

太阳系外行星的探测

——2019年诺贝尔物理学奖成果简析

马波

中山大学物理与天文学院, 广州 510275

摘要 James Peebles、Michel Mayor 和 Didier Queloz 3 位科学家分享了 2019 年诺贝尔物理学奖, 以表彰他们对宇宙学和系外行星的发现做出的贡献。介绍了 Mayor 和 Queloz 两位诺贝尔物理学奖获得者的学术经历, 简述了系外行星领域的发展及现状, 解读了太阳系外行星首次发现的科学意义, 论述了视向速度法探测系外行星的原理和发展过程, 介绍了该领域在中国的研究进展, 并对未来进行了展望。

关键词 诺贝尔物理学奖; 太阳系外行星; 宇宙学

2019 年 10 月 8 日, 瑞典皇家科学院宣布, 将 2019 年诺贝尔物理学奖授予 3 名科学家(图 1)。

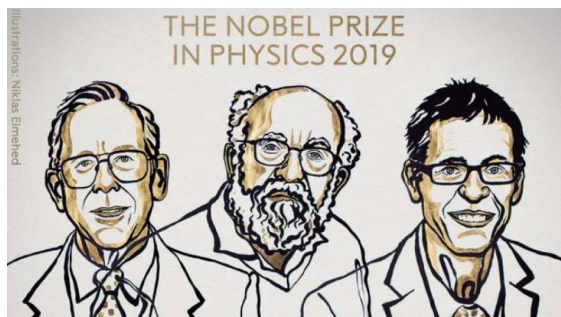


图 1 2019 年诺贝尔物理学奖获得者(从左至右分别为 James Peebles、Michel Mayor 与 Didier Queloz)

Fig. 1 Winners of the Nobel Prize in Physics 2019

来自瑞士的 Michel Mayor 和 Didier Queloz 因首次发现围绕类太阳恒星运转的太阳系外行星获奖, 来自美国的 James Peebles 因宇宙学相关研究获奖。诺贝尔奖委员会的颁奖理由是, 这 3 位科学家“对认识整个宇宙的演化和理解地球在宇宙中的地位”做出了极为突出的贡献。

1 2019 年诺贝尔物理学奖获得者

Michel Mayor 是瑞士天体物理学家, 1942 年 1 月 12 日出生于瑞士洛桑(Lausanne), 1971 年在日内瓦大学获得博士学位(论文题目是《研究银河系的旋臂结构》)。1971—1984 年在日内瓦天文台

收稿日期: 2019-11-05; 修回日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金项目(U1931102); 中山大学“百人计划”项目

作者简介: 马波, 副教授, 研究方向为太阳系外行星系统探测, 电子信箱: mabo8@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 马波. 太阳系外行星的探测——2019 年诺贝尔物理学奖成果简析[J]. 科技导报, 2019, 37(24): 30-35; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.24.004

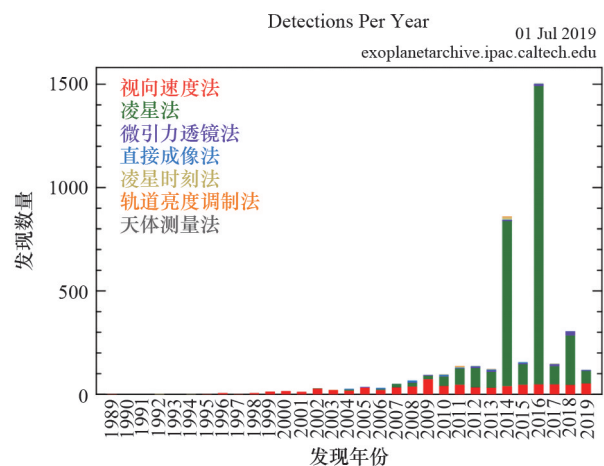
(归属于日内瓦大学天文系)做研究助理,1984—1987年任副教授,1988—2007年任日内瓦大学正教授。2007年,从日内瓦大学退休,但仍活跃于日内瓦天文台的研究一线,频繁出席系外行星研究相关的国际会议。Mayor的一生都致力于制作高色散光谱仪,使用视向速度法探测双星系统和太阳系外行星系统。他曾经参与了COREVAL、ELODIE和HARPS这3个科学成果丰硕的天文光谱仪的研发制作和观测使用项目,发现了一大批的双星和太阳系外行星系统,包括第1颗围绕类太阳恒星运转的太阳系外行星51 Pegasi b(飞马座51b)^[1]。从20世纪80年代以来,Mayor研究小组在制作光谱仪和测量恒星的视向速度方面始终处于世界领先地位。

