

现代宇宙学的奠基人——James Peebles

胡彬

北京师范大学天文系, 北京 100875

E-mail: bhu@bnu.edu.cn

2019年10月8日, 瑞典诺贝尔评审委员会将今年的物理学奖颁发给3位天体物理学家 James Peebles, Michel Mayor 和 Didier Queloz. 其中 James Peebles(图1)的获奖理由是他对物理宇宙学理论建立的贡献; 而后两位科学家是由于发现首个绕类日恒星运行的系外行星而获奖. 相比于后两位获奖者, Peebles 获得的更像是一个终身成就奖. 鉴于笔者的研究方向同为理论宇宙学, 在这里谨结合自身的研究经历谈一谈 Peebles 对现代宇宙学的贡献.

1 微波背景的发现

宇宙微波背景辐射是至今为止人类利用电磁手段能够观测到的来自宇宙最深处的光, 反映了宇宙尚在婴儿时期(诞生大约38万年, 当前宇宙年龄大约为138亿年)时的状态.

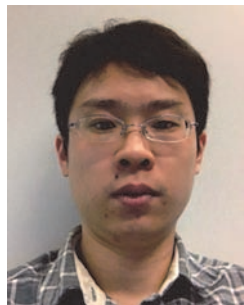
1929年, 天文学家 Edwin Hubble 通过对具有造父变星(用于测距)的星云的光谱测量(用于测速度), 发现距离人们越远的星云, 其在离开人们视线方向上的速度越大. 这预示着宇宙不是静态的, 而是随着时间膨胀的.

1948年, 核物理学家 Gamow 通过研究宇宙中的化学元素丰度, 提出宇宙起源于一个高温、高密度的“原始火球”, 随着宇宙的膨胀, 经历了由密到稀、由热到冷的演化史. 这一模型被称为“宇宙大爆炸模型”. 值得注意的是, 这里的爆炸跟鞭炮的爆炸有着非常大的区别. 鞭炮的爆炸



图1 James Peebles 的照片. 摘自维基百科

Figure 1 Photo of James Peebles. Credit: Wikipedia



胡彬 北京师范大学天文系教授. 2006年毕业于山东大学, 2008和2011年在中国科学院理论物理研究所先后获得硕士和博士学位. 2011~2016年先后在意大利帕多瓦大学、荷兰莱顿大学、西班牙巴塞罗那大学进行博士后研究工作, 2016年入选中组部千人计划“青年项目”. 主要研究方向是理

论宇宙学、引力波物理、宇宙微波背景辐射物理、宇宙大尺度结构形成.

是以空间某点为原点, 空气在火药迅速释放的化学能的驱动下向四周扩散. 而宇宙大爆炸则更像是烤箱里发酵的葡萄干面包. 葡萄干是宇宙中的星系, 随着烤箱里温度的升高, 面包的体积不断增加, 葡萄干之间的相互距离越来越远, 面包表面的葡萄干没有哪一粒是处于特殊地位的.

在宇宙大爆炸模型中^[1], 宇宙刚开始时(大约 10^{-38} s), 所有物质处于一个空间极小、密度和温度极高的区域之内, 这时粒子的热动能非常高, 所有粒子的质量都可以忽略不计, 使得强、弱和电磁3种相互作用也变得不可区分. 这时的宇宙是一锅由夸克、胶子、中微子、电子、光子等粒子构成的等离子“热汤”. 在这个过程中, 有两个相互制衡的因素: 碰撞和宇宙膨胀. 碰撞使粒子之间的能量趋于一致, 宇宙膨胀拉远了粒子相互之间的距离, 降低了碰撞次数. 当粒子在两次碰撞过程中行走的特征长度(平均自由程)小于两次碰撞之间宇宙空间尺度的增加时, 该种粒子相互作用(碰撞)就停止了. 该种粒子就从宇宙热汤中退耦出来, 粒子总数不再发生变化(如果不再衰变的话). 大约到了 10^{-5} s, 夸克胶子首先从“热汤”中退耦出来, 强相互作用束缚在一起形成质子和中子; 之后大约到了1 s, 中微子也退耦出来; 大约3 min后, 宇宙中的氘、氦-3、氦-4等轻原子核诞生了. 这时候, 宇宙的平均温度依然比我们高中物理课上所学的氢原子的第一电离能13.6 eV高出许多, 因此宇宙呈现电离态, 光子在电离的质子、电子之间穿行, Thompson 散射过程频繁发生, 宇宙呈现出不透明的状态. 该过程一直持续到宇宙大约38万年的时候. 这时中性的氢

原子大量形成, 光子得以在氢原子之间自由传播(free streaming), 直至传播到探测器的 CCD(charge-coupled device)上再次与电子发生相互作用, 被我们探测到. 这些光子在到达我们的探测器之前, 除了引力红移效应之外(引力效应将它们的波长拉大到大约几厘米长), 几乎没有参加任何相互作用, 因此原初的信息得以保留. 这些光子就是我们所说的宇宙微波背景辐射.

