

宇宙探索纵横谈

李 良

无论是在中国还是在外国，人类的好奇心是探索大自然的一种永恒的动力。从宇宙学的角度来看，人类正确认识宇宙及地球在宇宙中的地位经历了漫长的过程。天文学是从仰望星空开始的，自有文字记载以来，人类对天象的观察至少已有五千年以上的历史。天文学是一门既古老又年轻的科学，也是一门最有活力的科学，其发展对于历代哲学和科学技术的进步不断提出挑战，亦曾对人类社会的进步产生过巨大影响。

孔夫子说：“温故而知新，可以为师矣。”事实上，“温故知新”一方面不失为一种重要的学习方法，另外一方面是要以史为鉴，开启发明创造的智慧。宇宙是怎样起源和演化的？宇宙的结构究竟如何？我们的宇宙将来结局如何？这些问题仍然是现代宇宙学面临的课题。现代宇宙学观测表明，我们的宇宙是在膨胀着的，通过对微波背景辐射和宇宙大尺度结构等的观测，我们的宇宙历史可以追溯到极早期发生的大爆炸。为了理解现代宇宙学，我们有必要温故知新，追溯一下宇宙学的发展历史，由此可使我们更好地认识和理解宇宙学最新的发展方向。

从“天圆地方”到日心地动说的创立

在历史上，曾出现过各种各样的宇宙学说。在我国，2000多年前战国时代的学者尸佼（约公元前400年~公元前300年之间）指出“上下四方曰宇，往古来今曰宙”，这是非常明确的空间和时间的概念。东汉时代的张衡提出“宇之表无极，宙之端无穷”，这两句话明确地提出空间和时间是无限的宇宙观念。关于宇宙的起源，我国在远古的时候就有盘古开天辟地的说法，关于宇宙的结构有盖天说（周代初），认为“天圆如张盖，地方如棋局”，也叫做天圆地方（或天圆地平）说；还有张衡的“浑天如鸡子，地如鸡中黄”的浑天说；还有宣夜说（战国时），认为天无限而空虚，星辰悬浮空虚之中。

在外国，早在公元前7世纪，古巴比伦人认为，天和地都是拱形的，大地被海洋所环绕，而其中央则是高山。古埃及人把宇宙想象成以天为盒盖、大地为盒底的大盒子，大地的中央则是尼罗河，星星是天上悬挂的一盏盏灯。古印度人的宇宙图景是，四只大象驮着大地，大象则站在巨大的海龟背上，这一切又被一条巨大的蟒蛇所环绕，蟒蛇身上的斑点是星星。公元前7世纪末，古希腊的泰勒斯认为，大地是浮在水面上的巨大圆盘，上面笼罩着拱形的天穹。

在公元前4世纪，古希腊哲学家亚里士多德提出了“地心说”，即认为地球位于宇宙的中心，同时早在两千多年前，有古希腊天文学家阿里斯塔克提出朴素的“日心说”；托勒密继承并发展了亚里士多德的地心说，这个学说统治世界一千多年，直到16世纪波兰哥白尼提出日心说，才告结束。17世纪的

牛顿创立了他的经典力学定律，他把空间和时间的无限性作为他的理论的基本原理，他还推断星星的数目必定是无限的，而且相当均匀地分布在宇宙空间。到了20世纪，爱因斯坦创立了广义相对论。在现代物理学和大量观测发现的基础上终于诞生了现代宇宙学。目前的大爆炸宇宙学是一种主流学说，即大部分天文学家认可的学说。

近代自然科学是不不断摆脱在宗教神学笼罩下的古希腊经院哲学的束缚中诞生的。托勒密过世一千多年后，波兰天文学家哥白尼剔除了地球是宇宙中心的尊荣地位，小心翼翼地 toward 天主教的教义发出了挑战，最终系统地提出了震撼宇宙的日心地动说（后来简称日心说）。科学史实说明，哥白尼的成就使他成为人类科学发展史上最伟大的革命家之一。在欧洲文艺复兴运动中，哥白尼日心说的问世对近代科学发展做出了最伟大的贡献，使古老的天文学焕发青春并开始步入近代科学之门。

哥白尼在意大利陆续生活了将近十年，在这期间，他曾进行了大量枯燥的计算工作，反复核算了各种历法，出于研究历法的需要，他观察并记录了大量天象资料；他还广泛地阅读了托勒密的著作。在意大利，哥白尼深深地受到了当时文艺复兴思想的影响。例如，他曾拜访过比他年长20岁的著名意大利画家和科学家达·芬奇。作为文艺复兴代表人物之一的达·芬奇，十分蔑视宗教神学，他认为僧侣是用“天堂”做生意，并企图恢复一些古典哲学家的天文学说，其中包括地球不是宇宙的中心理论。

哥白尼经常和意大利天文和数学学者诺瓦拉在一起观测天象，探讨怎样改进错误的“地心说”。哥

伦布发现新大陆的振奋人心的消息，也激发了他创立新的天文学说的热情和勇气。他仔细地阅读了所能够得到的各种古希腊和古罗马的哲学著作。他发现在一些古书中，先哲已初步提出“地动”的思想。这个古老的科学见解，使哥白尼颇受启发。回国后，作为神甫的哥白尼在弗龙堡大教堂城墙上选择了一座塔楼平台作为天文台，用自制的简陋仪器对天空进行长期系统的观测，这地方后来被称为“哥白尼塔”，自17世纪以来被人们作为近代天文学的圣地保存。1515年，哥白尼开始写作《天体运行论》一书。在这本书中，哥白尼创立了崭新的、具有许多革命性的观点。首先，他提出地球不断地运动，它不是宇宙的中心，它应该和太阳“换一个地位”；第二，他提出造物主赋予宇宙万物的“特性”如重量和球形等导致它们不断运动；第三，宇宙的周长比以前想象的大得多。他的观点对基督教神学产生了巨大的冲击，因为他打破了地球静止和区分地球与天空的基督教——亚里士多德观点。哥白尼提出，太阳处于宇宙的中心，而所有行星沿着圆形轨道围绕太阳运行，地球同其他行星一样，每年围绕太阳运行一周。巨大的天球实际上不可能每天转一周，这不是它的真实运动，而是它的视运动，即是一种表面现象。

关于《天体运行论》这本书，用哥白尼自己的话说，是他花费了“将近四个九年的时间”写成的，毫无疑问，哥白尼对天文学的研究以及《天体运行论》的写作与他在意大利的涉世经历是分不开的。哥白尼生前没有把自己的研究及学说公开，只是在一些朋友之中探讨。他迟迟不愿将《天体运行论》公开出版，其原因主要是担心教会的责难。1542年秋，哥白尼因中风已陷入半身不遂的状况，这时他才同意出版他的著作。到1543年5月24日，即他临终前三天，他的伟大著作——一本刚刚印好的《天体运行论》送到病榻时，他已处于弥留之际。

在哥白尼的著作出版后三年，第谷·布拉赫（1546~1601）在丹麦出生了。第谷自幼就喜欢天文观测和研究占星术。当他十七岁的时候，通过对行星在星空中方位的观察和计算，他发现记载行星运动的正式星表有严重的错误，于是，他立志重新观察星空，编制出新的星表。在天文学史上，第谷是哥白尼最早的崇拜者之一。

1572年11月11日，仙后座有一颗明亮“新星”

（现在知道这是银河超新星，距离我们1万光年，当时的最大亮度达到太阳的3亿倍！）出现了，这一天象充分证明“天不变理论”的谬误。第谷正好观察到了这一天象并用文字记录下来：“11月11日晚间太阳落山以后，按照习惯，我正观看晴空上的繁星。忽然间我注意到这一颗新的、异常的星，光亮超过别的星，正在我的头上照耀，因为自从孩提时代以来，我便认识天上所有的星星（取得这一知识并不是很困难）。”“我感觉到很奇怪，我以为我的视觉发生了毛病。但是我把那颗星的方向指示给别人看的时候，他们也看到那里确实有那么一颗星，我便不再怀疑了。这真是一个奇迹！……”他对这颗星进行了一系列观测，直到1574年3月它变暗到看不见为止。前后16个月的详细观察和记载，取得了惊人的结果，彻底动摇了亚里士多德的天体不变的学说，开辟了探索宇宙的新领域。现代的天文学家在当年第谷发现超新星的位置上，已见不到原来的恒星了，但通过现代专门的望远镜能接收到它的残骸所发射出来的X射线和无线电波。几百年后，人们为了纪念他的功绩，将这颗新星命名为“第谷新星”。

