

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

现代科技与人文大观

宇宙天体交响曲



宇宙天体交响曲

怎样欣赏天体交响曲

天文学是研究地球以外天体及其毗邻环境的科学，研究对象包括太阳系天体，恒星，银河系，河外星系，行星际，星际及星系际物质，直至整个宇宙。天体物理学则是研究天体的物理性质的科学，它是近两世纪才发展起来的。

提及天文学，往往引起人们神秘莫测的感觉，有的人讨厌枯燥无味的天文数字，有的人则不愿去记忆数不清的星星，去辨认各个星座。有的人则对人类能认识遥远的天体的发生、发展及其消亡感到十分怀疑。但毕竟天体是每一个人最先接触到的自然界的客体。因此，它自然地吸引着每一个爱思考、希望了解人类生存环境、关心人类命运的人们。刚刚牙牙学语的婴儿往往就会听到父母讲述的以天体为背景的动人的神话故事。他们也往往会提出一些父母们难以回答的问题：天有多高？天上有多少星星？天有边吗？天外又有什么？

总之，天文学的发展一个重要的动力就是人类对这些神秘天体的好奇心。

人们总想以最适合自己的方式画出一幅最简单而易于理解的世界图景，并试图以他的宇宙代替并征服经验世界。这就是画家、诗人、哲学家、自然科学家各自按自己的方式去做的事。各人都把宇宙及其构成作为他的感情生活的中枢，由此找到他在个人经验的狭小范围内找不到的宁静和安定。

的确，面对美丽壮观的星空，人们都以自己的方式来抒发内心的感受。在中国，盘古开天地，女娲补天，夸父追日，嫦娥奔月及牛郎织女等，这些动人的神话故事几乎家喻户晓，而在西方流传至今的圣经头一句话就是上帝创造世界。

爱国诗人屈原曾写过：“遂古之初，谁传道之？上下未形，何由考之？”的句子。而诗人李白却写出“疑是银河落九天”的浪漫诗句。英国文艺复兴时期的伟大戏剧家和诗人威廉·莎士比亚在他的著名喜剧《威尼斯商人》中，面对柔和的静寂夜色，罗兰佐说道：

瞧，天宇中嵌满了多少灿烂的金钹；你所看见的每一颗微小的天体，在转动的时候都会发出天使般的歌声，永远应和着嫩眼的天婴的妙唱。

莎翁这里虽然是用的极富浪漫色彩的文学语言，但却道出了科学家们探索星空的真谛。下面让我们一起来欣赏散布在宇宙这个大舞台的，形形色色的星星乐团所发出的妙唱吧！人们常用歌声来表达内心的衷肠，那么从星星乐团所发出的各种妙唱中又如何来洞察各种天体内部的奥秘呢？敬请诸位耐着性子细听端详。

星星交响曲的基本组成

——天体辐射的各种波段

古代元曲有曲牌，西洋乐曲有曲调。处于不同状态和不同年龄的天体，往往按不同的方式产生辐射，它们发出的“光”具有不同的能量（即不同的频率），形成宇宙天体交响曲的不同“音域”。而对各个音域的欣赏产生了天体物理的不同分支。

1. 可见光辐射——光学天文学

几千年来，人类主要靠肉眼可见的星光来认识地球以外的宇宙万物，欣赏来自星星的妙唱。从物理学的角度来看，可见光只是电磁辐射（电磁波）的很小一部分。虽然如此，它可算得上是星星交响曲里的“下里巴人”和者甚多。前面说到的神学家，诗人的激情全来自于此。基于可见光对天体的研究是天文学的一个分支学科，称光学天文学。因为大气对可见光是完全透明的，因此，光学天文学主要是靠地面建立的观测仪器进行研究的。以光学望远镜为主，配以照像仪、分光仪或偏振仪等接收器，并利用光度计，光谱测量仪，坐标测量仪等仪器，对天体进行光学观测和研究。随着技术的不断改进，人们一方面加大望远镜的口径，以接收更微弱的星光及提高分辨率。另一方面利用新的感光器件，如光电器件及最新的 CCD（电荷耦合）器件，以缩短成像时间，更有利于发现天体光度短时间的变比。一些更详细的内容后面将陆续介绍，这里先只谈谈星光的光度和颜色，也就是星星乐曲的音阶和抑扬顿挫。

在望远镜发明以前，人类全凭肉眼分辨星光，把可见星光分为六等，最亮的为一等星，最暗的为六等星。现代科学研究表明，一等星相当于一支标准蜡烛放在 991 米处给人的视亮度。我们假定天体为一个点光源，它是按球状向四面八方传播，因此在一定距离上，单位面积内所能接收到的光与这个距离的平方成反比。因此，我们观测到的只是视光度或视星等。如何得到天体的“绝对光度”和“绝对星等”尚需知道天体的距离。如何确定天体的距离后面讨论。

另一个问题是光度和星等的关系。我们知道，人体器官对事物的感受往往并非线性关系而是成对数关系的变化。简单的分析表明，从一等星到六等星光度相差 100 倍，因此每个星等间的光度相差 2.512 倍。1609 年，伽利略发明了天文望远镜，从而诞生了光学天文学。他利用自己的望远镜发现了月球环形山，太阳黑子，木星的四颗卫星和金星盈亏等，并知道了银河是由无数恒星形成的一条亮带。现在最大光学望远镜的口径为 1.0 米（我国北京天文台的为 2.16 米）加上 CCD 技术已能观测到 24 等以上的天体。比肉眼能见的暗 1000 万倍，从而发现了河外星系，使人类的视野扩展到了 200 亿光年以外的距离，也就是我们讨论的观测宇宙学的“宇宙尺度”，也就是宇宙大舞台的范围。天文学家正在欣赏并分析来自那里的歌手们所发出的妙唱。

光谱仪展示了天体乐团的音阶。我们知道，利用棱镜能使太阳光分解成红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色。天文学家把分光设备用于望远镜所接收到的来自遥远天体的星光，同样可以将它们分解为不同颜色，展示出这些天体的光谱。从化学知识知道不同元素有其自己独特的光谱线，这些谱线可由量子理论得到解释。因此，天体乐曲的音阶告诉了我们天体表面物质成分的秘密。但来自遥远天体的谱线又有其自身的特殊性，即它们往往具有发射线和吸收线。发射线反应了天体自身的特色，而吸收线则是遥远天光在旅途中遇到不速之客（星际介质）“抢”走了它的一部分能量，因此在谱线上出现了某些凹缺。这个特点为天文学家比较两个星的远近提供了一个可靠判据，也为了解星际介质的物质成分及状态提供了重要信息。

由于天体不同颜色的光度比反应了天体的表面温度，而分光技术又是较难实现的技术，它要求大口径望远镜和高精度的光谱仪。因此通常采用不同颜色的滤光片加在望远镜的光路上，这样得出了不同颜色的星等。通常以紫、

蓝和绿三个颜色的波长上分别测定星等，并得到天体的色指数， $U-B$ ， $B-V$ 由此估计天体的表面温度，通常称它为天体的色温度。

读者诸君不知是否感受到了天体乐曲的某种奥妙。如果没有，不妨回头再读读想想。如果有了一些感受，请跟我们继续往下欣赏。

2. 红外辐射的意义——红外天文学

不知读者是否对利用红外瞄准器的射手在漆黑的夜间能射中目标，带有红外观测仪的卫星能在夜间拍下清晰的地面的照片而感到惊奇呢？原来电磁波辐射在可见光之外还有更广阔的领域，可见光波长仅在 $0.4 \sim 0.77$ 微米的范围，波长介于红光与微波间的电磁辐射，即 $0.7 \sim 1000$ 微米范围内的电磁波称红外波，它构成了天体交响曲的另一个曲调。基于天体红外辐射研究天体性质的天文学分支称红外天文学。

红外辐射可分为近红外区（ $0.3 \sim 3.0$ 微米），远红外区（ $3.0 \sim 30.0$ 微米）和亚毫米波区（ $30.0 \sim 1000$ 微米即 1 毫米）。这个波段的辐射大多受到地球大气（特别是水汽、二氧化碳和臭氧等分子）的吸收。因此，地面只能进行少量的观测，而大多要利用空间技术把红外探测仪带到地球大气层外进行探测。因此红外天文学也是空间天文学的一个分支。它可利用高空飞机，大型气球和探空火箭进行探测。不言而喻，要欣赏这一段曲子，技术上比光学探测更加困难。

大多数天体都有红外辐射。实际上，红外天文学的开始可追溯到 1800 年英国天文学家赫歇尔在观测太阳光谱时偶然发现了太阳光谱中的红外线。以后天文学家发现银河系中心、星系和类星体都有红外辐射。但促使天文学家进行红外探测的更大动力是 60 年代以来为验证宇宙微波背景辐射的黑体谱和探测红外星，它是辐射能量集中在红外波段的恒星。1961 年美籍华人天文学家黄授书预言了这类天体的存在。这类天体有两种极端情况：一是年青的摇篮中的恒星，它们由于引力坍缩使恒星的温度升高，但还未引起热核聚变成为恒星之前的天体。另一种情况是老年恒星，燃料已尽的天体其可见光被其自身喷出的尘埃云所吸收而尘埃云的温度升高而引起红外辐射。

因此，这一段乐曲包含了天体的“红白喜事”的喜乐及丧钟！

3. 射电天文学——天文学的一个强劲分支

波长从 1 毫米到 10 米的电磁波辐射称射电波，其中又可分为毫米波，分米波，米波和十米波。这一波段除少数区外，大气对它不吸收，因此它与光学天文学相仿，大多数观测可以在地面上进行。这就为其发展带来有利条件，而在技术上，射电天线的制造远比光学望远镜容易，加之它接收的射电信号很便于直接与现代计算机技术结合，因此便于将不同射电天线接收的信号加以综合处理。于是组成数十个天线大面积分布的射电阵。不难理解，对天体的观测要求看得远、分得清，这都要求增大接收面积，即加大望远镜口径。而分布在以公里计范围内的射电阵等效于这样大口径的天线，其灵敏度与分辨率自然能大大提高。研究射电天体不仅要测出其射电辐射强弱，还要测量其频谱，偏振，精确位置和结构。而采用射电阵得到的结构细节已达一角秒。可与地面上的光学望远镜拍摄的天体照片媲美，而甚长基线干涉仪则已达到万分之几角秒的分辨率，远远超过光学望远镜。举一个形象的例子，这种分辨率相当于在北京的上空能清晰地分辨在天津的人们他们头上相邻的两根发丝间的细节。60 年代天文学的四大发现：类星体、脉冲星、星际分子和宇宙微波背景辐射，全是借助于射电天文观测手段获得的。而脉冲星和宇宙微

波背景辐射已分别获得 1974 和 1978 年的诺贝尔物理学奖。从 50 年代初发现中性氢分子 21 厘米谱线，1963 年发现星际羟基的微波谱线至今已有数十种分子的两千多条星际分子谱线。研究这些谱线的意义是十分重大的。一方面它们是新天体形成的物质基础，另一方面它们受到其周围成团物质的引力场制约，因此观测它们的运动可以间接考查成团物质的质量。宇宙中暗物质的探测就是借助 21 厘米氢分子谱线探测而判别的。再有，由于这些游离分子中存在着大量有机分子，它们是产生生命的物质基础。因此它们或许对研究宇宙中生命的起源会提供重要信息。

通过上面一小段介绍你是否感到宇宙射电曲调的优美旋律和强劲的生命力呢？或许你会觉得宇宙中天体的射电辐射太强烈，甚至怀疑这样强的射电辐射对人类的生态环境有什么不良影响？在一次射电天文国际会议上，每个与会者在进入会场前都得到了一张小小纸片，大家疑惑不解！会议开始后人们才明白，它告诉人们 60 多年来射电观测所取得的这些成就，所接收到的来自宇宙射电源的总能量不足以驱动人们手里拿着的那张小纸片！从这个小故事你是否能感受到天文学家为了欣赏这一段宇宙旋律所付出的代价吗？

4. 天体的紫外线辐射和紫外天文学

1801 年德国的物理学家里特首次证实了来自天体的紫外线的存在。但在 150 年后人类才利用升高到 80 公里的一枚高空火箭得到波长为 2200 埃的太阳紫外光谱。

天体紫外辐射观测的困难对人类的生态环境却是福音。我们地球上的一派生机正是因为地球的大气层像过滤器那样差不多全部吸收了来自宇宙的 3000 埃以下的威胁生命的紫外辐射。首功就是在 50 公里高空形成的臭氧层。因此近些年来人类十分关心地球南极上空臭氧层空洞的扩大。本来介于可见光和 X 射线间即从 100 ~ 4000 埃范围内都是紫外辐射，但即使把探测器送到地球大气外层，星际气体对紫外线的吸收也是很严重的。因此，对紫外波段的观测实际上仅限于 912 ~ 3000 埃之间。

前面说过，当星光通过星际介质时，一些光子的能量会被吸收形成吸收线，这种吸收是由于气体中的中性元素受到一定能量光子的打击就会发生电离，这种现象对研究天体的物理状态和化学组成最为敏感，而这种吸收线在紫外区比可见光区丰富得多，所以天文学家愿意付出较大代价去欣赏天体发出的这一段乐曲。1995 年初美国还从发现号航天飞机上发射了一颗观测天体紫外辐射的天文卫星。

紫外研究的第一个天体就是太阳，它的紫外辐射不仅影响地球大气层而且会破坏人造卫星的正常运行。而从天文学角度出发，对太阳的紫外观测显示了其紫外光谱中有许多高电离的硅、氧和铁等元素的谱线，为太阳色球与日冕间过渡层和耀斑活动的研究提供了有价值的信息。

紫外研究对其他天体也很重要，特别值得一提的是对彗星的紫外观测，发现了大多数彗星其彗发外部都包围着比太阳体积大得多的氢云，这使我们对彗星的认识增加了一个新的组成部分。此外，紫外观测对了解行星大气，恒星大气，星际物质和星系等也提供了很重要的信息。

5. 更高的宇宙曲调——x 射线和 γ 射线天文学

x 和 γ 射线是更高能量的电磁波。它们的波长短，粒子性质更加突出。因此，除了软 γ 射线波段还能用聚焦，分光一类的传统光学观测方法外，其余只能用粒子物理探测器进行观测。这就使得 x 和 γ 射线天文学的研究从物

理内容到探测方法都与多种学科相关联。它涉及宇宙线物理，核物理，粒子物理，高能物理，天文学以及宇宙学等领域。这种多学科交错不仅对天体物理是必需的，而且对其他学科的发展也是有益的。因为壮丽的宇宙舞台有着地球上各种实验室难以实现的条件，如：超低温、超高真空、超高密度、超高压，或是与之相反的各种极端条件。可以说，作为宇宙乐曲的这一新篇章——x 射线和 γ 射线天文学，把无限大的宇宙与微观物理研究紧密地联系在一起。

由于大气对这两类辐射的强烈吸收，因此这两类观测仍属空间天文学的分支学科。x 射线波长为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-2}$ 微米。根据人造卫星和高能天文台的观测，已记录到上千个宇宙 x 射线源。主要可分为两类：一类为银河系内源，它们有超新星遗迹，密近双星，脉冲星，宇宙 x 射线爆发和暂现 x 射线源等；另一类为河外 x 射线源，多数为星系团，少数是活动星系，类星体和宇宙 x 射线背景辐射。

γ 射线为波长短于 1×10^{-6} 微米的射电辐射。人们利用高空气球，探空火箭，人造卫星和轨道天文台上的 γ 射线探测器，观测到宇宙 γ 射线背景辐射和一些 γ 射线源，以及某些脉冲星，活动星系核与暗星云等发出的 γ 射线辐射。此外还观测到 γ 射线爆发。其能量超过 10^{11} 电子伏特的 γ 射线，在地球大气中产生高能粒子簇射，这种簇射又产生大气切仑柯夫辐射，因而有人尝试在地面用大型天文望远镜对宇宙 γ 射线作间接的观测。可见，壮丽的宇宙乐曲不仅深深地打动了人类的心弦，激发了人类探索宇宙奥秘的灵感，它也引起了地球大气的共鸣，并转演出新的乐章。

6. 中微子天文学和引力波天文学

研究原子核 β 衰变时，理论上预言存在一种不带电的中性微粒子——中微子。以往，人们认为中微子的静质量为零。但近些年规范理论的发展，理论上允许它不为零，而不少实验物理学家宣布他们已测到了中微子的静质量。尽管这些实验并未被普遍承认，但中微子可能有静质量的问题一直成为物理学家和天体物理学家所关心的问题之一，并由此引出宇宙中的暗物质问题。按宇宙原初核合成理论来分析天文观测所得到的宇宙中物质的平均密度表明：宇宙中存在着占总质量 90% 以上的非重子暗物质。

研究恒星上可能发生的中微子过程以及这些过程对恒星结构和演化的影响形成理论天体物理的一个重要分支。从 1955 年起用四氯化碳接收太阳核反应所发射出的中微子，观测所得到的比理论上预言的少 10 倍，由此引出一个天文上至今尚未解决的太阳中微子短缺问题，它是太阳物理中三大疑难之一。中微子由于与一般物质很少发生相互作用，因此穿透力极强。如果恒星的中心产生一个光子，它要跑到该恒星的表面约需数千万年的时间。这有如人群中的一个长跑运动员，他只要一动就撞上附近的人，所以想跑出中心是极为困难的。但中微子目中无人，在人群中任意出入而不发生碰撞。因此它极易带走恒星内部产生的核反应所释放的能量，从而加速恒星的坍缩过程，在超新星爆发和中子星形成过程中，中微子也起着十分重要的作用。

1987A 这颗超新星的爆发过程中，人们测得了 11 个中微子事件，但由此引出了数百篇相关的论文。从这里你是否能感受到天文学家对中微子“歌星”的“崇拜”程度呢？

对天文学发展可能有潜在影响的另一支是引力波。它是爱因斯坦引力场方程从理论上预言的，有如麦克斯威方程当年预言了电磁波的存在，今天不

仅影响到每个人的生活，并成了整个天文学的观测基础。

引力波较之电磁波更难产生和接收。如果研究两个质子可能辐射的引力波其强度仅为其电磁波强度的 10^{-37} 。至今人们设计了不少探测引力波的装置，但并无公认的直接结果。而观测一些特定双星的轨道周期变化，可间接地证实引力波的存在及估算其辐射所带走的能量。获得 1993 年诺贝尔物理学奖的 J·H·泰勒所探测到的射电脉冲双星 PSR1913+16 的轨道周期变化率就给出了引力波存在的第一个间接的定量证据。

7. 多波段天文学

前面我们从不同电磁波段的观测介绍了对应各波段的天文学。不同波段的辐射，往往反应了天体不同时期和不同部位的辐射。很多研究表明，不同频段对天体的研究往往反映了天体的某个局部。好像瞎子摸象，有的摸到大象的耳朵，便认为大象像一把扇子，而其鼻子则像一支长号。为了全面了解大象，人们常常利用不同波段的探测设备在同一时间同时对某一特定天体进行观测。这样，一方面可以从不同方面去确认天体某种过程的确实发生，另一方面可以全面地反映天体该过程在不同地点的特征，可以给人们一个较全面的完整形象。同时用多个波段去观测天体，研究天体特征的方法，已形成天文学发展的一个新的倾向，与此相应地发展出多波段天文学的新分支。

乐曲中常用变调来改变曲子的情绪，如用升调来增加明快气氛，而某种突然的降调则产生某种恐怖与沉闷。多波段天文学家正如欣赏乐曲一样，从多方面去洞察天体咏叹调中所显示的天体内部的“深情”！

天文学家已很清楚，对天体辐射范围观测愈广，就愈能较全面地认识天体和宇宙，将有更多的难题得以解决。所以天文学家总是努力使研究领域扩展到所有波段，并尽可能利用各种波段的观测设备同时对准某个感兴趣的天体。这在今天已经成为现实，尽管有些还处于初始阶段。

星星乐团的各种乐器

——体的几种辐射机制

8. 热辐射和连续光谱

物质燃烧发出耀眼的光，这可算是人所周知的事实。一块铁在常温下不发光。但若对它加热，使其温度不断上升，开始会使人感到灼热，即有红外辐射，温度再升高，黑色的铁块变暗红，然后变红、橙、黄，最后发出白光。在更高温度下，如在电焊过程中，甚至发出耀眼的青白色光芒并带有强烈的紫外线，如果不加防护甚至会伤害人的眼睛和身体。这种随温度升高而增强的辐射称热辐射。热辐射所发出的光子具有各种各样的波长。通过光谱仪可看到由多种颜色构成的一条连续的彩带。形成连续光谱。物理理论中，用一个能全部吸收掉射在其面上的辐射而不放出能量的物体，简称黑体的模型来描述热辐射。因此，热辐射也常称为黑体辐射。

19 世纪末，大多数物理学家都相信，对自然的最终描述已经完成，所剩的只是些枝节问题。这种信念的依据就是牛顿力学，牛顿的万有引力理论和麦克斯韦电动力学在描述和预言宏观体系时所取得的惊人的和一贯的成就。这里所指的宏观体系的大小，是指从地面的实验室一直到整个宇宙。然而，一旦实验和探测技术发展到了研究高速运动和原子尺度的水平时，就出现了很

多困难。这些困难单靠经典物理学的定律甚至经典物理观念是解决不了问题的。正是相对论和量子力学提供了所必需的新定律和新概念。

困难之一就是当用优美而普遍的经典能量均分定理进行某些预言时所遇到的困难。直接利用这个定理就给出了错误的甚至荒谬的黑体辐射谱，而且对物质体系的比热也给出错误的结果。在两种情况下，经验的结论都暗示着，只有某些自由度完全参与导致统计平衡的能量交换，而其他自由度则很少参与，甚至不参与能量交换。

其次，在解释原子结构时遇到了困难，然而原子结构无疑是真实存在的。但按经典物理，这样的体系是不可能达到平衡的。按经典理论，一个电子在原子核的吸引下可以得到一个精确的运动轨道，然而沿轨道运动的电子的加速度会使电子产生辐射，而辐射带来的能量损失将使电子轨道迅速坍缩至消失。因此，按经典理论，原子无法产生稳定的辐射。即便在作某些假设下能使原子在经典意义下维持某种结构，但也不能解释当时已观测到的原子光谱所满足的里兹并合定则。

光电效应，是经典理论更为棘手的困难，即当电子从被光照射的表面上逸出时，仅所发射的电子数目正比于入射光的强度，而单个光电子的能量与光的强度无关。这个能量反而由入射光的频率确定。这个事实从经典物理体系根本无法理解。

1900年12月14日普朗克以《正常光谱中能量分布的理论》为题，大胆地提出了能量子的概念，才使上述一系列困难，开始迎刃而解了。1905年爱因斯坦发表了论文《关于光的产生和转化的一个启发性观点》。此论文是辐射量子论的开端，文中明确提出了光电效应的基本定律。但首先反对爱因斯坦这个理论的竟是提出量子概念的普朗克本人。直到1909年普朗克还告诫自己和别人说：“在将作用量子 h 引入理论时，应尽可能保守从事；这就是说，除非业已表明绝对必要，否则不要改变现有理论。”直到1915年，波尔根据普朗克的量子理论提出了一个新的原子模型，并成功地解释了原子结构和原子辐射光谱，普朗克本人才结束了他几度想把他的新理论纳入经典物理框架中的想法。而爱因斯坦的这篇论文获得了1921年的诺贝尔物理学奖。

按量子理论，如果辐射源处于热动平衡或局部热动平衡态，即系统内部的粒子的能量分布可以用一定温度下的玻耳兹曼分布律表示。而粒子具有一定的能量后，即处于与其能量相应的一定激发态，好像乐器的弦都张紧了，不同的能量使弦具有不同的张紧程度。一旦受到打击便发出不同频率的声音。而粒子由不同量子化的激发态向更低能态或基态的跃迁就发出相应频率的电磁波辐射。不同的原子有不同的激发态也就有相应的不同谱线系。一些分子的激发态间的跃迁也发出相应的分子谱线。

热辐射有三个明显的特点：一是辐射强度随温度升高而迅速增长，再有是辐射的波长范围很宽，可以说是天体乐器中的钢琴，另外一个特点就是温度越高辐射最强部分的波长越短。不知诸君是否还记得前面介绍过的天体的色温度，正是基于这点才可能用不同颜色的光度比来表示天体的表面温度。

大多数恒星都有极高的温度，并处于动态的局部热平衡，因此都以黑体辐射形式将其中心通过热核聚变产生的能量向宇宙太空辐射。

9. 回旋辐射和同步辐射

一般说来，带电粒子受到加速（或减速）就会产生电磁波辐射。

我们知道，带电粒子在磁场中受到洛伦兹力将沿圆轨道或螺旋轨道运

动。它是一种具有向心加速度的加速运动。因此这时带电粒子也会产生电磁波辐射。当带电粒子运动远小于光速时，粒子的质量视为常数，理论计算表明，其回旋频率也是个常数，此时粒子的辐射称回旋辐射。而当速度接近光速时，其质量随速度的增加而增加，因此回旋频率降低，此时粒子所产生的辐射称同步辐射。由于天体中，某些确存在有强磁场，回旋辐射就成了不容忽视的重要辐射机制。

回旋辐射的特点是：辐射功率小于同步辐射，再有其辐射单色性强，辐射具有线状谱且具有偏振特性。这种辐射机制可以用来说明太阳耀斑，白矮星的光学辐射以及中子星的 x 射线的线状发射等。

同步辐射的特点是：辐射功率强，方向性强，只能在一个窄小角锥内观测到辐射，而辐射具有连续谱并有显著的偏振。粒子在作螺旋轨道运动时，辐射是椭圆偏振的。

射电星系，一般星系和超新星遗迹的射电辐射及太阳的射电辐射均存在有同步辐射。在蟹状星云，某些射电星系和类星体中，还可观测到可见光和 x 射线的同步辐射。

10. 曲率辐射

高能带电粒子在强磁场中只能沿磁力线方向运动。因为磁力线的弯曲而产生的电磁辐射称为曲率辐射。由于磁场很强，任何横越磁力线的运动实际上不可能存在。电子只能沿磁力线运动。在强磁场中磁力线本身是很弯曲的，因此，沿磁力线运动的相对论电子将获得法向加速度，从而产生辐射。这种辐射机制可用以说明脉冲星，类星体等高能天体的辐射现象。这种电磁辐射的特征很像同步辐射。二者的区别是同步辐射的情况带电粒子是在垂直于磁力线的方向弯曲，而曲率辐射是沿着弯曲的磁力线作曲线运动。

曲率辐射中，有一种特别引人感兴趣的过程称“相干曲率辐射”。它是指一个由 N 个粒子组成的辐射源，其源的总辐射强度超过了单个粒子辐射强度的和的现象。此时，称这 N 个粒子的辐射是相干的，而该源则称为相干辐射源。曲率辐射的这种相干性往往可能使总辐射达到非常大的强度。所以，天文学家对其格外重视。例如，蟹状星云，其 x 射线和光学波段的辐射亮度仅为 10^6 开，而射电辐射的亮度竟可达 $10^{24} \sim 10^{25}$ 开，天文学家就愿意用相干辐射机制来解释。

按照广义相对论，由于物质的存在使时空发生弯曲，而时空曲率描述了引力场的特性。因此任何物质在引力场中也沿弯曲的时空轨道运动。当然，所谓时空弯曲轨道在三维的空间轨道可能是直线但确有加速度，因此也会产生辐射，如果我们也把它称为“曲率辐射”，那么带电粒子在强引力场附近也会产生“曲率辐射”。一般电磁场对带电粒子的加速除取决于电磁场强度外，主要决定于电子的荷质比。因此，只有电子最易产生辐射，而其他带电粒子，由于具有数千倍于电子的质量，故即便产生辐射其能量也微不足道。而引力场对粒子产生的加速度与其质量无关。因此研究强引力场附近的“曲率辐射”或许是一个十分有趣的课题。它是否能对黑洞的观测提供重要线索呢！在壮丽多彩的天体乐曲中有来自这种乐器的旋律吗？这有待天文学家进一步分析和研究。

11. 康普顿辐射——逆康普顿散射

按照经典物理学观念，当接近光速运动的相对论电子和辐射场中的光子碰撞时，也会获得加速度，从而引起辐射，这种辐射称为康普顿辐射，也称

逆康普顿散射。这一过程在天体物理学的辐射过程中也起着重要作用。如果说同步辐射是射电天文学中的基本过程，那么 X 射线和 γ 射线波段的乐曲大多来自康普顿辐射机制，它也是相对论电子在辐射场中穿行时损失能量的一种机制。

在康普顿散射机制中，高能光子（如 γ 射线光子）与近似视为静止的低速电子相碰撞，结果使光子减少了能量，电子得到这部分能量而被加速；而逆康普顿散射中，入射光子的能量显著地小于相对论电子的能量，即这时将发生低能量光子和相对论电子碰撞，结果是电子损失部分能量，而光子得到这部分能量后能量增加（即频率加大）。因此，逆康普顿散射是使低能光子能量增加的过程，因此实际上也就等价于相对论电子的一种辐射过程。

星际空间存在着星光或微波背景场，而许多高能宇宙线电子穿行其间，它们与低能光子碰撞的结果，电子损失了能量，而低能光子变成了高能光子，天文学家就是利用这种机制来解释宇宙 X 射线的起源。

电子和正电子对在湮灭时产生双光子的过程也与康普顿散射过程完全相似。而这一过程是产生 γ 射线辐射的主要机制。

12. 韧致辐射

我们已说过，带电粒子（最主要是电子）被加速时会辐射光子。这好像在刹车时会发出刺耳的响声一样。而在等离子体中的电子与离子发生近碰撞时，库仑力作用使电子获得加速，这时电子产生的辐射称为韧致辐射。

通常一群电子其能量有一定的分布规律。物理学中把能量分布满足麦克斯韦分布规律的一群电子称为热电子，反之则称为非热电子。而由热电子发出的韧致辐射称热韧致辐射，反之则称非热韧致辐射。

宇宙间有相当多的区域是处于等离子体状态。在那里通常的原子分离成电子和带正电的离子两个独立部分。这里电子可能服从麦克斯韦分布。有时并不服从这种分布，但由一系列非辐射库仑碰撞，使电子能量渐趋平衡，于是电子能量回到麦克斯韦分布，这个过程称电子的热化。天文学上，把光束垂直通过吸收层后，其辐射强度按指数律 e^{-t} 减弱的指数 t 称为吸收层的光学厚度。当 $t > 1$ 称为光学厚层，而当 $t \leq 1$ 时则称光学薄吸收层。对于光学薄的热电子产生的韧致辐射就可作为热韧致辐射处理。

实际观测中发现许多 X 射线源有指数谱型，它们就很可能是热韧致辐射产生的。这些典型的天区或天体有太阳耀斑，它包括射电，微波和 X 射线辐射。H1 区主要是射电辐射。猎户星云的射电辐射，天蝎座 X—1 的光学和 X 射线辐射，后发星团和宇宙弥漫 X 背景的 X 射线都是可能的热等离子体韧致辐射的天区或天体。

这里我们看到，与不同的乐器一样，不同的辐射机制可产生不同的辐射频率。当然如果深入研究会发现，来自不同机制的同类辐射仍存在着差别。就像修养有素的乐曲大师能鉴别不同乐器演奏出的同一曲子一样。

13. 切仑柯夫辐射

通常，狭义相对论认为，任何物质的运动速度不可能大于真空中的光速。但光在不同物质中的传递速度是不一样的。因此在介质中穿行的高速带电粒子，其速率可能大于介质中的光速，此时会产生一种辐射，它是包括可见光在内的连续辐射，具有明显的方向性和强的偏振性质。这种辐射现象首先是由前苏联物理学家切仑柯夫于 1934 年在理论上预言并由瓦维洛夫首次从观测中发现。

作匀速直线运动的带电粒子，当其速度大于介质中的光速时，它辐射的电磁波将集中在粒子后方的一个圆锥形的区域之中。而粒子位于该圆锥的顶点上。类似于船速超过水波传播速度时，在船头附近形成的 V 形波。或空气中运动速率超过声速时所形成的冲击波。切仑柯夫辐射本质上就是一种电磁“冲击波”现象。

由于固体或液体的折射率比气体大，因此通常气体中的切仑柯夫现象较弱。但当极高能宇宙线粒子（主要是电子）穿过大气时的切仑柯夫效应，将产生广延大气簇射（例如，初始的 γ 光子产生电子对，电子对又通过轫致辐射产生次级 γ 光子），造成瞬时的高能粒子数的剧增。这些高能粒子穿过大气时引起瞬时的切仑柯夫光脉冲。用光电技术检测这些光脉冲，同时可利用核物理学中的符快技术把光脉冲的产生与宇宙线事件联系起来，这已成为当前 γ 射线天文学的一种观测手段。

稳态外磁场中完全电离等离子体（磁等离子体）中有可能产生切仑柯夫效应，通常是在射电波段。这可能是天体物理学中的重要射电辐射。目前关于太阳的非热辐射过程，特别是关于与黑子事件相关联的射电发射，大体公认为有多种类型，有不同发射机制。一种可能性是把它归因于等离子体中的切仑柯夫效应。这种射电辐射仅持续很短的时间，量级仅几分钟。另一特点是辐射频宽较窄，且在发射过程中平均频率会从高频向低频漂移。

1980 年，我国天体物理学家尤峻汉和程富华提出在气体介质中切仑柯夫辐射不仅产生连续谱，而且可以产生谱线的概念，并用此模型成功地解释了类星体中的 La 的宽发射线。值得注意的是，这种发射线机制已由徐克奠等人的实验所证实。因此，这种辐射机制在天体物理学中的潜在意义将日益受到重视。

至此，我们已介绍了天体辐射的各个频段，及产生各类辐射的辐射机制。它们好比星星交响乐的不同曲调及演奏这些乐曲所用的乐器。而现代音响还通过立体声效果来表现不同乐器在乐队中的位置，使人们有身临其境的感受。而分布在无边无际的宇宙大舞台的星星乐团，识别其空间位置更有其特殊意义。

立体声乐团

天体方位的确定

14. 赤道坐标系

迄今为止，尽管空间天文已取得巨大成就，但最基本的天文观测仍然是在地面上进行的。即使空间观测仍然是环绕地球周围空间轨道的飞行体上进行的。因此，为了确定天体的方位，最自然的方式是把地球上确定方位的系统延伸向宇宙空间。

地面上任何点的位置都可以用经纬度来表示，而经纬度实际上是该点与地心连线和某些参考面之间的夹角。例如，北京的纬度是 $39^{\circ}.9$ ，经度是 $116^{\circ}.4$ ，表示北京与地心间的连线与赤道面的夹角是 $39^{\circ}.9$ ，这条线与南北极构成的平面和通过英国伦敦格林尼治天文台的 0 经度面的夹角是 $116^{\circ}.4$ 。

设想以地球表面为基准作若干向外扩张的同心球面（见图 1），这样的

一些球面称为天球面。地球赤道面在天球上相交的大圆叫做天赤道。任何一个天体与地心的连线和赤道的夹角就称为该天体的赤纬，往往用符号 δ 表示。在赤道以北的赤纬为正，以南为负。赤纬为 $+90^\circ$ 和 -90° 的点分别称为北天极和南天极，也就是地球自转轴和天球的交点。通过天体和两个天极的大圆叫做赤经圈，它们相当于地球上的经圈在天球上的延伸。地球上选择英国格林尼治天文台的经圈作为 0° 起点，向东，西各算 180° 。天球上则选择春分点的赤经圈作为起点。春分点是每年大约在 3 月 21 日前后，太阳由天球南半部进入北半部，穿过天赤道的点，也就是天球上黄道和天赤道的交点。太阳到达这一点的时间叫春分。虽然在天球上春分点没有明显的标志，但它的准确位置是可以通过测量确定的。春分点是用的一个像带犄角的羊头 γ 的符号来表示的。天体的赤经圈和天赤道的交点与春分点之间在地心的夹角称为天体的赤经或时角，用字母 α 表示。然而赤经一般不用 $0^\circ \sim 360^\circ$ 表示，而用时、分、秒的时间单位来度量，由春分点开始向东量，每 15° 为一小时。

由于地球自转轴和地球轨道面不垂直，而且地球又略呈扁球形，太阳和月亮对地球赤道部分多于引力使地轴以 26000 年为周期发生进动。因此，天赤道和天极在天球的位置也就不固定，也就是说赤道坐标在天球上不是一成不变的，逐年部有微小的岁差变化。天体的赤经赤纬值一般都应注明以哪个年代为准（如，1950 年，2000 年等）。一般星表的天体位置每 50 年变更一次。

15．黄道坐标系

为研究太阳系内各种天体的运动情况，用黄道坐标系是方便的。地球绕太阳公转的轨道平面是黄道坐标系中的基本平面，称为黄道平面。黄道面与天球相交的大圆称为黄道，它是太阳周年视运动轨迹在天球上的投影。黄道与天赤道在天球上相交于两点，它们称为二分点。其中，太阳沿黄道从赤道以南向北通过赤道的那一个交点称为春分点表以 γ ，另一个交点称为秋分点表以 Ω 。黄道上与二分点相距 90° 的两分点称二至点。黄道的两个几何极称为黄极，按其所处的天区位置不同又分别称为北黄极和南黄极。黄道是黄道坐标系的基圈，北黄极为黄道坐标系的极。黄道与赤道的夹角称黄赤交角，记为 ε ，且 $\varepsilon = 23^\circ . 27'$ 。

天球上与黄道平行的小圆称黄纬圈。过黄极的大圆称黄经圈，它是黄道坐标系的副圈，所有的黄经圈都与黄道垂直。过春分点的黄经圈称为主圈，春分点则称为主点。黄道为基圈。图 2 表示了黄道坐标和天赤道的关系。

黄道坐标系的基圈和主圈随旋转天球一起作周日运动，天体的黄道坐标不会因观测时间和观测的地点不同而发生变化。

16．银道坐标系

在研究天体的更大体系，即研究恒星团及星系结构时采用银道坐标系是更方便的。

后面我们将看到，银河系的主要部分是一个扁平的圆盘状结构，它的平均中心面称银道平面。它是银道系的基本平面，其与天球相交的大圆称为银道，是银道坐标系的基圈。天球上与银道相平行的小圆银纬圈。银道的几何极分为南、北银极。而北银极作为银道坐标系的极 L 。通过两个银极所作的半个大圆称为经圈，也就是银道坐标系中的副圈。所有的银经都与银道相垂直。银道与天赤道在天球上交于两点。由北银极向银道面看去，按反时针方向从赤道以南向北通过赤道的那一个点，称为银道对天赤道的升交点；另一

个就是降交点。

天体 δ 的银经圈与银道交于 B 点，大圆弧 $\delta B = b$ 就是天体在银道坐标系中的银纬。由银道起沿银经圈向南、北银极分别量度银纬 b ，从 $0^\circ - \pm 90^\circ$ ，南银纬取为负值。过升交点的银经圈与天体的银经圈所交的球面角或银道上的大圆弧是天体的银经 l 。由于银道面是银河系的平均面，需要对银道的位置作较准确的测定。银道坐标的空间定向用银极的赤道坐标来确定。1958 年前，北银极在赤道坐标中的坐标取为

赤经 $A = 12^h 40^m = 190^\circ$

赤纬 $D = +28^\circ$ (1900.0 历元)

这样规定的坐标系称为旧银道坐标系，系统内的银道坐标用 $l^I b^I$ 表示。银道与赤道的交角 $i = 62^\circ$ ，称为银赤交角，升交点的赤经为 $18^h 40^m$ 。1958 年国际天文学联合会第十届大会上，按新观测资料，规定北银极赤道坐标的新值为：

赤经 $A = 12^h 49^m = 199^\circ 15'$

赤纬 $D = +27^\circ 24'$ (1950.0 历元)

同时规定，银经不从升交点量起，而取银河中心方向（人马座）为银经的起算点，该方向在旧系统内的坐标为：

$l^I = 327^\circ . 69$ ， $b^I = -1^\circ . 40$ 。

量度方式仍按左旋坐标系的规定。这样规定的坐标系称为国际天文学联合会银道坐标系，并以 l 和 b 表示天体的银经和银纬以区别于旧系统的 l^I 和 b^I 。

用上面介绍的三种方法，原则上都可以确定天体的方位。但由于地球本身的运动和银河系的运动，用哪种坐标系来标志天体的方位，取决于我们研究的对象。为观测天体，用其赤经和赤纬来确定其方位是极其方便的；而研究太阳系则宜采用黄道坐标系，而研究银河系结构以及更大尺度的天体则应采用银道坐标系。

怎样寻找量天尺

——确定天体距离的方法和层次

17. 三角视差法如何应用于天体距离的测量

为完全满意地欣赏来自天体的妙唱，除了确定每一个天体在太空中的方位外，很重要的一点是要确定天体的距离。一切天体，无论是日，月，行星还是恒星乃至星系，不管它们距离的远近，都投影在我们头顶上的一个半球形天幕上，这是天文学的一个突出的，与其他学科大不相同的特点。天文学家的一项重要任务就是要揭示所研究对象的距离。

人的两个耳朵，从不同角度听取声源所发出的音响，从而可判断声源的方位和距离。人的两个眼睛，也是从不同角度去接受光信号，从而可判断发光物的远近层次。但由于两个眼睛相距太近，所以能感受的距离太有限，稍远一点的东西就无法区别其距离了。

设想在北京和上海各有一个天文台，他们同时去观测某个天体（如月亮），这就好像人的两眼，不过它们之间的距离有几千公里。（如图 3），月亮 M 和北京 B 及上海 S 间构成一个三角形 MSB。SB 的距离可通过大地测量

得到。只要我们能够确定两个视角 Z_B 和 Z_S ，那么，利用我们的几何知识，即可计算出月地间的距离。1752 年，19 岁的拉朗德在柏林而他的老师拉卡伊当时正在非洲好望角。这两地差不多在同一经度圈上，而纬度相差 90° 有余，他们同时在这两个地区进行观测并首次用三角视差法测定了地月距离。计算的结果是；月亮与地球间的平均距离大约为地球半径的 60 倍，这与现代的测量结果十分近似。用三角视差法测得的更精确的月地距离为 384400 公里。

本世纪 50 年代后期，利用雷达技术测得的月地距离为 384401 公里，误差不超过一公里，而利用现代激光技术，月地距离的误差已减小到 7 米。近年来已减小到 8 厘米左右，可望将此误差进一步减小到 2~3 厘米。

18. 基本量天尺——秒差距的意义

上面的测距方案对于有的还只习惯于从家里到学校的距离的小读者也许已经难以想象了。但对于天体距离的测量它仅仅是一个“原理示意”。我们知道，地球的赤道半径仅为 6378 公里。因此在地球上不同点来测量同一天体以定距离的基线太短。天文学家利用地球的公转轨道。如图 4 所示，地球绕太阳的公转轨道上，半年内从其某一直径的一端点到达对径的另一端点。我们知道，太阳到地球的平均距离光线需走 8 分钟，我们通常称这个距离为 8 光分。那么在相差半年的时间内，地球在其公转轨道上移动的距离为 16 光分。天文学家把日地的平均距离称为一个“天文单位”，它就像一把量天的尺子。我们知道，光线每秒钟行走 30 万公里，大约绕地球 7.5 圈，而日地间光约走 8.5 分钟，相当于绕地球表面的大圆 3800 多圈。如果说孙悟空一个筋斗是十万八千里，那么他得翻上一千五百多个筋斗才走完一个“天文单位”。如果用十倍声速的火箭飞行一个“天文单位”距离得花三年以上的的时间。但这个尺子对于恒星间的距离来说是太小了，而且使用也不方便。为了确定更方便的量天尺，天文学家改进了“三角视差”法，并以地球的公转轨道的直径为“基线”，观测某天体的视角变化。我们知道，当“基线”一定时天体离我们越远视线夹角 θ 越小。设想某天体处于这样的位置，使得在半年内天体的视角变化恰好为 1 角秒，则这个天体相对我们的距离为 1 秒差距（记为 1pc）。一个秒差距的空间距离光线需走 3.259 年，即 $1\text{pc} = 3.259\text{ly}$ （光年）。一秒差距也相当于 206265 天文单位和相当于 3.08×10^{13} 公里。这个量天尺不仅有适当大小，而且使用起来也很方便。如，当某颗天体的视角差为 $0''.1$ ，则其距离为 10 秒差距（10pc），而 $\theta = 0''.01$ 时，距离则为 100 秒差距（100pc）。但这种单位对遥远的天体仍嫌太小，常用其千倍（Kpc）和百万倍（Mpc）为单位来描述天体的距离。当然，光年（光在一年中所走过的距离）也是天文学中常用的距离单位。例如，今天已观测到的最大宇宙尺度约为 100~200 亿光年。光年度量距离的好处是，它也直接反应了天体的年龄。如距离为 100 光年的天体，我们今天所接收到的光信号，刚好是它在 100 年前发出的。

由于人类所创造的任何仪器本身都有一定的误差和灵敏限。例如，对视角的分辨率一般为 $0''.01$ ，故当天体的距离大于 100pc 时，三角视差法就显得无能为力了。那么，Kpc 和 Mpc 的距离又是如何确定的呢？

19. 什么是天体的光度距离

我们说过，一颗天体的视亮度与其距离的平方成反比。图 6 给出了这种变化的示意图。距灯 1 米远的 1 块平板接收到的灯光，等于 2 米处的 $2 \times 2 = 4$ 块相同平板所接收的光，也等于 3 米处的 $3 \times 3 = 9$ 块相同平板所接收到的

光；而在 4 米处的每块相同的平板所能接收到的光仅为一米处的 $1/16$ 。

我们已提及，通常把眼睛可直接看到的星光分成了 6 等，按这种标准，太阳的视星等为一 26.7 等，而天狼星为一 1.4 等。按视亮度比，太阳比天狼星亮 130 亿倍。但天狼星距离我们有 2.7PC，即 8.7 光年（而太阳仅 8 光分），如果把太阳放在天狼星的位置上，它要比现在暗 $55 \times 55 = 3000$ 亿倍左右。因此，天狼星的实际发光本领比太阳要强 23 倍。人们常常感叹夏天中午的太阳曰“赤日炎炎似火烧”。如果太阳的位置换成了天狼星，那么整个地球将变成一个大的炼钢炉了。

天文学中，为了比较天体的光度，通常设想把天体都放在距我们 10pc 的位置上来比较它们的亮度。处在这个距离上的天体所具有的“视星等”称为该天体的“绝对星等”。它直接标志了天体的发光本领。例如，对于天狼星其绝对星等为 1.3 等，而太阳为 4.8 等。（请注意：如前面所述，星等数越大，天体越暗。）

这样一来，如果我们按照一定的物理因素确信某一类天体具有相同的“绝对星等”那么这些相同类型天体的“视星等”即反映了它们之间的相对距离。如果能进一步确定其“绝对星等”则可确定它们的距离。而这种距离通常称为天体的“光度距离”。而具有相同“绝对星等”的某类天体称为“标准烛光”。因为天体的视星等是很容易确定的，因此，天体的光度距离的确定便归结为天体的“标准烛光”的确定。

20. 各种标准烛光的寻求

恒星是天体乐团的基本歌手，它们不仅在空间位置上有自行变化，在亮度上也有变化。一些老年恒星会出现光度的突然变亮的现象，有的突然增大几百倍，甚至几百万倍。于是在一个开始很暗弱甚至看来什么天体都没有的地方突然出现一个新的恒星。按其亮度和其他（如光谱型）特征可将它们分成变星，新星，超新星等。我国古书上也称为“客星”，好像来往的过客。因为这些星星很多在经过一段时期后即变暗甚至消失，仅留下肉眼看不见的如星云般的遗迹。

有些变星，其光度变化周期与光度变化幅度间有着严格的关系。分析表明，它们可能具有十分接近的绝对星等。例如有一类称为“第一类造父变星”（或简称为“造父变星”）的天体，它们的光变周期多数在 3 天到 50 天之间，而以 5~6 天为最多。后来查明，造成这类光变的原因乃是整个天体在脉动，即它们的半径在时大时小地变化，整个天体在时胀时缩。原来它们都是不甘心退出历史舞台的老年歌手。它们回味漫长的一生，总觉得自己还有余力可以发挥，但毕竟核燃料将尽，靠着引力的作用，当星体在坍缩过程中，引力能转化成热能使天体的温度升高并再次点燃核反应，反应所产生的热又使天体重新膨胀。这样的往复过程使天体产生整体的脉动。

这些“老年歌星”虽对雄壮的天体乐曲的总贡献显得微不足道，但由于它们的处境和经历几乎都一样，最后才形成了很多共同的特点，如周光关系，总的辐射能量等。于是它们提供了一种确定距离的“标准烛光”。由于每一个变星大多处于星团中，因此，一旦变星距离确定后，所在的星团的位置亦随之确定。

利用这种方法确定光度距离尚须说明两点：其一是有关精度问题，即“标准烛光”是否标准？即是否所选出的一类天体确有严格一致的“绝对星等”？研究表明，光变周期越长的造父变星亮度也越高。因此，为提高距离精度就

必须提高光变周期的分辨精度。另一个问题是变星的绝对星等的量值，限制了利用这种方法所能确定的天体的最远距离，它约为十万秒差距（约 326 千光年）。它比“三角视差”确定的距离推远了一万倍。通过对“标准烛光”的改进，例如利用天琴座 RR 型变星，作为“标准烛光”，定出了银河系中大量球状星团的距离。从而确定了银河系的大小和规模。

我想不少读者会自然地想到，为了确定更远的距离，需要找出发光本领比造父变星更强的天体作为“标准烛光”。大量的观测和研究表明“超新星”的爆发提供了这样的可能。天琴座 RR 型变星的绝对星等为 0 等左右，而 1 型超新星的绝对星等为一 19 等，比太阳亮 4×10^9 倍。II 型超新星为一 17 等，比太阳亮 6×10^8 倍。因此用 II 型超新星所确定的距离可达到 3200MPC，I 型超新星可达 1300MPC。这样，天体距离的测定又扩展了 1 万到 3 万倍。

由大量恒星组成的球状星团，通过一定的选择，用一些最亮的对象作为“标准烛光”。也可以用最亮星系作为“标准烛光”。虽然这些方法往往有些人任意的任意性，但却也把那些既找不到变星又没有新星或超新星的球状星团和星系的距离，作出相当可靠的推断。

