

# 开拓对宇宙认识的新天地

孟园 曹海霞

(苏州大学物理科学与技术学院 江苏 苏州 215006)

(收稿日期:2019-11-02)

**摘要:**目前的宇宙大爆炸理论认为,我们的宇宙诞生于137.7亿年前的一次爆炸.1922年Friedmann在证明Einstein提出的广义相对论中的引力场方程时,解出了此方程的非静态解,认为宇宙是膨胀的,1929年Hubble通过他的观测结果也证明了宇宙在膨胀,这一观点才得到天文学界的承认.1930年后的时间里,稳恒态宇宙模型与热大爆炸宇宙模型成为天文学界的主流观点,1965年宇宙微波背景辐射的发现,彻底结束了这场争论,Gamow, Alpher及Herman提出的热大爆炸宇宙模型也成为近代宇宙学的标准模型.随着理论的完善和观测仪器精密度的提高,大爆炸宇宙模型也面临着更多的挑战.

**关键词:**宇宙大爆炸 微波背景辐射 宇宙演化模型

## 1 引言

2019年10月8日,在瑞典的斯德哥尔摩瑞典皇家科学院宣布授予加拿大裔美国科学家James Peebles、瑞士科学家Michel Mayor和Didier Queloz诺贝尔物理学奖.诺贝尔物理学委员会对他们的工作给予了高度评价:“这是对宇宙的结构和历史的新理解,第一次发现了太阳系外的行星轨道,这个发现将彻底改变我们对世界这个概念的理解.”奖项得主之一James Peebles的主要贡献是使宇宙学从推测转变为一门精密的科学,建立了目前的大爆炸理论下的宇宙演化框架.他认为我们现在所了解的宇宙只占宇宙世界的5%,剩下的95%是我们目前所不了解的暗物质和暗能量,等待人类进一步探索.

## 2 大爆炸宇宙论的提出

1917年伟大的物理学家Einstein将广义相对论用于对宇宙的思考中标志着现代宇宙学的开端.Einstein假设宇宙在空间上是封闭的,大尺度中物质静态均匀分布,在广义相对论场方程引入宇宙学常数 $\lambda$ ,得出一个静态宇宙模型<sup>[1]</sup>.除Einstein给出

了一个解外,荷兰数学家、天文学家Willem de Sitter还找到一个质量密度为零时有中心的解.1922年俄罗斯物理学家Friedmann认为广义相对论场方程存在非静态解,根据弗里德曼方程对半径积分所得到的关于宇宙时间的方程,他提出3种宇宙:

- (1) 从奇点开始经先减速后加速的膨胀的宇宙;
- (2) 宇宙在 $r=0$ 和 $r=x_1$ 之间震荡,或者从 $r=x_2$ 处开始加速膨胀,其中 $x_1$ 和 $x_2$ 为满足条件的两个解,且 $x_1 < x_2$ ;
- (3) 宇宙从奇点开始减速膨胀,到达最大半径 $x_1$ 处收缩回零点<sup>[2]</sup>.

但这一发现并没有受到科学家的关注甚至有科学家认为这一观点是错误的.直到1929年,Hubble通过对40多个星系光谱的分析发现,银河系外所有已被发现的星系发出光线的光谱都显示为红移.对这一观测结果说明:银河外星系不像银河内星系既有靠近地球也有远离地球,而是所有的银河外星系都在离我们远去,并且一个遥远星系的红移大于一个接近地球的星系的红移,即星系远离我们的速度与它离我们的距离大致成正比,宇宙在高速膨胀.通

作者简介:孟园(1995-),女,在读硕士研究生,研究方向为物理课程与教学论.

通讯作者:曹海霞(1971-),女,博士,副教授,主要从事大学物理教学和凝聚态物理研究.

过比较星系中特定原子发出的光和地球实验室原子发出的光我们可以推算出恒星的视向速度,光度测距法估计星系距离后,他便得出了著名的哈勃定律

$$v = H_0 r$$

式中  $v$  为远离速度,  $r$  为相对地球的距离,  $H_0$  为哈勃常数. 这与观测到的结果不谋而合,成为大爆炸宇宙论的有力支持.

