宇宙环境新认知——有关 2019 年度诺贝尔物理学奖的理解

郝盛丰, 蔡一夫*

中国科学技术大学物理学院天文学系, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: yifucai@ustc.edu.cn

2019 年度诺贝尔物理学奖同时授予了系外行星和宇宙学领域, 以表彰天文学家米歇尔·梅耶(Michel Mayor)与迪迪尔·奎罗兹(Didier Queloz)在系外行星发现上做出的突出贡献, 以及理论宇宙学家詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles)从理论角度为现代宇宙学物理体系的建立做出的杰出贡献。诺贝尔奖委员会给出的理由是“为我们理解宇宙的演化和地球在宇宙中的位置做出的贡献”, 以他们 3 人为代表的科学家们为人类在现代科学的框架下重新认识自身与宇宙的关系提供了重要思路。一方面, 让人类重新思考我们所生活的这个星球在宇宙中是否是独一无二的, 对探索系外宜居星球和寻找外星生命非常重要; 另一方面, 使我们能够更加精准地把握宇宙演化的历史脉络, 更加清楚地了解我们生活的这个宇宙的前世今生。此 3 人中, 实验天文学家梅耶和奎罗兹一起发现了飞马座 51b, 这是第一个被人类发现的绕着类太阳恒星飞马座 51 运转的系外行星; 而理论宇宙学家皮布尔斯在原初核合成、暗物质、宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)和大尺度结构形成等现代宇宙学的重要领域做出了关键的理论贡献, 是开拓精确宇宙学时代的标志性领军人物。这两个领域在近二三十年内展现出了蓬勃生机。21 世纪, 伴随着先进技术的发展, 系外行星和外星生命的研究有了爆发式的发现。至此, 宇宙学领域已经获得 4 次诺贝尔奖, 分别是宇宙背景探测器卫星、宇宙加速膨胀的发现、引力波的探测, 以及此次的 2019 年度诺贝尔物理学奖, 它们使当代宇宙学获得了广阔的发展前景。下面将对梅耶和奎罗兹在系外行星领域的发现、系外行星的探测手段和发展前景, 以及宇宙学领域的发展简史、皮布尔斯的贡献等展开介绍, 并论述目前宇宙学领域的一大研究热潮, 即原初引力波的探测。

1 系外行星

所谓行星, 是指自身不发生核聚变反应发光并围绕恒星运转的天体, 这样的天体有可能适合生命存在, 例如地球和火星。自 19 世纪以来便有观测报告声称发现了系外行星的踪迹, 但是都未曾被确切证实过。此外, 有一些由于光度太低, 无法辨别是系外行星还是其他恒星的变种,

蔡一夫 中国科学技术大学天文学系教授。2010 年获中国科学院高能物理研究所理学博士学位。2010~2012, 2012~2015 年先后在美国亚利桑那州立大学和加拿大麦吉尔大学从事博士后研究工作。2015 年入选中组部国家青年人才项目, 2017 年获国家自然科学基金优秀青年科学基金项目资助。2018 年当选

国际天文学联合会 IAU 会员。研究领域是粒子宇宙学, 集中在暴胀、反弹、宇宙起源、大尺度结构、当前宇宙加速膨胀等方面。

例如低质量的褐矮星。早在 1988 年, Campbell 等人^[1]就曾报道过疑似发现系外行星的证据, 他们利用视向速度法发现距离地球大约 45 光年外的恒星双星系统少卫增八(仙王座 γ , Gamma Cephei)存在一枚绕其公转的行星。然而, 由于当时的观测技术有限, 观测数据质量不佳, 直到 2003 年通过新测量数据的支持^[2], 这枚系外行星的存在才获得了天文学界的公认, 它也因此错过了成为首枚被人类发现的系外行星。

1995 年 10 月 6 日, 日内瓦大学的梅耶和奎罗兹师徒二人宣布, 首次利用径向速度法(图 1)发现一颗普通主序星(飞马座 51)的行星(飞马座 51b), 该行星距离地球大约 51 光年^[3]。几天后, 美国天文学家们在加州圣何塞附近的利克天文台也证实了这一发现。这一发现打开了当代系外行星发现的先河。先进的技术, 特别是高分辨率光谱学大大加速了新系外行星的发现。这些新技术让天文学家可以凭借行星对恒星的引力影响或光度变化来实现间接探测系外行星的存在。

