

原文发表于 2003 年 3 月 13 日出版的《Nature》杂志
译自：“Cosmology gets real”, Geoff Brumfiel. 2003, Nature, 422, 108 -110

不断走向精确的宇宙学

Geoff Brumfiel 著
王二超 崔辰州 译
中国科学院国家天文台

通过澄清宇宙的年龄及其组成，天文学家们已经叩开了精确宇宙学时代的大门。现在，他们正为揭开暗物质和暗能量的神秘面纱而努力。

宇宙学的历史充满了深邃的思想和离奇观念。早期欧洲的天文学家认为地球处在宇宙的中心，而宇宙则是一个充满水晶的多层同心球；然而美洲的天文学家则认为，宇宙被一只巨大的神龟驮在背上。许多现代宇宙学有着相似的构思，一些理论学家用不规则的碎片来描述宇宙，用巨大的冷流体球的行为模拟宇宙的演化。

由于宇宙的重要参数，如年龄，不能被精确的测量，这类宇宙学的猜测很是盛行。但是在过去的 20 多年里，天文学家们一直在以前所未有的精度测量着这些数据。宇宙微波背景辐射（CMB）是早期宇宙辐射的遗留物。新近的 CMB 观测结果使宇宙学正迅速的收敛在单一的宇宙图像中。

但是这张宇宙图像十分的奇特，一股被称为暗能量的神秘力量正在把宇宙撑开。宇宙中绝大部分的质量依然不可见，也不能肯定这些“暗物质”到底是什么东西。现代宇宙学的两大理论支柱—量子力学和广义相对论—仍然互不相容。利用新一代精确的天文仪器，天文学家们正在努力减小宇宙学理论中的这些缺陷。

当前我们对宇宙的许多认识都源于二十世纪八十年代，对天文学家来说那是个困难的时期。通过研究宇宙大尺度结构，如星系的分布和宇宙的膨胀历史，天文学家得到了一些基本的结论，虽然这些结论还不是很可靠。

目前的状况

大多数人相信我们所处宇宙的几何结构是平坦的，这就意味着它会继续永远的膨胀下去。如果真的是这样，那么宇宙的物质密度肯定有一个特定值。但是宇宙中可见质量的估计值远小于这个数值。天文学家知道除此之外还有我们看不到的质量—暗物质，它们通过其施加在附近星系的引力影响而揭示自身的存在。即使是这样，综合了所推测的暗物质与观测到的可见物质之后的计算结果与理论预测还存在 25-30% 的误差。这使得我们很难断定宇宙是否真的是平坦的。

与观测宇宙学所面临的困难局面相比，理论学家的工作进展得就顺利多了。直到高能物理学家意识到由粒子加速器所得到的知识可以应用到早期宇宙的高能条件之下，这才使理论学家的工作受到束缚和影响。“在此之前，那简直就是理论学家的天堂，因为几乎没有任

何可以进行实际验证的数据，”英国诺丁汉大学的理论天体物理学家 Peter Coles 说，“你可以自由的进行理论上的设想，而不用担心会被实际观测数据所束缚。”

这些理论中最流行的是暴胀理论，麻省理工学院（MIT）的 Alan Guth 对这个理论的发展做出了重要的贡献。这个学说认为在大爆炸后的 10^{-35} 秒内宇宙急剧的膨胀，并明确预言了刚刚膨胀后的宇宙中的物质和能量分布。按照这一理论所描述的，宇宙成为了诸如电子、光子这些高能粒子的海洋，但同时也存在密度偏高或偏低的小区域。这些区域以温度起伏的形式在宇宙微波背景中留下了自己的印记。大爆炸 30 万年后，微波背景就不再与普通物质发生作用。通过检验这些预言，实测天文学家开始逐步赶上了理论学家的工作。

1990 年美国宇航局的宇宙背景探测器卫星首次发现了宇宙微波背景中的温度波动，1998 年，一台装载在气球上的小型望远镜—BOOMERANG 首次飞越了南极洲，它给出了更精确的温度变化图像。这两张图像看上去都显示了暴胀理论所预言的温度变化。加利福尼亚的劳伦斯·伯克利国家实验室的天文学家 Saul Perlmutter 指出：“这些结果具有重要意义，给予了天文学家们继续自己的研究的信心。”

在这以后，其他的测量方法为暴胀理论提供了更多的支持。宇宙微波背景研究中发现的早期宇宙物质分布不均匀导致了最早一代恒星的诞生。这就允许理论学家们预言恒星和星系在何地何时就已经形成。现在英澳天文台两度视场星系红移巡天观测和美国新墨西哥州 Apache Point 天文台的 Sloan 数字化巡天（SDSS）观测已检验了这些预测。SDSS 取得了有史以来最好的宇宙大尺度结构图像。这些观测图像揭示了星系是以何种方式分布的，还提供了暗物质分布的信息。这些结果很好的支持了暴胀理论中预言的暴胀过程对宇宙微波背景的影响。但是，仍然还有三分之二的宇宙物质得不到解释。