Didier Queloz是瑞士天体物理学家,1966年2月23日出生于瑞士,1995年在日内瓦大学获得博士学位,指导老师正是Michel Mayor。2003年开始在日内瓦大学任教,2008年获得日内瓦大学正教授职位,2013年在英国剑桥大学卡文迪许实验室兼职正教授。Queloz的研究生涯比较特殊,在跟随Mayor做博士生研究时,一起使用他们团队制作的名为ELODIE的光谱仪,发现了第1颗围绕类太阳恒星运转的系外行星51 Pegasi b。他的第1篇学术论文发表在《Nature》杂志上,并获得了诺贝尔奖,这是他博士毕业前发表的唯一一篇论文,也是他目前引用率最高的文章。正因如此,他本人在接受采访时曾经开玩笑说:“我的学术生涯一直在走下坡路。”目前Queloz正在领导一些地面和空间的系外行星搜寻项目,使用的方法包括视向速度法(radial velocity, RV)、凌星(transit)法和天体测量(astrometry)法,寻找宇宙中的生命。

2 太阳系外行星

太阳系外行星泛指在太阳系之外发现的行星系统,通常简称为系外行星(exoplanet)。20世纪90年代初,不时有“太阳系外行星被发现”的消息传出。特别是1995年瑞士天文学家Mayor和他的学生Queloz在类太阳恒星周围发现了一颗木星大小的行星51 Pegasi b^[1]。该发现拉开了探索太阳系外

行星的序幕。此后几乎每年都有新的系外行星被发现。发现频率从每年的1颗、数十颗到近年的几百颗(图2)。截至2019年11月底,发现并证认的系外行星数量超过4100颗^[2-4]。探测系外行星的方法主要有视向速度法、凌星法、微引力透镜法、直接成像法、凌星时刻法、轨道亮度调制法以及天体测量法。其中视向速度法和凌星法是目前效率最高、最流行的方法。毫不夸张的说,Mayor和Queloz开创了整个系外行星研究领域。



注:不同颜色表示不同的探测方法

图2 系外行星每年的发现数量

Fig. 2 Number of exoplanets discovered each year

与太阳系内的行星相比,很多系外行星系统都是异类。如51 Pegasi b就是一个典型的异类。它是一颗类木行星,但它与主星的距离只有地球距离太阳的1/20,所以表面很热,被称为热木星。之后的研究发现热木行星其实是稀少的(每200颗类太阳恒星周围只有1颗左右),因此并没有颠覆太阳系行星在人们对行星认识上的传统标准地位。然而,最近美国航空航天局的Kepler系外行星探测计划却大批量地发现了太阳系内不存在的短周期的超级地球,几乎每两颗类太阳恒星周围就有一颗这样的超级地球^[5-6]。以至于人们开始疑惑:难道太阳系中的行星才是异类?

目前系外行星领域的热门研究方向有:(1)类地宜居行星(地球2.0)的搜寻;(2)系外行星内部

结构和大气成分的研究;(3) 系外行星系统的形成演化研究;(4) 双星或多恒星系统中的行星形成和演化研究。

3 视向速度法探测系外行星

行星和恒星都在围绕它们的公共质心转动,只不过恒星的运转轨道要小得多。通过探测恒星本身相对于地球观测者的视向速度的周期性变化,就可以间接推测出围绕其公转的行星的轨道。恒星的视向速度可以通过测量其发出的可见光和近红外光谱的谱线波长变化(多普勒-斐索效应)得到。恒星谱线波长变长(红移)说明恒星正在远离观测者,波长变短说明恒星在朝向观测者运动。由于质量大且轨道周期小的行星能产生强度和频率大的视向速度信号,因此这种观测方法对短周期的大质量行星非常有效(图3)。这正是 Mayor 和 Queloz 发现的第 1 颗系外行星是一颗“热木星”(周期短,质量大)的原因。