21. 天体的视角距离

同样大小的物体，若处于较远的距离，看起来显得小，而近则大。或许有人怀疑这是人体的局限把？其实对任何精密观测仪器也均如此。这是因为同样大小的物体若距离越远，给出的视张角越小。比如太阳和月亮，它们在天空中看起来仿佛一样大，其实太阳的直径比月亮大 390 倍。凑巧太阳又比月亮远 390 倍。因此，在这个对宇宙而言十分微小的尺度上，它们的视角径也几乎相等，都是 $32'$ 左右。对于更大更远的天体，我们也可以用这种方法来确定其距离。

不过这种方法确定距离存在着内在的矛盾，即两个未知数的相互循环。因为要用视角推断距离必先知天体的线径 L ，而要准确推知天体的线径又必须知道天体的距离。而不同星系或球状星团的形状和尺度都相差很大。因此，涉及天体最大尺度相对视线的夹角。当角度 θ 的变化对视角 ϕ 的影响很大。另外，观测上确定天体的大小，涉及很多技术问题。如拍摄天体照片时的观测条件和曝光时间的长短都对显示出的光点大小有很大影响。

尽管这种方法相当粗糙，但在众多的确定天体距离的方法中，它仍提供了一种天体的距离的比较和判断的依据。特别是宇宙大尺度范围内的几何性质即“直线”的性质，提供了一种较为可靠的依据。关于这点我们在有关宇宙学的问题中再详细讨论。

22. 天体的哈勃距离

1929 年美国天文学家哈勃在研究星系光谱的性质时发现，河外天体的光谱线，与一般物质谱线很不相同。但如果认为这些谱线向红端有一个小的移动——一称为红移。则河外星系的谱线就与一般物质的光谱线一致了。哈勃研究了他当时得到的 24 个确定了距离的星系。发现，这些星系所发射谱线的红移竟和星系的距离成简单的线性关系。尽管哈勃当时仅用了 24 个天体得出天体距离和红移成正比的“哈勃定律”，但在他以后的 70 多年的天文学的观测和研究表明，各种河外天体的红移似乎无例外地都遵从哈勃定律。今天已观测到的最大红移为 4.98。它成为我们已观测到的最遥远距离的标志。人们也常把具有最大红移的类星体称为宇宙边缘的天体。而河外天体的红移成了新的量天尺。由此得出的天体距离称“哈勃距离”。

从物理观点看来，产生红移的机制仅有两种——引力红移和多普勒红移。大量研究表明，绝大多数天体的红移应归结为多普勒效应。由此，哈勃定律的一个自然的结论是：我们的宇宙正在膨胀！乍一看来这是一个令人毛骨耸然的结论。但人们由此建立起了以宇宙起源于一次大爆炸为基本假设的“标准宇宙模型”。关于这些，我们后面再详细介绍。

这里顺便说明一点，即哈勃关系中距离和红移的比例系数通常称为“哈勃常数”，它表述了宇宙的膨胀率，它是一个随宇宙时变化的量。当前这个值为 $H^0 = 75 \pm 25$ 公里/秒。百万秒差距。意思是天体的距离每增加一个百万秒差距其退行速率增大 75 ± 25 公里/秒。哈勃常数的倒数正比于宇宙的年龄。目前大多数天文学家倾向于认为宇宙年龄约为 130 ~ 200 亿年。与此相应表明我们当前已观测到的宇宙最遥远的距离为 130 ~ 200 亿光年。

至此，我们已介绍了来自宇宙天体的各种电磁波辐射的波段与产生相应辐射的各种物理机制。另一方面，我们又介绍了天文上如何确定天体的方位和视向距离。这样，人们不仅可以欣赏来自天体的妙唱，还能够辨别这些歌手在宇宙中所处的方位和距离。只有确定了这些参量后，我们才有可能对各类天体的一生的经历与遭遇，从它们的“衷曲”中加以分析。后面我们就来介绍形形色色的星星乐团及其歌手，以使读者能对当代天文学及宇宙学有一个较全面的轮廓。

太阳系的独唱歌手及其伴舞

地球在太阳系中的位置

23. 地心说与日心说之争

如果说，科学是人类试图把握客观世界的一种努力。那么人们总是力图把自己对客观世界的各种感受用自己设想的一个“模型”加以概括解释。从这个意义上说，“神”也许就是最原始，最朴实的“科学”。雷电本来就令人十分恐怖，加之还常常击死人甚至引起火灾。人们或许从自己钻木取火的经验中感受到或许天上住着比地面上的人类更有力量的“神”，他可以用他的超人的力量来惩戒这个世界的不平。于是人们由此得到一种安慰和满足，并预言出一些人的行为规范。“你应孝敬父母，否则将会遭到报应！”这或许是人类的一种要求“预见”的本能，或许是“模型”的创立者为了证明自己的正确而下的某种“赌注”。不难设想，对于一些遭到雷击的不幸者总可能有这种或那种弱点。于是预言者胜利了！但日子一久，必然会有一些公认的圣人也遭不测，于是人们开始怀疑是否真有神的存在。但这时还没有出现科学。直到人们了解到电的性质，才想到用放电现象来解雷电，认为雷击和闪电可能是一种大规模的放电。这个模型今天看来不足为奇，但在当年要突破“神”对人们的束缚，得要多大的勇气和魄力啊。直到富兰克林通过用能导电的线所放的风筝，当天上打雷时，地面上的人用金属钥匙接近风筝线同样可以看到放电现象。这样，才使人们的“猜想”变成了受到实验证实的科学真理。但科学到此并未止步。一方面，技术上利用它制成了“避雷针”，确保人们不再遭雷击。另一方面又进一步研究电的性质以及它和磁的关系……今天“电”已成了现代化的象征，可以说是每一个人每天都享受到的科学成果。但又有多少人想到当年法拉第为了研究电磁感应面对毫无反应的

线圈和磁棒长期所处的尴尬场面呢？的确，科学家的形象往往并不显得那么高大，他们很难激发起诗人的灵感，但他们的成果却深刻地影响着每一个人的思维和生活。

对于天象，生活在地球各地的人们，几乎都有他们自己独特的研究方法和习惯。天象的最大特点也许是他持久的稳定性。通过年长日久的观察和记录，人们逐步地掌握了太阳和月亮这两个最明亮的天体的运行规律，并根据这种运行规律，制定了他们各自的历法。以便更有效地掌握农事。大概也是人类要求“预见”的驱使：人类通过对天象变幻和人间生活间有着密切关系的体验，猜想既然日月的变化能确定农事，那么世上的人事或许由众多的群星变化所确定。因此人们在观测天象时往往更注意那些变化着的天体：流星的出现或预兆着某人将死亡，彗星的来临预兆着灾祸，日食和月食也是人们关心并感到恐怖的，特别是日全食的发生真有世界末日来临之感……

日月星辰的升落，给人们的直觉是：绝大部分星星像明亮的钻石，固定不动地镶嵌天球内表面上。整个天球就嵌着这些星星，绕着一根天轴，环绕着地面，由东向西不停地转动。我们所在的地球当然是宇宙的中心了！古代哲学家们也曾试图用种种方法来证明地球确实是宇宙的中心。最有力的证据就是关于重物 and 轻物的理论。他们认为，土是最重的元素，所有有重量的东西朝着它运动，趋向于它的中心。大地既然是球形的，重的东西又垂直于它的表面而运动，若不是被地面挡住，它们将一起冲向中心。那些向中心运动的东西，在到达中心后就不动了。于是整个大地在宇宙中心更加保持静止。大地接受了所有降落的物体，将由于自己的重量而保持不动。

亚里士多德的根据是运动的假想性质，认为，单个的简单的物体的运动是简单的。一个简单运动或者是直线运动或者是圆周运动。直线运动或者向下（即对着中心），或者向上（即离开中心）；圆周运动则是绕着中心。天体则具有圆周运动。

上面的描述大体上还是符合人们的直觉感受甚至是粗略的观测的。但在长期观测中，发现行星的运行规律比较特殊，它们好像是在沿着黄道附近“兜圈子”，平时由西向东，有时好像在天空停着不动，然后又由东向西，经过一段时间，又折回它们平时运动的方向。图 8 给出 1896 年 8 月 1 日到 10 月 3 日的水星的运行轨迹。

几个行星的特殊轨道的反常当然会引起人们的注意。为了维护地球中心说，人们用了本轮—均轮体系，认为，行星一方面绕地球运动，其轨道形成“均轮”，另一方面又绕以均轮上的点为圆心的“本轮”运动。这是托勒密所创立的体系，它采用几何的方式比较正确地描绘了各个行星的运动，单在数学上是说得通的，但要把几个行星统一起来形成一个整体就显得十分混乱了。哥白尼直截了当地指出：托勒密的体系“好像一个艺术家为了画像，从不同的模特儿身上选取手，脚，头和身体的其他部分，每一部分画得都很好，但不属同一个人的身体，大小不能配合，结果不是人而是一个怪物了”。

哥白尼通过长期地观测和分析指出：行星本身在太空中运行时不会“兜圈子”。住在地球上的人之所以会看到行星兜圈子的现象，归根到底是因为地球在绕着太阳运动。行星的兜圈子只不过是地球围绕着太阳运动的实质在现象上的反映。只要假设地球围绕着太阳运动，这种行星在太空中兜圈子的现象立即就可以得到合理的说明。

如图 10 所示，如果地球在轨道 1 上绕着太阳运动，某行星在轨道 2 上运

动，当地球和该行星各自分别在轨道 1 和 2 的 A、B、C 和 A'、B'、C' 的位置上，而地球上的观测者所看到的行星则投影到相应的恒星背位置 A"、B"、C"、.....它正好是一条兜圈子的曲线。所以哥白尼断言：“在地球运动的前提下，我经过多次持久的观察，终于发现，如果把其他行星运动同地球运动相比较，并按每个行星的轨道计算这些运动，那么就得到了对这些行星所观察到的现象；而且，所有星球，天体的序列和大小，以至于天穹本身，也都彼此密切相关，任何部分离开原来的位置就会使所有其他部分和整个宇宙产生混乱。”

哥白尼的日心体系后来经过市鲁诺、开普勒等人的工作又有了很大的发展，它的主要缺陷都被克服了。开普勒同时代人伽里略（161 年）把他独自发明的望远镜指向天空，从而发现了木星的卫星。在这里他看到了小规模的天王星，这就用实物把哥白尼的思想演示为视觉可见的实在。但伽里略更伟大的功绩是他发展了力学原理。后来牛顿利用了开普勒关于行星运动的三定律再结合力学原理，发现了万有引力定律，阐明了行星（包括地球）为什么绕太阳运转的力学原因，并由此引

出了天文学中的一系列新的重大成就。此后，哥白尼的日心说才最终成为举世公认的科学理论。

1983 年，罗马教廷也不得不承认，17 世纪宗教裁判所对于伽里略的审判是错误的，宣布为 350 年前的冤案“平反”。

地球不是宇宙的中心，它只是太阳系九大行星中的普通一员。因此，星星乐团的各种演奏也决非专为地球而进行的。地球和其它天体一样，它自身也是一位表演者。

24. 地球的自转和公转

我们所居住的地球，是太阳系的一颗行星。研究地球在天文学中有很重要的意义。这不仅有助于研究太阳系的其他行星及研究太阳系的形成和演化，而且有助于弄清从而消除源自地球的各种因素（如地球运动，地球大气和磁场等）对于天文观测和研究的影响。毛泽东有一诗句说：“坐地日行八万里，巡天遥看一千河。”的确，我们是乘坐着“地球”这个巨大的“宇宙飞船”在欣赏着来自各类天体的“交响曲”。

地有多大，它具有甚么形状？这可能是每个人在孩童时期都曾带着几分的“傻气”向父母提过的问题。不知道有多少人已得到了正确的回答？又不知道有多少人已得到了自己满意的回答？头一个根据观测来解决这个问题的是公元前 3 世纪的古希腊学者埃拉托色尼。他知道，6 月 21 日夏至那一天，就是太阳最接近天顶的这一天（当然是对北回归线以北的地区而言），在埃及的塞恩城（现在的阿斯旺），正午时分太阳正好位于天顶，他是看一口深井当时太阳直射井底。而在同一时刻，在塞恩城以北 800 公里的亚历山大城太阳位于天顶以南 $7^{\circ}12'$ 的地方。

如果大地是平的，那么，太阳对于上述两个城市应同时位于头顶正上方。现在太阳在一处位于天顶，另一处却不是在天顶，这个事实本身就证明了这两个城市间的地面是弯曲的。地面的曲率越大，两地的天顶角差就越大。图 11 给出了计算地球大小的原理示意。读者如果学过几何就不难由知道一个扇形的弧长和圆心角计算圆的半径的公式，代入上面的两个数就可得到地球的半径为 6366.2 公里，大圆的周长为 40000 公里。而最新的测定给出地球赤道的周长为 40076.5 公里。两千多年前的古人就通过一些简单的道理得到人

们十分关心而又对于了解自然十分重要的结果。人们常说：不识庐山真面目，只缘生在此山中。看来应改为：欲识庐山真面目，只能身在此山中。大自然把它的秘密平权地赋予每一个人，差别是你任它从你身边滑过去，还是有心去抓住它。而一旦抓住后得利用一些简单办法去揭示其中的奥妙。从这个意义上说来，想象力对于科学的发展也许是更重要的。

令人遗憾的是这个十分正确的结果当时并不被人所接受，而一些较小的不正确的数字反而被广泛流传，哥伦布就是利用的不正确的较小的数字来证明，凭借当时的船就能从西班牙向西航行到亚洲。以至他错把美洲当成亚洲而意外地发现了“新大陆”。这种“歪打正着”的事例，科学上也不仅一次。

直到 1522 年，麦哲伦的船队里唯一剩下的一艘返回之后，才无可辩驳地确定了地球的真实大小，证明了埃拉托色尼是正确的。

地球的运动分为公转和自转。地球绕太阳的周期运动称为公转，其轨道为椭圆。轨道长半轴即日地平均距离，历史上曾称为天文单位，作为重要的天文基本常数之一。据观测，目前地球于每年 1 月 3 日前后经过近日点，这时日地距离为 1.471×10^8 公里，公转速度达到最大值，为 30.3 公里/秒；大约 7 月 4 日左右经过远日点，日地距离增大到 1.521×10^8 公里，公转速度减低到最小值，为 29.3 公里/秒（见图 12）。观测还表明，地球接连两次经过近日点的时间间隔为 365.25964 日，在天文上称之为近点年，它比回归年长 25 分 07 秒。由此可知，每过 60 年，地球经过近日点的日期将推迟一天。这称为地球的近日点的进动。它是由于行星间的相互摄动，使其轨道偏离椭圆。利用摄动理论对行星轨道的精确计算曾导致海王星的发现，而水星近日点的进动问题，促进了爱因斯坦广义相对论的创立。

天体的周日运动是地球自转的反映。地面上可以通过很多现象和实验来证明地球在自转。如，落体偏东：由于地球自转的线速度随到地心的距离增大而增加。高处的物体向东的线速度大，因而其落点比原来的方位要稍稍偏东一点。力学理论中对于一个旋转系统中的运动物体将受到科里奥利力（简称科氏力）。地球自转引起的科氏力会造成很多特殊现象，我们这里不再介绍。

由于地球的自转，使之成为一个陀螺。又由于地球质量分布的不均匀致使太阳和月亮对地球的引力并不集中于地球的球心，甚至不是在一个固定点，因此有力矩作用于地球，使之产生进动和章动。所谓地球的进动是指地轴环绕垂直于黄道面的轴线作缓慢的圆锥运动。而由于地球、太阳和月亮三者间的距离在不断变化引起天极和春分点更复杂的运动，这类运动可以用一些小幅度短周期的振动加以描述，这类运动称为章动。这些运动的效果是改变了地球运动的回归年，而地轴的缓慢移动会造成各地星空状况的变化。图 13 给出了地轴的进动和章动的示意图。

地球的运动实际上是一个十分复杂的过程，就地球自转而言，由于潮汐，大气流动及水的流动会造成地球自转速度的不均匀的变化。这类变化有复杂的周期结构，观测和分析这些变化是当前天文学中的热门课题之一。

25. 地球的卫星——月球

除了流星，陨星和少量的人造天体（卫星，火箭及其碎片）外，月亮是离地球最近的天体。月球是地球唯一的天然卫星。因此，研究月球也为研究天然的卫星世界提供了一个难得的样品。

月亮的轨道也是一个椭圆，其形状和取向都在不断地变化。其偏心率 e

的变化范围是 $1/15 \sim 1/23$ 相应的月地距离变化范围为 358774 ~ 410028 和 363297 ~ 405505 公里。

由于距离近，因此就很容易用各种方法来确定月地间的距离。公元前 3 世纪，古希腊学者阿里斯塔克巧妙地做了第一次科学的尝试。他的原理十分简单，利用月球上、下弦的机会去测量太阳和月亮与地球间两连线的夹角 SEM 的值。然后可用几何方法估计月地和日地距离之比。由于当时技术的落后他测得的 $SEM = 87^\circ$ （实际应为 $89^\circ 51'$ ）和实际相差较大，但他却由此得到一个极其精辟而重要的结论：太阳比地球大，应当是地球绕太阳转而不是像地心说那样说的太阳绕地球转。如果他的发现能及时得到人们的承认，那么日心说的创立会提前两千多年创立了。

差不多一个世纪以后，又一个古希腊天文学家喜帕恰斯从日食时地球投在月球上的弧状影子，用几何方法测定月球的距离。他得到了比较准确的结论：月地距离值是地球直径的 $30 \frac{1}{6}$ 倍。可惜他并不知道埃拉托色尼关于地球半径的测量结果，否则他真可能第一个计算出月地间的准确距离了（如果真是这样可得到月地距离为 384072 . 8 公里）。前面我们已提到了，这个距离直到 1752 年由两个法国天文学家拉卡伊和拉朗德利用三角视差法得到为 384400 公里。（对比刚才设想的计算真是相差不多，不过那可要早两千多年啊！）这里我们请读者记住，这个数后来怎么被牛顿巧妙地利用。

知道了月地距后人们就可以进一步测量月球的大小。其半径为 1738 公里，它相当于地球半径的 0 . 2728。按体积而言仅及地球的 2%。质量的测定可只能是现代科学的事了。因为它必须借助万有引力的观念。但仍可用几何方法来估算月亮和地球的质量的比。一个可行的办法是测定地月系统的质心 C 的位置。质心 C 是通过精确测定太阳在天球上的位置，由它的黄经的细微变化中算出质心到地球的距离 $EC = 4671$ 公里（它小地球半径，因此地月的质心是在地壳内）故，月亮的质量仅为地球的 $1/81 . 30$ 。月亮上的重力加速度也可由此估算为地球上的 $1/6$ 。所以如果您想创造跳高的“世界记录”而您目前水平又只有一米，您可不用着急，你只要申请到月球上参赛，就可轻易地越过 6 米的栏杆。这里可能是个笑话，但阿波罗登月飞船上的宇航员在月球上的行动中感到在月面上，最有效的动作就是像袋鼠那样双脚离地的跳跃前进。

月球绕地球的运行周期为 27 日 7 小时 43 分 12 秒 = 2360592 秒 = $2 . 36 \times 10^6$ 秒。

在莎士比亚的《雅典的泰门》中，疯狂中的泰门说道：“月亮是个无耻的贼，她的惨白的光辉是从太阳那儿偷来的。”泰门还说：“（我的疯狂）正像月亮一样，因为缺少可以照人的光；可是我不能像月亮一样缺而复圆，因为我没有可以借取光明的太阳。”我想莎翁已经借用“疯人的狂言”说明了月亮反射太阳的光辉和圆缺变化的道理。我想这里就不必再多赘述了。

随着空间技术的发展，人类可能更多地登上月球，甚至是其他行星。那么，登上那些星球的人们将用地理学的方法去研究它们。他们还可以用天文学的方法来重新研究地球。

26 . 年、月、日和太阳的十二宫

时间和空间可能是和天文学一样是一个最古老而又是最前沿的课题。人类所从事的一切甚至人类自身无不与时间和空间相关。昼夜和季节的变化无疑是人类最先感受到的天象。似乎是时间更先被人们认识。但人们自身的存

在就必然要占有有一定空间。实际上，这三者是不可分割的整体。任何事物具有僵死不变性和漂浮不定性。所谓僵死不变最实质的表现就是永恒地占有确定的空间更进一步就表象出永恒不变的外形，于是产生了点、线、面，和体积等的一类空间的概念。反之，事物的任何变化，包括空间位置变化（机械运动）和内部状态变化则表象了时间。可见，任何一种事物的出现，必然意味着他占有特定的空间并开始了本身的演化。与每一个天体相关的演化过程则给出了与其相关的时间。

地球绕太阳的公转给出了“年”的概念它可以通过气候的变化或观测太阳在恒星背景的相对位置标志。如果没有别的运动过程加以比较，则“年”的利用是极为不便的。幸好地球本身还在自转，它使地球上的每个区域不断地交替地面、背太阳而形成昼夜现象。将二者加以比较则可发现地球每绕太阳转一周，它自身已转动了 365, 2564 周。于是地球上的一年是 365.2564 日，但每年都加个 0.2564 日确实很不方便，因此每一年定为 365 天，而每四年来一个闰年加一天为 366 天以避免误差的不断累积。但由年到日跳跃太大，恰好月相的圆缺变化填补了这个空缺，于是我们用年、月和日来计量时间。所以年、月和日计量的全是天文时。也是地球诞生后由地球的特定运动所标志的“地球时”。如果地球一旦毁灭，“地球时”也随之消失。与此同时也是地球本身所占有的空间和其轨道空间，我们姑且把它总称为“地球空间”的消失。但决不是时间和空间的消失。它仅意味着组成地球的物质由现在的近似为“固体球状围绕太阳不断地公转和自转的状态转化为另外的状态”；即占有另外形式的空间，并开始了另外形式的演化，即诞生了新的空间和时间。

为了在一昼夜内得到更短的时间间隔，人们创造了各种计时装置。人们利用各种简单稳定而又易于实现的周期运动作为時計（其实这仅是为了计量方便而非必要的，实际上任何变化过程均可作为時計，像沙漏就是非周期运动的時計）。有了计时的时钟，人们一方面可以合理地安排一天的活动日程，另一方面通过更精确的计时，人们发现了地球运动的某些不均匀性从而为进一步研究地球（甚至其他天体）的运动和演化提供了依据。

任何时钟的计时是以运动所展示的空间位移为基础的，也就是说时间的度量是以空间度量为基础的。钟表是以表盘的空间刻度为计时的基础。地球的经度线，就好像时钟刻度。实际上，各地的时差就是按每 15° 差一个小时而划定。如果我们在太空也做出某种标记，则它也可以作为时间指示。也许读者认为我在开玩笑吧！的确的，这并非玩笑，天空的星座就为我们提供了这种标志。由于地球绕太阳作公转运动，而地球上的人则看到太阳在恒星背景上作相对运动。太阳的视运动轨道就是“黄道”。黄道在天球上的位置基本上是固定的，它穿过 12 个星座，这些星座分布在黄道南北各 8° 宽的带内，称黄道 12 宫。从春分点起，每宫冠以星座的名称。它们是：

白羊宫 金牛宫 双子宫
巨蟹宫 狮子宫 室女宫
天秤宫 天蝎宫 人马宫
摩羯宫 宝瓶宫 双鱼宫

图 15 显示了 12 宫在黄道上分布的示意图。它不是很像一个大钟的表盘吗？如果太阳系一形成大体上就是今天这个样子，那么，这口钟已经稳定地运行了 50 多亿年了！不过它还不能算是宇宙中最老的“时钟”。

怎样区别恒星和行星

27. 天体是上帝的使者吗——行星的轨道

据说丹麦人对他们古代人中感到自豪的有两个：一个是世界著名童话大师安徒生，另一个就是天文学家第谷。他在汉岛过了历时 21 载美好的天文观测生涯，他始终不懈地坚持天文观测，带有许多训练有素的助手，他们按照他的严格要求细心地从事各项天文观测。由于第谷的天文仪器在当时是举世无双的，加上高超的观测技术，即使是在望远镜问世前，所测天体的位置误差也已小于 $2'$ 。在他们大量的观测成果中对天文学发展起着不可磨灭作用的是他积累了大量关于行星运动的观测数据，为开普勒行星运动定律的发现奠定了观测基础。

开普勒是出生在德国的天文学家，1600 年 10 月，他开始在第谷身边工作。次年秋，第谷病倒，于 10 月 24 日去世。他把大量珍贵的观测资料遗赠给开普勒，要求开普勒完成他的未竟事业，还告诫开普勒要尊重观测事实。开普勒认识到第谷资料的重要价值，他在获得这些资料后，立即全力以赴地投入研究工作。他仍从圆轨道开始考虑行星运动，并首先选择了火星。由于火星运动时地球也在运动，故要弄清火星的运动，必须先弄清地球的运动。为此，开普勒想出了一个巧妙的办法。他假定地球和火星都在偏心的圆轨道上绕太阳运动，然后在各个相继的火星年（即火星回到原来位置的时候），来测定地球的位置。比较幸运的是地球轨道确实很接近于圆，故通过一些几何分析，开普勒得到一个结论：在相同的时间里，地球到太阳的连线扫过的面积相等。后来这个结论的推广便是关于行星运动的开普勒第二定律，或称面积定律。当开普勒试图把这个结果用于火星时却出现了问题，经过反复演算他发现，只要假设火星的轨道是一个椭圆，则理论推算就与观测资料密切相符。于是开普勒又得到一个结论说：火星是在椭圆轨道上绕太阳运动，太阳位于椭圆的一个焦点上。这个结论的推广就是关于行星运动的开普勒第一定律。1609 年，开普勒出版了《新天文学》一书，公布了这两条定律。

在 1609~1619 年这十年间，开普勒不知做了多少次试算，经历了多少次失败。最后，当他将行星公转周期 P （以年为单位）的平方与行星到太阳的距离 r （以日地平均距离为单位）的立方进行比较时，终于发现两者惊人地相吻合。

于是开普勒又有了一项重要发现：行星到太阳平均距离的立方与其公转周期的平方成正比。这便是行星运动第三定律。1619 年，开普勒在《宇宙和谐论》一书中公布了这一结果。

我们已看到哥白尼虽然提出了日心说，但他并没有摆脱天体是理想的圆轨道的影响。由哥白尼的圆到开普勒的椭圆，现代科学把它们叫做轨道的运动学描述，即在运动的这种数学表述里不包括产生这些运动的条件和原因。运动规律的因果表述是伽里略所创立的动力学的内容。牛顿把这个动力学应用于天体得到了著名的万有引力公式，他使天文学沿着天体力学的方向发展到一个辉煌的高度，与此同时也暴露出牛顿力学的弱点。

28. 天体运动和落体运动怎么统一——万有引力的假设

牛顿成功地建立了行星轨道的动力学理论，奠定了天体力学的基础。他是将伽里略关于力的概念应用于天体。牛顿认为，开普勒的行星运动三定律

是把当时天文学对行星运动的观测结果归结为非常简明的表述。牛顿用他的力学方法来考察行星运动，并发现开普勒的头两个定律其实是表明行星在其轨道运动中具有一个向心加速度。考虑到第三定律则可以证明这个加速度是与行星到太阳的距离 r 的平方成反比，而与天体自身的性质无关。我们可看到牛顿到此并没有做任何假设。他有一句简短而明确的格言：“我不诉诸假设”。这也许是对他引出万有引力公式采用的方法的自我表白。至此，我们可以这样说：牛顿把开普勒由第谷的观测资料总结出来的行星运动的三定律从运动学的观点作了一次“翻译”说：行星在绕太阳的转动中存在一个与行星本身无关而只与其到太阳的距离 r 的平方成反比的向心加速度。

一旦得到运动加速度后，由牛顿本人建立的关于物体运动的第二定律可知，应该存在一个作用在行星上的“力”，这个力的方向指向太阳，大小与行星的质量成正比且与行星到太阳距离的平方成反比。进一步利用牛顿本人的第三定律，可证明这个力是太阳和行星间的相互吸引力也与太阳的质量成正比。这个力与行星质量成正比，就好像地球上物体的重量那样。这使牛顿想到，两种力可能有相同的起源。这或许是传说中牛顿因看到苹果落地而发现了万有引力的由来吧。这在今天已是老生常谈了，或许大家难以想象当时牛顿所具有的革新的魄力与胆识。把行星绕太阳的运动或月亮绕地球的转动想象成一个“降落”过程，天体的运动居然就像从我们手中扔出的一块石头降落那样，遵从着相同规律和在相同的力的作用下，这需要多么惊人的想象力啊！行星和月亮之所以没有像落体那样被吸引向中心天体，仅因为它们有一个垂直于吸引力的初始速度，而运动的惯性产生了离心力。

科学和哲学思辨的差别在于：一切科学思想，只有当计算所得到的数值与测量所得到的数值相互吻合时，才是正确的和有价值的。牛顿是用月亮来验证他的万有引力的想法。如果把地球当着中心天体，月亮就好比行星。而月地距离我们已提过早在公元前就有过精确的估计。而月球绕地球的公转周期更是容易准确测定的量。有了这两个量，就可以按牛顿的公式计算出地球对月亮的吸引力。牛顿推测，如果月亮所受地球的吸引力与地球对其表面物体的重力有共同的起源，那么把由月亮的公转参数所计算的地球对它的吸引力的关系，当把月地距离换成地球自身的半径时，就应该得到地面上的物体所受地球的重力值。计算结果完全证实了牛顿的想法。

这便证明了地面上的物体所受到的地球的吸引力和地球把月亮维持在它的轨道上的吸引力是产生于同一源。而后者是和把地球和其他行星维持在绕日轨道上的力的一致性是不能有任何怀疑的。于是牛顿想到所有物体间都存在着相互的吸引，而任何两物体相互吸引，吸引力的大小与每个物体的质量成正比，与它们之间距离的平方成反比。这就是牛顿的万有引力定律，它有力地证明了天体的轨道运动与地球表面的落体运动的同一性。

29. 太阳系的基本成员——独唱歌手的伴舞

地球上的人们经过千百年的观测和研究，到 16 世纪后才逐渐明白地球是绕太阳公转的行星之一。太阳连同它的九大行星（包括它们的卫星）及万千小行星，彗星组成了一个比地月“双星”系统更高一层次的天体系统——太阳系。

人们早就认识到太阳系中发光的天体只有太阳一个，其他天体尽管看起来很明亮，但它们都是从太阳那里“偷”来的。正像莎士比亚描写的“月亮是个无耻的小偷”。当然，这种说法是不很公正的，不过它出自一个处于疯

狂的人之口，我们也不必再追究！

给出了太阳系的示意图，唯一发光的太阳处于中央，九大行星处于各自的基本固定的轨道上旋转。多么像一些伴舞围绕着独唱歌星进退周旋，使整个舞台显得更加壮丽多姿！大量的小行星虽然也有其固定轨道，但由于其质量太小很容易受到“摄动”而偏离其轨道。而一些彗星和流星更是沿着独特的轨道不时出现而迅速退场……这难道不比人间的演出更加美妙动人吗！

这里我们不详细讨论太阳系的一些细节问题，仅将九大行星的主要特征列如下表：

30．行星的卫星——伴舞的舞伴

上表中的最后一项列出了九大行星的卫星数目。由表可见，大多数行星都有卫星，有的还不止一颗。而土星多达 22 颗而且还可能有更多。现代天体演化理论认为太阳系天体都有类似起源方式和演化途径。因而，九大行星和许多卫星的运动轨道特性必有很多共同之处。如，太阳系中所有行星，小行星绕太阳运动的方向都是自西向东——逆时针方向。而大多数卫星绕行星的运动方向也是如此。这种现象天文上称为同向性。另外，大多数行星的轨道几乎在一个平面上。人们把此特性称为共面性。另外，行星轨道很接近于圆，而卫星轨道就更接近于圆了。这一特点也称为近圆性。人们把具有这些特点的卫星称为正常卫星，反之是反常卫星。

地球只有一个卫星，即月亮。而火星有两个卫星，火卫一（靠里的一颗）和火卫二。根据水手 9 号所拍照片，已知它们的形状非常不规则，表面崎岖不平，密布不少凹坑，且火卫一还有许多沟痕。火星的两颗卫星均属于不规则卫星，此外，木卫六，木卫七，木卫八，木卫九，木卫十，木卫十三等也是不规则卫星。月亮是一颗特殊卫星，它既不是规则卫星，也不属于不规则卫星。

现在，天文学家普遍认为，规则卫星与不规则卫星可能具有截然不同的起源方式和演化途径。也就是说，规则卫星可能与行星起源于同一团星云物质，且是与行星同时形成的。而不规则卫星，尤其是那些逆行，质量不大，形状不规则的卫星，则很可能是在行星形成后，偶尔闯入行星区而被行星俘获的小行星。

可见，围绕太阳这个独唱歌手的伴舞，其中每一个还有多少不同的舞伴。它们各自在其轨道上不停地运动，展现出太阳系的宏伟壮丽的场面。

31．光速的天文测定——木星的卫星蚀

人们常常把天文学单纯理解为把已有的物理定律用以解释观测到的天文现象。其实，由于天体所处的各种奇特状态提供了大量地面上无法实现的物理状态，因此，大量的天文观测结果实际上为建立新的物理定律提供了观测事实，如牛顿的万有引力公式的建立就是依据的开普勒关于行星运动的三定律。与相对论的建立有关的光行差现象也是首先在天文观测中发现的。现代物理学中的一个重要常数，光速，也是在 1676 年，由法国天文学家罗默从对木卫一的观测中得到的。从对光传播所作的一切观测中知道，光速是十分巨大的。伽里略试图用灯光信号来测量这个速度，但没有成功，因为光通过地面上的距离只用极短的时间。因此要想成功地进行这种测量，只有利用天文空间中天体之间的巨大距离。

图 17 表示了我们在地球上观测木星及其卫星的情况，每当卫星进入木星的影子里时，就发生卫星食。如果木星上有一个观测者，他认为每隔一段时

间 t ，就出现一次卫星食， t 等于卫星绕木星转一圈的时间。如果 L 为木星到地球的距离，那么，这个信号要经过一段时间 L/c 后才能到达地球。如果令 1 表示在卫星转一圈的时间里距离 L 的改变量，那么在地球上的观测者看来，每相邻两次卫星食之间的时间间隔就稍有不同，而为 $t+1/c$ 。因此从地球上看到的卫星食周期就要比从木星上看到的真正周期长些或短些，这要看距离 L 是增加还是减小而定。从地球上观测时，卫星转 n 圈所需的时间等于

$$t_n = N_t + 1_n / C$$

上式中 1_n 是在卫星转 n 圈的时间里距离 L 的总改变量。

这里有两个未知量 t 和 c ，它们可以根据两个适当选择的观测来确定。首先，地球和木星之间的距离 L 经过一定时间 t_n 后又相距同样远。我们可以估计一下这个时间间隔 t_n 。内发生的卫星食数 N 。因木星运动得比较慢，所以可以近似认为仅取决于地球的轨道位置，故可把 t_n 取为地球绕太阳公转一圈所需的时间，即一年。由此可求出 t 。

其次，我们从地球和木星相距最近时的那个位置开始，数一下半年时间内发生卫星食的数目 N' ，此时 l'_N 等于地球的公转轨道直径（即 1 个天文单位约 3×10^8 公里）。我们由此可计算 $t'_N = N'_t + l'_N / c$ 。通过观测得到延迟时间 $t'_N - N'_t$ 为 17 分即约 1000 秒，由此得到 $c = 300000$ 公里/秒，它十分接近光速的精确值。

1727 年布拉德莱发现，因光速有限而引起的另一效应——光行差现象，即所有恒星似乎在作一种共同的周年运动，它显然与地球绕日运动相对应。从粒子的观点来看很容易理解这一现象。如图 18 所示，如果地球是静止不动的，则为了观测一个天体，我们必须将望远镜镜头直接对准该天体，相反，如果地球正在向右运动，则望远镜镜头必须如图 18 中 b 所示那样倾斜一个角度。有关光的传播性质的研究导致了日后狭义相对论的出现。

32．美丽的行星光环——伴舞的服饰

在太阳系的行星中已发现三个行星有环。是土星及其光环（见彩图），真像一个贵妇穿带着华贵的服饰。除土星外木星和天王星都已观测到有环。土星的环特别明亮，因此，也称为光环。早在 1656 年，荷兰物理学家和天文学家惠更斯就已证认到了土星的光环。虽然从照片上看来像一个整块，但在 1856 年英国物理学家麦克斯韦从理论上就否定了光环为一整块固体的看法，认为它由无数小卫星构成。现在知道，环内确实有着无数在绕着土星转动的小冰块。

土星的光环在望远镜中显得十分引人注目。它位于土星的赤道面上，而与黄道有一交角为 $26^\circ.7$ ，所以在地球上看来，不同时期有不同的形象。地面上观测土星环起初分为 A、B、C 三个环，后来又增加了 D 环和 E 环。“旅行者”从土星光环中穿过，它的观测分辨率可达 100 米，除了确证新发现的 F、G 环外，更清楚地看到了土星的光环就象一张巨大的密纹唱片，多得不可胜数，何止成百上千（见彩图）。而且环中还有结构，如大环中有小环，有的几条小环有如“发辫”那样扭结在一起，环中还有小卫星，几个主环间还有间隙。环的温度很低，约 65~75 开。光环的总质量约为 10^{20} 公斤。

33．太阳系中的吉普赛人——能歌善舞的彗星

彗星是宇宙间最奇特的现象之一。它形态奇特多变，迅速地在繁星中穿越，它每夜，甚至每小时都在改变着自己的亮度和形状。古代人不论中、外，

都把彗星的到来当着不速之客，有如大难临头，不免惊慌失措，甚至引起社会骚乱。

中国史书上的彗星记录十分丰富，且在晋代就已对彗星有了较正确的认识。《晋书·天文志》指出：“彗体无光，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。”西方直至16世纪末，第谷才第一次从观测中证明，1577年的大彗星的距离要比月亮远得多。

彗星在太阳系中的运动可近似地看着两体问题，因此其轨道可近似看成圆锥曲线。通常的天体轨道由三个观测点即可确定。但彗星的轨道大多极其扁长，很难由太阳附近的三点来定出真实的轨道。加之彗星的质量很小极易受到大行星的摄动而改变轨道。因此，即便是像哈雷彗星这类轨道很确定的彗星，每次回归时轨道也都有微小的变化。

彗星可分成彗头和彗尾。当远离太阳时看不出有什么结构，但当它接近太阳时，由于太阳的热辐射，太阳风和太阳光压的作用的增大，尤其是当它进入火星轨道区域后，即会出现通常说的彗星现象，表现出其独特的结构。

彗头明显的分为两部分：中央密集而明亮的彗核及其雾状包层——彗发。彗核一般很小，直径在100~100000米之间、很少有超过100000米的，而彗星的质量几乎全部集中在核上。彗发是彗核的蒸发物，形状和大小都与太阳的距离有关，直径可达几十万公里，有时大小与太阳相当，甚至超过太阳直径。通过空间观测，还进一步发现彗发之外还有一个更大的直径约100~1000万公里的包层，称为彗云，也称氢云，它几乎全是由物质密度极稀薄的氢原子组成的。所以地面上一般观测不到。

肉眼可见大彗星的长长的彗尾是彗星的最大特征。彗尾的物质十分稀薄，远低于地面实验室中得到的真空的气体密度。因此，它极易受到太阳的各重扰动而分裂，故历史上常见到双尾甚至三尾的彗星。最著名的1744年的歇索大彗星甚至出现过六条彗尾。1986年1月10日由北京天文台兴隆观测站拍的在回归路途上的哈雷彗星，它拖着长长的玉带载歌载舞地喜见阔别76年的地球。它和中国人民更是颇有些年代的世交！自秦始皇七年（公元前240年）至清宣统二年（1910年）的29次回归，都可从中国史书上找到记载。据张钰哲考证《淮南子·兵略训》中：“武王伐纣东面而迎岁，至汜而水，至共头而坠，慧星出而授殷人其柄。”即是最早对哈雷慧星记录的珍贵资料，这出自公元前1056年。

1994年人类观测到了苏梅克—列维9号彗星和木星相撞这千年万载难遇的宇宙奇观。早在事件发生的一年前就观测到了这颗彗星并准确地预言了发生碰撞的时间。通过哈勃空间望远镜发现这颗彗星被分裂，形成首尾相距16万公里的22块碎片。1994年7月17日4时15分（北京时间），以每秒60公里的高速开始撞击木星，历时五天半，撞击过程释放的能量相当于几十亿万吨黄色炸药的爆炸威力。在这次彗木相撞的过程中，由于撞击点并不面对地球，因此，国外天文学家利用伽里略人造卫星飞到撞击面进行观测。而我国天文学家上海天文台的钱伯辰研究员和南京师范大学的黄克凉教授及南京大学的周洪楠教授他们巧妙地利用了木星的卫星作为“反射镜”，在21次撞击中通过上海天文台的1.56米望远镜，观测到了6次木卫的反光，并确定出三次准确的碰撞时间，其中两次与伽里略卫星所观测到的结果在一分钟的误差范围内符合一致，而另一次就连伽里略卫星也未能观测到（见彩图）。

其实小天体撞击行星和卫星在太阳系中是经常发生的,已发现的行星(包括地球)和卫星(包括月亮)表面的撞击坑,对于月亮、火卫、木卫、火星和水星可以说是百孔千疮,通过对它们表面的这些坑的大小、深度、密度和年龄的分析研究可以估计碰撞几率。对于地球来说,平均一亿年有一次直径为 10~30 公里的小天体撞击,形成直径大于一百公里的撞击坑;平均每五千万年,一千万年和一百万年分别会发生一次直径为 10 公里,1~5 公里和小于 1 公里的撞击坑。1891 年在美国亚利桑那州北部发现一个陨星坑直径 1245 米,深 172 米。据推算,是约在两万年前一块重 10 多吨的铁质陨星坠落造成的坑洞。

就在彗星苏梅克-利维 9 号撞击木星 5 星期后,周期彗星马赫霍茨 2 号在它的越地轨道中心开始瓦解。预测,其碎块将于 2036 年到达与地球的最近距离——1900 万公里。年轻的小读者不知谁有志来验证这个推测呢?

理论的预言能力

34. 数的奇绩——波德定则(小行星的发现及其意义)

天文学家很早就发现,火星与木星间的距离似乎太大了些。开普勒就提出过“在火星和木星之间还应当有一颗行星存在”。他的依据,就是信奉“宇宙的和谐”。1772 年,提丢斯-波得定则又尖锐地提出了此问题。按距太阳的远近,由近到远计算,对于第 n 个行星(但对最近的水星, $n=-\infty$ 而不取 1),其对太阳的距离 $a_n=0.4+0.3\times 2_{n-2}$ (天文单位),按此式计算得到的行星距离值列入下表:

行星	a_n 观测值	a_n 计算值	n
水星	0.387	0.4	$-\infty$
金星	0.728	0.7	2
地球	1.000	1.0	3
火星	1.52	1.6	4
(谷神星)	(2.7)	2.8	5
木星	5.2	5.2	6
土星	9.5	10.0	7
(天王星)	19.2	19.6	8
(海王星)	30.1	38.8	9
(冥王星)	39.4	77.2	10

括号内表示当时尚未发现的小行星和行星。1781 年 3 月,赫歇耳在英国意外地发现了太阳系的第七颗大行星——天王星。观测结果恰好与提丢斯定则惊人地吻合,它成为提丢斯-波得定则的有力的观测支持。于是人们更加热心去寻找对应于 $n=5$ 的“失踪”了的行星。很多天文学家协商共同搜索黄道区域的星空。然而,捷足先登者却是一个“局外人”——意大利天文学家皮亚齐。1801 年元旦之夜,他在无意中发现了第一颗小行星谷神星,从此揭开了小行星研究的序幕。小行星的数目十分众多,每年发现的小行星数近二、三百颗。到 1985 年 8 月止,正式编号命名的就达 3301 颗。有人估计暗到 19 星等的小行星数约为 44000 颗,而 21.2 星等的小行星则近 50 万颗。

我国已故天文学家张钰哲 1928 年发现 1125 号小行星,命名为“中华”

为我国第一个观测到小行星的天文学家。以后他和他的观测小组前后发现了 800 多颗小行星。研究小行星无论在天文上或在人类未来的征服宇宙的活动中将起重要作用。天文上首先是为准确确定“天文单位”。因为在确定太阳和行星间的距离时，通常大恒星在望远镜中有一定大小，故给距离的确定带来误差，而小行星即使是在望远镜中也仅仅是一个光点。所以能更准确地定出它的距离。而一旦在太阳系中有任一行星的距离被确定，则按开普勒定律便能通过可以准确测量的周期而计算出行星的距离。一旦距离的精度提高，则行星的质量精度亦可相应提高。小行星对于天体测量和研究天体的演化也有很大作用。更有意思的是，在未来的星际航行中，人类为了到达更远的行星，我们可以趁某颗小行星接近地球的机会先到小行星，然后利用它做天然的“宇航飞机”当其接近目标行星时再开启发动机。这将不仅节约能源而且有更高的速度又安全可靠。

至于波得定则，由于海王星和冥王星的发现而其观测轨道与理论结果出入甚大，因此人们对定则的正确性发生了怀疑。但后来天文学家发现，行星的卫星的轨道也遵从波得定则，难道一种“偶然”的数学游戏竟有这样的普适性吗？最近我国天文学家紫金山天文台的李晓卿研究员和北京天文台台长李启斌研究员通过对非线性扰动方程的求解，得出了波得定则的准确关系。这也许会导致从理论上研究太阳系的形成和演化的突破性进展。

35. 牛顿引力理论的成就——海王星的发现

前面我们讨论了牛顿万有引力公式的导出。它本质上是把开普勒关于行星运动的三定律用几何和牛顿本人创立的力学语言加以“翻译”。但天文学只是在采取这种普遍形式时，才表明了描述行星轨道方面的真正进步。牛顿是由开普勒的椭圆轨道，推出引力的平方反比律。可以证明逆定律也成立。即可以证明：根据牛顿定律，一个物体围绕吸引它的中心静止物体的运动其轨道是开普勒的椭圆（当然，这只是对闭合的周期性轨道才是正确的。有些彗星的轨道是双曲线，不是闭合的）。不过要出现后面的情况必须有两个条件：一是这两个物体都是在运动着的；二，还有别的物体存在。这样，我们就面临到了三体或多体问题。研究表明，用三体或多体问题处理行星运动，能更精确地反映行星系的实际情况。因为，不仅是行星受到太阳吸引，月亮受到相应的行星的吸引，而且所有物体，太阳、行星、月亮，而且还有彗星，都是相互吸引的。因此开普勒的椭圆只是一种近似。之所以能够这样近似，是因为太阳有很大的质量，因而，它的作用远远超过了行星系中所有其他物体的相互作用。但时间一长，这些微小作用的累积足以形成人们可以觉察出的误差量，使行星轨道偏离开普勒椭圆。天文学家把这种现象称为“摄动”。

随着观测精度的提高，发现了大量行星轨道对椭圆轨道的偏离，而“摄动”理论的出现恰好给大量的新观测结果以很好的解释。特别在天王星发现后，有人利用摄动理论来计算它的位置。但结果总与观测值有差别。一些人怀疑摄动理论有问题，但也有人认为天王星外还有一颗大行星。大多数天文学家支持后一种假说。法国天文学家勒威耶研究了天王星运动的不规则性，并试图根据其轨迹去寻求产生它们的力的方向和大小，从而确定它们的原因。

到 1820 年，可用的正规子午观测已长达 40 年之久。而在 1690 ~ 1771 年期间一些天文学家曾对天王星观测了 19 次，他们把它看作是一颗 6 等恒星。在编制天王星星表时出现了一个难题：如果旧观测值和新观测值都采用，

那么在作摄动计算时，如果要求旧观测值复现，则新观测值就不能严格地再现；如果丢掉旧观测值只使用新观测值，那么编成的表对新观测值符合得很好，然而确不能充分符合旧观测值。必须在两者之间进行选择。一些天文学家相信新的观测结果，认为必须阐明，把这两个系统调和起来的困难是否真与观测的不精确性有关，或者，是否是由于施加在该行星上的某种奇怪且尚未曾察觉的力产生的。这就是说，除了太阳、木星和土星的作用力之外，天王星还受到其他的影响？要是这样的话，那么通过对该行星摄动的仔细研究，是否可以成功地确定这些未预见的不规则性的原因？人们能否达到这一步，就是把那个奇怪的天体——一切困难的来源——所在的天区指示出来？使实测天文学家对那个天区进行搜索时能够发现它。

勒威耶根据天王星对自身轨道的偏离以及当时已知的不少资料中推导出对未知行星的以下数据：

半长径 36.154

公转周期 217.387 年（恒星年）

偏心率 0.10761

近日点 $284^{\circ} 45'$

1847 年 1 月 1 日平黄经 $318^{\circ} 47'$

质量 $1/9300$

由此得出

1847 年 1 月 1 日真日心黄经 $326^{\circ} 32'$

离太阳的距离 33.06

1847 年 9 月 23 日，勒威耶写信给加勒，迫切要求他搜索这颗行星。当天晚上他就发现，在非常靠近勒威耶预报的位置处，有一颗布勒克尔星图上没有的 8 等星。当夜加勒和恩克进行了四次测量。第二天，这两人又进行了十五次测量，使这颗天体的运动得到了证实。

这是所有行星发现中最辉煌的一次。因为纯理论的研究使勒威耶得以预言一颗行星的存在并预报它的位置。当然，发现之所以如此迅速，是因为布勒克尔编制了卓越的星图；而行星圆面只有当人们知道它存在时方能被认出。

这一发现也是牛顿引力理论辉煌成就的标志。但同样的问题对于水星却遇到了牛顿引力理论无法克服的困难，导致了爱因斯坦广义相对论的创立。

36. 牛顿引力理论的困难——水星近日点的进动

牛顿理论经受住了无数次新的观测的考验而没有一次失败过。特别是在天王星的轨道观测中，理论和观测之间的某些不一致导致了对海王星的预言和发现，更使牛顿理论成为理论的楷模。然而宇宙规律不容忍有例外。但有一个情况，就是上面我们提到的那个例外，水星近日点的进动，使牛顿的理论遭到了失败。