1573年第谷发表了题为《新星》的重要科学论文，这使得他名声大噪。1576年2月，第谷得到当时丹麦国王腓特立二世的资助，国王将丹麦海峡中的汶岛赐给第谷，并拨巨款让第谷在岛上修建大型天文台，这座天文台被誉为“观天堡”。“观天堡”的天文仪器几乎都是第谷设计制造的，其中有木制的、铁制的和铜制的，其中最大的是一台精度较高的象限仪，称为第谷象限仪。由于第谷不断改进仪器的设计和测量的方法，他所进行的大量的天体方位的测量，其精确度是比较高的，一般能达到半弧分。第谷在20多年的观测生涯中，取得一系列重要成果，例如测定了一系列重要的天文数据，测量结果与现代值都很接近；1577年他通过对两颗明亮的彗星的观察，得出了彗星比月亮远许多倍的结论，这一重要结论对于帮助人们正确认识天文现象，产生了重要影响；他还创制了大量的先进天文仪器，并不断改进观测仪器，如在窥管上引入附加的照准器，找到了既精巧又方便的横向划分法，提高了仪器的精确度。他测定了大气折射改正表，为后人的观测活动提供了很好的参照。第谷通过重新测定恒星的位置，编制成比以往更准确的1000多

颗恒星的星表。

自从 1588 年丹麦国王腓特立二世去世以后，“观天堡”资金变得非常困难，第谷于 1597 年 3 月被迫关闭“观天堡”。第谷于 1599 年逃亡到布拉格，充当迷信占星术的奥皇鲁道夫二世的御前天文学家。在这里不久，有一天他收到了一位青年天文学家寄来的一本书——《神秘的宇宙》，这本书的主要内容是讲怎样用立体几何等数学方法绘出火星、地球、金星、水星等天体的运动轨道。寄这本书的人正是作者本人——约翰尼斯·开普勒。第谷看完全书，虽然对于开普勒的解释不十分满意，但是他看出来这是一个很有发展前途的年轻天文学家。于是他写信给开普勒，给予了热情的鼓励，并且告诉他，自己手上的观赏资料可能对开普勒今后的研究工作大有裨益。1600 年，开普勒经过长途跋涉从奥地利的格拉茨来到了布拉格，作了第谷的学生。

第谷对于哥白尼是非常敬佩的，他在 1584 年派自己的学生前往哥白尼工作过的弗龙堡，在那里考察验证哥白尼作过的一些计算，收集有关哥白尼的文物。第谷虽然是一个超众的观测者，却不是一位高明的理论家。因为宗教信仰的缘故，他虽然非常钦佩哥白尼，但他没有完全采取哥白尼的日心说体系。第谷精确测量恒星位置的目的之一就是企图发现恒星的视差效应，即观察由于地球运行而引起的恒星方位的改变的现象，结果一无所得。于是，第谷提出了一种介于托勒密的地心体系和哥白尼的日心体系之间的宇宙体系：恒星在遥远的天边，地球在宇宙中心，静止不动，行星绕太阳转，而太阳则率领行星绕地球转。第谷的体系在欧洲未能流传，对于天文学的进步没有产生什么影响，这一折衷体系在 17 世纪初传入我国后曾一度被接受。

1601 年 10 月 24 日，第谷与世长辞。第谷的工作，体现了近代科学的精密定量的精神。他所做的天文观测精度之高，是他同时代的人望尘莫及的。第谷编制的一部恒星星表相当准确，至今仍然有使用价值。此外，第谷最大的天文学成就就是发现了开普勒。第谷在临终前将自己多年积累的天文观测资料全部交给了开普勒，叮嘱开普勒继续他的工作，并将观察结果出版发表。开普勒接过了第谷尚未完成的研究工作，后来在伽利略的影响下，通过对行星运动进行深入的研究，抛弃了柏拉图、亚里士多德和毕达哥拉斯的学说，发现了著名的行星运

动三定律，开创了天体研究的新途径，使得宇宙探索走上了科学的轨道。

望远镜开拓人类新视野

1608 年，荷兰眼镜制作商列伯斯在一次偶然的时机中发明了望远镜。1609 年，意大利物理学家、天文学家伽利略在得知这一消息后，很快弄清了其中的原理，亲自动手制作了第一架天文望远镜，并不断加以改进。伽利略利用他的望远镜观测到了月球表面的环形山、金星位相和太阳黑子，发现了木星的四颗卫星、茫茫银河由无数恒星所组成，等等。当年伽利略刚刚把它的第一架望远镜指向天空，就发现了很多用肉眼看不见的恒星。望远镜的使用使人类的视野大大扩展，恒星天球层的打碎使人们有可能重新构思宇宙的结构。后来人们把望远镜每改良一次，就能发现一大批更多、更暗的恒星。

1718 年，英国天文学家哈雷通过他的观测和分析古星图，首次指出恒星不动的概念是错误的。牛顿曾用他的天体力学理论论证彗星也是一种行星，是一种沿偏心率较大的椭圆轨道运行的一团云雾状物质，其运动也服从开普勒行星运动定律。1682 年 8 月，即正当牛顿致力于解决开普勒遇到的几个问题时，夜空中出现了一颗明亮的大彗星，在彗星头部后面拖有一条弯弯的、引人注目的彗尾。其实，哈雷早在 1680 年 11 月时就曾见到一颗亮彗星，使他对彗星产生了浓厚的兴趣。这一次，哈雷对这颗又大又亮的彗星在星空中的位置及其逐日变化，作了认真的观测记录。望着天上的那颗大彗星，哈雷想起了牛顿，为了进一步确定该彗星的轨道究竟如何，他拜访了牛顿，结果他们很快成为好朋友。哈雷当时搜集了大量有关彗星的资料，考察了大约 300 多年来有关彗星的历史记载，编制了一张列有各彗星出现的时间、位置及运行路线的表。经过反复的计算分析，哈雷认为这是一颗周期彗星，周期是 76 年，他大胆预言这颗彗星将在 1758 年底或 1759 年再一次回归近日点。哈雷本人于 1742 年逝世，享年 86 岁。1759 年 3 月，这颗彗星如期出现，基本符合哈雷 17 年前的预言。后来为了纪念他，人们把这颗彗星命名为“哈雷彗星”。

1750 年，英国天文学家托马斯·赖特指出，白茫茫的银河和人们所能观测到的恒星可能构成一个巨大的扁平状天体系统，由于太阳连同地球位于这一系统的内部，所以从不同方向观测才看到银河光

带和离散分布的恒星。英国天文学家威廉·赫歇尔并不满足于这种定性的判断，决心利用他自制的当时世界上最大的口径46厘米的望远镜，数一数天上的星星究竟有多少，以及在不同的地方，星星的数目究竟是怎样分布的。耐心的赫歇尔把天空均匀分成几百个区域，然后数出每一个区域中用望远镜能看到的恒星。结果，赫歇尔发现，越靠近银河光带，每单位面积上的恒星数目就越多，在银河的方向上达到最大值，而在与银河平面垂直的方向上，星星数目最少。他经过研究认为，恒星均匀地分布在形状如一个“透镜”或者一块“磨盘”那样的空间里，而太阳系很可能位于靠近“透镜”中心的地方。1785年，赫歇尔建立了第一个银河系模型。在这一模型中，太阳位于当时人们所认识的宇宙范围——银河系的中心。赫歇尔还认识到，我们的太阳系正朝着武仙座方向运动，人们所观测到的恒星运动是由恒星自身的运动和太阳的空间运动两部分合成的结果。太阳运动的发现，彻底动摇了哥白尼日心体系中太阳固定不动的观念。

