

2019年度诺贝尔物理学奖解读: 两类研究的奇妙组合

余瑜

上海交通大学天文系, 上海 200240

E-mail: yuyu22@sjtu.edu.cn

时隔两年, 诺贝尔物理学奖再次授予天文方向. James Peebles, Michel Mayor 和 Didier Queloz 由于他们在“理解宇宙的演化和地球在宇宙中的位置”方面所做的贡献, 获得2019年度诺贝尔物理学奖. 笔者身边风趣的天文学家在诺贝尔奖评选的前几日相互逗趣说: “您最近是不是在等一个电话?” (诺贝尔奖委员会打电话通知获奖人). 而2019年度的诺贝尔物理学奖, 对笔者身边的许多同僚天文学家, 可谓意料之外, 但也情理之中.

这次的诺贝尔物理学奖授予了天文学研究中两个截然不同的研究领域. James Peebles 由于其对“物理宇宙学的理论研究”获奖, 而师徒 Michel Mayor 和 Didier Queloz 由于他们发现了“围绕其他太阳型恒星绕转的地外行星”而获奖. 宇宙, 可以说是科学研究中最大的对象, 它包罗万物, 从古至今. 它关乎着人类对自身和这个世界最基本的思考: 我们从哪里来? 世界为什么是这个样子? 而地外行星在宇宙中又是如此渺小. 整个可见宇宙(到宇宙微波背景辐射的距离)的大小为465亿光年, 而地外行星51 Pegasi b的轨道半径约为0.05天文单位, 它们差了17个数量级. 这次的诺贝尔物理学奖分别授予了天文学中两个极端尺度上的研究.

天文学家的研究大致可以归为两类: 观测研究与理论研究. 天文研究与物理研究最大的区别在于, 为了寻找物理规律, 人们可以发明很多可控的物理实验, 从而发现规律、构建模型、测量参数; 而天文研究通常无法进行实验. 天文学家能做的就是想尽办法进行观测, 上天入地, 搜罗所有可以观测到的数据来进行研究. 因此天文学家敏感于这些人类不可控事件和现象发生的概率, 例如超新星爆发的概率, 微引力透镜现象发生的概率等. 对于观测研究的学者来说, 这些概率关乎着成功的概率. 而观测工作也讲究一个“最”字. “最遥远”、“最大”, 这些词是人类对自己探索能力的自我肯定. 因此, 这些探索型的观测研究对于人类的意义通常不言而喻, 却又引人深思. 而通过努力不断探索, 最终获得这些发现的研究者, 也有幸被载入科学发现的史册中. 但值得注意的是, 这次获奖的地外行星却并不是“最早”被人类发现的地外行星. 诺贝尔奖的殊荣与之错过是因为, 最早被发现的地外行星围绕着一颗脉冲星公转, 和我们家园的样子相去甚远. 喜欢探索宇宙的人类, 最终将诺贝尔奖授予了与我们的家园更相似的行星系



余瑜 上海交通大学物理与天文学学院天文系特别副研究员. 2007年毕业于同济大学数学系, 获学士学位; 2013年毕业于中国科学院上海天文台, 获博士学位; 后留台任助理研究员、副研究员. 2017年10月加入上海交通大学. 主要研究方向为宇宙学和大尺度结构的统计研究, 包括重子声波震荡、弱引力

透镜、本动速度场等.

统的发现研究.

相比之下, 宇宙学对于公众来说是一个既熟悉而又陌生的词汇. 宇宙的至高至大, 总让人们自然地将其和哲学联系起来. 说起宇宙学, 谁都可以马上提出几个问题: 宇宙有多大? 宇宙有没有中心? 宇宙之外是什么? 而Peebles的工作, 正是将人类对宇宙的一些哲学思考变成了一门讲究精准的科学. 相比发现地外行星的一文成名, Peebles在宇宙学方向的贡献, 已经持续输出长达半个世纪. 众所周知, 哈勃对于河外星系的观测得到了“宇宙在膨胀”的结论. 基于这个观测事实往回推演, 人们提出了大爆炸的宇宙学模型. 那么大爆炸之前是否是前一个宇宙的收缩? 如果是, 那么前一个宇宙中通过恒星演化形成的重元素会如何? Peebles和他所在的团组为了回答这些问题所做的一些理论推导, 得出了“热大爆炸宇宙在膨胀冷却的过程中必然会留下具有黑体谱的宇宙微波背景辐射”这个结论^[1]. 然而不幸的是, 他们虽然理论上预言了这个信号的存在, 并且正要用自制的测量器去搜寻, 却被美国贝尔实验室的研究人员无心地作为一个怎么都扣不干净的噪声而发现了^[2]. 发现者Penzias和Wilson因此获得了1978年度的诺贝尔物理学奖, 而预言了这个信号的宇宙学家却与其失之交臂. 并且, 2006年度的诺贝尔物理学奖授予了证实“宇宙微波背景辐射为黑体谱”的John Mather.

