比平均值要高，因此水星的自转周期最终会比同步的公转周期短一些。然而除非

两个周期成简单整数比关系，否则潮汐力对自转的制动作用不能达到一个稳定状态。对水星来说，比值关系只能是 2/3。

金星是天空中除日月之外最亮的天体，也是距地球最近的行星。它与太阳的夹角永远不会超过 48°，不是为朝日东升开道就是随夕阳西落。我国古代曾把它误认为两颗星，曾分别称为启明与长庚。用望远镜很容易看到金星有类似月亮的相位变化，同时还有大小的变化。金星与太阳相距 1.08 亿千米，公转周期为 224.7 天。它的半径约为地球的 95%，即约为 6050 千米，质量约为地球的 82%，即约为 4.87×10^{24} 千克，密度为 5.3 克/厘米³。这些数据都和地球相近，似乎金星应该是地球最亲密的姐妹。从内部结构来看，金星确实和地球相当类似，但是它的大气组成和气象条件却和地球迥然不同。在空间拍摄的金星照片上，云雾弥漫无法看到大气层以下。

金星内部至今仍然有慢的对流引起造山运动和产生着新的岩石，新生的岩石年龄不过几百万年。金星岩石的薄弱处很可能还有火山活动。由雷达和金星探测器探知金星表面有大到几百千米的环形山和深达 7 千米的裂谷和平缓的坡地。由于金星有浓密的大气，环形山不可能由陨星冲击而成，只能是火山喷发的结果。从金星的大气组成来看，火山活动在发展金星大气里起了主要作用。金星大气的总量超过地球大气 90 倍，成分主要是火山喷出的二氧化碳，其次是氮和一氧化碳，水蒸气的比例很小，只约占 0.2%。另外还有 0.03% 的二氧化硫及极微量的盐酸、氟氢酸。金星大气中氧的含量极低，不到 0.003%。而在地球的大气中，除占 78% 的氮之外，其余几乎全是氧，二氧化碳则仅占 0.03%。金星上空永远浓云密布，不像地球上空云量平均只有 56%，而且比金星的云薄得多。金星的云层几乎完全是硫酸小滴，落到金星表面的雨也是硫酸雨，致使金星表面湿度只有 0.1% 到 0.2%。金星的黄色云层分布在 35 至 65 千米的高度范围里。金星云层的顶端能把入射的太阳光反射回宇宙空间 75%，尽管如此，由于金星距太阳比地球近许多，入射阳光的强度将近高出一倍，所以金星表面得到的太阳辐射并不比地球表面少。金星云层之下还相当亮，在穿透云层的阳光照耀下，物体还会投下模糊的影子。金星大气里有明显的天气变化，大气也有对流和环流，在云层里，上升气流经常有大规模的雷电。金星上空 10 千米左右高度上雷电非常频繁，闪电甚至使金星天空呈现连续不断的辉光。金星探测器就曾记录到一次历时 15 分钟的持续闪电。

金星表面的温度很高，达 730 开（约为 450℃），能使铅熔化，并且基本上不受纬度、日照和昼夜的影响。金星的自转非常慢，周期为 243 天。由于自转方向与公转方向相反，金星上面一昼夜的长度为地球上的 117 天。浓密大气的环流把热量均匀输送到表面各处，使整个金星表面的温度变化和温差都很小。金星表面的气压达到地球表面大气压的 90 倍。大气环流的水平风速并不高，记录到的风速仅有每秒 2 米左右，对岩石的风蚀作用很小，遍布金星表面的岩石边缘都很锐利。可是在大气高层，纬向风的速度却达每秒 100 米，与自转方向相同，四天就可以绕金星上空一周。

既然金星和地球内部成分和结构都很近似，起源和历史也应该很相似，为什么它们的大气条件、表面温度等却差别那么大呢？现在多数研究者认为这种差异的原因是金星上发生了失控的温室效应。

二氧化碳能让可见光和紫外线顺利通过，却对红外辐射相当不透明，有些像温室的窗玻璃。金星表面在二氧化碳的覆盖下，所吸收的太阳可见光和

紫外线能量使它升温，却不能以红外线的形式重新辐射到宇宙空间，能量在表面聚积起来，温度就会逐步升高，这就是温室效应。最后达到的平衡温度比地球上相对透明大气所确定的温度高出很多。金星表面的温室效应和二氧化碳及水的其它物理化学特性相结合，就使金星损失掉大量的水并保留下全部游离的二氧化碳，而地球则相反。

金星比地球接受的太阳辐射多，温度一直比地球高。据计算，在金星和地球的外壳冷却形成时，金星约为 55 而地球则约为 0 。当时还没有大气层，随后由火山喷发出来的二氧化碳和水蒸气等才开始形成大气。地球表面的水蒸气大都冷凝成液态水，而在金星表面大量水以蒸气的形式存在无法溶解二氧化碳。从此金星上就有了愈来愈强的温室作用，终于使大气发展的方向与地球背道而驰。到后期地球上有了生命，二氧化碳被绿色植物吸收进行光合作用，被海生动物吸引作为介壳石灰质的原材料。光合作用的副产品氧不仅供养了动物，而且在高层大气中吸收了大量紫外线，使水蒸气免遭破坏。最后，地球上原来只占很少量的氮变成大气的主要成分，氧也占了举足轻重的地位，二氧化碳却成为很次要的成分。大气中失去了原先最主要的二氧化碳，只余下 1% 左右，而保存下来的水却构成大片海洋。由此可见大气中二氧化碳的温室作用不容忽视。

金星基本上没有磁场，自然也就没有磁层和辐射带。估计这可能是因为它自转太慢的缘故。由于没有磁层和辐射带的保护，太阳风和其它高能宇宙线粒子可以直接进入金星大气层，在大气层内部离金星表面很近处造成一个不太厚的电离层。

火星从来就是天文学家很感兴趣的行星，因为早年在望远镜里看到它表面有明显的地形标志，并据此测定了它的自转周期。它的两极都有白色的极冠，大片浅橙色和暗灰色覆盖的面积随季节变化。有人甚至说看到过很规矩的运河网也随季节变化。乐观的天文学家过去曾经猜测火星上可能有好客的植物供养着高等生物。

火星的半径是 3400 千米，质量为地球的 10.7% ，即约为 6.4×10^{23} 千克，密度为 3.9 克/厘米³，自转周期为 24 小时 37 分。它和太阳的平均距离约为 2.3 亿千米，公转周期 687 天。由于它的自转轴和公转轴之间有 $23^{\circ} 59'$ 的交角，所以它有非常类似地球的四季变化。虽然火星的昼夜长短与地球大致相当，但季节变化却要慢一倍。火星内部的结构有核、幔和壳，只是含铁较少而且几乎全部是硫化铁。火星比地球小很多，内部压力低很多，所以平均密度比地球低相当多。因此从总体来说火星并不像过去有些人设想的那样和地球相似。

火星表面一片荒凉，地貌有点像地球上的沙漠。从在火星上拍摄的照片，可以看到由风力造成的典型沙丘，还可以看到大裂谷和滑坡。虽然现在没有发现火星板块活动的迹象，但过去火星壳也发生过很大的变动。火星上发现了十几个火山，其中最大的是奥林匹斯火山。火星上的火山曾经猛烈地活动过，强度可能超过地球上的火山。奥林匹斯火山的锥顶高度达到 26 千米，比地球上最高的山峰还要高出几倍。但火星的火山可能停止活动很久了。

火星的大气非常稀薄，表面气压只有地面气压的 0.6%，在一些火山的顶峰上只剩下 0.1%。由于空气稀薄，对流交换的热量小，所以昼夜温差极大，可以由 240 开变到 190 开，平均温度为 210 开。赤道处的极端最高温度可以达到 300 开，约相当于平常的室温。火星大气里由温差引起的气流速度

很快，达到每秒 30 至 60 米，经常刮起表面的尘土形成强烈的尘暴。火星大气也是靠火山活动喷发而成的，主要成分是二氧化碳以及少量氮、氩、氧、水蒸气和一氧化碳等。水蒸气和氧的含量随地区和季节不同有很大变化。火星两极即使在夏季也保留一片极冠，北极冠是水结成的冰，南极主要是干冰（固体二氧化碳）。火星上的水蒸气经太阳紫外线的光化学作用产生臭氧、单原子氧、过氧化氢、羟基等强氧化剂，对岩石表面氧化腐蚀并破坏有机分子。火星大气里云很少，但确有冰晶形成的云，在极区还有干冰形成的云，甚至有干冰构成的雪。

对火星的探测有一个重要目的是寻找地球以外可能存在的生命形式。从长期的观测和研究来看，在整个太阳系里，除地球之外火星存在生命的可能性最大，但直到今天为止有关火星生命的问题还没有肯定的结论。

火星探测中发现了一个引起人们极大兴趣的问题，就是在火星的赤道地区不少处存在着明显的河流遗迹。这些河道目前虽然是干涸的，但过去肯定是由流动的液态物质冲刷而成。除少数粗短的可能是熔岩形成的以外，其余大部分是由流动性很好的液体冲出来的，因此很可能火星存在过湍急而汹涌的水流，但目前火星大气和表面完全不存在保留流水的条件。

火星有两颗很小的卫星。说来有趣，18 世纪 20 年代英国讽刺作家的讽刺幻想小说《格列弗游记》里，除描述格列弗到大人国和小人国的经历外，还记载了格列弗到过一个叫拉普他的地方，那里的人都有许多奇思怪想。据拉普他的天文学家说，他们发现火星有两颗卫星，它们和火星的距离分别是火星半径的 3 倍和 5 倍，而围绕火星的公转周期则分别是 10 小时和 21.5 小时。实际上火星的两颗小卫星直到 19 世纪 70 年代才真正被观测到，已经是在小说发表后 150 年。最有趣的是它们和火星的距离分别等于火星半径的 2.8 和 6.9 倍，公转周期是 7.65 小时和 30.3 小时。这些数字和拉普他天文学家的“发现”实在相近得令人惊奇。

火星的两颗小卫星围绕火星转得很快，在火星上看起来它们不像地球上看见月亮。快的一颗会从火星地平线的西方升起，约 5.5 小时就从东方地平线落下，然后再经 5.5 小时又从西方升起。火星上每夜可以看到它升落两次，它的“月相变化”非常快而明显，因为它的“一个月”还不到 8 小时。比较慢的一颗东升西落，每次升起来要在天空呆 66 小时才落下去，几乎接近火星的三个昼夜。

巨行星

巨行星处在九大行星中部，与类地行星之间隔着一片小行星的轨道。从多次空间探测器的临近探测和理论分析知道，巨行星是以氢、氦为主的庞然大物，由铁石质固态核、金属氢液态内幔和分子氢液态海洋构成。外面的大气层也以氢为主，除氦外还包含氨、甲烷、硫化氢以及多种有机分子和含磷化合物。

木星是太阳系里最大的行星，半径 7.1 万千米，质量为地球的 320 倍，密度为 1.3 克/厘米³。它与太阳的距离是 7.8 亿千米，公转周期近 12 年，自转周期约 10 小时，由于自转很快所以相当扁。木星各部分自转速度不同，赤道部分比较快，两极转速稍慢。木星的可见外表是大气的上层，有很多明暗交替的带状条纹，色彩和形状都不断发生变化，里面还可以看到无数斑点。

据认为带状条纹是木星快速自转形成的，而那些斑点则有很多是差速自转所引起的气旋和风暴。木星大气上层的纬向气流速度最高可达每秒 150 米，局部风暴中心还可以另加上每秒几十米的旋转风速。空间探测器发现，木星辐射的能量约等于它接受太阳能量的 2 倍；因此木星本身还有某种能源。这些能源除形成一般行星大气上空都有的纬向气流之外，可能在能量分布不均匀的地方还形成局部风暴中心。在木星南半球有一个突出的大红斑，它和一些较小的红斑和白斑都是局部的风暴或气旋。旅行者号空间探测器发回了许多大红斑细致结构的照片，很明显可以看出它是一个很强大的旋涡，逆时针方向转动，很可能类似地球上的台风。由于木星大气很稠密，下面又没有固态表面的摩擦阻尼，气旋能量损耗很小，这种局部气流和气旋可以存在很长时间。大红斑至少已经存在 300 年以上，至今仍有 2.1 万千米长、1.1 万千米宽，足可容下两个地球。木星大气主要由氢和氦组成，比例和太阳大气相似。另外含有氨、甲烷、水蒸气、乙烷、乙炔、磷化氢、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢铵等。据信正是这些化合物受太阳紫外线辐射和频繁雷电的作用，在复杂的大气化学过程中对木星多变的色彩起主要作用。

从空间探测器先驱者 10 号和 11 号分别在 1973 年末和 1974 年末飞过木星的运行轨道分析中得知，木星大气以下的表面是液态而不是固态。再根据木星的总质量和密度，以及它的大气组成来推算，它的主要成分应与太阳相似，内部可能是处于高温高压下的氢和氦，状态应该是液态，在最深的地方甚至是金属性的液态。

木星的磁场较强，为地球的 10 多倍，在其外部形成一个庞大的磁层机构，最远伸展到七八百万千米，俘获很多高能粒子，发出射电辐射。如果木星的磁层能够直接看到的话，从地面上看起来视角约和太阳相当。

已发现木星有 16 颗卫星，其中最亮的四颗，即木卫一至木卫四，有两颗与月亮大小相近，另两颗更大一些。它们称做伽利略卫星，一般认为是伽利略靠望远镜首先发现的。

两次旅行者探测器就近观测，发现这四颗卫星表面各不相同。木卫一至今还有火山活动，表面覆盖着易蒸发的钠盐。木卫三和木卫四都有很多环形山，只有木卫二既无火山又无环形山却有很多裂纹，纹里由内部流出的熔岩填充。木卫二、三、四表面除覆盖砂砾土壤和冰霜之外也有钠盐。在木卫一附近及它的轨道上存在钠云和氨云，来源是木卫一表面的蒸发。现已判定木卫三是太阳系里最大的卫星，半径达 2638 千米，比水星还大，但质量只有 1.49×10^{23} 千克，不到水星的一半，密度只有 1.93 克/厘米³。

旅行者探测器发现木星有一个光环。木星环是太阳系内发现的第三个行星环。木星环约有 6500 千米宽，30 千米厚，在云端以上约 6 万千米。与木星半径相比环较窄离表面也较远。木星环是由黑色块状物组成的，每块尺度由几十米到几百米。这些物体绕木星公转的周期约为 7 小时。后来发现在木星环的下面还有一个内环，亮度比较低，高度几乎接近木星大气层上部。

土星与太阳的距离比木星几乎远一倍，达 14.3 亿千米，公转周期 29.5 年，自转比 11 小时稍长。因自转快，它也相当扁。它的差速自转比木星还要明显。土星半径比木星略小，为 6 万千米，但质量只有地球的 95 倍，密度只有 0.68 克/厘米³，比水还要低。这表明它内部主要不是密度较大的金属氢，而是液态的普通分子氢。土星大气的主要成分仍是氢和氦，另外还有甲烷和氨，高层有结晶态的氨云，云顶温度 160 开。土星外表也有黄色的带状条纹，

但界线不像木星那么分明，色彩也不像木星那么鲜艳，排列得却比木星规则得多，也没有木星那么多斑点。这表明大气里的气流不像木星那么紊乱，主要原因可能是土星接受到的太阳能量比木星要少。从探测知道土星内部也有能源，辐射出来的能量是吸收能量的 2.5 倍，但总量比木星小得多。