到了19世纪，光谱分析开始运用于天文学中。1863年，英国业余天文学家，光谱分析术的先驱者哈金斯发现恒星光谱与太阳系物质光谱的相同性，证明了宇宙中物质成分的同源性。1864年，赫金斯又从光谱分析中证实了弥散星云的存在。19世纪下半叶，通过观测恒星光谱的红移来确定天体的运动的工作也已开始。事实上，天体物理学的诞生标志着宇宙学与物理理论之间新的综合研究开始形成。1917年，美国天文学家沙普利通过对银河系内天体分布的分析，确认太阳并不位于银河系的中心，而是处于相对说来比较靠近银河系边缘的地方，从而纠正了赫歇尔太阳位于银河系中心的错误。地球身处银河系，所以说我们看到的漫天恒星几乎全部是属于银河系的，其中包括各类恒星和恒星集团，其中包括单个恒星（例如太阳类恒星）、变星、双星、聚星、星团、星云和星际介质。当三颗或更多恒星挤在一起时，它们被称为聚星。根据天文学家的推测，银河系中85%的恒星处于聚星群中。在所有恒星中，有超过一半以上是双星，靠相互吸引联系在一起，每一颗星都围绕两者共同质量中心旋转。星团是由许多在同一时期形成的恒星组成。有些星团包括几十颗或几百颗恒星，还有的甚至包括数百万颗恒星。

银河系是否包括宇宙的全部内容呢？早在赫歇尔探索银河系结构之前，人们就已观测到天空中除恒星外还存在着一些暗弱而又模糊的云雾状天体，取名为“星云”。例如1612年德国天文学家马里乌斯用望远镜观测到仙女座大星云。1755年著名德国哲学家康德从哲学思辨角度提出，在银河系外的宇宙空间中存在着无数个类似的天体系统，称为河外星系，或简称星系，甚至确指仙女座大星云就是一个例子。那时人们对“星云”的精细结构缺乏了解，更不知道它们的距离。

1923年，美国天文学家哈勃利用当时世界上最大的2.5米的胡克望远镜仔细观测了仙女座大星云，该望远镜性能非常好，能把仙女星云边缘的一些恒星分解出来，后来用它发现了其中的造父变星，由此推算出仙女座大星云距离我们225万光年，这个距离远远在银河系以外。这是人类发现的第一个河外星系，该星系至少有上千亿颗恒星！以后的观测进一步发现，河外星系不仅大量存在，而且可组成更大的天体集团，如双星系、多重星系、星系团和超星系团等。此外还有分布在星系与星系之间的星系际介质。观测事实表明，宇宙中有着上千亿数量级的河外星系，它们构成宇宙大厦的基本砖块，天文学家感到震撼的是，宇宙真可谓“广袤深邃”！

星系的质量差别很大。银河系的质量约为 10^{11} 太阳质量单位。在明亮的星系中，这是典型的大小。质量很小的星系太暗，不易看到。小星系的质量可低至 10^6 太阳质量。大部分星系只结成十几、几十或上百个成员的星系团。对于上千个以上的星系构成的大集团叫超星系团。大约只有10%星系属于这种大星系团。构成茫茫宇宙的河外星系形态各异，且充满无数未解之谜。无论是河外星系的超新星爆发，还是星系之间的碰撞、并合，以及各种星系级的黑洞，均涉及宇宙的结构和演化，天文学家不断地深入观测研究河外星系的物质结构和运动变化等问题。

观测宇宙学的诞生

哥白尼的日心说首先揭开近代宇宙学的序幕，通过开普勒、伽利略等人的重要发现和论证，终于在牛顿那里，划上了一个巨大的惊叹号。人们开始逐渐了解宇宙的细节，并确信宇宙是无边无际的，而且没有什么特殊的中心。事实上，哥白尼以太阳为中心的宇宙对象主要是太阳系。杰出的科学巨人

牛顿认为，在万有引力作用下，宇宙以一架精确的机器方式运作；在他看来，诸天体彼此通过引力互相牵制，它们总体上处于均匀、稳定的状态分布。牛顿把他的引力理论用于研究一些天体（如行星和彗星）的运动，理论与观测符合得很好。然而，在宇宙学方面，他提出了“绝对时间”和“绝对空间”的概念，他描述的空间是一个与物质无关的（存放物质的）容器，在这个无限大的容器中，到处布满天体，是一个“动者恒动”、“静者恒静”的体系。由于牛顿受神学的影响，把空间和时间互相割裂开，所以在宇宙学上陷入了困境。

17 世纪的科学家们对星球在宇宙中的分布是有限的还是无限的、是均匀还是不均匀有着截然不同的两种主张，牛顿和莱布尼兹分别是这两种主张的代表人物。牛顿主张星球只能分布在宇宙有限的空间里，否则宇宙是不稳定的；莱布尼兹认为星球必定均匀分布在宇宙无限的空间里，否则宇宙理论便会有边界有中心。无限宇宙理论不是古希腊自然哲学拯救现象的必然要求，而是宇宙观念变革的必然结果，然而它与牛顿物理学的矛盾也日益暴露。因此出现了一个与观测上明显的不一致是夜黑问题，即“夜晚的天空为什么是黑的？”。所谓的夜黑问题也叫光度佯谬。它是 1826 年由德国业余天文学家奥尔伯斯医生提出的。他指出，如果太空中均匀地分布着无限多的恒星，那么这些星光积累起来，宇宙空间里将处处是光明的，宇宙中任何一点都将感受到无穷大的亮度，地球上也就没有白天黑夜之分，但事实却不是这样，夜空的确是黑的。这样一个似非而是问题的提出推进了人类对无限宇宙的探索。在奥尔伯斯佯谬（也叫做“光度佯谬”）提出后，1894 年，另一位德国天文学家西利格又提出了“引力佯谬”。他指出，考虑到万有引力定律适用在宇宙的各个地方，那么恒星会受到宇宙中所有其他恒星的引力，如果星球无限多而且均匀分布，那么宇宙中任一有限区域的物质(质量有限)将被区域外的物质(质量总和为无限大)所吸引，有限区域内的物质无法依靠自身的引力收缩成星体；然而实际情况并不是这样。这就是所谓的“引力佯谬”。“光度佯谬”和“引力佯谬”深刻地揭示了以牛顿力学和欧氏几何为基础的“均匀无限宇宙模型”存在的自身无法克服的逻辑矛盾。正是为了消除这两个佯谬，后来的科学大师爱因斯坦修正了牛顿力学和欧

氏几何学关于无限空间的概念，并根据广义相对论提出了“有限无边宇宙模型”，从而为相对论宇宙学的创立奠定了基础。18 世纪出现的关于太阳系起源的“康德-拉普拉斯星云说”，事实上是对牛顿上述理论的进一步挑战。康德认为：（宇宙）有限无限问题本身毫无意义，根本不当再讨论它。随着爱因斯坦相对论宇宙学的问世，以及河外星系谱线红移的发现，人类对宇宙的认识终于揭开了崭新的一页。

1915 年，爱因斯坦创立了引力的一般理论——广义相对论。1917 年，他尝试性地应用广义相对论对整个宇宙进行了考察研究。1917 年爱因斯坦在写给荷兰天文学家德西特的一封信中，曾经引用海涅“白痴才会期望有一个回答”的诗句来嘲笑大哲学家康德。其实，出于对大自然和星空天体的好奇，人类一直在思索宇宙的起源及其结构。在爱因斯坦之前，无论是牛顿、莱布尼兹，还是赖特、康德，人们对宇宙的认识大都是基于感觉和猜测，局限于哲学思辨阶段。爱因斯坦将广义相对论用于宇宙结构的研究，开创了现代宇宙学的先河。他假定宇宙是空间上闭合的并具有均匀分布的物质连续区，并且假定宇宙在整体上是静态的，以此为基础建立了一个静态的宇宙模型，他发表的引力方程，是描述宇宙在物质引力和宇宙结构作用下的运动状态方程。为了保证理论上宇宙是静态的，他在广义相对论的场方程中加入了一个宇宙常数项。在宇宙物质均匀分布和各向同性的假设（即宇宙学原理）下，爱因斯坦得到的第一个理论宇宙模型——无限无界、平直而静态的宇宙。这样的研究在当时似乎也太超前了，因为在当时连河外星系的的存在还没有得到确认。这一模型现在一般称为爱因斯坦静态宇宙模型。荷兰天文学家德西特继爱因斯坦之后提出了自己的宇宙模型，它与爱因斯坦静态宇宙模型一样，认为宇宙的空间不随时间而变，故属静态型。但是它又认为宇宙的物质有运动，不过物质的平均密度趋近于零。一般认为，德西特是第一个求出方程的解并提出封闭宇宙观点的人，他的模型被称为爱因斯坦-德西特宇宙（1932 年）。