本文所要讲述的主人公 James Peebles, 于 1935 年出生在加拿大温尼伯, 现为美国普林斯顿大学荣誉退休教授. 他与微波背景光子的故事要比前面所讲述的历史节点大约晚了 138 亿年. 故事^[2]要从 1958 年他在家乡获得学士学位, 来到普林斯顿大学师从著名的 Robert Dicke(图 2)说起. 他的这位导师正是第一个修改引力理论的“Brans-Dicke 引力理论”的创立者之一. 除此之外, Dicke 同时也是一位出色的实验家和观测家. 他在 1946 年发明了射电观测中常用的辐射计—Dicke radiometer. 这也为后面宇宙微波背景辐射的发现打下了基础.

1965 年贝尔实验室的两位年轻的天文学家 Arno Penzias 和 Robert Wilson 利用液氮冷却技术研制了当时最先进的射电信号接收器. 在调试天线的过程中, 他们发现存在一个全天各向同性的、稳态的“噪音”. 这个“噪音”的大小远在天线接收机的系统噪音之上. 根据计算, 这个“噪音”对应于一个温度为 3.5 K 的黑体谱辐射.

一位在 MIT(Massachusetts Institute of Technology)的朋友得知此事后, 跟 Penzias 打了一通电话, 并给后者送来一份 Peebles 的尚未发表的预言微波背景辐射的文章. (Gamow 早在 1953 年就预言了宇宙微波背景辐射的存在, 当时的



图 2 Dicke 一家. 摘自网络

Figure 2 Dicke family. The picture is from internet

估计温度为 7 K. 据说, 由于当时宇宙大爆炸的思想太过超前, 不久就被人们遗忘了. Peebles 在 1965 年又重新推导并得出了“存在宇宙微波背景辐射”的结论, 计算结果是“温度为 3 K”. 看到文章后, Penzias 给同在新泽西的 Dicke 打电话, 告诉了后者他们发现“残存的射电辐射也是 3 K”. 于是, Dicke 就和 Wilkinson 等人一起到了贝尔实验室, 看了他们的数据和实验细节. 这里的 Wilkinson(图 3)正是 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)卫星项目的第一个字母 W, 为了纪念为项目作出巨大贡献但不幸在项目刚开始就辞世的 Wilkinson.

在 Dicke 等人确认 Penzias 和 Wilson 的数据无误的情况下, 他们商量同时发表两篇文章. 第一篇是 Dicke, Peebles, Roll 和 Wilkinson 的题目为“Cosmic black-body radiation”的文章; 第二篇 Penzias 和 Wilson 的文章题目则起得相当内敛, 为“A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s”. 结果如大家所知, 后者赢得了 1978 年的诺贝尔物理学奖.

2 微波背景声学振荡理论的创立

Peebles 对宇宙微波背景辐射领域的贡献不止于此. 20 世纪 70 年代, 他同他的学生^[3]又发展了“重子声学振荡”理论(图 4)^[4], 为后来的宇宙微波背景辐射的各向异性测量打下了坚实的理论基础. 其大体物理图像是, 在原初微波背景形成时, 物质密度的局域高密度区会形成引力势阱, 吸引等离子体下落; 而另一方面, 等离子体的光压又向外排斥等离子体. 两个因素此消彼长, 形成“声波(密度波)振荡”.

与前面所说的全天均匀且各向同性的黑体谱信号不同, 微波背景各向异性信号刻画天空中两个不同方向处发出的微波背景辐射温度的差异. 这个信号极其之小, 大约



图 3 (网络版彩色)Wilkinson(左)和 Peebles(右). 摘自网络

Figure 3 (Color online) Wilkinson (left) and Peebles (right). The picture is from internet