土星也有磁场并在空间形成磁层，里面也俘获高能粒子构成辐射带。虽然土星的磁层很大，但因距太阳远，高能粒子数量少，辐射的强度却比地球磁层差多了。土星磁层的形状有点像一头鲸鱼，有 100 多万千米长的尾巴。

长期以来土星就以它美丽的环系特别引人注目。土星的光环在它的赤道上空，至少由五道同心环组成，比较明显的部分总宽度达 6 万千米，厚度不超过几千米。构成光环的物质是小冰块和包着冰的尘埃和小石块，大小在 4 厘米至 30 厘米之间，旅行者探测器发现光环不均匀，而是像唱片纹路那样形成螺旋线。为什么会这样还待研究。

土星是目前已知卫星最多的大行星。两次旅行者空间探测器飞过它近旁之后，把原先所知的卫星数翻了一倍还多，总数为 23 颗，已知详细数据的达 17 颗。有些新发现的卫星轨道很有趣，至少有三组是两三颗共用一条轨道。现已知土卫四和土卫十二在同一条轨道上，土卫十和土卫十一的轨道相同，而土卫三、土卫十六和土卫十七则共有一条轨道。已确知新发现的土卫十六和土卫十七分别在土卫三前后，由土星上看它们与土卫三的夹角都是 60° 。土卫六是土星最大的卫星，半径为 2560 千米，比水星稍大一些，有较浓密的大气层。它的大气成分主要是氮（约占 82%），氫（12%）和甲烷（6%），另外还有氨和多种烃类。这些都是旅行者号空间探测器根据它的红外和紫外光谱分析的结果。空间探测器还探测出它表面的气压约为地球表面大气压的 1.5 倍，然而它表面的重力只有地面的 15%，因此它的大气总量至少超过地球大气总量的 10 倍。土卫六和木卫三的密度相近，为 1.92 克/厘米^3 ，显然也不可能主要由铁石类物质构成。

远日行星

远日行星处于大行星家族的外侧，由于远离太阳受太阳引力较小，氢、氫等气体逃逸很多。据计算它们应该各有一个铁石质的核，外边是由水、氨和甲烷等物质冻结成的冰幔，再外边是液态分子氢海洋，它们的大气虽主要是氢，但还有甲烷等成分。

天王星的半径是 26150 千米，质量为地球的 14.54 倍，密度为 1.19 克/厘米^3 。它与太阳的距离比土星又远一倍多，达 29 亿千米，公转周期是 84 年。它的自转周期很难测准，因为它的自转轴几乎与轨道面平行，是躺在轨道上转的。直到 1986 年 1 月 24 日旅行者 2 号飞临它的时候才准确测出它上层大气的自转周期是 17.24 ± 0.01 小时。

根据旅行者 2 号发回的资料，天王星大气中除 10% 至 15% 是氫之外，主要是氢，另外还有甲烷。据推测它还应该有水和氨。天王星接受的太阳辐射很少，又没有内部能源，所以大气层里很平静。现已探明天王星和海王星的化学成分中甲烷、氨和水等容易冷凝的所谓冰物质占总量的 60% 至 70%，它们都具有液态分子氢的海洋，都有浓密而深厚以氢为主的大气，体积、质量都很大，密度在 1 左右。

旅行者 2 号飞临天王星之前已经知道它有 5 颗卫星在其赤道上空。由于

天王星躺在轨道面上自转，所以它的卫星都垂直于它的轨道面绕其公转。旅行者 2 号一举发现了它的另 10 颗卫星，使它的卫星总数接近木星。天王星的环系也在它的赤道上空。

天王星有较强磁场并在外部空间构成磁层。这意味着它内部可能有铁质核，但旅行者 2 号发现它的磁场不同于其它行星的简单双极型，而是歪斜扭曲的。

为什么天王星会带着它的卫星和环系躺在绕日轨道上公转？有人认为它形成的初期受其它天体碰撞，不仅转动方向发生了变化，而且撞下来的很多碎块也都在赤道面上空散布开，然后才逐渐形成了它的卫星和环系。

海王星的半径是 24700 千米，质量为地球的 17.2 倍，密度为 1.6 克/厘米³。它与太阳的距离约为 45 亿千米，公转周期 164.8 年，自转周期 17.8 小时。海王星也有浓密大气，主要由氢、氦构成，另外还有甲烷和氨。海王星表面的温度为 56 开，甲烷和氨大都结成冰晶。从海王星接受到的太阳能量来计算，它的温度只应有 46 开，这与实际相差 10 开。据分析这并不是因为它有特殊的内部能源，而是自诞生以来约 45 亿年自然冷却的结果，它的温度尚未达到平衡，还在继续冷却过程中。

海王星有两颗卫星，其中较大的海卫一以 5 天为周期反向绕海王星转，轨道面和海王星赤道面成 20° 角，是一颗最大的不规则卫星。它肯定比月亮大，半径在 1800 千米到 2600 千米之间。红外观测发现它也有大气层，已探测到有甲烷成分。旅行者 2 号还发现海王星有 6 颗卫星，但尚未获得详细的数据。

海王星是否有环的问题曾数经周折。最后才肯定它有 5 道环。既然海王星也有环，那么木、土、天、海四星的形成和演化肯定有内在的共同点。研究环系的成因对了解太阳系的形成和演化定会有重要价值。

冥王星与太阳的平均距离为 95 亿千米，是已知最远的行星。它的公转周期约为 248 年，自转周期到 1973 年才测出来，约为 6.4 天，自转轴与公转轴的交角大于 60°，有点像天王星那样侧躺在轨道上自转。它的质量直到 1978 年发现了它的那颗卫星之后才测定出来，只有地球质量的 1/400，远小于月亮。它的半径至今没有准确测出，过去根据距离和亮度在 1977 年推算为 1350 千米，但在 1980 年用光斑干涉法测量得到半径为 1500 至 1700 千米。按此计算它的密度为 0.8 至 1.5 克/厘米³。不论采用哪个半径值它都比月亮小。冥王星光谱中有甲烷吸收线，表明它的化学成分和天王星、海王星相似，不过它的温度更低，除氢、氦还可以是气态之外，其余全部冷凝为液态或固态。它的质量过小，即使因温度低还可以保留一些大气，也一定会相当稀薄。

冥王星轨道的偏心率在大行星中是最高的，它走到近日点附近时离太阳比海王星还近。实际上冥王星自 1979 年 1 月 21 日就进入海王星轨道的距离以内，要到 1999 年 3 月才超出去。冥王星轨道面倾斜比较大，和海王星不在一个平面内，因此它们不会相撞。

波得法则、小行星和彗星

18 世纪德国的波得较详细地研究了太阳系里大行星的排列，提出了一个波得法则。实际上他利用了与他同时代的提丢斯的发现，所以这个法则也称为提丢斯—波得法则。这个法则认为行星轨道大小若用天文单位来计算，就

可以由下列经验公式表达：

$$a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2} \text{ (天文单位)}$$

其中 n 为行星的序号，不过水星应取 $n=1$ 。按这个式子在 $n=5$ 的距离上缺一颗行星，木星和土星的 n 应分别是 6 和 7，在 $n=8$ 的距离上发现了天王星，在约相当于 $n=9$ 的距离上发现了海王星。本世纪 30 年代发现的冥王星按说应该是 $n=10$ ，但实际上仍接近于 $n=9$ ，很可能和它形成的情况有关。冥王星之外是否还有真正相当于 $n=10$ 的大行星，虽然一直引起人们的兴趣，但至今尚未能定论。

提丢斯和波得都认为木星和火星的轨道差别太大，中间似乎还应该有一颗行星。直到 1801 年元旦之夜才发现了名为谷神星的行星，并由著名数学家高斯计算出它的轨道半长径为 2.77 天文单位，正好符合波得法则的预言。不过随后又陆续发现了另外三颗半长径与谷神星接近的行星，到 19 世纪末已经发现了 500 多颗。由于所有这些新发现的行星都很小，其中最大的谷神星半径只有 380 千米，所以它们统统被称为小行星，现在经编号的已有两千多，如果把照片上的暗弱小行星都算上，总数要多达 50 万颗。

小行星的成分可以从它们表面的反射能力来判断。绝大多数小行星除硅酸盐岩石成分外还含有较多的碳和硫化物，被称为 C 类小行星。另有一些主要为岩石构成，称为 S 类小行星。还有少数由铁、镍之类的金属为主构成，称为 M 类小行星。

波得法则不仅对行星有效，在木星、土星、天王星等卫星较多的卫星系统中也可以找到类似的经验公式。一般规则卫星都满足经验公式，不满足的是不规则卫星。由此看来，波得法则应该有它内在的必然性，很可能和太阳系的诞生和演化过程有关，但至今未得到合理的理论解释。

彗星是太阳系里较特殊的天体，它们的轨道多数是抛物线，少数是极为窄长的椭圆或双曲线。具有椭圆轨道的彗星周期性地在太阳附近出现。彗星的轨道可以与黄道面成任意夹角。

彗星要到离太阳相当近才会被发现，出现肉眼能看到的大而亮的彗星的机会极少。这些大而亮的彗星都有长长的尾巴，被称为扫帚星，不论中外过去都被当做不祥之物，认为它预兆着国家衰亡或其它天灾人祸。20 世纪初，对彗星的本质和运行规律有了很多了解之后，还有人担心哈雷彗星的尾巴扫过地球会形成灾难。实际上当它于 1910 年真的扫过地球时，什么特殊现象也没有发生，证明那都是杞人忧天。

我国古代很早就对彗星的本质有较正确的认识。《晋书·天文志》里说“彗本无光，傅日而为光，故夕见则东指，晨见则西指。在日南北，皆随日光而指，顿挫其芒，或长或短”。彗星离太阳较远时是由尘埃、石块、冰块以及凝成固态的氨、甲烷等化合物结合而成的固体，称为彗核，半径约为百米到几十千米。当它运行到太阳附近时，受到太阳光和热的照射，冷凝物质和固体里吸附的气体挥发出来在核外形成发光的气团，叫做彗发，连同彗核合称为彗头。这时它的大小约可达 10 万千米。当它更接近太阳时，彗发物质受太阳辐射和太阳风的推力，迫使其一部分背离太阳的方向流动，成为彗尾。在太阳附近彗尾的长度可以有一两百万千米，大彗星的彗尾甚至长达上亿千米。彗尾里的物质比实验室的真空还要稀薄很多，根本不可能对地球有什么影响。当然，如果一颗大彗星与地球当面对撞倒是会造成一些灾害。

彗尾其实并不一定尾随彗头，它只是永远背向太阳，彗星绕过太阳向远

方离去时彗尾实际指前方。彗尾的形状随时都有变化。彗尾一般可以分为两部分：由等离子体气态物质构成的离子彗尾和由尘埃物质构成的尘埃彗尾。前者的质点较小受太阳辐射压和太阳风的作用较大，往往形成细长彗尾直接背向太阳；而后的颗粒较大受太阳风的推力较小，往往散布较宽而且呈弯曲形。

一颗大而明亮的彗星出现时是很壮观的景象，有时甚至可以和日月争辉。不过彗星发光的能量全都来自太阳。彗核靠反射太阳光，是连续光谱，而彗发彗尾则是受太阳辐射和太阳风激发之后的跃迁辐射，光谱里有原子的发射谱线也有分子的发射谱线。彗星物质结合得不紧密，穿越大行星轨道区运行中受到太阳和大行星引力的作用，往往会发生分裂，甚至瓦解成碎片。大彗星发生分裂的机会更多。

彗星的质量至今没有准确测定过，只做过一些估计。以前曾对一颗大彗星进行详细观测，发现它经过木星的卫星附近对卫星几乎毫无影响。后来它与地球的距离曾近到 240 万千米，经测定它对地球绕日周期的影响尚不及 1 秒。按此推算它的质量不可能超过地球质量的 1/5000。现在估计大彗星质量在 10^{17} 至 10^{22} 克，小彗星的质量则只有 10^{10} 克。

太阳系里的其它物质

晴朗夜空经常突然出现一条光迹，这就是流星。极少数的情况下光迹一直延伸到地面，然后砰然坠地成为陨星。以上两者都是绕日运行的流星体进入地球大气层之后形成的。流星体进入大气层的速度为每秒十几千米至几十千米，在大气里受阻将动能转化为热能使星体熔化并燃烧起来。大多数流星体原来的体积只有豆粒大小，在大气层中存在不过几分之一秒，从离地 100 千米以上开始发光到 70 千米左右的高度上就全化为气体和尘埃。这短暂而光辉的一刹那为它赢得流星这个名称，其中特别明亮像个火球的被称为火流星。流星数量很多，晴朗夜晚在任何地方每小时都能看到四五颗。不过要在相当稀罕的情况下才会有特别大的流星体进入大气层，而且没有被完全烧毁直至到达地面成为陨星。陨星落地时都会在地面上留一个陨星坑，但因地球大气层的缓冲作用再加上风侵水蚀，地面上保留下来的陨星坑并不多。

密集的流星体被称为流星群，它们与地球相遇时会形成流星雨。我国《左传》上有世界上最早的流星雨记载：“鲁庄公七年四月辛卯（公元前 687 年 3 月 16 日）夜中星陨如雨”。特别大的流星体进入大气层之后，在受阻发热过程中往往会爆炸分裂成很多碎块，也会形成貌似流星雨的陨星雨。1976 年 3 月 8 日就有一颗特大陨星进入大气层，随后崩裂为无数碎块，形成有历史记载以来最大的一场流星雨，降落在我国的吉林省。

陨星的构成主要分铁质、石质和铁石质三类，都含有多种矿物和有机物。放射性同位素测定陨星的年龄为 40 多亿年，有的甚至达到 46 亿年，保存着太阳系起源的秘密。从 1969 年落在澳大利亚的一颗陨星中发现了氨基酸。氨基酸是地球上一切蛋白质的基础，而蛋白质又是地球上一切生命的物质基础之一。因此研究陨星的起源和构成具有非常重要的意义。从现在已经找到的陨星来看，铁质陨星以 1920 年在非洲西南部找到的一块重 60 吨的陨铁为最大。1976 年落在我国吉林省的特大石质陨星残块中，最大的一块有 1770 千克，是世界上现存最大的石质陨星。分析这块陨星时也发现了它所携带的氨

基酸。

在太阳系的广阔空间里，除了存在以上由物质凝聚在一起的天体之外，还存在着弥漫物质，称为行星际物质。它的成分包括等离子体和固态的尘埃。人造地球卫星和火箭探测的结果表明，地球周围物质的平均密度约为 10^{-23} 至 10^{-21} 克/厘米³，大都和流星体一样绕太阳公转，方向与行星相同。这种特征表明它们是太阳系的组成部分并和太阳系的起源相同。行星际物质的空间分布并不均匀，在行星轨道面附近比较浓密，离太阳近处比较多，所以整体上大约形成以太阳为中心的铁饼形。

在太阳系的广阔空间里还普遍存在磁场，称为行星际磁场。除在各行星附近有行星磁场的局部影响之外，行星际磁场的主要来源是太阳表面磁力线的伸延。太阳表面附近的磁力线有一部分会被太阳风带到遥远的行星际空间。太阳自转时，这些远伸的磁力线拖带着等离子体会稍微落后一些，形成螺旋形结构，行星在这种磁场中穿行时本身的磁场也要受到它的影响。