前苏联数学家弗里德曼在 1922~1924 年求解了不带宇宙常数的方程式。与德西特不同，在弗里德曼的模型中有天体存在，也就是说，宇宙的平均密度不是零而是有物质的膨胀宇宙。弗里德曼探讨了非静态宇宙，提出这个宇宙会不会膨胀的问题。

1912年，美国天文学家斯莱弗想通过研究星云的光谱，得出星云是由什么元素组成的。他在实测中发现，旋涡星云都很暗淡，光谱研究很困难。后来他总算通过光谱确定了仙女座大星云的视向速度：约以300千米/秒的高速背离太阳退行。到了1917年，斯莱弗一共研究了15个河外星系的光谱线，结果发现，几乎所有的河外星系的光谱向红端移动，这个现象后来被简称为“红移”，也就是说，除了首先研究的仙女座和另一个星系（后来证明只是银河系的一部分）正在靠近地球外，其余13个星系全都在“退行”——即远离地球。1929年，哈勃的大量的星系观测结果表明，几乎所有的河外星系都在远离我们，而且星系距离越遥远，其退行速度越快，两者之间存在着简单的线性关系，这就是著名的哈勃定律。

哈勃定律的含义是什么呢？当时哈勃和他的合作者哈马逊非常谨慎采用“星系视退行”的名称。比利时天文学家勒梅特在1927年重新求得爱因斯坦引力场方程的弗里德曼解。在获悉哈勃的河外星系谱线红移的观测结果后，勒梅特指出，哈勃观测到的宇宙膨胀现象正是爱因斯坦引力场方程所预言的；因此过去的宇宙必定比今天的宇宙占有更小的空间尺度。并且，宇宙有一个起始之点，他称为“原始原子”。他明确指出宇宙是膨胀的，而且是均匀的、各向同性膨胀。勒梅特在1932年提出了一种原初原子宇宙模型，他认为今天的宇宙是这个原初原子蜕变、膨胀的结果。在爱因斯坦生活的时代，流行的依然是宇宙静止、永恒的传统观念，它与宇宙膨胀观念水火不容。据说爱因斯坦在提出广义相对论后，有一次他听了勒梅特的一个科学报告，报告里面提出了他的宇宙“原始原子”概念，爱因斯坦听了以后当即表示说，这是我所听到的最好的一个科学报告，从那以后爱因斯坦就在一定程度上支持了宇宙膨胀学说。

根据前苏联天文学家弗里德曼、荷兰天文学家德西特和比利时科学家勒梅特的理论观点，如果把时间反演回去，遥远的天体会愈来愈靠拢在一起，直到它们一开始存在时，都被挤进最初的“宇宙蛋”里。根据哈勃定律显而易见，我们的宇宙正在膨胀。天文学家一致认为，哈勃的发现开创了现代观测宇宙学；从此宇宙学开始成了一门不仅可以进行理论研究，而且可以进行观测的科学。为了解释哈勃的

发现，在20世纪中叶出现了两类截然不同的宇宙模型。一类是由静止宇宙演变而来的“稳恒态宇宙模型”，它以英国科学家霍伊尔、戈尔德和邦迪为首。这种模型认为，宇宙是永恒不变的，为了弥补膨胀造成的物质稀疏，物质从虚空中源源不断地产生，大约每立方米空间每10亿年产生一个氢原子。另一类是大爆炸宇宙模型，它们以比利时神甫勒梅特、俄裔美籍物理学家伽莫夫为代表。

受勒梅特思想的启发，美国天文学家伽莫夫与他的学生阿尔法早在1940年首先提出宇宙起源于约100亿~150亿年前一次猛烈的巨大爆炸。后来伽莫夫在1948年提出了比较系统的宇宙诞生于原始火球的膨胀模型，认为我们的宇宙必定曾有过一段从密到稀、从热到冷、不断膨胀的过程。这个过程就好像是一次规模无比巨大的爆发，简单地说，宇宙起源于150亿年前的原始宇宙火球的大爆炸。在理论上，他们认为宇宙的大爆炸是时空的膨胀（宇宙是无中心的）；随着宇宙膨胀和温度降低，构成物质的元素以及后来的各种天体（恒星、行星等）相继形成。现今被称为“大爆炸宇宙模型”。其名得自于它的理论敌手英国天文学家霍伊尔。据说在一次演说中，霍伊尔将伽莫夫模型贬低为是“一声巨大的砰理论”，所以此后人们时常用“大爆炸”来称呼这一类宇宙模型。这两类宇宙模型各自都有相当数量的支持者，一时难辨真伪。争论从20世纪40年代一直延续到1965年发现宇宙微波背景辐射。

科学家们似乎“看到上帝的脸”

1965年，美国无线电专家彭齐亚斯和威尔逊在测试一架卫星通信天线改装的喇叭形射电天线时，发现始终存在一种3.5K温度的额外噪声，无论对准什么方向，无论采取什么办法都不能消除，他们为此迷惑不解。一次偶然的机会，他们得知这种额外的噪声就是宇宙学家梦寐以求寻找的宇宙微波背景辐射。1978年彭齐亚斯和威尔逊获得了诺贝尔物理学奖，这是因为宇宙微波背景辐射获得的第一个诺贝尔奖。大爆炸模型因此获得了强有力的观测证据，导致许多稳恒态宇宙的支持者纷纷倒戈。遗憾的是，作为大爆炸模型鼻祖的勒梅特和伽莫夫没有享受到这份殊荣，他们先后于1966年和1968年去世，按诺贝尔奖的规定，它从不授予已去世的人。

宇宙微波背景辐射是大爆炸的余辉，记录了大爆炸后短短38万年后的宇宙状态。虽说有了彭齐亚

斯和威尔逊的发现，但问题并未完全解决，按照大爆炸模型，原先处于热平衡的光与物质不再发生作用，所以宇宙背景辐射应当保持黑体谱的形状，即普朗克在 1900 年的黑体辐射公式所描绘的形状，它唯一地决定于黑体的温度。

自从 1965 年彭齐亚斯和威尔逊发现宇宙微波背景辐射之后，天文学家们致力于进一步证认的工作。彭齐亚斯和威尔逊所发现的宇宙微波背景辐射只是在一种波长，即波长为 7 厘米上的观测结果。为了证实这种辐射是黑体谱，需要在 70 厘米到毫米波广阔的频段范围上进行测量。1965 年 12 月，迪克小组的罗尔和威尔金森完成了在 3.2 厘米波段的测量，结果是 $3.0 \pm 0.5 \text{K}$ 。不久，豪威尔 (T.F.Howell) 和谢克沙夫特 (J.R.Shakeshaft) 在 20.7 厘米上测得 $2.8 \pm 0.6 \text{K}$ 。随后彭齐亚斯与威尔逊在 21.1 厘米上测得 $3.2 \pm 1 \text{K}$ 。1975 年，伯克利加州大学伍迪 (D.P.Woody) 领导的气球小组又得到从 0.25 厘米到 0.06 厘米波段的背景辐射，它们处于 2.99K 的分布曲线范围内。

20 世纪 60 年代中叶以后，针对这种大爆炸“余辉”的测量工作最初都是在地面上开展，研究进展缓慢，宇宙微波背景辐射应具有的黑体辐射特性一直未能得到地面观测结果的确认。大量的地面、火箭和气球观测的发现，宇宙微波背景辐射的峰值位于 1~2 毫米波长，然而这些测量大多在长波段上进行，因为地球大气的吸收和发射使得短波段的观测数据十分缺乏，仅有的一些观测又表明短波段的背景辐射严重偏离黑体谱。因此，发展空间观测成为判断两类宇宙模型的当务之急。

宇宙微波背景探测卫星计划 (Cosmic Background Explorer, 简称 COBE) 就是在这种科学背景下提出的。作为美国宇航局戈达德航天中心高级天体物理学家的马瑟，是这项计划的主要负责人和远红外绝对分光光度计 (FIRAS) 仪器负责人；而身为美国加利福尼亚大学伯克利分校天体物理学教授的斯穆特则是差分微波辐射计 (DMR) 仪器负责人。为了得到宇宙微波背景辐射黑体谱的完整谱形，为了检测宇宙微波背景辐射的各向异性，马瑟于 1974 年提议，发射一颗专门用于探索宇宙背景卫星，对微波背景进行探测。他的提议后来得到了美国宇航局的批准。宇航局最初打算用航天飞机将 COBE 卫星送入太空。但 1986 年“挑战者”号失事后，航

