

应用物理概論

扬州师院物理系

一九九一年二月

第一讲 天文学、宇宙学常识

邓桂昌

§1 概述

研究天文、宇宙的意义,天文学的主要分支及内容

§2 太阳系

概况,太阳的演化,大质量恒星的演化

§3 我们在宇宙中的位置及天球、星座

银河系,河外星系,天球与星座

§4 时间与空间

狭义相对论的时空观,广义相对论的基本概念,史瓦西空间的主要性质,关于引力波。

§5 宇宙的大爆炸理论

有限无界的静态宇宙模型,几种宇宙模型简介,重要的天文观测,大爆炸理论

第一讲 天文学、宇宙学常识

1 概 述

一、研究天文、宇宙的意义

天文学是现代六大基础自然科学(数、理、化、天、地、生)之一。而天文学又可谓是最古老的一门科学。太阳、月亮、星星最能引起人们的好奇心和求知欲;而“天有多大?”之类的问题又最易引起人们的思索。不仅如此,天文学从一开始就有着实际意义,例如测定时间、季节和确定位置、方向等。难怪在中国古代说一个人有学问,就有所谓“上知天文,下知地理”之说。

在人类科学的发展过程中,天文学还直接促进了其他科学的发展,如物理学中的从开普勒三定律到牛顿万有引力定律就是一例。天文学在揭示宇宙奥秘、探索基本自然规律上起了重要的作用,因而天文学和哲学尤其是和形成科学宇宙观更是密不可分。

但是研究天文学的意义还远不止这些,下面再举几个例子。

1989年12月13日中央人民广播电台播发了一条消息,说有一颗小行星不久将会撞击地球,并造成巨大的灾难,一时间引起人们的极大不安。第二天电台又对这一条消息作了更正,其他的报纸对这一问题也作了一些说明和解释。我们在此不去讨论这条消息本身的具体内容,只是从这一事件上,我们可以看到宇宙现象及天文学知识与我们人类的生活是密切相关的。

科学家早已证明,太阳黑子的活动对地球有着很大的影响。黑子的活动周期大约是11年,从而造成地球上重大的自然灾害如大旱、洪水、地震等也有着大约相同的周期。

研究者根据大量的统计资料还证明了,在某种月相的前后两天人们最容易发生交通事故。至于九星联珠,或排成大十字对地球会有什么影响,都需要用天文学知识来处理。

再者人类活动范围的不断扩大也是一个必然规律。到1969年人类已首次登月成功,在月球表面留下了地球人的足迹。首次登月者,在月球上停留21小时36分钟20秒,带回岩石、土壤样品22公斤。到1972年已六次登月成功。最近报道,苏联有两名宇航员结束长达166昼夜的宇宙飞行,于1990年2月19日返回地球,也就是说他们在宇宙空间生活了五个半月的时间。在下一世纪,人们计划登上火星,并开始在地球外建造长久性的人类生活区,小的可容纳几百人,大的可容纳几万,几十万人。犹如一个中小城市。至于在月球上、火星上建设实验室也早已提到议事日程……这一切事实表明,我们现在已经处在一个“冲出地球,开发宇宙”的新时期,而进入走向宇宙的新时期,没有天文学、宇宙学的知识是绝对不可能的。

我们再看得远一点。考虑一下，人类发展的前途和命运。恩格斯在《自然辩证法》中谈到物质的变化时，说了一段话：“它在某个时候以铁的必然性毁灭自己在地球上的最高花朵——思维着的物种，而在另外的某个地方和某个时候又一定以同一种铁的必然性把它重新产生出来。”这段话的上半句是说地球上智慧的生命——人类，一定要毁灭。不过对于这一问题，后来有两种解释。一种认为地球上的人类的确是要彻底灭亡；另一种则认为地球发展到一定的时候，在其上面不会再有任何生命这是确凿无疑的自然规律，但是现在生活在地球上的人类却可以转移到宇宙中的其他地方延续下来。即人类不是灭亡而是搬迁。人类是灭亡还是搬迁，这完全取决于科学技术发展的速度和水平。而其中天文学的发展又是一个关键。

介于在太阳系内航行和彻底脱离地球之间，还有一件大事也是天文学所要研究的内容，那就是在宇宙中寻找地球人的知音，与地球以外的文明世界取得联系。

总之，随着人类的进化和发展，天文学这门古老的科学将变得越来越重要。

二、天文学的主要分支及内容

天体测量，是研究和测定天体在空中的位置，以及它们的位置随时间而变化的规律的学科。如人们常谈的“星星离我们有多远”就属这一学科。

天体力学，研究天体的形态及天体之间的相互作用和运动状况。如“小行星会否撞击地球”就由这一学科的研究来回答。

天体物理学，用物理学的理论、方法和技术来研究天体的形态、结构、物理性质、化学成分和演化规律的学科。其中用相对论理论进行研究的称为相对论天体物理学。近几十年来发展很快。根据天文观测方法的不同又可分为许多不同的分支学科，其中最古老的可称之为光学天文学，就是用可见光进行天文观测获取宇宙信息的学科，已有几千年的历史。但到本世纪，观测手段有了飞快的发展，特别值得一提的是无线电波的利用，即五十年代兴起的射电天文学，这一分支学科诞生不久，在六十年代，天文学上就获得了有重要意义的四大发现，脉冲星、3 K微波背景辐射、星际有机分子、类星体。加之红外线、紫外线、X射线、γ射线的利用，人们很快就形成了全（电磁波）波段天文学。但是电磁波仅仅是人们获取宇宙信息的四条渠道中的一条。另外三条分别是宇宙射线、中微子和不久就会开发利用的引力波。

