

皮布尔斯的物理宇宙*

郑政^{1, 2, †} 张鹏杰^{2, 3, ††}

(1 美国犹他大学物理与天文系 犹他州 84112)

(2 李政道研究所 上海 200240)

(3 上海交通大学物理与天文学院天文系 上海 200240)

2019-10-27收到

† email: zhengzheng@astro.utah.edu

†† email: zhangpj@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200102

Peebles' physical universe

ZHENG Zheng^{1, 2, †} ZHANG Peng-Jie^{2, 3, ††}

(1 Department of Physics and Astronomy, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112, USA)

(2 Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai 200240, China)

(3 Department of Astronomy, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

摘要 2019年10月8日, 瑞典皇家科学院宣布将今年的诺贝尔物理学奖授予詹姆斯·皮布尔斯(物理宇宙学方面的理论发现)以及米歇尔·马约尔和迪迪埃·奎洛兹(首次发现围绕类太阳恒星运动的系外行星)。在现代宇宙学一步步走向精确定量科学的过程中, 皮布尔斯扮演了关键角色。文章对皮布尔斯在现代宇宙学研究中的奠基性工作进行了简要回顾, 侧重介绍其在宇宙组份, 宇宙演化, 和宇宙结构形成方面的重要贡献。

关键词 诺贝尔物理学奖, 物理宇宙学

Abstract On October 8, 2019, it was announced by the Royal Swedish Academy of Sciences that the Nobel Prize in Physics 2019 was awarded to James Peebles for theoretical discoveries in physical cosmology and to Michel Mayor and Didier Queloz for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star. Peebles has played a critical role in transforming cosmology into a precision science. We briefly review the foundation that Peebles laid for modern cosmology, focusing on his seminal contributions to our understanding of cosmic components, cosmic evolution, and cosmic structure formation.

Keywords Nobel Prize in Physics, physical cosmology

2019年10月8日, 瑞典皇家科学院宣布将今年的诺贝尔物理学奖授予詹姆斯·皮布尔斯(物理宇宙学方面的理论发现)以及米歇尔·马约尔和迪迪埃·奎洛兹(首次发现围绕类太阳恒星运动的系外行星)。

1 皮布尔斯和现代宇宙学

作为半个世纪以来宇宙学研究领域的卓越代表, 詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles, 即 Jim Peebles,

图1)是现代物理宇宙学大厦的主要奠基者之一。他在宇宙微波背景辐射, 宇宙原初核合成, 重子声波振荡, 宇宙中的结构形成, 暗物质和暗能量等众多方向做出了重大贡献。他的三部著作《物理宇宙学》, 《宇宙大尺度结构》和《物理宇宙学原理》(图2)更是几代宇宙学研究人员的蓝宝石(第一部封面有浅蓝的色块, 后两部封面基调是蓝色), 乃入门和练功之必备秘籍。

现代宇宙学, 从1917年爱因斯坦将广义相对论应用到宇宙学研究算起, 已经走过百年风雨。

* 原文发表于“上海交通大学物理与天文学院”微信公众号。本次刊发前作者略加修改。

在宇宙学研究早期，因为极其有限的观测数据，许多研究是缺乏根据的猜测。列夫·朗道(Lev Landau)曾经这样揶揄宇宙学家，“宇宙学家经常犯错，却从不怀疑。”（“Cosmologists are often wrong, but never in doubt.”）^[1]。其实直到20世纪90年代，宇宙学还有点曲高和寡，不被一些研究者看好。比如，90年代初，一位博士后向加州理工大学的一位资深教授询问该校有没有增设宇宙学方面教职的计划，得到的答复是：在很远的将来，当宇宙学成为科学的时候。笔者之一在1997年左右也被好心的老师建议不要选择宇宙学研究方向，因为宇宙学很难有进展——实际上，仅仅两年之后以超新星观测表明宇宙加速膨胀为标志，以随后的微波背景辐射各向异性观测和大规模星系巡天为代表，宇宙学研究进入了黄金时代。宇宙学从哲学思考，定性讨论，部分物理学家眼中的小玩闹，逐渐成长为基于坚实物理基础和框架的系统性定量精确科学，皮布尔斯在其中扮演了关键的角色，他披荆斩棘，逢山开路，遇水搭桥，是领军人物之一，功不可没。他的贡献是如此的重大、影响是如此的持久，以至于有人认为，“现代宇宙学之父”、“现代宇宙学的奠基人”、“现代宇宙学的巨人”都不足以形容他的贡献——他不仅是现代宇宙学的奠基人，也是现代宇宙学的建设者、现代物理宇宙学的发明人(2012年S. Faber的采访)^[2]。

现实生活中的皮布尔斯是一个温文尔雅、非常谦和的人，大家公认的友善。2004年笔者之一到普林斯顿高等研究院开始博士后研究工作。研究院的天体物理组每周都有一个例行报告会，邀请世界各地的优秀学者分享最新的研究工作，研究所和普林斯顿大学的天文研究人员都会来参加。笔者第一次参加这个报告会就注意到听众中有一位身材挺拔、精神矍铄的老者在很认真地听报告，他问的一些问题，有些非常基本。笔者当时就觉得这老者真是谦虚，知之为知之，不知为不知，虚心请教，哪怕是最初级的的问题。等报告会结束，一打听，原来他就是大名鼎鼎的皮布尔斯！不由得敬仰之情又平添几分，无论学问还是