美籍原苏联原子核物理学家 Gamow 对他的导师 Friedmann 支持的宇宙膨胀学说及 Bethe 支持的恒星热核反应思想加以发展. 并于 1948 年 Gamow, Alpher, Herman 发表的一篇名为《化学元素起源》的文章提出早期宇宙处于温度和密度极限高状态,化学元素是由于早期不均匀原始物质的迅速膨胀冷却产生. 1949 年 Alpher 和 Herman 提出关于物质辐射密度值,这些密度值在元素形成初期的宇宙中普遍存在,并指出宇宙的背景温度在目前的温度是 5 K<sup>[3]</sup>. 20 世纪 60 年代,美国普林斯顿大学的天体物理学家 Dick 教授领导着他的小组沿着 Gamow 等人的思路进行研究. 若宇宙产生于一场热爆炸,则可以用微波辐射计直接观测这种火球辐射留下的辐射,并且这种辐射符合普朗克定律,目前温度大约为 3 K,如果我们探测到了满足条件的辐射,则可以证明大爆炸宇宙论的正确性.

### 3 宇宙微波背景辐射的发现

离美国普林斯顿大学不远处的克劳福德山上,坐落着一架射电望远镜,贝尔实验室的两位青年 A. A. Penzias 和 R. W. Wilson 正在计划测量银河系内高纬星系的银晕辐射. 在仔细排除了其他辐射影响后,测得的总的天线温度减去天线各向噪声的等效温度得到多余的温度值 3.5 K 远大于实验误差 1 K,天线的多余温度令 Penzias 和 Wilson 很困惑,在和 Dicke 小组讨论了测量结果后, Dicke 小组认为贝尔实验室所得的结果正是他们一直在寻找的宇宙微波背景辐射,后来经过 Dicke 小组的进一步测量,确定这种辐射存在于宇宙的各处,各向同性,并且有大约 3 K 的黑体谱<sup>[4]</sup>. 1965 年宇宙微波背景辐射的成功探测对我们宇宙演化理论有着非常重要的意义,

Penzias 和 Wilson 也因宇宙微波背景辐射的成功探测获得 1978 年的诺贝尔物理学奖. 另外,在辐射温度为 3 K 这一前提下, Peebles 等人计算出宇宙早期氦的丰度值约为 22% 到 28%,与现有的宇宙中的氦丰度 26% 相当,由于氦元素十分稳定,所以氦的丰度也可作为大爆炸宇宙的另一重要证据. 1974 年美国 COBE 卫星的发射使宇宙微波背景辐射谱分析提高到前所未有的精确程度,2006 年的诺贝尔物理学奖获得者 John C. Mather 和 George F. Smoot 借助 COBE 卫星证明在波长在 1  $\mu\text{m}$  到 1 cm 宇宙微波背景辐射符合黑体辐射特征,证实了在较短波长范围内宇宙背景也完全符合黑体辐射,还更精确地测量到背景辐射的温度在一个方向上比相反方向高 0.003 K. 他们测得的宇宙背景辐射的微小涨落,解释了星系及恒星形成的原因,确定了我们的宇宙是平直的,会一直膨胀下去<sup>[5]</sup>.

### 4 现代科学视野下的宇宙演化图景

目前大爆炸宇宙理论已成为天文学界的主流观点,尽管这一模型还有待科学家们的进一步完善,但此模型为我们描述的宇宙的演化规律,是在大量证据的基础上建立的,为大多数科学家认同. 1946 年 Gamow 等人就提出过过热大爆炸宇宙模型,该理论认为宇宙诞生于大约 150 亿年前,当时的宇宙处于高密和高温的状态,随着宇宙的迅速膨胀,各种粒子在合适的温度下相互作用,宇宙变冷<sup>[6]</sup>. 基于大爆炸理论,科学家 James Peebles 帮助建立了目前的标准宇宙学模型,描述了宇宙从大爆炸开始经由量子涨落到宇宙暴涨再到各种粒子、星系天体形成的演化过程(图 1)<sup>[7]</sup>.

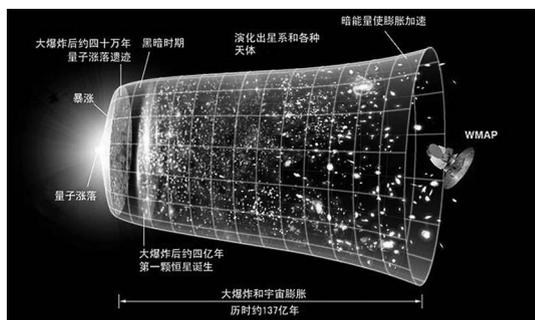


图 1 宇宙的演化过程(图片来源 NASA/WMAP Science Team)