飞马座 51b 是被发现的第一颗围绕类似太阳的主序星(飞马座 51)公转的系外行星, 也是典型的热木星。该行星的轨道周期为 4 个地球日, 其轨道与母星的距离比水星到太阳的距离近得多, 轨道速度为 136 km/s, 质量下限是木

图 1 (网络版彩色)径向速度法示意图。大圆表示恒星,小圆表示行星,叉表示双体系统质心。下图横轴代表时间,纵轴代表相对于地球的视线方向速度。在我们的视线方向上,恒星会轻微地接近和远离地球,它的谱线上会出现微小的多普勒效应而被捕捉到。图源: The Royal Swedish Academy of Sciences

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of radial velocity method. Big circle represents the star, little circle represents the planet, cross represents the center of mass of the two-body system. In the direction of our line of sight, the star moves slightly closer to and away from Earth, and a tiny Doppler effect will be captured along its spectral line. Source: The Royal Swedish Academy of Sciences

星质量的一半。当时,一颗如此靠近其母星的巨行星的存在是与行星形成理论相悖的,因此被认为是一种反常现象。然而,在此之后又陆陆续续发现了众多的热木星。天文学家开始研究行星的轨道迁移现象,并重新审视之前传统的行星形成理论。对于地球上的观测者来说,相较于母恒星,系外行星一般都非常暗淡,所以绝大多数系外行星都只能间接地进行观测^[4]。

值得强调的是,太阳系外存在行星,如果这些行星的轨道恰好位于宜居带,并且表面极有可能覆盖液态水的话,那么孕育出生命的概率就会大大提高,这也极大地吸引了人类探索外星生命的科学探索兴趣。截至目前,人类已经发现并确认了超过 4000 颗系外行星。在这些行星中,处于疑似宜居带的类地行星不在少数。在这些漂泊在太空中的星球上会不会也存在其他生命体?这一问题被科学家们长期关心^[5]。

2 物理宇宙学

人类对宇宙的近代认知,以文艺复兴后日心说的兴起为起点,紧接着牛顿力学的建立为宇宙学和天文学的发展在理论上打下了坚实的基础。20 世纪初,以量子力学和广义相对论为标志的物理学革命开始后,以相对论时空观为基础的真正意义上的宇宙学开始被建立起来。1929 年,美

国天文学家哈勃(Hubble)做出了一项举世震惊的里程碑式的发现,那就是他发现宇宙正在膨胀。这一观测结果直接促使伽莫夫(Gamov)等人在 20 世纪 40 年代建立起了热大爆炸宇宙学说。这一理论描述了宇宙创生于一个时空奇点的大爆炸,在极早期宇宙中充斥着由微观粒子构成的辐射流体,温度极高且密度极大,这一温度在整个宇宙背景下是统一均匀的,也就是宇宙背景温度^[6]。

在皮布尔斯所做出的一系列开创性工作中,最重要的当属他在 20 世纪 60 年代参与了宇宙微波背景辐射的理论预言及发现。热大爆炸宇宙学说预言了宇宙背景温度,即如今观测到的 2.73 K 绝对温度,说明宇宙背景辐射应该具有一个特别的分布规律。在研究工作进行得如火如荼时,两位无线电科学家找到皮布尔斯,说他们发现了一个奇异的信号,后经证实,这正好就是宇宙微波背景辐射的信号。这两位无线电科学家就是 1978 年诺贝尔物理学奖得主彭奇亚诺(Penzias)和威尔逊(Wilson)。这是宇宙微波背景辐射,也可以说是宇宙学领域的第一个诺贝尔奖。1989 年,人类发射了第一颗 CMB 观测卫星,即美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的宇宙背景探测器卫星(Cosmic Background Explorer, COBE)。当时这颗卫星以近乎完美的精度确认了 CMB 的黑体辐射谱和宇宙背景温度。不仅如此,在这个辐射背景上,人类首