根据研究对象的不同，天体物理学又可分为：太阳物理学、太阳系物理学、恒星物理学、星系天文学、天体演化学（各种天体、天体系统的起源、发展和衰亡）、宇宙化学（宇宙物质的化学组成及演化规律）、空间天文学（利用人造卫星及各种探测器、航天器，在高层空间及大气外层空间进行观测和研究）等等。

关于宇宙学下面还要专门介绍。在这里再重点谈一谈天体生物学，它是研究地球以外的天体有无生物存在的学科，是天文学的一个分支学科，也是天文学与生物学的边缘学科。在六十年代人们在星际空间发现了羟基（OH）、氨（NH₃）、水（H₂O）和甲醛（H₂CO），到1979年已发现五十多种分子，其中大多数是有机分子。大量有机分子的发现，使宇宙还有生命存在的结论已为大多数人所接

受。进一步研究发现这些星际分子都是地球上的生命不可缺少的那一类，似乎碳是组成这些有机分子的关键。既然这样的有机分子广泛分布于宇宙空间，而地球上的生命也是在这些有机分子的基础上进化而来的，那么其他星球上的生命很可能也沿着这样的途径进化。它们很可能与地球上的生命一样，都是氨基酸等构成的同宗后代。

2 太 阳 系

一、概 况

1、首先我们对太阳系中的空间尺度要有一个明确的概念。“坐地日行八万里”是说地球的周长为4万公里；地球半径为6371公里，光每秒钟可以绕地球转7圈半（光速30万公里/秒）。地月平均距离为384,400公里，合1.28光秒。太阳的半径为695,900公里，合2.3光秒，即比地月距离还要大。而日地平均距离在天文学上为距离单位，就称为“天文单位”，等于14,960万公里，合8光分又19光秒。

至于太阳系中，各行星到太阳的距离可由提丢斯（J. D. Titius, 1729—1796）定则帮助记忆。据说德国的一位物理教师提丢斯，在给学生们讲述太阳系中当时已知的六大行星到太阳的平均距离时，学生们往往记不住这些数字，1766年他想出一个办法：先在黑板上写出一列数字，第一个为零，第二个为3，下面后一数为前二数的二倍：

0 3 6 12 24 48 96 192

每个数加上4再除以10就得到：

0.4 0.7 1 1.6 2.8 5.2 10.0 19.6 （天文单位）

水 金 地 火 ? 木 土

在1772年由波德公开发表并逐渐传开。在1781年赫歇耳发现天王星，到太阳的距离为19.2天文单位。这就使许多人对提丢斯定则发生了兴趣，纷纷进行研究。如1800年由H. W. M奥伯斯等七人成立“天空巡警队”专门对2.8天文单位附近进行搜寻这个未知行星。1801年元旦，从意大利传来了好消息，在2.77天文单位处发现一颗行星，并命名为谷神星。但进一步的测量发现它很小，直径不过1000公里，不能与大行星为伍。于是搜寻工作继续进行。1802年又发现一颗，称为智神星；1804年发现婚神星；1807年发现灶神星；不过都是小行星。到1887年发现的小行星为264个，而到1982年正式命名编号的已达2297个。于是2.8天文单位，填上了一个“小行星带”。形成小行星带的原因，成了天文学中的一个研究课题。典型的理论有爆炸说及难以凝集成大行星说。值得一说的是，行星的卫星系统中，大部分顺行规则卫星到行星的距离也遵从提丢斯定则，但是海王星、冥王星及少数卫星不遵从该定则，于是这一定则

有无内在的原因也是一个未解之谜。

日冥距离为40个天文单位，合5.5光时，是最保守的太阳系领域的大小。

2. 其次对行星轨道运动的特征也要有一个大概的了解。

行星公转轨道都是接近正圆形的椭圆，只有水星和冥王星的轨道偏心率大，分别为0.206和0.25，其余行星的轨道偏心率都小于0.1，这可称为近园性。

行星公转轨道几乎都在一个平面上，我们选取九大行星轨道面的某种平均值称为“不变平面”，九大行星除水星和冥王星的公转轨道平面与不变平面的交角分别是 $6^{\circ}17'$ 和 $15^{\circ}33'$ 之外，其余七个的倾角都小于 $2^{\circ}2'$ 。太阳的赤道面与不变平面的交角不到 6° ，与不变平面最接近的是木星轨道面。这可称为共面性。