因为视向速度法无法判断行星公转轨道平面相对于地球观测者视线方向的倾角,所以视向速度法只能估计行星的最小质量;假若行星的轨道平面接近垂直于地球观测者的视线方向,行星的真实质量会更大。无法确定行星的真实质量是视向速度法的一个主要缺点。

传统的天文学属于观测科学,需要相应的观测仪器支持,系外行星探测也不例外。使用视向速度法探测系外行星在可查的文献中最早由 Otto Struve^[7]提出,但是由于技术上的限制,一直未能成功^[8]。因为恒星围绕系统质心运转的轨道半长径较短,其相对于质心的周期性运动速度也非常低(从 10 cm/s 到几十 m/s),需要现代的高精度视向速度光谱仪才能测量。而现代高精度光谱仪的诞生与 CCD(电荷耦合器件)探测器的出现、计算机性能的提高以及数据存储空间的增大这些人类历史上重大的科技进步都密不可分。Mayor 小组能拿到诺贝尔奖,也正是因为他们掌握了制造高精度视向速度光谱仪的核心技术。

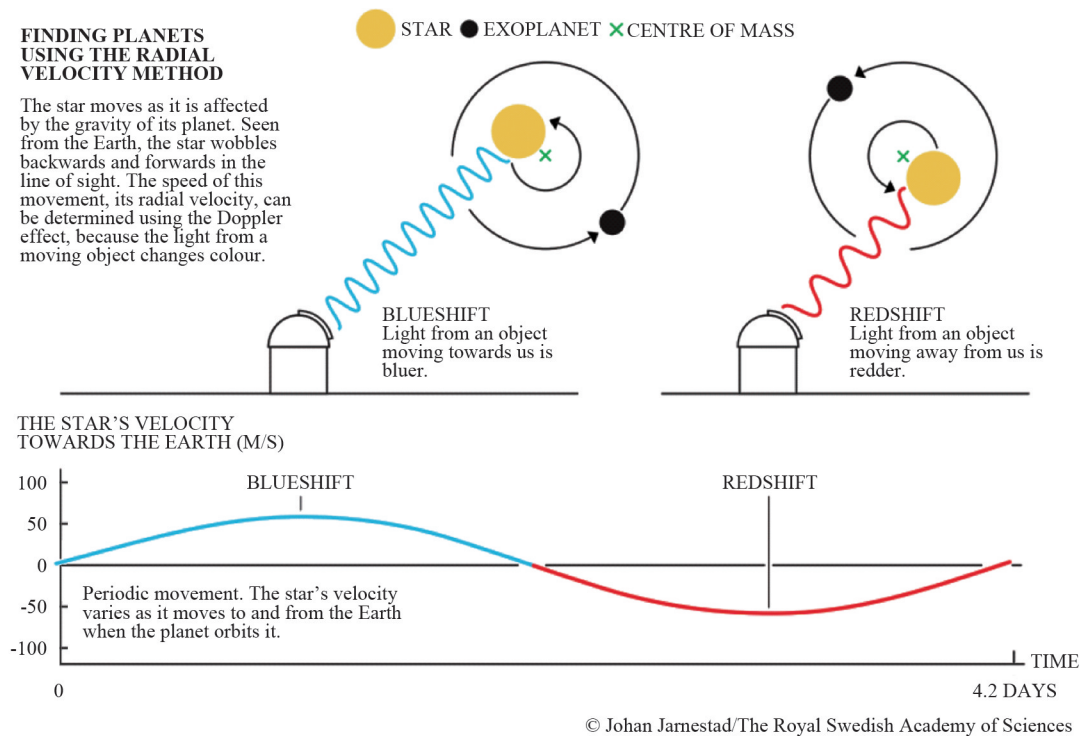


图3 视向速度法探测系外行星示意

Fig. 3 Schematic diagram of detecting exoplanets with radial velocity method

Mayor 和 Queloz 发现第 1 颗系外行星使用的是一台位于法国普罗旺斯(OHP)天文台的光谱仪,名为 ELODIE^[9]。在 ELODIE 之前,普罗旺斯天文台还拥有一台名为 CORAVEL 的光谱仪,也是由 Mayor 小组研制的,主要利用视向速度法做一些双星系统的研究工作,由此 Mayor 小组和 OHP 天文台建立了紧密的合作关系。当 Mayor 发现 OHP 天文台有一半的夜间时间因为明亮的月光背景污染而无法观测暗弱的天文目标时,便提出了建造一台新的高分辨率光谱仪,用视向速度法搜寻围绕明亮恒星运转的系外行星。这台新的光谱仪就是 ELODIE,其光学设计是由马赛天文台的 Andre Baranne 负责^[10]。整个光谱仪的制造在普罗旺斯天文台进行,其中大多数参与者都是 Mayor 研究小组的成员,也有一部分是普罗旺斯天文台的工作人员。所以这台光谱仪是 Mayor 小组和普罗旺斯天文台合作的结晶。Queloz 在普罗旺斯天文台度过了他大部分的博士生研究生涯,负责测试仪器硬件,包括用来做波长定标的钷氙灯、CCD 探测器和光纤等部件。Mayor 和 Queloz 拥有大量的天文台观测时间,并且 ELODIE 可以得到优于 10 m/s 的视向速度精度,足以发现后来称为“热木星”的系外行星系统,包括 51 Pegasi b,所以他们之后的大发现也顺理成章。