我们已知道，每一个行星的运动轨道都可近似地看成是开普勒的椭圆，这个椭圆运动由于受到其他行星的摄动，使得轨道平面的取向，椭圆主轴的方位，它的偏心率，总之，所有“轨道参数”，都在逐渐发生变化。根据牛顿引力定律可计算出这些变化数值，在发现了海王星和冥王星后除水星外，都与观测数据相符合。对于水星，其近日点的进动（见图 19），根据牛顿定律计算出来的数值，与实际观测值之间有着一个十分微小但却是确凿无疑的偏差。这个偏差量为每一百年 43 角秒。正是上面我们介绍的从分析摄动情况

而预言了海王星存在的天文学家——勒威耶第一个计算了这个偏差，现在人们已完全肯定了这个偏差。既然用已知的其他行星来解释这个进动是不成的。于是学者们就假设还有别的物质存在，用这些物质的吸引来解释水星近日点的上述附加进动。比如曾有人试图把黄道光（它被认为是从太阳附近的稀薄星云物质里发出来的）与水星的这种反常运动联系起来。但这个假说，和其他许多假说一样，都有一个共同的缺点，即它们仅是为了解释水星近日点这一反常运动而提出，此外再不能为任何其他观测所证实。

在最靠近太阳的行星——水星上所发生的这个唯一牢牢确定了的与牛顿定律的偏差，说明在这个定律里，归根到底可能还是存在有某种原则上的缺陷。如果假设牛顿引力定律的偏差，是随引力的增大而增加，那么这些偏差必定在太阳附近有最大值。总之，提出的各种修改牛顿引力定律的方案都带有极大的任意性，它们不能用其他事实来加以检验。它们的正确性并没有因为解释了水星近日点的进动而得到承认。如果牛顿的理论确实需要加以改进，那么这种改进所根据的原则，不是随便引入另外的常数，而是应使改进后的理论或者在普遍性上或在逻辑结构上要优越于以前的学说。爱因斯坦的广义相对论成功地解决了这个问题。广义相对论的建立为天文学的发展揭开了全新的一页。特别是 60 年代以来，天体物理学中一个接一个的重大发现，使相对论天体物理和宇宙学成为当前天体物理最活跃的分支。

太阳

——太阳系的独唱歌手

37. 研究太阳的双重意义——地球生态环境的主宰，最近的恒星

对于地球上的人来说，光辉的太阳无疑是宇宙中最重要的天体。是人们歌颂和崇拜的对象。历代君王都以自己为太阳的化身。可太阳确实可算是太阳系的名副其实的“君王”。它是太阳系中唯一发光的天体。所有其他大小行星，彗星等天体都不停地围绕太阳旋转，从太阳那里“偷”一点光来装扮自己，才使人类有可能注意到它们的存在。太阳确实是太阳系的光和热的源泉。太阳上的任何细微变化都会引起整个太阳系的明显变化。太阳质量的变化必然会改变行星和彗星的轨道的大小和周期，太阳风几乎直接影响到太阳系的边缘。太阳上的局部活动会造成许多地球物理现象——极光增多，大气电离层，地磁和磁层的变化等。对太阳的研究，太阳活动规律及成因的探索，可以为气候的长期变化提供线索。从许多历史资料分析表明，许多次全球性的大旱、大涝均与太阳黑子的盛衰有关。太阳活动还会严重地干扰无线电通讯及航天设备的正常工作。太阳耀斑爆发发出的强烈的短波辐射和微粒流会破坏地球大气电离层的结构，使短波通讯突然中断。太阳活动产生的紫外辐射和微粒发射还会对宇航员造成致命的威胁。熟悉太阳活动规律便能指导空间探测顺利进行。总之，研究太阳的重要意义之一，在于了解人类的生态环境。

从天文角度来看，太阳只是一个极普通的恒星。它是一颗 G2 型的中年主序星。在众多的恒星中无论就质量、大小和其他各种物理性质太阳差不多都处于平均值附近。因此，太阳也是恒星中的名副其实的“典型代表”。加之太阳离我们最近，使我们极易对它进行观测和研究。很自然，人们把对太阳

大气和太阳内部结构的知识推广到别的恒星上去。

太阳还是一个天然的超级实验室，它上面具有许多地球上难以实现的条件。化学元素氦就是从日全食时的太阳光谱中首先发现然后才在地球上找到的。对于太阳能源的探索，促使人们去弄清热核聚变的机制。爱丁顿的日全食的观测资料为人们肯定爱因斯坦的广义相对论投了决定性的一票，一夜之间使爱因斯坦成为世界著名人物。这些可算是太阳对人类科学发展所留下的“历史功绩”。今天太阳物理中还有著名的三大悬案：太阳磁场的产生机制和演化，太阳的“中微子失踪案”和日震的形成及演化。对于这些问题的深入研究，必将推动粒子物理，恒星内部结构和宇宙学等学科的进展。

总之，对太阳的研究始终占有天文学的重要的一席之地。

38. 太阳的结构——不透明的内部和多层次的外部

太阳系的独唱歌星是一个直径为 13.9198×10^{10} 厘米的巨大气体火球，其质量为地球的 333000 倍，而体积是地球的 1300000 倍，故密度小于地球，约为水的 1.41 倍，大约与木星相同。太阳表面的重力为地球表面的 28 倍。所以，如果你的体重为 100 斤，那么你可能站在太阳表面的话，你的体重就可达 2800 斤，也就是 1.4 吨！真可谓超重级巨人了。所以，太阳表面的逃逸速度也非常高。

我们平常所看到的太阳，只是它可见的表面，它构成太阳的光球。光球是一个气体表面，它是肉眼可见的太阳的最外层，其强烈的压力和极高的温度足以使之发出连续光谱。光球的厚度约 500 公里，是不透明的，由于它的遮蔽，我们不能直接看到太阳的内部。那儿的密度和温度是逐渐变化的，而不是像地球表面和大气之间那样突然变化。

光球以下属于太阳内部，最核心处约占太阳半径的 10% 的范围，密度高达 $135 \sim 150$ 克/厘米³，温度约达 1.5×10^7 开，是太阳的产能区。太阳内部由于密度极高，来自内部的高能 γ 射线和 X 射线光子不断地与浓密的物质粒子发生碰撞，被物质粒子吸收再辐射，经过反复多次的吸收和再辐射的过程光子逐步被软化以可见光的形式到达太阳的表面。本来光球的半径只有 70 万公里，按照光的速度仅需两秒多钟的时间就能从太阳中心跑到太阳的表面，但由于上述的反复碰撞过程，使核心处的一个光子，大约需要几百万年的时间的挣扎，才能以改头换面的形式到达太阳的表面。这好比如山似海的人群中心有一个马拉松冠军，他的长跑才能不能施展，为了把一个消息传出人群，他只能把消息给第一个碰到他的人，此人又给第一个碰到自己的人，而这些人可能向四面八方无规律地运动，因而在这过程中消息时而向外时而向内，时左时右必然经过漫长的时间才能传出人群。所以说太阳内部是完全不透明的。天文学家不可能通过电磁辐射得到有关太阳内部的任何信息。

光球以上的太阳大气可以分成为性质不同的两层。紧贴光球厚度约为 2000 ~ 5000 公里的叫做色球，在上面是延伸几亿公里的日冕。这两层平时都隐没于地球大气散射的阳光辉映里无法看到，只在日全食时才显现。这两层里面的物质都非常稀薄，对太阳正常的辐射的贡献也很小。太阳大气层虽然一直伸延到地球轨道以外，但质量却很小，与太阳总质量相比更是微乎其微。无论是光球或色球都存在着激烈的活动。这些活动形成一些观测特征。属于光球活动的表现为光球上的米粒组织，即光球上面那密密麻麻的斑点状结构，它们反映了光球表面的不同温度的区域。太阳黑子的变化反映了太阳辐射能量在变化。太阳黑子的变化存在复杂的周期现象。一个较确定的是大约

11 年的变化周期。通过太阳黑子变化的研究可以了解太阳活动的很多物理规律。谱斑是太阳光球活动的另一特征。用氢光拍摄的太阳像显示有精细的条纹结构。它是太阳上面存在扰动的证据。照片上的每块亮区叫做一个谱斑。耀斑是太阳活动的另一种形式，这是一种高温爆发性现象。对太阳光球拍照时，由于不同部位的光穿过太阳表面的气层的厚度会不一样，于是表现出其亮度从中心向边缘减弱的现象称为临边昏暗现象。

太阳色球的活动则可观测到日珥现象。从光球还延伸出一些气体流，这些喷射物称为日珥。喷发日珥可能是从光球迸发出来的巨大气柱，环状日珥同黑子有关，其特点是物质沿环的两臂向下运动。宁静日珥可保持数月之久。（参见彩图）

当日全食时我们可以拍摄日冕的照片，随着太阳黑子活动的变化，日冕的大小也在变化。日冕具有极高的温度，以至作用于日冕气体上的引力不能平衡压力差，因此日冕中很难保持流体静力平衡，因而日冕会稳定地向外膨胀，热电离气体粒子连续地从太阳向外流出而形成太阳风。理论上可推得太阳风大约可延伸到 25 ~ 50 个天文单位的距离。有人估计可达 100 个天文单位。它们都超过了离太阳最远的冥王星的距离。

也就是说太阳风一直影响到太阳系以外。

39. 太阳的物质成分

分析物质成分的最好方法就是光谱分析的方法。而最早把太阳光分解的是英国著名科学家牛顿。他于 1666 年用三棱镜得到了人类第一条光谱。太阳的光谱通常是指光球产生的光谱，物理学中称为夫琅和费光谱。由于太阳光异常强烈，所以容易产生大色散光谱。雨后天晴的彩虹就是大自然形成的光谱。

目前关于太阳光谱的研究工作已超出了光学摄谱仪的范围，几乎在太阳电磁波谱的所有波段上全面展开。利用在地球大气“帷幕”外工作的火箭和人造卫星可以进行 γ 射线，X 射线和紫外波段的光谱研究或直接拍照。光学研究（包括近紫外和红外区域）可以由地面上的望远镜来承担。此外，还有射电波辐射。所以，太阳物理的探测也是我们开始就介绍了的多波段观测。

光学波段的光谱研究已经发现了大约 26000 条谱线。每一条谱线无疑是来自某种化学元素和化合物。地球上的 100 余种化学元素在太阳上仅仅观测到 69 种，肯定不存在的有 10 种，还有些元素尚待进一步研究。按质量而言，含量最多的是：氢（78.4%）和氦（1.8%）；其他含量较多的十种元素是：氧（0.8%），碳（0.3%），氮（0.2%），氖（0.2%），镍（0.2%），硅（0.06%），硫（0.04%），铁（0.04%），镁（0.015%），钙（0.009%）。

光谱的证认并不是一件容易的事情。由于太阳上的温度、压强等差别太大，因此地球上能拍到的同种元素的谱线并不能完全包括太阳中相同元素所能得到的全部谱线。

理论研究可揭示出每种元素的谱线强度对温度和压力的关系，这样，人们可以反过来通过对太阳光谱中谱线强度的研究推断太阳上的各种物理条件。分别对太阳的光球、色球和日冕的光进行光谱分析，可以得到太阳结构中不同层次上物质成分的变化。我们知道，化学元素氦就是首先在太阳光谱分析中发现的，因此，“氦”的名字就是来源于希腊文中的“太阳”（helios）。

在日全食期间，当月球遮掩了太阳的光球，绚丽的色球衬映在黑暗的天

幕上，色球就发出明线光谱，它呈现的时间在日全食前后不到一分钟，这时色球宛如一钩纤细的蛾眉。如果让它发的光通过一架无缝摄谱仪，则产生的效果就和有缝摄谱仪一样，只是谱线的形状不再是直线，而是一条条的蛾眉月。这样的光谱称为“闪光光谱”，因为它的出现仅在日全食前后一闪而过。闪光光谱的重要意义在于他给天文学家提供了一个研究太阳大气中物质元素分布的最好机会。

40．太阳的产能机制

太阳的核心区域虽然很小，半径仅约为太阳半径的 $1/4$ ，但由于天体物质分布总是向核心高度集中的，所以根据理论推算，太阳核心区域的物质密度可达 1.60×10^5 公斤 / 米³。中心的压力达 3300 亿大气压，温度高达 1500 万开。

很多资料表明，太阳系形成至今已有近 50 亿年的历史，对于太阳能源的探索长期来困惑着人们。从 19 世纪开始，先后提出过化学能，陨星降落，放射性元素蜕变，引力收缩位能转化为热能等多种假设，但即使当时看来最有效的收缩说也仅能维持几千万年的时间。直到德国物理学家魏茨泽克和德裔美籍物理学家贝特分别于 1937 和 1938 年提出了由氢聚变为氦的热核反应（氢弹爆炸就是这种反应过程）理论，才圆满地解决了太阳（从而恒星）的能源问题。贝特的恒星核能源理论后来获得了 1967 年诺贝尔物理学奖。

核物理学的研究表明，太阳上的物理条件足以使氢原子核克服彼此间的电斥力而聚合成新元素的原子核。而在太阳中心存在两种核反应，即质子-质子反应和碳循环。质子-质子反应不仅比较简单，而且最适宜解释太阳的能量来源，因为太阳核心的温度同一般的恒星情况一样，不算太高，在 1500 万开，若两个质子（即氢原子核）相碰撞就会结合起来形成一个重氢（氘）的原子核和一个正电子。但正电子寿命很短，它会马上和周围的电子结合而变成两个 γ 射线光子。氘核如果又和质子碰撞则生成一个原子量为 3 的氦的同位素氦-3，两个氦-3 核发生核反应则生成氦-4 原子核和两个质子。其最终结果是 4 个氢原子聚变成一个氦原子。

碳循环的最终结果和质子-质子反应一样，也是 4 个氢核聚变成一个氦核。碳仅仅起了“触媒剂”的作用。因此，它比质子-质子反应的过程快。其他反应细节在这里并不重要。

原子量的精确测定表明，4 颗质子的总质量为 4.029，而一颗氦-4 核的质量是 4.0015。也就是说，每 4 个氢核结合成一个氦-4 核就会有 0.0276 个单位的质量被“损失”掉。

1905 年在爱因斯坦发表他的狭义相对论的论文的几个月后，他又发表了一篇分析能量与质量关系的论文。在这篇论文中，他提出了一条最后会改变世界面貌的简单数学公式，这是物理学最著名的公式之一： $E=mc^2$ 。这个公式表明能量 E 和质量 m 只是存在的两种不同形式。一切物质的质量 m 等价于能量 mc^2 ，反之任何能量 E 伴有质量 E/c^2 。这就意味着，一个烤热了的红薯所具有的能量比冷红薯要多，因此它就有了较多的质量。但是，当你把一个烤热了的红薯放在称盘上是发现不了质量的变化了的，因为质量变化太小了。把一斤红薯烤热到 230℃，它的质量增加不到一克的十亿分之五。相反，微乎其微的可以转化为十分巨大的能量。如果把一公斤的物质全部转化为电能，就相当于 250 亿度电，相当于美国全部电厂几周内的总发电量。而元素氢聚变成氦过程所损失的 0.0276 个单位的质量，全部转化为能量了。太阳的辐

射能为每分钟 5.8×10^{27} 卡。按热核聚变反应的产能机制，太阳每秒钟所损失的质量仅为 4.5×10^{12} 克。若按这个等速率耗损太阳的质量，那么按太阳的年龄为 4.5×10^9 年，它因为维持其辐射所消耗的总质量为 6.5×10^{28} 克。今天太阳的总质量为 2.0×10^{33} 克，它表明太阳产生至今，为维持其稳定的辐射，所消耗的质量仅占太阳今天质量的 0.03%。

41. 日中有乌吗——太阳的黑子

日常生活中人们并不关心太阳辐射的变化，但太阳的辐射确实存在一个大约 11 年周期的变化。最明显的证据就是光球上的黑子现象。我国古代早已发现了太阳中黑子的存在，并因此我国古代有时把太阳称为金乌。春秋时代就有“日中有三足乌”的记载。所谓黑子是相对其周围而言。它比太阳表面的温度要低约 2000 开也还有 4000 开。黑子随时都可看到，有的很小，存在时间也不长，有的黑子非常大，存在的时间也特别长，历经数月而不消失。有的黑子是单个的，孤零零地随太阳旋转。但一般情况下黑子都是成群结队出现的。按太阳的自转方向每群黑子通常分为两部分：前导黑子和后随黑子。后随黑子容易分裂并首先消失。黑子的中心部分最暗，称为本影，本影的周围是半影，它比本影亮，但比光球暗。严格说来，太阳黑子本身并不黑，如果把光球其余部分遮掩起来，只露出黑子，那么人们用肉眼可以看到一颗颗明亮的斑块。

从地球上看去，太阳黑子以规则的方式横越太阳圆面而运动，这种运动首先由伽利略在 1610 年观测到并发现太阳大约有 26 天的旋转周期，后来人们更加细致地观测发现太阳表面的自转周期还与太阳的纬度有关。例如，赤道附近的黑子，其自转周期大约是 25.1 天；赤道正负 15° 附近的黑子约以 25.5 天的周期旋转；而南北纬 30° 的黑子，其自转周期为 26.5 天左右。也就是说，在太阳赤道，转动最快，纬度越高转速越慢，这说明太阳存在较差自转现象。为了证实这一发现，人们把太阳像的边缘放在摄谱仪的窄缝上，测出其多普勒位移便可得到太阳的自转周期。结果是：赤道 24.6 天；赤纬 15° 带 25.4 天； 30° 带 26.4 天； 60° 带 31 天； 75° 带 33 天。两组数据不完全相同，原因是由黑子测出的是光球的自转周期，而摄谱仪测定的是形成吸收线的低层色球的自转周期。

大约从 1750 年起，天文学家每天都在记录黑子的数目。到 1851 年所累积的观测资料已经能看到黑子的数目是在逐年变化的。这种变化是不规则的。不论是极大年份还是极小年份的黑子数都不尽相同。而且周期也不是严格的 11 年。除黑子在数目上的差异外，黑子出现的纬度也呈现周期性变化。每一个新周期开始，黑子往往出现在正负 30° 附近，然后，随黑子数增加出现的位置向低纬度发展。待到大部分黑子出现在 10° 至 20° 纬度区时，黑子数就开始减少，最后黑子都靠近太阳赤道地区附近，黑子也减到最低。这时，下一周期的黑子又开始在高纬度区出现。黑子的纬度分布随时间变化，画在一张图上有点像蝴蝶的翅膀，故称为蝴蝶图。下面的图就是 1954 ~ 1977 年两个周期的蝴蝶图。

42. 太阳的磁场

太阳的绝大部分物质是高温等离子体，太阳的物态、运动和演变都与磁场密切相关。特别是太阳黑子，耀斑，日珥等活动现象，更是直接受太阳磁场支配的。因此，太阳磁场的研究具有特别重要的意义。

观测天体的磁场主要是利用谱线的塞曼效应，由于电子同时具有磁矩和

动量矩，因此在磁场中电子会有一定的取向并产生拉摩进动，于是在磁场内的辐射具有两种可观测性质，即谱线的塞曼分裂或致宽和塞曼支线的偏振。

1908 年，美国天文学家海耳等在威耳逊山天文台（现称海耳天文台），利用塞曼效应测量太阳黑子的磁场。这项工作后来在菠茨坦天文台（1942 年）和克里米亚天体物理台（1955 年）等处也相继开展起来。1912 年，海耳等开始测量普遍磁场，但得到的结果有较大误差。1953 年，巴布科克研制了太阳光电磁像仪，用以观测太阳表面的微弱磁场。在以后的二十多年，各种不同的类型的磁像仪先后研制成功，因而发现了日面局部磁场，太阳整体磁场和磁结点等。在实测工作取得巨大进展的同时，理论研究也蓬勃开展起来。对太阳黑子的磁场结构，太阳活动周的起源，耀斑爆发机制以及磁场内谱线形成理论等研究都有重要的进展。特别值得提出的是我国天文学家艾国祥他本人发明并联合我国南京天仪厂研制出的具有世界先进水平的太阳磁场望远镜，受到国际上同行的重视，于 1989～1991 年期间与美国联合开展了世界首创的“日不落”太阳磁演化联测，并得到了较完整的活动区磁场、速度场和亮度场，以及耀斑在射电，光学（包括单色光和光谱）等多波段上的时间变化序列和二维动力学演化过程的资料。1994 年通过鉴定的“多通道太阳望远镜”被国外同行誉称为“滤光器领域里的万里长城”。

黑子是日面上磁场最强的区域，强度可达三、四千高斯。一般说来，一个黑子群中有两个主要黑子，它们的极性相反。如果前导黑子是 N 极的，则随后黑子就是 S 极的。在同一半球（例如北半球），各黑子群的磁极性分布状况是相同的；而在另一半球（南半球）情况则与此相反。在一个太阳活动周期（约 11 年）结束，另一个周期开始时，上述磁极性分布就全部颠倒过来。因此，每隔 22 年黑子磁场的极性分布经历一个循环，称为一个磁周。强磁场是太阳黑子的最基本特征。黑子的低温，物质运动和结构模型都与磁场息息相关。

耀斑是最强的太阳活动现象，在耀斑爆发前后，附近活动区的磁场往往有剧烈变化。

本来是复杂的磁场，在耀斑发生后就变得简单了。这表明耀斑爆发使磁场湮没，从而磁场能全部被释放，并转化为爆发能量。太阳的日珥活动也与磁场有关。总之，太阳的一切活动都直接与太阳的磁场活动有关。因此，对太阳磁场的观测和研究是太阳物理研究的重要课题之一。

太阳磁场除活动区外日面宁静区也有磁场，它除有整体磁场外还有复杂的精细结构。太阳磁场的起源是一个尚未解决的难题。现有学说可以分为两类：一是化石说，认为现有的磁性是太阳几十亿年前形成时就产生并遗留下来的。理论计算表明，太阳普遍磁场的自然衰减期长达 100 亿年，因此，磁场长期留存是可能的。另一类是目前得到较普遍承认的发电机学说，认为太阳的磁场是带电物质的运动使微弱的“种子”磁场得到放大的结果。用这种模型可以说明太阳磁场起源中的若干问题。太阳磁场形成理论的一个重要课题是太阳活动周的形成机制。目前得到公认的是较差自转理论。它认为太阳的较差自转使光球下的水平磁力线管缠绕起来，到一定时候，上浮到日表面，形成双极黑子。而大量双极黑子磁场的膨胀和扩散，先形成的普遍磁场被中和掉了，接着就会出现极性相反的磁场。这样就可以解释太阳的 22 年磁周。

43. 太阳风

从太阳外层大气不断发射出的稳定的粒子流。由于日冕具有极高的温

度，作用于日冕气体上的引力不能平衡压力差，因此，日冕中很难维持流体静力平衡，热能使日冕稳定地向外膨胀，热电离气体粒子连续地从太阳向外流出，形成了太阳风。

最早人们是从彗尾总是背向太阳并随着到太阳的距离而变化的现象中猜测到有太阳风的存在。近年来利用人造地球卫星观测近地空间终于证实了确实有太阳风存在。观测表明存在于日冕中的冕洞同地球附近的太阳风有很好的相关性，而寿命长的冕洞更是太阳风的起源。太阳风的基本观测数据如下：

流速约 450 公里 / 秒

质子或电子数密度 8 个 / 厘米³

质子温度 ■

质子的热各相异性比值 2

电子温度 ■

磁场 ■

太阳风的理论模型是按稳定态球对称的日冕向外扩张的物质流处理，它导致一个无结构的太阳风。这与观测事实不符。几乎所有观测到的太阳风的参量都有一种无规则的起伏。这种起伏与太阳活动有关。太阳活动越剧烈，太阳风的风速越大，当风速降至 320 公里 / 秒时可认为太阳风处于宁静状态。

长期观测结果表明，太阳风中的平均氦丰度与氢之比仅为 4.5 : 100，低于太阳光球中氦和氢的丰度比。这表明氦在日冕膨胀中比氢更容易脱离太阳，也就是说，不同荷质比（一个粒子所带电量及其质量之比值）的离子在日冕膨胀中会分离，导致日冕重离子的引力沉淀。太阳风一直可达到太阳系之外与星风相混合。因此，它能和各行星的磁层发生比较复杂的作用，导致很多等离子体及磁扰现象。

我们已说到，太阳风是造成彗尾背向太阳的主要原因。有人算得离太阳距离 r 处太阳风的动力压力为 $2 \times 10^{-9} \cdot r^{-2}$ 牛 / 米²。显然，随着彗星接近太阳， r 减小时，其压力以平方律增大。因此彗尾就变得更长。

太阳风造成的太阳质量的减小是微不足道的，一般估计为 2×10^{-14} M / 年。因此，通常可以不考虑。

44. 日震——倾吐内心的衷曲

我们已提及，太阳内部是不透明的。因此，通常我们只能认识太阳的表面。同样地球也是不透明的。为了解地球内部，人们并不是去将地球“打开”，而是通过在离地面一定深度的爆炸过程观测爆炸波在地内的传播过程以推测地球内部的结构。

1960 年，莱顿等在研究太阳表面的米粒组织时，发现太阳的 5 分钟震荡。十多年后，人们认识到，这种震荡不是任何一种表面波，而是起源于太阳内部的一种整体共振现象。太阳震荡存在总体性，意义十分重大。有如地球上发生的地震，地球物理学家利用地球的自由震荡和地震波来探测地球内部结构。这个发现，不仅揭示出太阳内部存在着激烈的变化，而且为人们通过对这些震荡在太阳内部的传播和衰减过程而揭示出太阳内部结构的秘密。

简单地说，太阳震荡可以理解为，束缚在太阳内部的声波形成的一种共振现象。太阳表面有极大的密度梯度，从而形成声波的反射面。太阳内部，物质密度和温度随深度迅速增加，声速也随深度增加。这样，由外向内非径向传播的声波受到折射时，又会由内向外传播。由于在一个球体内来回反射

的声波会形成驻波。而太阳球体内形成的驻波，就是太阳震荡的本征模式。它可用一套严格的数学模式加以描述。

日震学就是要精确观测太阳震荡的频率和振幅等数据，并由此反演太阳的内部结构。观测太阳震荡的方法主要有速度观测和辐射强度观测。为精确测定太阳总体震荡频率，需要有高空间分辨率的长时间连续观测资料。但单站地面观测，会因昼夜变化而中断，造成功率谱图上的观测信号分裂出许多旁瓣，降低了信号水平，也使信号与噪音真假难辨。为得到连续数年的资料，只能通过空间观测，或在全球建立起地面观测网。目前全世界已选定了 6 个网点。这 6 个站的日照仪曾连续跟踪太阳 17 天。这真可算是一个“太阳永不落”，全球太阳震荡网组织。

太阳震荡的频率是天体物理中测量得最准确的参数之一。其相对精确度目前已达十万分之一。利用已有的物理知识和恒星演化理论，可推算出很精细的太阳模型，即标准太阳模型。由该模型可以算出每一个震荡模式的频率。这些理论频率与观测到的频率相比，有着不可忽略的很小误差，典型的相对误差约在 0.1% ~ 0.5% 的范围。这些小误差既再次证明了恒星演化理论的成功，又向人们提供了太阳内部结构的详细信息。产生这些误差的可能性有两种：一是来自计算标准模型的物理理论和数据的近似性；二是太阳这个特定对象中存在着目前尚未掌握的新的物理现象。因此，通过对太阳震荡的深入研究，人们有希望对太阳物理和天体物理中的一些长期悬而未决的重大问题得到答案。

45. 太阳中微子之谜

我们已知道太阳的巨大能量来源于中心的热核聚变。主要过程是氢原子核(质子)在高温高压下聚变成氦的反应，这个过程的一个重要副产品是“中微子”。根据太阳的能量输出和其中心温度，可从理论上推算出太阳中微子的流量。从 70 年代开始，人们进行了极其困难的探测中微子的实验。而观测到的中微子的流量只有理论预言的三分之一。这就是著名的“太阳中微子之谜”，也有人称为中微子佯谬。

这个不一致的根源在哪里，目前尚不清楚。虽然提出了各种各样的解释，但都不能减少到目前的观测值。解决这个问题原则上只有两个途径：对核物理和粒子物理理论作修正，或是对太阳模型与恒星演化理论作修正。但上面介绍的太阳震荡可能提供的太阳内部结构精确信息，有可能为解决中微子问题打开新的途径。

太阳磁场和速度场的观测和研究，太阳中微子之谜，和日震的观测和研究成为当前太阳物理的三个中心课题。它们的解决不仅将为太阳物理的发展，而且将有力地推动恒星形成和演化的研究；也将影响粒子物理和宇宙学的发展和研究。

天体歌手的诞生及其成长

——恒星的形成和演化

46. 怎样认识恒星的一生——事物的两种认识方法

我想不少读者养过蚕。经过一段不长的时间我们可以从卵到幼虫，成虫，做茧，出蛾，产卵，观察到蚕的整个生长过程。但恒星的演化是以亿万年为基本时标的。因此人的短暂一生几乎观测不到恒星的任何变化。以至到了 19 世纪，哲学家们还坚持说：恒星是永远无法被我们了解的。的确，人类对恒星的认知是十分迟缓的。150 年前，我们还未能测出一颗恒星的距离；那时人类甚至还无法肯定证明恒星就是和太阳一样的天体。60 年前我们还不知道银河系外是否还存在着恒星。50 年前我们还不知道维持恒星照耀数百万年甚至数十亿年的那些能量是如何产生的。

今天我们对恒星已有相当丰富的知识；人类对恒星的认知恐怕已经超过了对于组成我们身体的那些活细胞的了解，或者已经超过了对于我们大脑活动的了解。一颗恒星处在非常复杂的宇宙中只能算一种比较简单的天体，也恰如人体的一个细胞。近几十年来，人类对恒星的认知为什么会发生这么大的变化呢？科学上的认知原则上有两种方法：

(1) 追踪一个单体一生的历史，例如我们观察蚕的一生的变化。我们便可了解它的生长和发育过程。

(2) 恒星的寿命太长，我们绝不可能去追踪它的一生，但我们可同时观测亿万颗恒星，其中必然包含各种类型和不同年龄层次的恒星。就好像在某一时间我们作人口调查，必然会了解到各种民族，各种类型和不同年龄的人。如果我们把这些人的特点都综合起来，我们立即可推断一个人的一生的成长过程。实际上一个人很难同时观察亿万不同类型和不同年龄结构的人群。但我们却很容易同时观测到亿万颗不同类型的恒星。这就显示了人们研究恒星时所具的特有优势。

如何肯定地证明天空中亿万光点都是和太阳一样的恒星，这仅涉及天体的距离测定问题。这点本书前面已作过介绍。表面上看太阳的光度是别的天体无法比拟的，但由于一般恒星相对我们处在十分遥远的距离，因此其绝对光度（见 21）都与太阳同量级甚至比太阳还要明亮数十倍。

47. 恒星如何分类——恒星的温度、光谱型和颜色

恒星的大部分是以双星或三星的形式出现。较少单独存在。而双星的轨道特征为我们确定恒星的质量提供了有利条件。通过大量观测得到恒星的性质大体如下：

质量由 $0.05M_{\odot}$ 到 $100M_{\odot}$

光度由 $10^{-4}L_{\odot}$ 到 $10^6L_{\odot}$

半径由 10^8 厘米到 10^{14} 厘米

表面温度由 10^3 K 到 10^5 K

最容易测出的表示恒星固有性质的量是恒星的视星等和颜色。亮度反映辐射的能流，颜色反映辐射能谱。由于恒星辐射能谱大体上与黑体辐射谱相似，所以恒星的表面温度是决定能谱的一个指标。它为恒星的分类提供了依据。恒星的分类法除了表面温度外更多的是采用亨利·德雷伯分类与三色测光分类。亨利·德雷伯分类也称哈佛分类，它将恒星分成如下光谱型：

■

上面的符号看起来没有什么意义，也很不好记。当天文学家面对美丽的星空，忘记了一天的疲劳和远离城市的孤独（为避免夜间灯光干扰，天文观测站一般建立在远离城镇的偏远地区）浪漫地感叹道：

Wow! Ohbeafinegirl, kissmerightnow. Sweetie!

(哇!哦,好一位美丽的姑娘,快来吻我吧,呃!)

不同类型恒星的性质列入下表:

光谱型/表面温度/性质/颜色

W/ > 4 万开//白

O/3—4 万开/高温星,吸收线少,主要是氢,氢的吸收线,/蓝

B/1—3 万开/看到强的氢线/蓝白

A/0.75—1 万开/氢线达到显强,逐说减弱/白

F/6—7.5 千开/有显著的金属元素(铁,铬,钛等)谱线/黄白

G/5—6 千开/与太阳相似,钙线很强/黄

K/3.5—5 千开/主要是金属元素的吸收线/橙色

M/2.5—3.5 千开/主要是氧化钛分子带/橙红色

R, N/2—3 千开/有许多含碳的分子[甲川(CH) 氰基(CN) ...] 吸收线/
红色

S/2—3 千开/主要是氧化锆带/

在上表中的每一类都有一个温度范围,而温度的变化引

起了能谱的相应变化,为区分这些变化,每一类又可分为几个
次型。

48. 揭示恒星一生经历的秘密——赫罗图

把恒星的光度与温度作出比较图(见图 21)是很有意思的。由于恒星的光度依赖于它的温度和大小,故把它们的光度和温度作图比较就能把恒星按体积大小区分开来。如果两颗恒星的温度相等而直径不等,那么直径小的光度就小,这是因为直径小的恒星其表面积也小的缘故,所以它的位置就在图的下方。反之,如果两颗星的光度一样但温度不同,冷星的体积必然要大些。因此,越冷的星在图上的位置越靠右。

■

这种恒星光度和光谱型关系的图,是由丹麦天文学家赫茨普龙和美国天文学家罗素,于 1905~1913 年各自独立创制,故名赫罗图。该图以光谱型为横坐标,光度为纵坐标,结果发现有 90% 以上的恒星,分布在图中的左上方到右下方的对角线的狭窄带区内。这区域称为“主星序”;位于其上的恒星称“主序星”。主星序的右上角,有一个几乎成水平走向的“巨星系”。图的上部,有一些分散的星,称为“超巨星序”。主序星的下面是“亚矮星”再下面则是“白矮星序”。巨星序和主星序不相接,中间的空区称为“赫氏空区”。研究表明,赫罗图能显示恒星各自的演化过程,能估计星团的年龄和距离,是研究恒星演化的重要手段,也是天体物理学和恒星天文学的有力工具。

由赫罗图我们可以推测恒星的一生。我们的太阳在赫罗图上就处于主星序的中部。它是一个中等质量、中等温度也恰好是中年的一颗恒星。它大约在 50 亿年前形成,又大约在 50 亿年后可能变成巨星,其半径也许会扩大到目前半径的 160 倍。那时水星将被太阳吞并,太阳的边界将扩展到金星。在地球上虽可看到一个美丽的太阳,但地球却早已化为一片焦土,也许人类早已不存在,或者乘着“诺亚宇宙方舟”逃避到另一个适于人类生存的星球。人类的文明史不到一万年,究竟怎么能推得 50 亿年前和 50 亿年后的太阳的过去和未来呢?如果有位地外来客,他在地球上仅呆了一个小时,他是否能

了解到地球上人类的一生的生长过程呢？我想如果你是这个宇宙人，你一定会在人集中的地方拍摄尽可能多的人的照片，然后带着这些照片回去，并作出与赫罗图相似的图。例如把人按身长顺序排列，就可发现这是由小孩到大人的成长过程。但仅仅按身长很难区分成人和老人。于是，你可以从身长和肤色的润泽情况对比作二维图，就可进一步区分中年和老年了。但这类图对于不同民族会构成不同的序列。

■

球状星团 M 5 大约有十万颗恒星，其中有年幼的星，也有年老的星。在赫罗图上将这些星排列起来会发现它们非常有规律。图 22 给出了这种图形。其中 A 与 D 的那一方是年青的星，由图并不能直接看出，但恒星演化理论可以帮助我们找到答案。结果表明图 22 中 AB 间的星是一些年轻的星，越向 CD 越是演化了的老年星，所以看出，随着恒星的演化，半径会增大 100 倍，亮度增大 1000 倍。但是，恒星的一生与此的一生在某种意义上是极不相同的。例如 M 5 的星几乎是同时诞生的。在赫罗图中的 A 点处的星也好，D 点处的星也好，说到年龄是“同年”的。只是因为质量不同的恒星，演化（成长）的速度不同。质量大的恒星会更快地进入“老年期”。赫罗图上 D 点处的星由于质量略大于 B 点处的星。所以当前者以成为老年星时，后者还正当壮年，从而产生了这样大的差异。人们在学习相对论时，往往很难理解“双生子佯谬”，其实在恒星世界中“同时诞生”的恒星，总是质量大者“先衰老”。

49. 引力不稳定性——恒星胚胎形成的原动力

太阳的平均密度为 1.4 克/厘米^3 。即使低密度的 O 型星也有 10^{-3} 克/厘米^3 。与此相比，普通星际云物质密度为每立方厘米中有 10 个氢原子，即 10^{-23} 克/厘米^3 。为使星际云形成恒星，密度要提高 20 个量级以上。而能使低密度气体聚集而使密度增加的唯一因素是万有引力。分析表明，如果在气体云中除引力之外其他各种力都不起作用，则气云的连续收缩，大约仅需 1000 万年后，几乎所有的气体都将集中在中心。但是，实际上有很多妨碍气云收缩的因素。他们是气体的压力、磁场、离心力等。气体云如何克服这些障碍而进行收缩呢？

设想有一橡皮气球，当向它吹进足够的空气，则气球开始膨胀。而由于橡皮的张力气球要收缩，而反抗这一张力的是空气的压力。气球处于这两种力的平衡状态。温度一上升，空气的压力就增高，气球就膨胀。相反，温度以下降气球就收缩。

气云在某些方面与气球相似。对应于橡皮张力的就是气云的引力。对于橡皮球，若橡皮越厚的气球越不容易被吹起。而对应于橡皮厚度的就是气云的质量。星云的质量越大，引力也越大，收缩也越容易。同样星云的温度越低收缩也越容易。实际上，气体云的温度是决定气云能否收缩的决定性因素。

在星云收缩的过程中，由万有引力引起的引力不稳定性起着重要的作用。它是于本世纪初由英国天文学家金斯首先提出的，故也称为金斯不稳定性。万有引力有一个特点，即当密度一定的物质团，其表面的引力大小与物质团的半径成正比。也就是说物质团块越大，其表面的引力强度也越大。因此，一定状态下的物质存在一个临界尺度，当一个物质团的尺度大于这个临界尺度，其表面的引力就足以克服其他力作用，且使这个物质团在引力的作用下发生收缩。而物质一旦发生收缩，其密度增大，引力进一步加强因而更有利于物质收缩，而物质密度将进一步增大而形成引力不稳定性现象。气体云

将不断地收缩下去。这种引力不稳定现象的发生有两个特点：一是发生的物质聚集现象总是突然出现的，二是涉及的是受自身引力作用的大批物质。大约一万个太阳质量的星际气云会同时变得不稳定。这可能正是年轻恒星只能成群发现的原因。它们毫无例外地一大堆一大堆地同时诞生。当一万个太阳质量的星际气体和尘埃以很高速度自行收缩时，就有可能从气体中形成许多云块，其中每个云块再行收缩凝聚，然后形成一颗颗恒星。

50．原初恒星和零龄主序星

上面的叙述告诉我们，当星云在大小、密度、质量和温度等方面满足一定条件时，就能通过引力作用收缩，凝聚过程形成恒星。密度极低、体积庞大、温度很低的星云，最终会演变成密度较高、体积较小而内部温度很高的恒星：体积缩小到百万分之一，密度增大 10^{16} 倍以上，温度至少增高 7 万倍。这个过程对于星云来说是一场真正的灾变。这场灾变经历了两个行为很不相同的阶段：第一阶段，星云坍缩为“原初恒星”——“恒星胚胎”；第二阶段，原初恒星再进一步收缩形成恒星。

气体尘埃星云凝聚的第一阶段称为自由下落阶段，这是一个主要由引力作用支配的快速收缩阶段。对于一个质量同太阳相近的星云来说，这个过程所经历的时间约为 100 万年。在这个过程中，由于热运动形成的气体向外的压力远远抵挡不住向内的引力，于是物质很快地向中心坍缩、聚集，中心密度迅速增高。在这一阶段中，由于星云的密度极低，物质对热辐射是透明的，因此，由于收缩使引力能转化为气体中粒子运动而引起的热能几乎可以毫无阻挡地向外逸散，结果，星云的温度几乎没有升高，接近等温过程。此过程进行到中心密度为 10^{-13} 克/厘米³ 时中心部分的热能不再能无阻挡地逸散，此时热能使中心温度逐渐升高并开始产生红外辐射，当中心部分对红外辐射也逐渐变得不透明时，从外部看，其光度急剧下降，内部的热量越来越不容易散逸，于是，温度开始明显地上升。接近这一阶段末了时，引力能中约有一半以红外辐射形式离开星云（我们已说过红外辐射的重要的源之一，是初生恒星的喜乐），而另一半则使星云物质的温度继续上升。当中心温度达到 2000K 时，氢分子开始分解成原子，并吸收掉大量热量，致使向外的辐射压急剧下降。结果，在引力的作用下，星云急剧坍缩，其中心形成体积更小、密度更大的内核——原初恒星。

原初恒星形成的标志之一，是星云的快速收缩过程的结束。但原恒星仍继续收缩，只是不再按自由下落规律，而是开始了一种缓慢的收缩过程。当全部氢分子都离解成原子后，收缩使原初恒星的温度稳定地上升。此时，原初恒星中各部分物质所受到的向内的引力几乎和向外的辐射压相等。因收缩而增加的热量，一部分辐射到原初恒星的外部，一部分使其内部，特别是核心区的温度上升。当中心温度达到 700 万开以上时，核心开始出现由氢聚变为氦的热核反应。反应提供足够的能量，使内部压力与引力处于相对平衡状态，一颗处在主序阶段的年轻恒星就正式诞生了。质量过小的星云收缩到最后中心区也升不到足以引发热核反应的温度。它们只能靠引力势能转化成热能的方式在一个较短的时期里产生一点微弱的辐射，随后便逐渐冷却下去，形成一个死寂的天体。大的质量小于 5% 太阳质量的星云就根本不能演化成为恒星。能够演化成恒星的原初恒星，按不同的质量将分别走向主序星的不同位置，形成光谱型不同的主序星。刚开始由热核反应提供足够能量而形成的主序星称为零龄主序星。所有主序星在赫罗图上的位置连成的曲线是

主星序的左边沿。图 23 显示了中等

■

质量恒星在最初收缩阶段到进入零龄主星序时在赫罗图上的演化历程。

从原始球状星云凝聚成恒星的过程中，并非整个星云的物质最后都能汇合到恒星上。对于小质量恒星进入主星序前的最后阶段由于热对流十分强烈，加上星体表面物质密度很低且重力很小，内部携带能量流出来的物质可以达到很高的速度形成强烈的物质喷发或抛射。同时这种机械运动的动能还会传递一部分给周围物质，转化为外层大气的热运动以至快速向外膨胀。这些恰恰是金牛 T 型变星光谱中反应出来的特点。一般说来，大片星云分裂出来不久的小质量原初恒星进入主星序之前，有一个时期表现为金牛 T 型变星。此外对于巨大球状星云的外层物质来不及全部坠落到中心区，越是庞大的星云外层物质向中心下落所需的时间越长，而中心区则很快凝聚成发出强烈辐射的原初恒星或恒星。辐射压和向外膨胀的星体表面物质（又称为恒星风）阻止了外层物质继续下落，不仅把物质推开甚至形成高速喷流。也有的物质形成原初恒星的包层，表现出中心有亮核和周围有包层（也称星周物质）的现象。它们已被用红外的方法观测到，并被观测到一些深埋在冷包层中的早期原初恒星。

总之，每一个天体歌星的诞生都要大放烟火、张灯结彩，大规模地庆贺一翻。然后，它们就数十亿甚至数百亿年地不停地发出各自的妙唱。给整个宇宙大舞台增添一份新的光彩。天体歌星的“烟火”的规模不同一般，以金牛星为例，观测表明它相当于每年喷射出 10^{-7} 太阳质量，这相当于每秒钟向外抛射几千亿吨的物质。理论分析表明，原始星云质量越大的天体歌星越喜欢显示自己的财富，它们把大量的物质消耗在“烟花”的抛射中。例如质量分别为 150、50 和 20M 的星云，在达到主星序形成零龄主序星时剩于质量分别只有 36、17 和 12M，占原质量的百分比分别是 24%、33%和 60%。

天体歌手的归宿

——恒星的结局

51. 主星序后恒星的演化

宇宙间任何事物都有其发生和消亡的过程。恒星也不例外。尽管它们演化时标相对于人的生命而言极为漫长，以至人类把它们称为“恒”（永恒不变）星。天文观测表明，恒星不仅有长时标的变化而且有短时标的变化，甚至可以说是随时随刻都在不停地变比。特别是在主星序后，恒星的演化更为显著。

大约在氢燃料消耗掉百分之十以后，星核开始收缩，释放的能量迫使恒星的外层向外膨胀，并随之而冷却。但是，由于恒星体积加大所引起的光度增强超过了因恒星表面温度降低而导致的光度减小，故总体说来，恒星的光度还有所增加，它使得恒星在赫罗图上的位置向上移动。另一方面，表面温

度下降又同时使它在赫罗图上向右移动。这样一来，高的光度和低的表面温度标志着恒星进入红巨星阶段。图 24 显示了对于中等质量恒星这一过程在赫罗图中的轨迹。到了某一位置（视质量而定）后，恒星便停止膨胀。当建立起这种暂时平衡之后，它可能发生轻微的脉动，成为一颗变星。

在这一阶段，一方面恒星的外层因膨胀而温度降低。但另一方面，星核却因收缩而形成较高的中心温度和密度。由于星核的温度和密度都比较高，一部分氢就会转变成碳甚至其他重元素。当然，这些新的核反应会提供给恒星更多的能量，从而使它立即停止收缩。

■

恒星在红巨星阶段究竟要停多久还不清楚，但它肯定不像在主星序上那样保持太长的时间，这可以由比较赫罗图在主星序和巨星区恒星密集度之比可以看出。实际上位于主星序上的恒星比赫罗图上其他任何区域的星都密集得多。这表明，中等质量的恒星在主星序上度过的时间比早期演化过程的任何其他阶段都长。

赫罗图为什么能反应单个恒星的演化呢？让我们回到星外来客研究地球上的人的例子。如果我们把人大体分为童年（小于 20 岁），成年（20—60 岁），和老年（60 岁以上）。如果人的平均年龄是 80 岁，则在正常情形下，童年：成年：老年=1：3：1。主序星就是成年的恒星，但它所占的比例比人口中成年人的比例要大得多。

理论计算表明，一颗质量为 1.3 倍太阳质量的恒星，当它达到红巨星阶段时，其中心形成的氦核将扩大到接近整个恒星的 40%。此时，恒星核部的物质会承受异常高的压力和温度。在此条件下，恒星的物质会被压缩成极密集的状态，以至星中的原子结构均被挤碎：电子和核都紧紧地靠在一起，形成所谓简并态的物质。我们知道，通常的气体压力是靠小球一样的气体分子发生碰撞时引起的动量变化而形成。我们往往把气体分子视为一个没有大小的几何点。这种近似对于高温低气压的情况较为适用，但对于低温或高压情况这种近似就不再适用了，必需考虑气体分子本身的体积大小，使气体运动的有效空间等于其所占有空间减去所有气体分子自身的总体积。但如果在某些极端情况下，如极低温或特高压，使气体分子完全被压在一起，此时分子已不能再运动，但凭借分子自身的“刚度”仍能反抗外来压力，这种反抗压力就是“简并压力”。处于简并状态的气体称“简并气体”。简并气体有一个很大的特点，即在一定限度内，压力加大体积不会收缩，或者温度升高体积也不膨胀。此时星核四周的氢气继续“燃烧”，但辐射来不及传输走星核所产生的全部能量。于是星核温度升高。当温度接近 8×10^7 开时，氢开始燃烧变成更重的元素。由于星核的物质成简并状态，不能膨胀；这样使温度不断升高，氢的燃烧更加迅速。但是，这种迅猛的氢燃烧过程还是有限度的。因为，当星核的温度达到 3.5×10^8 开时，星核将被迫膨胀，气体的简并状态受到破坏。在星核受迫膨胀之前的迅猛燃氢过程，称为“氢闪”，这种燃氢过程仅仅持续数千年。当星核一旦膨胀使恒星温度下降，氢闪过程即随之结束。

在氢闪阶段恒星在赫罗图上的位置并不固定。其位移非常明显，由红巨星稍稍下降一点后就向左沿赫罗图上近似水平的巨星分支移动。此阶段的某一时期将出现不稳定现象，恒星变成一颗脉动变星。而不同质量的恒星将成为不同类型的变星。质量较大的恒星成为长周期的造父变星；而质量较小的

恒星将成为短周期造父变星，或成为天琴座 RR 型变星。理论上可以证明，恒星的氦闪阶段可能多次发生，因此，恒星可能沿着巨星分支来回移动，从而多次成为变星。

由以上的讨论可知，天体歌星有一种顽强的自我表现能力，它们不甘心退出历史舞台。在它们演化的一生中，按自己的财力不断地抛射物质，以“渲染”自己的存在。因此，财力（质量）越大的歌星衰老越快。它们在一种财富（氢）消耗尽后又消耗另一种财富（氦）。尽管是昙花一现，却也颇具特色。但必须注意“天上一天，地上一百年”。恒星的“一闪”人间却是数千年！当氦耗尽后，恒星仍不死心，凭借其余威（强大的引力）尽可能吞食周围的物质以补充自己，使其温度不断上升，以至点燃一些尚可燃烧之物，苟延残生。但毕竟力不从心，它们的表演时强时弱，形成周期性变化。有趣的是，它们这种“余热”的发挥，为人们确定天体的距离提供了各类“标准烛光”。