行星绕太阳转动的方向都是自西向东，太阳自转的方向也是如此，这可称为同向性。

在九大行星中，有七个行星的自转方向和公转方向是顺向的，只有金星为逆向自转，天王星为“躺着”自转。

地球的赤纬交角不等于零，使地球上明显的春夏秋冬四季。赤纬交角为 23° ($23^{\circ}27'$)，反映在地球上，使回归线为纬度 23° 。

3、再其次还要知道几个星球的主要性质。

(1) 太阳：质量为地球的33万倍，占太阳系总质量的99.865%。是一团炽热的气体，平均密度为 1.409克/厘米^3 。按质量计，氢约占71%，氦27%。表面温度不均匀，几千度（黑子）到几十万度（日冕）。中心温度高达1500万度，压强约 3×10^{11} 大气压，密度达 160克/厘米^3 ，进行着由氢核到氦核的聚变反应。太阳表面每秒向外辐射的能量约 9×10^{25} 卡。太阳黑子的活动周期为11年，对地球气候的影响很大。

(2) 地球：值得我们骄傲的首先是在地球上我们有一个大气保护层。地球表面的大气压强约为1巴 ($\approx 1\text{公斤/厘米}^2$)。成份中含有21%的氧气。关于大气层的厚度，因为它没有一个截然的边界，故无法给出一个十分精确的数据，大体说来，在1000公里以上是较稀薄的氦离子层，再往上是更稀薄的氢离子层，直到几万公里处，大气层才与行星际空间相融合。地球大气使地表温度提高了几十度从而达到平均温度约 20°C ，并且变化幅度不太大（最高处达四十几度，最低处达零下七十几度）。厚厚的大气层基本上挡住了射向地球的流星和高能粒子（当然还有磁层的功劳）。而在20~30公里处的臭氧层，又大量吸收了太阳射向地球的紫外线，保护了地面生物。

再一个值得我们骄傲的，就是地球表面的水。地球表面的70%以上被海洋所覆盖。若把地球表面削平，并使冰雪融化，则地球表面各处的水深可达3000米左右。

另外地球的平均密度为 5.52克/厘米^3 ，表面重力加速度为 9.8米/

秒²，地壳的平均厚度为19公里，洋底地壳厚约11公里。

(3) 月球：平均密度为3.34克/厘米³（为地球的 $\frac{3}{5}$ ）；表面重力加速度为1.62米/秒²（约为地球的 $\frac{1}{6}$ ）；不存在任何形态的水；完全没有大气。表面覆盖有一层厚薄不一的尘土，称为“月尘”。月球物质的化学成份和地球上差不多，不过是富铁的。表面昼夜温差很大（127℃~183℃）。

(4) 金星：表面有又厚又密的大气层，CO₂占97%，还有N₂、O₂、CO和H₂O；表面大气压约为地球的100倍；温度高达480℃，并基本上无变化。地势较平坦，有山脉也有平原。

(5) 火星：有稀薄的大气层，CO₂占96%，及N₂、Ar（氩）、CO、O₂、H₂O等。表面压强约为0.007P_地（相当地球上空30~40公里处的压强）。大气中有云，即干冰云（CO₂雾）、水冰云、尘埃云。

赤道处最高温度约20℃，两极处最低温度达-139℃。因赤纬交角为23°59'，故有明显的四季变化。

两极有水冰，又有干冰。水冰若全部融化，均匀分布在外表面，可形成10米厚的水层。

表面除高山、盆地、峡谷、沙漠之外，还有干河床。主要物质为硅酸盐、铁和金属氧（？）化物。火星沙漠的照片与地球沙漠差不多。

1976年探测器在火星着陆后，认为“大概没有生命”。对于生命未说，火星的条件与地球相比虽然是恶劣得多，但与月球、金星相比又要好得多。它是地球人继月球之后第二个飞往的星球。

(6) 太阳系的卫星世界也是大有天地的。现已探测到的天然卫星如下：地1，火2，木16，土23，天5，海2，冥1。

木卫一上火山活动十分剧烈，表面还有一层以二氧化硫为主的稀薄的热大气层

木卫三，表面除岩石和硅矿物之外，大都覆盖着冰及冻结的氨、甲烷、盐和硫磺等物。

土卫六，有着十分浓厚的大气层，主要成份为氮气（98%）。在云层中还发现有氢氰酸分子，这是生命前分子。有人认为可以在土卫六上找到地球早期生命开始的某些线索。

海卫一的表面也可能有大气。

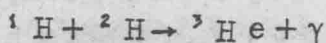
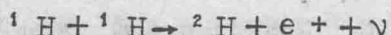
二、太阳的演化

我们的太阳起源于早期弥漫在宇宙空间的气态物质，由于气云分布不均匀和自引力的作用，开始收缩，并且收缩越来越快。不过随着收缩，气态物质的引力势能变成热能而升温、升压，遏制了收缩的过快进行。但表面热辐射的存在，使之不可能达到平衡状态。随着收缩的进行，气云的密度、温度、压力不断增加，到一定的程度，就把氢原子都电离成氢离子，并在外部形成球状的轮廓。当达到2~3千度时，便向外辐射较强的红外线。总之太阳的这一阶段收缩较快，大约有几百万年。可称之为星际气体云阶段。目前在天文观测中，除已发现有大量存在的星际间气态