图1 获得诺贝尔物理学奖当天早晨，皮布尔斯在他位于普林斯顿大学的办公室(来自普林斯顿大学传媒办公室)

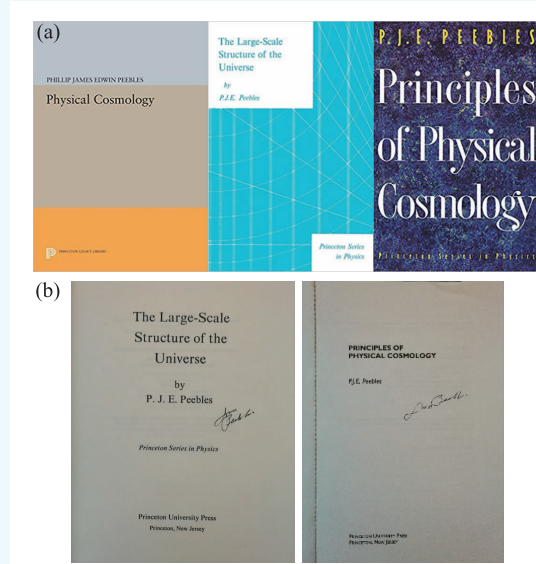


图2 (a)皮布尔斯的三部宇宙学著作；(b)笔者之一存书扉页的皮布尔斯亲笔签名

为人，高山仰止，乃我辈之榜样。他当时已经退休，却依然在享受科研之乐趣，是研究院的常客，时不时来参加报告会(图3)和午餐会，还有博士后的咖啡讨论。2005年底，国家天文台陈学雷研究员曾经计划通过中国科学院的爱因斯坦讲席教授项目邀请皮布尔斯访华，遗憾的是由于种种原因未能成行。

皮布尔斯1935年生于加拿大马尼托巴省。在马尼托巴大学读完本科以后，经校友介绍，他选择于1958年赴普林斯顿大学物理系攻读博士，并准备研究粒子物理。普林斯顿大学物理系的研究需要通过一个综合考试，他在钻研一些广义相

对论题目的时候，首次接触到了宇宙学。后来通过一位马尼托巴大学校友引荐，他开始参加罗伯特·迪克(Robert Dicke)教授引力研究组的组会。他在迪克的指导下完成了博士论文，发展了一个精细结构常数变化的引力理论并基于放射性衰变测量结果对这一常数的变化进行了限制。皮布尔斯1962年取得博士学位以后，留在了普林斯顿大学，一直到现在(图4)。60年代初，迪克等制造了一个辐射测量计，准备探测宇宙热大爆炸可能遗留下来的热辐射。迪克邀请皮布尔斯对这个热辐射进行一些理论研究，皮布尔斯的宇宙学生涯自此开启^[3]。



图3 2015年皮布尔斯在普林斯顿高等研究院纪念爱因斯坦广义相对论创立100周年的会议上(<https://www.ias.edu/news/peebles-nobel-prize>)



图4 (a)1958年大学毕业时的皮布尔斯；(b)1990年在普林斯顿大学办公室的皮布尔斯(来自普林斯顿大学传媒办公室)

皮布尔斯思想深邃，功底深厚。他在宇宙学方面的研究给他带来了众多荣誉，比如爱丁顿奖章、狄拉克奖章、格鲁伯宇宙学奖等。2004年，皮布尔斯获得了第一届邵逸夫天文学奖。2005年他和普林斯顿大学天文系的詹姆斯·冈恩(James Gunn)同获克劳福德奖(还有马丁·里斯，Martin Rees)，由于两人昵称都是Jim，天文系庆祝会的蛋糕上就写了“Congratulations, Jim & Jim!”。今年的诺贝尔物理学奖，既在意料之外又在情理之中。天文领域的诺贝尔物理奖项，大多是基于对理解大自然产生重要影响的发现和观测(比如脉冲星和脉冲双星的发现，微波背景辐射的发现和观测，宇宙X射线和中微子观测，宇宙加速膨胀的发现，引力波的探测等)，像皮布尔斯这样主要是理论贡献的比例不大。如同钱德拉塞卡(Subrahmanyan Chandrasekhar，1983年因对恒星结构和演化的理论研究荣获诺贝尔物理学奖)，这个奖对皮布尔斯来说是锦上添花，有点姗姗来迟，可謂是终身成就奖。

2 皮布尔斯的宇宙学研究

好了，说了这么多，让我们来了解一下皮布尔斯的研究工作。当笔者着手写此文的时候，才发现这基本上是一个不可能的任务：皮布尔斯在宇宙组份，宇宙演化，还有宇宙结构形成等诸多方面都有众多影响深远的贡献。笔者只能选择性地介绍，挂一漏万，能对他在宇宙学波澜壮阔激动人心的发展过程中的贡献领略一二就心满意足了。

通过一个多世纪理论研究和观测探索，目前对宇宙总体和演化有了非常清晰的认识。为了阐述皮布尔斯在其中的贡献，在此简要回顾一下宇宙演化的基本图像(图5)。宇宙在经历了极早期的极短暂的暴胀阶段之后，从一个极高温高密度的状态不断膨胀至今，已有大约140亿年了。目前，宇宙中的能量组份构成中，70%左右