经历了变星阶段后，恒星就进入了它的暮年。按质量大小，它们或为白矮星，或为中子星，或为黑洞。下面我们分别介绍它们。

52. 昌德拉塞卡极限——白矮星和黑矮星

1930 年，一个年刚 20 的印度的大学毕业生，在前往英国剑桥大学留学的旅途中，开始了他关于恒星内部结构的研究。他利用完全简并的电子气体的物态方程建立了恒星演化晚期的白矮星模型，并导出了白矮星的质量上限是太阳质量的 1.44 倍。这个印度大学生就是 1983 年度诺贝尔物理学奖的得主钱德拉塞卡。他得出的白矮星质量的上限也被人们称为“钱德拉塞卡极限”。它是描述恒星演化，决定恒星命运的一个重要的质量极限。

在从印赴英的三个月的航海旅途中，钱德拉塞卡对白矮星进行了反复的思考和计算，他意外地发现白矮星的中心质量密度可高达每立方厘米 7 吨之巨！这使他立即联想到一个问题：如此高的密度下，相对论效应将会显得重要吗？

这个年轻的大学生把当时流行的福勒的量子统计观点和爱丁顿关于恒星的多层结构模式的研究结合起来，并考虑到高能条件下的相对论推广。然而，他意外地发现了一些与预想完全不同的结果。如果他的结果是对的，那么对能够发展成白矮星的恒星质量有一个极限，当一颗恒星的质量大于这个极限时，它就不可能发展成白矮星。

从理论上说，钱德拉塞卡的结论有两个令人吃惊之处：一个是，当时人们对恒星的知识实在太少，既不知其产能机制，也不知其演化细节，但钱德拉塞卡却预言了关于恒星的结局！再有就是如此巨大的恒星演化的最终结局竟是由如此微小的基本原子常数所决定。

实际上，恒星内部的能源有两个，一是热核聚变反应，我们已知道它把氢聚合成氦，这个过程释放出大量热能和辐射能；另一种能源就是构成恒星的物质自身的引力能。恒星的引力势能和热核反应的产能率及以辐射方式向宇宙空间扩散能量的耗损率，三者处于相互制约的平衡态：引力能紧紧“抓住”物质向中心下落，热能使物质反抗引力向外扩散，而辐射能则带走热量起着削弱离散倾向的作用。

按一定的恒星模型（如流行的多层球模型）可以得到恒星的质量和半径与密度和压力的关系。另一方面，从量子统计力学可以给出气体压力和物质密度的关系，这种关系通常称为“物态方程”。一般情况下，物态方程是与物质的类型、温度和压力自身有关的十分复杂的函数。但有四种情况的临界

状态，即非简并的、简并的、非相对论的和极端相对论的。

通常对于很稀薄的气体，压力是靠气体粒子与边界发生碰撞时产生动量交换而形成。但如果压力很大，气体粒子被紧紧地挤压在一起，则气体粒子不能再自由运动，此时物质处于一种十分特殊的简并状态，一定物质的简并状态将产生一种与之有关的简并压力。

当恒星演化到晚期，核反应过程慢慢结束，星体逐渐冷却，再没有力量来平衡恒星自身的引力，于是在引力作用下，恒星开始引力坍缩，而引力使恒星内部的原子核紧紧挤在一起，这时电子则形成一种简并态的“气体”，称为简并电子气。如果简并电子气的简并压力大于或等于恒星的引力，则恒星将停止坍缩，形成一个稳定结构。这种恒星的状态就是白矮星。凭借其余热它们继续辐射，直至其表面温度降到 4000 开，这期间大约有 80 亿年。这以后常称为黑矮星，它们辐射更弱，由于辐射导致的能量损耗也更小，因此能维持一个更长的时期。直至完全冷却。这类天体的残骸其主要物质成分是铁。这也是地球上为什么会有铁陨石落下来的原因。

53. 奥本海默极限——中子星和脉冲星

质量大于钱德拉塞卡极限的恒星又会发生什么情况呢？一个有趣的历史事实是：在钱德拉塞卡提出他的临界质量概念两年后，物理学家才在实验中发现了中子。所以人们没有理由去评论钱德拉塞卡为什么没有能提出中子星的概念。1932 年当从物理实验中发现中子不久，物理学家朗道等即从理论上预言了中子星的存在。实际上，中子也存在着类似于电子的简并态，不过它有比简并电子气体更大的简并压强（每单位面积上的压力），故它能抵抗更大质量恒星所产生的自引力。一个通常称为奥本海默极限质量的值为太阳质量的 2.4 倍。它标志了另一类特殊天体——中子星的形成条件，也是中等质量恒星演化的最后归宿。从认识论的角度看，这是钱德拉塞卡思想的自然结果。如果能对其他物理结构层次的粒子得到相应的简并物态方程，自然也可推断出相应粒子的简并星。如夸克星、孤立子星等。这些工作本质上只是将钱德拉塞卡的“酒”，装在不同的瓶子里。

1967 年，英国天文学家休依奇和莱尔发现了脉冲星，并因此获得 1974 年度诺贝尔物理学奖。我们已提过，脉冲星的发现是 60 年代天文学的四大发现之一。1967 年，休依奇和他的研究生伯耐尔博士一起在英国剑桥大学射电天文台工作。他们研制了一台探测极微弱讯号的射电望远镜，想要探测射电星际闪烁。很多人孩童时都有过一个问题：星星为什么会眨眼？它就是这里说的星星闪烁。它是因为星光通过了不均匀的大气产生了不规则的折射的缘故。同样，天体的射电辐射波通过不均匀的星际电离气体以后，也会形成射电闪烁现象。对于射电波这种闪烁造成的光度起伏比星光闪烁更为强烈。不过，它与射电源的视角大小有关、对于达到一定大小视角的射电源，这种闪烁就观测不到了。这是因为对于足够大尺度的射电源，各部分的闪烁不一致，结果互相抵消了。这样一来，是否能观测到射电闪烁，倒成为了射电源尺度大小的一个观测判据。它可把角度很小的类星体同一般的射电源区别开来。休依奇他们本来是想这样做的。

仪器工作一个月之内，伯耐尔博士就看到有一组起伏特别强烈，很像是周期性反复出现的讯号。它不像是预想的星际闪烁，倒很像是地面的干扰。因为在射电观测中，有时一辆汽车或摩托车路过也会出现这类讯号。但后来讯号的反复出现排斥了是地面偶然干扰的可能。由于讯号的时有时无给观测

带来一定的困难。但他们已感到有什么值得重视的东西存在。经过了多次排除性实验后，终于于 1967 年 11 月 28 日，伯耐尔等首次确认存在非常明显的周期性的来自太阳系之外的讯号。每个脉冲持续约 0.3 秒，重复周期为 1.3373011 秒，周期短而精确。这种讯号很像是某种人为的作品。是来自地外文明世界吗？人们曾把它称为“小绿人”。但脉冲讯号中没有任何可识别的编码。加之，在脉冲频率上没有任何多普勒效应，因此，讯号也不可能是来自某个行星。这就排斥了“小绿人”的可能性。脉冲辐射究竟来自什么天体？

在天文学中一种周期现象的出现，往往只有三种可能：这就是天体的自转，天体的公转和天体自身的脉动。由于已观测到的周期如此之短，因此只可能是天体的某种自转引起的现象。而这样高速的自转只可能是高致密天体。如，像 30 年前预言的中子星。

随后不久，在蟹状星云中发现了另一颗脉冲星，周期非常之短，只有 33 毫秒。从 1968 年 10 月到 1969 年 2 月期间，测定出这颗星的辐射脉冲周期在以每月增长百万分之一秒的速率在增加。有趣的是这个变化率与脉冲星辐射能量所损失的自转能的计算结果是一致的。

更有意思的是，按上述自转衰减率算出，这颗脉冲星应该是在大约 1000 年前诞生的。而按恒星演化理论。在超新星爆发过程中形成脉冲星的模式，大约一千年前，那里应该有过一次超新星爆发。而我国的古代史书《宋史》中的《天文志》以及《宋会要》等书中，确实曾有以下记载：“至和元年，客星出天关东南，可数寸，岁余稍没”；“昼见如太白，芒角四射”等记载。按这些记载的意思是：一颗新出现的星，明亮得白天可见，直到一年多的时间之后才消失。这分明是一颗我国古代人所观测到的一颗超新星的记录。而“天关”又恰好靠近蟹状星云脉冲星的位置。至和元年是公元 1054 年，至今 941 年。这一切纯属巧合吗？如果不是，那么它就是对整个恒星演化，到超新星爆发形成中子星的理论的最好支持。脉冲星就是旋转的中子星。这一结果对于近代天体物理学的发展产生了不可估量的影响。它再次显示了一个正确的理论预言对天文发现的指导和促进作用。中子星的发现促使相对论天体物理和致密态和强磁场物理的研究空前活跃起来。

54. 令人生畏的黑洞

前面我们已讨论了中、小质量恒星演化的结局。具体地说就是；对于质量小于 1.44 倍太阳质量即所谓钱德拉塞卡质量极限的恒星其最终结局是白矮星；质量大于它但小于 2.4 倍太阳质量即所谓奥本海默质量极限的恒星其最终结局是中子星。而对于那些质量大于奥本海默极限的恒星甚至简并中子气体的压力也抵抗不住恒星强大的自引力。这样的恒星到了晚年，恒星内部的核燃料全部耗尽，此时将没有任何力量能平衡恒星的自引力，恒星的引力坍缩将毫无阻挡地进行到底，其唯一的归宿就是“黑洞”。这一类黑洞的质量一般为太阳质量的 3~50 倍。

早在 18 世纪 法国著名科学家拉普拉斯按照牛顿引力公式推导结果就曾预言：可能存在一种大质量天体，其表面引力强得连光也无法射出来。从理论上说，拉普拉斯的作法是不能成立的。因为现代研究表明对于引力足够强的情况下，牛顿引力公式已不再适用，取代它的是爱因斯坦的广义相对论。十分凑巧的是，拉普拉斯所得到的条件与按照广义相对论得到的史瓦西解中的引力半径公式完全一致。按此公式，一个与太阳质量相等的黑洞，其引力

半径只有 3 公里。这个“引力半径”也常称为“史瓦西半径”。

按现代天体理论，大质量恒星演化的结果，并非黑洞产生的唯一源泉。“星体碰撞”也可能产生黑洞。星系或球状星团的中心部分恒星密集，容易发生星体间的大规模碰撞。有人认为，我们的银河系中心就曾发生过这类超级碰撞。由这类碰撞就可能形成其质量超过太阳一亿倍的黑洞。此外还可能存在所谓的“原生黑洞”，它是在宇宙大爆炸中形成的微型黑洞，其半径只有质子或中子那样大，质量约为 10 亿吨左右。

崇拜光明也许是人类的一种天性，所以一听到“黑洞”就有些不太舒服的感觉。或许你会想到法西斯的集中营或奴隶主的暗无天日的地牢。但这些都远不能和我们这里说的“黑洞”相比。比如说吧，如果一个宇航员，不小心掉进了“黑洞”那么他的飞船、他的仪器、他的电视机……连同他本人一起，都将消失。唯一能有的一点可靠线索是黑洞的质量增加了。或者他在掉进黑洞前正在做大规模的旋转试验，那么黑洞的总角动量也或许会有变化。其余线索将完全消失。实际上，任何东西一旦形成黑洞，那么它将失去一切原有性质，只有它的质量、角动量和电荷将被黑洞所接管，其余的一切将化为乌有。实际上，黑洞本身也只剩下了这三根毫毛。其中最主要的一根毛是质量，只有这一根毛的黑洞称为史瓦西黑洞。第二根毛是自旋，有这两根毛的黑洞叫克尔黑洞；而第三根毛就是电荷，这三根毛发齐全的黑洞叫克尔—纽曼黑洞；敏感的读者马上会说，还可能有一种只有质量和电荷但无自旋的黑洞，确实如此，它们叫莱斯纳—诺斯特隆黑洞。其实这些名字并不关紧要，主要知道有这样几种可能情况而导致了黑洞的四种类型。

上面的叙述是否使人感到黑洞太可怕了。一颗大质量恒星真像一个暴君，他无情地吞噬周围物质，尽其可能拉进大量殉葬物。如果真是君王的殉葬品，若干年后出土成了文物。而黑洞的殉葬物完全被黑洞彻底“消化”最后浓缩在一起，很快就坠落到黑洞的中心了。说到这里也许很多读者对黑洞不仅感到可怕，甚至觉得它太无法无天了！实际上，以上我们叙述的黑洞品性都是基于经典广义相对论的局部特性。即使如此，按经典广义相对论黑洞还遵从两条基本原理：一是面积不减原理，它反应了黑洞的贪婪性，颇像民间说的“铁公鸡”。实际上黑洞的面积是由其质量决定的，所谓面积不减就是质量不减，就是“一毛不拔”。岂止不拔就是“吞噬”。但研究表明，黑洞之所以贪婪是因为它在理论上是一个时空奇点。在奇点处通常的时间和空间的概念都已失去意义，所以它才如此无法无天。就像老虎和人在一起，总是无法可讲。但如果把老虎关进笼子里它也就不可怕了。科学家发现了一条新的原理叫做“宇宙监督原理”。它说：奇点总是躲避外部世界，或者说奇点总是被视界覆盖住的。不在视界内的奇点称为裸奇点，它是非常令人厌恶的，就像逃出笼子窜入人群中的老虎。”但宇宙监督原理以科学的精确性保证裸奇点是不存在的。研究表明，从一个遥远的观测者来看一个客体向“黑洞”的下落，他可发现，当客体远离黑洞时，客体的运动规律完全遵从牛顿的引力定律，而客体逐渐接近“引力半径”时就逐渐偏离牛顿定律。特别是观测者可发现，无论他等多久这个下落客体只能极其缓慢地接近引力半径而总也到达不了引力半径。实际上不管什么东西向黑洞下落，对于这个观测者看来都一样，即它们只能无限接近引力半径，确永远到达不了那里。好像都“冻结”在引力半径上。因此“冻结星”是黑洞的曾用姓名。也许这个名字不那么令人害怕！引力半径就成了黑洞的“视界”。它是宇宙监督原理的“执

行者”。以它为半径的球面面积就是黑洞面积。它真是一身兼数职的多面手！

55．黑洞不黑

上面对于黑洞的描述是否使你感到它是一个宇宙中最自私的大怪物呢？其实那都是经典物理学冤枉了它。世界著名的英国科学家霍金从量子物理观点深入地研究了这个令人生畏的黑洞，发现黑洞并不是一个只进不出的“铁公鸡”天体。

前些年，不少物理学家和天文学家又研究了黑洞的另一个特征。他们发现，黑洞不仅不是一毛不拔的“铁公鸡”，而且它在无私地向外“自发蒸发”。从量子物理观点研究黑洞的结果表明：黑洞很像通常的发热体，它以类似于黑体辐射的方式稳定地向外发射粒子。微小黑洞为什么会蒸发呢？原来量子理论阐明，在很小的尺度上粒子都是模糊不清的，他们看起来像一些微小的云雾状的东西。根据这个观点，黑洞中央的奇点不能看成是无限小的弹丸，必须看成是物质云。人们不能说它的确切位置，而只能陈述在某一瞬间这个奇点位于何处的概率。对于一个特小的黑洞，模糊的奇点并不比黑洞本身小多少。黑洞内的物质通过量子隧道效应可能穿出视界，甚至远离黑洞。由于小黑洞的视界更加靠近它的奇点，所以黑洞蒸发过程会加速进行。一旦待小黑洞失去了一点儿物质，它就会变得更小，也就越加容易失去更多的物质。这个过程将一直持续到黑洞被完全蒸发掉。也许读者还记得，恒星在演化过程中，质量越大的恒星，在其演化过程中越多的物质被抛射，好像一个纨绔子弟毫不吝惜自己的财物。而黑洞的蒸发过程中情况恰好相反。黑洞的质量越小发射粒子的速度就越快。对于一个质量与太阳相当的黑洞来说，质量的蒸发是极不明显的，大约需要 10^{66} 年才能蒸发殆尽。但是对于一个质量只有十亿吨的原生黑洞来说，这种“蒸发”就相当可观了，它竟能在 10^{-23} 秒之内蒸发得一干二净。这种猛烈地蒸发使黑洞的温度急剧上升，甚至高达 1200 亿度！

可见，由于黑洞发射粒子使其质量不断减小，相应是黑洞温度的上升，自然会使其蒸发加剧，因此质量就减少得更快；相应黑洞也蒸发更快。如此，过程越演越烈，到头来，将引起一场猛烈的爆炸而告终。人们为这种“反坍塌”的爆炸过程起了一个形象而有趣的名字叫“白洞”。

56．怎样探测黑洞

黑洞果真存在吗？直到现在天文观测上仍然没有给出完全肯定的回答。探测黑洞的主要困难还是在于它的“黑”，即它本身不辐射电磁波。虽然我们也说了黑洞不“黑”。不过要使黑洞的蒸发引起观测效果，只能是具有足够小质量的黑洞。那类黑洞只能是原生黑洞。但这类黑洞的蒸发在很短的时间内就将黑洞蒸发得一干二尽。因此，即便真的在宇宙大爆炸中产生过，现在也被蒸发得不留任何痕迹。而能留下的黑洞其蒸发速度不能产生观测效果。也就是说，现在能存留的黑洞都是不可见的。那么又怎样能找到它们呢？好在黑洞还有三根毛！

有质量，而且一般来说是有很大的质量。因此，当别的物体接近它时就会朝它降落或绕它作轨道运动。下面我们会看到，恒星大多以双星形式存在。那么如果双星系统中，如果其中一个已成了黑洞，另一个作轨道运动的恒星就将绕一个看不见的天体运动。这不是寻找黑洞的简便易行方法吗？可惜，恒星一般都是十分遥远的，而我们必须回答两个问题：首先，要确定那颗可见恒星确实在作周期轨道运动；此外，要确定它的伴星的确是不可见天体而

不是一颗暗弱天体，仅因为距离遥远或由于其他原因没有被观测到。而要对这两点作出准确判断，一般是极为困难的。有没有任何其他较为明确的迹象可以提供我们用来确认双星系统内的黑洞呢？x 射线天文学提供了线索。

我们已知道由于 x 射线辐射不能穿透地球大气，所以必须到大气层外的空间进行观测。60 年代，x 射线天文学的全部进展都是利用由火箭或者有时是用气球将仪器送到大气层外所取得的。当一种观测是否能取得预期效果尚有争议时，火箭或气球是一种经济有效的手段，但其缺点是能利用的观测时间太短。一次典型的火箭飞行观测大约只有 5 分钟的有效观测时间。气球虽然可以有更长的时间但它不能完全飞出大气层外，因此只能对有一定穿透力的硬 x 射线进行观测。直到 1969 年多次火箭飞行的累积的观测时间仅仅略微超过一个小时，只是用了一个小时的时间来观测星空，可以想象能得到的信息是何等的有限。但是，就凭借这有限的一个多小时，x 射线天文学的火箭时代也已取得了十分丰富的结果。这足以显示天体 x 射线辐射的普遍。

1969 年，随着“乌呼鲁”卫星的发射，x 射线天文学的火箭时代接近尾声。这第一个 x 射线天文卫星已提供了天空较全面的 x 射线源表，它包含了 200 多个 x 射线源，其中一半位于银河系内。此后，各国发射了许多 x 射线观测卫星。同时有大量的火箭和气球观测。它们揭示了更多的新现象和新天体。特别是美国的系列卫星“高能天文观测站”。它们的发射及取得的成果，使 x 射线天文学进入了成年时期。截至 1982 年，已探测到 1500 多个 x 射线源。其中一些 x 射线源就很可能是黑洞存在的证据。

天鹅座 X—1 是一个有代表性的密近双星 x 射线源。他的光学对应体是一个有 5.6 天周期的分光双星系统 HDE226868，质量为 20 个太阳质量。该源的 x 射线没有食周期，也无规则的脉冲结构，只有不规则的脉冲式涨落。人们倾向于认为，这个双星 x 射线源很可能就是寻觅已久的神秘天体——黑洞。理由有如下几点：

(1) 天鹅座 X—1 和可见的正常星 HDE226868 的看不见的伴星是同一体，构成一个双星系统。

(2) 它的 x 射线发射区域小于正常双星系的。

(3) 看不见伴星的质量约大于 5 个太阳质量。

(4) 质量如此之大，而区域又如此之小的星体，必然维持不住，只能坍缩成黑洞。

对于其他的黑洞候选者如：圆规座 X—1 和天蝎座 V861。

57. 变星，新星和超新星爆发

我们已知道，恒星演化到红巨星阶段后即进入变星阶段。变星的观测特征表现为光度变化。它们可能是起因于星体的周期性脉动、不规则性的迸发、或者是发生巨大的突发性的爆炸。于是形成各种不同类型的不稳定的变化天体。

最重要的一类不稳定变星是造父变星，其最大特征是有明显的周光关系，即其绝对光度与光变周期之间存在某种相关关系。因此，它在天体的距离确定中起着重要的作用。在人类最后确认河外星系的存在时也起了判决性的作用。即在最初误认为是河内星云的天体中发现有造父变星，并由造父变星判定它们的距离远远超出了银河系的范围。因此，使人类对宇宙的认识揭开了一个崭新的层次。在宇宙的膨胀性质被天文观测所揭示后，造父变星又担起确定标志宇宙膨胀率的“哈勃常数 H_0 ”的重任。由于质量不同，恒星

演化到变星阶段所显示的性质也不同。图 25 给出了各类变星在赫罗图上相对于主序星和巨星的位置，关于变星的其他特征我们不再介绍。

有些突出的不稳定星在爆发时能释放出难以想象的巨额能量。这种爆发在历史上早已引起了人们的注意。因为在起初什么星也看不到的地方，竟有一颗星亮了起来。而且毫不费力就可以看到。这类恒星人们十分形象地把它称为新星（即新出现的星）。当然今天我们已十分清楚它们根本不是“新”星；而是一类老年星的某种爆发现象。

■

在东方和西方的古代文明中都曾记载过许多新星。早在公元前 13 世纪的殷代甲骨卜辞里，就已有了关于新星的零星记载。汉代以后，关于新星的记录更加丰富和详尽。在《汉书·天文志》中记有：“汉元光（汉武帝）元年六月客星见于房”。我国古代学者把新星和超新星都称为客星，这里是指新星，房宿就是天蝎座。此星西方称为伊巴谷新星。现代观测仪器出现后，所发现的明亮新星都尽可能地进行了全面的观测研究。天鹰座新星（1918 年）差不多是当时天空最亮的星。它是第一颗在成为新星之前就已有过记载的恒星。在成为新星之前曾是一颗光度变化的 A 型星。所以说，新星在其亮度猛增数千倍之前就存在了，爆发后，亮度猛增至最高，然后逐渐减弱，以至最后恢复到原来的不引人注目的平常状态。这过程所经历的时间可持续几个月甚至到几年。有的新星可多次出现。

平均说来，新星在最亮时的绝对星等约为 -6 等或 -7 等。这样的亮度，即使持续时间不长，也是足以令人吃惊了。但还有一种恒星，在爆发时能达到 -13 等，甚至到 -16 等。也就是说，一般的新星在其最亮时光度可达太阳的 50000 倍。而 -16 等的光度相当于太阳的两亿多倍。恒星的这种爆发现象称为超新星爆发，或者一般就简称超新星。超新星爆发除了光度大大超过新星外还有一个不同于新星的特点，那就是新星在其光度降低到爆发前的状态后不留下什么可观测的痕迹。而超新星爆发后所留下的遗迹将以星云的形式长期保留在星空，以至“超新星遗迹”成了天文学中的固有名词，且成了特有的研究对象。

在介绍中子星时，我们已谈到我国古代有世界上最早和最详细的超新星的记录资料，那就是人类观测到的第一个有较完整记录的超新星 1054。它是公元 1054 年爆发的一颗超新星。这里顺便介绍一下超新星的命名，在早些年代往往以最先发现者命名。如第谷超新星和开普勒超新星等就是这样的。现在，一般都以发现年代加上顺序。如大麦哲伦云中的超新星 1987A 就是 1987 年观测到的第一颗超新星。它是人类有现代观测设备以来发现的一次宇宙中最猛烈的爆炸事件。至今仍是吸引天文学家观测和研究对象。

超新星可按其光变和光谱特征进行分类。它被分成 I 型和 II 型超新星。这种分类主要是依据光变曲线特征。按其光谱及其中的发射线可进一步将每一型再分成细类。这里我们不再详细介绍。

至此，我们已简略地介绍了一个天体歌星（恒星）漫长而坎坷的一生。它们发家于一些零散的太空中流浪的气云，凭借微弱的万有引力牢牢地把握了时机不断地借助群体的力量使自己越来越密集，在这过程中不惜一切地尽力表现自己。一方面借引力增强自己的内部功力，采用最简单而效率最高的热核聚变的方式产生能量，同时不停地向宇宙万物倾述自己一生的遭遇。它们从诞生开始就按自己的财力豪华地渲染自己，向太空抛射大量物质。一些

较“贫穷”的歌星倒是以平静的方式结束自己的一生，最后化为一尊铁身！从此无声无息地存在于宇宙中。对于那些富有天体歌星它们真是财大气粗，它们绝不甘心就此了事，在与命运的拚搏中它们时明时暗变幻莫测，有的甚至燃爆自身以比平时数亿倍的光芒的猛烈爆发结束了一生。留下的遗迹仍显得绚丽多彩。

形形色色的星星乐团

星星歌手的营地

——恒星的空间分布

58. 双星及其分类——天体的重唱及轮唱歌星

前面我们介绍了恒星的类型及其演化。这里我们开始介绍恒星的空间分布关系。天文观测表明，绝大多数恒星并非是单独存在的。往往是两个或更多的恒星在其相互间引力的影响下形成一个系统。仅由两颗恒星组成的系统称双星。在相互引力的作用下，两颗恒星绕着它们共同的引力中心描绘出闭合的轨道。这里，对两颗恒星的距离并没有加以限制，它们的轨道可以是密接的，也可以相距几千天文单位或更远。双星的两个成员都称为双星的子星，其中较亮的子星称为主星，较暗的子星称为伴星。由于两子星距离的不同，引起观特征的变化，形成了不同类型的双星。

(1) 目视双星。通过望远镜能直接用眼睛看出两颗星的双星称为目视双星。这类双星两子星相距较远或者离地球较近，故两子星的视角距较大，所以能用望远镜分开。也有少数的甚至仅用肉眼就可以看出是双星。也有的仅主星较亮伴星太暗，不能看见但精确测量主星的位置相对于背景恒星的变化，发现其移动的路径呈波浪形，从而也可知其伴星的存在。现在已观测到的目视双星有近 8 万对。

(2) 分光双星。许多双星的两颗子星靠得很近，不能用望远镜分解出两个光点，但可用分光方法从它们的视向速度的变化来确定是双星，这类双星称为分光双星。已发现 5000 对双星。轨道周期最短的为 82 分钟，最长的为 88 年。大多数的为几天。

(3) 食双星。如果双星轨道面法线与视线的交角相当接近于 90° ，则发生两子星互相交食的现象，此时双星亮度（两子星亮度的叠加）呈周期性的变化，这种双星称为食双星。一般来说，在食双星的一个光变周期中，光变曲线出现两个极小。较深的极小称主极小，较浅的极小称次极小。由于两子星较接近，因此，当其处于近距点时引力作用下的起潮力会把星体拉成蛋形。已载入星表的食双星（即食变星），有 4000 多。

(4) 密近双星。1955 年，天文学家科帕尔根据两子星之间是否有质量交流的原则，提出了一种双星的新分类法：由两颗星的引力作用将形成一个

双纽线形的临界等势面，它所包围的两个区域称为洛希瓣。科帕尔以两颗子星是否充满洛希瓣为依据，把双星分为：不相接，半相接和相接双星。有人把子星的演化受到两星质量交流影响的称为密近双星。密近双星在天体物理中扮演着极重要的角色。它在确定有关恒星的物理量中起很大的作用。也是形成超新星爆发的重要机制之一。

三颗到六七颗恒星在引力作用下聚集在一起而组成的系统称为聚星。也可按其星数称为三合星、四合星，等。

可见，天体歌手也和人间歌星一样，他们并不满足于个人的美妙歌喉而往往三五成群地组成合唱、重唱（目视双星或聚星）和轮唱（食双星）团。

59. 不同规模的合唱团——星团和星协

在银河系中，除了上面介绍的双星和聚星外，还存在着由更多恒星组成的更大系统，即通常称为的星团和星协。

星团一般可分成疏散星团和球状星团。疏散星团其形态不规则，包含几十到二三千颗恒星。成员星分布得较松散，望远镜中易于区分，甚至肉眼都能看得见。疏散星团的直径大多数在 $1 \sim 10$ 秒差距的范围内。大多数分布在银道面附近。从光谱分析和赫罗图分析表明，它们含有较多的重元素且偏于年青的恒星。球状星团呈球形或扁球形。与疏散星团相比，它们是紧密的恒星集团，这类星团包含 $10^4 \sim 10^7$ 数量级的恒星。在银河系内发现了 131 个球状星团，直径在 $3 \sim 107$ 秒差距的范围内。

在球状星团中发现了大量变星，至今有 2000 多颗，其中大多数是天琴 RR 型星。我们知道，这类变星光度弥散度很小，故用来确定球状星团的距离。球状星团不像疏散星团向银道面集中，而是呈现出以银河系中心为球心的大致的球形空间分布。它们离银心的距离大多数在 20 千秒差距内。由赫罗图分析表明，球状星团中的恒星为较老年的恒星。它们含重元素较少。

天文学家早已知道，O 型和 B 型星在天球上的分布是不均匀的，有些天区里这类星比较多。1947 年，阿姆巴楚米扬提出了星协的概念。他认为，一部分 O 型星和 B 型星集结在一起不是偶然的现象，而是组成了一个具有物理联系的系统。他把这种系统称为星协。星协概念的提出，为研究那些看不出有恒星集聚的天区中恒星的形成和演化提供了重要依据。

人们把众多歌星组织起来，形成一个大的和唱团，天体歌手也一样，它们三五成群或成千上万地集聚在一起，形成不同规模的有更大显示度的“合唱团”，使人们更容易发现它们的存在。

60. 规模巨大的天体乐团——星系及更大尺度的结构

我们已经看到，人类认识宇宙及自己在宇宙中的位置时，曾把地球视为宇宙的中心，太阳系的发现使日心说代替了地心说。但天文观测表明，太阳仅是数以亿计的恒星中的一个，大量恒星组成各种形式的星团。而进一步的观测又表明我们附近的大量星团又组成了银河系。而我们的银河系也只不过是宇宙中亿万星系中的一个。而我们的太阳系又是银河系中亿万颗恒星系中的一个。这个结果表明，日心说与地心说同样是靠不住的。但天文学家仍然不能忘记哥白尼的不朽功绩。因为认识到太阳不过是一个普通恒星，其位置没有任何优越性，从而更进一步认识到，宇宙中没有任何一点具有特别的优越性的“宇宙学原理”其本质就是哥白尼的思想的自然发展。所以天文学家常把宇宙学原理称为“哥白尼原理”就是为了肯定哥白尼的这个功绩。

如果说，恒星好比组成宇宙的“原子”，那么星系只不过像一个分子，

它仍然是组成更大尺度结构的基元。若干星系组成星系群或星系团，而若干星系群和团有组成超星系团。这些构成了我们后面介绍的内容。

人类生存所寄的天体乐团

——银河系

61. 太阳系在银河系中的位置

见彩图银河系的全貌图。一为侧视图，一为俯视图其中标示的太阳就是我们的太阳系在银河系中的相对位置。银河系中间（图中实线）部分像一个凸透镜，其直径为 $8 \sim 10$ 万光年，我们的太阳系大约在位于银心 2.7 万光年的地方。银河系厚为 1.6 万光年，太阳系所在处厚约为 3 千光年。在银河系对称平面附近，恒星的密度远比对称平面的地方大，并集结了大部分的星际物质，构成一个扁盘形区域，称为银盘。在银盘中叠加了若干条旋涡星系必定具备的旋臂。中央凸起的扁球叫做核球，而银河系的核心——银核，深深地隐藏在核球中央的一个很小的区域内。在银盘四周广阔的空间里散布着球状星团和天琴 RR 型星等天体，形成了一个近于球形的银河系的晕，称为银晕。此外，近年的研究表明，银河系可能被一个范围更大的银冕包围着。

银河系这个天体乐团的“演奏”是十分丰富多彩的，特别是银核，它除了可见光还有射电辐射，红外辐射， x 射线和 γ 射线辐射。因此，人们常采用多波段的综合观测来研究银核。

从观测得到的恒星的空间运动是相对于太阳的运动，是否这也是一种表观现象，就像地球是绕太阳旋转那样太阳是否也在绕银心旋转呢？银河系具有的扁盘形状也暗示着它作为一个庞大的恒星系统在绕通过银心且垂直于银盘面的一条轴线快速自转。从观念上的猜想到观测上的确认是经过了大量的观测和分析才得到的。这也是科学和哲学间的最大差别。研究距银心的不同距离 R 处物质的运动速度 V 的变化关系可得到银河系的旋转曲线。通过旋转曲线的研究又可估计银河系的总质量。

一个天体系统其中心的转动规律应取决于系统内引力势的分布，即受物质分布的支配。例如，如果物质高度集中在中央，像太阳系那样，则转动遵循开普勒定律；如果系统呈球形，且物质均匀分布，则服从刚体转动的规律。70 年代前，由于观测范围较小，当时建立的银河系的模型中，自转速度在太阳附近达到极大后，向外单调下降，趋于开普勒运动，推算出银河系的质量为 $1.4 \times 10^{11} M_{\odot}$ 。

70 年代末以来，情况有了很大的变化。观测表明，从太阳轨道向外，自转速度反而在增加，到 $R=18$ 千秒差距处， $V(R)$ 增至 300 千米/秒（见图 26）。对其他邻近星系的观测也有类似结果。它表明星系的物质应分布在比以前设想的大得多的区域里。对于银河系而言，在太阳轨道以外存在着大量的物质。计算表明银河系的质量比以前的推算大 10 倍以上。这对其他星系也一样。这个结果导致观测确定的宇宙中物质平均物质密度的大大增加。它为宇宙中存在大量不发光的暗物质的可能提供了观测基础。

62．银河系中的各类星族及其分布

1944 年，巴德发现，用通常对蓝光敏感的底片对 M31 中央区域摄影却不可能获得单颗恒星的像。继而他使用对红光敏化的底片成功地将 M31 的中央区域及其附近的椭圆星系 M32 和 NGC205 分解为星。他对这些恒星绘制了赫罗图，发现它们绝大多数是红巨星，几乎没有主序星，它们同于太阳邻近的或疏散星团内的恒星，但跟球状星团内的恒星类似。于是他提出，像 M31 那样的星系中的恒星分属两个星族，称为星族 I 和星族 II。对于银河系情况也相同。巴德认为，银盘内的大多数恒星属于星族 I，银晕以及核球中的恒星主要属于星族 II。

■

通过对两类星族的恒星分别作赫罗图，发现它们之间的差异是很大的。O 型和 B 型星之类的十分年轻的恒星是星族 I 的成员，按质量计的重元素丰度达 1~2%。而星族 II 的恒星其丰度仅为前者的百分之一。这表明星族 I 恒星是在银河系早期诞生的恒星，它们的重元素丰度小，年龄至今已很老了。而星族 II 恒星是在后来形成的，由于一些老年恒星经过超新星爆发，使其演化过程中产生的重元素弥散在星际介质中，从而增加了新形成（星族 I）恒星的重元素丰度。可见星族的发现不仅为恒星的分类和研究其结构和演化提供了重要依据，而且也向着研究银河系和其他星系的结构和演化迈出了重要的一步。

63．银河系的年轮——银河系的次系

十分有趣甚至有些令人吃惊的是，恒星在星系中的轨道运动、位置及其年龄三者之间似乎存在着极其密切的联系：

（1）球状星团是我们银河系中最年长的成员，它们组成以星系核为中心的球状分布系统。其轨道速度很慢，轨道是偏心的，且与银道面相交的角度很大。

（2）O 型和 B 型星是最年轻的成员，它们组成几乎与银道面重合的极为扁平的系统。这两型恒星的轨道接近于圆形，轨道速度比其他类恒星都高。

（3）其他的恒星其性质在上面两种类型之间而在空间分布位置上也介于上述的球和扁平系统之间形成一个中介系统。

上述情况表明，银河系有些像树木一样保留着过去的“年轮”。最初，银河系处于由氢气云形成球状星团的年代，其形状颇像一个圆球，就和上述球状星团形成的系统形状十分相象。由于银河系的自旋（开始必定很慢）未形成恒星的气体加上一些较大质量的恒星形成超新星爆发后重新放回太空的气体逐渐被压成扁平，因此形成的第二代恒星就离银面较近且较球状为扁还具有较高的重元素丰度。而第三代恒星会比第二代更为甚之……

银河系中的三类分布形状的恒星所组成的系统也常被称为银河系的次系。

64．银河系中的星云——天体的“民间艺人”

在银河系中除了各种星团外还有大量星际物质，它们可以被分为三大类：亮星云，暗星云及它们之间的星际气体和埃尘。

亮星云可分成反射亮星云和发射亮星云。反射亮星云是靠它反射附近恒星的光而发光，其形状大都不规则，具有吸收光谱的特征，即许多吸收线重迭于一个连续谱上。反射星云的光谱与位于其中并照亮星云的恒星的光谱很相似。著名的反射星云有昴星团星云（NGC1432），仙王座星云（NGC7023）

和茧状星云（IC5146）等。发射星云其形状大小都不规则，而且往往没有明晰的边界，故又常称为漫发射星云。在这些星云中间通常都有一个或一团光谱型早于 B1 的高温恒星。这些恒星的丰富紫外线辐射使星云内的气体激发，从而产生光致电离而形成星云的发射线光谱。发射线星云中除了大量的炽热气体外还有少量的尘埃。近年来，通过射电观测，发现很多亮星云位于一个更大的暗星云中，如人马座大星云就包含有礁湖星云（M8），鹰星云（M16），欧米茄星云或称为马蹄星云（M17）和三叶星云（M20）。它们很可能就是恒星的胚胎。

在亮星云中还有一种通常所程的“行星状星云”（这个名称是不太妥当的）。这类星云中间有一颗温度很高的中心星。在已发现的 1500 个行星状星云中有少数形状像行星，一半以上如恒星。天文学家对其光谱作了广泛的研究。通过对谱线轮廓的分析可发现这类星云在膨胀。其典型膨胀速率值为 20 千米 / 秒。由行星状星云的大小可以估计星云从其中央开始被抛出的时间。很多观测证据表明行星状星云的中心星可能是白矮星。它说明行星状星云的出现正是恒星已进入晚年的象征。在银河系中，通过行星状星云进入星际空间的物质估计为 $5M_{\odot}$ / 年。

暗星云既不反射所嵌含的恒星的光，自身也不发光的气体云称暗星云。猎户座天区里的马头星云就是一个著名的例子，形似马头的这团黑乎乎的气体只不过是遮掩了背后的发射星云。有如我国民间的皮影戏。读者是否想到神秘的天空倒有这样多的“民间艺人”侨居！

星际气体和尘埃除了上面讨论的几种情况，如果还有暗黑无光的气体存在，那么人们又如何去发现它并肯定它的存在呢？有两种情况：如果星际物质中含有尘埃颗粒，则光线会由于颗粒的散射效应而红化；又若星际物质由气体组成，星光一通过它，恒星光谱中就会出现附加的吸收线。星际气体中的元素丰度和宇宙中元素丰度是一致的，以氢为最多，其次为氦，其他元素甚微。而星际尘埃中一般由以下物质组成：（1）水，氨，甲烷等的冰状物；（2）二氧化硅，硅酸镁，三氧化二铁等；（3）石墨晶粒；（4）上述三种物质的混合物。近些年还发现很多有机高分子化合物。因此人们对生命的起源也认为与星际介质有关。

丰富多彩的歌手营地

——星系

65．怎样从星云中识别星系

18 世纪后期，威廉·赫歇耳等天文学家在天空中发现了很多云雾状斑点的天体，他们称之为星云。他花费了很多时间作巡天观测，共记录了 2500 个雾状星云。1790 年他发现一个天体（NGC1514），中间有一颗星，四周是云，他称之为行星状星云。他发现了很多这类星云和弥漫星云。天体分光术的问世为云雾状天体的研究开辟了一条新途径。

对大量星云的本质，天文学家一直存在争论，其间涉及哲学问题。直至

本世纪初，用口径较大望远镜拍摄到许多更微弱的星云，其中很大一部分具有旋涡结构，这成了当时的热门课题。仅由旋涡结构甚至光谱分析都不足以揭示它们是河内还是河外天体之谜。1917年，威尔逊山天文台里奇在旋涡星云 NGC6946 的一张照片上偶然发现了一颗新星。在随后的两个月中，又在原有底片中找出了 11 颗新星。在一定的假定下确定出大量星云的距离远远超过了银河系的范围。但这些发现并没有使所有天文学家都相信它们是位于银河系外的。

1922 年，威尔逊山天文台的邓肯在 M31 中发现了一些变星。1923 年，哈勃用威尔逊山天文台当时世界最大的望远镜通过照相观测，将 M31 的外围部分分解为单个的恒星，并证认出其中的一颗是造父变星，接着在 M31 中又找到几颗造父变星。此外，在 M33 和 NGC6822 中也发现了一些这类变星。他利用周光关系，推出了 M31 的距离为 150 秒差距。虽然他采用的周光关系零点不精确，使定出的距离偏小，但确有力地由观测证实了“旋涡星云”确实是银河系外的与银河系同类的恒星系统，并把它们称为星系，结束了上面介绍的争论。

星系的发现是人类对于宇宙认识上的一个新的飞跃。

66. 星系的千姿百态——星系的分类

星系一旦被发现后，通过望远镜一下子就能观测到很多。望远镜口径越大，能看到的数目越多。现在已观测到的星系的数目达十亿的量级。面对这样众多的星系，自然的想法是要寻求某种分类，几十年来，对星系已建立了几种分类系统，其中流行最广的是哈勃的分类。哈勃是星系天文学的开拓者，他从大量星系的形态特征出发，把星系分成椭圆星系，旋涡星系和不规则星系三大类，旋涡星系又分成正常旋涡星系和棒旋星系。又按星系中核球相对于扁盘的大小旋臂的特征，旋臂或扁盘分解成星和 H 区的程度等，每一类又分成若干个次型。

根本上说，哈勃系统是一种形态分类法，他是直接以观测为依据的，切实可行而又稳定不变，因此被广泛采用。而形态的特征往往又反映了星系的形成和演化特征。如，核相对于扁盘的大小可能同星系前身的角动量分布有关，也同早期恒星的形成时标有关。而旋臂的特征，则可能同星系的目前的生成率有关。

星系的研究中，也常按其他一些特征进行分类。如，互扰星系，特殊星系，活动星系，活动星系核等。这些都是星系天文学中的前沿课题。

星系的尺度和质量的大小往往都与形态有关。下表表示了三类星系的尺度范围：

类型/尺度/质量/注

圆星系/3 千光年 ~ 15 万光年//

超巨星系// $5 \times 10^{11} \sim 10^{13} M_{\odot}$ /

巨星系// $10^{10} \sim 5 \times 10^{11} M_{\odot}$ /

中等星系// $10^8 \sim 10^{10} M_{\odot}$ /

矮星系// $10^5 \sim 10^8 M_{\odot}$ /

旋涡星系/2 万光年 ~ 15 万光年/ $10^8 \sim 10^{13} M_{\odot}$ /棒旋星系相仿

不规则星系/2 ~ 3 千光年 ~ 2 ~ 3 万光年/ $10^8 \sim 5 \times 10^{11} M_{\odot}$ /

67. 星系的红移

在天文观测中，测量一个发光天体沿着视线方向的运动，远比测量它垂

直于视向的运动精确得多，其原因就在于光的多普勒效应。前面的介绍中很多地方都涉及多普勒效应的问题。可见其在天文学的观测和理论中所起的重要作用。

当我们观测从一个固定源发射的光波时，到达我们仪表的两个波峰之间的时间间隔，等于它们离开发射源的间隔。但是，当发射源是离开我们而运动时，相继的两个波峰之间的抵达时间间隔，便要比它离开发射源时的时间间隔增大了，因为每一个波峰都要比前一个波峰多走一点路程，才能到达我们这里。波峰之间的时间间隔等于波长除以波速。因此，我们会觉得，从一个离开我们而运动着的光源发出的波的波长，要比这个发射源静止时所发射的要长些（具体地说，波长的相对增长等于光源的运动速度和光速之比值）。同样地，假如光源朝向我们移动，两个波峰到达的时间间隔将会缩短，因为每个波峰都要比前一个波峰走的路程短些。这好像一个旅行者在他的旅途中每一周都定期地发一封家信，当他的旅程是离家而去时，每封信都比前一封信的邮程长一些，因此，他的家收到的每两封信相隔的时间将要超过一周；而当他的旅程是向家而来时，每一封信的邮程都比上一封短一些，于是他的家里不到一周便可收到一封信了。

对于可见光而言，当光的波长增加其颜色向红端移动，因此称为“红移”，当然，相反的过程称为蓝移，但由于天体中更多的是红移现象，故常把两种情况通称为红移，而蓝移就用负的数值表示之。

还在河外星系的存在尚未被最后确认的 1910 ~ 1920 的十年期间，洛威尔天文台的斯莱弗发现许多星云的谱线稍微地向蓝或向红移动，这些移动可以直接地应用多普勒效应解释为这些星云在朝向地球或离开地球运动。例如，发现仙女座星云以约 300 公里 / 秒的速度朝向地球运动，而更遥远的室女座星系团却以约 1000 公里 / 秒的速度背向地球飞驰。

最初以为，这可能只不过是反映了太阳系朝着某些星系和离开某些星系运动的相对速度。随后发现了许多愈来愈大的而且都是红向的频移，这个解释便难以成立了。因为除了几个近邻如仙女座星云等以外，其他星系都是飞驰着离开我们而去的。当然，这绝不是说我们的银河系处于任何特殊的中心位置，而是表明宇宙是处在某种膨胀之中，每个星系都奔离其他每个星系。

68. 星系距离的确定

本书开始就介绍了天体距离的测量，也许读者会觉得这实在是很简单的事。而实际上在天文学上测定各类天体的距离是一项既基本又艰巨的工作。河外星系的存在最后是靠距离的测定而证实的，而要确定天体的一系列的物理参量无不与距离有关。

在哈勃定律发现前确定星系距离的方法只能采用光度距离法和视角径法。但后者又需有星系尺度大小的知识。因此，有效的方法只能是光度法。这就要求我们用各种方法去寻找标准烛光。在哈勃的工作中用的是造父变星，后来巴德指出了哈勃工作中由于经典造父变星零点的错误指使确定的距离小了一倍。而随距离的改进又使 M31 中的和银河系中的球状星团的光度十分接近。后来又发现，经典造父变星光变周期的差异，使哈勃常数的数值大为减小。实际上，一些更复杂的因素，如星际尘埃的消光等效应都会影响距离的确定。除这些因素外，由于变星的绝对光度的限制，使处于更远的变星不可能再被观测到，因此，也就限制了它所能确定的最远距离。如，RR 型变星在像仙女座星系和 M33 中就不可能再被观到。于是人们基于某些特定的假

设逐步寻找更亮的标准烛光，把天文观测可能确定的距离一步步推向更远。

十颗最亮的恒星一种最自然的做法是估计给定星系里的最亮恒星的光度。假定每一个星系里的最亮的恒星都具有大致一样的光度。而这一亮度可以对银河系里的恒星以及对邻近的距离已知的星系中的最亮恒星的研究估计出来。然后再根据观测到的待测星系中最亮恒星的视光度就可估计该星系的距离。这样可将可测定的星系距离推进了一步。

最亮的球状星团由于每个球状星团包含了数以千计的恒星，因此它比比最亮的恒星还要亮得多。因此，用它作标准烛光来估计星系距离必定将它推向一个新的深度。

超新星。一个超新星的爆发能达数亿个太阳的光度，因此，用它作为标准烛光来确定星系的距离是相当有效的。不过为提高距离的精确度必须对超新星作严格的分类，以使所用样品的光度离散最小。

十颗最亮的星系星系又组成更大的结构层次的事实启示天文学家尝试用星系本身作为距离的“量天尺”。如果假定星系团中的最亮星系有大致相同的大小和光度，则它们也可以作为标准烛光，把可推断的天体距离推向一个更大的深度。

上面的叙述或许会使一些读者感到吃惊，甚至会觉得天文学家的作法太任意和缺少依据了。实际上天文学的这种作法是完全符合科学的认识论的，即对于事物的认识总是从无知到知，从粗略的了解到较细的及较精确的了解。如果没有当初的粗略的认识就难于达到后来的精确的认识，而天文学的发展史告诉我们甚至可以说是根本不可能再有后来的认识。开普勒正是因为用的是第谷当年的低精度观测资料，才得到了行星运动的开普勒三定律。如果他所知道的行星轨道像我们今天所知道的这么精确，那么可能他永远也解释不了行星运动。观测的不精确性导致了一个重要事实的发现，在科学史上是经常发生的。而相反的例子也不少：即由于实验资料十分丰富，使得一些简单关系的发现变得困难得多，从而被明显地推迟了。物理学的发展中关于光谱规律性的发现就是如此。下面的哈勃定律也是仅用了 24 个天体得到的。如果把今天已观测到的亿计的星系和近万的类星体和活动星系核的资料给他，那么哈勃也许和一些天文学家同样不仅得不出哈勃定律，而且怀疑已得到的定律的正确性。

69．什么是哈勃定律

上面我们已介绍了河外星系的发现及其红移和距离的观测。至 1929 年哈勃已有 46 个河外星系（当时还称“星云”）的视向速度可资利用，但是已推算出距离的却只有 24 个。

表中的数据表征了距离与速度之间的线性相关，无论速度是直接采用的，还是对原先的结果作了太阳运动的改正，都存在着这种相关。这暗示太阳运动有一个新的解，其中距离作为 K （今天为了纪念哈勃大家称 K 为哈勃常数并用 H 表示之）项的系数而引入，也就是说，假定速度正比于距离而变化；因此 K 代表在单位距离处由于这一效应而引起的速度。哈勃由上表的数据得到：

$$rK=v, K=513 \pm 60 \text{ (公里/秒, 百万秒差距)}。$$

这就是著名的哈勃定律。

哈勃定律有着极深远的意义。1930 年爱丁顿把红移看成是由爱因斯坦的广义相对论中的引力场方程解出的非静态宇宙的膨胀效应。于是，哈勃定律

便提供了宇宙膨胀的观测证据。这点我们后面再专门讨论。从相反的角度考虑，如果我们承认了哈勃的发现，即承认天的谱线红移是由于某种与其距离有关的效应引起的，那么我们可以用比较简单的天体谱线频移的测定，从一个非常遥远的天体的退行速度去判断它们的距离。这样一来，我们又得到了一个新的“量天尺”。