物质外。确实已看到氢原子云、氢离子云及球状低温天体、红外星等。证明这一过程是真实的。

当温度达到 $2\sim 3$ 千度时，内部压力接近和引力相抗衡，从而进入慢收缩阶段。由于热辐射总在进行，引力总在起作用，使得收缩也总在进行，密度、温度、压力在不断增加。太阳在这一阶段约几千万年，可称之为原始星阶段。

当原始星内部达到 700 万度，便开始发生核聚变反应。首先是中心部分的氢核(H)聚变成氦核(4He)，具体反应为：



即 $4 {}^1H \rightarrow {}^4He + 2 e^+ + 2 \nu + 3 \gamma$

其中 e^+ 为正电子、 γ 为光子、 ν 为中微子，也就是四个氢核变成一个氦核和两个正电子、两个中微子、三个光子。聚变反应由中心向外慢慢发展。聚变放出大量的能量，形成高温、高压，与引力相平衡，太阳不再收缩。表面不断辐射出去的能量由内部聚变产生的能量来补充。这一阶段比较平稳，也比较长，称为主序星阶段，太阳的此阶段大约有 100 亿年，目前已度过近 50 亿年，估计还能维持 50 亿年。

在太阳中心，由 H 核聚变成的 He 核，在目前还不能累变放能。但随着质量的不断增加，从而密度、温度越来越大，当达到 1 亿度的时候， He 核“点火”，开始聚变成碳(C)核，并放出大量的能量，同时也加强了太阳中间部分 H 核的聚变反应，释放出的大量能量使太阳的体积猛增几千倍，表面积的迅速增加，造成表面温度的下降，但总的辐射能量依然增加。太阳此时成为一个红巨星，此阶段大约有 10 亿年。

从理论上讲，太阳的核聚变能是有限的，因为铁(Fe)核是放能聚变的极限而实际上，太阳上的聚变不会等到都成为铁核就停止了。聚变停止，没有能量的来源，强大的自引力，将使太阳不断收缩，当收缩到目前地球半径的 2 倍左右，太阳中电子的简并压力将和引力相平衡，便收缩停止，从而太阳成为一颗白矮星，密度约为每立方厘米上千吨。太阳不断降温，直至再也没有光和热向外辐射。整个太阳系一片黑暗。这就是大约 60 亿年之后，太阳的归宿。

三、附录 大质量恒星的演化

若恒星的质量大于 1.3 个太阳质量，则在演化后期核聚变反应停止之后，电子简并压力将抗拒不住强大的自引力，恒星将进一步收缩。高密、高压将迫使电子和质子反应而变成中子。



若恒星的质量还不算太大，如小于太阳质量的 $2\sim 3$ 倍，则中子的简并压力就可以和自引力相抗衡，使恒星停止收缩，从而成为一个比较稳定的中子星，其密度可达每立方厘米几亿吨，相当于原子核的密度。半径只有十公里左右。若恒星的质量再

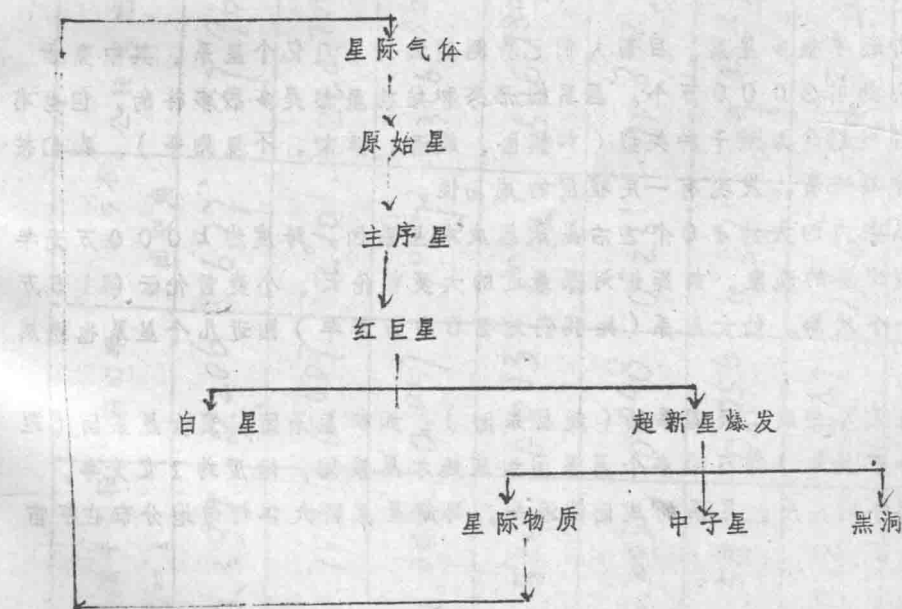
若恒星的质量再大，中子的简并压力也抵抗不住自引力收缩时，恒星将坍缩到“视界”之内而形成一个黑洞 (black hole)。任何一个物体一旦落入黑洞就再也无法逃出来。就是光，也不会从黑洞内发射出来。黑洞的边界也就是人们视野的边界，故称之为“视界”。而“黑”字也正是用来说明它不可能发出任何光。但是在黑洞的外部空间，却有着极强的引力场，人们正是根据这种强引力场的各种效应，来寻找宇宙中的黑洞的。