是暗能量，25%左右是暗物质，只有5%左右是人们熟知的物质(称为重子物质)，还有近万分之一的辐射成分。这只是当前的构成，不同的成份随时间的演化是不同的。在早期，宇宙以辐射为主，温度随着膨胀不断降低。在宇宙年龄是几十秒钟的时候，温度低到不足以有高能光子把氦核解离，大爆炸核合成(big bang nucleosynthesis, BBN; 也称原初核合成)开始，质子和中子结合形成原子核。由于宇宙的膨胀，这个核合成过程只持续了3分钟左右，产生了宇宙中最初的元素，主要是氢和氦4(还有少量的氘，氚，氦3以及极少量的锂)。充满了辐射以及氢和氦等离子体的宇宙继续膨胀，在宇宙年龄是大约5万年的时候，物质(暗物质和重子物质)取代辐射成了宇宙能量密度的主要成份。年龄大约35万年的时候，由于膨胀，宇宙温度降低到4000 K左右，氢和氦无法再保持电离状态，原子核和电子结合形成原子。经过这一被称为“再复合”(recombination)的阶段，宇宙从高度电离状态转为中性状态。背景辐射场中的光子由此脱离了和等离子体重子物质相互作用的苦海而自由飞行至今(成为人们观测到的宇宙微波背景辐射)。宇宙极早期暴胀的量子扰动在物质和辐射均匀分布的背景上产生了轻微的扰动，形成了极小的不均匀性。这个不均匀性由于引力不稳定性不断被放大，在宇宙年龄大约一亿年的时候，不断增长的不均匀性导致暗物质晕和第一代恒星和星系的形成，宇宙结构形成和演化持续至今。在宇宙年龄约为100亿年的时候，暗能量取代物质成为宇宙能量密度的主要成分。更早一些(宇宙年龄约75亿年)，暗能量已经开始主导宇宙膨胀的动力学，宇宙进入了加速膨胀阶段。

宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)。从宇宙膨胀的观测倒推回去，宇宙早期应该极端高温高密，以辐射为主，达到热平衡的辐射其能量分布是特有的黑体谱。随着宇宙的膨胀，温度下降，这个黑体谱演化到现在的温度是2.7 K左右，峰值在微波波段，被称为

微波背景辐射。在60年代初，这个辐射存在与否、温度多少还是个未知数，虽然1941年麦克凯勒(Andrew McKellar)^[4]就注意到星际CN分子的吸收线预示着有个2.3 K左右的辐射背景来激发，但是很少有人把它和早期宇宙联系起来。1964年皮布尔斯在迪克的建议下，对这个彼时被称为原初火球的辐射进行了研究。迪克，罗尔(Peter Roll)和威尔金森(David Wilkinson)利用他们制造的微波辐射计着手对这个可能的辐射进行探测。意外的是，贝尔实验室的彭齐亚斯(Arno Penzias)和威尔逊(Robert Wilson)无心插柳，在对他们制造的接受卫星信号的灵敏天线进行调试时，发现一个无法消除的“噪音”，对应大约3.5 K的天线温度。他们的一位朋友恰巧知道皮布尔斯不久前做过一个报告，于是建议他们和迪克聊聊。这一聊，聊来了他们的诺贝尔奖(1978年的诺贝尔物理学奖)，也聊没了迪克等的诺贝尔奖。原来，那个“噪音”正是宇宙大爆炸的遗迹、迪克他们孜孜以求的背景辐射！交流的结果是来自2个组的2篇论文背靠背发表在了1965年的《天体物理学杂志》上(图6)，前一篇5页解释宇宙黑体辐射^[5]，后一篇一页半说明测量结果(郑重提示：拿诺贝尔奖，论文只需一页半！)^[6]。

原初核合成(big bang nucleosynthesis, BBN)。宇宙微波背景辐射的发现是对大爆炸宇宙学的有力支持。在早期背景辐射极高温度的情况

在早期背景辐射极高温度的情况

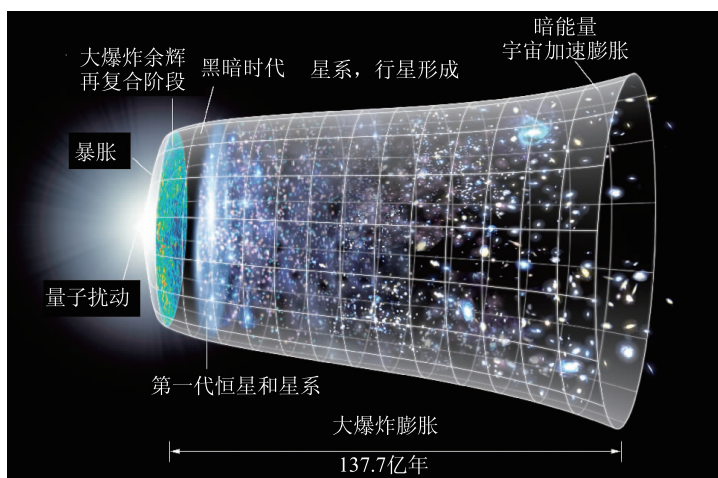


图5 宇宙的简明演化历史(改编自 wikipedia 图片)