现代的宇宙演化认为在 137.7 亿年前,宇宙产生于一次体积无限小、温度密度非常高的奇点爆炸,从爆炸开始到宇宙时间  $10^{-43}$  s(普朗克时间)前,时间没有意义,物质时空还未分化,4 种基本作用力统一于一个超大统一力场.普朗克时间后至宇宙时间  $10^{-36}$  s,这一阶段宇宙继续膨胀,温度约为  $10^{28}$  K,引力场和电核力场从统一力场中分离,伴有各类粒子和能量的生成,造成时空弯曲<sup>[8]</sup>.宇宙时间  $10^{-36}$  s 到  $10^{-32}$  s,美国理论物理学家 Alan Harrey Guth 提出宇宙暴胀的观点,这一观点可解决目前磁单极问题,此时高能级的量子真空向低能级跃迁,产生巨大的斥力效应,宇宙尺度按指数级瞬间增大约 50 个量级,磁单极子的密度变得极小,所以无法被观测到.宇宙从对称状态变为对称破缺状态,正是这种对称破缺使我们的宇宙不断演化,各种粒子如夸克、玻色子、轻子产生,电核力场分裂为强核力场和电弱力场,宇宙温度下降至  $10^{22}$  K 左右.从  $10^{-32}$  s 到  $10^{-10}$  s,宇宙中充满高温的夸克胶子电浆,电弱力场又分化为电磁力场和弱核力场,至此 4 种基本力场全部分离,宇宙温度为  $10^{15}$  K 左右.宇宙时间  $10^{-10}$  s 到  $10^{-3}$  s,这一阶段称为粒子时代,由于温度降低,夸克组合形成质子和中子,正反强子在高温下大量成对湮灭,释放的能量减缓了宇宙冷却速度,由强子转化时产生的光子和中微子数量逐渐增加,此时宇宙温度在  $10^{10}$  K 左右.宇宙时间  $10^{-3}$  s 到 3 min,这一阶段称为核合成时代,未转化的质子、中子形成了氢原子核和氦原子核,此时宇宙温度大约在  $10^8$  K.宇宙时间 3 min 到 30 万年,自由电子被原子核俘获,形成氢原子和氦原子,此时氢原子和氦原子密度为  $10^{-21}$  g/cm<sup>3</sup> 与实验室的真空密度  $10^{-20}$  g/cm<sup>3</sup> 接近,宇宙温度大约在  $10^4$  K.从宇宙的 30 万年至今,宇宙中充满由氢和氦组成的稀薄气体,在万有引力作用下,氢、氦原子开始聚集,原始星系出现,恒星发出的光子被氢原子和氦原子吸收,变成氢离子和氦离子,光只能传到有限远,宇宙是不透明的.随着氢离子和氦离子的增加,光子可以在宇宙中自由传播,宇宙逐渐明亮,宇宙 50 亿年,在原始星系中形成了第一代恒星.正是一代又一代的天文学家通过不懈的探索

向我们描绘出一幅壮阔的宇宙生命画卷.

## 5 新的挑战:暗物质与暗能量

暗物质和暗能量被称为宇宙之谜.1933 年,瑞士天文学家 Zwicky 在研究后发座星系团时,发现这些星系的运动速度非常大.这意味着星系团之间的引力场和星系团的质量大大超过了我们的估计,由此 Zwicky 提出星系团中应该存在着相当质量的暗物质,但当时暗物质这一说法并没有引起天文界的关注.直到 1960 年,天文学家 Vera Rubin 和 Kent Ford 发现涡旋星系的旋转曲线在半径很大处依然平坦延伸使暗物质开始得到天文界的关注;此后大量证据表明,宇宙中存在着相当质量的、目前我们无法观测到的物质,称为暗物质,约占宇宙世界的 26.8%.虽然目前还没有确定暗物质是哪一种粒子,但我们可以预测暗物质具有以下几个特点:暗物质是冷的,不反光,无碰撞性;与其他粒子有引力作用;比较稳定不容易衰变等等.暗物质可通过结合天文观测和引力波观测进行探测,根据暗物质的性质预测暗物质的可能粒子有大质量弱相互作用粒子、轴子和类轴子、惰性中微子<sup>[9]</sup>.那么需要指出的一点是,暗物质的存在是在认为万有引力定律和广义相对论正确的前提下得出的.

