

寻找太阳系外行星 ——2019年诺贝尔物理学奖成果简析

胡永云

北京大学物理学院大气与海洋科学系,北京 100871

摘要 2019年诺贝尔物理学奖授予了3位天文学家——James Peebles、Michel Mayor和Didier Queloz,以表彰他们在宇宙演化理论和太阳系外行星(系外行星)发现中做出的开创性贡献。本文评述Michel Mayor和Didier Queloz发现太阳系外行星的成果,简述系外行星研究的最新进展,展示系外行星的多样性及其对经典太阳系形成模型的挑战,探讨系外宜居行星的条件,并展望系外生命探测。

关键词 2019年诺贝尔物理学奖;太阳系外行星;宜居行星;系外生命;行星科学

2019年10月8日,瑞典皇家科学院诺贝尔委员会宣布将2019年诺贝尔物理学奖授予3位天文学家——James Peebles、Michel Mayor和Didier Queloz(图1)^[1],以表彰他们在宇宙演化理论和系外行星探测领域所做出的开创性贡献。3位获奖者的研究方向并不相同,Peebles的研究方向是宇宙演化理论,分享50%诺贝尔奖金,Mayor和Queloz的研究方向是系外行星探测,共同分享另外50%的诺贝尔奖金。本文介绍Mayor和Queloz系外行星发现方面的成果。其实,早在2013年,Mayor和Queloz获诺贝尔奖的呼声就很高,但2013年希格斯-波色粒子的存在被实验证实,风头正劲,因此,当年诺贝尔物理学奖颁发给了希格斯-波色粒子理论和实验团队。

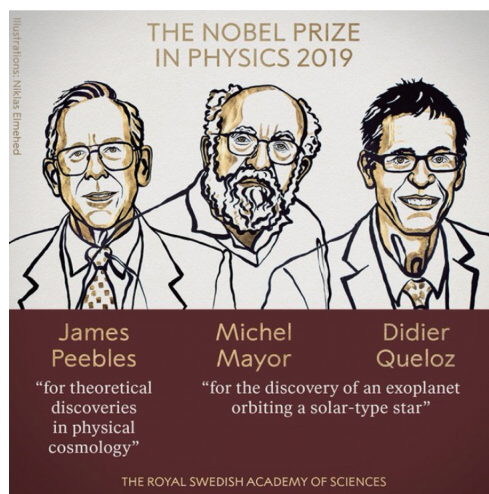


图1 2019年诺贝尔物理学奖获得者

Fig. 1 3 astronomers that share 2019 Nobel Prize for physics

收稿日期:2019-11-15;修回日期:2019-12-04

作者简介:胡永云,教授,研究方向为现代气候、深时古气候与行星气候,电子信箱:yyhu@pku.edu.cn

引用格式:胡永云. 寻找太阳系外行星——2019年诺贝尔物理学奖成果简析[J]. 科技导报, 2019, 37(24): 23-29; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.24.003

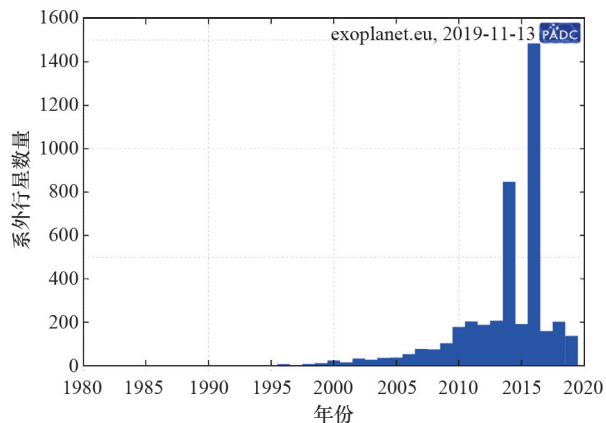
1 系外行星的发现

1995年, Mayor和Queloz在《Nature》杂志发表论文, 报道他们在飞马座一颗类太阳恒星附近发现了一颗类木星行星^[2], 编号为51 Pegasi b。51 Pegasi b是一个气态星球, 其质量大约是太阳系木星质量的一半, 距离其恒星只有0.05个天文单位(AU, 1 AU是地球与太阳之间的距离, 等于 1.496×10^8 km), 公转周期约4.2天(地球日)。因为51 Pegasi b距离其恒星非常近, 其表面温度大约为1000℃, 所以, 它的体积大约是木星的2倍。相对于太阳系木星-140℃的温度, 51 Pegasi b是很热的类木行星, 这类行星通常被称为热木星。