下是不可能存在原子核的，元素是随着宇宙膨胀温度降低到低于原子核结合能级的时候才能产生。宇宙中元素起源的这个思想，伽莫夫和阿尔弗等在40年代末提出来并进行了计算尝试(也预言了微波背景辐射)^[7-9]。由于种种原因，皮布尔斯并不知道他们的工作。皮布尔斯基于观测到的微波背景辐射，在相对论宇宙学的基础上对这一原初核合成过程利用计算机进行了数值计算^[10]。现代的计算基本沿用了其方法和引入的物理过程，进行了更新，比如3种中微子(当时只发现了2种)、还有更准确的反应截面和自由中子衰变速率。本质上，这个原初核合成是质子中子核反应形成原子核速率和宇宙膨胀速率的竞赛，取决于重子和背景辐射光子数密度之比。皮布尔斯的计算把各个过程考虑得很周全，得到了氘、氦3和氦4的丰度。比如他考虑了质子中子的质量差导致其数密度的差异以及自由中子衰变的影响。由于当时还没有在宇宙学中引入暗物质，对宇宙重子物质的密度也没有很好的测量，皮布尔斯考虑了两个极端情形，密度正好是临界密度($\Omega_b=1$)还有由星系观测得到的密度(大致相当于 $\Omega_b=0.04$)。他得到了氦4的丰度是0.26—0.28，表明其丰度是

大爆炸宇宙学非常稳健的一个预言，这和目前的理论数值和观测结果非常接近。

再复合 (recombination)。在宇宙年龄3分钟左右，膨胀导致重子物质密度降低到已无法继续进行核合成的地步，原初核合成结束。由于温度还很高，宇宙中充满了背景辐射和等离子体。当膨胀导致温度降到4000 K左右的时候，能够维持重子物质等离子态的高能背景光子数目已经不多，电子和质子以及氦核开始结合形成原子。皮布尔斯对这一宇宙“再复合”过程(其实是电子和核子在宇宙历史上的第一次结合)进行了细致的研究，并得到了这一过程结束之后残留的电离度^[11]。和计算原初核合成一样，在当时宇宙学参数远未观测确定的情况下，他需要考察不同的宇宙学模型。他引入了对再复合起重要作用的物理过程，比如氢的复合过程产生莱曼—阿尔法发射线，由于是共振线，会很快被另一基态氢原子吸收，影响再复合的进程。皮布尔斯指出宇宙膨胀导致的红移还有双光子发射是解决之道。再复合过程是解释宇宙微波背景辐射各向异性的模型计算中必不可少的一环，皮布尔斯的思路和方法以及考察的物理过程依然是目前进行精确计算的基础。皮

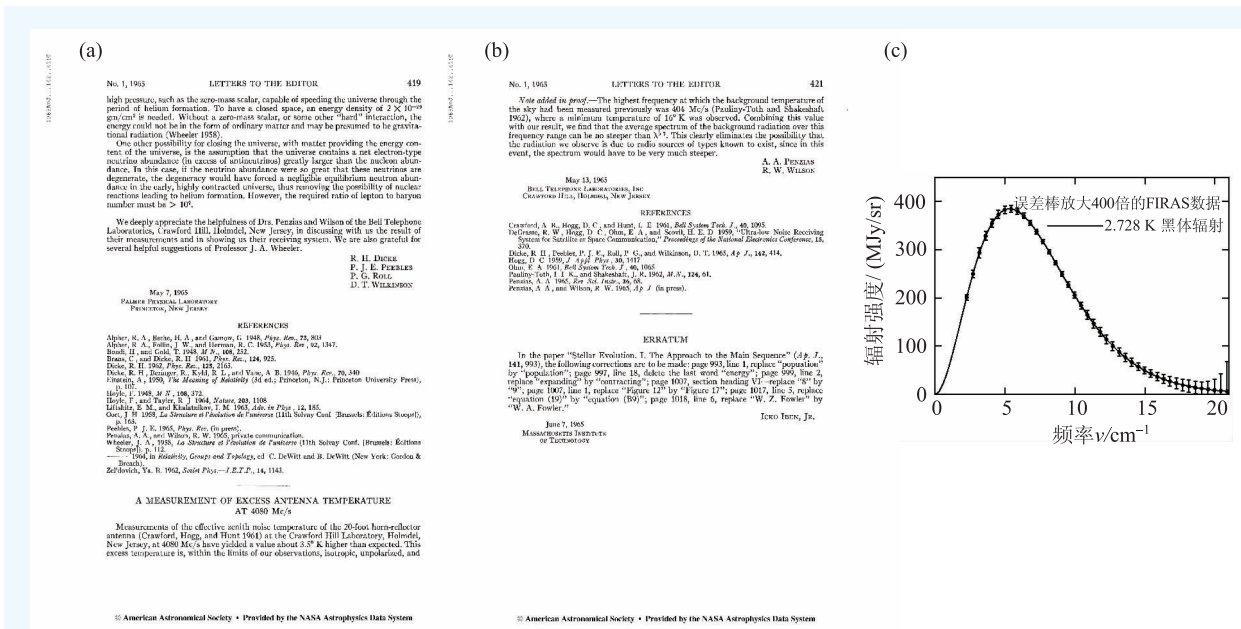


图6 1965年关于微波背景辐射的理论(a)和观测发现(b)的2篇论文背靠背发表在《天体物理学杂志》；(c)COBE卫星测量的微波背景辐射的黑体谱(数据点的误差棒被放大了400倍，曲线是黑体谱拟合。源自Edward L. Wright)