大爆炸理论为我们展示了一个逐渐膨胀和冷却的宇宙,那么我们的宇宙未来是永远膨胀还是膨胀到一定程度收缩取决于宇宙物质密度,计算表明宇宙中物质密度远小于临界密度,宇宙将逐渐减速膨胀,但两个超新星小组通过对 Ia 超新星的研究发现我们的宇宙竟然是加速膨胀的.那么这个膨胀的加速度是从何而来,一种说法是爱因斯坦认为,不仅质量会产生引力,压强也是引力产生的重要原因,当压强为负时引力表现为斥力,但是宇宙中不存在压强为负的物质,这种“负压强物质”是一种能量,称为暗能量.这种暗能量的密度会随时间变化,也就是在宇宙膨胀的过程中,暗能量会从宇宙中不断冒出,目前暗能量约占宇宙世界的 68.3%.另一种说法是爱因斯坦一直认为他最大的错误宇宙学常数,也许是

(下转第 129 页)

## 6 设置实践性和开放性习题 培养学生的质疑创新能力

新教材设置了一些有趣的实践性习题,让学生体验物理情境,获得感性的认识,学会科学的研究方法,培养质疑创新的能力.在必修1中设置了5道实践类习题,分别为复制纸带绘制 $v-t$ 图像、制作一把人的反应时间测量尺、悬挂法找出均匀三角形纸板的重心、手压桌面往前移感受摩擦阻力、手机加速度传感器测量电梯上升过程的加速度变化.

实践性习题的设置将学生的物理知识与生活应用联系起来,提高了学生的动手能力.例如第二章第1节课后练习第1题,让学生用一张薄纸压在图中,复制打点计时器打出的纸带,再把纸带每隔0.1 s剪断,得到若干短纸条,再把纸条并排贴在一张纸上,使这些纸条下端对齐,作为时间坐标轴,标出时间.最后将纸条上端中心连起来,于是得到 $v-t$ 图像.通过让学生自己动手复制纸带,绘制 $v-t$ 图像,让学生体会科学思维中的抽象方法和物理问题研究

(上接第123页)

正确的,我们应该寻找其他方程来解决多余能量的问题.暗能量空间分布可能具有显著性.研究人员发现,大型的巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope)是一种强大的暗能量探测仪,结合宇宙微波背景的测量,可以得到暗能量密度的测量值<sup>[10]</sup>.

虽然目前仍无法确定暗物质和暗能量是什么,但天文学家已经着手使用各种方法对暗物质和暗能量进行探测,相信总有一天我们能够解开暗物质和暗能量目前这一宇宙之谜.

### 参考文献

- 1 Cormac O'Raifeartaigh, Michael O'Keefe, Werner Nahmb, et al. Einstein's 1917 Static Model of the Universe: A Centennial Review[J]. The European Physical Journal H, 2017(42):461
- 2 王有刚,陈学雷,邹振隆.亚历山大·弗里德曼和现代宇宙学的起源[J].物理,2012,41(10):676
- 3 Alpher R. A., Herman R. C., Remarks on the Evolution

中的极限方法,为后面匀变速直线运动位移公式的推导奠定基础.

新教材关注学生的实验设计能力,例如第三章第1节课后练习第5题,设计实验,观察力作用下的微小形变,第7题利用重心知识设计一个自动冲水的装置;第三章章末习题A组第3题,设计一个测量纸跟桌面之间动摩擦因数的方法;第四章章末习题A组第9题,仿照以上装置,设计一个“水平加速度测量仪”,并要求学生画出示意图进一步说明自己的方法,学生利用掌握的物理知识,结合自己的生活实际,设计满足要求的实验方案,在问题解决的过程中培养了质疑创新能力.

### 参考文献

- 1 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准(2017年版)[M].北京:人民教育出版社,2018
- 2 彭前程.聚焦核心素养,体现时代要求——高中物理教科书修订说明[J].中学物理,2018,36(19):2~8
- 3 段玉文.浅析高中物理新教材(上科版)习题编选及其特点[J].物理教师,2003(10):6~8
- 4 林木欣,许国材.宇宙微波背景辐射的发现[J].物理,1990,19(4):246~248
- 5 胡中为.2006年诺贝尔物理学奖获得者的成果——宇宙微波背景辐射与宇宙学[J].科学中国,2007(9):22
- 6 Garmow, G.. Expanding Universe and the Origin of Elements[J]. Phys. Rev., 1946, 70:572
- 7 Ross Pomeroy. We'll Never Know For Sure How Everything Began [EB/OL]. Science & Astronomy, 2018-05-25. <https://www.space.com/40392-will-we-know-how-everything-began.html>
- 8 郭焜.现代宇宙学揭示的宇观、宏观与微观演化的相通性中体现出的哲学与科学的内在统一性[J].系统科学学报,2015,23(02):2~5
- 9 Gianfranco Bertone, Tim M. P. Tait. A new era in the search for dark matter[J]. Nature, 2018(562):51~53
- 10 Tyson, J. A., Wrttnnu, D. M., Hennawi, J. F., et al. LSST: a Complementary Probe of Dark Energy[J]. Nuclear Physics B, 2003(124):24~25