另外，对于大质量恒星，在停止聚变之后，引力收缩的速度是很快的。尤其是在克服了电子的简并压力之后，大量的电子突然消失，恒星物质几乎以近自由落体的状态在强大的引力场中迅猛坍缩。当遇到中子简并压力的抵抗时，就会产生强烈的冲击波，使外层物质猛烈地向星际空间抛射，这就是超新星爆发。

超新星爆发的时候，亮度急增几千万倍以至一亿倍以上。经过几个月的时间才慢慢暗下来。被剧烈的爆发抛向星际空间的物质，又成为弥漫的气体云，它们将再度进行上面所说的恒星的演化过程，而形成下一代的恒星。当然下一代恒星的元素成份与上一代恒星会有一些不同。超新星爆发过后，在中心将由于所留物质质量的不同而形成中子星或黑洞。

我国宋朝宋仁宗时 (1054年) 曾较详细地记载了一颗“客星”：“开始23天白天可见，后经22个月肉眼才看不见”。按记载的位置，正是现在称之为蟹状星云的地方，而在其中果然观察到一颗中子星，也就是说，所记载的就是一次超新星爆发。

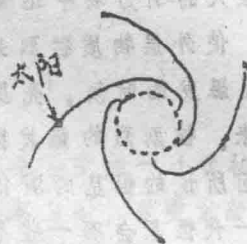
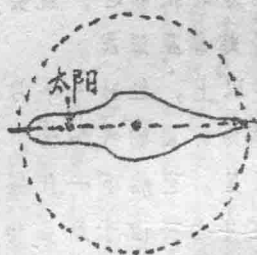
现把恒星演化小结如下：



3 我们在宇宙中的位置及天球 星座

一、银河系

我们的太阳是银河系中的一颗普通恒星。银河系大约包含 10^{11} 颗恒星。银河系的主体称为银盘。其形状犹如一个铁饼，直径约 10 万光年，中间厚度约 1 万光年。我们的太阳在银河的对称面附近，距银心 3 万光年，距边缘不到 2 万光年。



目前已发现银河系有四条旋臂，我们的太阳在猎户臂的内侧。在银盘外围有一个直径约 10 万光年的球状银晕，它是由稀疏分布的老年恒星和星际物质组成。

我们的太阳到冥王星的距离约 5.5 光时，而距太阳最近的恒星，半人马座 α 星，和太阳的距离为 4.3 光年，几乎是太阳和冥王星距离的 7000 倍。当然在银心附近恒星的密度要比我们这里大得多。

二、河外星系

银河系以外还有很多星系。目前人们已观测到大约 10 亿个星系，其中亮于 20 等的星系大约有 2000 万个。星系的形态和结构虽然是多种多样的，但也有一定的规律，并可划分为若干种类型（如椭圆、旋涡、棒旋、不规则等）。我们按星系在空间的分布来看，发现有一定程度的成团性。

包括银河系在内的大约 40 个左右星系组成本星系团，跨度约 1000 万光年在内部还有形成次群的现象，如距银河系最近的大麦哲伦云、小麦哲伦云（15 万光年）等组成一个次群。仙女星系（距我们约 200 万光年）附近几个星系也组成一个次群。