布尔斯在该论文中还探讨了再复合过程对背景辐射黑体谱产生的微小扭曲，近半个世纪后的现在，这一确保存在的扭曲已经成为规划微波背景辐射谱观测项目的重要基点和动机。

重子声波振荡(baryon acoustic oscillations, BAO)和微波背景辐射的各向异性(CMB anisotropy)。如果宇宙早期辐射和物质有一点点不均匀性，在再复合之前，这个不均匀性(扰动)在光子和重子物质等离子体这一整体的“气体”(光子通过电子和重子物质紧密耦合在一起)中会产生声波振动。再复合之后，光子和重子物质的耦合消失，不同波长的扰动因为振动频率不同会冻结在不同振动相位，从而表现为不同的扰动强度。皮布尔斯和 Jer Yu(皮布尔斯的第一个研究生，来自香港，当时已毕业去NASA)对扰动的时间演化以及再复合之后在背景辐射温度起伏以及物质功率谱上的效应进行了研究和计算^[12]。他们首次得到了物质扰动功率谱随波长(波数)的变化，呈现出多个峰的结构，这是不同波长的扰动冻结在不同振动相位的自然结果(图7)。其实这就是现在所谓的重子声波振荡(目前已经成为星系巡天的主要探测目标，被用做标准尺对宇宙学进行限制)。他们也指出这个振荡在微波背景辐射上的效应，在不同方向上会有温度起伏，其计算得到的幅度比现在的测量高5倍。这并不奇怪，因为当时对宇宙学参数的限制非常有限，宇宙学还没有引入暗物质，扰动从何而来也无从知晓(暴胀理论尚未出现，皮布尔斯等采用了白噪声的原初扰动谱，和现在的限制非常接近!)。这样超前的工作让人拍案叫绝!

星系成团性的统计研究。从1973年到1980年，皮布尔斯和他的合作者发表了一组文章，题目是“对河外天体星表的统计分析”，副标题编号从1到12。这组文章开启了现代星系成团性的统计研究。该系列的第一篇文章^[13]的副标题是“理论”，皮布尔斯建立了星系分布的相关函数和功率谱分析的框架。除了三维分布，为了用于当时星系测光巡天的观测，他还研究了如何分析星系在天球上的二维分布，引入了角相关函数，利用球谐函数展开表征角功率谱，并推导了其和三维功

(a)

No. 3, 1970 PRIMEVAL ADIABATIC PERTURBATION 831
mass density per logarithmic increment of k . In the figures the normalization is arbitrarily fixed to peak value unity.

c) Residual Irregularity in the Microwave Background

In Figure 8 we plot $G(k, \Delta\psi)$ (eq. [63]) for the cosmologically flat general-relativity model. The area under the curve for fixed $\Delta\psi$ gives the variance of the brightness of the observed background when the resolving power is $\Delta\psi$. Notice that $G(k, \Delta\psi)$ is appreciable only near the first peak of $\Phi_m(k)$. As $\Delta\psi$ decreases, the curve moves to the right because one is sensitive to shorter wavelength (larger wavenumber). The shift is not large, however, because the residual radiation perturbation at shorter wavelength is so very small. We conclude from Figure 8 that the experimental search for small-scale irregularities in the microwave background provides a test for the first big peak in Figure 5 (if the radiation has not suffered further scattering). The same conclusion holds for the other three cosmological models.

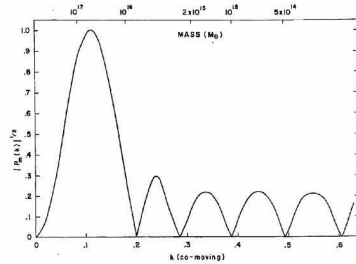


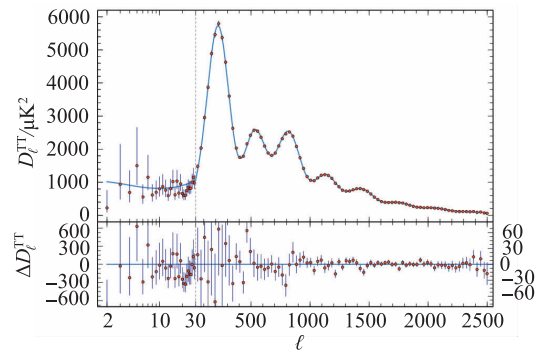
Fig. 5.—Same as Fig. 4 for the cosmologically flat general-relativity model, $\rho_b = \rho_c$. The normalization is fixed to peak value unity.

In Figure 9 we plot the mean square fluctuation in the total brightness of the microwave background (eq. [65]; see also Table 1). In these curves the normalization has been fixed so that $\Phi_m(k)$ (Figs. 4-7) reaches the peak value unity at redshift $1 + Z_m = 10$. The time variation of the matter-density power spectrum is computed in the linear approximation, and our normalization means that at about redshift Z_m matter starts to fragment into separate and distinct bound systems with mass comparable to the mass function (eq. [39]) evaluated where $\Phi_m(k)$ is approaching unity. The observational limit shown on the figure is the upper limit estimated by Conklin and Bracewell after allowing for system noise. The results of the computation with this choice of Z_m are comparable to but smaller than this observational limit.