宇宙微波背景辐射的研究工作使得Peebles将宇宙学作为一生的科研追求, 一干就是半个世纪, 而这项研究只是Peebles对人类认识宇宙所做贡献的开始. 众所周知, 恒星持续发光发热的能源来自其内部的核反应. 1967年的诺

贝尔物理学奖授予做出恒星能源机制研究的 Hans Bethe. 恒星内部的核反应会形成重元素,并在超新星的爆发过程中形成更重的元素.对于热大爆炸宇宙学,天文学家关心的问题之一,是在早期不断膨胀的宇宙中,各元素的形成和比例是什么样的.这个问题称为大爆炸核合成. Peebles 在一篇邀请报告^[3]中写道:“热大爆炸让我想到了爆炸的高压锅,一定有许多非平衡态的核反应和轻元素的形成.”这是一场元素形成和时间的赛跑,在不断冷却的宇宙中,核反应速度将越来越低,直到无法进行. Peebles 对环境变化如此剧烈的核反应过程做了仔细计算,主要考察氦元素和氘有关的核反应,得到了大爆炸核合成阶段所形成的元素比例^[4].让人们吃惊的是,这些计算结果非常接近当今的观测结果.而如今对于大爆炸核合成的研究,在此基础上加入了更多的物理过程,运用了更准确的反应速率和反应截面,可谓是在前人的肩膀上继续努力.

而随着宇宙的持续膨胀和冷却,高能光子不断减少,电子开始和质子结合,放出光子,这一过程称为再复合.再复合并不是一个简单的物理过程,同大爆炸核合成的研究一样,需要考虑随时间变化的宇宙大环境,还要考虑许多次级反应.例如,光子会被已经形成的基态氢原子吸收,变为激发态,再放出光子加热等离子体. Peebles 同样对此过程进行了仔细研究,推导出了当时宇宙的电离率^[5].若宇宙初始并不完全均匀,而是有个初始的密度扰动,那么这个扰动会形成大小不一的引力势阱,造成微波背景辐射的温度场有微小涨落.再复合过程之前,质子-电子-光子耦合在一起的等离子体会在引力势阱中做声波震荡.解耦后,这些声波震荡的信号就留在了宇宙微波背景辐射的温度图中.通过测量这些声波震荡,可以得到宇宙初始扰动的谱型^[6].而巧合的是,在没有测量之前, Peebles 在计算中假设了一个扰动的谱型,而如今宇宙微波背景辐射的实验测量得到的结果,也和这个假设的谱型非常接近.而宇宙微波背景辐射温度涨落的发现,也获得了2006年度的诺贝尔物理学奖.

前文所述的这些贡献属于 Peebles 对早期宇宙的研究,而 Peebles 对晚期宇宙的研究也是硕果累累.大爆炸宇宙学告诉人们宇宙如何开始,而宇宙如何演化和其最终的命运决定于我们所在的宇宙中的物质组分.当时的主要宇宙学模型有物质密度达到临界密度的 Einstein de-Sitter 模型,物质不到临界密度的开放宇宙模型,和物质加宇宙学常数的平坦宇宙模型等.令人疑惑的是,旋涡星系中所能观测到的发光物质提供的引力,不能解释观测到的不同半径处的旋转速率,预示着大量物质并没有被观测到. Peebles 运用了当时可以找到的所有观测数据:星系团、星系、射电源和类星体,利用从其他学科借鉴来的统计研究工具——相关函数和功率谱,试图对宇宙学模型做出限制^[7].通过比对从观测数据中测量到的统计信号和引力不稳定性导致的结构形成的理论,在证据的不断积累后,最终确定了

我们的宇宙学模型为冷暗物质加宇宙学常数的模型,此模型如今被称为宇宙学的标准模型.