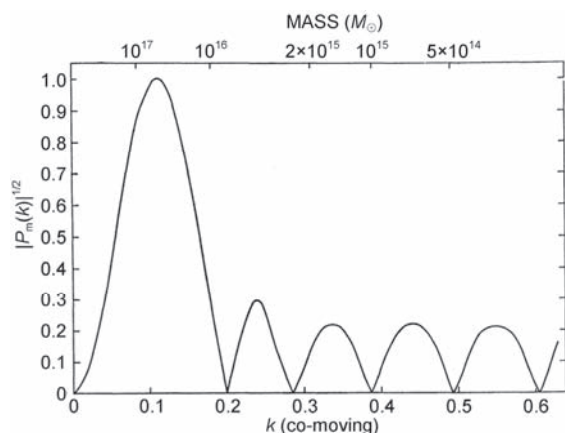


图 4 1970 年 Peebles 和 Yu^[3]第一次计算了微波背景辐射的角功率谱

Figure 4 For the first time, Peebles and Yu (1970)^[3] calculated the angular power spectrum of cosmic microwave background

是其各向同性信号的十万分之一。但是，这个信号却携带着宇宙原初密度扰动的丰富信息。而后者就是形成今天我们所生活的银河系的种子。

经过三十多年的发展，随着 COBE, WMAP, Planck 一系列的卫星、气球、地面项目的进行，宇宙微波背景辐射的各向异性测量已经成为宇宙学领域中最为重要、最为精确的测量手段。可以毫不夸张地说，正是宇宙微波背景辐射测量将宇宙学带入了“精确”宇宙学的黄金时期。值得一提的是，目前我国也在西藏阿里进行中国首个地面微波背景偏振测量观测——阿里原初引力波项目。

3 大尺度结构理论的创立

20 世纪 80 年代，Peebles 的研究兴趣转到星系、暗物质在时间长时标和空间大尺度上的“结构形成和演化”上来^[5]。在笔者看来，其最大贡献在于“将宇宙极早期的高能物理过程与星系形成和结团的天体物理过程联系起来”。

前面讲到宇宙成长至 38 万年的历史。而在这之后，宇宙进入了长达 10 亿年的“黑暗时期”。这期间，除了背景光子，宇宙中什么电磁信号都没有。此后，第一代恒星被引

力塌缩效应点亮，开始热核反应。宇宙中逐渐出现了星系、星系团、暗物质晕等大尺度结构。随着时间的流逝，这些大的结构逐渐碎裂成更小的、非线性程度更高的子结构。这个过程又大约持续了 50 亿年。在红移大约为 1 时，当时的宇宙空间尺度大约为现在宇宙的一半那么大，宇宙的膨胀速度加快，进入到暗能量为主的时期，直至现在。在这一漫长的过程中，有两种组分起到了主要作用，分别是冷暗物质(cold dark matter, CDM)和暗能量(暗能量的一个候选者是量子场论的真真空能，由希腊字母 Lambda 标记)。它们一起构成了现在被称为 LCDM 的协和宇宙学模型。

尽管暗物质、暗能量的提出和发现都与 Peebles 没有直接关系，但他却在将这一片片看似孤立、毫不相关的证据还原为一个统一的、协和的标准宇宙学模型的过程中，起到了十分关键的作用。可以毫不夸张地说，是他一手缔造了“大尺度线性结构增长理论”。举一个例子：就笔者所知，现在宇宙学研究常用的术语 Sigma8，最早就是由 Peebles 在 20 世纪 80 年代引入的，其表示物质线性扰动在 800 万秒差距的空间尺度上的平均值。其实这个平滑尺度(如 800 万秒差距)是可以在一定范围内任意选取的。而事实是，自从 Peebles 在 1983 年的论文中第一次选取这个数值之后，30 多年间宇宙学领域都在沿用这个惯例，直至现在。

4 统计学方法引入到宇宙学研究之中

Peebles 对于大尺度结构形成的另外一个贡献在于“将统计方法引入到大尺度结构形成领域中来”。这里，以 Bertschinger^[6]在 1998 年发表在 *Annu Rev Astron Astrophys* 上的文章为例，他总结了“星系/(暗)物质结构形成的统计分析方法”，如图 5。物质功率谱、双谱、多点相关函数等统计概念，都是最早由 Peebles 在 20 世纪 80 年代引入宇宙学的。

这些概念的引入，极大地推动了星系巡天研究方向的发展。以斯隆数字巡天为例，经过多年的观测，该项目已经得到了 5 亿多张星系的图像和不少于 400 万条光谱。试想，如果没有统计方法的引入，我们根本无法参悟这浩瀚宇宙馈赠于我们的天书。正如笔者的一位同事在得知 Peebles 获奖之后在微信朋友圈里的留言：“记得大概 10 年

Table 1. Statistical measures applied to galaxies and numerical simulations of structure formation