若干星系团又可组成二级星系团（超星系团）。如本星系团、室女星系团（距我们约 7000 万光年）等 50 多个星系团组成超本星系团，跨度约 1 亿光年。

大于 1 亿光年的尺度，星系的成团性消失，即超星系团大体均匀地分布在宇宙空间。

三、天球与星座

1. 以地心（或日心）为中心，其他大体都投影在其上的假想的大球，即为天球。人们经常直观而又方便地使用地心天球。

行星	轨道半长径 $\text{AU} = 1$	偏心率	轨道与不 变面交角	公转周期	赤乳交角	质量 $\otimes=1$	体积 $\otimes=1$	平均密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	自转周期
水	0.387	0.206	$6^{\circ}17'$	87.969天	$<28^{\circ}$	0.0554	0.056	5.4	58.6天
金	0.723	0.007	$2^{\circ}10'$	224.701天	177°	0.815	0.86	5.2	243天
地	1.000	0.017	$1^{\circ}37'$	356.256天	$23^{\circ}27'$	1.000	1.000	5.5	$23^{\text{h}}56^{\text{m}}45.1$
火	1.524	0.093	$1^{\circ}42'$	686.980天	$23^{\circ}39'$	0.1075	0.15	3.95	$24^{\text{h}}37^{\text{m}}22.6$
木	5.203	0.048	$0^{\circ}23'$	11.862年	$3^{\circ}5'$	317.9	1316	1.33	$9^{\text{h}}50^{\text{m}}.5$
土	9.54	0.056	$0^{\circ}57'$	29.458年	$26^{\circ}44'$	95.16	750	0.70	$10^{\text{h}}14^{\text{m}}$
天王	19.2	0.047	$1^{\circ}6'$	84.014年	$97^{\circ}55'$	14.63	66	1.3	$(24 \pm 3)^{\text{h}}$
海王	30.06	0.008	$0^{\circ}46'$	164.793年	$28^{\circ}48'$	17.2	57	1.7	$(22 \pm 4)^{\text{h}}$
冥王	39.5	0.25	$15^{\circ}34'$	247.686年	60°	0.0024	0.009	1.5	6.3867天

恒星（除太阳以外）的相对运动，对其在天球上的相对位置影响极小。主要原因是恒星距离地球太远。设有两颗距地球100光年的恒星，在天球上有横向相对速度，设为100公里/秒，则经过5000年它们的角位移还不到1度。也就是说除太阳之外的恒星，在天球上的相对位置基本上是不变的。

在地球上，人们把其表面划分成许多国家和地区。在天球上，人们也划分出八十八个天区，并根据各天区所含星座的图样给星座和天区起了名，如仙女、天鹅、天鹰、大熊、小熊、飞马、双鱼等。二月份最亮的几个星座为猎户、大犬、小犬、双子等。不同的国家和民族都有许多关于这些星座的、美丽而动人的神话。

由于太阳及太阳系的其他行星和月亮距地球较近，至使太阳在天球上作简单而又有规律的运动。其他几个行星和月亮则在天球上作较为复杂但仍然是有规律的运动。

2、由于地球的自转（从西向东）：使天球有视转动，由东向西。根据天球转动之轴——天轴，可以在天球上标出北天极、南天极、天赤道等。在地球的北极，赤道或其他某处所看到的天球的周日视转动并不相同。但根据北天极（附近有北极星）的高度（角度），就可以知道观测者所处的地理纬度。

3、由于地球的公转（与自转同向）：太阳在天球上从西向东运动，一年一周轨道称为黄道。黄道所穿过的十二个天区称为十二宫，分别为：双鱼、白羊、金牛、双子、巨蟹、狮子、室女、天秤、天蝎、人马、摩羯、宝瓶。太阳所在天区的星星都被太阳强烈的光芒所掩盖，若发生日全蚀，那么太阳所在天区的星星就会显示出来。而在天球上，与太阳所在天区的对面（相差 180° ）的星星，在半夜零点正好位于我们的头顶。不难推知，夜间的星空图，每月西移 30° ，或者说，晚一个月但提早两小时，其星空图相同。根据太阳在天球上的运动，不难理解太阳大于恒星日，每天差 $3'56''$ ；在地球上某处看星空就知道时间，看时间就知道星空；而看星空和时间就知道观测者所处的地理位置，这正是大海航行确定位置的一个重要方法。

4 时间与空间

一、狭义相对论的时空观

在此我们简单介绍一些狭义相对论中的重要结论，而不做具体的论证。设有两个惯性系，彼此有相对速度，比如地面S和一系列匀速运行的列车S'。在S'的一节车厢的两头各有一个人，他俩准备用手枪进行决斗。如果车上的人认为他俩同时开枪则地面的人就认为他俩不是同时开枪，而是车厢后部的人先开枪；同样如果地面的人认为他俩同时开枪，则车上的人就认为他俩不是同时开枪，而是车厢前部的人先开枪。S和S'（上的人——以后常省略）的看法，哪个对呢？狭义相对论认为，都对！这就是同时性的相对性。

如果在S和S'中各有一只结构完全相同的钟，则S将认为S'的钟走得慢，同样

S' 也认为 S 的钟走得慢。还是都对，这就叫动钟慢，也叫时间膨胀。如果在 S 和 S' 中各有一把沿运动方向放置的尺，他们都认为自己的尺子长1米，则将都认为对方的尺比自己的尺短，即不到1米。这就叫动尺短，或叫长度收缩。人们根据钟慢、尺短效应，向狭义相对论提出了有趣的时钟悖论及长度悖论等问题，狭义相对论都能给予很好的解释。

如果 S' 相对 S 的速度是20万公里/秒，在 S' 中又向运动的前方打出一颗炮弹该炮弹相对 S' 的速度设也为20万公里/秒，则 S 认为这颗炮弹运动的速度约为28万公里/秒。即20加20，小于30。

二、广义相对论的基本概念

人们早已发现，任何物体的惯性质量等于引力质量。不过遗憾的是对这一现象的含义及推论却没有作更深入的思考。直到爱因斯坦，才认真地分析研究了这一问题，并得出真实引力场与惯性力场在小范围等效这一结论。对此，不难通过所谓的爱因斯坦电梯加以理解。