爆炸中的谜团

随着支持暴胀理论的证据的积累，一个解决此问题的方案也提了出来。1998 年由 Perlmutter 领导的一个小组和澳大利亚堪培拉附近的斯特朗洛山天文台的 Brian Schmidt 带领的第二小队用各自的技术测量了遥远星系中爆发的超新星到地球的距离。首先他们测量了爆发发出光线的颜色。在绝大多数情况下，一个目标越远，看上去它就显得越红。在现代天文学中这种红移是一种使用非常流行的测距方法。天文学家已经知道超新星爆发有着十分相近的光度，所以他们可以通过测量爆发所显现的亮度来推断其距离。

Perlmutter 和 Schmidt 的小组发现，通过亮度测量的超新星爆发的位置要比按照红移计算的远得多。红移基于宇宙膨胀速率正在减慢的假设。这个发现使他们和其他天文学家提出了相反的观点：宇宙的膨胀正在加速，一些无法解释的神秘力量把宇宙向外拓展。

暗能量现象看上去很奇特。但是依照相对论理论，质量和能量是等价的。宇宙学家在思考产生这种神秘力量所需的能量时发现，这些能量恰好说明了宇宙图像上所欠缺的质量。如芝加哥大学的宇宙学家 Michael Turner 说：“就像恰好吻合的齿条，严丝合缝，十分有趣。人们很快就会接受这一看法。”

由 NASA 的威尔金森各向异性微波探测器所得到的最新的宇宙微波背景数据做补充，我们现在的宇宙图景比以前清楚多了。总的来说，各种各样的宇宙微波背景研究已经证实宇

宙的确是平坦的。威尔金森探测器给出了宇宙的一个组成清单：23%的暗物质，73%的暗能量，剩下的4%才属于星系、恒星和我们人类。宇宙的年龄也被认定为137亿年，误差在1%以内。全部物质的密度和暴胀理论所预言的相符，误差范围在2%以内。“这使宇宙学的可信度提高了一个大台阶，”费城的宾西法尼亚大学的宇宙学家Max Tegmark言道，“宇宙学已经变成了真实的，实在的科学。”

虽然这一巨大成就赋予了宇宙学理论前所未有的更可靠的立足点，我们认识中的漏洞还是相当多的。天文学家确信暗物质和暗能量自始至终一直就存在，但不知道它们到底是什么，如何找到它们。就像Turner所说的“宇宙的96%都是我们从未见过的东西。”

隐藏的奥妙

暗物质涉及的是更古老的，同时可能也是更简单的问题。理解它的关键在于它对恒星、星系的作用。按照广义相对论所说，任何质量都会使它周围的空间发生扭曲。当遥远物体发射出的光在暗物质近旁穿过时，它就会弯曲——这个作用叫做引力透镜。过去，天文学家只能探测能产生显著引力透镜效应的大的暗物质团块。但借助于计算机程序，他们现在可以探测到很微弱的扭曲效应。

美国夏威夷大学的天文学家Nicholas Kaiser说，这些引力透镜探测计划正在进行中，但未来的几年内它们会有结果产出。他预言探测到的引力透镜数目将会以幂级数增长。这为天文学家测定当前宇宙的暗物质分布带来了希望。虽然这些探测可能对研究暗物质的本质没有多大的帮助，但它们会为暗物质在宇宙演化中扮演的角色提供更有力的约束。

对于暗物质是如何与其他物质相互作用的，宇宙学家也知道得很少。粒子运动的越快，它传递给任何与其相撞的粒子的能量就越多。如果，在早期宇宙中，暗物质是以接近光速的速度运动，它就会在物质成团、聚合，进而形成恒星和星系的过程中留下痕迹。天文学家能够看到宇宙中非常遥远之处恒星和星系的形成，但到目前为止他们还没有发现任何快速移动的暗物质与其他物质作用而留下的痕迹。

这使得许多宇宙学家推测暗物质可能由相对慢速运动的重粒子组成，而且这些重粒子很少与可见物质发生作用。这种推测引起了高能物理学家的兴趣，因为如果是这样，他们便可以为宇宙学家提供帮助。虽然现在粒子加速器还没有产生令人兴奋的结果，2007年，日内瓦附近的欧洲核子中心（CERN）的科学家将有更强大的新设备——大强子对撞机投入使用。理论计算显示此对撞机可以产生暗物质的候选者，这会帮助宇宙学家建立更好的宇宙模型。

暗能量是更让人头痛的问题，问题的答案要依靠对真空性质的探寻。依据量子理论，即使在真空中，粒子和与其相对应的反粒子也在不断的产生和湮灭。一些科学家已在猜测这种真空能量可能就是加速宇宙扩张的力量。但理论预测的真空能量强度比今天探测到的暗能量强度要高120个数量级。