事实上, Mayor和Queloz在发表论文时, 并没有把51 Pegasi b称为行星(planet), 在他们的论文题目中, 把51 Pegasi b称为伴星(companion)^[2]。他们甚至认为51 Pegasi b也有可能是一颗褐矮星。根据传统的太阳系形成模型, 一颗木星大小的行星是不可能是在恒星附近形成的。木星与太阳之间的距离是5 AU, 而51 Pegasi b距离其恒星只有0.05 AU, 因此, 在当时很难想象51 Pegasi b是一颗行星。这既反映了两位学者的谨慎, 也反映出一个研究领域的突破需要首先突破传统的观念。

Mayor和Queloz并不是系外行星的首次发现者, 诺贝尔物理学奖委员会给出的获奖评语是: “因为发现了一颗围绕类太阳恒星运动的系外行星”(for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star)^[1], 并没有说两位获奖人是首次发现了系外行星。这是因为在51 Pegasi b被发现之前, 已有系外行星被发现。1992年, 在一颗脉冲星附近探测到2颗系外行星^[3], 其质量与地球相当。但脉冲星是一种死亡的恒星, 其发射的能量不足以使周围的行星维持宜居状态。因此, 人们对脉冲星周围的行星并不感兴趣, 感兴趣是主序星周围的行星。Mayor和Queloz发现的是一颗围绕类太阳恒星运动的行星, 因此, 虽然Mayor和Queloz并不是系外行星的首次发现者, 但诺贝尔物理学奖委员会仍决定将物理学奖授予他们。

Mayor和Queloz的发现揭开了系外行星探测的序幕。1995年以来, 系外行星研究已成为天文和行星科学的一个热点领域。截至2019年11月13日, 已有4130颗系外行星被确认, 图2给出了历年确认的系外行星数目。需特别指出的是, 根据凌星法原理设计的开普勒空间望远镜贡献最大^[4], 共发现了2734颗系外行星, 并且, 在开普勒望远镜留下的观测资料中, 还有大量候选系外行星有待确认。



数据来源: The Extrasolar Planets Encyclopaedia,
截至2019年11月13日

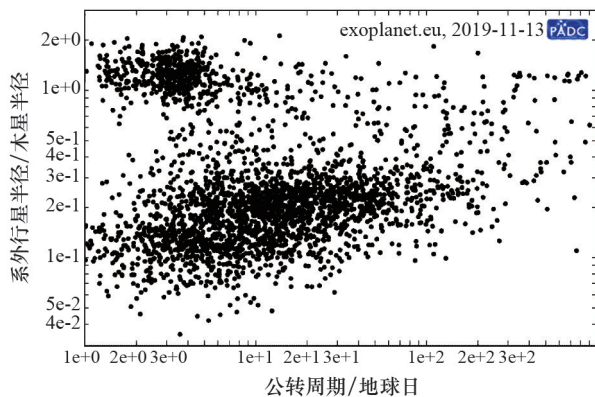
图2 历年所确认的系外行星数量

Fig. 2 Numbers of exoplanets discovered in the past few decades

Mayor和Queloz关于系外行星的发现是划时代的, 引领了天文学领域的一个重要研究方向, 获得诺贝尔奖毫无疑问是实至名归的。但回首24年前, 他们的研究方向却并非是天文学领域的热门或者主流方向。那时, 天文学的主流方向是宇宙学、黑洞、暗物质、星系的形成等, 而传统的恒星和行星系统观测已不是天文的热点, 是他们的坚守迎来了成功。系外行星探测与2017年获得诺贝尔物理学奖的引力波观测非常类似, 在成功之前经历了长期的沉寂, 几乎没有重要进展可言, 特别需要学者执着的坚持。幸运的是, 他们都坚持了下来。Mayor和Queloz的获奖再一次证实, 最原创的科研成果并不一定来自本领域的热门方向, 需要学者不懈的努力和甘坐冷板凳的坚守。

2 系外行星的多样性

目前确认的4000多颗系外行星展示了丰富的多样性,它们从根本上改变了我们对行星的形成、运动轨道、构成成分和演化过程的认识。图3是系外行星半径-公转周期分布图。其中,绝大多数系外行星的半径超过地球半径(6370 km),而且公转周期绝大多数在100天之内,说明距离恒星很近的行星不在少数。图3中,系外行星主要集中在2个区域,这与探测方法有关,而非行星的物理属性有倾向性。左上角的系外行星是质量和半径较大的行星,主要是由视向速度法发现的,视向速度法更适合发现大质量行星。左下角密集区的行星主要是通过凌星法发现的,凌星法更适合发现距离恒星较近的行星。