天飞机停飞数年，COBE 卫星的前途莫测。为了使 COBE 早日升空，马瑟和斯穆特与同事们专门争取到一枚火箭。1989 年 11 月 18 日，COBE 卫星被成功地送入了轨道，开始了它长达 4 年的观测。卫星上载有 3 架仪器：分散红外背景探测器 (DIRBE)、微分微波辐射计 (DMR)、远红外分光分度计 (FIRAS)。其中 DIRBE 观测红外微波背景辐射，远红外绝对分光光度计用来观测和比较宇宙微波背景辐射 (CMB) 光谱与黑体辐射谱的差异，以区别早期宇宙是否处于绝热状态，马瑟曾参与了这个项目的指导工作；差分微波辐射计则探测 CMB 光谱中不同波段的各向异性行为，亦即测量不同方向上微波背景辐射的微小温差。这个项目是乔治·斯穆特所负责的子项目。

在 COBE 卫星项目中，斯穆特主要负责测量微波背景辐射微小的温度波动。早在 1977 年，以斯穆特为首的天文学家小组曾经将灵敏辐射计放置在 U-2 喷气飞机上，在大气层上面飞行，得到了关于背景辐射中温度变化的第一个证据，叫做“偶极各向异性”现象。天空的微波辐射在沿着地球运动的方向热一些，在反方向冷一些。这是由于地球随着太阳在宇宙当中向前穿行所产生的。大家知道，我们的地球绕着太阳运行，太阳绕着银河系的中心转动，银河系在本星系群中运动，本星系群又朝室女座星系团运动。本星系群相对于宇宙微波背景辐射的运动速度是最快的。偶极各向异性是一种多普勒效应，并不是宇宙微波背景辐射本身的各向异性。斯穆特在 1977 年观测的基础上，设计了精度更高的微分微波辐射计 (DMR) 并放置在 COBE 卫星上。DMR 由 3.3 毫米、5.7 毫米和 9.6 毫米三个不同射电波长的三个辐射计组成。在这三个波长上面宇宙微波背景辐射的强度大大高于其他波长的强度。斯穆特又为这个仪器设计了一对天线，使用这对天线去测量两个不同天区的温度差，能够测出 1% 的温度差，获得比其他辐射计精度更高的观测结果。

COBE 计划的整个研究工程团队超过 1000 人，前后几乎花费了 20 多年的时间。利用太空的有利条件，卫星上天后，最初 9 分钟的观测就已证明宇宙微波背景辐射完全遵循普朗克黑体谱，其符合程度如此之精美，表明它是迄今为止最完美的黑体，无论是在实验室还是在大自然。进一步的观测和数据处理表明，这种辐射的温度为 2.735K (即绝对温标

2.735 度,或零下 270.415 摄氏度),误差只有 0.06K,而不同方向上的微小温差只有十万分之一。宇宙微波背景辐射谱与温度为 2.7K 的黑体辐射谱符合很好,且与大爆炸宇宙学所预言的结果一致,从而证实了宇宙微波背景辐射谱的宇宙学起源,连同哈勃定律、宇宙化学丰度,它们成为大爆炸宇宙模型强有力的三大观测证据。

1992 年 4 月,斯穆特激动地向媒体宣布,利用 COBE 卫星的观测结果,他们发现了期待已久的宇宙微波背景中的微弱的各向异性现象,这是在 1 亿光年大小的天区内的热的和冷的变化。这些区域内的温度变化相对于平均温度为 2.74K 的微波背景来说,变化幅度仅有百万分之六。这微弱的温度起伏是由引力起伏造成的,也就是由物质密度的不均匀造成的。这种微小差异揭示了宇宙中的物质如何积聚成恒星和星系,这些结果都大大加深了科学家对宇宙及星系的形成演化过程的认识。后来马瑟经过对 COBE 数据的重新处理,得到了 2.726K 的背景辐射温度,误差也被缩小到 0.01K。

简而言之,马瑟借助 COBE 探测卫星的数据,经过研究证明微波背景辐射光子的能量分布与一个温度为 2.725K 的黑体发出的辐射毫无二致,完全符合宇宙大爆炸的理论预言;而斯穆特则借助 COBE 卫星的观测数据,发现这种温度在全天各个方向上存在着极其细微的起伏变化,揭示了宇宙早期的物质分布情况。

继 COBE 的任务之后,2001 年发射的威尔金森各向异性探测卫星(WMAP)对这种极其微弱的背景辐射温度作了更精确的测定,得到 2.725K 的温度,误差仅有 0.002K。根据 WMAP 的精确测定,宇宙微波背景辐射是宇宙大爆炸后约 38 万年的余辉。迄今为止的宇宙观测结果是,宇宙物质在大尺度空间内的分布的确是均匀的和各向同性的,这个观点称为宇宙学原理,是现代宇宙学理论所必须依据的一个公理。科学家认为,所观测到的微波背景辐射高度各向同性的特征强烈支持了宇宙学原理和大爆炸宇宙学。在这高度各向同性的背景上,微小各向异性的发现为人们显示了今天宇宙大尺度结构(星系、恒星形成)的起源之所在。微波背景辐射实际上是人们能够直接看到的最远,也就是最早的信号。它的各向异性展示的实际上是最远的也就是最早的宇宙图像,它们应当是今天宇宙大尺度结构

的种子。COBE 的结果第一次展现出一幅宇宙早期——“婴儿时代”的图像,有人把它形象地比喻成“就像看到了上帝的脸”,象征看到了宇宙创世期的图像。那个时期宇宙正处于高温高密度的粒子时代,因此也将成为检验粒子物理理论的最佳场所。

COBE 的结果还回答了一个重大的宇宙学问题:今天观测到的灿烂缤纷的星系世界和恒星世界从何而来?宇宙学家们推测,由于地球相对于背景辐射的运动,极其均匀的宇宙背景辐射应当有千分之一的温度变化,扣除这种变化和其他一些因子,并考虑到宇宙中暗物质的存在,宇宙背景辐射应有十万分之一的各向异性,它们作为物质聚集的种子,随宇宙的膨胀演化成今天的恒星和星系,乃至更大尺度上的结构。这正是 COBE 卫星 DMR 仪器获得的另一个重要结果,它证明我们今天的物质世界正是由当年极其微小的不均匀演化而来,并且还间接地证实了暗物质的存在。

鉴于马瑟和斯穆特在宇宙领域的科学贡献,他们两人荣获了 2006 年诺贝尔物理学奖,以表彰他们发现宇宙微波背景辐射的黑体谱及其不同方向上极微小的差别(即各向异性)的杰出贡献。约翰·马瑟在接受采访时感慨地说,这一奖励是对 COBE 项目的所有人乃至整个宇宙学界的一次集体肯定。说起来,宇宙微波背景辐射已经是第二次获得诺贝尔奖了。据 2006 年诺贝尔奖评审委员会提供的材料介绍说,如果没有上述这样一种物理机制,今天的宇宙很可能完全不是现在这个样子,其中的物质也许像淤泥一样均匀分布。有的科学家兴奋地指出,如果把诺贝尔奖看作是对一种理论的正确性的最终评判的话,那么现在可以认为,宇宙学走到今天,科学家们已经看到了“上帝的脸”。由此,毫不夸张地说,COBE 和 WMAP 的观测开始了精确测量宇宙的新时代!