次观测到了均匀温度背景中的扰动,即 10^{-5} 的温度涨落。后来的第二代 CMB 卫星——美国宇航局威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP)和第三代卫星——欧洲空间局(European Space Agency, ESA)的普朗克(Planck)卫星,都进行了极高精度的测量和完美验证。由于 COBE 卫星实验所带来的巨大影响,该项目的两位首席科学家——马瑟(Mather)和斯穆特(Smoot)在 2006 年被授予了诺贝尔物理学奖。这一领域的成就与其他宇宙学观测实验的发展一起推动了“精确宇宙学”时代的来临。

继 CMB 之后,宇宙学家还发现了占全宇宙物质比重约 95%的暗物质^[7]和暗能量^[8,9]的存在。它们对我们认识宇宙演化有及其重要的影响,这一切都要归结于对大尺度结构形成的研究。二十世纪六七十年代,皮布尔斯的研究兴趣转向宇宙的大尺度结构形成,他参与研究宇宙的各种物质组分以及宇宙本身的演化,并做出了重要贡献。在此之前,宇宙学的研究都比较定性;在此之后,宇宙学理论进入了可以通过扰动理论定量研究的精确宇宙学时代,可以对宇宙的物质、暗物质等物质组分的演化分布进行计算。并且,皮布尔斯和苏联的苏尼亚耶夫(Sunyaev)、泽尔多维奇(Zel'dovich)等人还发现,宇宙大尺度结构的种子来源于宇宙微波背景辐射中的扰动^[10],这对宇宙学的理论发展至关重要。此前有关宇宙学的诺贝尔奖都被授予了实验发现,这次是理论宇宙学第一次被诺贝尔奖垂青,它是对自 20 世纪中叶以来日益发展成熟的热大爆炸宇宙学以及相关的宇宙学扰动理论为人类呈现的新的宇宙观的极大肯定。

传统的热大爆炸宇宙学能够十分精确地描述宇宙从创生后几分钟到当前 138 亿年的演化历程,然而它也面临着一定的理论短板。例如,该学说无法完美解释当前的宇宙为什么在所有方向上看起来都如此均匀和平坦,同时无法确知 CMB 中的扰动来源于何处等。为了解答这一系列的理论问题,美国宇宙学家古斯(Guth)于 1980 年提出了暴胀学说。这一学说指出,宇宙在刚刚诞生约 $10^{-36} \sim 10^{-32}$ s 期间曾经历过一次极为剧烈的加速膨胀^[11]。通常这样的加速膨胀过程需要一个动力学标量场,被称为暴胀场,该场可以将宇宙的空间尺度在短时间内放大至少 10^{25} 倍。因此,这个过程十分有效地抹平了宇宙空间可能存在的任何不平坦性和不均匀性。

在现代宇宙学中,宇宙学扰动理论是基于爱因斯坦的广义相对论进行微扰展开,并通过研究这些微小的原初扰动的演化行为去确定星系及星系团等大尺度结构的最终形成过程^[12]。暴胀期间,暴胀场自身在不断地产生量子涨落,这些量子涨落的波长又因为暴胀而被拉伸到极大尺度,并且能退化成经典扰动。这些经典扰动最后演变成了 CMB(宇宙微波背景)中的温度涨落,并且在暴胀结束之后为宇宙中大尺度结构形成提供种子。而且,由宇宙学扰动理论所预言的近标度不变的功率谱和大尺度结构的物质功率谱,在后

来的宇宙学观测实验中都获得了极高精度的检验。

基于广义相对论,热大爆炸宇宙学说与暴胀框架下的宇宙学扰动理论结合在一起,可以给出一个只含有 6 个基本参数的宇宙学中的标准模型,即“和谐宇宙模型(concordance model)”。当前宇宙学家们正致力于通过各种更加精确的宇宙学观测实验来检验这个标准模型,同时也在努力搜寻着任何可能超出标准宇宙学图像的蛛丝马迹^[13]。

