

专 论

# 宇宙演化与 2019 年诺贝尔物理学奖

黄燕萍 沈珊雄 (华东师范大学物理与电子科学学院 上海 200241)

**摘 要** 本文介绍 2019 年诺贝尔物理学奖,以及获奖者对物理学的主要贡献。皮布尔斯的理论发现有助于我们理解宇宙在大爆炸后是如何演化的,而麦耶和奎洛兹则在寻找未知行星的过程中探索到了我们在宇宙中的邻居。他们的发现改变了我们对宇宙的看法。

**关键词** 2019 年诺贝尔物理学奖 理论宇宙学 地球在宇宙中的位置

**文章编号** 1002-0748(2019)11-0002

**中图分类号** G633·7

**文献标识码** A

2019 年诺贝尔物理学奖 10 月 8 日正式公布,其中一半奖金授予美国普林斯顿大学的詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles),以表彰他在物理宇宙学方面的理论贡献;另一半授予瑞士日内瓦大学的米歇尔·麦耶(Michel Mayor)和英国剑桥大学的迪迪埃·奎洛兹(Didier Queloz),以表彰他们发现了一颗围绕类日恒星运行的系外行星。他们的研究极大加深了我们对宇宙的认识。

皮布尔斯对宇宙大爆炸理论的发展做出了巨大的贡献。根据预测,宇宙的诞生时间在 138 亿年前,如图 1 所示(图片来自百度火星科普网站)。经过如此长时间的冷却,宇宙的最早辉光会随着空间膨胀而衰减成为肉眼不可见的微波,这就是宇宙微波背景辐射,其温度大概为 3 K,比绝对零度只高了 3 度,即 $-270^{\circ}\text{C}$ 。在 1964 年,物理学家彭齐亚斯和威尔逊终于发现了 3 K 背景辐射,两位发现者也因此与物理学家卡皮查分享了 1978 年诺贝尔物理学奖。

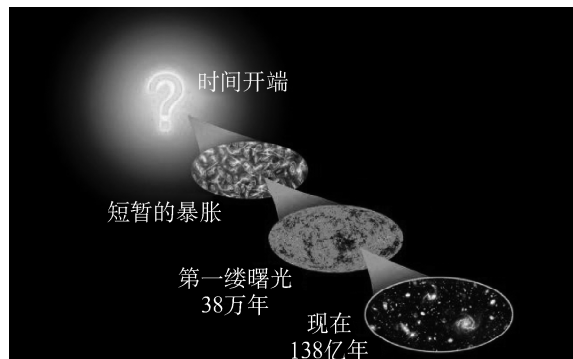


图 1 宇宙的演化

皮布尔斯解释了 3 K 背景辐射正是宇宙大爆炸的最重要证据之一。此外,皮布尔斯还在太初核合成(合成宇宙物质基础的过程)、暗物质(占比 27%)和暗能量(占比 68%)等方面做出了巨大的贡献。有了皮布尔斯的努力,宇宙结构形成理论最终才演变成一个严谨的物理学分支。

天文学家很早就知道,夜空中肉眼能够看到的星星都是像太阳那样自身能够发光的恒星。既然太阳周围有行星环绕,那么,其他恒星周围是否也存在行星呢? 1995 年,麦耶和奎洛兹首次共同发现了一颗围绕着主序星旋转的系外行星——飞马座 51b,如图 2 所示(图片来自百度火星科普网站)。

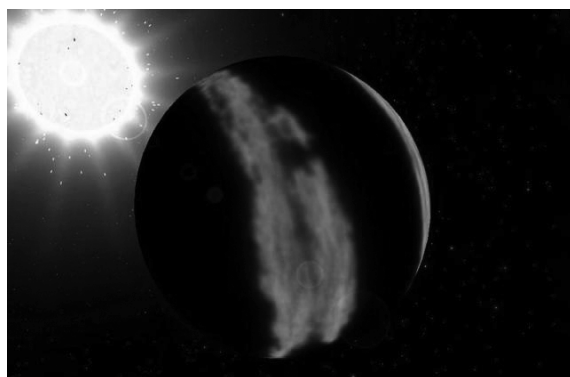


图 2 系外行星——飞马座 51b

由于飞马座 51b 离主恒星非常近,它已经被潮汐锁定,永远以一面对准主恒星,它的表面温度高达 $1010^{\circ}\text{C}$ 。天文学家把这种行星称之为“热木星”,它们并不存在于太阳系中。这颗热木星的发现改变了天文学家对行星形成的认知,揭开了系外行星研究的新纪元。

## 1 理论宇宙学

### 1.1 宇宙演化

宇宙从哪里来?直到 20 世纪在物理学和观测手段上取得了长足的进步,我们才第一次有能力试图回答这个问题。对宇宙的起源提出了一些可行的说法,并且思考了这样几个问题:宇宙的组成成分是什么?掌握宇宙背后的规则是什么?宇宙中的恒星、星系、星系团和大尺度结构是如何产生和演化的?