可观测时空与“大爆炸”宇宙模型

事实上,现代宇宙学每一次观测发现都是在试图回答有关宇宙的两个最基本的问题:一是宇宙的范围有多大;二是宇宙的年龄有多大。这两个问题是相同的。我们在谈论这个问题时,指的是可观察的宇宙,也就是以我们所在的地球为中心到可见宇宙边缘的这段距离,若以光年计,与整个宇宙年龄的数字相等。从宏观整体和理论推测来说,宇宙很可能比这个可“见”的宇宙大得多。大爆炸宇宙学

是现代宇宙学中最有影响的一种学说，与其他宇宙模型相比，它能说明较多的观测事实。其主要观点是，我们的宇宙曾有一段从热到冷的演化史；在这个时期宇宙体系并不是静止的，而是在不断地膨胀，使物质密度从密到稀地演化；这一从热到冷、从密到稀的过程好似一次规模极为巨大的爆发。

现代宇宙学沿着两个方向发展。一是发现宇宙大尺度的观测特征，即观测宇宙学；另一是理论宇宙学，研究宇宙的运动和发展，建立宇宙模型。在观测宇宙学方面，已积累了大量的资料，有了许多重大发现。主要有：①河外天体的谱线都有红移，而且，红移量同距离之间存在一定的关系。②1965年发现了温度近似为 3K 的微波背景辐射。③星系可以分为椭圆星系、旋涡星系、不规则星系等几种类型，各类星系的物理特征的弥散不大。星系有明显的成团倾向，组成星系团和超星系团，但没有发现更高级的星系集团。④天体的年龄虽然相差很大，但星系的年龄都在 100 亿年左右，尚未发现年龄超过 200 亿年的天体。⑤氢和氦是宇宙中最丰富的元素。⑥河外天体的计数表明，某些河外天体存在着强烈的演化过程。⑦对河外天体的短缺质量的研究表明，可能存在暗物质，而且，尺度越大，暗物质越多。在理论宇宙学方面，已经建立了许多种宇宙模型。所有的模型都必须能够说明上述观测事实。在已有的宇宙模型中，大爆炸宇宙模型是主流学者所接受的，它能说明的观测事实最多。

天文学家把目前我们所观测到的整个时空范围称作“我们的宇宙”。科学家把从整体上研究大尺度的时空性质，宇宙物质运动的规律称为宇宙学，宇宙学作为天文学的分支学科，是当代最活跃的科学前沿之一。现代宇宙学研究者常在理论物理学的基础上，对宇宙、天体给予科学的阐述，其最大特征是尊重观测到的客观事实，而不是只凭想象。它涉及天文学、物理学、数学、化学等诸多学科的基础理论问题。近年认为，我们的宇宙大小约为 140 亿光年；它的起源、结构、演化和未来的结局，正是宇宙学的研究内容。“即使不是有史以来最伟大的发现，也是 20 世纪最伟大的发现。”这是著名物理学家霍金于 1992 年对 COBE 出色成果的由衷赞美。

根据大爆炸宇宙学说，我们的宇宙经历了一个由热到冷、由密到疏的诞生演化过程。最初宇宙如同一个原始火球，处于高温高密状态，后来发生了

一次大爆炸，能量转换成了粒子。初期的宇宙就像一锅基本粒子汤，由光子、中微子、电子、质子和中子组成。随着宇宙的膨胀，宇宙开始变冷，质子和中子形成了氘核、氦核和少量的锂铍原子核，这个过程在大爆炸后的最初 3 分钟就完成了，正如诺贝尔物理学奖获得者、美国科学家温伯格在《宇宙最初 3 分钟》一书中所描述的，此时宇宙密度温度极高，光子和各种粒子不断发生碰撞、交换能量动量，宇宙处于热平衡状态，各种粒子具有相同的温度。

大爆炸后数十万年，宇宙冷却到 3000K，辐射大大减弱，自由电子与质子、氘核、氦核结合成原子。自此宇宙变得非常透明，光子几乎可以自由飞行而不与物质发生作用，从此辐射与物质走上各自膨胀、冷却和演化之路。随着宇宙膨胀和冷却，原子物质在引力作用下凝聚，最后形成今天的星系和恒星世界，而 3000K 的原始黑体辐射也得以保留下来，并冷却成今天温度为 5K(阿尔法和赫尔曼预言)或 50K(伽莫夫预言)的背景辐射，充满着整个宇宙。这种辐射位于微波波段，故而被称作宇宙微波背景辐射。

自从发现宇宙背景辐射以来，宇宙学家就疑惑不解，不同方向上宇宙微波背景辐射为什么如此精确相同？宇宙年龄是有限的，光的作用范围也是有限的，超出这个作用范围的两个地方为什么会有几乎相同温度的辐射？这就是所谓的宇宙“视界问题”。人们在试图回答这些问题的众多宇宙模型中，最引人注目的是美国科学家古斯提出的暴涨宇宙模型：宇宙在极早期时，即时间 t 约等于 10^{-35} 秒（大爆炸后 1 千亿亿亿分之一秒）时，温度 T 降至 10^8 K 以下，强相互作用力与其他力分离。出现相变和对称性破缺。这时，宇宙真空具有很高能量（伪真空）。这种真空能量导致宇宙呈指数膨胀。暴涨所经历的时间段约为 10^{-33} 秒。宇宙经历暴涨，尺度增大到 10^{50} 倍，即宇宙发生了极为短暂的指数式超光速膨胀。

COBE 这个具有特别灵敏仪器的卫星，1989 年上天之后很快就测量出来有千分之一的各向异性。这证明宇宙“暴涨”阶段是存在着的。因为只要有“暴涨”阶段，就会出现各向异性。暴涨模型能够解决视界问题和其他一些宇宙学问题。因此，验证该模型的正确与否成为认识宇宙极早期的关键。这正

是宇宙微波背景辐射所能揭开的：按照暴涨宇宙学说，暴涨会产生引力波，在某些情况下测量宇宙微波背景辐射的偏振能够间接地探测到是否存在这种引力波，从而可探讨宇宙极早期的情形。

长期以来，天文学所研究的是恒星和星系。虽然均匀分布的物质可通过引力不稳定性形成恒星和星系，但怎样在合理的宇宙年龄范围内形成今天观测到的恒星和星系？解决这个问题却很困难。在 20 世纪 80 年代初，前苏联的泽尔多维奇就把宇宙大尺度结构问题看作宇宙学晴朗天空中的一朵乌云。暴涨理论曾缓解了这个困难。在暴涨期内，以前的起伏不均匀性会被衰减掉，有效的非均匀性种子将由暴涨后的量子起伏来提供，由它们成长为微波背景辐射的各向异性，进而形成今天的大尺度结构。近年，WMAP 测出的宇宙微波背景偏振信息图进一步包含了宇宙复合时期以及其后的再电离时期的重要信息。事实上，微波背景辐射的偏振主要由两个原因造成：一个来自复合时期（宇宙年龄约为 38 万年）的最后散射面；另一个来自第一代恒星（宇宙年龄约为 4 亿年）再电离产生的电子上的散射。正是偏振观测改进了非均匀谱的测量精度，对暴涨理论提供了进一步支持。

宇宙学研究经历了大爆炸宇宙学和暴涨宇宙学两个阶段，取得了很大成功。据我国权威的天体物理学家陆埏院士评论指出，“大爆炸宇宙学几乎没有引入什么特殊的假设，却获得了原初核合成和微波背景辐射那样精确的观测检验。暴涨宇宙学虽然引入了尚未直接检验的暴涨假设，但产出却极为丰富。它不仅解释了视界、平直性等重大疑难，还做出了今天宇宙几乎精确平直等极强的预言。虽然暴涨假设不那么自然，却能与高能粒子物理相印证，而且暴涨只发生在宇宙极早期仅 10^{-33} 秒的短暂时间内，暴涨后的再加热过程与大爆炸宇宙学自然接轨。暴涨假设好比对大爆炸宇宙学动了一次只有局部‘微创’（只影响 10^{-33} 秒的短暂时间）而获得极大成功的手术。”

从 1948 年伽莫夫建立热大爆炸的观念以来，通过几十年的努力，宇宙学家们大致勾画出这样一部宇宙历史，即我们的宇宙大致经历了这样几个演化阶段：

原始火球阶段 大爆炸发生(时间为 0)，宇宙开始急剧膨胀，辐射和物质均匀分布，一切成分都处

在热平衡态，温度极高。历经普朗克时代(10^{-43} 秒, 10^{32} K)、大统一时代(10^{-35} 秒, 10^{28} K)、强子时代(10^{10} 秒, 10^{15} K)、轻子时代(10^{-3} 秒, 10^{12} K)，当温度达 10^{10} K 时，便进入以辐射为主的辐射阶段。

辐射阶段 宇宙年龄为 10 秒时，温度从 5×10^9 K 下降，几乎所有能量均以光子(辐射)形式出现；经过最初 3 分钟时，温度为 10^9 K，宇宙已经膨胀为直径约 1 光年的实体，同时约有近三成的物质合成为氦，核反应消失；但宇宙的辐射密度仍然大于物质密度。一直到 1000 年时，宇宙才从辐射为主的时期过渡到物质阶段。