70．哈勃常数的确定及其意义

在上面的哈勃关系中，有一个重要的比例常数 K ，现在称为哈勃常数并改用 H 表示。上面看到，哈勃给出的数值为 513 ± 60 公里 / 秒。百万秒差距。1931 年，哈勃又和哈马逊第二次测定 H 为 558，后又订正为 526。

哈勃确定 H 时，采用了造父变星和星系中的最亮恒星作为标准烛光来标定距离。1952 年巴德指出，仙女星系中造父变星的星等零点应变动 1.5 等，于是哈勃常数应修订为 $H=260$ 。1958 年桑德奇指出，哈勃所谓的最亮星实际上位于电离氢区，因此要加上 1.8 等的星等改正，从而将哈勃常数降低为 $H=75$ 。1974—1976 年间，桑德奇和塔曼又用七种距离指标的方法重新修订哈勃常数，得 $H=55$ ，只及哈勃当年测定的十分之一。这一方面意味着按哈勃定律推算星系的距离，用 H 的新修订值所得的结果比哈勃当年所得的距离增大了 10 倍，大大扩展了我们所观测到的宇宙空间的尺度。另一方面也给出了宇宙的合理的年龄。

由于得到精确的哈勃常数具有根本性的意义，故从 70 年代以来，许多天文学家用了多种不同方法来测定 H ，各家所得的结果很不一致，有代表性的有四种，

哈勃常数测定值的分歧在于用不同的距离指标给出的距离模数不同。除观测的系统误差，随机误差和银河系内距离指标的标定的不确定性等外在因素外，还有内在的原因。例如，不同星系间由于化学成分，年龄，演化经历不同，距离指标和绝对星等之间的关系就不会完全一样。

在相对论宇宙学中，按标准宇宙模型哈勃常数描述的是宇宙尺度因子的相对变化率，它是随宇宙时而在变化着的参量，故通常表为 $H(t)$ 。而天文学中所测得的哈勃常数乃是宇宙今天的相对膨胀率并表示为 $H_0=H(t_0)$ 。 t_0 表示今天的时间。

哈勃常数测定的不确定性不仅造成天体大尺度距离的不确定性，还影响宇宙年龄的不确定性。实际上，它将影响宇宙学中的一系列描述宇宙特征的物理量的确定。为了在宇宙学中避免为此带来的附加申明常令 $H_0=100 \times h_0$ ，而 $0 \leq h_0 \leq 1$ 。所以很多宇宙学的参量中往往带有与 h_0 有关的符号。

遥远而活跃的星星乐团

——剧烈变化的星系核

71．天体中的丑小鸭——蝎虎天体的发现

在星系中活动现象种类繁多，其中有一类称为活动星系核的引起了天文学家的广泛兴趣，成为当前天体物理最活跃的领域。

蝎虎座 BL Lac 早就知道是一颗亮度变化的“恒星”而被列入了变星表。虽然它是一颗极不规则的变星，增亮、变暗没有明显的规律。但不规则的变星实在太多，因此也并不引人注目。1968 年，施米特注意到有一个射电源与

之在同一位置。这才引起光谱天文学家的兴趣，他们把望远镜对准了这颗“射电星”，想看看它有甚么样的光谱。出人意外的而有点令人失望的是，它的光谱竟然没有什么结构。既没有发射线，也没有大部分恒星光谱中出现的那些吸收线，虽然有几颗白矮星的光谱也没有什么结构，但它们亮度并不变化。后来人们又发现了另外有四个天体，也都同 BLLac 类似。

1974 年，有一些人开始注意到 BLLac 并不完全像一颗恒星，在它中心点源周围有些模模糊糊的绒毛状东西。但当人们挡住核心部分来的光线，并对绒毛状天体作光谱，结果发现，它是一个正常椭圆星系的光谱，有两条吸收线，红移为 0.07。按哈勃定律所确立的距离尺标，BLLac 离开我们竟有 420 万秒差距。

由 BLLac 的距离，可以得到它的核最亮时的光度为 10^{46} 耳格/秒。这个曾被认作是我们银河系里的一颗暗弱变星的天体，实际上却是一个辐射功率比太阳大数亿倍的非常遥远的星系。真像安徒生童话里的“丑小鸭”。不过，如果按质量或大小而言，天鹅和野鸭之间不过是成倍的变化，而这里确是亿倍甚至更大的变化。要证实这个结论当然不能只作一次观测就算了。天文学家作了大量的反复观测认证了这个结果。后来在其他一些 BLLac 天体上也发现相同性质的情况。这说明天文学家在这里发现的是整个一类具有共同特性的天体，因此，把蝎虎座 BL 型天体看着核非常亮的星系是正确的。

蝎虎座 BL 型天体的光变几乎都很剧烈，在几个月左右光变可达 10 倍之多。有些蝎虎座 BL 型天体相当亮，用中小望远镜就可以观测到它的光变。像这样的光变需要逐夜地监视。大望远镜通常被用于观测一些更吸引天文学家的一些暗源。因此，对 BL 型天体的光变的长期监测正好是中小望远镜发挥作用的地方。我国天文学家云南天文台的谢光中正是利用了云南天文台的一米望远镜，观测到了很多 BLLac 天体的短时标光变（光变周期为几天，几小时，甚至几十分钟）的这类天体，为进一步认识 BLLac 天体的本质及其在宇宙学中的意义做了很多好工作。

72. 赛福特星系的发现

1943 年美国天文学家赛福特发现了六个旋涡星系光谱中有异常的发射线，大量观测表明了它们是一类特殊的天体，现称为赛福特星系，至今已观测到了一百多个。

赛福特星系有一个很亮的核。通常用照相观测时，一分钟的曝光就足以显示出核，但要显示出基底星系却需要曝光十分钟。因此，在短时间曝光的底片上赛福特星系易被误认为是恒星。

属于赛福特次型的 N 型星系的光谱中有一系列的发射线，其中至少有一部分发射线很宽。按其发射线的宽度，赛福特星系又可分成两个次型：

(1) 型：氢的巴耳末线很宽，其他元素的谱线较窄。

(2) 型：氢的巴耳末线与其他元素的谱线差不多宽，但比 型的巴耳末线窄。

宽发射线表明，产生这些线的气体云以很快的速度作无规则运动。当产生发射线的那些光子离开气体云时，其中那些朝向我们运动的云产生的光子向蓝端移动，而远离我们运动的云产生的光子则向红端移动，结果便形成了一条展宽了的发射线。天文学家正好利用他们所观测到的发射线的平均宽度来估计气体云的随机运动速度。型赛福特星系的巴耳末线的平均宽度等价于 3400 千米/秒的速度。而 型的所有谱线以及 型中除氢谱线外的其他

谱线宽度跟速度 500 ~ 1000 千米 / 秒相当。

理论上说，赛福特星系的巴耳末发射线是氢离子与电子复合时经过由较高能态逐渐向较低能态跃迁直至到基态的级联跃迁产生的。很宽的巴耳末线在星系核内形成，那里的电离气体的质量应为 $10 \sim 1000 M_{\odot}$ 的量级。密度 $10^{13} \sim 10^{15}$ 个离子 / 米³；窄的发射线大概由核周围密度和速度均较低的气体产生。致使气体电离并获得高速度的能源还不清楚，应在星系核内，1000 千米 / 秒量级的速度很可能是由激烈的爆发引起。

赛福特星系从射电到光学波段的连续辐射谱不单纯是由大量恒星光谱的复合。分析表明，射电辐射具有非热的同步加速辐射的性质；红外辐射大部分来自被星系核的光学和紫外辐射加热的尘埃的再辐射，一小部分可能是同步加速辐射的贡献；在光学波段连续谱主要是恒星热辐射谱的复合，但也有非热辐射成分。连续辐射的总功率为 $10^{37} \sim 10^{38}$ 瓦，约相当于 $10^{11} L_{\odot}$ 。这类星系的亮度常有不大的变化，变化时标从一个月到一年，当连续谱发生变化时，发射线却保持不变。这表示产生非热连续辐射的区域比产生发射线的区域要小得多。

从上面的一段叙述读者可以进一步体会天文学家如何利用他所取得的关于天体的“乐曲节奏”去猜测天体内部的深情。

73. 类星体的发现和数以千计的类星体的启示

自 1947 年第一次在天空发现了射电源之后，射电天文学便表现突飞猛进的形势。不久这类天体就数以千计地被发现。射电天文学家当时的一个努力目标是，将已观测到的那些射电源和用光学观测到的天体加以对应的证认。最初由于射电望远镜的分辨本领差，而可对应的光学天体又很暗弱，在其可能达到的精度范围内，一个射电源有不少暗星可能作为它的对应目标。射电阵的出现，使射电源的方位测定有了很大的改进，证认工作日趋完善。以致方位经过精密测定的射电源，其中 80% 以上都可以和帕洛马山五米口径望远镜所拍照的暗弱天体相对应。射电天文观测技术的改进，为人们在宇宙里开辟了许多新的境界，但最奇特而又没预料到的，是“类星体”的发现。这些遥远的天体表现在照片上，一般是 16 至 18 等的蓝色小星点，但是经过研究后才明白，它们是宇宙中发射能量最多的天体。比正常星系小得多，但却明亮一百多倍。它们发光的寿命可能很短暂，而且亮度有不规则的变化。它们物理性质的极端情况，是以前没遇见过的。

类星体的观测须用灵敏度很高的射电望远镜。它们的方位和强度已经发表在几个射电星表内，最完善的一个是《剑桥射电源第三星表》（简称 3C 表，后又修订为 4C 表），表的制订者用了很多巧妙的方法，使大量射电源有很精确的方位。它给天文学家以极大方便，可在这些区域的照片上对这些射电源加以光学的证认。

所谓类星体并不是和一般正常星系对应的射电源。天文学家发现的第一个类星体是 3C48，在照片上它是一颗微弱的星点（16.2 等），周围有一点儿暗淡的星云气，因而绝不像是一个星系。它的光谱有很特殊的性质：在很强的连续背景上，重合有几条强而宽的发射谱线。由光度观测得知，这个类星体的颜色异常之蓝，发射大量的紫外波。这光谱与爆后的新星的光谱相似，但与正常恒星的光谱大不相同。天文学家想尽了办法试图分解类星体的组织成分，但没有得到成功。

面对拍得的 3C48 的光谱，天文学家起初没有办法去证认其中的谱线。后

来有人想到，如果认为 3C48 的谱线有很大的红移，便可以使它和行星状星云的谱线对应起来。进一步研究发现 3C49 的谱线的红移值达 0.357。证认方法一旦确定后，天文学家很快就找出几十个这样的天体。迄今为止已有七千多个类星体列入星表。我国天文学家何香涛教授和黄克谅教授都有一套识别类星体的好方法。他们在类星体的观测证认中做出了较大贡献。

类星体的一个重要和十分显著的特征是它们有特别大的红移量。而且在不同红移段的相同的红移间隔中所据有的类星体数目的多少显示出了某种周期性。早在 1969 年前伯比奇等就利用当时观测到的 151 个类星体得到了类星体计数的每个相对丰值所对应的红移值 z 满足关系：

$$\ln(1+z) = 0.205n + B$$

其中 n 为自然数， B 为一常数，它与所选的样品有关。到 1980 年类星体已观测到了 1549 个，而这个关系仍然成立。这是一个使天文学家十分棘手的问题。1980 年底，中国科学技术大学研究生院的刘永镇教授和本书作者提出了宇宙密度扰动波的概念，我们认为，在宇宙演化到氢原子复合前夕，临界稳定性附近的物质密度扰动有可能引起有观测意义的宇宙的物质密度扰动波。形象地说，一个巨大的扰动形成一个在整个宇宙内传播的声波。由于这是宇宙演化过程中星系形成的时期。因此，如果星系是在宇宙密度扰动波背景下形成的，那么周期变化的波腹和波谷自然地给出了物质密度（从而也就是天体的数目）的周期变化。利用标准宇宙模型可得到与观测一致的结果。这个工作不仅解释了上述的棘手问题，还提出了研究宇宙大尺度结构的有效方法。后来方励之和日本天文学家佐藤文隆利用宇宙的多连通性来解释类星体计数的多周期现象。他们认为，如果宇宙在拓扑结构上是多连通的，则一个光源发出的光可能通过几条光程不同的测地线传到观测者，于是，同一个天体可观测到红移不同的几个“鬼像”。而类星体的红移和计数间的关系恰好是宇宙多连通性的观测证据。他们发表在中国的《天文学报》上的文章获得 1985 年度的国际引力学会颁发的引力奖的一等奖。中国科学技术大学的褚耀泉教授和朱杏芬教授等在类星体红移计数的周期性方面做了大量的工作。

类星体的吸收线是类星体光谱的一个十分突出的特征。几乎所有类星体的光谱中都有裂缝，这表示在这些波长处发出的光子要少一些。几乎在所有情况下类星体光谱中的红移总是小于发射线红移（有很少情况略大于发射线红移）。除与发射线红移相差不大的吸收线可能产生与类星体自身周围的气体云外，所有的吸收线产生于类星体与地球间的插入气体云。因此，类星体吸收线的研究将提供星系际介质的重要信息。关于类星体吸收线的 $H\alpha$ —森林的研究，北京天文台的陈建生院士、邹振隆教授和卞毓麟教授等做过很多好工作。

星星乐团的各种联合

——星系群，星系团和超星系团

74. 星系的空间分布

星系在天球上的分布远不是均匀的。表观观测上它们大多数分布在高银纬的天区，在银道附近几乎看不到它们的踪影，故此天区有隐带之称。其实，

在隐带方向并非不存在星系，只不过是银河系内集聚在银道面附近的星际尘埃把它们遮住了。

用统计方法分析星系的分布，发现它们有集结成大小不同的系统的倾向。孤立的星系只是极少数，多数星系是双重星系和多重星系的成员。多重星系由几个彼此靠近，有物理联系的星系组成。比多重星系更大的系统有星系群，星系团和超星系团。

星系群由 10 个至几十个星系组成，结构较松散。据对银河系周围 31 兆秒差距范围以内的统计，大约有 54 个星系群。其直径介于 0.3~2.5 兆秒差距之间，其中心之间的平均距离为 7 兆秒差距。星系群的形状颇不规则，每一个星系群内大质量的主要星系一般是旋涡星系。比星系群更大的系统是星系团，它是由几百或几千个星系组成的，其平均直径为几兆秒差距；超星系团是现在已知的最大的星系系统，也是宇宙中迄今已知的最大的物质成团结构。超星系团的成员星系团数最少为 2~3 个，一般在 5~10 个之间。已发现的 50 个超星系团的成员数大多为 10 个或 11 个，最大的拥有 29 个成员星系。超星系团的平均直径为 2×10^8 光年，总质量高达 $10^{15} \sim 10^{17} M_{\odot}$ 。观测表明，星系团有沿长条形链排列的倾向，而为数众多的星系则作片状分布，于是我们得到所谓的宇宙的分格结构：在尺度为 3×10^8 光年数量级的立体格子内部没有或只有很少星系，大量的星系位于格面上，沿格棱的星系数目增多，在格子顶点处星系更为密集。

我们的银河系也不是一个孤立的星系，它跟南天的大、小麦哲伦云一起组成了三重星系，而它们又同属一个星系群，称本星系群，其成员都是银河系的近邻。本超星系团是一个长径为 10^8 光年，厚度为 6×10^6 光年的扁平状天体系统。

宇宙在小于超星系团的尺度内是有结构从而也就是不均匀的；但在更大尺度的空间里，星系的分布才呈现出均匀性和各向同性。

75. 关于星系团

星系团是天文学研究中的一个十分重要的层次。对于它的研究不仅能揭示星系团的整体及单个成员的天体物理性质，而且对星系和宇宙学的研究也有重大影响。因此，多年来它一直是天文学和天体物理学研究中的重要课题之一。主要研究内容包括星系团表、星系团成员的确定、光度函数、质量和动力学问题。

由于在各种差别相当大的角径范围内都有星系成团的现象发生，而团成员的星系数目相差也很大，因此很难对星系团给出一个唯一明确的定义。通常的研究者只能按星系团表。各种星系团表制订所依据的共同原则是：星系团是一个星系密度比较高的区域，如果某天区内星系的平均面密度为 δ_0 ，而星系团区的面密度为 δ ，则 $\langle \delta / \delta_0 \rangle \geq N$ ，要求 N 为大于 1 的数。此外还有下面三个原则：（1）规定一个线度或角度范围，以防止星系多重系误为星系团；（2）规定一个星等范围，以排除大量暗星系；（3）规定一个红移或距离范围，以保证所选定的对象确在一个有限的三维空间范围。目前被应用得最广泛的星系团表是 Abell 和 Zwicky 星系团表。

在星系团的研究中一个十分重要但至今尚未解决的问题是星系团的质量短缺问题。团的总质量可由维里定理，或由团内星系的观测空间分布及速度分布与理论模型的比较，以及由团际引潮力作用来求得。这三种方法所得的结果是比较一致的。由此确定星系团的质量一般都在 $10^5 M_{\odot}$ 量级。而按星系团

的质光比的分析表明，星系发光部分的质量仅占团总质量的 10%。从 X 射线观测也表明团中热气体的质量仅占总质量的 10% 左右，这就出现了质量短缺问题。这个问题和整个宇宙中的质量短缺问题是一致的。它显示宇宙中大量的暗物质的存在。

一般认为暗物质并不束缚在团星系中，这是因为星系的两体弛豫作用正比于星系质量，如果短缺质量束缚于单个星系中并与它们的亮度成正比，则质量分层效应将非常显著，而观测中并未发现此类现象。推测这种短缺质量可能以连续占据整个团空间的形式存在，但其分布是与团中星系的分布是相类似的。

76．星系际物质和宇宙巨洞

存在于星系与星系间的气体和尘埃称为星系际物质。它们有的聚集于两个相互邻近的星系之间，构成星系之间的物质桥；有的位于星系团内，成为星系团暗物质的一部分。有的更位于星系团之间，形成星系团际物质。星系际物质的气体成分可能是中性气体，也可能是电离气体。星系际物质也和星际物质一样具有消光效应。在一些星系际物质较密集的地方也可能形成星系际暗云。目前已发现几个可能是星系际暗云的天区。星系际物质的研究与宇宙学和星系演化的研究有极密切的关系。宇宙的总质量密度对宇宙演化的最后结局有直接的影响，而星系际物质对宇宙的总物质密度的贡献是不容忽略的。在星系的演化中，一些扰动星系可以抛出物质进入星系际空间，形成星系际物质。星系际物质也可能被正常星系吸收，或形成新的星系。星系际物质的平均密度约为 2×10^{-34} 克 / 厘米³ (在一般空间) 到 5×10^{-30} 克 / 厘米³ (在星系团中心附近) 之间。

另一方面，由星系团形成超星系团时，其形状和尺度大小就更不确定了。它和我们所划分的其他各类团如太阳系、银河系或其他星系及星系团不同，它们都是孤立宇宙空间的体系，即物质集中在中心区域附近，周围是空的空间。而超星系团间是分不清的，物质分布是网状的，周围空间反被这些“网”包围成一个一个的“洞”了，天文学家称之为空洞或称宇宙巨洞。

乐团间的离心倾向

——宇宙正在膨胀

77．哈勃定律的宇宙学意义

前面我们介绍了哈勃定律，它说明了天文学家所观测到的河外天体所发射的光谱线的谱线红移与该天体离开我们的距离成正比。面对这一发现，人们首先要追究的是：天体的谱线红移是怎么产生的？人类目前已完全肯定的红移机制只有两种：即多普勒红移和引力红移。观测事实不能支持哈勃关系表述的是引力红移。1930 年，爱丁顿把红移看成是动态宇宙的膨胀效应，于是，哈勃定律便提供了宇宙正在膨胀的观测证据。

宇宙正在膨胀，所有河外天体以正比于其距离的速度远离我们而去。人们的第一个印象是一种不自觉的惊讶：为什么所有其他天体恰好都是远离我们而去？这不正是我们是处于宇宙中心的观测证据吗？

为理解这个问题，我们得先理解什么是平面和什么是直线？也许会有读者向我抗议了：“你也太小看我们了，难道我这点还不明白吗？”但我想抗

议之后再冷静一想或许真回答不出来。会做木工活的人会说，鲁班发明的墨斗就给出了直线。但由于地球的引力作用它给出的实际上是一条悬链线，有如过江的电缆线。那光可是走直线的！但爱因斯坦的广义相对论的一个重要的理论预言并由爱丁顿通过日全食时的观测加以证实的正是说明光在引力场中走的是曲线。“两点之间引一条直线！这可是几何学中的一个公理。”该不会再有问题了吧！其实问题就出在这里。我们生活在地球上很习惯于两个东西：即“水平泡”和“铅垂线”。建筑师在修建房屋时用它们检查地基是否水平或墙壁是否铅直是十分有效的。但读者是否想过，假如风平浪静，我们在海面上一个个的小块地区作水平面，如果我们从我国的海岸面一直作到美国，那么我们会发现，我们努力作出的“水平面”竟是一个“球面”的一部分。不难想象，如果我们在地球的赤道线上向北作两条垂直于赤道的直线，并按水平面上的方式不断延伸，不难看出这两条线会相交于北极极点。于是我们可以得出几条令人吃惊的结论：（1）在地平面上过直线外一点不能引一条直线与原直线平行，但过地面上的适当两点（如两个极点）可以引无数条直线（即子午线）。（2）地球表面上的一个三角形其三个内角的和大于两个直角（即 180° ）。这些事实告诉我们，我们日常经验得到的一些直观常识往往是靠不住的。甚至像欧几里德几何这一类知识在地球表面上也只能是在一个足够小的区域内近似成立的，而一般情况下遵从的是球面几何关系。那么，我们有什么理由相信欧几里德几何可以无条件地用到宇宙空间呢？

设想有一束极强而又准直的激光，它可局部地沿“直线”向前无限地传播。那么在足够大的范围这束光的轨道是什么？难道它不可能是“曲线”甚至是“闭合曲线”吗？如果果真如此，那么我们如果用局部构成平面的很多的这种激光束同时向前传播，那么这些光束的轨道在大范围内就会是一个球面的部分（甚至就是一个球面）。

天文学家认为，我们今天观测到的宇宙就是这种情况。我们今天所看到的星系就好像钉在一个气球表面的小点。当气球膨胀时，这些点就四散分开。这时，球面上的任何一点都会看见所有其他点都在离开自己退行，而且相对距离越远的退行的速度也越大，正像哈勃定律所描述的那样。可见，宇宙膨胀的观测事实并不带来人类及其所在环境的特殊地位。

从理论上讲，哈勃定律只适用于红移足够小于1的情况，对于大红移的情况应利用严格的宇宙模型所推出的红移公式。在标准宇宙模型下，哈勃常数是宇宙模型中尺度因子的相对膨胀率，它是随时间变化的参量。通常我们说的哈勃常数值是指今天的“瞬时值”，并用 H_0 表示之。

哈勃常数的倒数是一个与宇宙年龄有关的数值，宇宙年龄的确定还与宇宙常数因子 Λ_0 和减速因子 q_0 有关。宇宙年龄除了在宇宙学中通过对 H_0 的观测确定外，我们还可以通过别的方法来间接估计宇宙年龄或对其做出某种限制。如，通过地球上存在的放射性元素中有关同位素的丰度比确定的地球年龄，以及通过恒星、球状星团的演化理论确定的恒星（特别是太阳）和球状星团的年龄应小于宇宙年龄。哈勃最初确定的 $H_0=500$ 公里/秒。百万秒差距就太大，以至使计算的宇宙年龄竟小于地球和太阳系的年龄，这当然不能为人们所接受。当前的哈勃常数比当初小了十倍，已无年龄矛盾。现在，天文学家倾向于把宇宙年龄订为 130 亿年（最大的估计为 200 亿年）。

上面我们已介绍了哈勃常数的确定及其宇宙学的意义，我们应该能感受到常数确定的艰巨，如果理论上没有新的见解，或观测手段上没有实质性的

突破，当人们宣称他们得到了什么实质性的新结果，一般是不足信的。

78．什么是宇宙学原理

当读者看到这里，我猜想我已跟我一起欣赏了一大段天体交响曲。或许你还从中得到了某种满足。这里我们不涉及本书的好或坏，而是想讨论另外一个问题：即你为什么能从书或别人的某种表述中获得与作者或表述者相同的感受，甚至达到某种共鸣？

不难理解，人类的任何知识都只能是通过个别人去感受并将自己的感受用语言或文字表述出来。当听众或读者得到这些表述后，他或者过去曾有过相同感受，于是引起同感或共鸣。如果他过去并没有过这类经历，那么作者的表述或许会促使他按表述者所指出的同样方式去感受，从而得到与表述者的同感或共鸣。我相信你一定有过这种经历。但你从没感到某种惊奇吗？为什么可能处于完全不同环境和不同状态的人，会对事物得到完全相同的感受和认识？科学家却从反面来理解这个问题，并相信：人们（观测者）对客观事物的认识（观测）不受其所处状态的不同而变化。

人们现在更一般地认为，在任何给定时刻，位于任何典型星系的观测者向各个方向看到的宇宙都是一样的。（这里指的“典型”是指那些本身除了随宇宙的整体运动外没有大的特殊运动的星系。）这个假设是如此的自然，以致人们把它称为“宇宙学原理”。它是人类研究宇宙学的基本出发点。宇宙学原理可以用不同的语言表述。如：

宇宙中没有任何一点具有优越性，所有位置都是平权的。宇宙学原理也常称为哥白尼原理或宇宙平庸原理。应用到星系本身时，这个原理要求一个观测者无论在哪一个典型星系上所看到的其他星系都以同样方式运动。直接的数学表示就是，任何两个星系的相对运动速度都必然正比于它们之间的距离，这正好是哈勃所发现的。

用数学语言来表述宇宙学原理则可说：宇宙在任何时刻，其物质的空间分布是均匀的和各向同性的。长期来人们往往习惯于把宇宙学原理称为“假设”，认为是为便于数学处理而做的某种简化。但 1990 年 COBE 卫星对 3K 微波背景辐射的观测结果已使这个假设成为了受到观测支持的客观事实。天文学家目前公认的标准宇宙模型所采用的罗伯逊—沃尔克度规就是他的数学描述。

79．各种可能的宇宙模型

爱因斯坦的广义相对论是研究宇宙学的理论“武器”。在宇宙学原理要求下建立的场方程，得到的解理论上都可建立一个宇宙模型。人们把各种可能的解析解，利用李代数加以表示，按其结构常数的特征进行分类。可分为均匀和各向同性的宇宙及均匀和非各向同性的宇宙。虽然大多数天文学家采用了均匀和各向同性的“标准宇宙”模型，但在研究宇宙极早期的某些不对称性质时人们也常求救于一些特殊的非各向同性甚至是非均匀的宇宙模型。

即便在标准宇宙模型下，由于参数的不同也使宇宙将显示出截然不同的性质。标志宇宙特征的尺度因子 $R(t)$ 可以是随时间增胀的，此时的宇宙称为是膨胀的；反之，如果 $R(t)$ 随时间减小则是收缩的宇宙；如果 R 与时间无关，即它保持常数不变则称稳恒态宇宙。必须指出，理论只可能给出各种可能性，而不可能在其间做出决断。只有天文观测才能给宇宙的实际状态从各种可能性中做出最后的裁决。这正是哈勃定律的巨大功绩。

80．开宇宙，闭宇宙和临界宇宙

在标准宇宙模型中对于目前的膨胀宇宙按其演化前景也可分为三种情况：如果宇宙始终不断地膨胀下去“永不回头”这称为开放宇宙；如果宇宙膨胀速度慢慢地减小以至为零甚至转为收缩，这称为封闭宇宙；当宇宙恰好处于二者的中间状态时，称为临界宇宙。同样，它们只能通过天文观测来做最后决断。可能的观测方法是：

几何学方法 通过哈勃图或天体的视角径红移图来确定减速因子 q_0 其数值大小决定了宇宙性质：

<0.5 开放宇宙；

$=0.5$ 临界宇宙；

>0.5 封闭宇宙。

动力学方法：通过对一定天区中物质运动速度的观测，确定该天区的引力势的大小，从而确定该天区的平均物质密度。并利用很多天区的统计结果确定整个宇宙当前的平均物质密度 ρ_0 ，它与宇宙的临界物质密度 ρ_c 之比 $\Omega_0 (= \rho_0 / \rho_c)$ 其数值确定了宇宙的性质：

<1 开放宇宙；

$=1$ 临界宇宙；

>1 封闭宇宙。

图 29 表示了三类宇宙的尺度因子 $R(t)$ 随宇宙时 t 的变化曲线。。

大爆炸宇宙学

——宇宙的起源

81. 宇宙正在膨胀的观测事实能告诉我们什么？

如果星系在飞驰着分离，那么它们必然曾经距离得很近。简单地说，如果其速度是恒定的，则使任何一对星系分离到今天的距离所需要的时间就是它们现在的距离除以它们的相对速度。但哈勃定律告诉我们膨胀速度正比于它们现在的距离，因此任何一对星系所需的分离时间是一样的。这就是说它们必定在过去的某一时刻是在一起的！

如果哈勃常数 $H_0=50$ 公里 / 秒。百万秒差距=15 公里 / 秒。百万光年，星系开始分离的时间将近似为一百万光年除以 15 公里，约为 200 亿年。人们把用这样计算出的时间称为“特征膨胀时间”，它就是哈勃常数的倒数。而宇宙的真正年龄实际上比它小。

宇宙在膨胀常常可以简单地说宇宙的大小在增加，这似乎给人的印象是：宇宙在尺度上是有限的。尽管可能真是如此，但宇宙的大小在增加和宇宙是否有限本身并无直接联系。我们说宇宙的大小在增加，是指任何一个时间，任何一对星系的间距都在按一个与距离成正比的相同比率在增长。在任何一个足够短的时间间隔内，星系的速度可近似地看成一个常数，而对任何一对星系间的距离的增加值等于这个速率和经历的时间的乘积，或者利用哈勃定律，由哈勃常数、距离和时间的乘积给出。但是所增加的距离和距离的比值将仅是哈勃常数乘以时间，而这对于任何一对星系都是一样的。例如，在百分之一的“特征膨胀时间”里，任何一对星系的距离都增大了百分之一，这样我们就可以说宇宙的大小增加了百分之一。

当然，并非所有天文学家都同意把红移解释成宇宙在膨胀。国际上有四

个著名的天文学家常常通过观测寻找出一些反例，使人们一时难以用膨胀宇宙模型加以解释。例如，哈尔天文台的阿普在一些天区找到一些星系群，其中的天体有差异非常大的红移，在数千个类星体中也有数以百计的类星体似乎与一此小红移星系“成协”！但另一些天文学家又通过吸收线红移的分析发现：上述的“成协”情况中，我们往往能观测到大红移天体的光谱中能发现与较小红移相应的吸收线，当然并非所有上述事例均如此，但绝无反例。所以仍支持膨胀模型。

82．大爆炸宇宙假设的提出

既然宇宙正在膨胀，由此又推出了宇宙的年龄，那么在这个年代以前宇宙应该是什么样的呢？一种极自然的假设是：从前形成我们这个宇宙的物质曾是高度压缩而具有很高的（也许是均匀的）密度和温度。1932年，勒梅特提出，现在观测到的宇宙是由一个极端高热，极端压缩状态的原始原子膨胀而产生的。1948年，伽莫夫发表了《宇宙的演化》等论文，还与阿尔弗、贝特等人联合发表了《化学元素的起源》一文，进一步发展了勒梅特的上述思想，并对早期宇宙中元素的合成作了探讨。同年，阿尔弗又与赫曼发表论文，纠正了伽莫夫在《宇宙的演化》一文中存在的关于物质密度表达式的某些错误，并指出这些错误的改正对物质密度值本身影响不大，但对早期宇宙遗留至今的辐射的温度估计影响很大，并指出这个温度可能非常之低，约只有5K，直至1965年微波背景辐射的发现才证明了这一论断的正确性，而实际观测值为2.7K。1965年，伽莫夫再次发表论文《膨胀宇宙的物理学》，更清晰地描绘了宇宙从原始高密状态演化、膨胀的概貌。伽莫夫还把原始原子称为原始火球，并把其开始的膨胀称为大爆炸，奠定了大爆炸宇宙模型的基础。

本来在更早的年代，人类就有可能动手去寻找上面提到的微波辐射，但1965年前的很多年里，天体物理学家并不普遍知道，在“大爆炸”模型里，很据现在的氢和氦含量要求存在一个微波背景辐射，可能实际观测到它。物理学本质上是个保守的科学。人们往往不是过于认真地对待一些新理论的提出，而是看待得不够认真。人们常常难于理解，严格计算出的数字和方程式总是和现实世界有一定关系的。更糟的是人们似乎有一个普遍的默契，认为某些现象是严肃的理论学者或实验学者不宜去研究的主题。科学史告诉我们，在科学研究中绝不存在不严肃的课题，只有不严肃的研究方式。新的思想，实质性的突破几乎全来自冷门的非“主流课题”。或许这是科学史中最发人深省的部分。

83．宇宙中的物质丰度——氦丰度的解释

在地球上，氦是一种稀有的惰性气体。但在天体中，按质量氦的丰度高居第二位，仅次于氢。所以，这个元素是通过对太阳日用光谱的研究中首先发现的，然后才在地面上找到了氦。

我们知道，每一种元素有其特定的光谱线。比较一个天体的光谱中各元素对应谱线的相对强度，就可以推算出元素的相对丰度。这类研究既可利用天体的光学光谱也可以利用其射电谱进行。令人注目的是，在许多不同类型的天体上，有大致相同的氦丰度 Y ，其值在下列范围：

$$Y \approx 0.25 \sim 0.30$$

对一些星系的光谱（包括可见光谱和射电谱）的测量结果，得到了它们的氦丰度列如下表：

对于太阳，由于其表面温度低，一般情况下是看不到氦谱线，从日珥光

谱中估计出太阳的 $Y \approx 0.38$ 。而由太阳宁静时的太阳风中粒子流的分析 $Y \approx 0.20$ 。

通过赫罗图可推断恒星内部的氦丰度，得 $Y \approx 0.24 \sim 0.33$ 。而从恒星的演化理论及核合成过程研究表明，靠恒星中的核合成不可能使宇宙中的各类天体得到如此多的氦。这也可以称为氦丰度困难。

大爆炸宇宙模型成功地解决了氦丰度困难。不难设想在宇宙膨胀的不同阶段会具有不同的物理条件，而这些不同条件导致宇宙由原始的均匀物质演变成今天这种由单个星系、恒星、行星等组成的高度非均匀系统。分析表明，当宇宙年龄在一秒到一百秒这一段，宇宙的能量尺度恰好是核过程的尺度，是一个很适合于发生核合成的环境。在这两三分钟里发生的核合成称为原初核合成。按我们已有的核物理知识可以计算出 $Y \approx 0.33$ 。它就是宇宙早期核合成中产生的氦丰度。它是使人们接受大爆炸宇宙模型的重要依据之一。

84. 微波背景辐射的理论预言和观测发现

1978 年度的诺贝尔物理学奖授予了两位美国射电天文学家——彭齐亚斯和威尔逊。瑞典科学院在颁奖的决定中指出：“彭齐亚斯和威尔逊的发现，是一项带有根本意义的发现：它使我们能获得很久以前，在宇宙创生时期所发生的宇宙过程的信息。”

在美国贝尔电话实验室的彭齐亚斯和威尔逊于 1964 年利用一种号角式天线在工作波长 7.3 厘米处发现天空有 3.5K 的背景噪声。与此同时，普林斯顿大学迪克教授领导下的一个小组也根据大爆炸宇宙学理论预言了这种噪声的存在，并正在研制工作波长为 3.2 厘米的射电装置以测量这种背景噪声。由于彭齐亚斯和威尔逊所使用的天线性能良好，所以他们先得到了观测结果。但他们开始并不明白他们的发现的意义。后来，附近的普林斯顿大学的迪克教授等告诉他们，这正是普林斯顿小组在努力寻求的东西。于是，彭齐亚斯和威尔逊才在美国的《天体物理杂志》上发表了一篇题为《在 4080 兆赫上额外的天线温度的测量》的短文。虽然文章本身没有涉及宇宙学，但却给宇宙学带来了划时代的影响。它开启了探讨宇宙整体物性演化的大门。

不久迪克小组也完成了 3.2 厘米波长辐射的观测。但为了证实辐射具有黑体辐射的谱型，还需要进行其他波长辐射的测量。在 0.3 ~ 75 厘米波段上天文学家进行了一系列的测量。波长大于 100 厘米的波段，由于银河系本身有很强的这类超高频辐射，它掩盖了来自宇宙的其他辐射，因此无法测量。在比 0.3 厘米更短的波长范围，由于地球大气的吸收，故只有利用探空气球或火箭进行高空测量。

微波背景辐射的发现为什么具有如此重要的意义呢？按大爆炸宇宙模型，宇宙早期必定是很热的，而且理论上宇宙有一个从辐射为主到以物质为主的转折时期。如果各种因素使宇宙处于热平衡态，整个宇宙就会像一个黑体那样发出热辐射。随着宇宙的膨胀，温度逐渐降低冷却到今天只有 2.7K。它就是观测到的微波背景辐射。也就是说，微波背景辐射就是宇宙在其膨胀早期阶段的物质状态所留下的“化石”。而它是由大爆炸宇宙模型所预言的。因此，它的发现当然是对这个模型的最有力的支持。

85. COBE 的最新观测结果及其意义

由于微波背景辐射对大爆炸宇宙学的重要性，而这种重要性不仅在已发现其存在而肯定了大爆炸宇宙模型的正确性。更重要的意义在于，通过对其性质的观测对宇宙本身及其演化性质做出决定性的判断。为了消除大爆炸宇

宙学中的一些不确定因素就必需得到关于宇宙微波背景辐射的高精度信息。为此，美国国家宇航局于 1989 年 11 月发射了宇宙背景探测器（COBE），该科学卫星有三个组成部分：

（1）迈克尔逊干涉分光仪：它以 10^{-3} 的精度测量宇宙微波背景辐射的黑体谱的谱形，它是宇宙在接近退耦时代时曾发生过高能过程的证据。

（2）较差微波辐射计：以 10^{-6} 的精度测量微波背景辐射的大尺度各向异性。其结果将用以研究现代大尺形成时的“种子”，宇宙各向异性的膨胀和旋转，引力波，物质的大尺度流动和宇宙弦等。

（3）弥漫红外背景实验仪：它用以探测 1—300 微米波段天空中的绝对亮度，对来自早期宇宙的弥漫红外光（第一代的原星系、星系和恒星所辐射的光）进行迄今为止的最灵敏的搜寻。也就是寻找来自最早一代恒星的辐射，从而搜寻古代物质分布的线索，今天的宇宙结构就是从古代物质分布演化而来的。

1990 年就发布了 COBE 所得到的宇宙微波背景辐射的十分理想的黑体辐射谱形。

1992 年又公布了大尺度的各向异性（其数值小于 10^{-5} ）及起伏的空间分布。当天文学家满怀希望利用这个结果来对宇宙中暗物质的性质和宇宙大尺度结构的形成和演化作最后的确断时，人们失望地感到为最后消除不确定因素仍存在极大的距离。当然，它使人们对上述问题的了解确实向前大大推进了。

天文学家仍在等待更新的观测结果。

宇宙中暗物质——看不见的团聚力

86．大爆炸宇宙学面临的困难

前面我们介绍了大爆炸宇宙学的建立和成就。从哈勃定律的发现，到宇宙原初核合成解决氦丰度问题和 3K 微波背景辐射的预言和发现，以及 COBE 卫星探测到的微波背景辐射的高度均匀性，使大爆炸宇宙学达到了光辉的顶峰。就像其他理论的命运一样，正是它取得辉煌成就的同时暴露了它的问题。

首先就是均匀性问题。宇宙为什么会如此均匀和各向同性？早先人们把宇宙的均匀性与各向同性作为一种假设。当成是为了简化模型便于求解的某种约定。但微波背景辐射的高度均匀性使这个先前的假设成为受到高度精确的观测检定的客观事实。这样一来它就不是这样想当然的事情。而应该是宇宙中各个部分各种相互作用反复作用的结果。有如两种物质混合在一起，开始总是不均匀的，由于两种物质的分子相互碰撞，经过一段时间后形成均匀的混合或化合物。有的情况下，两种物质不互溶，还得加上一定的物理的或化学的手段。天文观测已达到一百多亿光年的尺度，而且在这个尺度上宇宙是均匀的。那么在这个尺度范围内的各部分间应该已进行过充分的相互作用。按相对论，真空中的光速是任何物质运动及任何相互作用传播速度的上限。而宇宙的年龄也是有限的，因此在宇宙创生以来，物质间能进行相互作用的范围也是有限的。由此推之，宇宙的均匀范围也应该是有限的。一句话：如果大爆炸宇宙学严格成立，那么宇宙不应该如此均匀。这个均匀性问题，也可称为视界问题。通常视界包括观测视界和事件视界，前者是指观测过程中讯号以光速传播，因此一定时间内所能观测到的范围是有限的，后者是指

同样条件下相互作用能到达的范围是有限的。

图 30 用时空图表示的视界问题。图中 t_0 是现在时间， P 表示我们今天所在的时空位置，而今天我们所收到的背景辐射分别来自图中 x 的正、负向即 A 和 B 所在的位置，而宇宙的各向同性意味着 A 和 B 具有相同的辐射性质且同处于宇宙时 t_R 。然而从宇宙开端到宇宙透明并开始发出背景辐射的时刻 t_B ，有因果联系的范围 ab 是由条件 $ab=2ct_R$ 所决定的。这个范围就称为视界。作为一个自洽的理论体系应该有 $ab \geq AB$ 。但按照大爆炸宇宙学只能得到相反的结果，即视界 ab 远远小于 AB 。这就给大爆炸宇宙学带来困难。

第二个问题是平性问题。前面我们已介绍，宇宙的理论模型所描述的宇宙可以有三种可能情况：即开放的，封闭的和临界的。它们取决于宇宙的减速因子 q_0 或者物质密度因子 Ω_0 。很多观测事实表明 q_0 十分接近 $1/2$ ，或者说 Ω_0 十分接近于 1 。如此巨大的取值范围为什么恰好选择了这个临界值？仅用巧合是难以令人信服的。是否在宇宙的演化过程中存在某种调节机制使宇宙密度自然地到达这个数值。

在大爆炸模型与物理学中为了统一强、弱和电磁相互作用的大统一理论结合，成功地解释了宇宙中的光子和重子之比，同时合理地解释了重子和反重子间的不对称。但按大统一理论，宇宙早期会发生“真空相变”。通常我们习惯于把物理上的“真空”理解为一无所有的空间区域。而按现代物理学的理解，真空乃是各种物质场的基态，因此，它并非一无所有，而且可能有多重不同的真空态。设想自然界中有一种场，并用 δ 描述该场的场强。一般说来，“空的空间”应该相应于 $\delta=0$ ，即处于真空态时场强为零。所以，从现代粒子物理观点来看，真空之所以相应于 $\delta=0$ ，不在于它是一无所有的“空”，而在于 $\delta \neq 0$ 状态的能量比它高。图 31 给出了一种场的能量随 δ 取值而变化的曲线， $\delta=0$ 能量是极小，故对应于基态，即真空态。我们已说过，真空态并不是唯一的。如果 δ 场的能量曲线是如图 32 所示，那么真空态就可能有二个，即 $\delta=+\delta_0$ 和 $\delta=-\delta_0$ 。对于这样一条曲线， $\delta=0$ 也仍然是个极值。但它是极大值，故此时对于 $\delta=0$ 的态是不稳定的。一种场强 δ 的能量曲线一般说来是温度的函数。如果存在某个临界温度 T_0 ，当实际温度高于它时，能量曲线由图 31 表示，反之则由图 32 表示。此时真空态在温度下降过程中就会从一种稳定状态过渡到不稳定的状态，并将发生所谓的“真空相变”。而按大统一理论，这个相变过程中将有大量的“磁单极子”产生。我们在现实世界中所观察到的只有电荷，但无磁荷。也就是说，没有磁单极存在。但从理论上考察磁单极子是可能存在的，且按大统一理论，在宇宙大爆炸过程中，这种磁单极会大量产生。1982 年美国斯坦福大学的卡伯来拉曾宣称他们已探测到了一个磁单极事件。可惜 10 多年过去了，不仅别人，就连他们自己也再没能重复这种探测。于是大爆炸宇宙学又面临一个“磁单极”问题。当然，这个问题也可能是大统一理论本身的。

此外，大爆炸宇宙模型认为宇宙起源于时空奇点的爆炸。但它本身不能解决“奇点”问题。这也是给大爆炸宇宙学带来的疑难。

87. 暴胀宇宙的成就和困难

1981 年，美国物理学家古斯提出了一种摆脱困境的有效途径，就是“宇宙暴胀”。他原本是借助经济上的通货膨胀 (inflation) 一词得来。暴胀模型和通货膨胀之间确实也存在某种可以类比之处。

在社会的经济发展过程中，失业率和通货膨胀率之间是一对矛盾因素。

想要压低通货膨胀率，势必要增加失业率；而人为地压低失业率又会增加通货膨胀率。理论研究表明，膨胀宇宙中磁单极子的产生率和宇宙膨胀率之间也是这样一对矛盾因素。宇宙的膨胀率越低，磁单极子的产生率就越高。而为了压低磁单极的产生率（以适应实际上并未观察到磁单极子的客观事实）就必须有很高的宇宙膨胀率。

暴胀模型认为，当宇宙的温度下降到某一个临界值 T_c ，甚至 $T < T_c$ 时，相变并不发生，真空仍保持对称状态。此时 δ 场的能量图将如图 33 所示。由图可看出：当 $T < T_c$ 时，对称态 $\delta = 0$ 与不对称态 $\delta = \delta_0$ 之间有势垒，尽管 $\delta = \delta_0$ 能量更低，但真空仍能保持在 $\delta = 0$ 态，并不立即发生相变。此时形成所谓过冷态，就如 0 以下的水是过冷水一样。而当宇宙处于过冷态时，粒子与辐射这两种成分对于宇宙膨胀的影响很小，而起作用的是真空态。理论研究表明真空压力是负的，即相当于一个排斥力。也就是说，当宇宙处于过冷真空态的时期，是一个以排斥力为主的时期。在斥力作用下，宇宙的膨胀将会是加速的。这种加速会使宇宙极快地膨胀，它就是暴胀。

在图 33 所示的模型中，人们把 $\delta = 0$ 处的真空态称为假真空态，而 $\delta = \delta_0$ 的真空态称为真真空态，两者间过渡时的相变是通过真真空泡的形成而迅速发生的。按量子理论，假真空只能通过隧道效应来衰变；而这是一个局域过程，新相的泡是在旧相之内无规形成的，因此，不可能同时产生。因此，即令每个泡都以光速膨胀，后发生的宇宙泡将小于可观测宇宙的尺度。也就是说，在可观测宇宙之内将存在一些小泡。这些泡间互相碰撞，直到整个宇宙变成新相。但由于宇宙膨胀得如此之快，使这些泡之间只能互相远离，不能结合在一起。结果使宇宙变成一种非常不一致的状态，破坏了它的均匀性，这与观测事实矛盾。

为了克服上述困难，林德于 1982 年提出了对古思暴胀模型的修正方案，现在人们称这些方案为新暴胀模型。这个模型假设：如果每个泡泡都如此之大，以致我们宇宙的区域被整个地包含在一个单独的泡之中，则可避免泡泡不能合并在一起的困难。研究表明，这要求宇宙由对称相向对称破缺相过渡变化必须在泡泡中进行得十分缓慢，而按粒子物理中的大统一理论，这种过程是相当可能实现的。但不少研究又表明对于极早期宇宙是否真存在这类所需要的相变是很值得怀疑的。林德在 1983 年又提出了一个更好的混沌暴胀模型。此模型不用相变和过冷，而代之以存在一个自旋为 0 的场。我们知道每一个基本粒子除了有具有质量、电荷外还有宇称、自旋、磁矩等物理特征量。这些量虽然可以与经典物理量类比，但并不完全一致。例如自旋它尽管可以表现出经典动量矩的特征，但基本粒子的自旋却是一个量子化的量。在经典物理学中，一个矢量可以指向任何方向。相对于人们称为 Z 轴的某方向，经典角动量矢量可以取不同的角度。但是，在基本粒子的量子物理学中，一旦选定了 Z 轴，角动量矢量的方向就不是任意的了。它只允许指向几个固定的方向，这些角度的数量与矢量的长度有关。不同的自旋量将粒子分成了不同类型。粒子的自旋量子数为 $1/2$ 的整数倍。在四大类粒子中，光子的自旋为 1，统计性质上是玻色子；轻子和重子的自旋为 $1/2$ ，是费米子；而介子的自旋为 0，也是玻色子。自旋为 0 的场的量子涨落，在早期宇宙的某些区域有大的场量。在那些区域中，场的能量起到宇宙常数的作用，它具有排斥的引力效应，因此使得这些区域以暴胀形式膨胀。当它们膨胀时，其场的能量慢慢地减小，直到暴胀改变到犹如热大爆炸模型中的膨胀时为止。这些区域

之一就成为我们观测到的宇宙。这个模型既具有早先暴胀宇宙模型的所有优点，但它不是取决于使人生疑的相变，并且还能给出微波背景辐射的温度起伏，其幅度与观测相符合。

这样，按暴胀宇宙模型，当宇宙处于 10^{-35} 秒 $\sim 10^{-32}$ 秒间，宇宙经历过一个急剧地膨胀阶段，宇宙尺度增长的幅度达 50 $\sim$ 60 个量级。这样一来，大爆炸宇宙学的因果疑难，平性困难都自然地解决了。但奇点问题等，暴胀宇宙任未加以解决。