银河系

银河与银河系

在天高气爽的秋夕抬头仰望，会看到一条白茫茫的银带高悬在头顶的天空。这就是银河。古时候人们曾为这条奇异的银带编造了许多动人的神话故事。中国的牛郎织女被这条天河所隔，使诗人为之叹息：“河汉清且浅，相去复几许？盈盈一水间，脉脉不得语。”实际上天空当然没有大河，银河只是密集群星给人的表面印象。

直到伽利略把他的望远镜指向天空之后，银河才开始显露出一些真面目。原来它是由无数密集的星辰组成的，而在其它方向上星辰的数量比较少，所以看起来才像一条带子或银色的大河。银河里的星辰有许多都距离太阳系成千上万光年，这在本世纪初已经显得是无比遥远了。当时很多天文学家都认为人类所能了解的宇宙范围大概就限制在银河的密集群星之中。为了对银河群星所形成的宇宙范围有个整体概念，天文学家在 18 世纪中叶就对各个方向上的恒星计数，了解到银河所代表的宇宙范围是扁平的，像一块运动场上的铁饼，而太阳系也在这块饼里面。人们从饼内向外看，垂直于圆盘方向上穿过的距离短，遇到的星数少，而平行于圆盘方向穿过的距离长，看到的星多，所以才会看出一条星辰密集的银河。表面的银色带状群星密集区和由这些星所组成的扁平天体系统是两种不同的概念，现在分别用“银河”与“银河系”两个术语来表述，有时也把后者称为“银河星系”。

粗看起来一整圈银河亮度似乎相差不太多，所以起初天文学家认为太阳居于银河系的中心。这真是“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。实际上由于星际空间有气体和尘埃吸收了很多星光，使离太阳稍远的地方被遮挡，才使那时的天文学家上了当。直到 1918 年测定了很多球状星团的位置和距离之后，才知道银河系的中心并不是太阳，而是在远离太阳的人马座方向，距离太阳 2 万多光年。那时假定球状星团对银河系中心成球对称分布，没有理由全都偏在银河系的一侧，后来知道这个假定相当正确。

银河系之外还有什么？这是一个长期为天文学家感兴趣而又争论不休的问题，直到 1924 年以后才真正有些眉目。实际上 18 世纪中叶德国哲学家

康德就有过宇宙里存在着很多类似银河系这样的天体系统的看法，他认为在仙女座里肉眼都能模糊看到的那个“星云”并不是普通的星云，而是和银河系类似的天体系统，他甚至认为银河系和仙女座星云像孪生姐妹。约 100 年以后德国博物学家洪保德甚至还为这类天体系统取了一个“宇宙岛”的名称。但是康德的这些看法在很长时期并没有为大多数天文学家所接受。对于天空中陆续发现的所谓“旋涡星云”包括仙女座星云在内，多数天文学家仍然认为是银河系内的一类特殊天体。少数赞同康德和洪保德主张的人又苦于无法从观测上找出确凿无疑的证据。为解决两派争端，1920 年 4 月美国科学院甚至专门出面主持召开了一次会议，由两派代表人物沙普利和柯蒂斯进行辩论，前者认为旋涡星云都是近处天体，在银河系之内；而后者则认为它们远在银河系之外，是与银河系本身可以类比的天体系统。双方尽管争辩十分激烈，但谁的论据也不充分，谁也说服不了对方，最后仍以无结论告终，但总的来看仍以反对康德意见的沙普利一派继续占上风。一直到 1924 年美国青年天文学家哈勃在仙女座“星云”里发现了造父变星之后，情况才发生了根本性逆转。根据当时对造父变星的了解，哈勃断定仙女座星云在 80 万光年之外，远远超出银河系的范围。从那以后对那些远离银河系的恒星系统才开始使用“星系”这个术语，意思等同于洪保德的宇宙岛，有些人还愿意在星系之前加上“河外”这个形容词把它们和银河系以内由气体和尘埃组成的星云划分开来。后来发现当时认定的造父变星实际分属不同类型，按照更精细测定的周光关系推算出仙女座星系的实际距离是 225 万光年。现在已经在天空中发现了上亿个星系。这样一来不仅太阳系不再是银河系这个小宇宙的中心，而且银河系也降为一个不足为奇的普通星系。宇宙展现出更大范围、更高层次，人类的眼界也大为开阔了，对物质世界不可穷尽性的认识也大大提高了。

现在对于银河系的真实形状已经有了比较确切的了解。它的主要发光部分有点像个摊鸡蛋，中间有个球形，旁边摊成薄片。银河系的扁平圆盘叫做银盘，中央的球形隆起叫做核球。在主要发光部分之外，银河系还包括一个球形的区域，里面有球状星团、天琴 RR 型变星等天体，但分布得很稀疏，被称为银晕。近年来还发现在银晕外还有一个更大的球形区域，里面的可见天体更少，但有明显迹象表明其中仍然包含相当多物质，有人把这个区域称为大晕，有人把它叫做银冕。

银河系的恒星总数大约有 3000 亿颗。虽然在恒星之外银河系还包含着大量气体和尘埃，但能够直接探测到的物质中 90% 以上是恒星。在 1980 年以前，人们普遍认为通过各种方式探测到的银河系物质总质量大约是太阳质量的 2×10^{11} 倍。然而 80 年代以来，由银河系对它外围天体和附近小星系的引力作用判断，银河系的质量要比原先的设想高出一个数量级，达到 2.1×10^{12} 倍太阳质量，表明在主要发光物质之外有大量不可见的物质散布在广阔的区域里。银河系全部发光物质的总光度大约是太阳光度的 2.5×10^{10} 倍，这相当于每秒钟发出 10^{37} 焦的能量，从这些数字可以看出银河系里大多数恒星比太阳暗。

和银河系的总质量测定值相反，其发光部分的尺度最近的测定值反而比 80 年代以前估计的要小。过去公认银盘直径约为 10 万光年，太阳约离银河系中心 3 万光年。1986 年宣布的新测定值是：银盘直径约为 7 万光年，太阳到银河系中心只有 2.3 万光年。此外，银盘平均厚度约为 5000 光年，中心核

球直径约 1 万光年。在核球正中还有一个银核，直径只有约 30 光年。在主要发光部分以外，银晕的直径约为 10 万光年，而新发现的银冕则一直伸展到离中心 30 万光年的范围。

旋臂基本上在银盘的对称平面上，这个把银盘横向一分为二的对称面称为银道面，太阳系差不多在这个面上，仅仅向北偏离约 25 光年，所以在地球上看起来银河似乎正好把天空分为两半。在地球上以银道面为基准来研究银河系内各天体的分布比较方便。

星际物质和旋臂

在银盘里，恒星之间的辽阔空间还普遍存在着极其稀薄的星际物质。这些物质的密度一般都比地球上实验室能取得的最高真空的物质密度还要稀薄 100 万倍，然而银河系里所有的恒星、行星和其它天体恰恰是由这种稀薄物质聚集起来而构成的。这些物质中如果以原子的个数来算，氢要占到 90% 以上，氦占不到 10%，其余所有元素的原子总数合计还不到 1%，如果按质量来算，氢约占 3/4，氦约占 1/4，其余元素共占 2% 左右。氢存在的形态分三种：电离氢、原子态氢和分子态氢。气态物质除氢、氦之外，还有少量氮和氩、氖等惰性气体，以及多种气态化合物分子。混杂在这些气态物质中的还有固态颗粒的尘埃，颗粒的大小约在微米量级，总质量约占星际物质的 1%，成分是各种金属及它们的氧化物和硫化物，以及冷凝成冰晶的水、氨、甲烷等等。尘埃颗粒的表面往往还会吸附一些气态物质。这些星际物质在银盘里分布得并不均匀，从大的轮廓来说，在螺旋形的旋臂里面比较浓密，从局部来说往往聚集成团，形成一片一片的星云。人们往往把星云以外更为稀薄的星际物质称为星际介质，密度在 10^{-24} 克/厘米³ 以下，即每立方厘米之内少于 1 个氢原子。

银河系的星云主要分为亮星云和暗星云两类。亮星云只能在明亮恒星附近才会出现，它们都是受到恒星光线照射之后才发亮的。有一些亮星云的光谱和它们附近恒星的光谱基本一致，说明它们完全靠反射及散射恒星的光来发亮。

实际上星云里的氢氦混合气本身并不能反射光线，因此反射星云里必定含有不少尘埃物质，由尘埃反射和散射恒星投射到它们上面的光线才使星云发光。散射光的强弱和入射光的波长以及尘埃颗粒的大小有关，波长愈短受到的散射愈强，所以反射星云颜色往往比恒星原来发的光偏蓝一些。

除了反射星云之外，还有一些亮星云的光谱和附近的恒星不同，它们的光谱是在暗弱的连续光谱上有明显的发射线，称为发射星云，这种星云一般都是由电离氢构成的，它们所伴随的恒星全都是光度和温度极高的 O 型或 B 型恒星。这些恒星辐射最强的部分处在紫外线区，高能的紫外线光子和氢原子碰撞时，往往把原子核外的电子激发到很高的能级上，形成高激发态或者成为电离态，受激发的电子向下跃迁时就会发出明线光谱。向下的跃迁往往分几步进行，辐射的能量每次都比激发能量小，因此辐射的波长比激发波长要长一些，落在了可见光波段，这是一种荧光现象。

暗星云附近既无明亮星光可资反射，更没有受到高能光子的激励，因而无法发光。它们只有在明亮的星云背景前面靠遮蔽背景的亮光方能被人发现。很显然，仅仅由混合气构成的星云消光能力很弱，很难达到那么强的遮

挡作用，在暗星云中起遮挡作用的主要也还是尘埃。暗星云在银道上分布得很多，特别在牵牛星附近的一段，银河明显分为两叉，正中被大片暗星云遮挡。由于暗星云的存在，用光学手段几乎无法观测银河的中心区。

星云的体积都很大。不论那一类星云，小的也有几光年直径，大的到上百光年。星云里的物质密度差别很大，从每立方厘米里面仅仅几个氢原子到多达几千个氢原子，相当于 10^{-23} 克/厘米³ 到 10^{-20} 克/厘米³。尽管密度如此低，一块大星云的总质量却往往有几千倍太阳质量，由它可以凝聚出成百上千颗恒星。

由于银盘内星际物质特别是星云的严重消光作用，在银盘内距太阳稍远一点的地方就很难用光学方法加以研究，而且充满着银盘的星际物质和暗星云本身又因温度低而几乎不存在光学辐射，因此在本世纪 40 年代以前对银盘内物质组成和结构形式可以说是毫无所知。银河系是否真的像仙女座星系（M31）那样是一个旋涡星系，在那时也是猜测的成分多于观测的成分。只有到射电技术发展以后，特别是 60 年代以后，才真正对银盘里物质的空间分布和化学成分有了一些比较确切的了解。

氢原子的特征谱线除在紫外区、可见光和红外区都有之外，在射电波段的 21.1061 厘米上还有一条谱线，简称 21 厘米谱线。这条谱线的产生，不像别的谱线那样来自电子在不同轨道之间跃迁，而是由于电子自旋方向的变化。氢原子有一个电子，它和氢原子核都绕各自的轴旋转，称为自旋。电子和原子核的自旋方向相同和相反的两种情况，在能量上有细微的差别。这两种状态之间发生跃迁所涉及的能量很小，辐射的波长在射电波段，而且在很低温度时也可能发生这种跃迁。21 厘米射电波有一个最突出的优点就是波长远远大于尘埃颗粒的尺度，使它不受尘埃的吸收和散射，成为探测银河系内外氢原子密集区的有力工具。

对银盘面内各个方向进行 21 厘米射电波探测之后发现，几乎任何方向上都有 21 厘米射电辐射，而且在一个方向上往往发现几条很靠近并顺次减弱的谱线。一条 21 厘米射电波谱线变成很靠近的几条谱线，只有用多普勒效应来解释比较合理，几条谱线就代表氢原子的几个集中区域各以不同速度在运动。通过 21 厘米中性氢谱线的测定，再结合其它方面的测定知道银河系内星际空间的物质和恒星大气类似，最丰富的物质仍然是氢，对其它星系测定的结果也莫不如此。现在一般认为在人类探测所及的宇宙这一隅，所有区域物质丰度都差不太多，丰度最大的是氢和氦。

通过 21 厘米中性氢谱线的测定，还了解到星际空间普遍存在磁场。虽然这一点在别的观测里也同样发现过，但测定得非常不准确。银河系内普遍存在着平均磁感应强度约为 10^{-10} 至 10^{-9} 特的磁场，局部区域可能要高一些。银盘内磁场的方向大致平行于旋臂，在银晕里以及一些局部区域的磁场方向则很紊乱。

21 厘米射电波对探测一般的原子态中性氢密集区很有用，但它对氢特别密集的区域反而无能为力。这些区域里氢已结合成分子状态，氢分子由两个氢原子组成，其中一个的电子和原子核自旋相同，另一个自旋相反，不存在两种自旋状态之间的跃迁，也就不会发出 21 厘米谱线的辐射。不过在氢密集形成分子的区域或称分子云里，其它化合物分子的总数也相当可观，这些分子各有自己的特征谱线，其中不少也在射电波段，可以间接用来指示氢分子的密集区。最常选用的是一氧化碳在 2.6 毫米的谱线。2.6 毫米射电波观测

的结果更加证实了银盘物质的旋臂结构。

化合物分子内部有多种运动状态，相应于多种能级，在运动状态发生跃变时也会吸收或发射一定波长的光子。分子的运动状态除电子运动外，还有各原子在平衡位置上振动和分子的转动。振动能级之间的跃迁对应谱线的波长在红外区，需要的激发能量还比较大，只有在离炽热星体不太远的区域才会遇到，一般的星际空间条件下较少见。60年代以来利用空间技术在一些正在形成恒星的星云附近发现一些红外源，里面有分子谱线的红外辐射。分子跃迁能级差最小的是转动，虽然其中也有一部分落在红外波段，但这类跃迁的谱线绝大多数在射电波段，主要是毫米波与厘米波。即使在星际空间的低温条件下也较容易发生这类跃迁，因此射电观测的谱线分析技术是从事星际分子观测非常有力的手段。

分子云里的化合物分子和一般星际空间的分子是60年代用射电技术发现的，是当时一项重大发现，被称为60年代四大发现之一。到1986年为止已发现了近100种星际分子。

银盘和星族

在银盘里除上述的星际物质和星云之外，还有大量恒星和银河星团。本世纪40年代发现，银河系里的恒星可以根据它们的化学成分、相对于太阳的速度以及分布区域的不同划分为两个星族。银盘里的恒星都是属于星族的，其中包括主序星、蓝超巨星、造父变星、金牛T型变星和银河星团等。这些类型的恒星除分布区域的共同性之外，在化学成分上都包含比较多的重元素，含量可达1%至4%。此外，在太阳附近的这一族成员与太阳之间的相对运动速度比较低，大都是年龄比较轻的恒星。星族还可以细分为三个星族：极端星族，包括O型星、B型星、蓝超巨星、造父变星、金牛T型变星和银河星团等年龄最轻的星体；中介星族，包括A型星和有较强金属谱线的M型星等年龄稍老一些的星体；盘星族，包括G、K、M型主序星、行星状星云、新星及部分处于银河系核球部位的星体。整个星族的星体都分布在银盘里面，以大致为圆形的轨道绕银心旋转。极端星族的恒星分布相当不均匀，大都形成集团，一般年龄不到 10^8 年，有的甚至只有三五千万年或更短，重元素含量大约要占到4%。所有这些情况都说明极端星族是诞生得最晚，由受污染最严重的星际物质凝聚而成的。中介星族的年龄在 10^8 至 1.5×10^9 年，重元素含量约占2%，垂直于银道面的无规运动速度比极端星族高。这表明它们已诞生比较久，大都已经分离开，但仍可以看出一定的成团情况。盘星族在银盘内分布得比较均匀，没有成团倾向，年龄为 1.5×10^9 至 5×10^9 年，重元素含量仅有1%左右，表明它们是诞生较久的星体。它们垂直于银道面的运动速度更高一些，已经分散到银盘内各处。