当 Queloz 在普罗旺斯天文台找到 51 Pegasi b 的信号并且确信自己的观测结果无误后,Mayor 正好在夏威夷进行学术休假。Queloz 通过传真把这个发现告诉了自己的导师(当时还没有电子邮件)。他们一起检查了整个数据处理过程,确信结果正确之后,于 1995 年 10 月向全世界公布了这个大发现。当时大部分天文同行都怀疑该结果的真实性。和他们处于竞争关系的美国加州大学教授 Marcy 后来也承认,他看到这个结果后觉得 Mayor 和 Queloz 是在行骗,因为这个发现实在是太奇异了,超乎了所有人的想象,包括科幻作家。这也正是科学的魅力所在,每隔几年,总有科学同行能发现一些前人意想不到的新东西。但是 Marcy 和他的博士后 Paul Butler(Marcy 曾经的硕士生)当时刚好获得了宝贵的美国加州 Lick 天文台 3 米望远镜的 4 个晚上的观测时间,从当年 10 月 11 日晚上持

续到 10 月 15 日早上。两人每天晚上都观测 51 Pegasi 这颗恒星数次,在观测结束回到伯克利,处理完 4 个晚上所有的光谱仪数据之后,把观测结果发到了当时刚兴起的互联网上,证实了 Mayor 和 Queloz 的发现,宣告了系外行星研究领域的诞生。

Marcy 团队在搜索系外行星领域实际上要早 Mayor 团队 2 年^[11-13],但是因为搜寻策略(他们正在尝试搜寻周期为 12 年的“系外木星”,而不是周期 4 天的“热木星”)和经费支持(当时尚没有“系外行星”这一研究领域,研究组没有经费购买更多的计算机处理观测数据,他们当时拥有的观测数据需要几年的时间才能处理完)问题,与第 1 颗系外行星的发现失之交臂。之后系外行星探测就进入了一个“冷战”时代,欧洲日内瓦大学 Mayor 团队和美国加州大学 Marcy 团队都依靠视向速度法,发现了几百颗系外行星。Marcy 曾经也是诺贝尔物理学奖的有力竞争者,但是在 2015 年因违反了学校的性骚扰政策而被辞退。Butler 后来去了位于美国华盛顿的卡耐基研究所工作,继续他的系外行星探测研究。