88. 中微子有静质量吗

本书中我们已多次提及中微子，一开始就介绍了中微子天文学，后来又介绍了太阳中微子之谜。我想读者会有有一个很深的印象，相信中微子在天体物理学中确实起着十分重要的作用。但究竟“什么是中微子？”也许不少读者仍不十分明确。人们可以毫不含糊地说：中微子是一种基本粒子。它具有物理学中其他基本粒子所具有的性质。人们常说：1931 年泡利“发明了”中微子。也许不少读者认为，科学家进入实验室时，是不带任何成见的，并忠实地报告他的见闻。他们或许想象，科学家像一个优秀的捕鸟人，一个新的粒子发现好比是捕捉到了一种新的珍禽。

实际上，科学上的新发现，特别是近代物理学中，差不多总是与上面的叙述相反。科学家往往总是带着一定的成见走进实验室。这些成见就是他们所接受的科学原理，在他们进行实验前总认为这些原理是正确无误的。物理学中的绝大多数实验，都是想证实理论所预言的结果。就像天文学家预言了海王星的存在，人们按其指示的方位和时间去等待它的出现那样。现代的物理学家绝不会像守株待兔的农夫，呆在树下等待某只不小心的野兔撞死在树下。当科学家发现某一现象与他的固有看法相抵触时，最振奋人心的发现就出现了，而一位优秀的科学家的特点，就是他能取得十分可靠的结果，因而他能坚信他自己的结果，而不致于陷入先入为主的下意识观念。

在泡利发明中微子之前，人们已清楚地从实验认识到，在 β 衰变中发射出的电子能量并不固定。这个实验事实只有两种可能解释：不是能量和动量不守恒，就是 β 衰变并不是双体的，即除电子和核外，还要放出别的粒子。当时，包括玻尔在内的一些物理学家，曾打算在 β 衰变中放弃能量守恒与动量守恒等概念。而泡利深信守恒定律的普适性，他不相信在自然界中唯独 β 衰变过程不遵从守恒定律。他提出的这个附加粒子后来费米把它叫做“中微子”。费米建立了第一个定量的中微子理论。他假设存在着一种看不见但遵从量子力学一般规律的粒子，并由此建立起与很多实验相吻合的 β 衰变理论。按费米理论，通过对 β 衰变中发射出的电子能量极大值的测量，如果已知电子、母核与子核的质量，我们就能知道中微子的质量。这是用非零值的未知中微子质改写能和动量守恒方程的结果。然而，测量中微子质量远非表面上看来那么容易，以至中微子的质量至今仍是一个大的谜团。但最简洁和最漂亮的中微子理论是以其静质量准确地为零的假设出发而得到的，这是当时物理学家一致公认的结果。

1980 年，一些粒子物理学家宣称，中微子的静止质量可能不为零，前苏联的一个实验小组则更具体地宣布：电子中微子的静质量约为 6×10^{-32} 克。这个消息，在当时，在天体物理学界的反响远远大于粒子物理学界。

原来中微子不是重子，通常天文学家所观测到的天体的各种辐射都是与重子物质有关的。理论分析表明，在宇宙中，中微子的数量远远多于重子物

质的数量。只要每一个中微子有很小的静质量，其总和就会远远大于重子物质成分的质量，成为宇宙质量中的主导成分。粗略地说，在目前的宇宙中光子的数目和中微子的数目大体相等，每立方厘米的体积中大约有 400 个。每个光子的平均质量为 1.1×10^{-36} 克。所以，光子对宇宙平均质量密度的贡献为

$$1.1 \times 10^{-36} \times 400 = 4.4 \times 10^{-34} \text{ (克 / 厘米}^3\text{)} \ll \rho_c$$

如果中微子的静质量为零，则它对宇宙平均质量密度的贡献不会超过光子的贡献。但若中微子果真有上面所述的静质量，则它对宇宙平均质量密度的贡献将为

$$6 \times 10^{-32} \times 400 = 2.4 \times 10^{-29} \text{ (克 / 厘米}^3\text{)} > \rho_c$$

即，仅中微子的质量贡献就使宇宙的平均物质密度超过了宇宙的临界密度，从而可能使宇宙是封闭的。小小的中微子竟可能决定整个宇宙的命运！尽管中微子的静质量至今仍是一个未解之谜，但是，关于中微子静质量的风波却引出了天体物理学中的一个新的研究领域——宇宙中的暗物质。它是一个有待天体物理和粒子物理共同去开发的新天地。粒子物理学家希望在这个新领域中找到或证实他们所预言的许多“暗”粒子。

89. 热暗物质，温暗物质和冷暗物质

80 年代兴起的超对称、超引力等理论，预言了很多新粒子。它们都不是重子，它们大都不参与电磁作用，或只有很弱的相互作用，极难甚至不可能在现今的实验室中发现它们。而这样一些粒子如果真实存在，它们也将像有静质量的中微子那样为宇宙的平均物质质量密度做贡献。也就是说，或许正是这些粒子组成了宇宙中的各种不可能发光的各种“暗”物质。下面的表给出了暗物质可能候选者的名单：

由表可以看出，多数的候选者都是微粒子。所以说，如果这种理论正确，那么宇宙中百分之九十的物质将由不可能发光的微子组成，而不是迄今为止天文学家所直接观测到的发光物质。也就是说，宇宙中的绝大部分成员都是伟大的哑巴！而我们前面所介绍的形形色色的天体歌星仅是其中的少数佼佼者！

也许有的读者会说，既然是观测不到的东西，我们为什么还要去研究它们呢？天文学不是以观测为基础吗？研究表明，具有静质量的微粒子虽然不可能发光，因而不能被人们直接观测到。但它们在宇宙的演化，特别是在宇宙大尺度结构的形成过程中扮演了极重要的角色。我们已说过，微粒子很少能与普通重子物质发生相互作用。因此，在极早期宇宙的极高温和高压下各种物质高度混合的物质“浓汤”中，各种微粒子会首先“逃”出浓汤而“独立”，天文学家称之为“退耦”（即不再与浓汤中的物质发生碰撞或其他相互作用）。而这些游离的微粒子在引力的作用下会成团。这些团当然不会产生什么观测效应，但其引力却形成了一种“看不见的团聚力”，它像化学反应中的“触媒剂”那样，促使后来退耦的重子物质很快成团，从而有效地改变了宇宙的大尺度结构和星系的形成进程。研究表明，对于具有不同静质量的微粒子，这种影响是极不相同的。为此，人们将由各种微粒子组成的暗物质按其质量大小分成三种不同类型。取其典型质量为 10eV、1keV 和 1GeV 分别称之为热暗物质、温暗物质和冷暗物质。由于这些粒子的质量都非常小，它们都是相对论性的，即总是以极接近光的速度运动。按相对论，静质量越小的粒子运动速度越接近光速。其特点是退耦早，因而开始成团的时间早。

但它容易抹平一些小尺度的重子物质的成团。这一点与宇宙中存在多种小尺度结构的观测事实不相符合。因此，天文学家很快就对热暗物质失去了兴趣。冷暗物质虽然有能保存小尺度结构的优点，一度是天文学家所偏爱的选择，但由于它退耦时间晚，致使宇宙中各种尺度结构的形成时间过长，以至按严格的理论计算星系等结构至今尚未完全形成。这也与观测事实不符。当然，在考虑宇宙大尺度结构形成中除了暗物质成分因素外，尚需考虑各种动力学和热力学等因素。

90. 暗物质存在的观测依据是什么——星系周围物质的转动曲线

也许读者会感到暗物质像一个“幽灵”，它几乎无所不在而又捉摸不住。实际上由于暗物质仍参与引力相互作用。因此，能通过引力效应间接地证实暗物质的存在。所谓星系的转动曲线，是指围绕漩涡星系转动物体的速度与其半径的关系。它就是天文学家证实暗物质存在的基本观测依据。

对于一个旋转的刚体某一点的转动速度与其到转心的距离成正比。而对于太阳系，行星绕太阳的转动速度与行星的轨道半径的平方根成反比，即距太阳越远的行星，转动速度越小。这也是开普勒定律中的一条。它对于任何绕一个大质量的中心物体作转动的运动都是适用的。因此，如果一个星系中的质量都集中在发光区，那么，发光区之外的物体的转动速度也应当遵从上述的开普勒定律：距星系中心越远的物体，转动速度应越小。

观测结果却与开普勒定律完全不同。图 34 显示了一些星系由 21 厘米射电波观测所得到的旋转曲线。它们表明：在大量的星系的发光区之外，物体的转动速度几乎与距离无关。也就是说，在距星系不同距离上的物体，竟然具有相同的转动速度！对于这个“反常”的观测结果的唯一可能解释是：在星系周围的空间里，并不是真空，而是存在着质量相当可观的物质晕。这些晕是不发光的，不可视的。在我们介绍银河系时也曾提及这一点。实际上，1983 年曾发现，在距银心 20 万光年的距离上，有一颗名为 R15 的星，其视向速度高达 465 公里/秒。要产生如此大的速度，也表明银河系的总质量也至少比光学区的质量大十倍，即银河系的质量中也有百分之九十是属于暗物质。这些暗物质究竟是属于什么性质的物质？天文学家常把这个问题称为宇宙的质量短缺。

一种很自然的猜想是暗物质由弥漫的气体所贡献。在银河系中确实有不少的气体云，那么星系际空间是否也有类似的这类气态物质呢？简单的分析表明，只要在星系团中平均每平方厘米体积中有 $1/100$ 个氢原子，其总质量贡献就足以解释星系旋转曲线的观测结果。这种物质密度若放在地球上的实验室可称得上是很好的真空条件了，的确可以说是不可视的，即很难加以测量。可是对于天文观测来说，这种密度已经算是很高的了。

物理学研究表明，中性的氢气会发射或吸收波长为 21 厘米的射电波，探测这种信号的分布就可以判断氢气的分布和密度。而在射电背景辐射中没有搜寻到 21 厘米的发射线，在一些射电源的谱中也没有 21 厘米的吸收线。分析这些观测结果表明，氢气的密度决不高于每立方厘米百分之一这个数值。通过更精确的可见光波段的类似观测可断定在星系际空间氢原子的密度不会高于每立方厘米 10^{-12} 。至于其他元素如锂、碳、氧、镁、铝、硅、硫和铁等的原子的密度也不可能超过氢气的密度。

通过对星系团中 x 射线观测的分析可知，电离气体的密度也很小，以至不足以用电离气体来说明质量短缺的所在。如果短缺质量以尘埃形式存在，

则它会引起星光的昏暗。通过定量的分析估计，弥散尘埃的质量最多只占星系团中恒星质量的百分之一。理论上的各种分析也排斥了短缺质量由“死亡了”的恒星提供的可能性。一句话，宇宙中的短缺质量绝不可能是由重子物质构成的。前面所介绍的非重子暗物质刚好可能填补这个短缺！这正是天文学家热衷于非重子“暗物质”的基本原因。

91. 引力透镜——光在宇宙空间中如何传播

光线在宇宙空间如何转播！这也是个问题吗？光线在真空中走直线，这还有什么疑惑吗？爱因斯坦所建立的广义相对论其三大经典验证中有两个是涉及光的传递性质的。其一是光线的引力红移，它表明光在离开引力场时与一般物质一样，会损失能量。而按光量子理论，光子在损失能量后波长增加故红化，这种效应称为引力红移。它被大量的恒星的光谱观测结果所证实。广义相对论关于光的传递性质的第二个预言是光线的引力弯曲。它指出，光线在从一个引力场经过时会像其他物质粒子一样因受到引力吸引而使其轨道弯曲。图 35 就是一束来自遥远天体的星光在经过太阳附近时被太阳所弯曲的示意图。1919 年 5 月 29 日非洲发生日全食，英国天文学家爱丁顿发起，两个英国远征队去进行观测，一队到非洲西海岸，一队到巴西北部。他们带回了大量的太阳附近的恒星观测照片。从这些照片的结果分析，证实了爱因斯坦所预言的结果是正确的。

如果一个遥远的天体，其星光在向地球传递的过程中，经过了一个足够大的质量由于光线的对称偏转很像通过了一个凸透镜而产生的聚焦现象，天文学家把它称为引力透镜现象。引力透镜效应引起了很多有趣的天文现象。最典型的事例是“双类星体”现象。在已观测到的七千多个类星体的样本中，有很多双类星体现象。所谓双类星体是在方位位置上相距很近（往往视角差只有几角分），而其他性质极接近甚至完全相同的两颗类星体。例如，类星体 Q0957 + 561A, B 它们的红移均为 $z=1.41$ ，而在其视线上发现了一个红移为 $z=0.36$ 的插入星系其视星等为 18.49、视角半径为 0.24"、椭率为 0.13。这充分证明了这两颗类星体就是一个类星体通过引力透镜现象所形成的双像。对于其他双类星体也有类似的发现。这些观测发现引起了人们对于引力透镜现象的兴趣。刚才说的双类星体现象，可以说是通过点质量成像的事例。爱因斯坦曾预言在一种很对称的情况下一个点光源通过引力透镜现象可能形成一个光环。当然他本人也曾指出这种现象的产生几率很小。近些年来通过欧洲南方天文台 3.5 米新技术望远镜确实发现了光环的事例。

为了证实宇宙弦的存在人们也寻找链状物质分布导致引力透镜成像的特征。在这种情况下一个小天区内可能观测到多个双像。如果在一个天区研究光线传递的整体特征，人们可以分析这局部天区的物质质量分布，其中当然也包括各种暗物质的质量。近几年来，天文学家为此进行了“微引力透镜”效应的研究。如果一个遥远的光源的光的传递路径中插入了某个天体，则该天体的引力也有可能像凸透镜的聚焦效应那样引起光源的亮度增加。倘若这个天体在运动，则这种亮度增加会随时间变化。当天体接近某一个位置时亮度逐渐增加，而到达这个位置时亮度达最大，然后天体远离这个位置，亮度又逐渐变小。这样一来遥远的光源好像是发生了一个随时间变化十分对称的光变。天文学家通过巡天观测，的确发现了几个这种光变的事例，为研究宇宙中的物质质量分布提供了极有价值的新途径。但这个方案研究的初步结果似乎是否定非重子暗物质的存在。

宇宙简历表

上面我们已介绍了大爆炸宇宙学的一些基本问题。这里我们按照这个模型的研究结果，给出宇宙的演化历程及各阶段的主要特征。

92. 时空创生

人类还是容易理解时空创生这概念的。圣经的头一句话就是“上帝创造了世界”。我国古代《老子》一书中第一章就说：“无，名天地之始，有，名万物之母。”在四十二章中又说：“道生一、一生二、二生三、三生万物。”又说：“天下万物生于有，有生于无。”西汉《淮南子》对道家的宇宙演化作了更简单的概括：“有生于无，实出于虚。”在我国著名的《周易》中也有：“无极生太极，太极生两仪，两仪生四象，四象生八卦，八卦生万物。”这些都反映了我国古代思想家关于宇宙创生的思想，而且，共同点是认为宇宙的“有”乃产生于“无”！

我们已看到，整个现代宇宙学从宇宙膨胀的发现到暴胀宇宙的提出，构成了一个相当完备的体系。由于它的成功，这一套理论已被称为标准宇宙学，或俗称大爆炸宇宙学。也许读者也会问：大爆炸以前的宇宙是什么？宇宙是否有“一无所有”的时代？我们今天习惯的时间和空间及真空是怎么演化来的？这些问题提出对于大爆炸宇宙来说已不是一个单纯的哲学思辨，而是宇宙膨胀观测事实面临的科学现实。

由于哈勃定律的发现，一种最合理的解释是宇宙正在膨胀。那么今天的宇宙正是由一个较小的尺度范围发展来的，以致反推下去宇宙最初是起源于一个奇点的大爆炸。也就是说，宇宙是从一个原初的时空奇点开始的。所谓奇点，就是按经典物理学不能描述的物理状态。它就连时空性质也无法确定，通常物理学的其他量也就更没有意义了。按迄今的经典物理理论，奇点既不能告诉我们为甚么宇宙会有暴胀阶段发生，也不能告诉我们奇点怎么创生时间、空间和真空。

时间和空间究竟是怎么产生的？英国著名物理学家霍金提出了一个半经典的量子模型。

该理论的第一个要点是建立一种“没有时间”的物理理论。所谓没有时间，就是将爱因斯坦的四维闵柯夫斯基时空（即三维实坐标加上一维的虚坐标）改为四维欧氏空间（即四维实坐标）。他认为只有把这种空间中的理论结果进行延拓后，才可以定义时间坐标，即可以得到一个与有关时间测量相比较的坐标值。换句话说，他认为只有空间才是基本的物理量，而时间不是。时间只是一种观测表象。按照这种理论的一个必然结果是：在某些物理解中，延拓不出时间，此时表示，不可能用时间表象来描写，时间概念在这类情况下是不成立的。而从这类本质上非时间的情况过渡到可用时间表象的情况，就是时间的起源，也就是时间本身的从无到有。

霍金理论的第二个要点是寻找宇宙的“边界条件”。他认为，宇宙就是有，宇宙之外就是无！由此可推知：“宇宙是没有边界的”。这就是宇宙的边界条件。以此去构造出“宇宙波函数”。按照量子理论，一个体系的全部性质由它的波函数所确定。因此，整个宇宙的性质，应由宇宙波函数来描述。由于没有时间，因此，建立的波函数只能是“定态”波函数。基态波函数就是最重要的波函数，而它正是可由宇宙的边界条件确定的。

有了宇宙波函数后，就可以利用它来研究时间的起源了。把宇宙波函数延拓到时间表象中，即可发现，只有在一定范围内才可能建立时间概念。而在可用和不可用时间概念的交接处，就是时间的起源点。

看起来这个理论是很优美动人的。但这中间有两个问题是不令人满意的：一个是人为地把时间和空间割裂开了。时间和空间本是一个对立统一的整体。没有空间的时间和没有时间的空间都是不美妙的。最美妙的图景是时间和空间的一起“创生”或“消失”。另一个缺陷是在时间创生后并不能自然地引出宇宙的暴胀过程。当然，暴胀过程的结束也不能自然地进入热胀阶段。宇宙的演化应该是一个自然的因果序列而不应该是一些偶然事件的拼凑组合。能否寻求一个统一的模式将宇宙的演化过程融于一体？这或许应该是对宇宙模型的基本要求！本书作者的研究表明利用芬斯勒时空结构的几何模式可能达到此目的。1976年英国数学家齐曼，研究了“双尖点突变”的三种典型模式： $x^4 + y^4$ 、 $x^4 - y^4$ 和 $x^4 + y^4 - 8x^2y^2$ ，其主要应用之一，是讨论经济学中的“通货膨胀”(inflation)的数学模型。有意思的是宇宙暴胀的这个“暴胀”恰好来自英语的“通货膨胀”(inflation)。研究表明宇宙的创生和暴胀以至热大爆炸和热膨胀均可能通过双尖点突变的模式加以几何描述。在微分几何中，由 ds^4 定义度规的函数的空间称为芬斯勒空间。我们发现，适当定义一个芬斯勒时空，同样可建立一套相对论结构，这个新结构除了包含全部爱因斯坦相对论外，还允许超光速运动存在，并引出一些新的时空性质。这一点我们后面再介绍。

93．暴胀宇宙阶段

在宇宙的极早期，不能区分四种相互作用，只有一种统一的相互作用，就像是树枝的主干。随着宇宙的降温，相继发生以下相变：

(1) 对应于超统一的真空相变，在 10^{-44} 秒时发生。此时宇宙的相应能量为 10^{19}GeV 。相变的结果是使引力相互作用出现。这就是时空起源。

(2) 对应于大统一的真空相变，在 10^{-36} 秒时发生，此时宇宙相应的能量是 10^{15}GeV 。这就是宇宙不对称的起源。此后宇宙开始以指数方式膨胀。即开始了宇宙的暴胀过程。此时强相互作用出现。

(3) 对应于弱电统一的真空相变，在 10^{-10} 秒时发生，此时宇宙相应的能量为 100GeV 。它就是弱电分离的相变。

每一次相变都降低了宇宙的对称性，使之在宇宙中区分出一种特有的相互作用。当今宇宙中的四种相互作用就是在宇宙的各次相变的演化过程中一一产生的。这些相变也导致了宇宙时空尺度的指数增长，形成宇宙的暴胀阶段。

发生相变的年代，取决于临界温度的大小。当今，只有弱电统一理论较为成熟，它的临界温度为 $kT_c \approx 100\text{GeV}$ 。大统一理论目前尚有不少问题，但也有不少的成功，其临界温度是 $kT_c \approx 10^{15}\text{GeV}$ 。对于超统一或超引力目前还没有能与观测对照的理论，其临界温度仅是一个粗略的估计。

94．热胀宇宙阶段

在暴胀时期结束时，真空发生相变宇宙从对称过渡到不对称，它就是宇宙最早的不对称的起源。而相变中所放出的能量转变成辐射和粒子。而宇宙本身在继续膨胀，这个过程开始宇宙温度仍高达 10^{15} 开。按照广义相对论的宇宙模型，当宇宙尺度足够小时，整个宇宙有一个以辐射为主的时期。但此时由于宇宙并不透明，辐射与物质仍是互相碰撞形成“一锅”宇宙“浓汤”。

在这浓汤中由于某种尚不清楚的衰变过程使 CP 对称性受到破坏，粒子、反粒子的不对称形成；于是重子物质产生。此时宇宙的年龄尚不足一秒。

反粒子的存在是从量子力学原理和爱因斯坦狭义相对论原理用数学直接推导出来的结果。反电子的存在是在 1930 年由狄拉克从理论上首先指出的。为了不在其理论中引入一些未知粒子，狄拉克先想把正电子当为是质子。1932 年正电子的发现，证实了反粒子的理论，并表明电子的反粒子不是质子，而质子有它自己的反粒子，本世纪 50 年代发现了反质子。

近代物理认为，每一种粒子都有其相应的反粒子，它们具有完全相同的质量和自旋，但却带相反的电荷。只有像光子那样的纯中性粒子是例外。可以认为，光子的反粒子是自己。按狄拉克理论，正、反粒子间应具有某种对称性。即宇宙中的正、反粒子应该同样多。这曾给宇宙学带来困难，一度人们希望能发现反物质星。但这种努力遭到失败。它表明我们的宇宙主要是由正物质组成的。理论分析表明，当今的正物质宇宙只要在宇宙早期有约 10^{-10} 的不对称就足以形成。它要求重子数守恒的破坏，而这一点正是大统一理论所预言的。正是这种不对称性导致了宇宙热胀过程中，当粒子和反粒子湮灭之后，所剩下的东西就是宇宙中的重子物质。此后，开始了元素的合成。像恒星进入主序星的初期那样，进行质子到氦四的聚变反应。理论分析表明，这个反应的结果形成了宇宙中 20—30% 的氦丰度。极微量的氘（原子量为 2 的氢，也称重氢）却限制了宇宙中重子物质的总量。按照目前的观测结果表明，宇宙的平均重子物质密度应远低于宇宙的临界物质密度，仅为它的十分之一。理论上说，这个时期的宇宙中产生了大量的中微子，随着宇宙的膨胀，它的温度亦随之降低，至今约为绝对温度 2 开。由于中微子探测的困难，至今仍无法观测到这种 2 开的宇宙中微子背景。如果有一天，人们观测到它，那将是宇宙极早期留下的遗迹！

当宇宙温度降到 10^5 开后，宇宙开始由辐射为主转为以物质为主的时期。由于物质逐渐与辐射脱耦（即逐渐减少相互作用），物质在引力作用下开始成团，即开始了宇宙的结构形成。直到宇宙温度降到 3000 开左右，宇宙开始变得完全透明，由于宇宙处于热平衡状态，一个以黑体辐射形式传播的宇宙背景辐射产生，它就是我们今天探测到的 3 开宇宙微波背景辐射。这是迄今人类观测到的宇宙的最早的“遗迹”。

95. 物质复合时期

在宇宙温度降到 4000 开以后，处于等离子体状态的宇宙物质开始结合成原子。我们知道，河外天体的红移既标志了天体的距离，同时又反映了天体发光的时间。因此，也常常用红移来标志宇宙的年龄。物质的复合时期对应的红移就是 $z \approx 1500$ 。早于这个时期物质完全处于等离子体状态。

处于不同状态的物质，一个很重要的特征是扰动的传播速度，通常称为声速。在日常生活中，我们说话、唱歌等是人的声带引起空气的扰动，并以 340 米/秒的速度在空气中传播。这是我们熟悉的声速。我想大多数读者一定知道，在不同的物质中，声音的传播速度是不一样的。在极高温的物质中，扰动的传播虽然不能“听”到，但这类扰动的传播本质上和声波是一样的，因此扰动的传播速度仍称为声速。当扰动速度低于声速时，扰动在介质中正常传播，而当扰动速度高于声速时就会出现微波现象。理论分析表明声速在宇宙膨胀的早期阶段近似等于光速。

在宇宙中物质复合前、后物态发生了巨大变化，因此声速也发生了很大

的变化。下面的讨论将指出，这为原来整体处于均匀的宇宙中形成物质的非均匀分布造成了很好的条件。这些物质的非均匀分布就是宇宙大尺度结构和星系形成的“胚胎”。

96．星系形成时期

宇宙中的最重要的问题之一就是均匀膨胀介质的宇宙中，如何形成现在观测到的各种结构的问题。早在 1692 年牛顿就指出，均匀物质在粒子相互引力作用下最后必然聚集成一个巨大的团块或者聚集成为数众多的独立团块。1901 年，金斯提出了一个理论，称为引力不稳定性理论。金斯提出一个临界长度，它是由介质的密度和介质中的声速所决定的，称为金斯长度。按流体力学方程可以推出，如果一个密度扰动（即密度不均匀的起伏），其尺度小于金斯尺度，那么，扰动将像声波一样在介质中转播，从而很快被衰减。反之，当扰动尺度大于金斯尺度，扰动就将按指数规律增长。1940 年，前苏联的物理学家李弗西兹把金斯的理论推广到弗里德曼的膨胀宇宙中。在膨胀宇宙中，决定宇宙结构生成的有三个基本尺度：视界尺度，它是光速与宇宙年龄的乘积；金斯尺度，它是由宇宙物质状态决定的声速与宇宙年龄的乘积；阻尼尺度，它是由破坏物质成团的各种因素所决定的特征尺度。为了分析方便，人们常把这些特征尺度转换成特征质量。这是把相应的特征尺度视为一个球的半径，以相应球的体积乘以宇宙的平均物质密度得到的质量作为特征质量。显然，这三个特征质量都是随宇宙的演化而演化的。一般情况下，小于金斯质量的扰动被逐渐衰减了。但在宇宙复合前夕的扰动，它们还没来得及被衰减，由于宇宙复合，金斯质量突然下降；以至那些原来小于金斯质量的扰动都变得大于金斯质量，因而，这些扰动得以迅速增长，使原来均匀的宇宙划分为按金斯质量表征的大量的物质团块。它们就是星系的胚胎。天文学家有时也称为星系的“芽”。

在估计星系的质量时，发现金斯质量和星系质量相差甚远。为了使金斯理论与观测到的星系质量一致，人们利用阻尼质量来估算星系质量。但它只能由一些特殊假设得到星系质量的下限，而整个星系质量的分布仍得不到合理解释。本书作者曾发表文章指出，金斯尺度实际上是一个“单向膜”，由于引力的作用，它限制了金斯半径以内的物质向外离散，但它并不能阻止一些物质粒子继续向金斯半径内继续“下落”。因此，星系的真实质量应该是从金斯半径到视界的某种积分。这样，便可由“奇点”的不同性质得到星系的质量分布的范围。理论计算结果与观测就符合得很好了。

关于暗物质对于宇宙物质成团的影响我们在暗物质的介绍中以提及，这里不再重复。理论上处理双成分物质的金斯波长可以用各成分单独的波长的平方倒数的和作为复合金斯波长平方的倒数。

星系、星系团和星系团形成时期分别对应于红移 $z \approx$

97．恒星形成时期

星系形成的初期仍是一个较均匀的物质团。但其密度比起宇宙的平均物质密度来得大。因此，当星系内发生引力不稳定变化时，金斯尺度自然较之宇宙中扰动时的尺度为小。扰动的结果就形成了星团或恒星。恒星的形成本质上已不再具有宇宙学意义，它只是个别星系内部的局部问题。但人们仍相信，不同星系中恒星的形成和演化规律是相似的。这由赫罗图和超新星爆发的观测可以证明。

按我们已介绍的恒星演化理论可推想，在一个星系中首批形成的第一代

恒星更接近星系中心，质量大的恒星演化更快，并产生超新星爆发，演化过程中产生的重元素重新散布在星系中。第二代恒星形成有两个特点：其一是由于星系的旋转使离散物质更偏离星系中心，并较集中于星系中心的旋转平面上；其二是重元素增加（我们已经知道重元素是在恒星演化过程中才产生的）。因此第二代恒星平均说来比第一代恒星为快。以后的恒星则更远离星系中心且更接近星系中心的旋转平面，形成类似于银河系的“年轮”。

经过数代恒星的形成和超新星爆发，使星系中的介质有了足够多的重元素，才可能形成水及高分子化合物甚至有机物，为宇宙中形成生命和人类创造了物质基础。

98．人类形成时期

人类的形成本质上已不是天文学的问题。但作为宇宙演化的一部分，它又与宇宙的整体环境密切相关，因此，我们也把它作为宇宙演化的一个阶段。它更着眼于宇宙中适于生命演化的环境的形成。后面我们介绍的“人择原理”将详细介绍“人”和宇宙的演化的关系。

人择原理的基本思想是：宇宙之所以是这样，是因为如果不是这样就不可能产生人类，也就不可能有人来研究宇宙。更不可能有你今天来读这本《宇宙天体交响曲》这本小书。简言之，一切事情之所以如此，就是因为现在有人存在。这大概就是我国古代的“天人合一”的哲学思想的一种很好的应用。

关于地外文明

地球是宇宙中得天独厚的天体吗

99．人类是怎样从“以我为中心”的宝座上跌落下来的

我们已说过，一开始人总是以自己为中心。把自己生活的环境当着地球的中心。我们“中国”这个名称大概就是这种观念的产物。再大一点，又把地球视为是宇宙的中心（这当然就不仅中国如此了）。人们的一个基本信念是：“眼见为实”！人们往往并不知道在眼见的现象的背后还隐藏着更深刻的本质。

也许每一个人一开始思考周围的事物时，总是把“上”和“下”认为是绝对的。也正因为如此，神学家们总把“天”视为美好的，是神仙居住的地方。地面上住的是人。而地底之下则是鬼魅存在之所。当我第一次知道地球是椭圆形时，一个随之而来的问题就是：站在球下方的人不会“掉下去吗”？知道了地心引力才理解了上和下的相对性。于是鬼魅的居住地就找不到了。

哥白尼的日心说，又使地球从宇宙中心的宝座上跌落下来。地球成了太阳的一颗普通的卫星，它携带着人们在宇宙空间围绕着太阳不停地兜圈子。仅太阳系内和地球相似的还有另外的八大行星和无数的小行星及彗星和流星。一个自然的想法是：太阳系大概就是宇宙了吧！但望远镜的发明，揭示出人们肉眼看到的“天河”原来是无数颗和太阳一样的恒星构成的。而太阳系仅是银河系中一个“边远地区”的小成员。近代天文观测表明银河系内不下于一千二百亿颗恒星。而河外星系的发现又证明：我们的银河系也仅仅是数以亿计的星系中的一员。而最新天文技术的发展，使人类直接通过观测证明了宇宙学的基本原理：宇宙就整体而言是均匀和各向同性的。简而言之就是说：宇宙中没有任何特殊点，宇宙中各点是平权的！

100．宇宙中不存在任何特殊点

上面我们说到，宇宙学原理已由一个科学假设变成了经过现代观测所直接证明了的观测事实。“宇宙中没有任何特殊点”，这句话应该成为指导人们言行的一条基本准则。那么它究竟有什么科学意义和实践意义呢？

首先，人类的任何知识只能是通过每一个单独的个人去感受、去思考，并从中将自己的直觉的感性知识上升到理性并总结出一些能反映客观实际的规律或定理。当人们通过语言或文字把自己的感受与别人交流时，别人按照他的感受去进行自己的实践后，证实或修正了这些规律或定理后，又向更多的人去传播这些规律或定理，于是更多的人又去实践，去感受。只要这些总结是正确的，最后总会被越来越多的人的实践所证实，最后成为共同的认识。于是建立了科学。每一个个体的感受为什么能被不同的感受者所接受并逐渐形成人类的共识呢？这不正说明了正确的认识与个体无关吗？换句话说：世界上不存在任何特殊的个人！所有人应该是平权的！一切“圣人”和“神仙”一样都是愚昧的产物！宇宙中不存在任何特殊点正是相对性原理的推广。而相对性原理说：物理规律不受观测者所在参考系的运动状态的影响。

再有，人类对宇宙的任何知识都是基于地球上的观测而得到的。它具有普遍意义吗？如果其他星球上有“人”会跟我们相像吗？如果他们也有科学，所建立的基本定律会与我们的相抵触吗？实际上，人类对宇宙的认识虽然是在地球上进行的，但地球是围绕太阳不停地转动而太阳又在银河系中转动，银河系也有自身的运动。因此，人类的每一个不同的实践都是在宇宙的不同时间和不同地点进行的。但所有这些观测和实验并没有发现什么明显的差异，也正因为如此，才可能建立起现代科学。当宇航员到达月球时，他们看到的“天上人间”——地球不恰好像地球上看到的“月亮”吗？人类的航天技术虽然还不能飞出太阳系，但由各类天体的光谱分析可以证明它们的化学组成与地面上是十分一致的。因此，我们有充分理由相信，如果其他星球上有“人类”（科学高度发展的智慧生物）即便外形和习惯可能有很大的差别，但对宇宙的认识必然是一致的。至少他们也会有宇宙学原理。或者一旦与地球人进行交流后，会很快接受宇宙学原理：宇宙中的一切点是平权的！

最后，宇宙中有数以亿计的星系，每个星系中又包含数以亿计的太阳系，当然绝不可能只有我们的地球得天独厚出现了人类。他们正在通过各种手段去观测天体，认识宇宙并力图改善自己的生态环境。天文学家相信，整个宇宙中必定也有数以亿计的星球上存在着与人类相近的智慧生物。他们也在观测天体、认识宇宙、改造自己的生态环境并力图与其他星球上居住的同类进行交流！

人择原理

101．生命存在的基本条件

现代科学定律包含了许多常数，如光速、普朗克常数、哈勃常数、电子的电荷、质子和电子的质量比等。当人们研究这些常数之间的关系时，常常会令人十分吃惊的，往往在一些描述宇宙尺度和描述基本粒子的微观尺度的常数之间存在十分令人吃惊的比例关系。例如：宇宙的大尺度和中子星的尺度之比就十分接近宇宙中所包含的粒子总数和恒星内部所包含的中子数之比。标志恒星演化结局的两个重要质量极限：钱德拉赛卡质量和奥本海默质

量竟是由基本粒子的物理常数所确定的。这些都充分反应了宇宙中各个层次结构之间存在着十分和谐的内在关系。看起来，宇宙中的各个常数是被精细地调整了，才可能出现今天的宇宙万物，特别是才使得宇宙中生命的发展成为可能。设想，如果这些常数稍微有一些不同，或许就不会产生维持恒星辐射能量的氢和氦的燃烧，或许还没有发生过超新星爆发。这样宇宙空间就没有这样多的重元素，也就不可能出现生命，更不可能产生人！由此，人的存在就可反过来成为对宇宙演化和科学定律选择的限制条件。

人究竟需要些什么自然条件

地球的引力场强度适中，它取决于电磁相互作用特征。实际上，地球上的物质都处于静电吸引力与简并电子气压相平衡的状态。由此可确定地球的平均密度和半径。从而也就确定了地球的质量。地球表面的重力场也就确定了。

人是一种生物，人靠不断的新陈代谢，不断有生化反应在体内进行。这就要求适当的温度。按生物的生长和发育的规律，温度过高则生命过程发展太快，人的寿命就会太短促；而温度太低，生命过程就会停止。而人体内有固态和液态的物质，人的呼吸又需要气体。因此，又需要地球上要有大气。这些都对地球的温度和引力场的大小有一个限制。质量太小，气体就不会存留在星体表面，而会逃逸到太空中去。像小行星和月球表面就没有大气。

另外，人是一种动物。他要运动、要走、要跑、要跳、要能承受相当大的冲击力而不致使人体断裂。因此，要求人体有一定的结构强度和适当的质量，特别是和地球质量的相对比。这是有了人的存在对地球质量的又一个限制。

人的存在，限制了地球的性质，而地球是在太阳系中，它的光和热来自太阳。因此，人对温度的要求又进一步限制了太阳和地球和太阳的相对状态。太阳系又在银河系中，银河系又存在于宇宙中。这样，人的存在就进一步限制了银河系和整个宇宙！一句话：为什么宇宙会是今天这个样子，那就是因为有了“人”！看起来这种说法近乎荒唐，似乎成了宇宙是因为人而存在！我国古代的文人就尖锐地批判过类似的观点。有人说：“天待人太好了，种植五谷供人作粮食，养育鱼鸟供人当菜肴。”而另一年轻人反驳说：“万物的产生都是各自禀了天地之气，不一定是为了人而生长的……蚊蚋吸人血，虎狼吃人肉，那是否上天有意为蚊蚋生人血，而为虎狼生人肉呢？”

的确，从达尔文的生物进化论观点看来，“适者生存”乃是生物进化的基本原则。人类之所以存在，就是因为在长期演化过程中适应了周围的大自然环境而存留下来了。而大量的不能适应者已受自然淘汰而消亡。犹如战场上的英雄，他仅是千百个阵亡战士中的幸存者。但如果从相反的角度来看，既然英雄已经出现了，人们是否可以分析他之所以能存留下来的客观条件呢？能否由他的存在而反推战场甚至整个战争的历史背景呢？我想，回答是肯定的。同样由于人的存在，由人类的进化和生存条件我们反推地球甚至宇宙过去应该是什么样并由此预测其将来，这的确也不失为一种好的科学方法。

的确，宇宙的存在是与宇宙中是否有人存在是没有关系的。但宇宙中既然是有了人存在，它就必然是有适合与人的形成及生存发展的条件，以至使人类有可能来研究宇宙。

然而，要生成人必须首先形成有机物。而它又需要元素碳和氧。这些元素在早期宇宙中是没有的。这就要求宇宙在形成我们的太阳系之前先有超新星爆发，使在恒星演化过程中形成的重元素通过超新星爆发散入太空。我们的太阳系至少是第二代或第三代以后的恒星。太阳系的年龄大约是 50 亿年。地球在其形成后的头 10 亿或 20 亿年，对于有机物的生成尚嫌温度太高。余下的 30 亿年左右才适合于生物发生和发展。如果宇宙大爆炸发生在 100 亿年前，那么再头 50 亿年内是否来得及发生超新星爆发呢？恒星演化理论告诉我们，只有大质量恒星的晚期才可能产生超新星爆发。而大质量恒星的演化时标恰恰远短于小质量恒星。例如，一颗 10 个太阳质量的恒星，其在主星序上的停留时间约为 10^7 年，它仅为太阳的千分之一。它意味着，从宇宙大爆炸到我们的太阳系形成这 50 亿年间可能发生足够多次的超新星爆发，来提供生物形成所需要的重元素。

103. 数以亿计的恒星（太阳）系中的行星都可能是生命的摇篮

地球上从没有生物到有生物大约经过了十亿年的化学演化，逐步形成了相当复杂的化合物。这以后才开始形成了细微的原始生命，产生原生物。人们很难对生命下一个明确的定义。但地球上现有的生物主要是由具有十分复杂的空间结构的巨大的有机化合物分子——蛋白质和核酸分子构成。蛋白质是生物体结构的基本材料，而核酸是存放遗传密码和诱导蛋白质合成的指挥部。蛋白质又可分解成 20 多种氨基酸。核酸又是由 5 种核苷酸组成。这些氨基酸和核苷酸就是谱写出奇花瑞草、珍禽异兽生命之曲的基本音符。它们本身并没有生命，甚至连单纯的蛋白质或核酸也没有生命，但它们一经奇妙地组合，就出现了生命。人类的科学发展史表明，生命就像非生命的物质一样受同样的自然规律支配。虽然我们很想对自然有一致的见解，但是在对待宇宙中有智慧生命的作用方面，人们会一直遇到这样一个难以处理的二重性问题：即人既作为研究对象又作为研究者。当我们问为什么我们的物理学原理是现在这个样子时，要避免谈及活着的观察者也是困难的。当我们思考自然规律与宇宙的初始条件怎样意想不到地允许能够观察它的人类存在的时候，这些秘密是更加深不可测了。我们充分了解宇宙和我们在它中间所处的位置。但我们目前能解释的东西却是很有局限的。地球仍然是迄今所知唯一可供生命栖息的星球，但是科学家们发现宇宙富含生命的化学物质。

射电观测表明，银河系内存在大量的高分子甚至有很复杂结构的分子。如：甲醛（ H_2CO ）、甲烷（ CH_4 ）、氨（ NH_3 ）、甲醇（ CH_3OH ）、氰化氢（ HCN ）等，甚至有包含九个原子的高分子，乙醇（ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ）和丙腈（ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ ）。一般在恒星演化中的生成物中除了氢（ H ）、氦（ He ）、氧（ O ）、氖（ Ne ）外排第五位的是碳（ C ）。水（ H_2O ）是生命必须的“溶剂”，而结构十分复杂的大分子还需要十分容易和其他原子相联络的碳原子组成。这是因为它的最外层电子有四个。我们知道化学元素的最外层电子数决定了它的活性。最外层电子太多或太少都会表现出太大的活性。太多显酸性，太少显碱性。而最外层电子的饱和数除氦为二外其余均为八个，它们组成了不易发生化学反应的惰性气体。因此，组成复杂有机分子的“重任”必然落在碳的身上。这样，

能形成生命的天体就要受到严格限制。就是那些在经过第一代大质量恒星发生超新星爆发后的环境中形成的第二代或更晚形成的恒星系。当然，它们还必须是在数十亿年形成的，以保证有足够的时间完成生命的演化过程。

恒星中有行星系结构的不在少数。70 年代以来，通过红外观测已发现了大量具有气体和尘埃盘的恒星。著名的织女星就是其中之一。1977 年在天鹅座发现有一颗称为 MWC349 的天体。通过地面上的光学观测和空间的红外观测都断定它是一个由气体和尘埃形成的炽热圆盘，亮度一直在下降。平均每月约降低原亮度的 1%，十分符合形成行星系的条件。

早在 60 年代就断定：距太阳仅有 5 至 9 光年，光谱型为 M5 的巴纳德星，有一颗相当于木星大小的伴星，至于是否有地球般大小的伴星，目前的观测手段尚难肯定。但有行星系统则是十分肯定的事。这就有了形成生命的必要条件。对于地外生命的探测无疑是天文学家感兴趣的问题之一。国际天文学会（IAU）第 51 专业委员会的名称就是“地外生命探索”。国际上很多天文台对较近的类似太阳的恒星进行了系统地观测发现：在 100 颗恒星中 1/3 以上有视向速度的细微变化。这表明它们肯定有不可见的伴星。当然，目前尚不能断定它们究竟是双星或是行星系。但无论如何，宇宙中在数光年尺度内，恒星形成行星系的绝不是少数。据估计，仅银河系内具有文明生物进化条件的可能天体就有 10 万个。

最近，天文学家根据由脉冲星 PRSB1257 + 12 发出的无线电发射定时的变化，明确无误地推断出存在着三颗围绕该脉冲星的行星。可能有一个更遥远的可供生命栖息的行星围绕着这颗恒星的残骸运行。有趣的是这些行星是在超新星爆发前就已形成而幸存下来的呢，或者是在爆发后由周围的碎片聚集形成的？无论如何，它们的存在表明行星的形成是一个目前尚无法预料的、常见的和普遍的过程。也有越来越多的证据表明，有一些行星系统环绕着许多类似太阳的恒星运行，它们为生命的发展提供了好的环境。

目前，天文学家正进行着在早期的和成熟的类似太阳的系统中寻找行星的工作。他们将用到大量的新技术。今后的十年中，他们将积累出一张内容十分丰富的清单，其中会列举出地球附近的那些恒星周围的行星。

太阳系内的九大行星中，除地球外最大可能具有文明生物的是火星。1976 年先后两次“海盗号”登陆在火星上对生命的可能存在进行了探测，这两个登陆舱都装备了灵敏度极高的仪器。这些仪器即使在地球上无生命迹象的沙漠和荒原上也能探测出生命。但它们对火星的观测结果是否定的。可以完全肯定地说，火星至少现在是一个无生命的行星。但观测结果表明，在 40 ~ 38 亿年前，火星上的条件可能有利于生命的产生。火星的表面覆盖着远古的河流、湖泊、乃至深达 100 多米的海洋的形迹。40 亿年前的火星比现在的火星要温暖和潮湿得多。不少人因此认为，目前尚没有充分理由排斥火星上可能存在生命或曾经存在过生命。问题的答案在很大程度上取决于这样一个我们迄今尚一无所知的问题：生命能以多快速度诞生。当然，生命现象也可能发生在像土星和木星这些行星的卫星上。不过现在也可以断言，它们上面肯定不存在“人类”。也就是说，在太阳系内，除地球外再没有别的天体上居住有“人类”。

如何建立星系间的通讯联系

104．人类通讯技术发展的历史及第一个讯息所能达到的最远距离

国际上不少天文学家正在尽力通过现有技术手段去发现地外文明生物，特别是努力与地外文明生物发生联系。就目前技术水平，人类可以对太阳系内的天体发射宇宙飞船，甚至登陆其上进行探测并向地球发回信息。像两次“海盗”在火星上登陆那样。但我们已指出，要寻找类似于人类这样的生物，至少要在数光年以外去探索。因此，就人类目前的技术水平而言，近期内想通过宇宙飞船到达其他有“人类”的星球进行“访问”是不可能的。但利用通讯手段确是可能的。

实际上，半个多世纪以来，人类发出的大量广播、通讯、电视、雷达等众多的无线电波，早已传到了几十光年以外。如果这样一个尺度范围内也有“天文学家”在监测他们周围的天体，则他们肯定会发现我们的太阳系是一个特殊的“射电天体”。如果他们也像人类欣赏“天体交响曲”那样去作“频谱”分析、测定红移、蓝移，他们会发现这些信号是极其特殊的。或许他们已有了很多“破译密码”专家已从这些讯号中精通了人类的各种语言，正准备向地球发射他们的友谊的呼号。不过我们要收到他们的回呼也是几十年后的事了！他们的回呼又将用什么语言呢？他们是否会出现一个聪明人，想到把接受到的来自太阳系（地球）的信号用录音设备记录下来而又直接向我们发射回来呢？也许几十甚至几百年后的人们打开他的收音机时突然收到了他的爷爷甚至祖爷爷的播音会感到奇怪吗？那是否会是“外星人”跟人类开的一个小小的玩笑呢！

105．实现星际通讯的基本条件是什么

实际上，要实现星际通讯并非是件容易的事。首先，就人类的无线电技术而言，我们一般总是采用固定频率范围的发射和接收。然而，由于天体间的相对运动所引起的多普勒频移使一个固定频率的信号变成一个随相对速度变化的变频信号，这便增加了信号接收和信号识别的困难。如果对象是某各确定的天体，我们还可以根据该天体与我们之间的相对速度加以修正。当我们并不确切知道信号的来源时，作这种修正就更加困难了。

不少读者也许常接受短波广播节目，领会过信号的起伏变化。这是大气上空电离层变化对电波传播的影响。而在星际通讯中这类影响无疑会更严重，再加上两星体间的星际介质的影响使信号的接收和识别变得更加困难。但科学的发展从来就是迎着困难而前进的。人们曾特别为地外智慧生物提供地球上的信息而发射过功率很强的无线电波。信息的内容包括去氧核糖核酸的组分和双螺旋结构，人体、太阳系以及射电望远镜的数据等等，全部用二进制编码。在接收地外智慧生物可能发来的电波方面也花了很大力量。

1984年国际天文学会专门组织的首次地外生命问题讨论会上，与会天文学家讨论了25年内约50次的射电搜索，从开始的单通道发展到800万通道同时接收。并对90年代的进一步搜索定出了规划。对地外智慧生物的搜索开始列入了国际合作的课题。

探索地球外的智慧生命就是利用大型的射电望远镜、先进的接收器和现代化的数据分析方法去探测假设中的由其他恒星周围的行星上的先进文明向我们发送的信号。在选择用以探索这些信号的适当的波长、通频带、极化性、时间常数和译码算法时必定有着大量的不确定性。尽管如此，由于无线电技术并不昂贵，是容易检测到的，而且可以传递大量信息。1992年10月12日，美国国家宇航局发起了一次大规模的、系统的探索计划。这项计划包括相当

一部分最适宜于星际通信的波长。虽然美国国会在一年后取消了这项计划，但哈佛大学的一位物理学家霍诺维茨等仍经过持续五年的空间观察和两年的跟踪研究后，发现了少量值得研究的无线电信号。这些信号的频带宽度特别窄，看来和地球的转动并不一致，而且也不能认为是由特有的噪声源或干扰源发出的。唯一令人感到困扰的是这些信息源都并未重复出现，这就很难具有令人信服的科学价值。初步研究结果表明所有五个最强的信号源都位于银河平面上。这种排列的概率可能是 0.5% 左右。天文学家认为它们值得作一些更全面的探测。

106. 实现星际航行是可能的吗

近几十年来，人类开始认真地、系统地寻找地外生命的踪迹。尽管至今还没有找到过活的有机体，但仍然有理由对此充满希望。遥控的空间探测器探测到了几个也许曾有生命涉足过的星球，尽管今天已没有生命在那里繁衍生息。

“伽利略”号宇宙飞船现在正飞行在星际空间，预定在 1995 年 12 月到达木星系。它包括一个木星轨道飞行器和完整的探测器。由于技术上的原因，未能把“伽利略”号直接送上木星。这项飞行任务要通过三次重力加速（两次从地球，一次从金星）把它送上征途。1990 年 10 月“伽利略”号因此得与地球相会。科学家利用这意外的机会，安排了一次参照性的试验：利用典型的行星探测器研究了地球上的生命。其结果使科学家受到极大的启发。