从上述星族细分的情况可以清楚地看出，星际物质里的重元素是逐步加多的，恒星形成得愈晚，构成它的原材料污染得愈厉害。最年轻的极端星族的星都在旋臂里；旋臂同时又是星际物质的密集区，有很多星云。新诞生的星大都成团并与星云有密切联系，经过一段时间后，各星无规运动的结果使它们相互分离，散布到比较大的范围里。所有这些情况都和恒星由星际物质凝聚而成的演化理论相符合。

银盘里有旋臂存在这件事，用光学方法测定最年轻光度最高的O型星和

B 型星的分布也可以发现。这样做要充分考虑到星际物质对星光的消光作用，不然计算出来的距离就会比实际距离远。从星光红化的程度可以估计受到的散射，而吸收又和散射的大小成比例，因此吸收程度也是可以估算出来的。用光学方法在银盘里观测只限与地球相距 1.5 万光年的范围以内才比较有把握。现在已经用光学方法定出太阳附近的几段旋臂，最靠外的一条主要在英仙座，叫英仙臂，其次是猎户臂，再往里是人马臂。太阳在猎户臂的内边缘里面，不在旋臂上。光学方法测定出来的实际只是三条旋臂在太阳附近的片段，其基本位置与射电方法测出来的相符。猎户臂里恒星形成的活动非常明显，至今还在不断诞生出新的 O 型或 B 型星，使猎户星座区域里散布着许多新诞生的亮星和伴随这些亮星的星云。

在银盘里除了单个恒星、双星、聚星之外还有许多银河星团，大多数聚集在旋臂里面。任何一个星团都是由一团弥漫星云分裂成的，因此它的成员应该有相同的年龄，然而在分裂中形成的碎块却大小不同，形成的恒星质量也不相同，演化的快慢就会出现差异。大质量的很短时间就离开主星序成为红巨星，或者已发生超新星爆发而成为高密度低光度的天体。

星团的赫罗图不仅可以用来确定星团的年龄，而且还可以用来确定该星团与地球的距离。小质量恒星演化得很慢使星团赫罗图主星序下端保留很多星，带状主星序的位置由下端的恒星分布描绘得很确切。由于星团内各星处在同一地区，与地球的距离基本相等，它们的光度就和它们的视亮度成正比，用视亮度所作的赫罗图和用光度所作的赫罗图形状完全相同，仅差一个比例常数，表现为纵坐标的数值不同。因此若把按视亮度所作的赫罗图重迭在标准赫罗图上，再沿纵坐标上下移动两幅图的位置使主星序带状分布重合，就可以找出视亮度和光度之间的比例关系。这时根据视亮度、光度和距离的关系就可以求出星团对地的距离。当然利用星团里的造父变星也可以确定星团的距离，两种办法可以相印证。

现在已经用上述方法确定了 200 多个银河星团的距离，按它们的方位和距离也可以得出太阳附近有三段旋臂。因此，人类虽然处在银河系之内，但从氢的 21 厘米谱线观测、分子云的观测，高光度 O、B 型星团的观测以及银河星的观测都证明银河系有一个旋涡状的银盘。

银晕、银冕和星族

以银河系核心为中心在大致呈球形或椭球形，半径约为 5 万光年的空间里，还分布着一些恒星和球状星团以及少量极为稀薄的星际介质。这个空间称为银晕，它的外沿并没有明显的界限，只是逐渐过渡到物质密度更小的银冕里去。银河系内球状星团的总数约为 500，但已被确认的只有 132 个。银晕里的恒星之间和星团之间的距离比较大，比起银盘里的恒星和星团来，它们要稀疏得多。它们围绕银河系中心运行的轨道大都是很狭长的椭圆，轨道面的取向很分散。太阳和它附近的恒星都在银盘里围绕银心旋转，相互之间的相对运动比较慢，球状星团等则是与太阳相对运动较快的天体，称为快速恒星或快速星团。银晕的星际介质比起银盘里旋臂以外的区域还要稀薄很多，只是根据银晕发出一种均匀分布的射电辐射才判定它里面还存在着极少量的星际介质，但不像银盘里特别是旋臂里那样充满星际物质。这很足以说明银晕里的气体和尘埃已经全都凝成恒星了。

银晕里恒星的分布是愈靠中心愈密，因此银河系的核球实际上相当于银晕中部的恒星密集区，里面的恒星绝大多数属于银晕的成分。银晕的恒星全都属于星族 I，它们的特点是年龄比较老，重元素含量极少，大约只占 0.1%。很显然它们是在银河系本身还很年轻的时候诞生出来的。星族 I 也可以再细分为两个：极端星族 I，也称晕星族，包括天琴 RR 型变星和球状星团等；中介星族 I，包括苍藁型变星等。极端星族 I 的成员年龄都大于 6×10^9 年，有的甚至超过 10^{10} 年以上，因此大质量的恒星很少，很多都是和太阳质量差不多甚至比太阳还小的恒星。这些星的重元素含量只占 0.1% 以下，垂直于银道面的速度分量则很大，不少都达到 75 千米/秒。中介星族 I 的成员年龄约在 5×10^9 至 6×10^9 年之间，重元素含量可以达到 0.4%，垂直于银道面的速度分量一般都超过 30 千米/秒。正是由于星族 I 的成员分布在大致呈球形或椭球形的银晕里，而且诞生的时代已很久远，才使人们推测银河系早期的范围大致是相当于银晕区域的球体，后来才逐渐演变到今天这种样子。

从恒星演化理论可以推算出来，M3 由形成到现在已经有大约 140 亿年的历史。很可能这不仅代表球状星团的年龄，也十分接近银河系本身的年龄。用视亮度赫罗图与标准赫罗图重迭的办法，也可以和银河星团一样确定球状星团的距离。同时也可以利用球状星团里的天琴 RR 型变星确定距离加以比较验证，银河系中心所在的位置最初正是靠测定球状星团的空间分布才定出来的。

过去认为离银河系核球较远的部分应该按开普勒定律运行，即离银河系中心愈远转得愈慢，并且按这种看法估算了银河系的总质量。可是在 1976 年以后发现远离银河系中心的部分绕心旋转的线速度几乎不随距离变化，一直保持到很远都如此。1979 年研究银河系外围的一些球状星团的绕行速度之后，肯定了 1976 年的结论，后来根据射电观测资料更加证明这个结论，并且获得了比较准确的数据，绘出距银心不同远近各点的旋转速度曲线。根据天体力学的理论，这种现象表示有相当一部分物质并不集中在核球附近而是分布在很广阔的区域，由此才提出了在银晕之外还有一个更大的银冕区。

由于银河系总质量比过去估计高很多，它的逃逸速度也比过去的估计提高许多倍，银河系的物质更难扩散到银河系以外的空间，银河系比过去设想的要稳定得多。如果以目前比较粗略的数据来估计，银盘（包括核球）、银晕和银冕大致比例如下：以银盘的体积和质量为 1，则银晕体积约为 10，质量约为 1/10，而银冕体积约为 2000，质量约为 10。由此可见银冕的密度比银晕还要低。

核球与银核

银河系中心的位置最初主要靠分析球状星团和天琴 RR 型变星的分布找出来。在已知的 132 个球状星团中约有 1/4 在人马座，其余的分布在以人马座为中心的半边天空中。天琴 RR 型变星的分布有些类似，也以人马座为中心在半个天空中散布，只是区域略带扁平。随着射电技术的发展，银河系中心的准确位置已经找到了。从全天射电连续谱辐射强度的探测中发现，除了许多分立的射电源之外，以来自带状银河的强度最大，其中又以人马座与天蝎座交界处附近为最强，这就是银核所在。银核还同时发出强烈的红外线和 X 射线辐射。

银河系中心部分的核球里面有少量 K 型和 M 型的星族 恒星，但主要的却是星族 恒星，可以认为核球的外层是银盘物质和银晕物质的混合区，以银晕物质为主。核球内部深处的信息主要由射电和红外辐射提供。从 2 微米的红外波段到 73 厘米的射电波段观测的结果得知，银核的直径大约是 30 光年左右，里面还有一个只有几光年的内核，而其中发出强烈同步加速辐射的最核心处甚至不大于木星绕太阳的轨道范围。过去很多人认为银核和核球与外层部分一样是恒星密集之处，只不过银核处密集程度更高而已。现在看来银核的构成不那么简单，还需要经过很大的努力才能弄清楚。恒星的能源主要来自聚变热核反应，辐射形式主要是热辐射。强烈的同步加速辐射是非热辐射，显然不可能简单地来自密集的恒星。此外，由 21 厘米射电谱线观测得知，在距银核 1.3 万光年处有一团质量为 1000 倍太阳质量的氢云，以 53 千米/秒的速度向太阳奔来，在银核的另一侧有大体相同的一团氢云以 135 千米/秒的速度离银核而去。在离银道面较远处也观测到一些氢云以 100 千米/秒左右的速度在运动。从这些氢云的运动状况来推测，在大约 1300 万年前银核应该发生过一次类似爆炸的事件，抛射出大量物质。射电观测还发现距银核约 1000 光年处有一个绕银核快速旋转的氢气盘，以每秒上百千米的速度向外膨胀。气盘里还有一些直径约为 100 光年的氢分子云。再向里到距银核 200 光年处还有扰动很激烈的电离氢区，也以高速向外膨胀。由红外观测还可知，银核在 3 光年直径范围里就有几百万个太阳质量的物质。一方面有各种强烈的辐射，另一方面又大量抛射物质，表明银核处于十分不稳定的状态，因此银核的情况很复杂，很难说它是单纯由恒星和星际物质构成的。现在仅能推断在 3 光年直径范围里大约只有 100 万个太阳质量的物质是以恒星的形式存在，其余部分究竟以什么形式存在还不清楚。有人认为中心的致密核很可能是一个旋转的大黑洞，在它四周还有电离物质运动并产生极强的磁场。在黑洞吸积周围大量物质时巨额引力势能转化为热能，使物质高度电离并在磁场中加速到很高速度，最后产生强烈同步加速辐射，同时大量热能还会使部分物质发生剧烈对流、喷发等活动。实际上银核的活动性迄今并没有真正明确的理论解释，黑洞说只是一种猜想并据此作了些推测，但没有详细的活动过程和具体机制。今后还要经长期努力才能获得比较确切的了解。

星系

现在已经知道人类探测能力所及的范围里有数以亿计的星系，它们都属于与银河系相同等级的物质结构。星系之间虽然相距十分遥远。平均达到约 1000 万光年，但与星系本身的尺度几万至几十万光年相比，也不过百倍上下。可是太阳系与恒星的距离和大行星区尺度相比接近 1 万倍，和恒星半径相比，要高达 1 亿倍。因此可以说星系之间的相对密度要比太阳系附近恒星之间的相对密度高很多。为什么到晚上仰望天空时只觉繁星罗列，而不见众多星系相互拥挤呢？其原因主要是因为它们都十分遥远，除仙女座星系和大小麦哲伦云之外肉眼都无法看见。

星系发现的历史要追溯到 18 世纪。当时限于物理学的发展水平，对恒星的观测研究长久没有多大进展，不少天文学家就对发现新彗星十分感兴趣。可是在彗星远离太阳的时候把它们找出来却相当不容易。那时它们运行得很慢，又没有长长的彗尾，往往只是一些暗弱而模糊的光斑。很多人遍寻天

空，找出所有模糊的光斑，然后长期观测来确定它们的轨道。这种努力得到了一项副产品，当时任何人都估计不到这项副产品的的重要性远远超过彗星本身。他们在天空中除了发现不少缓缓移动的彗星之外，还发现大量位置不动的模糊光斑。随后把这些资料汇总起来列为星表。最常用的有三种，一种叫《梅西耶星表》，其中列举了 103 个天体；另一种叫《星云星团新总表》，上面列了 7840 个天体，包括《梅西耶星表》的全部成员在内。两表里所列的成员在序号前分别加 M 或 NGC 以资识别。后来还有一个补充的《星云星团新总表补编》，列出另外 5386 个天体，序号前冠以 IC。现在知道这三个表里所列的成员包括星团、真正的星云和过去被称为星云实际上是星系的三类完全不同的天体。前两类都在银河系以内，而后一类却是和银河系属于同等物质层次的天体。

星系的分类法是以形态为基础的。星系在望远镜的视野里和恒星不同。即使距离最近的恒星看起来也只是一个光点，看不出任何结构，但星系却显出一定形态。若拍成照片，会因曝光时间不同显出不同层次。另一方面，恒星的光谱相互间有很多差别，并且可以据此对它们分类。可是星系的部位就有不同的光谱，总和效果随形态而变化。因此至今还是按形态来分类比较能反映星系之间的差别。形态相同的星系有类似的物理特性和演化规律。现在通行的分类法主要是美国天文学家哈勃 1926 年提出来的。后来观测资料增多，有人提出了一些新的分类法，其中有些是在哈勃分类基础上作些修订补充，另一些则着眼于光度和光谱结构或其它特点。不过哈勃分类法简洁明了，仍然比较常用。

哈勃把当时观测到的星系分为三大类。一类是椭圆星系，用字母 E 代表；一类是旋涡星系，用字母 S 代表；另一类是不规则星系，用 Irr 代表。后来发现旋涡星系还可以分为两类：一类是标准旋涡星系，沿用字母 S 代表；另一类是棒旋星系，用 SB 代表。另外还有少量像旋涡星系那样扁平，却看不见旋涡结构的，叫做透镜形星系，用 S0 代表。

椭圆星系的外形看起来是椭圆形（包括正圆形）。即使看起来接近正圆形的椭圆星系，由于人们只能从一个方面观测，也很难肯定它们是真正的球形。有些可能实际上像糕饼一样扁平，只是因为视线正对着圆面，才被看成圆形。看起来细长的椭圆星系，按引力和旋转的动力学要求估计，它们的真实形状不可能是雪茄形，也应该是扁平的圆饼形，只不过视线从侧面看而已。为了更细致地把椭圆星系加以区分，一般按它们的扁平程度定为 0 至 7 共八个等级。当然由于倾斜角度不同，一个星系的实际扁平程度一定等于或大于它的等级分类。椭圆星系扁平程度的差别原因在于旋转，旋转快的就会扁一些，不过总的来说，椭圆星系比起旋涡星系来，旋转要慢得多。在暗弱的星系中有非常多的椭圆星系，被称为矮椭圆星系。现在的统计是椭圆星系占总数的 60%，其中特别明亮而巨大的巨椭圆星系是少数。