暴胀宇宙学的另一个重要预言是,时空自身的真空量子涨落也会迅速扩张到哈勃视界外形成张量型的原初扰动,即原初引力波。原初引力波与暴胀期间的物质成分没有直接关系,是纯时空涨落,而且是一种量子效应。因为暴胀发生在整个可观测宇宙中,所以原初引力波在宇宙中应该处处存在,形成引力波背景并遗留至今。因此,一方面,探测原初引力波有利于检验暴胀这样一个极高能标的早期宇宙过程,甚至有机会触及宇宙最接近大爆炸那一刻的动力学性质,例如反弹宇宙学的检验^[14,15];另一方面,它是引力(即时空)的量子产物,有助于推进人们对量子引

图 2 (网络版彩色)Planck 卫星实验组公布的 CMB 温度涨落图。上图为精细结果展示,中图为光滑处理后的图,下图为光滑后的加极化的示意图。图源: ESA

Figure 2 (Color online) CMB temperature fluctuations from the Planck group. Detailed results are shown above, a smoothed picture in the center, and a smoothed polarized picture at below. Source: ESA

力这些基本物理问题的理解^[16].

2017 年的诺贝尔物理学奖授予了维斯(Weiss)、索恩(Thorne)和巴里什(Barish),以表彰他们带领 LIGO 团队发现引力波信号的贡献.然而,由于原初引力波是宇宙本身这一极大尺度对象产生的,其波长早已超过地球尺度,所以无法使用与 LIGO 类似的实验方法进行探测,还是需要求助于宇宙的自拍照——CMB 的偏振进行探测,如图 2 所示.从观测角度来看,CMB 偏振图像可分解为两种独立的模式,一种是 E 模式,一种是 B 模式.B 模式偏振是“有旋”的,因而它在空间反射作用下具有与 E 模式不同的性质.若将两种偏振模式做空间反射,将会发现 E 模式保持不变,而 B 模式的 $B>0$ 和 $B<0$ 的两种自旋模式会互换.换句话说,E 模式具有偶宇称,B 模式具有奇宇称.

在 CMB 产生时期,原初引力波扫过整个宇宙,使得

散射前电子周围的时空变形,散射出来后的 CMB 光子就会具有 B 模式偏振,因此对原初引力波探测来说,CMB 是最直接的方式.同时,CMB 探测的原初引力波的频率非常低.波长是宇宙学尺度,来源于早期宇宙,也就是说,实现 CMB 光子散射的“实验装置”是天然的.并且,原初引力波有一个优点:作为信号源,它非常稳定,这是因为原初引力波充满整个宇宙空间,在同样充满整个宇宙空间的 CMB 上留下的印记也长久存在,可被重复验证.而 LIGO 探测的黑洞并合这样的事件偶然性比较大,而且同一事件无法由后续其他实验来验证.目前,中国的宇宙学界正在致力于发展 CMB 的 B 模式偏振信号的探测计划,例如在西藏阿里地区建造微波探测望远镜寻找原初引力波的微弱信号^[17].此外,有关暗物质的实验探测也在如火如荼地进行^[18,19].这些项目极大推进了中国的宇宙学研究力量.