“伽利略”号宇宙飞船所测的图像和进行的测定，显示了地球上生命存在的特殊标志，主要有以下四方面：

（1）近红外光谱在 0.76 微米处可发现亮度的急剧减弱。这一明显的吸收特性意味着地球的大气层中有极丰富的氧分子，其数量比太阳系中其他行星上的大好几倍。地球大气层中分子氧的普遍存在是我们了解地球之所以能有生命发生的第一个线索。

（2）覆盖在地球上大部分陆地的色素——叶绿素，引起在波长 0.7 微米附近的吸收。这为探测有生命栖息的行星提供了第二个证据。

（3）明显的甲烷不平衡是地球上生命存在的又一个标志。

（4）“伽利略”号的等离子波测量仪探测到一条来自地球的窄频带的、脉冲的、调幅的无线电发射信号。它们起始于地球表面上的物线电波传播开始能穿过电离层时的那个频率处；这些信息看来不可能是来自自然界（如闪电和地球的磁性层）的无线电波。这些不同寻常的、有序的无线电信号正是人类技术文明的标志。

总之“伽利略”号的这一对地球的意外的探测结果，加强了科学家的这样一种信念；即他们能够探测到其他行星上生命的痕迹，不管这些生命信号和地球上的生命信号有多么的不同。

目前，太阳系内的可疑的有关天体的观测结果虽然没有直接找到生命的存在，但却发现了很多与形成生命有关的有机物质。它一方面证明了生命现象确实不可能是地球上所独有的；另一方面也确实显示了宇航技术和对生命现象的探测技术的巨大威力！

为了在探测范围内与可能存在的智慧生物联络，人类还在先锋号和旅行者空间探测飞船上装了不少资料送往太空。这些资料里包括人体的形象，太阳系的组成，二进制的一些基本常数，一百多张地球文明和风景的幻灯片，记录在镀金铜板上的各种语言、音乐、声响等等。图 36 显示了先锋号所带的

图记。

107. 飞碟可能是星外来客吗

说到“地外文明”也许不少读者更关心的是关于“飞碟”的种种传说。它是从1947年开始在世界上掀起的热潮。后来演变为UFO（不明飞行物）的探索和研究。先后在许多国家建立了相应的组织，还有定期和不定期的出版物。近些年在我国也有相当大的反响。一些人往往把一些现象与人体特异功能及气功等相联系。我们不可能去列举那些事例而只能从科学的观点来分析“天外来客”出现的不可能性。

（1）我们在前面已介绍宇宙间的确可能存在大量的适宜于智慧生物生存和进化的星体。但离地球最近的“候选者”与我们的太阳系距离就有5至9光年。也就是说，如果真的在那个天体上有“人”，而且他们有与地球上的人类相当的科学技术水平。假定他们的宇宙飞船的最高速度已达20个马赫数，那么，他们的飞船要到达地球得在太空飞行15至30万年。这样长时间的飞行至少对于人类目前的科技水平是不可思议的。如果智慧生物离我们更远，那么飞行时间还要数倍甚至数十倍地增长。

（2）如果他们的技术水平远远地超过了人类，以至他们已制造出人们幻想中的光子火箭甚至是“超光速”火箭。他们确实能在有限时间内到达地球。但按人类的设想，他们同时应该解决安全的“软着陆”的问题。因为按人类的实践表明后者应比前者更容易解决。而且如果他们作如此规模的宇宙航行显然只能是为了科学探索，而不可能是给同伴“送葬”。因此，他们在作宇宙航行之前就应该先解决“软着陆”和安全返回等问题。但至今关于“飞碟”的大量传说中并没有一例是进行了成功的安全着陆的。

（3）最后我们来考虑一下“天外来客”访问地球的目的。很多传说要么是“飞碟”突然爆炸、要么是“飞碟”所经之处突然某人失踪或经过多少时间人又复现，但已忘记了过去的一切或者成了废人。这不禁使人怀疑“高度智慧”的“外星人”花费如此大的代价来和地球上的“同类”开一些无聊的玩笑。理智总是和知识成正比的，具有如此高度发达的科学技术的“智慧生物”，绝不可能是无聊的“戏虐狂”或“战争狂”。所以人们总也把可能到来的“外星人”称为“天外来客”而不是“天外来敌”。如果真像“飞碟”所传说的那样，那么我倒要建议人类今后真应改称“天外来敌”了！

总之，关于“飞碟”和“UFO”的种种传说，可以说是无根据地猜测和幻想多余严格的科学考察和研究。

天文学和其他学科的关系

天文现象是文学创造的重要源泉

108. 天象是人类最先认识的客观存在之一

除了人体自身的诸如饥饿、疲劳和受到外界刺激感到疼痛等等感受之外，昼夜变化以及由之而伴随的日、月及星星的升落，是人们最先认识的客观存在。作为自然之物而又要力图认识和改造自然的人类，从他诞生之日起，日、月、星辰的运行就对他产生了某种功利主义的作用。其行动自然地受到天文现象的制约。太阳的东升西落，月亮的阴晴圆缺，都不仅对原始人甚至对今人的生活与行动都会产生极大的影响。我国原始民歌《击壤歌》中写的

“日出而作，日落而息”就生动地反应了天文现象对人类生活的制约。人们一方面受到天象的制约，另一方面却又对于天象充满仰慕、礼赞与讴歌。我国另一首远古民歌《卿云歌》所云“卿云烂兮，纠漫漫兮，日光华，旦复旦兮”即是最好的例证。

人们日常生活中所感受到的“天”，与天文学的“天”存在着某种差别。人们常说：“天要下雨”、“天上打雷”、“天有不测风云”等，其实这里的“天”并不是天文学的“天”。所有前述景象都是地球上大气活动的“产物”。而人们对于“天”的很多概念却来自于它们。特别是对天的恐怖心理多来于此。人们常说的“天气”可能是对于这类现象的概括。用今天的科学划分，它们应属于“气象学”的范畴。当然，它们直接影响到“天象”的观测。天象直接造成人类恐惧心理的事例也不少。黑夜的出现尽管是累见不鲜的，但它往往仍给人们带来某种恐怖之感。日食和月食更给古人大难临头，世界末日来临般的恐惧。彗星的出现，在古代无论中、外都视为不祥之兆。这些感受对于缺乏理性的原始人就已形成。可以毫不夸张地说，没有其他任何自然现象，能像天文现象那样直接地影响到人类的生活、生产、情感和思维等活动。

109. 天体是民间神话故事的源泉

变幻莫测的天空和气象，刚才万里晴空，转眼间变得乌云密布、狂风骤起、雷雨交织。这对于原始人类来说是多不可思议啊！他们要对付这些变化，特别是对付那些灾害性的变化，需要付出多大的努力甚至牺牲啊！正是在这种同类遭到牺牲的恐惧感中，人们产生了对自然的人格化，对它虔诚地加以崇拜。费尔巴哈说过：“唯有自然的变易才使人变得不安定，变得谦卑，变得虔诚。”

不同的生活环境决定了不同民族的性格。在历史的黎明首先在中国（黄河）以及幼发拉底河、底格里斯河、印度河和尼罗河几条大河的流域中。在东方以中国文化为典型代表。而西方，人们知道最多的则算古埃及的人民和巴比伦尼亚的人民，主要是靠了希腊历史学家的著作中的记载。在中国虽然也不少改朝换代的事，但基本是一统天下，一言堂。虽然新朝代往往靠揭露旧朝代而夺取天下，但一旦天下已定仍是维护一套老的封建传统。因此，中国文化必然趋于保守，并维护一个永恒不变的最高统治。

中国的天界也是一个以“帝星”为中心、以“三垣、四象、二十八宿”为主干的组织严密、等级森严的庞大的空中社会。中国人的宇宙意识有几个特点：

- （1）宇宙万物的本体是天。
- （2）天、地、人三界的的关系是不平权的。
- （3）天是至高无上的。天管地，地管人。而天神之中玉皇大帝是至高无上的。天、地、海中龙王以至冥界的大小事都得由他最后定夺。

希腊人的宇宙意识有些与中国的相反：

- （1）宇宙的中枢是奥林匹斯山。
- （2）天上的事务由居于人间神山上的神灵管理。
- （3）天不是至上的，天、海、冥三界的的关系从理论上来讲是对等的。

在不同的宇宙意识的指导下创造了不同的神话故事。而共同点是大多数的故事是以男女间的爱情为背景的。

在希腊神话中，美女卡力斯托因为与万神之父宙斯媾合而遭到天后赫拉

愤怒的报复：母子二人变成了大熊和小熊。宙斯可怜自己的情妇与幽子，偷偷把他们提到天界成了大小熊星座。而盛怒的天后并不甘休。她派出一个勇武的猎人——牧夫座，牵着两只凶恶的猎犬，在后面狂吠，紧紧追赶，使他们疲于奔命，永不停止。

一次，宙斯变幻成美女阿尔克墨涅的丈夫形象，与她发生了秘密的关系，生下赫拉克勒斯。暗中知情的神后赫拉命令两条巨大的毒蛇爬进了孩子的摇篮，但伤心的母亲却惊奇地发现两条毒蛇死在了孩子的手中。后来孩子成长为全希腊最英俊、最雄壮、最勇敢、最聪明的英雄。他战胜了赫拉设在他生活道路上的十二道难关，从而成为希腊神话中最为人传颂的大英雄之一。为表彰他在人间的业绩，宙斯在天上给了他一个光荣的星座——武仙座。还把他除掉的几只凶猛的野兽：墨涅亚巨狮（狮子座）、许德拉九头蛇怪（长蛇座）、狂暴凶残的野牛（金牛座）、巨大有毒的蟹子（巨蟹座）等等，放在边上作为陪衬。

在中国的神话中，则是一些零星的故事。往往同一个人在不同的著作中有不同的面貌。如《山海经》说，羲和是羲和国的姑娘，帝俊的妻子，她生了十个太阳。《离骚》和《淮南子》都把羲和当作驾日车的神，这辆日车由六条龙拉着，羲和乘车驾龙载日，匆匆西奔。后来，也有天马拉车载日西行的说法。以后，六龙四马竟变成了三条腿的乌鸦，如《洞冥记》说：“东北有地日之草……三足乌数下地食此草。羲和欲馭，以手掩乌目，不听下也。食草能不老。”《淮南子》载：“尧时十日并出，草木焦枯。尧命羿仰射十日，中其九乌，皆死，堕羽翼。”后来，这故事又演出后羿之妻嫦娥奔月的故事。《淮南子·览冥训》载：“羿请不死之药于西王母，嫦娥窃以奔月。”是说后羿射落了九个太阳以后，他从西王母那里讨到了一些仙药，吃了可以长生不老。他舍不得吃，要留着跟妻子嫦娥共享，但嫦娥却偷偷吃了仙药飞奔到月宫里去了。而他自己最终也死在了打鬼的“桃棒”之下。到了唐朝。神话又增加了新内容，说月中已长出一颗五百丈高的桂树，有一人叫吴刚，想学仙，犯了过失，罚他砍桂树，但桂树被砍处随即又弥合，因此，吴刚老得那么砍下去，永远砍不倒。后来，他大概也就不砍了，竟酿起桂花酒来了。以至毛泽东写下：“问讯吴刚何所有，吴刚捧出桂花酒”的诗句。

可见，无论中外，人们从对天体的观测中，由日月和星象的变化，想象出各种动人的故事和浪漫的诗句，构成了人类文化的重要组成部分。

天文学和人类的生产活动

110．地球运转规律是制定历法的基本依据

历法是天文学中一个重要的内容。日历对于人类的生产和生活都有重大的意义，因而世界各文明古国历来十分重视历法的编制和研究工作。中国古代一向把历法的改革当做重大国事，自有文字记载的几千年以来，中国历史上曾先后提出过 100 多种不同的历，在世界历法史上占有重要地位。一部好历的制订可以促进生产，在中外历史上都有过因改历不善而导致社会骚乱的记载。

早在 4500 年前，轩辕黄帝就制定了天文历法。《史记》卷一，五帝本纪第一中写道：“于是（尧）命令羲氏、和氏，恭敬的顺应上天，从日月星辰的运行，定出一年的历法，敬谨的把时令传授给百姓，分别命令羲仲住在扬

谷的地方。敬谨的迎接旭日的初升，管理督导春季的耕种。日夜的长度均等，傍晚乌星正在南方出现，依据这景象来定准春分的日子。人民于是都分散到田野里，鸟兽也在生育交尾。再命令羲叔住在南方大交山，管理督导夏季的农作，敬谨的祀日并记下日影。白天最长，傍晚火星在正南方出现，依据此一景象来定准夏至的日子。人民于是尽全力助耕，鸟兽的羽毛也变得稀疏了。再命令和仲住在西方叫昧谷的地方，敬谨的恭送太阳的隐没，管理督导秋收。日夜的长度均等，傍晚虚星在正南方出现，依据此景象来定准秋分的日子。人民于是喜悦和乐，鸟兽也长出新的羽毛。再命令和叔住在北方叫幽都的地方，管理考察农作物的储藏。白天最短，傍晚昴星在正南方出现，依据这景象来定准冬至的日子。人民于是都停留在室中取暖，鸟兽的羽毛也长得茸茸的。确定一年为 366 天，又用置闰的办法来调整四时的误差。确实的整饰百官，各种事业都欣欣向荣。”这充分反映了我国辕黄时代天文学就开始得以发展，并紧密地同人民的生产活动及生活的时日的推算相结合。

也许是由于尼罗河的年年泛滥，古埃及大约于公元前 27~22 世纪就开始根据天狼星的偕日升来预报尼罗河的周期性泛滥。公元前 2000 年左右巴比伦尼亚还把一年定为 360 天，或 12 个月。这种原始的历法十分粗疏，每月 30 天，与朔望月的周期不符；而一年 360 天又与一回归年的实际长度不一致，所以时常加入闰月，作必要调整。但巴比伦人对太阳和月亮的运行周期测得很准确。在公元前 4 世纪末，他们所测得的朔望月和近点月的精度已达秒的量级。可见，他们和古代中国人一样，利用天体的出现于夜空的时间变化来确定农时季节。

一般地说，所谓历法就是推算年、月、日的时间长度和如何协调它们之间的关系，以制定一定的时间序列法则。具体地说，就是安排一年的月数及每人月的天数，使每年能在相同的月份及大体相同的日子发生季节的变化，从而便于按照日历所规定的时日来进行人们的生产和生活活动。当然，年中的月和月中的日都必须是整数。

从天文学观点，“年”的长度实际上反映了地球绕太阳公转的周期。从地球看来，就是太阳在天球上所作的周年运动。然而，如果选用不同的参考点就有不同长度的“年”，现代的历通常是以春分点为参考点，这称为“回归年”——太阳在天球上连续两次经过春分点的时间间隔。其长度大致是 365.2422 日。应该指出的是，回归年并不是地球的公转周期。地球在宇宙空间中的运动是以恒星作参考点，因此其公转周期称为“恒星年”，长度约为 365.2564 日，比回归年略长一些。其原因是因为春分点受岁差和章动的影响，平均每年抽西移动 50″左右。月也是一种比日长的单位，其原来的意义是以月亮绕地球的公转运动为基础的。古代人类很早就利用月亮的这种运动来测定时间。同样，因为参考系的不一就有不同的长度，出现不同意义的“月”。通常可分为：“朔望月”，它是指月相盈亏的变化周期，约为 29.5306 日。“恒星月”，它是指月亮连续两次通过某恒星的时间间隔，长度为 27.3217 日。从理论上说，回归年、朔望月、太阳日是以完全独立的三种运动为基础的时间单位，因而，它们之间没有整数的比例关系也是很自然的。但为了人们生产和生活活动的需要，希望在一定精度下，把它们统一起来，这就是制定历法的基本原则。

111. 天体（特别是太阳）的活动对人类生态环境有直接影响

地球上的生命的起源和演化都离不开太阳的光和热，除了为地球创造了

合适的生态环境外，太阳还以其他方式影响着地球。早在 1801 年英国的天文学家威廉·赫歇耳就发现年雨量与太阳的黑子数的多少有着一定关系，这便是最早的日地关系的研究。近年来“日地关系”已发展成为介于太阳物理与地球物理之间的一门边缘学科。这门学科研究的内容包括：太阳活动的地磁效应、太阳活动的电离效应、太阳活动与极光、太阳活动与宇宙线、太阳活动对气候变化的影响及太阳活动的其他效应。

上面所列举的方面，都是太阳活动可能引起地球上各种活动的变化。经过数十年的资料统计往往呈现明显的相关性。例如，至今人们虽然对于太阳活动如何影响气候的具体机制缺乏了解，但人们对 80 年的降雨量的统计与太阳的黑子活动相比较，发现其间有明显的周期相关性。树木年轮的疏密也与太阳核子数间有一定的关系。

除了太阳对地球的影响而外，过去人们对于其他天体可能对地球的影响是重视不够的。中国流行一句谚语：“杞人无事忧天倾”。天果真是蹋不下来吗？考虑天是否会塌下来的问题会是“庸人自扰”吗？按现代宇宙学的观点，如果宇宙是“闭合的”，那么它迟早是会“塌”的。这是一个严肃的科学问题。而杞人的“忧虑”倒是提出此问题的“先导”了！当然，那将是数十亿甚至是数百亿年后的事了。这对于鄙薄科学的功利主义也许仍是“庸人自扰”吧！但无数的小行星和彗星碰撞地球的可能性大概总不是“天方夜谭”了吧？各个行星和它们的卫星上所留下的“宇宙弹坑”，说明了产生巨大爆炸威力的小天体对行星及其卫星的碰撞事件是频繁发生的。1994 年发生的相当于 5 亿颗原子弹爆炸规模的彗木相撞，如果发生在地球上，那我们这些热衷于“种内竞争”的人类，是否都将成为地球下一个地质世纪的石油资源呢？

天文学和物理学

112. 从牛顿的万有引力到爱因斯坦的广义相对论

从牛顿到爱因斯坦这是经典物理学发展的两个重要标志。人们常说，天体物理学就是将物理学的基本理论用以解释天体的发生、天体的结构和天体的演化的科学。这仅是问题的一个方面。问题的另一方面是天文观测为物理学基本理论的建立提供了地面上无法得到的基本事实。前面我们已介绍，牛顿的万有引力公式就是由开普勒关于行星运动的三定律加以“几何解释”而得到。而万有引力，在物理学至今了解的四种相互作用中，是最微弱的一种。这类相互作用在地面除了重力能有可观测效应外，一般的物理实验难以检测到。而单是重力现象很难作出万有引力的结论。只有在牛顿根据他由开普勒三定律总结出的公式应用于月亮绕地球运转，并归算到地球表面而得到与地面所测的重力加速度在数量上的严格一致时，才使万有引力成为被人们公认的科学定律。因此，万有引力定律的建立，只有通过天文观测才有可能。而牛顿的引力理论又是在天文学中以理论上预言的海王星的被观测证实，达到其成就的光辉顶点。而同样的摄动理论，对水星的近日点进动的计算结果却又暴露了牛顿理论的不可克服的缺陷，从而导致了爱因斯坦广义相对论的建立。

也许会有人觉得，广义相对论讨论引力，自然与天文观测有关。而狭义相对论就与天文无关了。其实不然，狭义相对论的两个基本原理：相对性原理和光速不变原理，可以说都与天文观测有关。相对性原理可以说是天文观

测的基础。尽管天文观测总是在一个确定的坐标系中进行的。但观测的最后结果却能正确地反映天体的本来性质而与坐标系的选择无关。而光速的测定，首先是天文观测中由木星的卫星食的现象测定的。光行差现象也是天文观测首先发现的。而广义相对论的经典检验也全来自天文观测。这些充分说明了天文学与经典物理学之间的密切关系。它不单纯是将物理学作为武器去解释所观测到的天体的物理过程，而在很大程度上它提供了创建新武器的“原始材料”。这些观测结果或者是在地面实验室根本无法观测，或者是天文观测中首先观测到，而后在地面上的实验加以重复或进行更为精确的测定。例如，在牛顿得到万有引力公式 100 多年以后，才由英国的一位化学家卡文迪什通过地面上的精密实验完成了引力常数 G 的测定。

113. 粒子物理和宇宙学

物理学的发展总是和一定的实验技术的发明相互促进的。对物质结构基元探索的粒子物理也是如此。古代人用极简单的机械方法发现了物质的可分性，但最后分成了一些不可再分的小颗粒。这些小颗粒人们称之为“分子”。但燃烧过程却使很多“分子”消失了。但进一步的观察和分析消失了的那些分子又变成了其他形式的分子。人们后来又发现，除了燃烧外，有某些物质放置在一起（或适当加热）也会发生分子间的转化。对所有这些可能的转化的研究，构成了化学的研究内容。人们又发现，在所有的化学反应的过程中，物质仍存在着某些不可再被分裂的基元。而所有的化学反应过程只是由这些不可再分的基元的重新组合。化学反应很长时间成为人们研究物质结构及其转化的主要途径。古希腊人把化学反应中物质的这种不变“基元”称为“原子”。其本意是“不可再分”。电子的发现打破了几千年来原子不可再分的“神话”。原子成了由原子核和核外电子组成。而放射现象的发现表明原子核也是可以再分的。它们由一定数目的质子和中子组成。质子数的不同决定了物质的化学性质，并按数目多少的排列表现出周期性变化。

为了人工“打破”原子核，人类发明了各种类型的“粒子加速器”。它将带电的粒子（电子或质子）加速到极高能量，然后让被加速的粒子流轰击用想“打破”它的核的材料做的“靶”，以观测在预计的核反应过程中所产生的各种粒子、辐射和释放的能量。这类在高能加速器中得到的高能粒子轰击下进行的实验形成特有的高能物理实验。最初通过宇宙射线的观测和高能物理实验发现了一系列的“基本粒子”，粒子物理学家将它们分为四类：即，光子，轻子和强子，其中强子又分为重子和介子。除光子外，所有粒子都有相应的反粒子。光子的反粒子就是其自身。10 年代末又发现一系列奇怪的粒子。如，超子，它是一类比强子更重的粒子。50 年代以后，又发现了大量的短命的“共振态粒子”，致使人们知道的基本粒子竟达四百余种之多，其中人部分为强子。

太多种类的基本粒子使人们开始怀疑它们的“基本”性。大多数物理学家认为这些基本粒子，至少是强子，应当有结构，由少数几种更基本的成分组成。这更小层次的粒子被称为“夸克”。存在着几种不同的夸克——至少有六种以上的“味”，它们分别称为上、下、奇、魅、底和顶。每种味都带有三种“色”，即红、绿和蓝。（显然，这里的“味”和“色”仅是一种形象的称呼，并非通常意义下的颜色和味道。）一个质子或中子是由三个夸克组成，每个一种颜色。一个质子包含两个上夸克和一个下夸克；一个中子包含两个下夸克和一个上夸克。我们可用其他种类的夸克（奇、魅、底和顶）

构成粒子，但所有构成的粒子都将有比质子大得多的质量，并非常快地衰变成质子和中子。

现在我们已知道，质子和中子都是可分的。问题是什么是真正的“基本粒子——构成宇宙万物的基本构件？物理学家常用电子伏特的单位来测量粒子的能量。一个电子从一伏特的电场所得到的能量即是一电子伏特。19世纪，当人们只知道通过化学反应（如燃烧）去使用仅达几个电子伏特的能量时，就把原子视为最小的单位。在卢瑟福的实验中， α 粒子具有几百万电子伏特的能量，于是原子被“打破”了！更近代，人们利用各种加速器，首先得到几百万而后是几十亿电子伏特的能量。人们才知道，20年前所认为是“基本”的粒子，原来是由更小的粒子组成的。为表示更高能量，人们采用了“京”电子伏特。1京电子伏特=10亿电子伏特。而为证实弱电统一理论，人们把粒子加速到了100京电子伏特。这已是目前人类可以“制造”出的最高能量。计划中的加速器可达几千京电子伏特。为了验证物理学中的“大统一理论”，可能至少要一千万亿京电子伏特的能量！看来加速器也只有“望能兴叹”了！于是物理学家把希望寄托于极早期宇宙！天文学家、物理学家、数学家甚至哲学家的智慧都“会师”于宇宙极早期的高能阶段。

114. 核物理学和恒星演化

从天体歌星一生的遭遇中，我们已知道，他们的风华岁月是靠热核聚变过程来维持的。但这些过程都是天文学家，利用了核物理学家在地面上的核实验所得到的数据而加以理论上推测的。

1938年冯·魏扎克注意到所谓碳氮氧循环反应（CN反应），根据计算，当太阳中心的温度为 1.3×10^7 时，使太阳的辐射能源得以解释。在这里， C^{12} 和 N^{14} 起着触媒的角色。但CN反应对温度要求严格。后来，贝特和克列次维特应用费米的 β 衰变理论，研究了质子反应（PP反应）。计算表明，这一反应过程对恒星温度不像CN反应那样敏感。对于太阳来说，两类反应都很重要。但在1950年埃普斯坦发现PP反应在比太阳更高温的恒星中仍很重要。另外，如果在PP反应中考虑到 Be^7 （铍）和 Li^7 （锂）的反应，以取代 He^3 的反应，则PP反应过程所释放出的能量可增大两倍。1953年沙尔彼特提出，由于恒星内的密度的差异，PP反应中的循环过程应作小量的修改。而可能的新的反应过程中由于有 β 俘获，所以可能导致恒星的高密度核中心的不稳定发生。因此，这些过程可以用来处理不稳定的恒星。

总之，天文学家认为，恒星中的物理状态，与地面上取得的核反应数据的状态大不相同，因此，很多地面上没有观测到的核反应过程，恒星中是很可能发生的。如果真是如此，那么现在关于恒星演化的理论，很多部分可能会作根本的修改。这些设想，还得通过地面的核反应实验加以证实。核物理学家为此正努力通过低能重粒子加速器得到的低能重粒子的对撞实验来验证一些核反应过程的可能性。当然，这些实验的完成是十分困难的。现在，“核天体物理学”和“天体核物理学”等边缘学科正应运而生。

115. 是视超光速膨胀还是真实的超光速运动

早在1905年爱因斯坦发表的关于狭义相对论的第一篇论文《论动体的电动力学》中就明确指出：“对于 $v=c$ （光速），一切运动着的物体——从“静”系看来——都缩成扁平的了。对于大于光的速度，我们的讨论就变得毫无意义了；此外，在以后的讨论中，我们会发现，光速在我们的物理理论中扮演着无限大速度的角色。”稍后一点，在讨论电子的动能时他又指出：“当 $v=c$

时, W (电子的动能) 就变成无限大。超光速的速度——像我们以前的结果一样——没有存在的可能。”在 1907 年, 爱因斯坦又发表了一篇文章《相对性原理及其结论》, 又指出: “从速度加法定理还可以进一步得出一个有趣的结论, 即不可能有这样的相互作用, 它可以用来作任意的信号传递, 而其传递速度大于真空中的光速。”如果有这种大于光速的相互作用存在, 爱因斯坦通过他的速度合成计算公式又指出: “这个结果表明, 我们必须承认可能有这样一种传递机制, 在利用这种机制时, 结果竟比原因先到达。在我看来, 虽然这种结局单从逻辑上考虑是可以接受的并且不包含矛盾, 然而它同我们全部经验的特性是那么格格不入, 所以 (可能有相互作用的传递速度大于光速) 的假设的不可能性看来是足够充分地证实了的。”由于狭义相对论的成就, 于是不可能存在有大于光的速度几乎成了相对论的等价语, 同时人们下意识地吧时序认为是绝对的, 并把时序的绝对性等同于物理学中的因果关系。

60 年代初, 一些物理学家提出一种假设的亚原子粒子, 称为“快子” (tachyon), 其速度总是超过光速的。人们认为, 它的存在是与只适用于光速或小于光速运动的粒子的相对论并不矛盾。正像电子只在速度小于光速才存在一样, 快子也只有在速度超过光速时才能存在, 这时其质量才是真实的且为正值。快子在失去能量时就会加速; 它运动得越快, 具有的能量越小。人们提出了很多的实验设想, 企图发现这种粒子, 但至今毫无结果。

有趣的是 60 年代末射电天文学家, 通过甚长基线干涉仪 (VLBI) 发现一些活动星系核和类星体, 如 3C120、3C345、3C273 等, 几个类星射电源的两个致密子源以很高的速度分离。如果这些天体确实是位于宇宙学距离, 两子源向外膨胀的分离速度将超过光速, 最大的可达数十倍光速。由于人们不愿意怀疑爱因斯坦不可能出现超光速运动的结论, 因此, 怀疑具有超光速分离现象的天体并不处于宇宙学的距离上, 即认为类星体的红移并非具有宇宙学意义。但像 3C120 就是塞佛特星系, 因此, 对距离的怀疑被否定。于是人们又说, 这类超光速现象是一种“视”现象。用了一些自相矛盾的模型来加以解释, 但都不能彻底解决问题。至今, 观测到具有超光速膨胀的天体已有近 50 个之多。特别是 1994 年天文学家又利用甚大阵观测到一个超光速膨胀的天体是在银河系内。也就是说, 它根本就不是利用红移来确定的距离。这就完全避开了宇宙学的问题。

80 年代初, 由于甚长基线干涉仪的改进, 使观测结果不仅能准确给出数值, 而且能给出图像。特别有意思的是, 70 年代和 80 年代的观测数据间发生了明显的跳跃, 似乎显示这膨胀是一个加速过程。这就更增加了这类超光速膨胀的神秘色彩。天文学家总想把它归结为仪器改进过程中带来的某种变化。但加速的膨胀过程被观测所直接得到了。在 3C345 中就观测到一个具有加速度的非径向过程。面对这些观测特点, 本书作者发现, 无论是径向的或非径向的膨胀过程, 都十分好地符合广义相对论中史瓦西解的类空测地线所描述的运动规律。这就引出一个十分有趣的问题: 即天体的超光速膨胀现象是一种真实的超光速膨胀过程吗? 广义相对论是与超光速运动相洽的理论吗? 科学发展史表明: 一切科学思想, 只有当计算结果与观测的数值相吻合时, 才是正确和有价值的。那么这里的吻合竟是一个例外吗?

我们发现, 如果假设物理时空是遵从芬斯勒时空 ds_4 , 则我们可以建立一个既包含超光速运动又保留狭义相对论全部性质的新理论, 我们把它称为

“ 芬斯勒时空中的相对论 ”。从数学上来看,早在 1854 年黎曼就曾指出:“ 几何学的基础既可以用二次微分形式的平方根定义度量,也可以用四次微分形式的四次方根作为度量函数。”从物理学考虑,这里定义的时空包含了“ 时序的相对性 ”。考察人类关于时空观念的发展可知,人们最初把空间和时间都视为绝对的,即认为人们对时间和空间的度量都与观测者的运动状态无关。但后来发现,人们对物体空间位置的观测是与观测者的运动状态密切相关的。牛顿力学就是建立在由伽利略变换所描述的时空结构的基础上的。牛顿和伽利略的时空认为空间是相对的,但时间对于所有观测者都是不变的绝对量。而爱因斯坦发现,时间也是一个与观测者运动状态有关的相对量。当物体以接近光的速度运动时,随速度增加,其长度在缩短和时间在变慢。但爱因斯坦认为时序是绝对的,并把时序的绝对性与物理学的“ 因果关系 ”等同起来。相对论的成就使爱因斯坦的这些观点成为当前物理学的“ 正统观点 ”。也正因为如此,狭义相对论必然排斥超光速运动的存在的可能性。但正如前面所指出,狭义相对论实际上只适用于光速或小于光速的运动。对于大于光速的运动它不再适用。爱因斯坦正是用罗仑兹变换来研究超光速的运动问题,当然会遇到矛盾。实际上,如果真有超光速的运动存在,那么同时性的定义就不再是普适的。因为我们不能设想,光信号能够追赶上比它运动得更快的客体。但此时还能在狭义相对论的两个假设前提下来讨论物理问题吗?简单分析表明它仍是可能的。我们只需假设客体朝着观测者“ 飞来 ”,于是原则上观测者所发出的光信号总是可以到达以任何速度运动着的客体并由它反射回来的。但此时会出现一个与直觉相悖的情况。即当客体处于超光速运动时,观测者先发出的信号将后反射回来,而后发出的信号反而先被反射回来。我们将这种现象称为时序的相对性。也就是说,一系列的事件发生后,并不像直觉那样,一定是先发生的事件无条件地先被任何一个观测者观测到。直觉上时序的这种“ 绝对性 ”只有对以小于光速的运动才无条件地成立。也许有人马上会说,先发生的事件后被观测到,这岂不破坏了因果关系了吗?人们往往认识到时间的不可逆反的性质。但常常却忽略了事件序列的发生和它们被观测者所观测到,这两件事间的差别。一系列事件(可能是有因果关系的也可能没有)按先后顺序发生了,但它们按什么顺序被观测到并不是因果问题。因果性只严格限制每一个事件必然是先发生后被观测到。如果一个事件先被某观测者观测到而后才发生,这自然是违背因果规律的。但已经发生了的两件事,哪一件先被某观测者先观测到,这却不是因果问题,而是信息传递和相对运动速度大小的问题。一序列事件可能按发生顺序被观测者观测到,也可能按相反的顺序被一个观测者观测到,这就是“ 时序相对性 ”。

为说明时序的相对性,让我们举一个简单的例子:设想有一个具有 N 辆车的车队,所有的车都以速度 $V=200$ 公里/小时,向相同方向按时序 $1, 2, \dots, N$ 离开某地。对于每一个以速度 $U < V$ 的观测者,他们只能按顺序 $1, 2, \dots, N$ 这个车队的每一辆车,但当观测者以速度 $U_1 > V$ 运动时,则他们既可按顺序 $1, 2, \dots, N$ (当 U_1 和 V 方向相反时),也可能按顺序 $N, N-1, \dots, 2, 1$ (当 U_1 和 V 的方向相同时)。也就是说,当观测者的运动速度低于车速时,他所观测到每辆车的顺序与车发出的顺序严格一致。此时,时序是绝对的。但若观测者的运动速度高于车速时,时序的绝对性便被破坏了。观测者完全

可能按车发出的相反顺序观测到每一辆车。这绝不是因果关系的破坏，而是当观测者的速度大于车速时，因果关系的新的表述形式。

在芬斯勒时空中的相对论，把爱因斯坦的相对论作为一部分保留下来。通常的相对论，为了保持度规的正定性，人为地把闵柯夫斯基时空中的类空部分给扔掉了。这里流传着一个小故事：在 1908 年 9 月闵柯夫斯基发表了她的《时间和空间》的论文，把爱因斯坦的狭义相对论的时空结构作了很好的几何解释。但爱因斯坦本人没看懂这篇论文，并说：“闵柯夫斯基把我的相对论弄得我自己都不懂了。”遗憾的是三个月后闵柯夫斯基因割除阑尾而离开人世。而在芬斯勒时空中，类时和类空是对称的。度规 ds_4 对于亚光速和超光速的运动都保持正定。因此，在新的时空结构下无论是空间长度和时间间隔、运动元粒子的动量和能量的表述都不对其速度有任何限制。而在小于光速和大于光速之间存在某种对称性。

利用芬斯勒度规定义的时空的另一个特征是，它所描述的时空具有突变性质。也就是说，时空并不总是连续的。它存在某些临界面，在这些曲面上，时空性质会发生不连续的突然性变化。而爱因斯坦相对论中的光锥和视界恰好就是临界面。而临界面上发生突变的结果就是出现亚光速和超光速运动的“分裂”。因此，超光速运动和亚光速运动是由一定能量的“光子”突然分裂而成对产生的。反之，也由亚光速和超光速“粒子对”同时转化为“光子”。这里由于作者的偏爱，已花了太大的篇幅。人们常说：一个好的实验结果，往往别人都相信，唯实验者自己不信。而一个理论的提出恰好相反，往往只有自己相信，别人都不信。按此标准，我只盼望读者们看了以后都不要相信才好。

这里无非想说明，如果有一天，终于有一个描述超光速运动的物理理论，被人类的实践所证实，从而被广泛接受，那么，请读者相信，那个理论必定是基于天文学的观测。

116. 致密天体和高致密物质状态

我们已知道，当恒星中心的核能源用尽之后，它将逐渐变成一颗“冷星”。但由于它们的质量的差异会导致不同的结局。通过引力坍缩，形成密度极高的天体，称为致密星。致密星大体可分为三类，即白矮星、中子星和黑洞。我们也已知道，白矮星是天体的引力与简并电子气压力平衡的结果而形成的稳定结构。天体最后形成巨大的“铁块”。虽其规模地球上不可能见到，但铁却是地面上极常见的物质状态。天上也常掉下“陨铁”。因此，白矮星的存在并不会引起人们的大大惊奇。最多感受到“天体歌星”开办了规模如此巨大的炼铁厂。这竟是人力所不能及的。理论上指出，当物质密度在 $10^6 \sim 10^9$ 克/厘米³ 范围时，简并电子气的压力占主导地位。这限制了白矮星的质量范围。而一旦天体的引力超过了简并电子压力，引力将使天体继续坍缩，直到形成简并中子气，如果简并中子气足以平衡恒星的引力，那么，天体将形成中子星。中子星的物质密度达 10^{15} 克/厘米³，半径的量级是 10 公里。

早在 1932 年，中子刚被发现不久，朗道就曾提出过有可能存在由中子星组成的致密星。到 1934 年，巴德和兹维基又分别提出了中子星的概念。当一颗较大质量的恒星用完了核燃料后并最终发生引力坍缩时，中心的压力激增而把电子压到核内，与质子结合成中子，形成中子星。物质由引力收缩放出的巨大能量使恒星发生超新星爆发。

尽管理论上已预言了中子星的存在，甚至建立了中子星的简单模型，但

直至 60 年代后期才从观测上发现了脉冲星,并证明它就是以极高速度旋转着的中子星。无论是理论分析或者是天文观测,都表明这类星具有某些极端的物理条件。如超高温、超高压、超高密度、超强磁场和超强辐射等极端的物理条件。这些条件在地球上无法实现。因此,脉冲星的发现不仅极大地推动了天体演化的研究,而且极大地推动了在极端条件下物理过程和技术的研究和发展。

近些年,还有人设想用脉冲星极稳定的辐射频率作为新的时间标准。

117. 宇宙极早期和量子宇宙学

前面,我们已大体介绍了宇宙的演化 and 发展的历史,并显示了宇宙的极早期有一个物质高度致密、形式上导致密度无限大的奇点时期。此时,天文学家遇到一种不能在广义相对论的框架内来描述,而要求用另一种更加一般的理论来处理的情况。由于现代量子理论预言了非常接近奇点时期的量子引力效应,而爱因斯坦的引力理论是一种非量子化的经典理论,它不能描述由在整个宇宙尺度上量子化所产生的效应。现在,首要的问题在于如何确定一个界限,在它以内通常的理论可以应用,而越过此界限就必须考虑量子引力效应了呢?

人们从物理学和天体物理学的普适常数着手。目标是确定一个宇宙的曲率半径,考虑一些起决定性作用的物理量。如,反应引力效应的引力常数 G , 表征量子效应的普朗克常数 h , 和象征相对论效应的光速 c 。由它们的某种组合人们得到了具有象征意义的三个常数:

普朗克长度 $r_{Pl} \approx 10^{-33}$ 厘米,

普朗克时间 $t_{Pl} \approx 10^{-43}$ 秒,

普朗克密度 $\rho_{Pl} \approx 10^{93}$ 克/厘米³

由上面的三个数我们可以从三个方面来划定经典理论的应用范围。从长度尺度来看,如果曲率半径小于普朗克长度 r_{Pl} 或可相比拟,则量子引力效应就不容忽略。也就是说,此时广义相对论不再成立。从时间来看,当宇宙年龄小于普朗克时间 t_{Pl} 时,人们必须用量子理论来研究宇宙的演化。从物质密度角度来看,普朗克密度超过现时宇宙的平均物质密度 120 多个数量级,就是与原子核的密度相比普朗克密度也要大几乎 80 个数量级。这表明,在通常广义相对论的框架下来考虑宇宙中原初核合成过程是合理的。普朗克密度对于黑洞理论的研究可以给出明确的限制。

上面,我们仅仅讨论了理论应用范围的划定问题,并未涉及量子宇宙本身。实际上,量子宇宙本身,在理论上是一个远没解决的问题。它涉及量子引力理论或称为时空量子化的问题。目前,人们采用半经典理论即所谓的“弯曲时空中的量子论”来处理黑洞和早期宇宙中的一些量子化过程。其中心思想是:将广义相对论中所得到的各种时空度规中,各有关量用相应的量子化算符取代,并用协变微分代替普通微分,来建立方程和求解方程,并由此得到物理体系的各种特征。人们利用这种理论更多的是研究黑洞的某些量子化的过程。

118. 关于时空量子化

所谓时空量子化问题,实质上就是量子引力问题。爱因斯坦的广义相对论,通过等效原理的假设表明,引力场中物质运动规律与其自身的质量大小无关。也就是说,引力场中的运动元粒子的特征只决定于由场物质质量所确定的时空的几何特征。其实,引力场中物质的运动与其质量无关的事实,正

是伽里略斜塔上做落体实验的结果。后来人们发现它意味着物质的引力质量和惯性质量的严格相等。这一推断已通过精密的物理试验在 10^{-12} 的精度范围内被证实。爱因斯坦从这一事实抽象出等效原理并将其推广到所有物理过程。由此，爱因斯坦发现，表征引力场性质的几何量就是时空流形的曲率张量。这里我们说的时空曲率不同于通常的空间曲率。如图 37 所示，一粒子弹和一个铅球飞行了相同的距离，而它们的空间曲率大不相同。但若将它们各自的飞行时间乘以光速作为时间轴，则两者的“时空轨道”的曲率是完全相同的。这个曲率将唯一地表述地球的引力。

爱因斯坦还由通常的黎曼曲率张量引出一个协变微分为零的爱因斯坦张量，从而，与物质的能量-动量张量结合得到爱因斯坦引力场方程。因此，现在人们一谈及引力问题就想到“弯曲时空”。反之，说到“弯曲时空”就想到万有引力。因此，引力量子化问题往往也说成时空量子化问题。不过，后面的说法更直观，也更能表现问题的困难程度。

我们知道，宇宙中的任何事件（甚至包括宇宙自身）都是在时间和空间中发生的。每个人本身也是存在于某段时间过程内占有-一定空间体积的实体。按现代科学观点，人类的思维活动也是人体内的某种特殊形式的物质的运动过程。也就是说，它也是在时间和空间中进行的。而在量子化的引力理论中，空间和时间的形态将要受到不断的扰动，甚至过去和将来之间的差别也可能变得模糊起来。仅凭人的直觉这就是难以想象和把握的。

时空的量子化还涉及时空的拓扑性质的一些基本问题，如，连通性问题。平常我们想象在空间画一条任意的闭合曲线，它总可以连续地收缩到一点。这类空间数学上称为单连通的。但如果我们在一个圆筒形的柱面上画一条绕圆柱体一周的闭合曲线，则这条曲线就不可能被收缩到一点。这是多连通空间的一个最简单的例子。有兴趣的读者不难去找更多的多连通的例子，如类似于面包圈的环面等。这里我们不再多讨论。多连通时空会产生很多奇怪的结构，如，“蛀洞”，“时间隧道”等。关于这些可能不少读者已从科幻小说或科幻电影中遇到过。总之，量子引力是一个充满幻想但在科学上远没有解决的问题。

其他学科

119. 宇宙观是哲学的基本课题

西方哲学是从泰勒斯开始的，他曾预言过公元前 585 年的一次日食。这种巧合是否恰好揭示了天文学和哲学的姻缘关系呢？哲学和科学是不可分的，而天文学又是科学的“基础科学”，那哲学和天文学当然更有不可分的内在关系了！人们所说的“哲学的”人生观与世界观乃是两种因素的产物：一种是传统的宗教与伦理观念，另一种则是最广泛意义下的“科学的”那种研究方式。至于两种因素在哲学家的体系中占何种比例，则各个哲学家大不相同；但唯有这两者在某种程度上的同时存在，方能构成哲学的特征。哲学的意义随时代不同而在演化发展。柏拉图将哲学分为辩证学、物理学和伦理学三部分。亚里士多德将哲学范围更加扩大，几乎包括讨论宇宙与人生的一切学问。

在中国古代，诸子百家中虽然名目繁多，相互鄙薄。但关于天地起源问题，却是大家都在探讨的问题。他们虽有各式各样的见解，但这些见解大体

可分为三类：即创世说、自无生有说和气化说。创世说的代表，如屈原的《问天》，他一开始就问道：“宇宙的原初情况，是谁传下来的呢？那时连天地都未形成，又从哪儿去考察呢？昼夜尚未分明，谁又能看清楚呢？整个宇宙只是混沌一片，根据什么来认识它呢？”而老子的“道生一，一生二，二生三，三生万物。”和《易经》中的“无极生太极，太极生两仪，两仪生四象，四象生八卦，八卦生万物。”都可说是从自无生有说的代表。而气化说则主张天地万物都是由气或元气演化出来的。在宇宙模型方面则有：盖天说、浑天说、浑盖合一说和宣夜说。这里我们不作介绍。但说明中国古代哲学家和西方哲学家一样，总是把宇宙观作为一个重要课题加以论证。

科学的发展不仅改变了人对自然的认识，而且也改变了人对自身的认识。特别是人在自然界中地位的认识。自从哥白尼以来已经很显然的是，人类并没有从前人类所自许的那种在宇宙中的特殊的重要地位。人类突然从以我为中心的宝座上跌落下来。凡是没有彻底领会这个事实的人，绝没有资格把自己的哲学称为科学的哲学。

120．没有正确的理论就没有正确的观测结果

人们常喜欢说一句话：“眼见为实”。看来它似乎不错，但我们已反复指出过，科学的发展正是对“眼见为实”的否定。人们天天见到的是太阳东升西落。于是人们想象，是太阳神驾驭着踏着火云的骏马，把太阳拖着沿着圆形轨道奔跑。在中国如我们已介绍过的也有羲和驾日车的传说。所以，公然敢说“不是太阳在奔跑，而是地球在转动”的布鲁诺被当众烧死。通常科学家的形象不像战场上的英雄那样高大，也很难激发诗人的灵感，但为了维护他们所发现的真理往往也得付出血和生命。

我们说过，物理学家总是带着成见进入他们的实验室的。天文学家何尝不是带着成见走到望远镜旁呢？大量金钱和高精技术堆积起来的为数有限的现代化设备难道还能让人用以“守株待兔”吗？天文观测中确实也需要一些守株待兔式的观测。如不规则轨道彗星和超新星的发现，都有如大海捞针。不过现代天文学发展中这些观测更多已属业余天文学家做的事情。但即使这类观测，也需要一定的理论指导才可能更有效地发现新的对象。例如，超新星总应该到晚期恒星较多的天区去寻找。因为它们是大质量恒星演化到晚期的产物。

大量的天文发现虽然常说是“偶然”的。但这些“偶然”是基于某种技术的突破基础上的对于一些现象的深入思考。由于射电源强度的起伏变化及星际闪烁的发现。为了观测这种被认为是太阳风所造成的闪烁，英国剑桥大学射电天文台专门设计制造了一架观测行星际闪烁的仪器。这台望远镜有两个重要特征：首先是接收面积大（约27亩），而且很灵敏；其次是时间常数短，可观测射电信号的迅速涨落，而且它经常在天空的同一天区上扫描。它很适合于观测发现脉冲星。此外，正如脉冲星发现者之一的贝尔所说，还加上运气和艰苦的工作，终于发现了脉冲星。虽然是在寻找类星体时偶然发现的，但这偶然中却包含了很多必然。另一方面，如果没有中子星的理论模型的预先提出，即便是观测到了脉冲信号，也未必能想到它就是旋转着的中子星。或许至今人们还怀疑它是“小绿人”，为存在地外文明提供一个“证据”！可以说，任何一个实验或观测，离开了正确理论的背景，将得不到任何的积极结果。人们常说：机遇总是偏爱素有准备的心思。

121．中国的古代文化有着人类最早的最完整的天象记录

我国古代有着对天象的最早的完整的记录。除了对历法的制定并注意观测天体的运动和相对位置以准确确定农时外，中国古代人还特别注意“客星”的观测。古代中国人的“客星”包括彗星、新星和超新星。大约在公元前 1300 年左右，中国留存世界上最早的新星记录。图 38 就是刻在甲骨文上的这次记录。甲骨文中的“七日己巳夕兑𠂇新大星并火”，就是记载的在心宿二附近爆发的一颗新星（或超新星）。

1965 年，席泽宗和薄树人详细考究了中、朝、日等国的古书资料，从公元前 1300 年到公元 1700 年的有关天象资料中，整理出了 90 多次有关新星或超新星的记录，其中中国观测到的有 68 次。而在同一时期内，阿拉伯和欧洲国家中，总共只有可数的几次新星和超新星的记录。这项工作为历史地研究超新星提供了资料基础。

按现在已知的超新星星表，利用上述考查结果，证认出分别于公元 185，393，1006，1054，1181，1572，1604 年爆发的七颗超新星，中国都有详细记录。其中 1054 超新星尤其受到全世界的关注。这颗超新星在我国有多个记录。例如，《宋会要》中记有：“至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日”；《续资治通鉴长编》中有“至和元年五月己丑，客星出天关之东南可数寸”，“嘉佑元年三月辛未司天监言：自和元年五月客星出东方，守天关，至是没”。从这些记录中可以看出：这颗超新星于 1054 年 7 月 4 日（即至和元年五月己丑）爆发，位于金牛座 ζ 星（天关）附近，最亮的时刻有 23 天，甚至在白天还可见，直到 1056 年 4 月 6 日（嘉佑元年三月辛未），才不能再见到它。现在已确认，这颗 1054 所留下的遗迹就是著名的蟹状星云。可见，我国古代 1054 年对超新星的记录为检验现代天文学理论提供了极有价值的观测依据。

此外，我国古代对恒星的观测，并用太阳与它们的相对位置来确定季节也很具特色。对行星及日食和月食的观测中也有十分详细的记载。这里我们不再详述。有兴趣的读者可阅读有关书籍。