宇宙间最大的星系和最小的星系都是椭圆星系，它们的大小差别极为悬殊。最庞大的巨椭圆星系有几千亿甚至几万亿（ 10^{11} 至 10^{12} 量级）颗恒星，发光部分总质量最高达到太阳质量的 10^{13} 倍。最小的矮椭圆星系只有几百万颗恒星，很像银河系里的球状星团。有些离银河系很近的矮椭圆星系看起来几乎透明，可以穿过它们群星之间看到远方的亮星系。椭圆星系构成的特点是它们几乎不含气体，里面的恒星几乎全部是低质量的星族 恒星。直到 1981 年才发现约有 1/4 的椭圆星系里有少量的中性氢、电离氢和发出 X 射线的炽热气

体，并且也观测到极少数正在形成中的恒星。椭圆星系中极少有年轻的恒星，而大质量恒星又早就走完了生命的历程，成为光度很低的小天体：白矮星、中子星或黑洞。椭圆星系里的恒星数量虽然很多，但大都是余下来的小质量的老恒星。因此相对整个星系的质量和恒星总数来说，椭圆星系的光度是比较低的。基于同样的理由，椭圆星系的总和光谱特性和比较暗弱的 K 型恒星相近，反映出来整体的颜色比较发红。

标准旋涡星系的外形从正面看有很美观的旋臂由中心核球伸出来，绕核球呈旋涡状。如果由侧面看则是中央有核球突起的盘状，而且在对称面附近往往还有被尘埃遮挡的带状暗黑区。对旋涡星系一般按中心核球的突起程度和旋臂缠绕的紧松分为三种类型，分别用 Sa、Sb 和 Sc 代表。Sa 星系的中心核球最大，旋臂收得最紧；Sb 星系次之；Sc 星系的核球最小，旋臂散得最开。

几种旋涡星系的内部发光物质的分布各不相同。在 Sc 星系的星系盘里物质最多，而在 Sa 星系里则以核球包含的物质最多，Sb 星系居中。除了盘与核球之外，还有一小部分物质以球状星团和零散恒星的形式处在晕里。旋涡星系的盘里，特别是在旋臂里有比较多的气体和尘埃，还有星族 II 恒星。一些新诞生的恒星正在那里成长，有很多高光度的蓝巨星和蓝白色的巨星。在核球里则主要是一些年老的星族 I 恒星。因此旋涡星系的盘与核球具有不同的光谱和颜色。所有的旋涡星系的核球的颜色和光谱都和椭圆星系相近似，但三种类型旋涡星系的盘却具有不同的颜色和光谱型。其中以 Sc 的色调最蓝，光谱型相当于 A 型或 F 型恒星，Sb、Sa 则比较发白、发黄，光谱型相当于 F 型或 G 型。与椭圆星系相比，在质量相同的条件下，旋涡星系要亮得多。这是哈勃早期统计时，认为旋涡星系所占比例较大的原因之一。旋涡星系里发光物质的质量范围是太阳质量的百亿（ 10^{10} ）到几千亿（ 10^{11} ）倍，银河系和仙女座星系（M31）都是比较大的 Sb 星系，两者各种性质都非常相似。仙女座星系质量和体积都比银河系略大一些。它是用肉眼可以看到的最远的天体。

从正面看，有些旋涡星系的旋臂并不从中心圆形核球伸出来，而是由通过中心核球的一根棒形结构的两端伸出来，再形成旋涡状。这就是棒旋星系。一般也按核球大小和旋臂松紧，照标准旋涡星系那样分为三种类型，分别用 SBa，SBb，SBc 来代表。有的棒旋星系还有一个圆环结构，通过核球的棒形结构是圆环的直径，它们大多属于 SBa 星系。棒旋星系的一般性质都和标准旋涡星系相似，包括光谱和颜色在内。它最特殊的地方就是棒形结构。棒旋星系在旋转的时候，棒形结构就像由固体材料制成的那样，整体以同一角速度旋转。可是实际上棒形结构仍然是恒星和星际物质的集合体，并不是一整块固体。

不规则星系从外形上看既看不到中心核球和旋臂，又没有对称平面，只是一团无定形的亮斑，它们一般都是含气体和尘埃最多，年轻而明亮的恒星也最多，年老恒星最少的星系。因此不规则星系的颜色最蓝，而光谱型则较多地接近 A 型恒星。不规则星系的一个显著例子，叫做大麦哲伦云。它和小麦哲伦云都是离银河系最近的不规则星系，它们两个都在南天，我国要在南沙群岛才能见到。它们是麦哲伦作环球航行之后才为世人所知的，所以用了麦哲伦的名字。大麦哲伦云距银河系约 15 万光年，小麦哲伦云约为 20 万光年。从最近的资料来看，它们很可能通过银冕和银河系联系在一起。在普通不规则星系之外还有少量外形也不规则，但明显看出似乎在发生喷发或爆炸

的星系。过去也有人把它们归于不规则星系，但现在多数人的意见是把它们叫做特殊星系为好，因为它们反映出一些活动性的特点，很多方面和普通所称的不规则星系不同。在哈勃分类时，不规则星系只占 3%，而实际上，现在统计要占 10%左右。它们的质量都不太大，比较大的约相当于最小的旋涡星系，也就是不超过 10^{10} 倍太阳质量。曾经有人认为不规则星系是诞生较迟的星系，可是在不规则星系里，年龄很老的恒星虽然很少，却并不是没有。因此只能认为在不规则星系里恒星的诞生率比较低，大量恒星的诞生被推迟了，所以今天还有很多气体可以制造新的恒星，而不是整个星系比较年轻。

以上列举的几种类型星系的形态和分类，完全是根据可见光辐射的观测结果，在射电、红外和 X 射线探测技术发展之后，对河外天体的观测发现了很多新情况。有些河外天体，包括一些星系在内，它们的主要辐射能量并不在可见光波段，有些还表现出一系列很特殊的其它性质。在光学观测里，它们至少属于星系这个等级的物质结构，也应该称为星系。因此后来就把主要辐射能量集中在可见光波段的星系称为正常星系，而把其它的称为特殊星系。正常星系的辐射基本上可以看为恒星和星际物质辐射的总和，其基本特点是热辐射。但是特殊星系的辐射显然不符合热辐射定律，肯定有很大的非热成分，而恒星的能源机制又不可能产生这么强的非热辐射。因此把它们单纯当做普通恒星和星际物质的集合体就不符合实际了。

星系绝大多数不是单独存在的，往往组成大大小小的集团。有的成双成对，有的三五成堆，还有十几个、几十个成群，更有成百上千，甚至几万个组成的大团。每个集团内部靠引力联系在一起。在同一个集团里的星系并不都属于同一种类型，往往各类星系相互混杂，但集团成员愈多椭圆星系的比列就愈大。零散的星系中旋涡星系和不规则星系居多。

银河系就至少带领着三个小星系。它们是大小麦哲伦云和一个叫做比邻星系的矮椭星系，后者距银河系只有 5.5 万光年。另外还有几个矮椭星系也靠得相当近，很可能也在与银河系的相互引力约束之内。仙女座星系近旁也有四个矮椭星系。银河系、仙女座星系 (M31) 和一个较小的旋涡星系 (M33) 加上附近的小星系又组成一个比较大的群，称为本星系群。目前认为成员总数约有 40 个。本星系群内部结构很松散，没有向中心密集的现象。本星系群的尺度，由于几十年来不断发现新成员，所以范围在不断扩大，目前认为其直径为大约有 300 万光年。

很多星系团远远大于本星系群。离本星系群最近的星系团是室女座星系团。银河系到室女座星系团中心的距离约为 7000 万光年。室女座星系团包含着 2500 个星系，它的中心有一个巨椭星系 M87，是一个相当特殊的星系。有证据表明，实际上本星系群只不过是室女座星系团为中心的更大集团的一个成员，这个大集团称为本超星系团。本星系群的位置靠近超团的边缘。本超星系团总的外形是一个扁平的旋转球形天体系统，直径约为 2.5 亿光年，很可能还在膨胀。目前银河系绕本超星系团中心的公转周期约为 1 千亿年。本超星系团是许多星系群和星系团的集合体，成员总数约有 50 个群和团，总质量可能达到太阳质量的 1000 万亿 (10^{15}) 倍，离银河系 2.2 亿光年还有一个叫做后发座星系团，约有 9000 个成员星系，它们都不同于恒星那样仅仅为单纯的圆点。在武仙座方向还有一个巨大的星系团，包含着上万个星系。总之星系的成团现象是很普遍的。

一般成员较多的所谓富集星系团里，越靠中心星系密度越大，中心大多

是巨椭星系，近旁是椭圆星系和透镜形星系，只是在边缘区域才有旋涡星系和不规则星系。在富集星系团中心区，星系的密度远远大于人类探测范围内星系的平均密度。在那里星系之间的距离和它们本身的尺度差不多是同一个数量级，以至星系之间的相互靠拢，不时发生碰撞。富集星系团中心的巨椭星系往往会吞食游荡到它附近的矮星系。很可能正因为这样它才成长为巨椭星系的。有些发生碰撞的星系相互之间的作用非常强烈，潮汐力使两个星系内部结构都发生变化。相互发生强作用或碰撞的星系在距离还比较远时往往就出现“桥形”物质流相互连接，在潮汐力更强的时候，背向另一星系的方向上也会长出延伸物和相互连接的桥对应。有些巨大星系的边缘区域存在着一个或几个突起的亮斑或亮团，看起来很可能是被它吞食掉的矮椭星系残骸，还没有来得及完全“消化”。

在富集星系团内的星系际空间，近年来还探测到弥漫的 X 射线源。从 X 射线的谱形来分析，属于热辐射，是温度高达 10^8 开的气体发出来的。最近直接探测到铁原子电离 25 次（即失去 25 个电子）的谱线，只有温度达到 10^8 开才能达到如此高度的电离状态。由此证明富集星系团里的星系际空间确实存在着极高温度的电离气体。此外也发现星际空间还有 21 厘米氢谱线的射电辐射，表示那里也有中性氢原子。现在判断在富集星系团中心区物质密度可能达到 5×10^{-30} 克/厘米³，而在一般星际空间则约为 2×10^{-34} 克/厘米³。通常认为这些气体除了空间原有的弥漫物质之外，还有受到星系团中心区巨大引力从成员星系里拉出去的气体，因为探测表明星系团内的星系本身大都只保留很少气体，甚至一些旋涡星系也被剥离得只剩下少量气体，不大容易观测到盘结构而变成类似透镜形星系。

星系在星系团内部是靠引力联系在一起，它们本身则在不停的运动之中，否则就会落到一起去了。星系在团内的运动速度可以高达 1000 千米/秒。在这么高的速度下，星系团的总质量必须相当大，使整个星系团具有很高的逃逸速度，这样才能约束住星系，使团不致分崩离析。可是由星系的光度和它们的自转推算出来的质量总和，却比维持星系团存在所需要的总质量小很多。现在虽然从银河系的观测情况推测可能存在星系冕，而且发现星系团内空间普遍存在星系际物质，其中包括温度高达 10^8 开的高温电离气体，但其数量仍不足弥补短缺质量。这个短缺质量问题，对于更大范围的宇宙结构和演化有重大的影响。

在庞大的超星系团之上还有没有更大范围的集结现象，目前还不能绝对肯定或否定。不过从统计天空各个方向星系数目的情况来看，在人类目前探测能力所及的范围里，星系的分布比较均匀，肯定不存在类似银河系里恒星分布那样的不均匀现象。在银河系里，核球和银盘是恒星密集区。在星系空间里，即使把大量十分暗弱的矮星系全都计算在内，也显然不存在类似的集结现象。因此从大范围来看，星系在空间的分布可能是相当均匀的。

对于我们现在能探测到的全部空间，有人称为“总星系”，有人直接称为宇宙。从哲学上的意义来说，宇宙应该是包罗万象、无边无缘、无始无终、不可穷尽的，然而在任何一个时期，人类对宇宙所能认识到的部分又必定有具体内容，有一定范围。从古至今，在讨论当时所知最辽阔广延的时间空间实体时，又往往把这个实体称为宇宙。远古时代，人类把自己居住的局部地面和上面像帐篷一样罩着自己的空间称为宇宙，正如后来民歌里唱的“敕勒川，阴山下。天似穹庐，笼盖四野。天苍苍，野茫茫。风吹草低见牛羊”。

以后又认为地球和围绕它转的九重天就是宇宙，后来则以为太阳系和外面的天球就是宇宙。直到本世纪初发展到银河系是整个宇宙。现在人类把能探测到的 100 多亿光年的空间和 100 多亿年的时间实体称为宇宙当然更是可以的。这是一种狭义的宇宙概念。

“总星系”这个名词是本世纪 30 年代提出来的，虽然至今还有不少人在使用，但概念上各人理解并不相同。有人认为总星系是超星系团以上的一层物质结构体系，它的范围可能大于、等于或略小于今天人类探测能力所及。既然人类无法观测到这个体系以外，因此它究竟能否算作一级天体系统只有理论上的意义，或者说没有多大意义。比较多数的人认为它和狭义的宇宙概念是同义词，所以习惯上比较倾向于直接用“宇宙”一词。星系团或超星系团就是这个宇宙空间里的组成单元。虽然星系团内和星系团之外星系的密度差别很大，但星系团的总空间分布却比较均匀。在研究宇宙的结构时，宇宙间物质分布的基本状况可以认为是均匀而且各向同性的。这种情况可以和一团云雾相比，云雾所含的小水滴内部水分子密集，小水滴之外的空间，水分子的密度就很小，但是从云雾的整体来看，可以说物质的分布是均匀且各向同性的。

射电天文学

太阳

虽然从外层空间来到地球的宇宙线、X 射线和 γ 射线使天文学家产生强烈的兴趣，但 20 世纪中期天文学方面的真正突破却是在电磁波谱的另一端——在长波一端，即光子能量较小的无线电波部分。

关于这一点有两个主要原因。首先，地球的大气对于可见光是透明的，但对于电磁波谱的其他部分是不透明的，不过，恰好在非常短的无线电波或微波部分又有一个透明的宽带。这样，天文学家就有了观测天空的第二个“窗口”。所以，从天体射来的任何微波辐射可以在地球表面上从容不迫地进行研究，没有必要用气球或火箭把仪器送上高空。

其次，无线电波在通信方面的应用，使得对这类微弱辐射的接收和放大的精巧技术有了空前的进展。

事实上，科学家很早就考虑过来自天空的无线电波的可能性。仅在发现无线电波后几年，就有人设想探测来自太阳的无线电辐射的可能性。这其中有英国物理学家洛奇，他是一位无线电通信的先驱者，他在 1890 年前后就试图探测太阳的无线电波，但没有成功。这方面的努力销声匿迹一代人之久，最后是一次偶然的的机会获得了成功。

太阳的无线电波是美国无线电工程师詹斯基发现的。1931 年，他正在研究纯粹与天文学无关的问题，即无线电通信天电干扰的防御问题。有一个天电干扰源他起先无法弄清楚来自什么地方，最后他确定，那是来自外层空间的非常短的无线电波。他于 1932 年和 1933 年发表了发现，但他的文章在天文界没有引起多少兴趣。

事实上，唯一热心的是另一位美国无线电工程师雷伯。他于 1937 年在他的后花园建造一个“无线电（射电）望远镜”，这是一个直径为 9.4 米的抛物面装置，用来收集一定面积上的、来自空间的微弱微波辐射，并把它们集