推荐阅读文献

- Campbell B, Walker G A H, Yang S. A search for substellar companions to solar-type stars. *Astrophys J*, 1988, 331: 902
- Hatzes A P, Cochran W D, Endl M, et al. A planetary companion to γ Cephei A. *Astrophys J*, 2003, 599: 1383–1394
- Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- Seager S. Drake deming, exoplanet atmospheres. *Ann Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 631–672
- Schwartzman E W, Kiang N Y, Parenteau M N, et al. Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life. *Astrobiology*, 2017, 18: 663–708
- Peebles P J E. *Principles of Physical Cosmology*. Princeton: Princeton University Press, 1993
- Yuan Q, Feng L. Dark matter particle explorer observations of high-energy cosmic ray electrons plus positrons and their physical implications. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 101002
- Ratra B, Peebles P J E. The cosmological constant and dark energy. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 559–606
- Cai Y F, Saridakis E N, Setare M R, et al. Quintom cosmology: Theoretical implications and observations. *Phys Rep*, 2010, 493: 1
- Peebles P J E. Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. *Astrophys J*, 1982, 263: L1
- Guth A H. The inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys Rev D*, 1981, 23: 347–356
- Mukhanov V F, Feldman H A, Brandenberger R H. Theory of cosmological perturbations. *Phys Rep*, 1992, 215: 203
- Cai Y F, Capozziello S, De Laurentis M, et al. $f(T)$ teleparallel gravity and cosmology. *Rep Prog Phys*, 2016, 79: 106901
- Cai Y F, Easson D A, Brandenberger R. Towards a nonsingular bouncing cosmology. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 1208: 020
- Chen J W, Li C H, Li Y B, et al. Primordial magnetic fields from gravitationally coupled electrodynamics in nonsingular bounce cosmology. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 100411
- Addazi A, Marcianò A. A new duality between topological M-theory and loop quantum gravity. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 120421
- Li H, Li S Y, Liu Y, et al. Probing primordial gravitational waves: Ali CMB polarization telescope. *Natl Sci Rev*, 2019, 6: 145–154
- Chen X, Fu C B, Galan J, et al. PandaX-III: Searching for neutrinoless double beta decay with high pressure ^{136}Xe gas time projection chambers. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2017, 60: 061011
- Wang L, Yue Q, Kang K J, et al. First results on ^{76}Ge neutrinoless double beta decay from CDEX-1 experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2017, 60: 071011

Summary for “宇宙环境新认知——有关 2019 年诺贝尔物理学奖的理解”

New perspectives of our universe—Thoughts about the 2019 Nobel Prize in Physics

Shengfeng Yan & Yifu Cai*

Department of Astronomy, School of Physical Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding author, E-mail: yifucai@ustc.edu.cn

The 2019 Nobel Prize was awarded to the research of exoplanets and cosmology in recognition of the discovery of astronomers Michel Mayor and Didier Queloz on the discovery of exoplanets and the outstanding contributions of theoretical cosmologist James Peebles to the establishment of the physical system of modern cosmology from a theoretical perspective. The reason given by the Nobel Committee is “for contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth’s place in the cosmos”. The scientists represented by the three of them provide important ideas on re-recognizing the relationship between ourselves and the universe in the framework of modern physics. On the one hand, it is important for humans to rethink whether the planet we live in is unique in the universe. It is very important for us to explore the outer world of livable planets and to find extraterrestrial life. On the other hand, we can accurately grasp the evolution of the universe. The historical context allows us to understand more clearly the past and present of this universe in which we live. Among the three scientists, experimental astronomer Meyer and Queloz discovered the Pegasus 51b, the first exoplanet discovered by human beings which run around the solar like star Pegasus 51; and theoretical cosmology Pebble has made a key theoretical contribution in the critical aspects of modern cosmology, such as Big Bang Nucleosynthesis, dark matter, cosmic microwave background (CMB) radiation and large-scale structure formation. He is the iconic leader in the era of precise cosmology.

These two fields with dramatic developments in both theoretical and experimental perspectives have shown their vitality in the past two or three decades. The study of exoplanet and extraterrestrial life has come to an explosive discovery with the development of technology in this century. After entering the new century, four Nobel prizes in physics have been awarded to the contributions in cosmology, namely the cosmic background detector satellite (COBE), the discovery of the accelerated expansion of the universe, the detection of gravitational waves, and the one just awarded, which have made physical cosmology a broad prospect for development. This article begins with the recent hot topic of the Nobel Prize in Physics in this year, and provides a general interpretation of the underlying physical meanings of the two major areas of exoplanet and cosmology. In this article we will begin with a brief introduction to Meyer and Queloz’s discovery in the research of exoplanets, the detection methods and development prospects of exoplanets, and then a brief history of the development of physical cosmology, which is widely regarded as the contribution of Peebles, and afterwards, a major research priority in current cosmology, namely the detection of the primordial gravitational waves. The authors wish that this article could attract more young scholars of the relevant interest to join the study of astronomy and cosmology, and to promote a more significant breakthrough in these fields under the trend of the new era.

the Nobel Prize in Physics, exoplanets, cosmology, primordial gravitational waves

doi: 10.1360/TB-2019-0752