122. 人差方程式促进了实验心理学的发展

1796 年格林威治天文台的皇家天文学家马斯基林辞退了助手金内布鲁克，因为金内布鲁克观测星体通过（或星之中天）的时间，比马斯基林迟约一秒钟。马斯基林深信 1794 年间，他的观测从未相歧。1795 年 8 月，金内布鲁克所记录的时间比马斯基林迟二分之一秒。他对此误差很是注意，且似曾力求纠正。然而其后数月，这个误差确仍有增无已，至 1796 年 1 月，竟达十分之八秒，于是马斯基林辞退了他。因为钟表的准确度当时是由天象的观测加以校准的，而对时空的观测又依赖于钟表，所以马斯基林认为此种误差是严重的。20 年后有人著格林威治天文台史述及此事，并刊布于《天文学报》，因此引起了柯尼斯堡的天文学家贝塞尔的注意，其时他恰好任该处所设一新天文台的主任。此人为当时天文学精确测量的代表人物，他不受传统观念的束缚，怀疑金内布鲁克的观测或许是一种不能避免个人观测误差。他通过训练有素的不同观测者进行反复的观测试验，发现不同人之间确实存在着不可避免的差异。

1823 年他有机会和阿革兰特尔共同观测。贝塞尔请阿革兰特尔观测七颗星，他自己则由观测决定钟表的校正。星体上升的准确时间算出来后，与 1821 年同样的星的类似观测和计算作一比较，贝塞尔本人也作了观测，也作了钟表的修正。发现，两位天文学家的人差可以表示为： $A-B=1.223$ 秒。这就是

后来称之为“人差方程式”的著名方程。

方程的发现，不仅为比较不同天文学家的观测结果提供了理论和实践的依据；而且为实验心理学的发展。人们观测天象并记录时间，这无疑是一个心理过程。这心理过程需要时间，而这个时间是可以测量的事实被发现则大有助于反应时间的研究和 19 世纪下半叶新心理学的心理时间的测量。

日新月异的天文观测技术

123. 各类天文卫星得到的新信息

空间技术的成就，使空间天文出现突飞猛进地发展。从开始的高空气球到探空火箭，以至各类空间天文观测站，使短短 10 多年内红外天文、紫外天文、x 射线天文、 γ 射线天文、极紫外天文都有了令人鼓舞的发展。这些绕轨道运行的天文台从不同频段得到一系列持续的数据流，勾画出一幅幅动态的、常常又是谜一般的宇宙的生动情景，进一步拓宽了对宇宙的认识。所得到的大量数据将成为探寻宇宙结构和演化的重要线索。

火箭是中国人最早发明的。据记载，早在北宋开宝三年（公元 970 年），冯继升和岳义方两人就成功地试验了火箭。1863 年，法国的凡尔纳的《从地球到月球》的科幻小说出版，不久又出了《环绕月球》，两本小说描写了几位探险家乘一枚飞弹去月球探险的故事。据说，小说中所描写的飞行状况，竟与美国阿波罗第一次登月的实际飞行状况如出一辙。这或许说明小说家的科学素养是很高的。现代科学火箭理论的先驱是俄国的齐奥尔科夫斯基。他第一个提出火箭使用液体燃料，推导了在发动机工作期间火箭获得速度增量的公式。

第一次成功地利用液体燃料制成可实用的火箭，是二战期间的法西斯德国。他们研制了 V—1 飞弹和 V—2 火箭，妄图以此扭转注定失败的战局。但它并没有改变法西斯死亡的命运。战后，美国和前苏联都是在 V—2 基础上发展了各自的火箭和洲际导弹。我国也是从 50 年代后期开始在 V—2 的基础上开始了火箭和导弹的研制。这个战争的怪胎和冷战的产儿却为空间天文的发展提供了坚实的技术基础。开始，人们发射人造卫星和登月火箭只不过是“冷战”以“科技”面貌出现的新形式。正是 1970 年 4 月美国发射的为监测地面核爆炸的两颗卫星发现了宇宙的 γ 射线爆发，它被认为是 70 年代天体物理学的一项重大发现。

人造卫星成功发射后的第一项天文观测成就是通过地球空间的探测发现了地球的两个辐射带。它是由美国第一颗人造卫星“探险者”1 号、“探险者”4 号和 1958 年 12 月发射的“先驱者”3 号所取得的。接着，美国和前苏联都对月球进行了大量的探测。从 1959 年 10 月 4 日发射的“月球”3 号，首次成功地拍摄到月球背面的传真照片，以后美苏又数次登月。如，阿波罗的六次登月，仅采回的月岩、月壤样品就有 400 多公斤。又对水星和金星也进行了大量考察。探测方式有绕转飞行、逼近飞行、硬着陆和软着陆等四种方式。对火星和木星以及行星际空间和彗星都多次发射卫星和飞船。总之，近代天文学中的任何一个数据的取得，是大量人力和物力的付出的结果，而不是单凭热情和美好愿望就可以想象出来的。

此外，对于红外、紫外、x 射线和 γ 射线辐射，世界各国也发射了数十枚卫星或空间观测天文台。取得了大量的令人吃惊的数据。目前，世界上拥

有卫星发射能力的国家，唯一没有自己的天文卫星的就是中国的天文学家。但他们仍努力在国外同行所取得的丰富的第二手资料中去赶超世界先进水平。下面我们介绍几个以发射的或计划中的天文卫星或空间天文台。

宇宙背景探测器 (COBE)：这是美国国家宇航局于 1989 年底发射的专为观测宇宙大爆炸的微波背景辐射的天文卫星。卫星携带了三种互补的检测仪器：一组较差微波辐射计，一个偏振迈克尔逊干涉仪，一个红外滤波光度计。每种仪器都测定宇宙背景辐射的不同方向，并提供了为测定宇宙背景辐射的灵敏度。较差微波辐射计将测量宇宙微波背景辐射的大尺度各向异性，其误差小于十万分之一。这种仪器所取得的数据将用来研究现代宇宙中的大尺度结构形成的“种子”、宇宙各向异性的膨胀和旋转、引力波、物质的大尺度流动和宇宙弦。迈克尔逊干涉分光仪，将用来测量 1000 个天区中每一个从 1 厘米到 100 微米的宇宙微波背景辐射谱。还将以误差小于千分之一的精度，测定该谱偏离黑体谱的程度。第三个检测仪器叫弥漫红外背景实验仪，它将测定天空中 1~300 微米波段的绝对亮度，对来自早期宇宙的弥漫红外光（来自第一代的原星系、星系和恒星的光）进行当时最灵敏的搜寻。卫星在 1991 年取得了十分重要的结果。可以说，它的观测结果，使宇宙的均匀性和各向同性由过去的科学假设变为受观测直接检验的自然规律。

康普顿 γ 射线天文台 (CGRO)：1991 年 4 月 5 日，亚特兰蒂斯号航天飞机携带着 16 吨重的康普顿 γ 射线天文台从佛罗里达州肯尼迪航天中心发射驶向太空。这个具有四台仪器的高能空间天文台在发射两年之后，就已取得丰富的天文发现。最令人激动的观测结果就是关于空间 γ 射线爆的分布性质。康普顿天文台发射前，天文学家对此爆发现象似乎已得出了一个合理而又得到广泛承认的解释。根据这一理论，认为爆发起源于中子星的塌缩残余星体表面上的地震破裂、爆炸或小行星的撞击。但康普顿天文台的发现完全出人意料。在过去的几年中，上面的仪器平均每日观测到一次爆发。但这些爆发完全是均匀跨越天空的。它们没有表现出沿银盘或是沿其它任何方向集中的迹象。在爆发源的距离分布上也得到一个截然不同的型式。如果爆发源在空中是均匀分布的，则暗爆发源应比亮源多得多。但令人吃惊的结论是：此卫星的观测表明，地球处于一个延伸到有限距离的爆发源球形集合的中心。天文学家们一直在开动脑筋努力构想可能形成这种分布的天体和物理模型。但至今没有一个令人满意的意见。在一次天文学家的会议上进行了一次别开生面的举手表决，反映天文学界在星系晕解释和宇宙学解释之间大体分为相等的两派。只有一少部分人倾向于爆发刚好发生在太阳系之外的模型。我国天文学家，南京大学天文系教授陆钊认为，这是本世纪来天体物理学出现的第三次大争论。第一次是关于星云的性质，它导致了银河系以外的星系的发现；第二次是关于河外星系光谱线红移的解释，它导致了大爆炸宇宙学模型的诞生；而这第三次关于 γ 射线爆的争论目前刚拉开了序幕，它必将导致天体物理和宇宙学观念上的更大突破。

极紫外探险者 (EUVE)：1992 年 6 月 7 日一枚——型火箭将 EUVE 送入到地球上空 550 公里的轨道上。这颗卫星的性能超过了人们的期望。通常人们普遍相信，星际气体会吸收来自近邻恒星、更不用说来自河外天体的所有紫外辐射。而 EUVE 所探测到的大量天体中，除了白矮星、冕活动星（指具有活动冕的恒星）、中子星和太阳系中的行星状天体（所有这些天体都是在这—高频带发出辐射）外，EUVE 令人意外地还探测到 10 个银河系外的极紫外

辐射源，拓宽了人类对宇宙认识的窗口。虽然目前人们尚不清楚将会有什么样的发现，但迄今的结果已是相当令人鼓舞的。这颗卫星将是一颗跨世纪的观测卫星！它将在其轨道上稳定地运行到下一个世纪。

新一代的红外望远镜——红外空间天文台（ISO）和空间红外望远镜（SIRTF）：我们知道，红外天文学在红外天文卫星（IRAS）发射后取得了很大进展。临近世纪之交，欧洲空间局（ESA）和美国国家航天局（NASA）将分别把两颗重要的空间红外卫星送入太空。ISO 是一颗高 5.3 米、直径 2.3 米、重 2500 公斤的红外天文卫星计划于 1995 年 9 月 19 日发射。它将在天文学和天体物理学的很多领域做出新的贡献。如，太阳系天体、恒星际介质、恒星及其周围物质、星系学和宇宙学。对于宇宙学，主要着眼于棕矮星和原始星系的观测。棕矮星是质量比木星大，但小于 0.08 个太阳质量的天体。它是否存在对于宇宙“暗物质困惑”的解决有很大的关系。SIRTF 原来计划是美国四大空间望远镜之一。其他三大望远镜即 1990 年发射的哈勃空间望远镜、1991 年发射的康普顿 γ 射线天文台和计划于 1996 年发射的 x 射线空间望远镜（AXAF）。由于经费的困难，压缩了 SIRTF 的规模。它的总投资约 4 亿美元。预计观测四大轴心项目：原始行星系盘、寻找棕矮星、超红外星系和活动星系核及宇宙早期的演化。

SIRTF 的极高灵敏度可对 3000 光年以内的原始行星系统作出认证。其高效的深度巡天可对棕矮星的存在及其质量做出有力的统计性答案，预计它可探测到红移为 5 的超红外星系和类星体。深度巡天的曝光时间将长达几小时。这些照片将能为研究早期宇宙中星系的形成和演化提供重要的统计数据。

124. 哈勃空间望远镜（HST）

1990 年 4 月 25 日，“哈勃”太空望远镜从“发现号”航天飞机的货舱里疏散开来，开创了光学天文学的一个新纪元。地面上设置的光学望远镜，从伽利略的原始小型望远镜到最新式的凯克望远镜，都受到地球大气层瞬息多变的扰动的干扰，也就是我们平常看到的星星在“眨眼睛”。它严重地影响我们对天体的准确认识。哈勃空间望远镜则能利用它离地面 610 公里的有利地位，空前清楚地观测宇宙，是人类欣赏天体交响曲的 HiFi！

哈勃空间望远镜与地面的现代化反射式望远镜相同。直径 2.4 米的主镜收集光线，收集到的光线被分配到 5 台分析仪器内。由于人为的疏忽，发射前未能准确地测定主镜的曲率，致使望远镜的聚焦曾一度出现问题。很多机械方面的和设计方面的其他毛病降低了它的能力。这些困难曾一度使许多天文学家感到沮丧。还遭致了新闻界的批评。但这些困难和批评并没有吓倒望远镜的设计师和天文学家，他们临时作了一些程序上的变更和新颖的计算机图像修正技术，使“哈勃”空间望远镜的灵敏度仍可以与地面最精致的望远镜媲美，其分辨能力也超过了后者。而且，哈勃空间望远镜能探测不能穿过地球大气层的紫外线。

“哈勃”空间望远镜在头两年的工作中还是发回了大量令人眼界大开的图像，揭示出了宇宙天体的光谱形式。它奇迹般地观测到了土星上的风暴、恒星的诞生和死亡、隐藏在星系中心的神秘天体（也许是巨大的黑洞）。它的发现之中虽然还没有可被称得上是革命性的，但综合起来考虑，却足以使天文学家们值得重写他们的教科书。

天文学家特别急于想获得利用哈勃望远镜拍摄的超新星 1987A 的遗迹的

照片，超新星 1987A 是 1987 年初在大麦哲伦云中出现的一颗明亮的超新星。也是人类有了现代观测手段以来观测到的一次最猛烈的宇宙爆炸。1990 年 8 月 23 日，哈勃空间望远镜的暗弱天体照相机对超新星遗迹 1787A 作了 25 分钟的曝光，所得的图像清晰地显示出遗迹四周有一个直径为 1.4 光年的发光环，这使很多天文学家感到惊奇。这个环最令人感兴趣的是，它看起来是椭圆形，而不是圆形的。说明其特征不是一个三维壳层，好像是一个真实的物质圆环，与我们的视线成 43° 角，故成椭圆形。估计，这个环不是超新星本身产生的，而是被排出的原始红巨星外层的幽灵般的残存物（参见彩图）。

1993 年 12 月 2 日“奋进号”航天飞机带着七吨器材飞向太空修理哈勃空间望远镜，给主镜加上了矫正镜。12 月 30 日拍到矫正后的暗天体的清晰图像，表明矫正完全成功。望远镜 70% 以上的光聚集在 0.1 角秒之内，比地面上的大型望远镜的分辨率提高了十几倍。1994 年 2 月，修复的哈勃空间望远镜拍得苏梅克—利维 9 号彗星的照片，它清晰地显示出这颗彗星分裂为 20 个小彗星的彗头和彗尾的图像。在人们关心彗木相撞的新闻热潮中我国电视和报刊广泛地采用了这张照片。这也反应了哈勃空间望远镜的“社会效益”。

125. 月球上可以建立天文台吗

月亮是地球唯一的天然卫星。除流星等偶然落入地球大气的小天体外，月球是离地球最近的天体。古代人们就向往着月宫，按照月亮中变化的阴影想象出嫦娥奔月，吴刚伐树以致酿出了桂花酒。20 世纪 50 年代末，人类的空间技术终于把人真正地送进了“月宫”。月宫虽然不像中国古代传说那么美好，但至少还不是立即致人于非命的“天上炼狱”。于是人们幻想 21 世纪月球将建立起人们的生产、生活特别是宇宙航行基地。但月亮上没有大气，这无疑给人类生活带来巨大的困难。但我们已知道，没有大气却是天文观测的最好条件。所以，对于天文学来说，月球可能是理想的地方。在其表面建立天文台也许会得到异常详细的星空视野，打开研究宇宙的新窗口。天文学家分析认为，月球上天文台的分辨率将令人吃惊地超过当前地面的光学仪器，也许会超过 10 万倍以上。这种天文台将打开一扇可探测极低射电频率的宇宙的新窗口，它们直至可能通过引力波和中微子的难以捉摸的中性粒子的研究开辟出天文学的一些新分支。

美国一些天文学家，打算 21 世纪在月球上建造天文台。上面介绍的天文卫星比起地面观测确实具有很多优点。但这些低轨道卫星从长远来看存在一系列致命弱点。如，大量卫星的残骸和发射火箭的碎片将污染天文卫星的环境，可能会严重地损害望远镜灵敏的光学部件和仪器；在卫星的高度上仍然有尘埃和气体，它们能模糊或混淆天文的谱线观测；地球大气的阻力会使卫星慢慢地沿螺旋轨道堕回地球。这个过程还受太阳活动的影响；再有，地球本身就是遮挡辐射的主要源泉；最后，近地轨道卫星会遭受到迅速的热变化和引力变化，这些变化限制了轨道上望远镜的尺度，从而也限制了它的分辨率和灵敏度。因此，下一代的空间望远镜的发展前景有两种可能选择：一是高空的地球同步轨道（距地球 37000 公里作轨道运动）；另一个就是把仪器放在月球表面（距地球 384000 公里作轨道运动）。月球上建造天文台有很多天然的优点。主要可归结为以下几方面：

（1）月球上提供了一个巨大的天然平台，足够人类建立庞大的天线阵。

（2）月球上的引力场的微弱，减轻了仪器结构强度和制造的困难。而且对仪器的操作和控制也变得更易。

(3) 月球是一个非常稳定的平台，登月探测表明，月震放出的能量比地球上平均地震能量小一亿倍，月震产生的月面移动约十亿分之一米。这样的稳定性对于光学干涉仪是极为有利的，因为要求可见光光学望远镜“联网”两个基元望远镜之间的距离精度就要在零点几光波波长之内，即大约一千万分之一米。

(4) 月球上的另一个优点是它没有大气，因此，能给予天文学家所有感兴趣的辐射的清晰视野。可能只有建立在月亮上的天文台才可能实现全波段观测。

(5) 据考察，月球两极附近的某些环形山似乎总是阴暗的：据认为这些地区的温度约为 70 开，适合大多天文测量仪器所要求的低温环境。

(6) 最后，月球上存在很多制造望远镜的矿物资源。

当然，月球上建造天文台也不是没有缺点的。地球上，由于大气的存在好像加了一个防护罩，一般的小流星进入地球大气后，由于高速运动与大气间的摩擦所生之热将流星烧蚀。而月球就没有这种“防护罩”。因此，容易遭到各种流星的撞击。为此，必须给各类设备加上特殊的“保护罩”。

对于其他波段的观测，月球上也许只是提供一个更优越的条件或环境。而对于波长约为一公里的极低频射电波的观测，这只有在月球背面才可能实现。这个探测宇宙的诱人的新窗口，可以通过建立月球低频天线阵 (VLFA) 来打开。美国的很多天文学家研究了这种天线阵。VLFA 约由 200 多个偶极天线组成，它们中的每一个都类似于长度为米的电视接收天线。天线以一种圆形的方式分布于直径 20 多公里的区域内，它对于 50 千赫到 30 兆赫之间的辐射是最敏感的。如果能最后克服种种技术上的困难，就可期望 VLFA 迅速产生科学效果。天文学家将能够用它来研究太阳耀斑中高能粒子的加速过程，并使得建立太阳高能事件预警系统成为可能；它对一米光学太阳监测装置的工作是一个补充。天文学家还可以用 VLFA 来研究行星际磁场、超新星遗迹、脉冲星以及河外射电源中的高能电子流量，这些都是能量巨大但却至今了解甚少的天体物理过程发生的地方。VLFA 将有可能探测行星际和恒星际介质的结构。最后，低频观测将使天文学家可能一睹奇妙的低能过程，这种过程总是与活动星系和类星体的许多看得见的状态特征共生的。

总之，我们有理由期待人类长期来不断仰视并梦想攀登的月亮，不久将为人类的天文学的发展做出新的贡献！

126. 从底片成像到 CCD

上面我们介绍的都是望远镜设备，它们或者被置于地面，或者是被置于人造卫星甚至天然卫星——月球。望远镜的作用是将微弱的星光尽可能地聚集起来，但对于极微弱的星光即使通过望远镜聚集了，仍然很微弱。因此，还得通过适当的转换器件将望远镜得到的光变成可测定的信号。这种转换器件称为探测器。最简单而又常见的“探测器”就是人的眼睛。当然，人眼只能感受可见光。一般来说，不同的辐射波段所用的探测器也不同。但所有探测器有一些共同的要求，即它们的“性能指标”。这些指标是：

(1) 量子效率：它表述探测器接收并记录下信息的能力。具体地说，就是射入探测器的光子数和产生光子事件数之比。

(2) 响应度：即输出信号与射入的辐射信号的功率之比，它也称为灵敏度。一个好的探测器还要求有好的线性特性。

(3) 分光响应：它也称分光灵敏度，是指单色的灵敏度，理想的探测器

对所有波长应该一样灵敏，常称为非选择性的，但大多数探测器都是有选择性的，不过这只需对不同频率加以简单修正。

(4) 探测率：探测器能探测到的最小辐射功率的倒数。它主要是受到仪器噪声的限制。

(5) 分辨率：通常用角分辨率来表征。分辨角越小越好，分辨率就越高。常常人们一问望远镜的性能，总是首先想到它的“放大倍数”。其实一台好的装置，主要是看它的分辨率。好比给你拍张照片，如果放大到一平方米，但分不清鼻子和眼睛，那么你肯定很生气并要求重拍。但如果一张一寸的照片，各部分轮廓非常清晰，你必定也是十分满意的。

我们将不同频段辐射常用的探测器列入下表：

如果把人眼作为探测器的基准，让我们来比较一下探测器的性能变化。实验表明，正常人眼的灵敏度——能觉察的最小辐射为 5×10^{-17} 瓦，相当于 $5 \sim 14$ 个光子的作用。人眼对于颜色也有非凡的分辨能力，而最敏感的波长在 550 纳米附近。人眼的瞳孔直径最大为 $6 \sim 8$ 毫米，而白天仅有 2 毫米左右，最理想的情况下，人眼可分辨 $0.5'$ ，而通常仅能达到 $1'$ 左右。在亮度分辨上，人眼通常只能识别 1% 以上的亮度差，且有强的“视觉暂留效应”，所以人眼无法记录不同瞬间的光子，加之人眼的反应是非线性的，所以人眼不可能对天体进行较准确的定量观测。

照相技术发明后，照相底片很自然地成了探测器。历史上它确实对于天文学的发展做出了特殊的贡献。它的最大优点是可通过延长曝光时间而把微弱的辐射累积起来。但底片有很多致命的缺点，首先是量子效率低。大约只有百分之几的入射光起到成像的作用。由于感光的溴化银的颗粒性和玻璃层及乳胶层都会影响成像的扭曲。此外，底片不能记录天体的瞬时变化。利用光电效应制成的各种光电器件，如，光电管、光电池、光敏电阻和光电倍增管等很大程度上克服了照相底片的缺点。如，灵敏度高，尤其是光电倍增管可将初级电子数放大 $10^8 \sim 10^{10}$ 倍。光电器件的线性度较好，也便于测量天体的快速变化。但它们的灵敏度有老化现象，且在使用过程中有随辐射强度增强而增大的疲乏现象。更为致命的缺点是，它们不能像照相那样直接显示出图像。

光电像转换器的出现使电子接收器发生了很大的飞跃，它们既有光电倍增管那样的定量化测光的能力，又能如照相那样直接变为可见的图像，因此很快地发展起来，逐步用于天文观测中并有取代其他探测器的趋势。光电像转换器有不少类型。1967 年法国巴黎天文台研制出一架“电子成像机”，其灵敏度到足以探测到一单个光子。现在的电子照相机可以高效率地记录天体的精确图像，它特别适合于暗弱天体的测光和分光工作。“像增强器”又称为像管，其组成与电子成像机很相似，不同的是把后面的底片换成了荧光屏。因此，成像可用肉眼直接观测，也可用底片记录下来。采用几个单级管串联后，亮度增益可提高一千至十万倍，曝光时间可缩短到普通照相的千分之一，特别是它能提高对红外波段的敏感度，因此，可应用于红外波谱区。1970 年，诞生了第一台光子计数照相机，它能精确探测同单个光子相应的信号，甚至可以观测那些亮度比天空背景还暗的极弱天体，其缺点是它绝不能用来测亮的天体。

电荷耦合器件 (CCD)：70 年代初期，出现了大功率的电荷耦合器件 (CCD)。其主要特征是消除了一般接收器无法消除的“解读噪声”，实现了

接收器的一次飞跃。加之它是固体元件易于微型化，且性能和结构稳定，使用安全可靠。因此，它很快成为了空间和地面观测的理想器件之一。美国有人于 1982 年 10 月 16 日用原来极限星等为 20.4^m 的 5 米望远镜加上 CCD 后最早探测到回归过程中亮度还仅为 24.2^m 的哈雷彗星。由此可见其性能较一般器件的优势。CCD 在天文观测中的重要性正与日俱增。目前我国的望远镜也都先后换上了 CCD，领先的是云南天文台。CCD 还可用于其他波段。北京天文台的红外望远镜就采用了 CCD 作为探测器件。现代一般的摄像机，也采用了 CCD 作为成像探测器件，当然它只须满足人眼的视觉需要，故对精度要求，特别是线性度的要求远不如天文观测。所以流行比起天文观测更快、更广。天文学家预计，CCD 不久将完全取代光子计数照相机。

127. 从射电阵到甚长基线天线阵

随着现代科学技术的突飞猛进地发展，射电天文的观测手段更是日新月异。从 1932 年首次对银河系进行射电观测开始，射电望远镜的灵敏度平均每十年提高两个量级；分辨率由几十个角度提高到精于 0.001 角秒，也就是说提高了近一千万倍。其典型标志就是 60 年代初发展起来的基于射电干涉仪系统的“综合孔径技术”的出现。它已是建造新一代射电望远镜的有力基础。除了追求高灵敏度和高分辨本领外，也有效地提高了各类射电源成像的保真度。

所谓射电干涉仪系统，是把两个或更多的射电天线所接收到的同一个射电源的信号叠加起来。如同光的干涉现象那样，适当调整各天线所收到的电磁波间的相位差使之形成干涉图象。我们知道，如果两个电磁波的光程差是波长的整数倍且达到接收机的信号同相位，则两信号彼此加强产生极大值；而如果光程相差半波长的奇数倍，且到达接收机的电信号的相位相反，则两信号相互抵消产生极小值。因为光程取决于源与天线间的相对距离，所以相干信号一方面反应了有关射电源的位置和结构，另一方面受到地球自转的影响。由于地球自转所引起的光程变化，使接收到的射电信号产生在同相位与反相位之间的振荡，从而干涉仪的输出电压形成在极大和极小值之间变化的正弦函数图形。这种振荡图形称为“干涉条纹”。相邻条纹间的距离与天线之间的距离及射电源的角尺度有关。相距较近的天线（或称为短基线）对就产生较宽的条纹，这些宽条纹，对应于射电源的较粗的结构；而相距远的天线（或称长基线）对所探测到的较密的条纹，对应于射电源的精细结构。为了取得有关射电源结构较完整的信息，就必须用许多不同基线去探测同一天体，以取得各种各样的干涉条纹。因此，由许多天线组成的天线阵可以综合成为一个特大孔径的射电望远镜。基线长短以及取向的分布是综合孔径望远镜成图的最基本元素。为了得到不同的基本元素，可以采用不同的方法。如，可将一些天线置于可沿轨道滑行的车上，也可在固定的天线阵中取不同距离的天线的组合。实际上，地球自转自然地改变了基线相对于射电源的取向和投影长度，因此，若干个小时的连续观测可以达到增加许多基线的效果。按这种方式构成的射电天线阵称甚大阵（VLA）。例如，位于美国新墨西哥州高原沙漠中的 Y 形 VLA 是当前世界上威力最大的综合孔径射电望远镜。它由 27 座直径 25 米的可灵活操作的抛物面天线组成，它们被安排成 Y 形的三条臂状，每条臂上的 9 座天线可用特殊的运输车沿铁轨移动，通常可按需要组成四个阵列，其最大跨度分别为 36，11，3 和 1 公里。天线可在 75 兆赫到 23 京赫间的 7 个频道中接收来自宇宙射电源的辐射。对于 23 京赫的辐射源，VLA

的分辨率可达 0.1 角秒。无论在角分辨率和灵敏度及图像的保真度方面，性能都超过了地面上最好的光学望远镜。

观测表明，对于许多类星体和活动星系核中的致密射电源的研究，往往需要射电望远镜的分辨率高达 0.001 角秒。所需的望远镜的基线要比 VLA 的尺度大几百倍。于是射电天文学家又发展了“甚长基线天线阵”（VLBA）的技术。它是在甚长基线观测仪（VLBI）的基础上发展起来的与地球尺度相当的甚长基线阵。当然，如此遥远距离的天线要直接用波导管来联结是很不现实的。然而，把每座天线所接收到的信号记录在磁带上，送到中心实验室，然后使磁带同步播放以模拟同时接收到的信号却是很现实的。60 年代初发展起来的 VLBI 技术在过去的 30 年里取得了巨大成功。现在，美国、欧洲、中国、澳大利亚、巴西、加拿大、日本、韩国和俄国等都建立了 VLBI 观测站。当然，要真正实现世界各地的天线的“联网”还有很多技术上的和其他困难。但目前的 VLBI，就已经取得了前所未有的分辨本领的高质量射电源图像，使人们对各类天体现象的认识发生了实质性的变化。

对于 VLBA 情况就更不同了。举个例子说，正常人肉眼的分辨率为 1 角分，目前地面最好的光学望远镜的分辨率为 1 角秒，即为人眼的六十分之一。而 VLBA 所提供的最高分辨率是 0.0001 角秒，是人眼的六十万分之一。假如人的眼睛有如此高的分辨率，那么他站在珠穆朗玛峰顶可以随意阅读张贴在北京城里的报纸啦！可惜中国神话中的千里眼没有具体的分辨率的指标，所以这里无法跟他比较。不过我猜想，千里眼是远不如 VLBA 的。实际上，VLBA 早已清晰地“看”到了 20 亿光年以外的“宇宙边缘”了！有兴趣的读者可以自己比较他们的精度。

在天文尺度上，VLBA 能够区分银河系内两个相隔 1 个天文单位（即一个平均日地距离，它相当于 1.5 亿公里）的天体。或者说，能从类似太阳系的体系中区分出轨道大于地球的行星。对于宇宙中最遥远的天体，VLBA 能够区分出一光年的尺度，为研究活动星系核和类星体中的能源动力学问题和高能粒子的输运过程，提供了强有力的观测手段。此外，VLBA 天文可以用于研究脉冲星、宇宙分子微波激射、矮星的非热辐射、活动双星系统、银河系内的黑洞、星际物质的闪烁、引力透镜、天体测量和视差测量等一系列有意义的天体和天文现象。另外，VLBA 对于大地测量、地壳动力学和航天都有重要意义。这些方面 VLBA 已在 VLBI 的基础上取得了大量成果。我们这里不再详细介绍。

人们一方面期待着 VLBA 的进一步的成果，另一方面却又朝着更高的目标攀登，更高分辨率的射电望远镜将延伸到太空。目前，日本等国正在计划发射特殊的 VLBI 卫星。计划中的 VLBI 卫星其远地点距离是 8 万公里，其角分辨率可达 2×10^{-5} 角秒。这座空间射电望远镜将专门用于对类星体、活动星系核和宇宙微波激射的研究。

结束语

天文学发展的几个阶段

128，观测手段的发明

人们常说，天文学的成就等于大望远镜的尺寸和大脑尺寸平方的乘积。

这一方面反映了天文学发展中理论和观测相结合的重要性，另一方面说明了观测仪器的发明制造对天文学发展所起的举足轻重的作用。在日新月异的天文观测技术中，我们已介绍了近些年人类在天文观测手段的发明和制造方面所作的努力和取得的初步成就。

大自然赋予每个人一台精巧的双筒望远镜——我们的双眼。借助于它，人们看到了满天的星斗和日月。但这台“仪器”虽精巧，尺寸太有限。因此，它把银河系视为“牛奶河”。我想，伽里略一定不满意牛奶河的概念，或许他相信光线总是来自一些具体的光源，于是他想揭示这天河的“结构”，1609年他制成了口径为4.4厘米的望远镜。在他的望远镜下，肉眼中的天河果然是由一颗颗明亮的恒星组成。这是人类天文观测的一次大飞跃，也是光学天文学发展的开始。1668年牛顿制成了第一台牛顿式反射望远镜。虽然在17世纪后半叶它并没有对天文发现做出重大贡献，但到了18世纪反射望远镜却大显神威。1789年赫歇尔制成了一架口径1.22米、焦距12.2米的当时世界上最大的巨型望远镜。当时，天文学家对是否存在银河系结构有着种种猜测，但赫歇尔通过大量天文观测，并采用抽样统计方法，分区计数恒星数目以及亮星与暗星之比，在一些粗略的假设下，获得了一幅扁而平、轮廓参差、太阳居中的银河系结构图。赫歇尔的工作从观测上证实了一个比太阳系更高一级的天体系统的客观存在，这是人类对宇宙认识史中的又一个飞跃。以后的一百多年中，人们一直把太阳视为银河系的中心。但观念的转变不是靠想象，而是靠艰苦细致的天文观测。1918年，沙普利通过对球状星团距离和方位的确定，才证明了银河系中心不是太阳所在处，而是在人马座方向离太阳数万光年处。赫歇尔发现的大量云雾状斑点的天体，直到1923年哈勃通过威尔逊山天文台的1918年建成的2.54米的反射望远镜，识别了星云中的造父变星，才确定了河外星系的存在。可见，观测仪器的建立，是天文学发展的先导。

射电望远镜的建立导致了60年代天文学的四大发现。总之，天文学的每一个数据的取得，每一项重大成就的出现，都需要人们的巨大投入。上面我们已介绍，尽管各个国家经济上都会出现各种困难，但天文学家仍在千方百计地克服困难，努力建造更新、更大的设备，以便更有效地获取藏在宇宙深处的信息。为了欣赏壮丽的宇宙天体交响曲，人们几乎是不惜任何代价啊！

129. 基本观测数据的获得——数量大，周期长

建造天文望远镜是要花费财力和人力的。利用望远镜进行观测更是一个艰苦和细致的工作。观测天文学大师第谷，26岁开始从事天文观测。近30年的科学生涯使他累积了大量的行星运动的观测资料，直到他55岁去世时不得不将他大量珍贵的观测资料遗赠给开普勒，要求开普勒继续完成他的未竟事业。天文学家常把通过天文观测而得到大量数据的工作，称为第谷型的工作。它是天文学发展的第一阶段。今天，科学技术高度发展，天文学家的观测工作当然不会像第谷那样艰苦，高度自动化的设备，计算机的数据和图像的快速处理功能，使人们几乎可以一边喝着咖啡一边聊着天就可取得所要的数据。但由于天文现象变化的缓慢，很多现象需要我们历时数十年的数据才有决定性意义。验证广义相对论的经典观测事实之一，水星近日点的进动速率就是每百年43角秒。这些数据绝非一两年的观测就能最后确定的。为了确定恒星的自行，常常需要比较相隔50年的恒星照片。这些实际上都要求几代人持续地工作。

一般情况下，对天体大体可分为两种类型的观测。一类是对个别特殊天

体的观测，另一类是“巡天”观测。

对单个特殊天体的观测，是“抓典型”的观测。它是通过个别天体特征的研究推动一般研究。或因其特殊而往往导致重大发现。例如，对一些类星体和活动星系核，通过个种波段上的观测进行了相当详细的研究。从x射线波段的连续谱能量分布推测这些天体的能量辐射机制；甚长基线干涉仪观测证实50多个这类天体有超光速膨胀运动；光学观测发现它们很多有光学喷流结构；紫外光谱显示银河系对它们典型谱线吸收等。这些观测也都是在这类天体发现已来的三十多年的时间内持续进行的。1974年泰勒等发现了一颗射电脉冲星PSR1913+16。它与当时已观测到的所有的射电脉冲星都不同，观测直接证明它是双星系统中的一员。观测数据表明这双星系中的两颗星都是致密星。从PSR1913+16脉冲到达时间的微小变化，他们猜测这变化可能是由引力波辐射造成的质量损失而引起的。为此，他们又进行了四年多的监视性观测，分析脉冲到达时间的变化。最后定量地证实了引力辐射阻尼理论是正确的。

“巡天”观测是为了通过对大样本的统计研究而得到对于某类天体的整体性质，所进行的数据采集。这类观测和研究在天文学发展中起过不可估量的作用。最典型的事例可算是20世纪初“赫罗图”的建立。它是以测定大量恒星的光度和色指数（反应恒星温度）为基础。在这里，重要的不是对个别恒星的详尽研究，而是获得足够均匀和完备的样本。哈勃定律的建立虽然只用了24个星系，但定律建立后成千上万的河外星系和更大红移的类星体已得到，为了检定它们是否遵从哈勃定律，从而验定大爆炸宇宙学的观测基础，这也需要对大量星系的红移和标准烛光进行“巡天”。20世纪80年代以来，为了进行宇宙大尺度结构的研究，揭示星系和星系团间的相关性和成团特征，从而加深对星系的形成和演化的认识，这也要求对星系的大样本“巡天”。需要确定大量星系的空间方位和距离（红移）。北京天文台正在进行的利用60/90厘米施密特望远镜的多色巡天，预计对500个天区对于星系和类星体完整样本的采集，其副产品是这些天区的恒星。他们预计两年内完成四分之一的“小巡天”。由此看来，如果完全顺利，也至少得八年时间才能完成全部巡天任务。此外，在每张0.9平方度天区的巡天底片中会有数以万计的天体的像。以500张为单位计的巡天底片又得花费多少人力和物力去分析和处理啊！

130. 经验定律的总结

人们往往还多少带点同情和钦佩的心情来看待从事实际观测的天文学家。每当夜深人静，人们都进入梦乡之际，他们正紧张地工作在望远镜旁。尽管是在欣赏来自宇宙天体的动人的交响曲，但成年累月地处于这种状态也不免使人感到枯燥乏味。因此，像那些“第谷型”的天文学家，也不愧称为在天文观测中默默奉献的英雄。

但人们往往容易轻视利用观测资料进行的“统计”工作。其实，对科学发展有着举足轻重作用的正是这些通过“统计”得到经验定律的工作。天文学中常称为哥白尼或开普勒型的工作。它被认为是天文学发展的第二阶段。最初，人们通过朴实的天文观测，发现行星的运动轨道不是人们想象中的“圆”，而是在那里“兜圈子”；正是哥白尼第一个由这些视运动观测，推测出了地球绕自身轴的自转和绕太阳的公转。而开普勒又从第谷遗赠给他的宝贵资料中总结了他的关于行星运动的三个定律，为牛顿建立万有引力公式

提供了原始素材。如果没有赫罗图的发现，人们肯定无法认识恒星的形成及其演化的一生。没有哈勃定律的发现，人类大概还会坚持宇宙永恒不变的陈旧观点。总之，天文学发展的第二阶段是带革命性的。它往往需要天文学家更多的魄力和勇气。某种意义上，理论模型的建立只是把经验定律加以数学化的技术问题。在物理学的发展中也不乏这种例子。从法拉第的电磁流线到马克斯威的电磁场方程的得到；从普朗克常数的发现到量子力学的建立都是相似的过程。

从认识论观点来看，天文学发展的第二阶段是一个由表及里即由现象到本质的认识跃变过程。人类只能从事物的相互作用和相对变化中去认识事物。也就是说，人们直接认识的只能是事物的表面现象。只有人们将大量的表面现象通过比较、加工，去掉假象的东西，逐渐留下一些反映本质的内在规律。“统计”的方法本质上只是把这思维过程加以几何化或定量化。人们常用“直方图”把得到的结果直接表示为几何图像。将一些随机变化的偶然因素尽可能除掉而留下人们预计的内在规律。毛泽东在《实践论》中指出的：“理性认识依赖于感性认识，感性认识有待于发展到理性认识，这就是辩证唯物主义的认识论。”是同样的道理。

131. 理论模型的创立

正是牛顿将开普勒关于行星运动的三定律总结成了万有引力公式。这是天文学发展的第三个阶段。这个阶段的发展并不是一个单纯的“翻译”工作。某种意义上它是一个“统一”的努力。本质上来说，人类认识事物的过程就是一个“统一”的过程。列宁在《唯物主义和经验批判主义》中指出：“下‘定义’是什么意思呢？这首先就是把某一个概念放在另一个更广泛的概念里。例如，当我下定义说驴是动物的时候，我是把‘驴’这个概念放在一个更广泛的概念里。”顾名思义，牛顿万有引力的“万有”当然就是一种统一了。实际上他正是把当时人们相信是截然不同的落体和天体的运动找出了统一的根源——引力。如果仅仅这样，还不是物理定律。只有当牛顿把他的公式用于月亮绕地球的运动，并用月亮运动的轨道参数归算到地球表面，所得到的引力与地面上通过精确的物理实验所测量的结果严格一致时，那么，他的猜测（或假设）才可能成为被人们接受的物理定律。从这个意义上来说，一个科学定律，比一个哲学上的思辨有更严格的要求。能量守恒，哲学上形成这个概念就比科学上确立能量守恒定律早一百多年。人们往往借此来说明哲学对科学的指导作用。其实，事情正好是倒过来的。一个逻辑上自洽的观念，哲学上就是可以接受的。但科学上还不能构成定律。就能量守恒而言，它是在摩擦能将机械能转化为热能和热能也可以推动机械转化为机械能的大量客观事实的基础上，再通过精确的物理实验，准确地测定了热功当量，从而在热能和机械能之间能通过数学表达式唯一地描述每一个具体的转化过程，此时，能量守恒才在机械运动和热运动间成为一个物理定律。它是否能推广到电磁运动或其他物理运动过程，还得由新的实验加以鉴定。当然，一个逻辑上矛盾的东西，肯定是不大会得到任何实验支持的。这或许就是人类思辨的威力。也许有人深信：逻辑上自洽的东西，自然界中一定会存在。但至少目前并没有被人类的实践所完全证实。但科学家们常常相信：“我们在桌子上计算着的数字和方程式总是与现实世界有一定关系的。”可是人们常常难于理解这点，甚至更糟糕的是似乎有一个普遍的默契，认为某些现象正好是认真的理论学者或实验学者不宜去从事研究的主题。其实，科学史告诉我

们，没有不适宜的课题，只有不适宜的研究方法。很多划时代的理论往往开始被人认为是“不适宜”的。

应该说明，牛顿万有引力公式的建立，是新理论创立的一种模式，但并不是唯一的模式。天文学的发展也有相反的事例。宇宙学的发展就是这样。爱因斯坦的广义相对论建立不久就提出了他的宇宙模型。当初，为了维持一个稳恒的宇宙，在他的引力场方程中加进了一个“宇宙常数”以产生一个“斥力”来平衡遥远天体间的“万有引力”。后来俄国数学家弗里德曼发现这个常数的加入是不必要的，并利用爱因斯坦场方程得到了一个动态的宇宙解。也就是说，在这个解中，有一个随宇宙时间变化的尺度因子。当此因子随时间增加，则表示一个膨胀的宇宙，反之，则表示一个收缩的宇宙。当尺度因子不随时间变化时，则是爱因斯坦所讨论的稳恒态宇宙。1929年哈勃定律发现后，恰好证明了我们的宇宙是正在膨胀着的。因此，它是先有了宇宙的理论模型，而后被天文观测所证实，并从模型的三种可能性中确定了宇宙正在膨胀。

132. 对未来观测的预言——新的观测要求

牛顿引力定律的建立不是天文学的结束，而是天文学从一个新起点发展的开始。在这个新的发展过程中，理论的预言成了它的特色。在万有引力公式建立后，牛顿反过来利用引力公式，设两个天体在引力作用下，研究运动和轨道的确立法则。他发现，运动轨道不仅可以是椭圆，而且也可以是其他圆锥曲线，如抛物线和双曲线。这一结论推动了彗星轨道的研究。1705年哈雷利用牛顿万有引力公式，研究了哈雷彗星，并预言这颗彗星将于1758年再度回归。在他去世16年后，这颗彗星果然如期返回到太阳附近，其经过近日点的时间与预报的日期仅差了一个月。这件事在当时的欧洲引起了轰动。不仅哈雷彗星得以命名，牛顿的万有引力定律也在学术界得到广泛承认。我们在前面已介绍过，建立在牛顿引力理论基础上的摄动理论，通过对行星轨道计算结果和观测的比较中所预言的海王星的被发现，使牛顿力学的成就达到了它的顶点。

1919年当爱丁顿在非洲日全食过程中，所得到的证实了爱因斯坦广义相对论所预言的。光线在引力场中会受到弯曲的观测结果发表后，同样在欧洲引起了轰动，一夜之间使爱因斯坦成为世界名人。他自认为他一生藐视一切权威，对一切理论持怀疑和批判态度，总是试图探索其弱点。但命运使他成了权威。这或许是命运对他的捉弄和报复。

但命运也并非总是这样捉弄每一个人的。大爆炸宇宙理论就受到了近20年的冷遇。40年代就预言了的宇宙微波背景辐射迟至1964年才在对银河系射电辐射的观测中意外地发现。这一发现对后来宇宙学的发展起着决定性的作用。

“波得定则”提出并预言了有某个行星存在的29年后，1801年元旦之夜才发现了第一颗小行星——谷神星。至今已有数千颗小行星被观测到。但波得定则的意义，至今仍是人们争论的问题。

总之，不管每个理论的命运如何，天文学家对理论的要求之一，是理论的预言能力。自古以来，人类往往相信命运，希望预测未来。但人类的经验表明，只有通过严格科学计算的预测是可靠并最后被证实了的。天文学家通过对SL9彗星轨道的精确观测，并在此基础上进行了严格的计算，提前了一年多的时间就准确地预报了它与木星发生碰撞的时间。当1994年7月17日

4 时 15 分（北京时间）观测到第一次碰撞的发生的时刻，与预计时刻的误差仅在一分钟之内。这是天文学史上的一次最精确的预测。对照 1758 年引起欧洲轰动的哈雷彗星回归近日点时间的一个月的误差，是否能反映出当代天文学的突飞猛进呢？

通常人们谈及预测，往往总和神仙或上帝联在一起。牛顿晚年大概太热衷于“第一推动”的探索而陷入神学。人们往往还十分关心爱因斯坦是否也信上帝？有的人甚至很肯定地听说过：爱因斯坦也相信上帝！让我们看看他本人是怎么说的吧。1929 年他在回答一位犹太教领袖的电报中说：“我信仰斯宾诺莎的上帝，他显示于存在事物的有秩序的和谐中。我不信仰干预人类命运和行动的上帝。”1948 年在给纽约“自由牧师俱乐部”的回信的最后，爱因斯坦说：“我认为在科学上有伟大创造成就的人，全都浸染着真正的宗教的信念，他们相信我们这个宇宙是完美的，并且是能够使追求知识的理性努力有所感受的。如果这种感受不是有强烈感情的信念，如果那些寻求知识的人未曾受过斯宾诺莎的对神的理智的爱的激励，那么他们就很难会有那种不屈不挠的献身精神，而只有这种精神才能使人达到他的最高成就。”

133. 模型的证伪——进一步改进和发展模型

科学发展还有一个特征，那就是每当一个理论达到其成就的顶峰时，也是它遇到不可克服的困难的时候。牛顿引力理论正是在它预言的海王星得到证实的时候，在水星近日点每一百年 43" 进动的微小数值面前遇到了不可克服的困难，从而导致了爱因斯坦广义相对论的产生。因此，爱因斯坦深信，即便是那些得到充分证实的科学理论总归还是一种假说，一种猜测。因此，他从来不满足于他所提出的任何理论。他总试图探索其弱点。他认为这种批判态度是一种最好的科学活动的特征。但这种批判态度，并不是对已有理论的全盘否定，而仅否定那些与更新的观测事实发生矛盾的部分。因此，这种批判必然是在一定范围内充分肯定原有理论的基础上，寻求理论在新条件下的扩充。

爱因斯坦在他的《自述》中说道：“牛顿啊，请原谅我；你所发现的道路，在你那个时代，是一位具有最高思维能力和创造能力的人所能发现的唯一的道路。你所创造的概念，甚至今天仍然指导着我们的物理思想，虽然我们现在知道，如果要更加深入地理解各种联系，那就必须用另外一些离直接经验领域较远的概念来代替这些概念。”

爱因斯坦确实是这样，他是牛顿的伟大赞赏者，他并不去批判牛顿的错误主张，而是做了更重要的事情：建立一种可以代替牛顿理论的理论，这个新理论不仅通过了牛顿理论所通过的一切检验，而且通过了牛顿理论所无能为力的某些检验，从而革新了物理学，扩大了物理理论处理问题的领域和能力。

但很多理论家并非如此，他们往往更容易满足于现有的成绩，总喜欢在旧的框架中加一些片面的假设，来拼凑出所想要的的数据。他们喜欢宣布科学正处于“满天晴空”，把新理论视为“小小的乌云”。本世纪初如此，本世纪中期又有人宣布物理学将只有广度而无深度的发展了。近些年，由于宇宙学的一些成就，似乎极早时期宇宙的现代时期的宇宙理论的“合拢”，物理学就实现了理论的“终极”！

但科学的发展史对上面的观点，恰好作了相反的回答。本世纪初，物理学中的两朵小小的乌云竟演成了倾盆大雨，相对论和量子力学就是在这暴风

雨中诞生的。50 年代，企图建立在强子基础上的“统一”理论，几乎没有在物理学理论中留下什么痕迹。而新的粒子却接二连三地发现。60 年代以来，天文学的一系列重大发现正有力地冲击着现代物理学的基础。今天，质子、中子和其他的强子作为“基本粒子”的地位已让位于“夸克”。但夸克是否还有结构呢？我想多数人可能会回答：是的，并相信物质从微观角度来看是“无限可分割的”。但从宇宙大尺度的宇观来考虑，几乎有完全类似的情况。伽里略以前，人们逐渐认识到了太阳系结构，使人们发现以往视为宇宙中心的地球，只不过是太阳系中的一个普通行星。当时有人又把太阳系视为宇宙。伽里略的望远镜，揭开了人们认识银河系结构的序幕。太阳系又被包容在银河系中，并发现它在银河系中也是处于“边远”地区的、不起眼的一个成员。河外星系的发现又表明，银河系也不过是数以亿计的星系中的一普通成员，它被包容在更大的“星系团”结构中……我们又有什么理由相信，今天人们所观测到的，以哈勃膨胀为标志的包容了若干超星系团的更大结构，就是宇宙大尺度结构的终极呢？相反，天文学发展的历史倒让人们有理由相信：在宇宙大的宇观尺度方面，很可能与微观尺度的无限可分割相仿，它是“无限可包容”的。人们今天所研究的“宇宙创生”（和“宇宙消亡”），只不过是以哈勃流为标志的尺度量级的结构在比其更大的包容结构中的“创生”（和“消亡”）。宇宙无论从微小粒子的微观尺度来看，或者是从巨大天体的宇观尺度来看都是无穷尽的。我们深信未来天文学将从观测上证实这点，即便它不是一两代人的努力所能完成的。