The above choice of Z_m may be too large. If Z_m were moved to a later epoch, it would reduce the required initial amplitude of the perturbation, hence reduce the mean square variation of the background. In Table 1 we list the factors by which the mean square variation of brightness must be multiplied when Z_m is reduced to smaller values (more recent epochs).

© American Astronomical Society • Provided by the NASA Astrophysics Data System

(b)



(c)

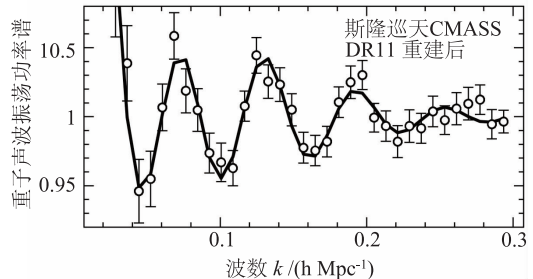


图7 (a)皮布尔斯和 Jer Yu 计算得到的物质扰动功率谱清晰展现出重子声波振荡的特征^[12]；目前，与重子声波振荡相关的微波背景辐射温度起伏功率谱^(b)^[13]和星系空间分布功率谱(SDSS-III)^(c)^[14]已经成为限制宇宙学的重要观测目标

率谱的关系。皮布尔斯还考虑了星系巡天只覆盖部分天区的情形，得到积分限制(integral constraint)和功率谱窗函数等改正。后面的系列文章把这些分析手段应用到当时存在的星系、星系团、射电星系和类星体等星表(图8)，对河外天体进行了成团性分析，而且还从两点相关函数分析拓展到高阶(三点和四点相关函数)。这一系列的工作奠定了以后星系巡天以及微波背景辐射各向异性的统计分析方法。尤其是第一篇文章，其推导之清晰，考虑之全面，令人叹为观止。

宇宙学常数——冷暗物质宇宙学(Λ CDM)。出于朴素审美，宇宙学家对空间平直宇宙情有独钟。按照广义相对论，必须有足够多的物质才能维系宇宙几何上的平直，即达到临界密度。按照已知的物理(粒子物理标准模型)，这些物质质量由重子主导，所以天文学家统称为重子物质。重子物质会形成恒星、星系、发光，从而可以观测、称量。但是称量结果低于预期两个量级。失踪的物质在哪里？70年代初，星系旋转曲线的观测表明，漩涡星系中存在大量不可见的物质，即

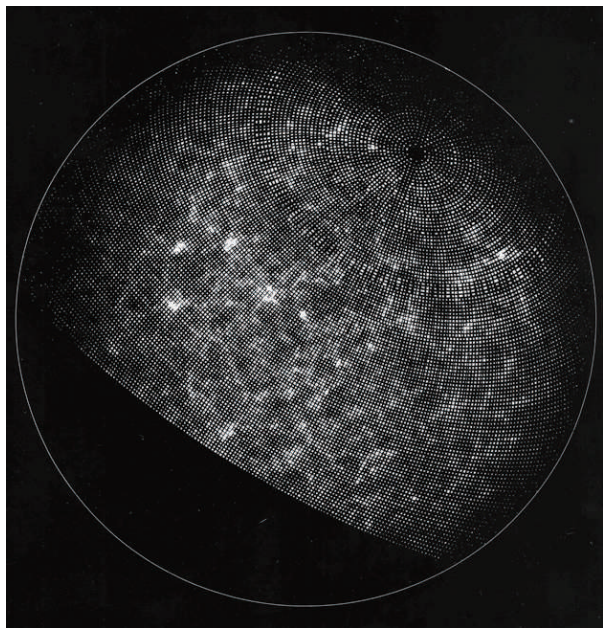


图8 手工绘制的星系分布图。70年代根据茨威基近邻星系表绘制的星系在天空的分布图。皮布尔斯利用绘图仪打印了格点。为了用方格的大小代表每平方度里星系的多少，他和夫人艾丽森在餐桌上手工涂黑。这幅图是他的著作《宇宙大尺度结构》的卷首插画^[9]

暗物质。奥斯特里克、皮布尔斯和耶希尔^[16]由此推测这些暗物质形成很大的暗物质晕，将漩涡星系包裹在内，并贡献了相当比例(约临界密度20%)的宇宙质量。此后，鲁宾(Vera Rubin)等提供了更加确凿的旋转曲线和暗物质存在的观测证据。那么，这些暗物质是什么组成的呢？当年他们推测是很暗的恒星。