在 ELODIE 之前,Mayor 小组的 CORAVEL 光谱仪只能得到 50~100 m/s 的视向速度精度,尚不足以发现系外行星。ELODIE 之后,Mayor 研究小组又成功地研制出了一台名为 HAPRS 的光谱仪,将视向速度精度提高,优于 1 m/s^[14]。目前世界上精度最高的视向速度光谱仪,大部分都是 Mayor 领导的日内瓦大学行星小组制造的,包括 HARPS、HARPS-N、HAPRS-III 和 ESPRESO^[14-15]。在美国,也存在一些和 Mayor 小组竞争的仪器,包括美国加州大学系统研制的 Keck-HIRES、Lick-APF,美国佛罗里达大学制作的 TOU^[13,16-18],美国宾州州立大学制作的 WIYN-NEID。中国的一些科研单位也在研制更高精度的视向速度光谱仪,包括中国科学院国家天文台、中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所以及中山大学物理与天文学院。

在系外行星探测领域,随着美国 Kepler 卫星项目的巨大成功^[5],视向速度法开始逐渐被凌星法取代,从老大哥的位置跌到了第 2 重要的位置。但是

视向速度法仍然有它的不可或缺性,例如获得凌星行星的质量,以及探索一批距离太阳系最近的系外行星系统。世界各国科学家都在追求寻找距离地球最近的一批宜居系外行星系统。要达到这个科学目标,视向速度法当前尚存在一些技术瓶颈,包括光谱波长的定标精度、恒星自身的活动噪声、天光线的去除等。学界已经提出了各种各样的技术方法和数据处理方法来尝试克服这些技术瓶颈。可以相信,在不久的将来,随着以上瓶颈的突破,视向速度法还将在系外行星探测领域发挥重要作用。

4 中国相关研究进展

国内目前尚没有能够与国外高精度光谱仪竞争的设备,中国科学院国家天文台兴隆观测站 2.16 米光学天文望远镜的光谱仪以及中国科学院云南天文台丽江观测站的 LiJET 光谱仪,在性能上都要略逊一筹。两个天文台都有团队在继续努力调试和完善这两台光谱仪设备。位于上海的中国极地研究中心周宏岩、姜鹏,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所张凯、李正阳团队,南京大学谢基伟,中国科学院云南天文台常亮,中山大学马波团队正倡议在南极中山站修建一座 1.5 米的光学望远镜,配备一台高分辨率光谱仪进行太阳系外行星的探测和研究。这将会是世界上第 1 台在南极运转的天文高分辨率光谱仪,具有重要的科学意义。此外,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所还计划为世界上最大的光学望远镜——位于西班牙加纳利群岛的 GTC,修建一台高分辨率光谱仪,进行太阳系外行星研究。中国未来的 12 米光学红外望远镜 LOT,也将拥有自己的高分辨光谱仪,进行系外行星研究。

从更广的研究方法看,中国科学院国家天文台赵刚团队、周旭团队与王炜团队,中国科学院紫金山天文台季江辉团队,中国科学院上海天文台沈志强与葛健团队,中国科学院云南天文台常亮团队、郭建恒团队与顾胜宏团队,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所窦江培团队、张凯团队与李正阳团队,南京大学周济林、谢基伟、张辉与刘慧

根团队,清华大学毛淑德团队,北京大学东苏勃团队,北京师范大学付建宁团队,中山大学崔俊、余聪、马波、刘尚飞、高扬、张泳团队,澳门科技大学田丰研究团队等,都在理论和观测上积极推进太阳系外行星研究,也独立提出了几个中国的太阳系外行星探测研究空间计划,包含中国空间站巡天望远镜计划、STEP 计划、觅音计划、Earth2.0 计划、4 米空间望远镜计划、子母星计划与紫瞳计划等,很多项目都是独辟蹊径,勇于创新。如能成功,对中国和世界系外行星领域都将有巨大贡献。

5 展望

系外行星研究,一个 20 多年前还不存在的天文学科方向,一个被认为属于科学“幻想”而不是科学研究的领域,迅速成长为天文学领域的主要研究方向之一。美国和欧洲未来 15 年要发射的空间天文观测卫星中,系外行星研究卫星几乎占了“半壁江山”,包括 CHEOPS、JWST、PLATO、ARIEL、WFIRST、LUVOIR 和 HaBEX 等空间计划。这个新兴领域成长如此迅速,开山鼻祖 Mayor 和 Queloz 功不可没。