爱因斯坦的广义相对论和哈勃定律,为我们理解宇宙演化奠定了基础。

“往古来今谓之宙,四方上下谓之宇。”宇宙,即广宇自然,是所有空间、时间、物质以及事物的总称。所以要了解宇宙的演化,必须搞清楚时空的性质以及物质(能量)和时空之间的关系。爱因斯坦的广义相对论告诉我们:时空不是固定不变的,而是一种由于物质和能量的存在而弯曲的几何实体,它参与着事物的运动和宇宙的演化。

爱因斯坦在自己的方程中已经得出了空间会在引力的作用下收缩,为了防止宇宙塌缩还在方程里加入了“宇宙常数”,这就说明空间是可以变化的(可大可小)。广义相对论这种引力理论的成功和发展,不仅解决了当时解释不了的水星轨道进动问题,还预测了一大堆已经被证实的现象,包括遥远的星光因大质量物体而偏转、引力红移、由于引力而产生的延时效应、大质量物体之间的轨道衰减等等。广义相对论为我们进一步理解宇宙打好了坚实的基础。

在哈勃确认 M31(仙女座)星系之前,最初人们认为 M31 是星云状的恒星形成区域,距离我们只有几千光年或几万光年远,也就是处在我们的银河系中,当时觉得整个银河系就是宇宙。后来,人们通过对变星的大量了解,知道了变星的周光关系,哈勃通过对仙女座星系内部变星的识别告诉我们,它距离我们有数百万光年远。是银河系之外宇宙中独立的星星岛,至此人们的思想终于是走出了银河系,走向了宇宙。

哈勃的另外一个重大发现是:宇宙中的星系大致均匀地分布在所有方向和距离上,这些星系都在远离我们。结合星光红移数据,即星系远离我们的速度以及我们能够从每个星系内的恒星观测中获得的距离数据,哈勃发现一个星系离我们越远,退行的速度越快。这就是哈勃定律。

在广义相对论的解中,空间本来就不是恒定不

变的,不是收缩就是扩张,通过哈勃的观测,得出一个具有开拓性的结论:星系之间不断产生新的空间,迫使星系相互远离。也就是说空间在膨胀。这就是广义相对论对宇宙演化的贡献。

### 1.2 皮布尔斯的理论宇宙学

如果今天的宇宙正在膨胀,那么过去的宇宙更热、更稠密、更年轻。那时的光线波长更短,宇宙的温度更高。从理论上讲,物质和辐射的距离更近,因此早期的宇宙碰撞不仅造成了更大的冲击,而且发生的次数更加频繁。如果这是真的,皮布尔斯认为这个想法将会对我们的宇宙产生巨大的影响。

(1) 宇宙过去在空间上物质分布得更为均匀,因为万有引力是一种失控的力,任何特定的区域聚集的质量越大,引力就越大。现在的宇宙比以往任何时候的物质团块更多。这说明曾经有一段时间宇宙中没有超星系团,没有星系,甚至我们回到足够早的时期,也没有恒星。这意味着在宇宙形成初期,宇宙中密度最大和最小的区域之间不仅只有细微的差别,而且所有在恒星中产生的重元素在遥远的过去都不存在。

(2) 宇宙曾经非常热,以至于中性原子无法形成。能量足够高的光子和原子之间的碰撞频繁,就会把中性原子的电子踢出去。也就是说如果你加热任何物质,只要温度足够高,原子就会被电离。如果回到宇宙足够热、密度足够大的时候,就不可能形成任何中性原子。

(3) 宇宙温度高到不能形成原子核。尽管把原子核结合在一起的力比把原子结合在一起的力强几个数量级(大约一百万倍),但只要宇宙的温度和密度足够高,原子核也会被炸开。如果这是真的,那么曾经就有一段时间,宇宙仅仅是质子、中子和电子的海洋,并通过一个冷却阶段,在这个阶段质子和中子可以融合在一起而不会被炸开。

这将导致大爆炸核合成特定数量的最轻元素和同位素(氘、氦-3、氦-4 和锂-7)的融合和形成,除了这些元素之外不会有其他重元素。这个数量和比例应该完全取决于宇宙中重子(质子和中子)与光子的比例。

在 20 世纪 60 年代,由贝尔实验室的彭齐亚斯和威尔逊发现了充满全天空的微波噪音,后来经过 COBE、WMAP 和 Planck 等卫星的精准验证。宇宙微波背景在黑体辐射光谱的温度为  $2.72548 \pm 0.00057\text{K}$ 。