然而，几年之后皮布尔斯意识到，这些暗物质不可能是恒星，甚至不可能是重子物质，而可能是超出粒子物理标准模型的非重子暗物质(weakly interacting massive particles, WIMP)^[17]。80年代初的宇宙微波背景辐射观测表明微波背景各向异性小于0.01%。在一个由重子物质主导的宇宙，引力不稳定性只能把该初始扰动放大到最多10%，比当时星系成团性的观测结果小至少一个量级，无法形成星系尺度的结构。而如果存在质量大、速度低、与光子/重子几乎不发生相互(非引力)作用的非重子暗物质，则可以很自然地解决这个矛盾。此后，暗物质的含义逐渐从之前不发光的重子(例如此前猜测的暗恒星)转变为非重子暗物质。这些暗物质因为粒子质量大，热力学冷(热运动速度低)，所以被称为冷暗物质(cold dark matter, CDM)。在同一时期，还有其他两组天文学家也基于结构形成发表了类似的理论^[18, 19]。从粒子在宇宙早期热退耦后剩余丰度对宇宙平均密度的贡献角度考虑，粒子物理学家也曾指出WIMP的存在可能性^[20]。

冷暗物质的引入很自然地解决了宇宙微波背景和星系成团性观测结果的矛盾，但是皮布尔斯也清楚地意识到，星系成团性的观测结果表明，这些冷暗物质似乎不足以维系宇宙的平直几何。当时宇宙早期的暴胀理论已经开始发展起来，其预言之一是空间平直的宇宙。经过两年思考和更全面的数据分析(包括CfA星系巡天观测的红移畸变效应、球状星团年龄等)，在1984年，他推测宇宙应该是平直的，如暴胀理论预言，但是其中的物质(主要是冷暗物质)，只占临界密度的20%。剩下的80%是什么？他推测是爱因斯坦60多年前引入的宇宙学常数 Λ ^[21]。这就是 Λ CDM模

型，亦即今天的标准宇宙学模型，已被从宇宙微波背景辐射、宇宙大尺度结构到超新星的多重观测精确验证。当年的预测和结合有限数据所得到的限制，跟今天物质约占30%，宇宙学常数约占70%的结果并无显著差别，令人震叹！宇宙学常数的存在，导致宇宙的膨胀在约60亿年前从减速变为加速。2011年诺贝尔物理学奖授予了1998年通过超新星观测发现宇宙加速膨胀的3位宇宙学家^[22]，但是这个重大发现，其实很多年前已落入皮布尔斯的理论视野。

这是一个崭新的宇宙，崭新到难以置信：亿万生命、地球、太阳、比邻星的三体世界、美丽星云、灿烂银河、粒子物理标准模型涵盖的所有物质和能量，竟然只是宇宙的冰山一角，只占宇宙中总物质和能量的5%！非重子冷暗物质占25%，至今仍未被物理实验发现；宇宙学常数/暗能量占70%，在驱动着整个宇宙加速膨胀，但其来源和本质依然是一个谜。

其他。皮布尔斯在星系和宇宙学领域贡献实在太多，再简单提及几个。1965年，帕特里奇和皮布尔斯^[23]考虑如何探测宇宙早期的星系，他们提出这些早期的星系恒星形成率会很高，产生大量大质量恒星。这些高温的大质量恒星会把它们周围星际气体中大量的氢原子电离，电离氢在再复合的过程中有非常大的几率产生莱曼—阿尔法跃迁。他们指出，强莱曼—阿尔法辐射是这类星系的重要特征，可以籍此来搜索发现早期星系。目前，莱曼—阿尔法发射线窄带巡天以及积分视场巡天已经成为发现和研究宇宙早期高红移星系的最主要手段之一，他们那篇论文成了这一领域的开山之作。在1969年的一篇论文里^[24]，皮布尔斯探讨了星系角动量的起源，考虑了物质密度扰动场的角动量分布和潮汐力矩作用下的角动量演化，这篇论文成为星系形成和演化领域的一篇重要文献。皮布尔斯还研究过球状星团的起源^[25, 26]和星团中心塌缩天体(比如黑洞)周围恒星的空间和速度分布^[27]，都为后来的工作提供了思路和启示。宇宙学常数——冷暗物质宇宙学之外，皮布尔斯和拉特拉在1988年提出了标量场暗能量^[28]，

后来被称为“quintessence”(精质)，直到今天都是宇宙学的研究前沿。

3 现代宇宙学的发展

皮布尔斯获得2019年诺贝尔物理学奖后，一如既往地谦逊。他在诺贝尔奖发布会的采访中特地强调他不是一个人在战斗^[29]，他提及了苏联卓越的物理学家雅科夫·泽尔多维奇(Yakov Zel'dovich)，还有他的博士及博士后导师和同事罗伯特·迪克，以及他们领导的研究组在宇宙学研究中做出了重要贡献。的确，在现代物理宇宙学的殿堂中，除了皮布尔斯，泽尔多维奇，迪克，还有伽莫夫(George Gamow)，阿尔弗(Ralph Alpher)，霍伊尔(Fred Hoyle)，苏尼亚耶夫(Rashid Sunyaev)等，星光璀璨，许多前辈业已仙去。这些宇宙学研究的武林高手，一起打造了破解宇宙奥秘的倚天剑和屠龙刀。皮布尔斯作为其中的杰出代表，成就加上机遇，斩获了诺贝尔奖，可喜可贺。这也是物理宇宙学走向成熟的一个标志。