中到处在抛物面焦点的一个接收装置上。在好几年里，雷伯小心地定出天空各射电源的位置。他是第一位，并且在相当长的时间里是唯一的一位“射电天文学家”，他于1940年发表他这方面的第一篇文章。

天文学家仅是缓慢地产生了兴趣。一个不利因素是从天空来的波长非常短的射电波比通常用于无线电通讯的射电波要短得多，所以这些射电波通常不干扰无线电接收以引起人们的注意。此外，当时技术上还未发现有效的方法来掌握这样短的无线电波。

然而，在30年代末期，几个关键性的进展最后打开了缺口。英国和美国都在发展“雷达”——这是一种装备，它发出一束微波，期望它射在一个不透明的物体上反射回来，并且能够探测到反射的回波，从回波射来的方位可以确定这个不透明物体所在的方向；从发射微波束到接收到回波之间的时间延迟，可以确定这不透明物体的距离（因为微波以光的速度传播）。雷达是准确快速探测远距离目标的理想手段，特别是在普通光学方法用不上的条件下更是如此。它在夜间和白天一样工作，云和雾对于可见光是不透明的，但对于微波实际上却是透明的。

雷达被英国用于早期预报德国飞机的到来，并且是英国赢得战争的关键性辅助手段。所以，任何对雷达工作的干扰理所当然地会引起英国及其盟国的严重关注，而且就在1942年，这样的干扰发生了。整个雷达系统受到倾泻而来的外部微波辐射的严重干扰。英国警报系统暂时毫无用处。如果这是由于德国方面的有意干扰，后果是不堪设想的。然而，研究表明，那是由于太阳耀斑而引起的（耀斑就是偶然地发现来自太阳的宇宙线的最早征兆）。很明显，耀斑送出的强大微波流射向地球，很轻易地就淹没了人工供应给雷达系统的辐射。就这样，人们发现了太阳在电磁波谱无线电波区的辐射。第二次世界大战结束后，天文学家就认认真真转向“射电天文学”。

因为和雷达有关而高度改进了的技术，一旦用于研究太阳的微波谱，人们很快就查明，太阳辐射的微波远比根据太阳表面温度所应辐射的还多。有些波长的辐射强度，只有温度达到1,000,000才有可能。当然，这些是由日冕发射的，日冕的高温甚至足以发射X射线。

太阳也发射突变性高强度的微波辐射，这些辐射和黑子、耀斑或其他扰动有关。

行星

在太阳系中的微波源不光是太阳而已（这是够令人惊奇的）。行星只靠反射光线而发光，但其中有些自己会发射微波，这些微波的强度足够让地球上探测到。

例如，1955年人们认识到，木星是某些微波爆发的源，这些微波爆发曾使观测者困惑了5年之久。木星的一部分一般微波辐射起源于热，这仅仅是由于木星表面处于某一温度下，从而辐射出电磁波。这部分辐射覆盖了电磁波谱中很宽的一段波长范围，其中包括微波区域。然而，在某些波长，无线电波的辐射比纯粹由热原因所应有的要强得多。

同样值得注意的是，从金星也接收到微波。这种微波第一次于1956年探测到，并立刻给天文学家端出了一个很有趣的互相矛盾的事实。对金星的普通红外辐射的测量表明，它的“表面温度”大约为-43。可是，微波辐射明

显示温度要比这高数百度，事实上，比水的沸点还高得多。

但这是真的矛盾吗？从金星来的红外辐射，必定是来自这个行星的最高层大气。要是它来自固体表面或靠近金星固体表面的地方，红外辐射将被金星的大气所吸收。而金星和地球的大气对于微波都是透明的。尽管金星不透光并永远被云层覆盖着，使得它的固体表面还未曾被人类的眼睛看过，但对于微波却是透明的。所以，很有可能红外线所指示的温度，是人们对其高层大气所自然应该期待的低温，而由微波辐射所揭示的温度是金星固体表面的真实温度。

对于金星来说，表面温度比水的沸点高得多，是相当值得惊奇的。是不是微波辐射不是由于热的原因，而是至少有一部分是来自磁场，就如木星那样，后面这种可能性是很小的。天文学家普遍相信，金星绕它的轴自转是非常缓慢的。天文学家还强烈地意识到，一个行星要具有磁场，就要求它自转得足够快，能够在它的熔融核心建立起涡流。因此，缓慢旋转的金星似乎不像会有可观的磁场。

这个问题由金星探测器“水手2号”解决了。“水手2号”是一个仪器装备精良的火箭，它于1962年12月在离金星34800公里内经过，没有探测到明显的磁场。要是金星有磁场的话，它不会超过地球磁场强度的1/100。“水手2号”的数据还指出，微波辐射不是来自金星的电离层，而是来自它的表面，所以微波辐射必定是来源于热，因而金星表面必定是很热的。从“水手2号”所观测的微波强度表明，金星的表面温度约为400。

利用反射的微波辐射也可以得到太阳系的信息。第一个例子是1945年由流星雨反射回来的微波。即使在白天通常看不到流星雨时，也可利用它们的反射波来探测和研究它们。如果要利用更远的障碍物作为微波的反射体以研究这些障碍物，只要改进技术，即能够送出非常强的微波脉冲，并且能在同样性质的本底辐射（“噪声”）中检测并放大非常弱的回波就行了。

在发射与回波到来之间的时间延迟可用来确定行星的距离，事实上，利用金星对无线电波的反射就是新的、空前准确的测定太阳系大小的方法。这种方法比一代人之前利用小行星爱神星的视差所进行的测量有明显的改进。

此外，从微波辐射还可以得到有关反射面的信息。如果反射面是光滑的理想球形，就只有直接面对着地球的部分会送来反射回波。不过，如果表面是粗糙的、不平的、倾斜的，就会在那些作为球面本来不该有回波的地方发回回波。然而，以月球为例，由于月球的曲率，有回波返回的倾斜的地方距离地球会稍远些，因而回波就会变得不太尖锐，会比原先发出去的脉冲拉长些。如果反射面是在自转着，那么，由于多普勒效应，微波的回波也会有某些失真。

自然，从雷达所获得的月球情况，有许多可以从月球表面所反射的太阳光来核实。在金星的情况下就做不到这一点。金星的固体表面对于可见光而言是被覆盖的，但利用能透过云层的微波就能够触摸到它。就这样，1965年的微波反射似乎揭示出金星表面至少有两座大山脉，其中之一的走向是自北向南，而另一座则自东到西。

金星的自转问题还更有意思。由于在这个行星上面除了毫无面目的覆盖云层之外，什么也看不到，因而没有办法准确测定它的自转周期。一直到1962年，关于遥远的冥王星的自转，所知道的还是比金星要多得多，而金星却是我们最邻近的行星。根据不充分的数据，对金星的自转有许多猜测或估计，

多数人的看法是，这个行星的自转周期等于它绕日公转的周期——225 天。

要是真的这样，这个行星的一侧就总是面对太阳，而另一侧永远背着太阳（就如月球的一侧永远向着地球，而另一侧永远背着地球一样）。这样，人们就可以期望金星的“永昼侧”必然非常热，而“永夜侧”必然非常冷。

然而，相当奇怪，微波辐射似乎表明，金星表面温度变化没有像存在永昼侧与永夜侧所应有的那么多。人们可以设想有很强的风把永昼侧的热传给永夜侧。或者还有可能金星的自转周期并不完全等于公转周期，所以没有永昼侧和永夜侧，而是（像地球这样）行星上任何一个点都会周期性地见到太阳，然后又见不到太阳。

后面这种看法被微波反射所证实，使天文学家感到相当惊奇的是，1962 年测得的金星自转是倒转，周期为 247 天，这就是说，如果从它的北极上空高处观看，它的表面是顺时针方向旋转，而不是像地球和几乎所有其他行星那样是逆时针旋转。换句话说，金星表面是自东向西转，而不像我们地球那样自西向东转。把自转周期与行星绕日运动结合起来，就意味着从这行星的表面上任一点看起来，在每个行星年中，太阳（要是云不存在的话）从西方升起而从东方落下大约各两次。

为什么金星会逆向自转以及为什么它会那么热，目前正让天文学家们大伤脑筋。不过，出现未解答的问题比没有问题更好。

新的微波技术更正了人们对金星自转的见解，但这不是唯一的成就。1965 年，微波反射表明，水星的自转周期并不等于它绕日公转的 88 天周期。这比金星还更值得惊奇，因为水星没有云层覆盖，它的表面可以看得见（虽然它与太阳那么接近，观测很困难），所以它的自转周期可以直接从它的表面细节的变动观测出来。

当有了微波的观测数据后，水星表面被小心严格地进行观测，结果表明，水星的自转周期为 58.5 天，刚好大约为它的一年的 $\frac{2}{3}$ 。某次近日点太阳所照到的特定区域在往下数第二次、第四次、第六次近日点时又再出现。任何人相隔两次公转周期或其倍数所进行的观测，都将看到同一些表面细节出现在同一地方，因而假设行星每公转一周就自转一次是情有可原的，因为在那种情况下，人们的确会观测到完全相同的现象。

恒 星

太阳系中的物体所辐射的微波虽然是值得重视的，但这决不是全部射电天文学的内容。事实上，在这个领域里从一开始观测，就与太阳系以外的微波源打上交道。

詹斯基的第一次观测是在太阳相对来说比较宁静的时期，它发射的微波相对来说比较少。所以太阳不是他所探测到的微波源。詹斯基起先认为太阳是他探测到的微波源，因为那个源随着太阳在天空中移动。然而，一天又一天过去了，他注意到这个源每天比太阳提早四分钟出现，这意味着这个源相对于恒星而言，位置是固定的，而当后来定出它的位置在人马座方向时，它就被叫做“人马座 A”。无疑地，这个源是银河系的核心，这个核心从微波所得的数据来判断，直径为 10 秒差距，包含 1 亿颗恒星。

这是最重要的一次发现。永远妨碍人们对银河系核心进行可见光观测的尘埃云，对于微波是非常透明的。如果说我们不能以通常的方式看到银河系

的核心，我们却能够用微波“看到”它。

雷伯在独自对天空所发射的微波进行的研究中，画制了可以叫做“射电波天空”的图。这是天空各个区域微波辐射的本底强度。其主要特征是：射电波天空是沿银河延伸的高辐射带，它在银河系核心方向最强，而沿两侧减弱，在与银河系核心正好相反方向上减到最弱。

然而银河平面并不就囊括了射电天空的所有东西。即使是远离银河的天区，也会在这里或那里出现高强度的射电辐射源的小斑。起先，这些射电源无法和什么看得见的东西对应起来，不过很清楚，它们不可能是像我们太阳一样的普通恒星。要是恒星一般说来只像太阳那样辐射微波，那么，银河系的核心就不可能辐射足够多的微波，使得它在到达我们这里时还那么强。

当这些射电源之一很快被认证出就是蟹状星云时，它们的不平常性质就完全清楚了。我们已经把这个天体作为X射线源和宇宙射线源讨论过了。它被证明也是一个微波源，是太阳系之外第三强的微波源。

起先人们可能设想，蟹状星云的微波辐射远远比太阳强得多，这只是由于它有那产生X射线和宇宙线的高温。然而很明显，情况不是这样。要是温度高到足以产生如所观测到的微波强度，蟹状星云在可见光范围里应当还要亮得多。其次，由高温产生的微波的强度应当随着波长的增加而减小，但蟹状星云并不是这样。

1953年，苏联天文学家什克洛夫斯基提出，蟹状星云可能有一个很强的磁场，而且磁力线可能迫使电子作螺旋运动，因而电子就如它们所表现的那样发出同步加速器辐射。这种辐射可能同时包含微波和可见光。

如果真的是这样，其所发出的波的形式就受到磁力线的控制，这些磁力线在空间有固定的取向。这样的波的振动方式必然固定在一个平面里，因而从蟹状星云来的光必然具有“偏振”的性质。天文学家可以检验这些光是否偏振，而苏联物理学家多姆布洛夫斯基首先证明，事实的确是这样，这立刻就得到天文学界的承认。通过取某些给定方向的偏振滤光器观测蟹状星云，都会呈现与偏振器取向垂直的直线结构，这正是偏振光所应有的现象。

由于有关蟹状星云的这种见解获得成功，人们提出这样一种看法：木星的非热辐射可能有一部分是来自同步加速器辐射。这就意味着木星具有比地球强几十倍的磁场，考虑到木星的迅速自转（尽管木星直径为地球的11倍，它自转一周却仅为10小时，而地球为24小时），这种看法很有可能是对的。到1960年，木星的微波辐射被发现是偏振的，偏振的情况就像它的磁极与地理极接近时（地球就是这样）所应出现的那样。

人们认识到磁力线能有效地捕捉带电粒子，从而发现了地球的磁层。因此，人们必然也就会推断木星有一个更强的磁层。不仅如此，当1962年一颗核弹在大气层以外爆炸时，有大量带电粒子拥进地球的磁力线区并被捕获，并且在它们来回绕磁力线作螺旋运动时，的确发出了可检测到的同步加速器辐射。这就使得上述见解得到充实。

当然，蟹状星云几乎肯定是超新星遗迹，而其他一些射电源也可以认证是处在我们银河系已爆发的超新星的位置上。第谷和开普勒所观察到的超新星就是这方面的例子。然而，最强的射电源却不和已知的超新星有联系。这个射电源叫做“仙后座A”，因为它的位置在仙后座中。没有什么光学上引人注意的东西和仙后座A相对应，有的只是距离我们大约10000光年的一些气体云或成为小束的气体丝状物。对这些气体的认真研究表明，它非常热，

并且在剧烈运动着。它非常可能是一颗近在 1700 年爆发的超新星遗迹，但由于它的距离较远并不显得特别亮，因而没有引起人们注意，那时候对“新星”的兴趣不大，只有特别亮的才会引起观察者的注意。另外一个有趣的射电源 IC443 也是云状的，可能是超新星遗迹，或许已有 50000 年的历史。与这个云状物相联系的白矮星没有观察到——这也是由于它的距离较远。

这样设想是有道理的：银河带发射的微波一般可能是由于其中出现过的超新星所引起的，但这不一定是唯一的微波源。有一种类型的红矮星会不规则地偶而闪亮起来。人们推测，这些星是由于类似太阳的耀斑而闪亮起来的，只不过耀斑的规模强大得多，这些耀斑像太阳的耀斑一样辐射出微波。英国天文学家洛弗尔与美国天文学家惠普尔合作，证明了微波辐射的强度的确与闪亮是并行的，因而这些“耀斑星”就是最早被认证为射电源的普通个体恒星。

银河系

来自银河系的微波辐射不全是来自恒星或者来自超新星遗迹。就连恒星之间的物质，即恒星际主要由氢组成的稀薄气体，也会发射微波。要是这些氢恰好受到附近某些恒星的加热，氢原子就可能被泵足能量而电离。以后，这些能量可能又辐射出来，因而天文学家就会观察到发光的云和探测到与氢相联系的光谱线。

有这种现象会比没有要好些，但好不了多少，因为银河系中只有很少一部分星际氢被加热到产生这些光谱线。至少 95% 的星际氢相对来说是比较冷的，用辐射的语言来说，是宁静的。此外，炽热的氢的发射谱线，只有当中途没有暗星云插入时，我们才能观测到，这就是说，能够进行这类观测的，仅限于银河系中我们自己所在的这一地段。