Peebles 对宇宙学的贡献远不止于此.纵观他的研究论文题目和摘要,有两个词经常出现——origin(起源)和reconcile(缓和、调解). Peebles 研究了很多宇宙学中物理现象的起源,例如星系角动量的起源. Peebles 收集了所有的观测来研究宇宙学,试图缓和不同观测得到的矛盾结论.如果说 Peebles 将人类对宇宙的哲学思考发展成了一门精确的科学,那么地外行星的发现则将“人类并不孤独”的自然猜想向现实拉近了一大步.视向速度法,这是找寻地外行星的主要方法之一.因为恒星和行星将绕着它们共同的质心运动,观测到的恒星光谱将随着时间做周期性的红移和蓝移.得益于技术的进步,人们可以通过监测恒星的光谱移动,探测到恒星视向速度的微小变化,使得发现地外行星成为可能^[8].而寻找地外行星还有另一种方法——凌星法.通过连续观察恒星亮度的变化,若其有行星绕转,则恒星的光有可能被行星遮挡而出现变暗的现象,可以推测出行星的存在.

物理研究中许多实验可以反复做,从而得到更确定的结论.而对从事天文理论研究的学者来说,这些事件/现象发生的概率不可控制,直接代表着研究中所能用到的样本数量,因此关乎着研究的精度和结论的可信度.而天文中的宇宙学研究,由于我们只有一个宇宙,情况则更糟糕.物理学研究中,通常将信噪比达到 5 作为发现的标准.而天文学研究中,特别是早期,信噪比达到 1 已经是让多数天文学家激动的发现了.在宇宙学的研究过程中, Peebles 也曾迷茫过.曾有同僚劝 Peebles 换一个能得到比较确定结论的研究方向.可用的数据实在是匮乏,甚至有些自相矛盾. Peebles 在 2004 年获得第一届邵逸夫奖时就曾感叹:“1964 年初涉宇宙学时,我感觉太不易了,却又很兴奋.实验室里得到的物理结论外推到宇宙上却只有极其有限的数来支持.曾想过做两三个项目之后就换方向吧,结果每个工作都引人深思,让人无法拒绝.”就算是观测数据爆发的今天,仍有许多宇宙学的信号徘徊在“被探测到”的边缘.科学家们正在试图使用更多的数据,更好的分析统计方法,更仔细的系统误差控制,来提高测量的信噪比.而地外行星的发现研究可谓是证据确凿,并且仅在一周后就被其他观测所确认.

事实上,观测研究和理论研究是密不可分的.正是这些发现探索所带来的激动人心,使得这一方向的学科研究成为风潮,样本快速累积,科学家们才能利用这些大样本通过统计研究得到更令人信服的结果.宇宙学已经进入大数据时代.正在进行的和下一代的大型星系巡天项目,以及微波背景辐射实验,都给人们极大的信心来更进一步地探索 and 了解我们的宇宙.我们不仅将对已有的标准宇宙模型的参数做出更好的限制,并且很有可能发现标准模型以外的新物理.而地外行星方向的研究还在数据快速增长的

阶段。在地外行星探测方面，近几年最大的事件莫过于开普勒空间望远镜的升空。开普勒望远镜上唯一的科学仪器就是测光计。在长达9.5年的运行中，开普勒望远镜盯着一个固定的天区连续测量恒星的亮度，通过凌星法共发现了2662颗地外行星，这使得地外行星的研究一下子成为全世界最热门的天文学研究领域。这次诺贝尔物理学奖，可谓是一半授予了一门历史悠久的研究方向，而另一半授予了一个新兴的研究热潮。

宇宙学研究中还有许多问题并没有解决。天文学家引入了暗物质和暗能量来解释宇宙，而粒子物理方面并没有找到对应的粒子作为暗物质，也还未确定暗能量是不是就是宇宙学常数。我们的宇宙确实有过一段暴涨的时期，但“是什么驱动了暴涨”也是未解之谜。在Peebles搭下的宇宙学研究框架下，天文学家正通过各种更先进的观测来搜集新的证据，为以上宇宙学悬而未决的问题做出解答。而地外行星方向，科学家正大步向前，发现越来越多的行星系统，回答太阳系形成、地球形成等人类关于自己家园的基