Category	Statistic	Name	Reference
Particle positions	$\xi(r)$	Two-point correlation function	Peebles 1980
	$P(k)$	Power spectrum	Bertschinger 1992
	$\xi(r_1, r_2, r_3)$	Three-point correlation function	Groth & Peebles 1977
	$B(k_1, k_2, k_3)$	Bispectrum	Peebles 1980
	$\xi_N; \xi_N$	N -point correlation functions and moments	Peebles 1980
	$P_V(V), P_M(V)$	Void probability function, cell counts	White 1979
	-	Percolation, minimal spanning tree statistics	Coles 1992
	-	Multifractal statistics	Martínez et al 1990

图 5 Peebles 在 20 世纪 80 年代将统计分析引入到宇宙学研究当中^[6]

Figure 5 In the 1980s, Peebles introduced statistical analysis into cosmology studies^[6]

前的一次组会上，大家讨论一篇 Peebles 写得比较‘奇怪’的文章，我导师的评论原话：‘Peebles 以前和我在一个办公室，他是个 God，他写的东西一般大家要过 5~10 年才能意识到，所以你们必须好好读他的 paper.’”

推荐阅读文献

- 1 Yu Y Q. Hot Big Bang Cosmology (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2001 [俞允强. 热大爆炸宇宙学. 北京: 北京大学出版社, 2001]
- 2 Durrer R. The cosmic microwave background: The history of its experimental investigation and its significance for cosmology. *Class Quant Grav*, 2015, 32: 124077
- 3 Peebles P J E, Yu J T. Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe. *Astrophys J*, 1970, 162: 815
- 4 Dodelson S. *Modern Cosmology*. Pittsburgh: Academic Press, 2003
- 5 Xiang S P, Feng L L. Cosmic Large Scale Structure Formation (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 2012 [向守平, 冯珑珑. 宇宙大尺度结构的形成. 北京: 中国科学技术出版社, 2012]
- 6 Bertschinger E. Simulation of structure formation in the universe. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1998, 36: 599–654

Summary for “现代宇宙学的奠基人—James Peebles”

Founding father of modern cosmology—James Peebles

Bin Hu

Astronomy Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
E-mail: bhu@bnu.edu.cn

The Nobel Prize in Physics in 2019 has been jointly awarded to James Peebles, Michel Mayor and Didier Queloz for their work in furthering our understanding of the universe. One half of the prize was awarded to Peebles for “theoretical discoveries in physical cosmology”, and the other half to Mayor and Queloz for “the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star”. Compared with the latter two laureates, the award to Peebles is more like to his whole scientific career accomplishments. His major research topic covers cosmic microwave background (CMB) and cosmic large-scale structure formation (LSS).

As the oldest photons we can observe, the cosmic microwave radiation forms a uniform background and fills in all space. It is an electromagnetic radiation remnant from the very beginning stage of big bang universe. It is born in the recombination epoch, when the universe is just 380 thousand years old. Compared with our current universe age, namely 13.8 billion years, the former can be called infant phase of our universe. Before recombination epoch, our universe is filled in opaque baryon-photon plasma. The mean free path of the background photons is very small. The relativistic Compton scattering and non-relativistic Thompson scattering frequently happened. Our universe is almost a hot black body. With the expansion, our universe is adiabatically cooling. After the recombination epoch, the free electrons and protons form into neutral hydrogen. The CMB photons start to free streaming until they hit into our radio detectors. It experiences most of the evolution history of our universe. Although it is very faint, it carries fruitful information of the early stage of our universe.

In CMB field, together with his collaborators, Peebles firstly predicted the existence of the background radiation remnant after the hot big bang. Their calculated CMB temperature (3 K) excellently agrees with the observational results from Penzais and Wilson in 1965. In 1970s, together with his student, Peebles firstly built the acoustic oscillation theory of the cosmic hot plasma, which is the basic theory of the anisotropy of CMB and baryonic acoustic oscillation in LSS. They firstly calculated the angular power spectrum of the CMB anisotropy.

According to modern theory of astrophysical structure formation, stellar are organized into galaxies, which in turn form galaxy groups, galaxy clusters, superclusters, sheets, walls and filaments, which are separated by immense voids, creating a vast foam-like structure, namely “cosmic web”. 1980s, Peebles turned to study the formation of the dark matter halos and galaxies. His pioneer works link the physical processes of the early universe with the late-time galaxy formation theory. He made significant contributions to the linear growth theory of the large-scale structure. He firstly introduced the statistic analysis idea into the cosmological data analysis. Due to the writer’s research field is also the theoretical cosmology, in this paper we will share our view of Peebles’s contributions to the modern cosmology.

Nobel Prize, cosmology, cosmic microwave background, cosmic large scale structure formation

doi: 10.1360/TB-2019-0632