然而，1944 年，一位荷兰天文学家范德赫斯特以用纸笔计算与冷的氢有关的行为来消磨时间。他指出，氢原子中与质子和电子相关连的磁场彼此有一定的取向关系，它们可以同向或者反向。这两种状态的能量有少许差异，而且每当氢原子处于较低能量状态时，经过一段时间就会吸收一个能量恰好合适的光子，使它自己过渡到能量更高的状态。接着，每当氢原子处于更高的能量状态后，再经过一段时间，就会发射一个光子，并使自己降低到较低的能量状态。氢原子收进或支出的这份能量是如此之小，只有能量很小的光子才能被吸收或者被发射。这种光子的波长为 21 厘米，处在微波范围里。

每个氢原子发射和吸收 21 厘米波长的微波注定是很稀罕的——平均说来每 1100 万年才发生一次——但整个空间的氢原子是如此众多，因此这样的事件就应当像下毛毛雨那样，存在着虽然微弱但能够探测到的光子流。

第二次世界大战结束后，天文学家们开始搜寻这方面的一些证据，并且于 1951 年，由瑞士出生的美国物理学家布拉克与美国物理学家蒲塞尔分别探测到 21 厘米的辐射。而氢原子在 21 厘米波长处的标志性吸收，后来也被探测到了。

这就提供了一种探测星际氢的手段，可以根据它得知氢在什么地方相对来说比较丰富，在哪些地方比较稀少。不仅如此，由于这种光子落在微波而不是可见光区域，它们很容易穿过尘埃，因此天文学家就可以借助它们“看到”银河系中很多用可见光无法看到的地方的氢。

由于人们设想银河系的尘埃和气体集中于旋臂，因此，21 厘米射电源的分布图就应当给出关于我们银河系的旋臂结构的概貌。

其实，早在探测到 21 厘米的辐射以前，人们已经试图利用炽热发光的氢云来描绘银河系的旋臂了。这些亮氢云围绕着特别热的第 族恒星，它们是在充满尘埃的旋臂上形成的恒星。这些能够照亮数光年范围里的氢的蓝白色巨星的分布情况，勾画出旋臂的来龙去脉。利用这种技术，美国天文学家摩根及其合作者于 1951 年绘制了银河系的旋臂图。

这张图描绘了三支旋臂，其中之一包含猎户座中那些亮星云和热巨星，所以叫做“猎户臂”。

进一步的类似研究弄得这样的图更加错综复杂，但接着这种技术就过时了，因为有了 21 厘米辐射可资利用。利用这种手段，立即可以探测到银河系中更远的地方，并且也探测得更加详细。银河系的旋臂图现在已经绘制出来，人们可以形象化地把它想像为相当对称的双螺旋。

银河系中冷的中性气体氢并不是静止不动的。乌尔特与范德赫斯特的研究似乎表明，氢从银河系的中心向边缘以令人惊异的速率流出。乌尔特估计每年从银心向外迁移出来的氢等于一个太阳的质量。根据某些揣测，这些沿旋臂向外流的气体使得旋臂保持丰富的气体，并在那里形成恒星。另一方面，很难弄清楚在银心中这些氢的来源是如何维持的。除非有某种整体的循环使得银心的氢能得到补充，否则，氢必然早已用完了。但现在还不清楚是什么原因维持着这样的氢循环。

当然，其他星系也有它们自己的氢储备，其数量随星系的类型而不同。旋涡星系似乎比椭圆星系有较多的氢。21 厘米辐射的研究表明，比较开放的旋涡星系，星际氢比收紧的星系多，而不规则星系的星际氢最多。这一点要是与星系的演化有关的话，关系密切到什么程度，至今也不明确。

天文学家们很自然地渴望找到其他类型的微波辐射，以便用来研究星际气体，因而就考虑到氘（氢 2）。氘 2 与普通的氢 1 的不同是它的原子核中多了一个中子。由质子和中子组成的核的磁场也与单一质子的核一样，必然与电子的磁场相互作用，据理论预言，这种作用必然会发射 91 厘米波长的微波。像仙后座 A 这样的强射电源就被用来搜寻这个能揭露秘密的波长。1966 年，芝加哥大学的天文学家们已探测到它。目前看来，氘在宇宙中的数量大约为普通氢的 5%。

宇宙中除了氢以外，最常见的就是氦。苏联天文学家卡尔达雪夫从理论上计算了氦应发射的微波波长，这也于 1966 年被探测到。

在氢与氦之后，星际气体最常见的成分就是氧。一个氧原子很容易和一个氢原子结合成“羟基”。这样的结合在地球上是不稳定的，因为羟基非常活泼，会与它遇到的几乎所有其他原子或分子结合，特别是会与另一个氢原子结合成水分子。然而，正如什克洛夫斯基于 1953 年所指出的，在星际空间中原子的分布是如此稀疏，原子之间的距离很远，碰撞是很罕有的，因此，羟基一旦形成，可以维持一段相当长时间不受扰动。

在氢、氦和氧之后，星际物质最常见的成分就是氮和碳。人们继续搜寻包含这两种元素的化合物。1968 年在星际气体和尘埃中探测到了和氨分子（由一个氮原子和三个氢原子构成的 NH_3 ）相联系的谱线，并于 1969 年探测到与甲醛分子（由一个碳原子、两个氢原子和一个氧原子构成的 CH_2O ）相联系的谱线。这些东西使人们特别感兴趣。因为任何有关行星上生命发生的描

述，都把诸如氨和甲醛这类分子当做原始材料。要是甚至在恒星际的空间物质中也有这些分子，那么，在很多行星上生命的形成应是宇宙间的普遍现象这种猜测就得到了一些加强。

到 60 年代，天文学家对一些特殊的微波源的强度会发生变化这一点增加了兴趣。这种强度变化要不是发生得那么快，是不值得惊奇的。但是在 1964 年左右，人们注意到有些微波源所发射的微波强度变化得惊人的迅速，简直就是一个不断闪烁的微波源。

这就推动天文学家去建造能够探测非常短促微波爆发的射电望远镜。他们认为，这就能够详细地研究这种迅速的微波强度变化。使用这种射电望远镜的天文学家之一是剑桥大学天文台的休依斯。

几乎当休依斯刚开始开动这台望远镜时，就探测到来自织女星和牵牛星的中间地带的微波爆发。虽然他事先设想过很迅速的微波爆发，可是他没想到爆发会如此短促，每次爆发只持续 $1/30$ 秒，这使他感到非常惊奇。不仅如此，更使人惊奇的还在于这些爆发一个接着一个，极其有规则地相隔 $1\frac{1}{3}$ 秒。

光说是 $1\frac{1}{3}$ 秒简直是不公正的。这个时间间隔是如此准确，使得其数值可以测准到一亿分之一秒。这个属于某种新现象的第一个例子，其周期为 1.33730109 秒。

这台新仪器这样快就“捕获”到这个射电源，似乎有些奇怪。为什么通常的射电望远镜未能“抓”到它呢？

应当明确，一次这样的射电爆发，能量是巨大的，足够使它在一瞬间显得非常明亮，并且容易探测到——但仅仅是在一瞬间而已。一台射电望远镜如果不是专门设计用于探测非常非常短的爆发的话，它仅能探测到从那个地方来的平均辐射，而这平均辐射只有爆发时最大亮度的 3% 或更少些，这就不大会引起注意了。

休依斯一点也没想到会出现这个奇怪的微波现象。由于这种微波似乎是来自天空的某一点，他把它当做某种类型的恒星。由于微波是以短脉冲的形式出现的，他设想它是一种“脉动着的星”。这个名称几乎立刻就被简化为“脉冲星”，这个新的天体就以这个名称为人们所知晓。

不过，我们应当说“一些天体”而不是说“这个天体”，因为休依斯发现了第一个后，他就接着搜寻其他的，到 1968 年已找到了 4 个。其他天文学家也开始热烈地搜寻，并很快就发现了更多的这类天体，两年以后，又找到将近 40 个脉冲星。

这些脉冲星中的 $2/3$ ，位置都非常接近银河系的赤道面，这很好地说明脉冲星一般说来是银河系的成员。有些脉冲星可能近到约 100 光年左右。

所有脉冲星的特点都是脉冲极端有规则，当然，各脉冲星的准确的脉冲周期是不同的。有一个脉冲星周期长达 3.7 秒，而西弗吉尼亚州格林班克的天文学家们于 1968 年 11 月在蟹状星云中探测到的一个脉冲星，周期只有 0.033089 秒。它每秒钟发出 30 个脉冲。

当然，问题是什么东西会产生这样短的“闪光”，并且闪光具有这样难于置信的规律性。休依斯及其同事们对于第一个脉冲星是如此奇怪，他们甚至想到会不会是外层空间某种有文明的生命所发出的信号。但这种想法很快就被抛弃了。

但总得有什么东西产生这样的脉冲；某些天体必然经历着某种按时发生的、快得足以产生这些脉冲的变化。

理论工作者们立刻忙碌起来，但是，使尽他们的本事，无论是设想一颗白矮星绕另一颗转，或者绕轴自转，或者自身脉动着，都无法要求其周期小到足以成为脉冲星的周期。白矮星的个子还是太大了，而它们的引力还是太小了。

后来人们又把目光转向中子星并针对此做了一系列的观察、计算、推测和试验，但即使是中子星，也似乎还是不太足够产生这样的引力波。

那么，是不是还有某种尚未认识的东西，有更加极端的力，更加想象不到的规模巨大的物质聚集，我们拭目以待。

宇宙的起源

演化着的宇宙

关于宇宙作为一个整体的结构和它的诞生、形成、演化，从来就是非常引人入胜的课题。人类一直用自己最高的智慧和想象力，尽自己一切知识去解答这个问题。宇宙论可能是和整个天文学同时诞生的最古老分支之一。世界上任何一个民族都在非常早的时候就有宇宙诞生的神话和传说。不论是在中国开天辟地的盘古，还是在西方开创世界的上帝，都由混沌中创造出宇宙万物，也创造了宇宙本身。最先是清者为天浊者为地，然后是日月星辰，最后才有各种动物和人类。但是盘古和上帝在一次创造出宇宙之后，似乎就大功告成，从宇宙的和谐运转中抽身隐形，让宇宙永存不朽地运行。除非出现共工那样的捣蛋鬼破坏了宇宙美妙的韵律，需要女娲来加以修补，或者上帝一旦发现世上罪恶滔天，要来加以毁灭。这种神造永存的宇宙论虽然完全来自古代人类的蒙昧无知，但其影响实际上延续到牛顿之后近代科学已有了相当发展的时代。由牛顿力学原理引申出来的宇宙论仍然是没有演化发展的、机械的静态宇宙。直到本世纪初宇宙论的基本内容仍然是：宇宙在原始外力的推动下按一成不变的方式运行下去。

到爱因斯坦在广义相对论里把时间、空间、物质、引力和运动全部联系成统一的整体之后，现代宇宙论才开始建立。广义相对论的哲学基础是不承认宇宙间有处于特殊地位的观测者。广义相对论认定宇宙间一切观测者的地位都是等价的，他们所测定的全部自然法则都应该相一致。由此得出的结论是：物质及其运动与时间空间组成的统一体——时空是密不可分的宇宙结构要素，物质与时空之间通过引力相互渗透和影响。既然宇宙本身就是物质及其运动与时空的组合体，用数学形式描述它们之间渗透和影响关系的爱因斯坦引力场方程自然就成为研究宇宙结构和演化的有力工具。因此从广义相对论引力场方程诞生日起，就把宇宙论研究推向一个新的阶段。这个阶段的最显著特点是：宇宙再也不被认为是受原始外力推动而机械运行的一部机器，而是由内在因素促成其诞生、演化、发展的完整体系。不过爱因斯坦本人却仍然受到静态宇宙论思想的影响，开始的时候在他的场方程里人为地增加上一个称为宇宙因子的项，使他的场方程得到静态的解。如果去掉这个人造的因子，场方程就不可能有静态解，得到的宇宙模型不是在膨胀就是在收缩。总之，按照广义相对论引力场方程的推论，宇宙必定不能是一成不变的，而

是有着自身的演化。既然宇宙必定有演化，自然就应该有它的诞生和终结，也就是有演化的起点和终点，在这段演化史之外是其它的存在形式。

虽然在以往的年代里，人类曾经先后认为地球、太阳系或银河系就是宇宙，而这些也确实就是当时了解到的宇宙范围，当然也完全可以研究它们的形态、演化和发展，可是这种过分狭窄的含义又和现在谈论的宇宙有所不同。因为当时是对客观上确实已经观测到的遥远天体作了错误的估计，将之硬塞在狭小范围里，例如仙女座星系 M31 早就被人们看到，但被主观认为在银河系之内。而现在所谈论的宇宙在主观上没有任何限制，只要是观测所及的范围都包括在宇宙整体内。如果要问还有无限制，那只能来自客观。客观限制有两个可能的来源：一是光速限制，二是演化效应。被观测的天体愈远，它的退行速度愈高，极其遥远的天体就会接近光速退行，红移值会趋于无穷大，它的辐射将无法在地球探测到，这就是光速限制。另一方面，观测宇宙的深度愈大，看到的就愈是它久远过去的历史景象，如果它的历史本身就有限度，回顾自然无法超越，能够探测的宇宙深度也就有个尽头。这就是演化效应的限制。不过目前人类的观测离这两个限制的边界还相当远。

热大爆炸宇宙模型

关于宇宙的形成和演化，现在虽然有很多模型，但都不能认为主要方面已经有比较坚实的基础。但目前为多数天文学家所接受的热大爆炸宇宙模型，比其它模型能解释的事实更多一些，因此也更优越一些。

先不妨用设想来回溯一下宇宙过去可能的状况。既然宇宙目前在膨胀，倒推回去很自然得出：在久远的过去宇宙的尺度比现在小得多，宇宙间的物质密度比目前高得多，在宇宙形成的早期物质应该十分密集。由于物质与时空无法分离，根本不存在没有物质的时空，也不存在脱离时空的物质，因此在宇宙物质极端密集的时代，时空也缩到非常小的范围，整个宇宙也就高度浓缩到一个特别狭窄的区域。另一方面，在宇宙早期，现在分散于宇宙空间成为微波背景辐射的能量也会十分集中，使那时的温度远远高于目前的 2.7 开。现在已知，物质在异常高温和高密的条件下，不仅通常的天体不可能存在，甚至分子、原子的结构也要被破坏，在极端条件下连原子核也要被压碎成为基本粒子。由上述的回溯大概可以描绘一个宇宙的简略的演化过程：宇宙形成的早期温度和密度都高得令人难以想象，当时的物质形态最多只能包含基本粒子，或者甚至是现在还不了解的物质形态。随着宇宙的膨胀，温度密度都相应下降，到一定程度基本粒子开始结合，先后形成氢、氦等轻元素的原子核。温度密度的进一步降低导致组成原子，然后陆续发生宇宙物质分裂成团块的现象，逐次形成超星系团、星系团、星系，以至恒星、行星等等。

本世纪 40 年代末提出来的热大爆炸宇宙模型正是顺着上述的基本思路而形成并发展的。不过当时还没有发现微波背景辐射，宇宙早期处于高温状态是这种模型的假定，并且据此预言应该观测到今天尚剩余的温度。热大爆炸宇宙模型认为，宇宙起始于高温高密的“原始火球”，最开始甚至可能只是一个点。在原始火球里，温度与密度都高到无法想象的程度，甚至连基本粒子也难于存在，物质处于目前还不了解的状态。这种状态可能很不稳定，终于使原始火球发生爆炸，爆炸的范围涉及整个宇宙的全部物质和全部时空。爆炸使宇宙的空间尺度各部分同时膨胀，物质和能量的空间密度都逐步