本疑问。

在准备解读2019年度诺贝尔物理学奖期间，笔者很享受调查一个学者的研究经历的过程。不经意回想起上一次做类似的调查是在攻读博士期间，赴国外长期访问临行前，需要先了解国外合作单位导师的系列研究。当年作为学生知识还不够全面，深深佩服这位导师做过那么多精彩的研究。在数据匮乏的研究道路中，难免有许多弯路和错误的猜测，这些挫折可能会被淡忘，而只有最终的结论被总结在教科书中。了解这些经历，想象宇宙学在当年的现状，不得不佩服Peebles一路坚持下来，并做出如此多的贡献。他的智慧和不懈努力，已经回答了宇宙学中许多基本的问题，确立了标准模型。然而，正如Peebles在获得诺贝尔奖的庆祝会上的总结：“宇宙总是能给我们带来惊喜。我很确信我的理论不会是一个最终答案。当我们发现膨胀和演化宇宙中的新物理，那一定会再次让我们吃惊。在座的都是正在追逐新发现的人们，我希望大家快马加鞭做出这些让人震惊的新发现。”

推荐阅读文献

- 1 Dicke R H, Peebles P J E, Roll P G. Cosmic black-body radiation. *Astrophys J*, 1965, 142: 414–419
- 2 Penzias A A, Wilson R W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. *Astrophys J*, 1965, 142: 419–421
- 3 Peebles P J E. Seeing cosmology grow. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2012, 50: 1–28
- 4 Peebles P J E. Primordial helium abundance and the primordial fireball. II. *Astrophys J*, 1966, 146: 542–552
- 5 Peebles P J E. Recombination of the primeval plasma. *Astrophys J*, 1968, 153: 1–11
- 6 Peebles P J E, Yu J T. Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe. *Astrophys J*, 1970, 162: 815–836
- 7 Peebles P J E. Statistical analysis of catalogs of extragalactic objects. I. Theory. *Astrophys J*, 1973, 185: 413–440
- 8 Mayor M, Queloz D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359

Summary for “2019 年度诺贝尔物理学奖解读：两类研究的奇妙组合”

The Nobel Prize in Physics 2019: Wonderful combination of two astronomical research areas

Yu Yu

Department of Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
E-mail: yuyu22@sjtu.edu.cn

The Nobel Prize in Physics 2019 was awarded to three astronomers, James Peebles, Michel Mayor and Didier Queloz, for their contributions to our understanding of the evolution of the Universe and Earth's place in the cosmos. Cosmology and exoplanet are quite different research area in astronomy in many aspects. The former belongs to theoretical study and the latter is discovery. Cosmology studies the origin and evolution of the Universe, which is the biggest object in science, while exoplanets are so small compared to the Universe. Cosmology has a long history and exoplanet became the hottest area in astronomy in recent years. However, the public understands the meaning of the discovery of an exoplanets orbiting a sun-like star to human being, but knows less about what happened in the research of cosmology.

Peebles has been contributing to cosmology for more than half century. He proposed the existence of the cosmic microwave background with a black-body spectrum, calculated the Big Bang Nucleosynthesis, deduced the physical processes during the recombination epoch, and estimated the anisotropy magnitude for the cosmic microwave background temperature. He also developed the statistical analysis framework for the study of cosmology by extragalactic objects observation. Based his research results and other evidences, the standard model for our expanding universe is established. His contribution is so important for the modern cosmology and the descendants like us are still working with the research framework he constructed. His research interest is very board and he opened many research areas that now we are still working on.

Different from the research in physics, we cannot design an experiment for astrophysical study. Astronomers always attempt to use all the available data to validate their theory. During Peebles' life, he also felt confused in his research. Many of the long extrapolation from well-established laboratory results to the physics of our expanding universe was supported by exceedingly limited empirical evidence. He kept going and found that each project was too interesting to resist.

The research in exoplanets is in a very different way. Thanks to the development of the technology in the telescope and spectrometer, astronomer could use radial velocity method to search the exoplanets orbiting a star, since both the star and the exoplanet is orbiting around their mass center, which induces periodical shifts in the star's spectrum. The exoplanet 51 Pegasi b is found in this way and is confirmed just one week later by another research group. In exoplanets area, one important event is the launch of the Kepler space telescope. 2662 exoplanets were found during the 9.5 year service by finding dimming effect from the transit of the exoplanets across the star.

Cosmology is in the epoch of big data. Ongoing and planned galaxy surveys and cosmic microwave background experiments will enable us to put more constrains on cosmology, even to find new physics beyond the standard model. However, the exoplanet research is in the period of fast growing. More data is coming thanks to the exciting discovery of the exoplanets.

There are several open problems in cosmology and exoplanets research. Peebles believe that the Universe is capable of surprising us. He encouraged the young researcher to hurry up to make those wonderful discoveries.

cosmology, exoplanets, the Nobel Prize, early universe, statistical analysis

doi: 10.1360/TB-2019-0665