如果把狭义相对论的效应，用于匀速旋转的圆盘上，就可以得出如下结论：转盘上的“居民”认为在圆盘的不同位置，时间流逝得快慢不同；在圆盘面上，欧几里德几何不成立。我们称这种现象称之为时空的弯曲。尽管在转盘外的人可以说，在转盘上存在惯性力场；而圆盘上的居民却完全可以说，他们生活在一个不均匀的引力场中。于是从旋转圆盘便可得到一个重要的启示：引力场造成了时空的弯曲。（进一步的观念是：引力场和时空弯曲，是从不同角度讲述的同一个问题）。

引力场的强弱变化，是由物质的分布和运动所决定的；也就是说，物质的分布和运动决定时空性质。爱因斯坦经过近十年的艰苦探索，终于得到了联系物质的分布和运动与时空性质的方程，即所谓的爱因斯坦场方程。通过求解这个场方程，人们就可以得知各种时空的性质。

三、史瓦西空间的主要性质

球对称物质外部的时空，称为史瓦西外部空间。许多星体，包括地球和太阳，外部的时空，都可以做为这种空间。人们通过求解爱因斯坦场方程，已经比较全面地认识了这种时空的性质，下面予以简单介绍。

若用 r 表示空间的径向坐标，当 $r \rightarrow \infty$ 时，引力场的强度趋于零。或说在无穷远处，引力场不存在，时空变成平直的，即成了狭义相对论中惯性系的时空。

我们把静止在惯性系中的物体（或时钟）自己认为自己度过的时间称之为固有时，它具有重要的物理意义。如果我们把一个物体从无穷远平直时空处移到里面引力场不为零的地方，则和在无穷远处相比，其固有时流逝得要慢；并且越向里，引力场越强，固有时越慢。也就是说，只考虑时空弯曲效应，一个基本粒子或一个人

处在地球表面的不同高度，或说楼上楼下，衰老的速度不同，楼下衰老得要慢一些。当然对于地球表面这种弱引力场，这一效应是十分微小的，若有人想用这一效应来延长寿命，则可以认为不会得到一点有意义的效果。

这种空间具有球对称的性质。我们可以沿径向，由里向外作出一个个由小到大的球面，其中每一个球面都和三维平直空间中的某一个具有一定半径的球面完全一样。

设史瓦西空间中，有一个和半径为8的球面完全一样的球面，外面又套着一个和半径为9的球面完全一样的球面，然而这两个球面之间的空间距离却不是1！，而是大于1。

根据广义相对论的理论，推导出的史瓦西空间所具有的上面这些性质，已由“引力红移”、“光线在引力场中的偏折”、“水星近日点的进动”及“雷达回波的时间延迟”等实验所验证。

四、关于引力波

爱因斯坦早在1918年就从理论上预言了引力波的存在。尽管目前人们还没有在实验上直接探测到这种波（间接证明引力波存在的证据还是有的），但是绝大多数物理学家坚信引力波是存在的，并充满信心地认为，在不久的将来人们就可以直接探测到并利用引力波。

人类观测宇宙获取信息的四条渠道为：电磁波（包括可见光）、宇宙射线、中微子、引力波。

人们研究和掌握引力波的第一个重要目的就是获取宇宙信息，深入认识宇宙。由于引力波似乎不会被屏蔽，所以通过引力波，可以取得天体内部以及天体后面宇宙空间的大量信息。

人们掌握引力波的重大意义，目前还很难准确预计，可以想象到的有：（1）引力波通讯；（2）引力能量的利用；（3）物体运动状态的确定；（4）引力的屏蔽问题；（5）引力场的控制即时空的控制。（不同星球上的文明生物之间相互往来，其最大的困难就是时空障碍）。

一、有限无界的静态宇宙模型

物质的存在使时空不再是平直的，即时空要发生弯曲。但在一般情况下，这种相对平直时空的偏离，即时空的弯曲是很小的。在太阳系，最大的相对偏离只有 10^{-6} ，地球表面为 10^{-9} 。因此，在一般情况下这种偏离所产生的影响不大。但在宇宙空间，一些大质量（小体积）天体，将引起时空的强烈弯曲。使时空出现许多新的性质（可参阅有关黑洞的介绍）。另外，在大尺度上，这种弯曲效应也将变得非常重要。例如在地球表面的一个小范围，如对一个湖面，可以认为是平面，这并没有什么差错；但推广到大范围，还认为大地是无限大的平面就大错而特错。同样，对于宇宙大尺度空间的性质，若不考虑这种弯曲在大范围上的积累效应，也就无法正确认识宇宙的性质，无法建立正确的宇宙模型，也就没有科学的宇宙学。

广义相对论的一个重要应用就是在宇宙学上。爱因斯坦正是根据广义相对论的基本思想，并人为地又引入一个非常严格的条件，在1917年提出了有名的“有限无界的静态宇宙模型”。尽管后来的天文观测证明“静态”是错误的，而对是否有限目前尚无最后的结论（取决于宇宙中的物质密度）。但是这一模型的提出，对宇宙学及人类思想史都有巨大的影响以至科学界公认这一模型的提出标志着“近代宇宙学”的开始。下面我对这一模型作一简单的介绍，要求大家了解而不是迷信它的结论。