数据来源: The Extrasolar Planets Encyclopaedia,
截至2019年11月13日

图3 2971颗系外行星半径-公转周期分布

Fig. 3 Radius-orbital period distribution of 2971 exoplanets

系外行星的偏心率是多样性的。在太阳系,8颗行星的偏心率都不大,最大的是水星,偏心率约为0.2,其他行星的偏心率都小于0.1,也就是说,太阳系行星的轨道都倾向于圆形。但探测到的系外行星偏心率最大可达0.96,公转轨道是椭圆形的。

不仅系外行星的半径和轨道具有多样性,其物理属性也具有丰富的多样性。目前已发现大量表面温度超过1000℃的热木星,其中温度最高的热木星 KELT 9b^[5],表面温度达4327℃。这一方面是因

为 KELT 9b 距离其恒星非常近,公转周期只有1.5天。另一方面,其恒星辐射温度比太阳高得多,达9897℃(太阳的辐射温度是5600℃)。

TrES 2b是目前所知的最黑的行星,也是一颗热木星^[6]。这颗热木星最为特殊的特征是表面反照率极低,小于0.01(地球的反照率是0.3,木星的反照率是0.34,金星的反照率是0.78)。这意味着 TrES 2b 的大气成分是由吸收性很强的物质所组成,比黑炭的吸收性能还要强得多。目前,科学家还不清楚 TrES 2b 的大气的化学成分。

55 Cancri e 是一个富含碳的固态星球^[7],质量约为地球的9倍,表面温度高达2149℃。钻石是碳在高温高压下的产物,因此,发现者推测该行星可能由钻石组成。在如此高温下,其表面大部分岩石都将熔化,形成岩浆海洋。

GJ 1214b 被认为是一颗海洋行星^[8],质量大约是地球的6.5倍,由于其密度接近水的密度,被认为是一颗主要由水分组成的行星,海洋深度可达5000~10000 km, GJ 1214b 的表面温度约为200℃。如果 GJ 1214b 确实是一颗海洋行星,则其大气主要由浓密的水汽组成。

3 重新审视太阳系模型

系外行星的多样性需要我们重新审视太阳系形成的经典模型。根据经典的太阳系形成模型^[9-10],8颗行星的形成及其现在所处的位置在太阳系形成之初就已确定了。经典模型还解释了为什么在太阳系内围是4颗固态行星,而在外围则是4颗气态行星。太阳系模型认为,在距离太阳较近的区域,由于温度较高,易挥发组分(例如水、甲烷、氨等)很难存在,主要以岩石类金属元素为主,这些成分逐步汇集形成了内围的4颗固态行星;而在外围,温度相对较低,易挥发组分以固态形式存在,形成气态星球的内核,这些内核物质的质量快速增长,不断吸引周围分子量较小的气体(如氢和氦),从而形成巨型气态星球。经典模型还解释了,行星的质量先是随着与太阳距离的增加而增加,在木星的位置达最大,再随着与太阳距离的增加而减小。

但系外行星显然并不遵循这样的规律。首先,很多热木星距离其母星很近,这与经典太阳系形成模型有冲突。为什么这么多的热木星距离其恒星这么近,这是关乎一个恒星系统形成的关键问题。1996年,轨道迁移理论被提出来解释为什么 51 Pegasi b 距离其恒星这么近^[11]。轨道迁移理论认为,由于气态巨行星与系统内其他行星的相互作用,气态巨行星会向内侧迁移,停留在距离恒星很近的位置。

轨道迁移现象有很大可能性在太阳系发生过。根据对月球、水星、火星等的陨石坑观察,科学家提出,在大约 41 亿~38 亿年前,这些行星和卫星都曾经经历过小星体的密集撞击,该现象被称为晚期重轰击 (late heavy bombardment)^[12]。根据地质记录,科学家推测晚期重轰击也在地球上发生过^[13],并提出晚期重轰击事件是木星轨道迁移造成的,这便是尼斯模型^[14]。根据尼斯模型,木星向外的轨道迁移导致了大量小星体向太阳系内围移动,从而导致了 41 亿~38 亿年前的晚期重轰击事件。轨道迁移理论还有助于解释地球水分的来源。传统观点认为,地球的水分是地球形成时就具有的。最新的观点认为,至少部分地球水分是晚期重轰击期间由于彗星带来的。因为彗星是富含水的星体,当其撞击地球时,带来了大量水分。因此,系外行星的发现对经典太阳系模型形成了巨大的挑战^[15]。