物质阶段 宇宙年龄 2000 年以后，物质密度大于辐射密度，温度还有 10^5 K； 10^5 年时，温度为 5000K，物质对于背景辐射变得透明，物质的温度开始低于辐射温度；物质复合的结果使重子数与光子数之比将保持恒定； 10^8 年时，辐射温度为 100K，物质温度为 1K，星系形成； 10^9 年时，辐射温度为 12K，出现最早的类星体，随后各种天体演化过渡到现在。

现在 各种天体形成为现在观测到的样子，目前宇宙年龄为 137 亿年，宇宙背景辐射温度约为 3K，星系物质温度约为 10^5 K。

根据大爆炸宇宙学的观点，大爆炸的整个过程是：在宇宙的早期，温度极高，在 100 亿度以上。物质密度也相当大，整个宇宙体系达到平衡。宇宙间只有中子、质子、电子、光子和中微子等一些基本粒子形态的物质。但是因为整个体系在不断膨胀，结果温度很快下降。当温度降到 10 亿度左右时，中子开始失去自由存在的条件，它要么发生衰变，要么与质子结合成重氢、氦等元素；化学元素就是从这一时期开始形成的。

谈到自然界化学元素的来源，人们不难想到，原子序数大的元素可以从原子序数小的元素产生出来。那么，最早的元素就应该是氢。氢的原子序数为 1，它的原子核只由一个质子构成。根据大爆炸宇宙学，宇宙刚诞生出来大约 0.0001 秒后，飞来飞去的三种夸克相互吸引结合，先诞生出质子和中子；随着宇宙的膨胀，宇宙的温度随之下降。这时候，质子开始捕捉乱飞的电子。一个质子捕捉到一个电子，遂成为一个氢原子。这期间，也有微量的氦原子核、锂原子核诞生出来。其他的元素则是在宇宙诞生以后约 4 亿年才开始形成。它们是在主要由氢

聚集形成的恒星内部通过核聚变反应合成出来的。核聚变反应是多个原子核由于高温聚合在一起而形成新的原子核的一种物理反应。

按照大爆炸宇宙论，宇宙物质在大尺度上是均匀而各向同性的，宇宙的膨胀造成了星系的退行(哈勃定律)；大爆炸的宇宙是一个演化着的宇宙；通过理论计算知道，遍及整个宇宙的黑体辐射(相应的辐射温度)、氢的丰度(星系中的氢含量，它在各星系中大致相同，大约 30%)等无论在定性还是定量方面都获得了观测证实；这个模型确定宇宙年龄的上限大约 200 亿年。以广义相对论为基础的大爆炸宇宙模型(也叫作标准宇宙模型)，目前一般认为它是比较成功的一个理论。

宇宙的未来

我们的宇宙的未来趋势取决于宇宙究竟是“开放”还是“闭合”的。开放的宇宙将永远膨胀下去，而闭合的宇宙则将终止膨胀并开始收缩。宇宙大爆炸的基本框架仍然是弗里德曼式的，根据这个模式，有一个临界密度 $\rho_c \approx 10^{29}$ 克/厘米。设宇宙目前的平均密度为 ρ_0 。如果 $\rho_0 > \rho_c$ ，宇宙是闭合的；反之， $\rho_0 < \rho_c$ ，宇宙是开放的；而当 $\rho_0 = \rho_c$ 时就是平直的。人们可以通过观测到的 ρ_0 值来判断宇宙的开放或闭合。由于星系之间的引力牵制，宇宙的膨胀过程可能减速。考虑用减速因子 q_0 来表示减速程度，可以证明， $q_0 = 1/2$ 对应于 $\rho_0 = \rho_c$ ； $q_0 > 1/2$ 对应于 $\rho_0 > \rho_c$ ，闭合的宇宙； $q_0 < 1/2$ 对应于 $\rho_0 < \rho_c$ ，开放的宇宙。同样可以从观测中得到减速因子 q_0 。宇宙膨胀速度的变化，也可以决定宇宙是开放还是封闭的。如果宇宙是开放的，目前的膨胀速度标志的宇宙年龄上限大约为 200 亿年。近年研究认为，如果宇宙是闭合的，则该膨胀速度标志着宇宙年龄约为 137 亿年。

根据天文学家们描绘，未来的宇宙可能有三类不同的情况。第一种命运，就是引力最终占上风。引力最终克服四向膨胀的力量，宇宙不再膨胀。然后，我们的宇宙就开始大收缩，这个有一天要收缩的宇宙就叫做“闭宇宙”。第二种可能就是一直膨胀下去，按照哈勃的线性关系，无穷无尽地一直膨胀下去，这种一直不断膨胀下去的宇宙称为“开宇宙”，即开放式的。第三种是宇宙可能膨胀之后又收缩，收缩之后又膨胀，变成反复的振荡，这个称为振荡的宇宙。天文观测已表明，我们的宇宙不是属于第

三种情况，而是属于第二种情况，即开宇宙。

众所周知，宇宙存在着很多的物质，根据万有引力定律，宇宙中的物质应该集中到一点上，由于引力存在它们距离应该越来越近。正是由于大爆炸以后的惯性，所以向四面八方膨胀的一种力抵消了万有引力，即膨胀的力占了优势。所以宇宙才能处在现在的这样一种膨胀的状态当中。正因为宇宙物质之间有万有引力，因此这个过程是一个引力与斥力之争，到底是引力厉害还是斥力厉害？这就要看宇宙中间物质的密度，如果这个宇宙中间物质比较多，密度比较高，斥力最后顶不过引力了，那么总有一天膨胀会减慢下来，当膨胀结束后就开始收缩，又由于万有引力的存在，宇宙可能会向一个引力中心坍缩。但是话说回来，如果这个宇宙物质密度不够高，它顶不住那个斥力，那么我们的宇宙就会一直不断地膨胀下去，即属于开放式的。

天文学家在观测中认识到，那些归类为 Ia 型的超新星有着惊人的恒定性，即其爆发有一定的亮度，而且亮度随时间减弱的情形是可预测的，因此天文学家可以将它们当做所谓“标准烛光”，并且能测量出它们与地球的距离。早在 1980 年，美国天文学家帕尔玛特(S. Perlmutter)和加州大学柏克莱分校的潘尼巴克(Carl Pennypacker)合作，搜寻相对较近的超新星。当时这个领域还很新，他们的主要竞争者只有澳洲的一位业余天文学家艾凡斯(Robert Evans)，他利用自制的天文望远镜来辨识超新星。他们的目标是要测量宇宙的动力学，当时仍认为宇宙的膨胀会因为物质的掌控而减速，因此他们需要进行更多观测，以标示出超新星的亮度和最大亮度，以及亮度减弱的情形，这些通常需要连续观测几个星期。帕尔玛特的团队花费了多年时间，收集并且分析研究那些煞费苦心来自世界各地的数据。

1998 年，帕尔玛特等人的超新星宇宙学课题组(SCP)和里斯(A. G. Riess)等人的高红移超新星课题组(HSST)用 Ia 型超新星经过诸多校正后作为标准烛光光源进行观测，结果发现，那些远的 Ia 型超新星的亮度比按宇宙减速膨胀预期的要暗(即更远)，由此发现，宇宙不仅如 1929 年哈勃发现的在膨胀，而且膨胀速度还一直增加，换句话说，我们的宇宙不是在减速膨胀，而是在加速膨胀。科学家们说，这是一个令人震惊的发现！所谓万有引力自然是只有引力，没有斥力，因此宇宙膨胀只可

能减速；加速膨胀的发现意味着宇宙中存在斥力，而且，宇宙整体上看应当以斥力为主。这就意味着要修改万有引力定律，或者至少要增加一种新的力——斥力。

河外星系超新星的观测结果和宇宙微波背景辐射各向异性的观测，均已证实我们的宇宙在加速膨胀。科学家还非常关心宇宙中物质的总量。COBE卫星不仅测出了宇宙微波背景辐射满足高度热平衡的黑体谱，而且测出了温度扰动微小的各向异性。在COBE项目的基础上，耗资145亿美元的美国“威尔金森微波各向异性探测器”(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 简称WMAP)于2001年6月30日进入太空，其探测目的是找出宇宙微波背景辐射的温度之间的微小差异，以帮助测试有关宇宙产生的各种理论。该探测器以宇宙背景辐射的先驱研究者大卫·威尔金森命名，长期以来，他是宇宙背景辐射探测的骨干力量，也是COBE团队的精神力量，他因病于2002年逝世。《自然》杂志的文章指出，威尔金森如果现在还活着，那么他应该能分享2006年的诺贝尔物理学奖。

