

为什么说宇宙在膨胀？

撰文/郭宗宽



郭宗宽

中科院理论物理研究所研究员。2006~2011年，先后获得日本学术振兴会和德国洪堡基金会资助，从事博士后研究。2011年入选中国科学院引进“国外杰出人才计划（百人计划）”回国工作，2016年中科院终期评估结果为优秀。主要从事宇宙学前沿的研究，涉及暗能量及其观测限制、暴胀及其实验检验、宇宙微波背景等研究领域。迄今共发表论文五十余篇，目前总被引用2400余次。

1929年，美国天文学家哈勃（Edwin Hubble）通过分析多年来观测的数据发现，河外星系的退行速度与距离成正比，即离我们越远的星系，退行速度越大，这就是著名的哈勃定律。这种膨胀是一种全空间的均匀膨胀，就是说，无论在宇宙中的任何地方观测，周围的星系都在远离观测者，并且距离越远，退行速度越快。如何直观地理解这一点呢？就像给一个有斑点的气球充气，气球表面的斑点都在彼此远离。彼此远离的星系去了哪里呢？换句话说来说，宇宙的边界在哪里？这涉及到宇宙的几何性质，对于平直和双曲几何，宇宙是无限大和无边界的；对于球形几何，宇宙是有限大和无边界的。因此，宇宙可以永远膨胀。由于光的传播速度是有限的，我们只能看到宇宙的部分区域，对宇宙的认知也局限于这部分区域。

宇宙膨胀是20世纪最伟大的科学发现之一。这一发现有力地支持了弗里德曼（Alexander Friedmann）在1922年理论上得到的膨胀宇宙学解。该膨胀解遭到爱因斯坦的极力反对，他认为宇宙应该是静态的，而不是膨胀的，爱因斯坦的静态解是当时的主流观点。后来，爱丁顿（Arthur Eddington）1930年证明爱因斯坦的静态解是不稳定的。最终，爱因斯坦于1931年放弃了自己的静态解，认可了弗里德曼的膨胀解。

宇宙膨胀的发现告诉我们，在宇宙遥远的过去所有物质都非常靠近，理论上宇宙的演化起源于一个初始的大爆炸，这就是热大爆炸理论（Hot Big Bang Theory）。大爆炸之前的宇宙是什么？由于时间和空间自身是在大爆炸时刻产生，因此没有“之前”和“宇宙”的概念。膨胀在宇宙演化过程中扮演着重要的角色。譬如，当中子转化为质子的反应率小于宇宙膨胀率时，重子从轻子中退耦，较轻的原子核开始形成；当光子与电子的相互作用率小于宇宙膨胀率时，光子退耦，宇宙微波背景辐射形成。轻元素丰度的测量和宇宙微波背景辐射黑体谱的观测为热大爆炸理论提供了令人信服的证据。

热大爆炸理论取得了成功，但也存在一些理论问题。譬如，对于一个非平坦宇宙，随着宇宙膨胀，宇宙将迅速变得越来越弯曲，反推到宇宙早期，要求总密度参数非常非常接近1，

略微的偏离都会导致与目前的观测不一致，这就是平坦性问题。另外，我们现在观测到的宇宙尺度反推到宇宙早期时远远大于因果关系区域，这很难解释观测到宇宙是均匀各向同性的，这就是视界问题。为了解决这些问题，1981年古斯（Alan Guth）提出了宇宙暴胀思想，在宇宙极早期，发生过一段加速膨胀的过程，持续了大约 10^{-32} 秒，暴胀结束后经过重加热机制暴胀场衰变为基本粒子，回归热大爆炸理论。指数的加速膨胀使宇宙瞬间变得非常平坦，在暴胀过程中哈勃参数几乎不变，而宇宙标度因子指数增加，从而观测到的宇宙尺度在暴胀期间可以小于哈勃尺度。最重要的是，暴胀预言的原初曲率扰动和引力波能很好地解释宇宙微波背景辐射在不同方向的微弱涨落，同时为宇宙大尺度结构的形成提供了原初密度扰动的种子，因此，暴胀成为了现代宇宙学的重要组成部分。尽管目前有很多唯象的暴胀模型被提出，但暴胀的物理本质仍是一个未解的科学问题。

我们知道，由于物质之间的引力是相互吸引的，无论辐射成分占主导还是物质成分占主导，宇宙都应该减速膨胀。然而，1998年超新星宇宙学项目组和红移超新星搜寻组分别发现宇宙在加速膨胀，这一重大发现很快斩获了2011年的诺贝尔物理学奖。理论上如何解释宇宙的加速膨胀现象呢？解释大致分为以下四类：（1）对Ia型超新星作为“标准烛光”提出质疑（显然这是在挑战诺贝尔奖的权威性）。

（2）破坏宇宙学原理的非均匀宇宙，认为我们刚好处在宇宙的一个空洞中心，物质的不均匀分布导致了宇宙加速膨胀的假象（但这与其他观测实验不相符）。（3）在大尺度上修改爱因斯坦引力理论，这类典型的有DGP模型和f(R)模型。（4）引入负压强的暗能量，最简单的就是宇宙学常数，另一种可能是随时间变化的动力学场。后两类是目前研究的主流，观测上如何区分这两类模型是重要的研究课题。

现代宇宙学进入了精确时代，所有观测一致表明，宇宙经历了从加速膨胀到减速膨胀，再到加速膨胀阶段，揭示驱动这两段加速膨胀的物理本质是21世界现代宇宙学中最重大的两个科学问题，对它们的研究极有可能孕育新的物理学革命。