4 宜居行星

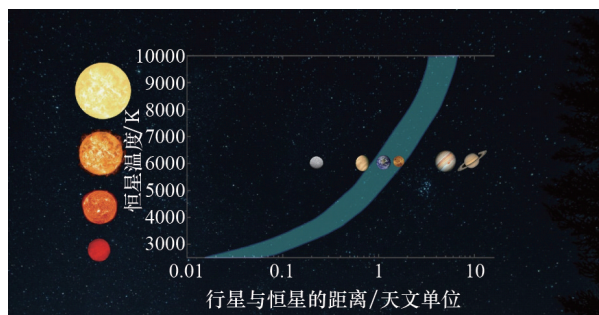
宜居行星是指适宜类地生命存在的行星。类地生命存在需要许多条件,液态水被认为是首要条件,没有液态水存在,其他条件都无从谈起。液态水存在的温度范围是 0~100℃。但实际上,液态水在行星表面存在的条件更为苛刻。研究表明,当行星的表面温度超过 80℃,行星将进入温室逃逸状态^[16],大气永远不会饱和,直至液态水完全蒸发,并被光解。因此,保证液态水存在的条件是

$$0^{\circ}\text{C} < T_s < 80^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

式中, T_s 是全球平均行星表面温度。

式(1)定义的温度范围实际上对应着恒星周围

的一个带状区域,只有当行星位于该带状区域之内时,其表面温度才能够维持液态水存在。如果距离其恒星太远,行星将进入全冰封状态;如果距离恒星太近,行星则将进入温室逃逸状态。该带状区域通常被称为恒星的宜居带^[17-18],也被称为液态水带。图4是根据式(1)所定义的宜居带示意图。对于类太阳恒星而言,宜居带位于 1 AU 附近。地球基本位于太阳宜居带的中央,金星超出了宜居带的范围,而火星则位于太阳宜居带外侧的边缘。红矮星的辐射温度只有 3000 K 左右,因此,其宜居带位于 0.1 AU 的地方。



注:图中蓝色带状区域为不同类型恒星的宜居带

图4 恒星宜居带示意

Fig. 4 Schematic diagram of the habitable zone

宜居行星的另一个判据是行星的质量,较为宽松的判据是

$$0.1M_E < M < 10M_E \quad (2)$$

式中, M 是行星质量, M_E 是地球质量。

稍微保守的判据是

$$0.2M_E < M < 5M_E \quad (3)$$

如果一颗行星的质量大于地球的 10 倍,这颗行星很可能是气态行星,如海王星、木星。另一方面,如果行星的质量小于地球质量的 10%,该行星很可能无法吸附足够厚的大气层。例如,火星质量只是地球的 11%,不足以吸附较厚的大气层,火星大气压只有 6 hPa,不足地球大气压的 1%。

根据判据式(1)和(2),在目前所发现的 4000 多颗系外行星中,可能宜居的行星只有 10 多颗(表 1)。距离地球最近的可能宜居行星是 Proxima Centauri b^[19],位于约 4.2 光年外,它的质量约是地球

的1.3倍。在大气成分与地球大气相似的情况下,朝阳面最高温度约为300 K。唯一围绕类太阳恒星的是Kepler 452 b,被称为“地球的表兄”“第二个地球”等,距离地球约1400光年。在大气成分与地球相当条件下,Kepler 452 b的全球平均温度约为293 K^[20],比地球的全球平均温度(288 K)高5 K。

表1 目前所现的可能宜居的系外行星

Table 1 List of potentially habitable exoplanets.

| 系外宜居行星名称 | 与地球的距离/光年 | 恒星类型 |
|--------------------|-----------|-------|
| Proxima Centauri b | 4.2 | 红矮星 |
| GJ 667C e | 22 | 红矮星 |
| GJ 667C f | 22 | 红矮星 |
| TRAPPIST-1 e | 39 | 红矮星 |
| TRAPPIST-1 f | 39 | 红矮星 |
| TRAPPIST-1 g | 39 | 红矮星 |
| Kepler 186f | 561 | 红矮星 |
| Kepler 1229b | 770 | 红矮星 |
| Kepler 442b | 1115 | 红矮星 |
| Kepler 452b | 1400 | 类太阳恒星 |
| Kepler 62f | 1200 | 红矮星 |