降低，相应的温度也下降，与温度相应的热辐射光子的能量也随之降低，辐射的波长拉长。在温度下降、体积膨胀的过程中，大部分高能基本粒子湮灭转化为光子，余下的极少部分在能量降低之后结合成轻元素的原子核，再进而结合成原子。温度大为降低之后，物质才分裂成团块，进而逐步形成现在的宇宙状况。

热大爆炸宇宙模型从提出到现在已有近 40 多年的历史。刚开始的时候只有一个轮廓，后来结合高温高密物质状态研究以及基本粒子理论的研究，现在已经有比较完整的理论体系，对宇宙各个阶段的状况有了一些定量的描述，有些定量的结论符合观测得到的数据。在这个模型里，宇宙从诞生到今大致可以分为三个阶段，下面就简单地把整个过程叙述一下。

初始阶段：

大约在一百几十亿年前，原始火球开始爆炸，当时的温度和密度都很高，在爆炸发生的初期，物质所处的状态现在还不清楚，因为目前的物理学内容里还没有那么高温高密条件下的实际知识。爆炸发生之后 10^{-6} 秒，温度和密度已经下降了，物质就能以基本粒子动态平衡的形式存在，就是处于光子、中微子、介子、电子、极少量的质子和中子以及所有这些粒子的反粒子相互作用和转化的动态平衡状态。这种情况总共维持了 1 秒钟。爆炸发生后，在 1 秒钟内温度已经降到 10^{10} 开。这时正反粒子大都湮没了，只剩下光子、中微子以及极少量的电子、中子和质子。这里所谓极少量是与爆炸初期的各种粒子总数相比。实际上今天宇宙里存留下来的就是这个极少量。在第 1 秒末的时候，宇宙的尺度还很小，大约只有 5 光年左右，但是物质和能量的密度却很大，尤其是光子和中微子的能量按照当时的温度来算更是很高。若把全部能量都按相对论的质能转化公式折合成质量，则光子和中微子的能量折合的质量密度约为 10^5 克/厘米³，而电子、中子和质子等实物粒子的平均密度则约为 1 克/厘米³。在宇宙膨胀的过程中所有的尺度都按照同一比例增长，光子的波长也包括在内。热辐射特性是辐射的波长愈长相应的温度就愈低。由此可以得出一条很重要的结论：宇宙的温度和它的尺度成反比，宇宙膨胀得愈大它的温度愈低。这一点不仅在初始阶段如此，在其它阶段也莫不如此。

辐射为主阶段：

温度由 10^{10} 开降到 10^5 开的阶段，宇宙的尺度相应地膨胀了 10^5 倍，最后约达到 50 万光年左右的阶段称为辐射为主阶段，因为在这个阶段里辐射能量折合的质量密度一直高于实物粒子的平均密度。在宇宙膨胀的过程中，辐射能量的密度和物质粒子的密度虽然都在降低，但变化的规律不同，能量密度降低得要快一些。热辐射规律是辐射强度和温度的四次方成正比，而辐射强度的大小就代表着辐射能量密度的高低。既然宇宙的温度和它的尺度成反比，辐射能量的密度也就和宇宙尺度的四次方成反比。但是实物粒子的质量并不随宇宙的大小改变，在宇宙膨胀过程中它们只是分散到愈来愈大的体积里去，而宇宙的体积当然是和它的尺度三次方成比例。由此可知实物粒子的密度是和宇宙尺度三次方成反比。很明显在辐射为主阶段的末了，因为宇宙膨胀了 10^5 倍，辐射的密度应该降低 10^{20} 倍，而实物的密度应该降低 10^{15} 倍，两者由原来相差 10^5 倍变成相等，数值都约为 10^{-15} 克/厘米³。

这个阶段大约总共延续了 2000 年左右。大爆炸之后各阶段演化的时标和宇宙的物质密度直接相关，但总的来说膨胀的速度是越来越慢。辐射为主的阶段还可以细分为前后两期。前期大约共历时 30 分钟，宇宙里主要的原始元

素都在这一阶段时间里合成。在这个阶段的开始 100 秒时间里，温度下降到约 10^9 开，这种条件下几种最轻的原子核可以稳定地存在。于是质子和中子开始结合成氘，然后在氘的参与下，合成大量的氦₄，即普通的氦原子核。

元素的核合成到 30 分钟末尾就基本停止了，因为那时温度已降到 3×10^8 开，绝大多数质子和中子的动能已不足以使它们相碰撞而结合。用已知的基本粒子理论进行计算，在元素合成的这几十分钟里面，大约有 25% 的质子转变为氦原子核，还有少量氘以及极微量的氦₃、铍₇、锂₆ 和锂₇，其余的仍然是质子（氢原子核）。由于质量数为 5 和 8 的原子核极不稳定，所以元素合成跳不过这两道障碍，使得当时没有能合成更重的元素。氢和氦都是相当稳定的元素，就一直遗留到今天。热大爆炸宇宙模型对宇宙间氢氦含量的比例作出如此完美的解释，是目前其它任何模型不能与之相匹敌的，也是它受到普遍接受的重要理由之一。辐射为主阶段的后期只是一般的膨胀过程，没有什么特殊的事件发生。

实物为主阶段：

宇宙温度降到 10^5 开以下，实物的密度就超过了辐射的密度，宇宙的演化就要以实物的密度变化为主，整个宇宙的平均密度就大致与宇宙尺度的三次方成反比。这个阶段一直延续到现在，同样可以分为前后两段。在宇宙年龄小于 70 万年、温度高于 3000 开的前段，虽然辐射的密度已经比物质的密度低，但整个宇宙的温度仍然很高，实物粒子都在高速地运动着，具有很高的能量，电子、质子及其它原子核无法结合形成原子。直到这时宇宙间一直充满着快速运动的自由电子，它们和光子之间碰撞得很频繁，它们和别的物质粒子的碰撞也经常发生。这时候辐射和实物粒子之间、实物粒子相互之间仍然不断相互交换能量，使每种粒子分配到的平均能量相等，而且相互混杂成均匀的混合状态。整个宇宙间处在所谓热动平衡的条件下，温度完全相同，因此直到此时宇宙仍然处于严格均匀各向同性状态。同时由于光子和电子经常发生碰撞，根本无法顺利穿透宇宙空间，所以从大爆炸以来至此宇宙都是不透明的。如果当时有个观测者对宇宙进行研究，他大约只能看出 1000 光年的距离，因为那时光子平均走这样一段距离就要和自由电子发生一次碰撞。可是那时宇宙的尺度已经超过 1500 万光年，而宇宙的年龄已经近 70 万年。

实物为主阶段的后段自宇宙温度降到 3000 开以下开始。随着温度的下降，物质粒子的能量愈来愈小，电子从质子或其它原子核附近跑过，或与它们相碰撞时，再也没有足够的动能去摆脱正电荷的羁绊，于是就与它们结合成中性原子。至此宇宙间突然失去了大量自由电子，光子不再受到自由电子的强烈散射，宇宙就开始透明了。从此以后实物和辐射之间基本上就各行其是互不干扰了。实物不再受到布满宇宙的辐射影响，就可能发生非均匀性扰动或涨落而分裂成团块，然后发生引力集聚逐步形成各种层次的天体。与此同时，光子的波长仍然继续随宇宙尺度的膨胀而加大，辐射的有效温度随之而降低，直到现在余下的 2.7 开背景辐射温度。这就是原始火球的余温，完全均匀各向同性，充满整个空间无所不在。

严格讲，人们今天观测到的微波背景辐射并不直接来自热大爆炸的原始火球，因为在宇宙温度低于 3000 开以前宇宙并不透明。人们所能观测的只是在接近透明处的辐射，也就是 3000 开时发出的辐射。这就像根本无法直接观测太阳或恒星的不透明内部所发出的高能辐射，而只能看到它们表面的辐射一样。不过发出 3000 开辐射的宇宙早期景象已经与现代相隔了一百几十亿

年，这种辐射传到人类眼睛的时候，宇宙已经大为膨胀了。人们接受到的辐射是由远在一百多亿光年之外的地方发来的，所以有很大的红移，使人们看到的不再是 3000 开的高温而是 2.7 开的低温。从人类现在所处地位附近发出的 3000 开辐射早已传出去很远了，当然人类不可能再看到。

前面曾经提到过：人类能够探测的宇宙可能在客观上有一定限度。从上面的热大爆炸模型就可以理解何以会有这个限度，且不讲原始火球以前是什么状况人类无法观测，就以宇宙年龄 70 万年以前来说，视线已是无法透过。人们现在极目四望，最远只能达到宇宙在 3000 开时的景象，那就是现在已经被人们接收到的微波背景辐射。比微波背景辐射的来源近一些的大概是众多的类星体，再近一些是星系。这个顺序也同样是宇宙演化的历史顺序。

以上就是热大爆炸宇宙模型所提供的宇宙演化历史的大致图景。这个模型孕育于哈勃关系的回溯和反演中，后来结合了基本粒子理论等物理学理论，经过长期改进才逐步完善的。在上面几段里列举的宇宙温度、时代、物质构成和密度以及宇宙尺度等等，都是根据现有物理学知识推算出来的。它满足了宇宙均匀各向同性和星系退行的要求，解释了宇宙间氢氦含量的比例关系，而且在发现微波背景辐射之前，就预言应该有宇宙早期高温的余热，并估计约为 5 开的低温。正因为它能说明的观测事实最多而且准确预言了当时尚未观测到的现象，所以它才获得了多数天文学家的承认。但是它也有些问题没有解决。例如，根据这个模型计算，宇宙间氦的含量应该受元素合成时代物质密度的影响很大。如果当时密度高，氦转化为氢的机会就多，剩下的氦就比较少，反之氦就比较多。从现在实测的氦含量和按实测宇宙物质密度倒推回去计算的结果有较大的出入，原因在哪里现在还没有弄清楚，此外，这个模型只描述了宇宙的去，对将来的发展趋势没有进行预测。

即使只考虑宇宙演化的历史过程，热大爆炸宇宙模型也不是没有问题。最大的问题就是原始火球的起点。这个模型的起点是全部物质和空间缩在一个点，一个几何学上的点，一个密度、温度都无穷大的奇点。宇宙就要从这么一个奇点爆发产生。奇点在数学上司空见惯，但在物理上很难接受。很可能物质密集到一定程度以后，会形成比基本粒子更原始的物质状态，会出现新的力使收缩不能持续到底。不过从目前的物理学知识来看，还没有发现这一类情况。

开宇宙和闭宇宙

热大爆炸宇宙模型和其它一些爆炸模型都只描述了宇宙的去。稳恒态宇宙模型假定宇宙的样子任何时候看起来都和现在一样。真正可能描述宇宙今后发展趋向的还是要看物质与时空的进一步相互作用，也就是爱因斯坦引力场方程的进一步解。物质之间的引力是最终决定宇宙演化去向的唯一作用力。膨胀着的宇宙受引力的制动作用，膨胀速度一定会愈来愈小。速度变化的情况就可以由爱因斯坦场方程中求得解答。按照这个理论的分析计算，宇宙演化的去向有三种可能。第一种可能是：宇宙间的物质相当多，减速效果很明显，经过一段时间之后膨胀速度就会减到零，然后变成收缩，最后又缩成一个点。这种宇宙叫作闭宇宙。第二种可能是：如果宇宙间的物质过分少，减速作用永远不能制止膨胀，就会一直膨胀下去没有尽头。这种宇宙叫作开宇宙。当然还应该介于两者之间的第三种可能，处于临界状态，膨胀速度

逐渐趋向于零。这种宇宙叫作临界宇宙。以上这三种宇宙都可以采用热大爆炸模型作为它们的过去。从现在观测到的膨胀速度推算，它们开始的时间应该不相同。如果是开宇宙，起点应该最早，临界宇宙次之，闭宇宙的起点最晚。这三种情况又都比按哈勃时间所定的起点要晚。

三种宇宙今后的发展趋势之间的差别比过去演化历史的差别要大得多。开宇宙会一直膨胀下去，永无止境。将来星系之间的距离愈来愈大终于于稀疏到所有星系都成为真正的孤岛，或者最多只有邻近几个星系在相互强引力作用下尚未分离。临界宇宙里星系之间的距离最终会稳定下来。但是从爱因斯坦场方程来看这种状态本身是不稳定的，只要稍有误差或扰动就会变成另两种之一。闭宇宙在达到最大宇宙尺度之后会由膨胀变为收缩，而且收缩的速度越来越大，最后会从相反方向回溯演化的历史进程而变成高温高密的火球，或奇点。

对于闭宇宙还存在另一种可能性，在收缩到火球或奇点之后可能又开始新一轮新的大爆炸。甚至可能在现在这次大爆炸以前已经经历过多次，今后还要重复多次。这种宇宙叫做振荡宇宙。当然每次收缩到极小时，过去的一切痕迹都会消失了。宇宙对它的上一次轮回没有丝毫记忆。这里虽然说收缩到最后成为奇点，很可能实际上并不形成奇点而是收缩到一定程度后巨大的引力转化为巨大的斥力，又形成新的大爆炸。不过这在目前还只能是猜想。

上面虽然说了几种宇宙，但客观存在的宇宙只可能是其中的一种。从实际观测中判断宇宙类型的努力，到现在还没有得到十分明确的结论。理论计算表明，要使宇宙闭合，现在宇宙的物质密度应该大于 5×10^{-30} 克/厘米³。然而目前有把握的物质密度，只不过约为此值的 1/10。另外从目前测定氦含量推算出来的结果也倾向于开宇宙。可是从遥远星系和类星体所统计的减速情况来看，又似乎可能是闭宇宙。到 1980 年这个问题的解答里忽然又异峰突起地冒出一个中微子的质量之谜。前面谈到宇宙的物质成分时，都是把光子和中微子看作一类，都按辐射来算，因为按一般理解两者都以光速运动并且都没有静止质量，它们之间的重要差别之一在于和实物粒子的相互作用：光子比较容易受到吸收和散射，而中微子则不大容易和实物粒子相作用。在宇宙演化历史中，宇宙在相当早期就对中微子透明了，直到 3000 开低温以后才对光子透明。如果中微子没有静止质量，这点差别对宇宙演化的影响微乎其微。按计算，到大爆炸初始阶段结束的时候，中微子的总数约为质子、中子和电子总数的 10^9 倍，到现在每立方厘米里面平均还有几百个，和充满宇宙空间的微波背景辐射光子的数量差不多。1980 年有两组实验显示出中微子可能存在静止质量的迹象，有人估计约为电子质量的十万分之一，有人则估计可能达到电子质量的 2%。不论哪一种估计更正确，只要中微子存在静止质量就是翻天覆地的大事。即使中微子的静止质量只有电子的十万分之一（ 10^{-5} ），宇宙间中微子的质量总和就要高出其它全部物质粒子总和的 5 至 10 倍，因为质子和中子的质量不到电子质量的 2000 倍，而中微子的数量要高出它们 10^9 倍。这样一来宇宙间的主要物质密度就要由中微子来控制，因此今后宇宙演化的过程就只受中微子左右，实际上过去的历史也应该受到中微子的极大影响。