暴胀理论的创始者之一，新泽西州普林斯顿大学的理论物理学家Paul Steinhardt表示，另一种观点认为暗能量可能是暴胀的孪生兄弟。如同暗能量一样，暴胀力反抗引力，把所有的东西向外推。但暴胀是当前向外作用力强度的好多倍，并且似乎在大爆炸后不久就消失了。理论学家现在正在用暴胀理论的弱态方程做实验来看他们可否描述暗能量。到目前为止，还

没有出现可靠的结论。“这些模型提出的问题比它们所能回答的问题还多，”Turner 如此言道。

亮丽之弦

将量子力学和广义相对论统一在一起的尝试可以产生其它的一些理论观点。弦理论已经广为人知，它们提出所有的基本粒子全部由在多维空间中不断振动的微小的弦和环组成。这一理论可能能够解释像真空能量这样微小的量子起伏如何在大尺度范围内与引力相互作用产生暗能量效应。哈佛大学的理论学家 Lisa Randall 正在进行一项带有额外维度的暴涨理论研究，他称：“弦理论可能给你一些答案，但我不认为所有的问题都已趋近解决。”

像过去那样，最终科学家还是可以提供约束这些模型所需要的数据。在 2001 年，马里兰州巴尔的摩空间望远镜科学研究所（STScI）的天文学家 Adam Riess 领导的一个哈勃空间望远镜小组通过观察老龄的超新星来确定暗能量的存在。这些超新星比 Pterlmutter 和 Schmidt 所研究的超新星还要古老。Riess 现在正在寻找更老的超新星以研究暗能量是否随时间变化。当然，他的研究只能探测到非常明显的力作用过程。

除了超新星以外，没有其它既遥远又明亮的天体使得自身能被进行距离测量，所以天文学家正在为寻找探测暗能量的新方法费尽脑汁。最有希望的是夏威夷 Mauna Kea 山上凯克天文台的银河系外深空演化探测器 2 号。此计划试图确定何种类型的天体能在整个宇宙中均匀的分布，而结果很可能是某一类星系。研究距地球不同距离的这类天体从而研究不同的宇宙演化阶段，这会揭示暗能量是如何使星系分离的，同时可以对利用超新星得到的结果进行验证。

新一代精确的天文仪器将在未来十年或者更长的时间内为天文学研究提供更丰富的数据资料，参见附文。例如超新星/宇宙加速度探测器（SNAP）卫星会持续的监测天空中的特定区域，搜寻新爆发的超新星。来自多个美国研究机构的科学家都支持这个探测计划，他们声称它一年可以收集到 2000 颗超新星的信息，将是地基观测十年所获超新星数目的 20 倍。

这样的数据将允许天文学家判断暗能量是否像真空能量的解释显示的那样是稳定的，或是像它那孪生的暴涨兄弟在早期宇宙中所表现的那样是变化的。参与 SNAP 项目的科学家们仍在寻求基金支持。探测器在 2010 年以前发射的可能性不大。Steinhardt 言道：“要搞清暗能量的本质需要很长的时间。”

对许多天文学家来说，Wilkinson 探测器生成的 CMB 图像是宇宙学研究中的一个里程碑。这些数据对测定宇宙的基本特性起了非常重要的作用。尽管还有暗物质暗能量这些还不清楚的现象，但与以前相比，宇宙学家对他们理解宇宙的能力更加充满信心。“我们已经把宇宙基本的细节从其藏匿之处驱赶了出来，”Turner 说，“而我们现在需要的是一个好的宇宙模型以把故事编得更圆满。”

译者注：译者感谢国家天文台霍志英。她对译文进行了细致的校阅。

附文

引领宇宙学走向精确时代的新一代天文仪器

新一代的天文仪器为宇宙学家们提供了大量的数据。宇宙学家们可以借此检验自己的理论。

- **Planck 宇宙微波背景卫星**

这颗卫星与威尔金森探测器相比具有更高的空间分辨率和温度灵敏度，预计 2007 年发射。

- **James Webb 空间望远镜 (James Webb Space Telescope)**

即原来的下一代空间望远镜，NGST。它是哈勃空间望远镜的后继者，会使天文学家观察到比当前所能观测的更早的星系，预计2011年发射。

- **超新星 / 宇宙加速度探测器 (Supernova/Acceleration Probe)**

旨在测量遥远超新星的距离从而检测暗能量的强度是否随时间而变化

- **大口径综合巡天望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope)**

这是一架巨大的地基望远镜，可以为我们描绘精确的星系大尺度结构图像，通过引力透镜技术探测暗物质。

- **空间激光干涉天线阵 (Laser Interferometer Space Antenna)**

三颗卫星（利用激光干涉技术）来寻找暴胀过程中产生的引力波。引力波是暴胀理论中一个重要但尚未得到证实的预言。