从表1可以看出,绝大多数宜居行星都是围绕红矮星运行的行星,这有两方面原因。首先,宇宙中红矮星的数量最多,占恒星总数的80%^[21],所以,红矮星附近的宜居行星数目要远超过其他类型恒星附近的宜居行星数目。其次,红矮星附近的宜居行星距离恒星较近,更容易被探测到。

5 系外生命探测

目前,虽然人造卫星的分辨率已高到可以直接观测地球表面的人类活动和植被分布,但是,这些卫星距离地球只有数百千米。如果把这些卫星移动到几光年以外的位置,它们仅能观测到一个像素的地球信号。因此,探测生命信号只能通过间接方法,直接探测是很难想象的。

探测系外生命的思路是观测系外行星大气中与生命过程有关的气体成分^[22-23]。例如,在地球上, O_2 是生命光合作用产生的气体,又是动物呼吸所需要的; O_3 是氧气的副产品,也是屏蔽太阳紫外

辐射所需要的气体;甲烷(CH_4)是通过植物腐烂(氧化)而产生的; N_2O 也是通过生命过程产生的。这些气体都可以视为生命存在的表征。图5给出了这些气体的吸收谱^[24]。 O_2 在0.7 μm 附近有吸收线, O_3 在近红外和红外部分有吸收线,尤其在9.6 μm 有很强的吸收带, N_2O 和 CH_4 在近红外和红外波段均有吸收带。如果我们能够在位于宜居带固态行星大气中探测到这些气体,就大致可以确定该行星是宜居的。

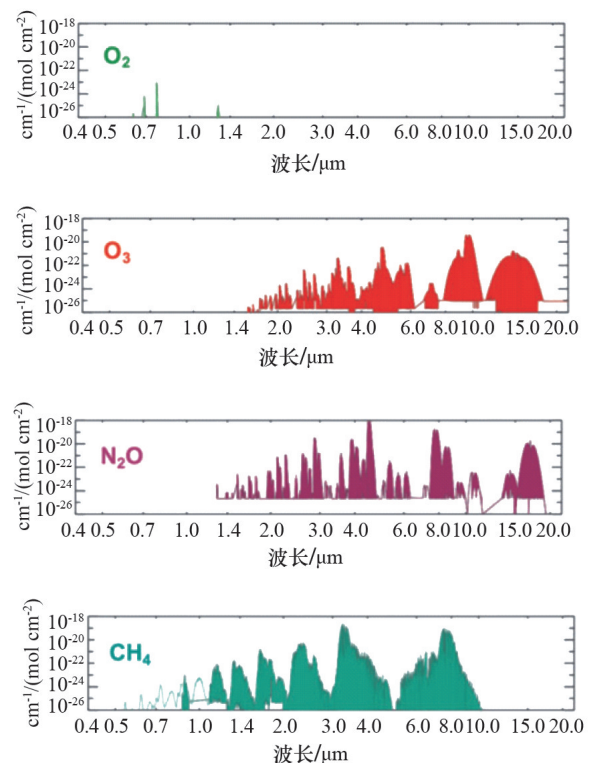


图5 包含生命信号的气体的吸收谱

Fig. 5 Biosignature gas absorption features

但需指出的是,如果仅探测到以上的某一种气体存在,还不能完全确认生命的存在。例如, O_2 并不是唯一通过生命过程产生的,水汽光解也可以产生 O_2 。因此,如果仅探测到 O_2 或 O_3 ,并不能意味着生命的存在。但如果同时探测到 O_2 和 CH_4 的存在,就比较肯定生命的存在。因为 CH_4 是一种很容易被氧化的气体,生命期很短,如果 CH_4 能稳定地存在,说明有生命过程在不断地产生 CH_4 。

图6中这些气体的吸收带都在近红外和红外

波段。探测这些气体需要望远镜的波段在近红外和红外波段。为了排除地球大气层的干扰,最好使用空间望远镜,而非地基望远镜。中国的FAST望远镜是射电望远镜,其探测波段是无线电波段,并不是为探测气体成分而设计的。美国哈勃望远镜观测的波段主要是紫外—可见光—近红外波段,对系外生命的探测帮助有限。目前,欧洲和美国正在建造探测系外生命信号的新一代望远镜。最令人期待的是詹姆斯·韦伯太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST),它的主要波段是红外和近红外波段,最适合探测以上4种气体成分。JWST的发射几经推迟,预计将于2021年发射。另外,欧洲航天局(ESA)的太空望远镜ARIEL(atmospheric remote-sensing infrared exoplanet large-survey)主要是为探测生命信号而设计的,将于2028年发射。这些望远镜将为揭示系外行星大气组成和包含生命迹象的气体的存在提供观测结果。