WMAP上天，一刻不停地在绘制宇宙微波背景辐射的图谱。除了上述空间探测器工作之外，同时进行的还有地面长期的观测宇宙学的工作，这个工作是用光纤去做遥远星系的三维数据，以取得遥远星系的距离和它们的位置。根据这项研究所得出来的初步结论，可看到遥远的早期宇宙的物质分布情况。科学家们描绘了一幅今天我们宇宙的图像，这就是：我们的宇宙从大爆炸到现在是137亿年，也就是说我们的宇宙的年龄是 137 ± 2 亿年，宇宙大小是 137 ± 2 亿光年，宇宙物质总的大体构成是由22%的暗物质、74%的暗能量和4%的普通物质，换一句话说，人们见到的星系、恒星、星云等明亮物质仅仅占4%。根据WMAP探测到的宇宙背景辐射的起伏情况，可以肯定，我们宇宙的几何特征是一个平直的宇宙。研究还表明，暗能量似乎会加速宇宙膨胀，而暗物质则有助于星系和星系团保持“团聚”。

美国宇航局于2003年公布了WMAP卫星的首年观测结果，2006年发表了WMAP卫星三年的观测结果。这些结果与暴涨宇宙学的预言非常一致。科学家认为，微波背景辐射微小各向异性的精确测定对于暗能量存在的确认以及宇宙学中不少基本问题的澄清也极为重要。宇宙早期的暴涨和近期的加

速膨胀很可能由真空能量引起，与真空量子数一致的只能是标量场。因此，这两次加速膨胀很可能均由标量场引起，但它们的规模却十分不同。直至今日，在粒子物理中最有名的标量粒子希格斯(Higgs)粒子，人们已经寻找了几十年，至今没有找到。

据去年4月《科学美国人》杂志载文介绍说，在1000亿年之后，人们在仰望天空时会看到些什么呢？根据宇宙学家的推测，如果不借助望远镜，那时的人们看到的景象大概跟今天的星空没什么太大的区别：天空中散布着属于他们所在星系的恒星；到那时，最大最亮的恒星应该早就耗尽了核燃料，为数众多的较小恒星依然会点亮夜空。不过，当他们未来的科学家们建造出望远镜，有能力观测他们所在星系以外的其他星系时，情况就大不相同了。他们将看不到天上任何东西！到那时，邻近的星系已经和银河系并合成一个超星系，所有其他的星系全都将消失不见，逃出事件视界之外了。未来的天文学家还能不能找到大爆炸的其他依据？他们能不能用宇宙微波背景来探索宇宙的动态演化？根据现代宇宙学家的推测，答案是否定的。由于随着宇宙的膨胀，背景辐射的波长也会变长，辐射也会更加弥散。当宇宙的年龄达到1000亿年时，微波背景的峰值波长也将长达几米——已经不再是微波，而是射电波了。辐射强度也会降低到目前强度的一万分之一，也许再也观测不到了。

随着时间的继续流逝，宇宙背景将变得不可观测。在我们所处的星系中，恒星之间充斥着一种电子电离气体。低频射电波无法穿透这些气体，它们会被吸收或者反射回去。类似的效应可以解释，为什么我们能在夜晚收听到遥远城市的调幅广播，因为无线电波会被电离层反射再折回地面。星际介质可以看作为充斥于星系之中的一个巨型电离层。任何频率低于1000赫兹(即波长长于300千米)的射电波，都无法在我们所处的星系中传播。频率低于1000赫兹的射电天文学，永远不可能在星系内部建立起来。当宇宙的年龄达到目前年龄的25倍时，微波背景的波长就会被拉伸到这个极限之上，星系内的居民也就不可能再探测到这种辐射。甚至在一天到来之前很久，微波背景中那些给今天的宇宙学家们提供了许多有用信息的精细图案，就会因为信号变得太弱而无法研究了。

目前摆在人们面前的非常重要的问题仍然是：

精细调节

章德海

上讲谈到基本费米子有三代粒子。三代粒子的一个基本性质是它们的质量（其值见表 1），这些质量是实验直接或间接测定出来的。测量中会碰到种种难题，例如中微子是难于捕捉的，夸克是禁闭的，复合粒子是短命的，质量是跑动的等等。尤其轻夸克质量的测量绝非轻易，也导致某些数字不准。中微子质量目前没有被完全测定出来，这里只给了个来自宇宙学限制的大概数值，它们很小。中微子质量很小的原因是由于有一个“跷跷板机制”在起作用。顶夸克 t 的质量正好在弱电能标上，这很自然于是能很好理解。但是其他粒子为什么要取这些质量值，在理论上几乎没有被理解，我们只知道测出来是如此。除中微子外，从电子到顶夸克，质量跨度高达 6 个量级，特别令人惊奇。可以发现一些质谱的规律：例如下一代比上一代重，每代中夸克比轻子重。但是，整个质谱的分布仍然缺乏明显规律。然而略微观察也能发现一个几乎成立的经验“规律”：在每个二重态中，电荷绝对值大者重。例如 (ν_e, e) 轻子二重态， e 比 ν_e 重；(b, t) 夸克二重态中 t 比 b 重，等等。总共 6 个二重态中有 5 个符合这一经验规律，唯一的例外是 (d, u) 二重态， u 居然比 d 轻！这是一件最至关重要的事情！让我们再次强调一下一个重要事实：即使我们千辛万苦获得了实验结果，我们并不一定能理解它。理解夸克轻子质谱是“味物理”的艰巨任务，也是整个基本粒子物理的重大任务，又是理解整个自然世界的关键所在！

表 1 三代基本费米子的质量

(质量单位: GeV)	轻子二重态	轻子二重态	夸克二重态	夸克二重态
电荷绝对值符号	0	1	1/3	2/3
第一代	$\nu_e, <10^{-9}$	$e, 0.000511$	$d, 0.006$	$u, 0.003$
第二代	$\nu_\mu, <10^{-8}$	$\mu, 0.106$	$s, 0.104$	$c, 1.27$
第三代	$\nu_\tau, <10^{-7}$	$\tau, 1.777$	$b, 4.2$	$t, 171$

为什么 u 夸克比 d 夸克轻这件事如此重要呢？这关系到宇宙的一个根本结构——核结构。没有丰富的核结构，就没有丰富的化学世界，于是就没有生命！但是有没有核结构的最关键要素在于 u 、 d 夸克质量，而且几乎是命悬一线！只要 u 、 d 夸克质量的取值稍有差池，核结构就要崩溃瓦解。也许有人会问， u 、 d 夸克质量是“基本物理常数”，该什么值就什么值，怎么会容许人们讨论它们有所变动或选择呢？那是因为物理世界的形成是对称和破缺矛盾斗争的结果，并非一成不变。对称是完美的，破缺是多样的。从而决定了物理世界的丰富性，因此某些表面上“基本”其实不基本的物理常数就是可调的了。 u 、 d 夸克质量处在整个粒子物理对称破缺链的末端，对于多次对称破缺的复杂过程极为敏感，颇有非线性动力学中“蝴蝶效应”之味，因此它们的取值可能有相当的随意性。于是首先我们要解释，为什么 u 比 d 轻与核结构有关？上讲我们谈到，要使原子核有丰富的但又不过分的结构，中子必须适度不稳，于是它应比质子略重。由于牵涉核结构，



究竟什么是宇宙暗能量？宇宙暗物质又是什么？宇宙膨胀加速会永远继续下去吗？等等，这些问题正等待宇宙学家们回答。美国芝加哥大学天体物理学家特纳 (M.Turner) 说：“虽然我们还不知道暗能量是什么，但可以肯定地说，弄清楚暗能量将会对统一宇宙间的力和粒子提供至关重要的线索，而弄清楚它的途径要的是天文望远镜而不是加速器。”

据最近报道，2009 年 4 月，欧洲空间局一颗新的宇宙观测卫星——普朗克卫星将从欧洲发射升空，继续提高研究的精确度（即前所未有的 0.000001K 测定误差），或许将为解开宇宙怎样诞生，怎样演化到今天的形态，未来向什么方向演化等等重大宇宙之谜提供更多、更新的线索。

（北京天文馆 100044）