在遥远的宇宙深处的原始气体云中,自大爆炸

以来从未形成过恒星的区域,我们探测到了早期阶段微量元素和同位素的数量。

以上的观测结果都与大爆炸理论的预言惊人的一致。没有其他理论或模型可以预测这些事情,也没有任何理论或模型可以与大爆炸理论相提并论。皮布尔斯提出了严谨的数学模型和物理理论,这些理论模型与实验观测很好地吻合,使得宇宙学从描述性、猜测性的科学,转变为可预测可验证的精确科学。实际上它是所有现代宇宙学的基础。因此皮布尔斯获得了今年的诺贝尔物理学奖。

## 2 地球在宇宙中的位置

从宇宙的大尺度结构到恒星系统,宇宙需要经历数十亿年的进化,从恒星到星系再到星系团。宇宙中无数的恒星经历死亡、重生,将自己一生合成的丰富元素抛洒到宇宙中,富含重元素的行星才得以形成。

这些行星应该都含有岩石加金属核心,并且受万有引力的控制绕自己的母恒星以椭圆轨道的方式运行,这应该和我们太阳系一样。行星的引力作用能对母恒星的光谱产生可观测的影响,周期性地谱线红移和蓝移,这就是恒星摆动法。而行星从母恒星面前经过,会周期性地挡住一部分光线,我们可以测量恒星光度的微弱变化,就可以探测一个行星的轨道周期和半径,这就是行星凌日法。这两种方法是我们常用的探测系外行星的方法。

在 1995 年以前,我们只知道太阳周围由行星环绕,但是,1995 年 10 月 6 日瑞士日内瓦大学科学系天文台教授米歇尔·麦耶(Michel Mayor)和迪迪埃·奎洛兹(Didier Queloz)宣布发现了第一颗围绕类太阳恒星运行的行星飞马座 51b。自从飞马座 51b 首次进入天文学家的词典以来,对系外行星的研究已经成为一个新兴而重要的领域,迄今共发现了 4000 多颗已证实的系外行星。

要知道第一颗系外行星的发现对科学来说有多重要,只需考虑人类一直关心的一个最基本的问题:“我们在宇宙中是孤独的吗?”

随着每一年都有新的望远镜和设备支持着我们,对系外行星的搜寻,我们发现了系外行星上有可支持生命的大气的迹象。当我们分析这些行星和它

们的恒星系统时,将它们的起源、演化、物理和化学成分拼凑在一起。可以说,发现系外行星的下一个重要步骤是确定一个能够支持生命存在的系外行星。

飞马座 51 距离地球大约 50 光年,其视星等为 5.5 等,在观测条件极佳的地方肉眼可见。就像太阳一样,飞马座 51 是一颗 G 型黄矮星。它略大于太阳,其质量为太阳的 1.1 倍,半径为太阳的 1.2 倍,光度是太阳的 1.4 倍,表面温度与太阳接近(约 5500 °C),年龄大约 61 亿年。

通过径向速度法,麦耶和奎洛兹在飞马座 51 周围发现了一颗行星——飞马座 51b。这颗系外行星完全不同于太阳系中的任何一颗行星,因为它非常靠近主恒星,它的轨道半径只有 0.0527 天文单位,即 788 万公里,相当于水星与太阳距离的七分之一,环绕主星一周只需 4.2 天。飞马座 51b 非常大,其质量是木星的一半,相当于 158 倍地球质量。

此后,天文学家陆续发现了另一种更引人注目的系外行星——类地行星。由于飞马座 51b 这种行星是气态的,其主要成分为氢和氦,它们与地球相差很大,几乎不可能孕育出生命,因为太阳系中的木星和土星就是很好的例子。

因此,那些类似于地球存在岩石和金属固体表面的行星更受关注,尤其是那些处在宜居地带中的类地行星。如果一颗类地行星与其主恒星的距离适中,它的表面就有合适的温度来让大量的液态水存在,从而为生命的孕育提供了条件。

据估计,宇宙中存在数百亿颗行星系统,理论上可能存在大量的系外行星,这让天体物理学家和天体生物学家们有理由相信,生命并不是我们这个渺小而平凡的世界所独有的。这就是为什么说第一颗系外行星的发现改变了我们地球在宇宙中的位置。因此这两人与詹姆斯·皮布尔斯分享了 2019 年诺贝尔物理学奖。

## 参考文献

- [1] 向守平,冯珑珑. 宇宙大尺度结构的形成[M]. 北京:中国科学技术出版社,2010. 1.
- [2] 温伯格. 宇宙学[M]. 向守平,译. 合肥:中国科技大学出版社,2013. 3.