参考文献(References)

- [1] The Nobel Committee for Physics. Scientific background on the Nobel Prize in Physics 2019: Physical cosmology and an exoplanet orbiting a solar-type star[EB/OL]. [2019- 11- 10]. <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-physicsprize2019-3.pdf>.
- [2] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, 378: 355-378.
- [3] Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12[J]. *Nature*, 1992, 355: 145-147.
- [4] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results[J]. *Science*, 2010, 327: 977.
- [5] Gaudi B S, Stassun K G, Collins K A, et al. A giant planet undergoing extreme-ultraviolet irradiation by its hot massive-star host[J]. *Nature*, 2017, 546: 514-518.
- [6] O'Donovan F T, Charbonneau D, Mandushev G, et al. TrES-2: The first transiting planet in the Kepler field[J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 651: L61-L64.
- [7] Dawson R I, Fabrycky D C. Radial velocity planets de-aliased: A new, short period for super-earth 55 Cnc e[J]. *Astrophysical Journal*, 2010, 722: 937-953.
- [8] Charbonneau D, Zachory K B, Irwin J, et al. A super-Earth transiting a nearby low-mass star[J]. *Nature*, 2009, 462: 891-894.
- [9] Raymond S N, Quinn T, Lunine J I. High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics[J]. *Icarus*, 2006, 183: 265.
- [10] de Pater I, Lissauer J J. *Planetary Sciences*[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [11] Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location[J]. *Nature*, 1996, 380: 606-607.
- [12] Wetherill G W. Late heavy bombardment of the moon and terrestrial planets[C]//Proceeding 6th Lunar Science Congress. Houston: Pergamon, 1975: 1539-1561.
- [13] Bottke W F, Norman M D. The late heavy bombardment [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 619-647.
- [14] Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets[J]. *Nature*, 2005, 435: 466-469.
- [15] Morbidelli A, Raymond S N. Challenges in planet formation[J]. *The Journal of Geophysical Research Planets*, 2016, 121(10): 1962-1980.
- [16] Ingersoll A P. The runaway greenhouse: A history of water on Venus[J]. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 1969, 26: 1191-1198.
- [17] Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable zones around main sequence stars[J]. *Icarus*, 1993, 101(1): 108-128.
- [18] Kasting J F, Kopparapu R, Ramirez R M, et al. Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars[J]. *PNAS*, 2014, 111: 12641-12646.
- [19] Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri[J]. *Nature*, 2016, 536: 437-440.
- [20] Hu Y Y, Wang Y W, Liu Y G, et al. Climate and habitability of Kepler 452b simulated with a fully coupled atmosphere-ocean general circulation model[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 2017, 835: L6.
- [21] Rodonò M. *The atmospheres of M dwarfs: Observations, the M-Type stars*[M]. Washington: US Government Printing Office D C, 1986.
- [22] Meadows V S. Reflections on O₂ as a Biosignature in Exoplanetary Atmospheres[J]. *Astrobiology*, 17(10): 2017, 1022-1052.

[23] Schwieterman E W, Kiang N Y, Parenteau M N, et al. Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life[J]. *Astrobiology*, 2018, 18(6): 663–708.

[24] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HI-

TRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4–50.

Searching for extra-solar planets: A brief introduction to the Nobel Prize in Physics 2019

HU Yongyun

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract The Nobel Prize of 2019 in Physics was awarded to three astronomers for their contributions to our understanding of the evolution of the universe and the Earth's place in the cosmos. They are professor James Peebles at Princeton University “for theoretical discoveries in physical cosmology” and professors Michel Mayor and Didier Queloz at the University of Geneva “for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star.” The three astronomers have different research directions. Peebles' research is on cosmology, while Mayor and Queloz's research is on searching for extra-solar planets (exoplanets). In the present paper, we reviews the scientific accomplishment by Mayor and Queloz and their important impacts on planetary sciences and astronomy, as well as the diversity of exoplanets and the great challenges to our traditional understanding of the formation of the Solar system. We also comment on the progresses on searching for potentially habitable exoplanets and the s exo-life.

Keywords Nobel Prize in Physics 2019; exoplanets; habitable exoplanets; exo-life; planetary science ●



(责任编辑 傅雪)