作为天文学最年轻的分支研究科学,太阳系外行星研究方兴未艾,有一大批新的空间望远镜和地面望远镜设备已经把系外行星列为未来 10~20 年主要的科学研究目标。从这个角度讲,中国对系外行星研究的投入还很小。但值得欣慰的是,中国科学院国家空间科学中心已经把发射一颗太阳系外行星研究卫星作为未来 5 年的重要工作计划之一,“觅音”计划得到了国家领导人的关心。国际上现在已有海量的天文公开数据可以用来进行系外行星研究。建议国家自然科学基金委员会把“太阳系外行星”作为一个单独的学科子方向,独立列在天文学科代码之下,与宇宙学、星系和类星体、恒星与星际物质、太阳和太阳系、天体基本物理过程、天体测量和天文地球动力学、天体力学和人造卫星动力学、天文技术和方法、天文学史等作为平行研究方向,并在太阳系外行星学科下分设系外行星探测方法、系外行星大气研究、系外行星内部结构、系外行

星形成理论、原行星盘研究等子研究方向,充分发挥国家自然科学基金指挥棒的作用,鼓励更多的天文学家参与太阳系外行星的研究。

参考文献(References)

- [1] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, 378(6555): 355-359.
- [2] NASA exoplanet archive[EB/OL]. [2019-10-20]. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.
- [3] Wright J T, Fakhouri O, Marcy G W, et al. The exoplanet orbit database[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2011, 123: 412-422.
- [4] Howard A W, Marcy G W, Bryson S T, et al. Planet occurrence within 0.25 AU of solar-type stars from Kepler [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 201(Suppl): 15.
- [5] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 977-980.
- [6] Borucki W J, Koch D G, Basri G, et al. Characteristics of planetary candidates observed by Kepler, II: Analysis of the first four months of data[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 736(1): 19.
- [7] Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work[J]. *The Observatory* 1952, 72: 199-200.
- [8] Griffin. On the possibility of determining stellar radial velocities to 0.01 km s^{-1} [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1973, 162(3): 243-253.
- [9] Ilovaisky S A. A user's guide to Elodie archive data products[EB/OL]. [2019-10-20]. <http://www.obs-hp.fr/www/archive/elodie-for-dummies.html>.
- [10] Baranne A, Mayor M, Poncet J L. Coravel— A new tool for radial velocity measurements[J]. *Vistas in Astronomy*. 1979, 23: 279-316.
- [11] Marcy G W, Butler R P. Precision radial velocities with an iodine absorption cell[J]. *Publications of The Astronomical Society of The Pacific*, 1992, 104: 270-277.
- [12] Butler R P, Marcy G W, Williams E, et al. Attaining doppler precision of 3 m s^{-1} [J]. *Publications of The Astronomical Society of The Pacific*, 1996, 108: 500-509.
- [13] Vogt S S, Allen S L, Bigelow B C, et al. HIRES: The high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2198: 362-375.
- [14] Mayor M, Pepe F, Queloz D, et al. Setting new standards with HARPS[J]. *ESO Messenger*, 2003, 114: 20.
- [15] Pepe F A, Cristiani S, Lopez R R, et al. ESPRESSO: The Echelle spectrograph for rocky exoplanets and stable spectroscopic observations[J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Doi: 10.1117/12.857122.
- [16] Ma B, Ge J, Muterspaugh M, et al. The first super-Earth detection from Dharma Planet Survey[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 480(2): 2411-2422.
- [17] Schwab C, Rakich A, Gong Q, et al. Design of NEID, an extreme precision Doppler spectrograph for WIYN[EB/OL]. [2019-10-20]. <https://doi.org/10.1117/12.2234411>.
- [18] Vogt S S, Radovan M, Kibrick R, et al. APF: The Lick Observatory Automated Planet Finder[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2014, 126: 359.

Exploration of an Exoplanet: Commentary on the Nobel Prize in Physics 2019

MA Bo

School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract A half of the Nobel Prize in Physics 2019 was awarded jointly to Michel Mayor and Didier Queloz for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star. In this paper we review the academic achievements of these two scientists, the scientific significance of this important discovery, and the future development of this research area in China.

Keywords Nobel Prize in Physics; exoplanet; cosmology ●



(责任编辑 傅雪)