一个学科的成熟并不意味着终结。物理宇宙学的大厦上空依然飘浮着几朵乌云，暗物质是什么，暗能量又来自哪里，什么场驱动了宇宙暴胀，暴胀能量尺度有多高，等等。这些谜团的存在正是宇宙学进一步发展的动力和源泉。人们期待正在进行的以及规划中的大规模星系巡天(比如SDSS-IV, HETDEX, DESI, PFS, DES, LSST, WFIRST, Euclid等)，微波背景辐射(偏振)观测(比如SPTpol, ACTPol, BICEP/Keck, LiteBIRD, AliCPT, Simons Observatory等)，以及地面和空间暗物质探测(PandaX, XENON, DAMPE, AMS等)能够进一步揭示宇宙的神奇和奥秘，不断带给我们惊喜！

4 后记

今天坐拥海量宇宙学观测数据的我们，很难想象当年天文观测的数据匮乏、质量低下和自相矛盾。以皮布尔斯为代表的现代宇宙学先驱，竟然能

够凭借着卓越的理论洞察和扎实的数据分析, 抽茧剥丝, 发掘出如此令人震撼的宇宙奥秘, 实在是史诗般的壮举。这个过程困难重重, “奇妙的洞察、幸运的猜测、优雅的推理, 伴随着更常态的不走运的猜测和 disregard of unwelcome evidence¹⁾”^[3], 后代研究者往往只能从他们的回忆中管窥一豹了。浏览他的论文, 不得不再次感叹皮布尔斯的确是一位极其谦逊的科学家, 他总是大胆假设, 小心求证, 总是以战战兢兢的态度审视各种漏洞, 尝试新的可能, “Publish and be damned, but keep it short.”——他引用霍伊尔的话, 如是说。仿效朗道对早期宇宙学家的评价(“宇宙学家经常犯错, 却从不怀疑。”), 普林斯顿高等研究院的斯科特·特里

1) 直译可能是“忽视不合意的证据”, 也可能是“摒弃不合意的证据”。结合当时的情形, 理论与观测都面临筛选的问题。“unwelcome evidence”也可能包括与理论不符合最终证明是错误的观测结果。因为不能把握其真实含义, 我们选择列出英语原文, 不进行翻译。

梅因(Scott Tremaine)说“皮布尔斯很少犯错, 却总在怀疑。”(“Peebles is rarely wrong, but always in doubt.”)^[30], 可谓恰如其分。

两位笔者均从事宇宙学方面的研究, 研究方向离不开皮布尔斯的奠基和开拓。我国目前参与和领导了诸多项目致力于暗物质探测、暗能量测量和宇宙微波背景辐射的精确测量, 比如由上海交通大学领导的 PandaX 暗物质实验, 由上海交通大学和国家天文台等单位参与的 DESI 星系巡天, 由上海交通大学、清华大学、国家天文台、中国科技大学, 厦门大学和北京大学等单位参与的 PFS 星系巡天, 以及由高能物理所牵头的 ALICE 宇宙微波背景辐射探测项目。这些都离不开皮布尔斯的开创性工作。谨以此文, 致敬皮布尔斯和他的物理宇宙。

参考文献

- [1] Alpher V S. Asian Journal of Physics, 2014, 23: 17
- [2] Faber S. “A Conversation with P. James E. Peebles”(https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/do.multimedia.2013.06.10.181/abs/)
- [3] Peebles P J E. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2012, 50: 1
- [4] McKellar A. Molecular Lines from the Lowest States of Diatomic Molecules Composed of Atoms Probably Present in Interstellar Space. Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria, 1941, 7: 251
- [5] Dicke R H, Peebles P J E, Roll P G *et al.* ApJ, 1965, 142: 414
- [6] Penzias A A, Wilson R W. ApJ, 1965, 142: 419
- [7] Gamow G. Physical Review, 1948, 74: 505
- [8] Alpher R A, Bethe H, Gamow G. Phys. Rev., 1948, 73: 803
- [9] Alpher R A, Herman R. Nature, 1948, 162: 774
- [10] Peebles P J E. ApJ, 1966, 146: 542
- [11] Peebles P J E. ApJ, 1968, 153: 1
- [12] Peebles P J E, Yu J T. ApJ, 1970, 162: 815
- [13] Planck Collaboration. arXiv: 1807.06209
- [14] Anderson L *et al.* MNRAS, 2014, 441: 24
- [15] Peebles P J E. ApJ, 1973, 185: 413
- [16] Ostriker J, Peebles P J E, Yahil A. ApJL, 1974, 193: 1
- [17] Peebles P J E. ApJL, 1982, 263: 1
- [18] Bond J R, Szalay A S, Turner M S. Phys. Rev. Lett., 1982, 48: 1636
- [19] Blumenthal G R, Pagels H, Primack J R. Nature, 1982, 299: 37
- [20] Lee B W, Weinberg S. Phys. Rev. Lett., 1977, 39: 165
- [21] Peebles P J E. ApJL, 1984, 284: 439
- [22] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/summary/
- [23] Partridge R B, Peebles P J E. ApJ, 1967, 147: 868
- [24] Peebles P J E, Dicke R H. ApJ, 1968, 154: 891
- [25] Peebles P J E. ApJ, 1969, 157: 1075
- [26] Peebles P J E. ApJ, 1969, 155: 393
- [27] Peebles P J E. ApJ, 1970, 162: 815
- [28] Peebles P J E. ApJ, 1972, 178: 371
- [29] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/prize-announcement/
- [30] https://www.theglobeandmail.com/world/article-winnipeg-born-james-peebles-among-winners-for-nobel-prize-for-physics/