宇宙空间是三维的，在其中任一点都有三个互相垂直的方向，而每个方向又有正反两个方向，这样就共有六个方向，若沿这六个方向不断延伸，后来它们将会交于一点。再打个比喻：若有一个可以看到无限远的理想望远镜，当你不断移开障碍物时，最终看到的是自己的后脑勺。或说你从空间任一点出发，沿任一固定的方向前进，最后就又回到出发点而不会遇到空间的边界，即宇宙空间是无界的；而当又回到出发点时所走过的路程，总长度为 $2\pi R$ ，这个 R 就称为宇宙半径，并可计算宇宙空间的体积为 $2\pi^2 R^3$ ，即宇宙空间的大小有限。宇宙半径 R 不随时间变化即表示宇宙是静态的。

二、几种宇宙模型简介

在爱因斯坦提出上面这种宇宙模型的前前后后，还出现过许多其他的宇宙模型。在此，选择几个有代表性的作一简单介绍。

1、认为宇宙空间是三维、平直、无限的，其性质与物质无关。在其中任一点沿任一方向都可以作一条直线，该直线可沿其两个方向无限延长绝不会相交。而宇

宙时间呢？无始无终，均匀流逝。

至于宇宙中的天体及其他各种物质，有人认为只分布在空间的一个有限范围。其实这种模型，相当于承认天有边界，与有限宇宙没有什么本质区别，（只是又加了个有界）。另外在科学上可以证明，这种宇宙不稳定，因而也不可能。

还有人认为发光天体大体均匀地分布在无限空间。现在也不难证明，若真的如此，那么我们在地球上将不会有黑夜，永远是十分光亮的大白天。这就是有名的“黑夜悖论”问题。

2、等级式宇宙模型：地球带着自己的卫星组成一个系统；太阳带着自己的行星组成太阳系；许多类似太阳的恒星在一起又组成银河系；许多类似银河系的星系又组成星系团。于是有人就推而广之，认为星系团之上还有二级团、三级团……以至无穷。宇宙就是这样一种无限等级式的成团结构。

这样的宇宙模型与目前的天文观测不符。天文观测表明，星系团及超星系团（约 $10^7 \sim 10^9$ 光年）是存在的，而在大于1亿光年的尺度上却不再有成团性，超星系团在空间基本上是均匀分布的。这种机械的无限重复理论，就是从哲学的角度看，也不是一个好的理论。就微观方向而言，物质分布的分级成团性，到基本粒子的尺度，肯定也是不正确的。

3、还有人认为保留宇宙在时间上，无始无终；在空间大尺度上，没有演化；而又想和星系运行的天文观测不矛盾，于是就又提出了“稳恒态宇宙模型”。根据这种理论将推出宇宙中的物质不断地无中生有。由于这种理论与宇宙在大尺度上有演化的天文观测不符，故目前已很少有人支持。

4、其他还有正反物质模型、狄拉克模型、惯性质量增大模型等等。

但是研究未研究去，或说在竞争、淘汰中，越来越多的人支持宇宙的大爆炸理论，并对这一理论作了大量的研究，使之不断地充实和发展。目前把这一理论称为宇宙的标准模型。

三、重要的天文观测

在具体介绍宇宙大爆炸理论之前，先谈一谈宇宙学中几个重要的天文观测事实。一个宇宙理论的好与坏或说成立与否，主要看它对这些观测事实能不能很好地解释。

1、宇宙物质的分布：有一定程度的成团性，但在1亿光年以上的大尺度上，成团性消失。

2、宇宙物质的内容：宇宙中的（广义）物质，以（狭义）“物质”和场两种形式存在。物质基本上是由正粒子构成的正物质，而不是由反粒子构成的反物质。

3、元素丰度：大的宇宙天体，恒星系或恒星，所含氦元素的丰度大致都为25%~30%。

4、哈勃红移、星系运行、宇宙膨胀；哈勃（E. P. Hubble, 1889~1953）在1929年发现遥远天体谱线的红移有着普遍的规律，从而推出相距为

附 史瓦西时空的弯曲状况

空 间	r_0 (公里)	r_0 处 1 秒, 相当远处的 时间 (秒)	r_0 处 $\Delta T = 1$ 米 的 距 离 (米)
地 球	6400	$1 + 10^{-9}$	$1 + 10^{-9}$
太 阳	7×10^3	$1 + 10^{-6}$	$1 + 10^{-6}$
白矮星 ($M_{\odot}$)	1.3×10^4	$1 + 10^{-4}$	$1 + 10^{-4}$
中子星 ($2M_{\odot}$)	20	1.19	1.19
黑 洞 ($5M_{\odot}$)	15	7.7	7.7
	14.76	38.4	38.4
	$\frac{2GM}{c^2} = 14.76$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$