

系外行星和系外生命——兼谈 2019 年度诺贝尔物理学奖

胡永云

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

E-mail: yyhu@pku.edu.cn

2019 年度诺贝尔物理学奖授予了 3 位天文学家^[1], 他们分别是普林斯顿大学的 James Peebles 教授、日内瓦大学的 Michel Mayor 和 Didier Queloz 教授(后者也兼职剑桥大学)。但他们 3 人的研究并不在同一方向, Peebles 的学术成就就是关于宇宙演化的, 而 Mayor 和 Queloz 的获奖成果是发现了太阳系外行星(简称系外行星), 获奖理由是“for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star”。本文将首先介绍 Mayor 和 Queloz 的获奖成果及其科学意义。其次, 简述近年来系外行星探测的进展、系外行星的多样性, 以及系外行星的发现对太阳系模型产生的挑战。最后, 介绍宜居行星研究进展和系外生命探测。

1 获奖者的发现

既然太阳系有 8 颗行星, 那么在其他恒星周围也应该存在行星。因此, 人们很少会怀疑系外行星的存在, 但问题是如何探测到系外行星。1995 年, Mayor 和 Queloz 在飞马座——一颗类太阳恒星附近发现了一颗与木星质量相当的行星^[2], 编号为 51 Pegasi b(系外行星命名是在其母星名字后面加上一个小写的英文字母, 第一个发现的行星编号为 b, 随后发现的则依次为 c, d 等。如果同时发现多颗行星, 最内侧的行星用第一个可用的字母, 其他行星由内向外用后续字母)。51 Pegasi b 的质量大约是木星质量的 47%, 距离其恒星只有 0.05 个天文单位(astronomical unit, AU, 1 AU=1.496×10⁸ km, 即地球与太阳之间的平均距离), 公转周期约 4.2 d(地球日)。因为 51 Pegasi b 距离其恒星非常近, 所以其辐射平衡温度很高, 大约为 1000°C。相对于太阳系木星-140°C 的温度而言, 51 Pegasi b 是很热的类木行星, 这类行星通常被称为热木星。因为其温度很高, 所以体积比木星大, 大约是木星体积的 2 倍。

事实上, Mayor 和 Queloz^[2]在发表论文时, 并没有把 51 Pegasi b 称为行星(planet), 而是称为伴星(companion)。在论文的讨论部分, 他们甚至认为 51 Pegasi b 也有可能是一颗褐矮星。因为根据太阳系形成模型, 一颗木星大小的行星不可能在恒星附近形成, 木星与太阳之间的距离是 5 AU。这既反映了两位研究者的谨慎, 也反映出一个研究领域的突破首先面临的是对传统观念的突破。

Mayor 和 Queloz^[2]使用的行星观测方法是视向速度法。



胡永云 北京大学物理学院大气与海洋科学系教授, 中国气象学会副理事长, 多个国内外期刊编委。2000 年获芝加哥大学博士学位, 2000~2002 和 2002~2004 年分别在华盛顿大学和哥伦比亚大学做博士后。研究领域为现代气候、深时古气候、行星气候和宜居性。

该方法可以测量行星的质量下限, 尤其适用于探测质量较大的行星。51 Pegasi b 的质量是地球的 160 倍, 所以测量精度很高。另外, 因为该行星的公转周期只有 4.2 d, 所以很容易在较短时间内多次观测到该行星存在的信号。而且, 其观测结果也很容易被其他观测者所验证。如果其公转周期像地球的公转周期那样长达 365 d, 那么其观测结果则需要几年的连续观测才能被验证。在论文修改阶段, 他们被国际同行告知, 他们的结果被验证了。1996 年, 另外两颗类木行星在其他恒星周围被发现^[3,4]。

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”, 并没有说两位获奖人首次发现了系外行星^[1]。这是因为在 1995 年之前, 已有其他研究者发现了系外行星。1992 年, Wolszczan 和 Frail^[5]在一颗脉冲星附近探测到 2 颗系外行星, 它们的质量与地球相当。脉冲星是高速旋转的、磁场很强的中子星, 磁极方向具有方向性很强的射电辐射, 因此被称为脉冲星。根据恒星演化理论, 恒星在核燃料燃烧殆尽、核聚变反应停止之后, 有几种归宿: 质量远大于太阳的形成黑洞, 较小一些的形成中子星, 质量与太阳相当的形成白矮星。因为脉冲星向外辐射的能量不足以使其周围的行星维持宜居状态, 所以人们对脉冲星周围的行星并不感兴趣, 感兴趣的是主序星周围的行星。因此, 尽管 Mayor 和 Queloz 并不是首次发现系外行星, 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。自 1995 年起, 系外行星研究已成为天文和行星科学的一

个热点研究领域,一系列的系外行星探测计划已被实施或将要实施.截至2019年10月16日,已有4122颗系外行星被确认.图1(a)给出了历年确认的系外行星数目.近10年来,每年发现的系外行星都接近200颗,这其中的2962颗是通过掩星法发现的.需要特别指出的是,根据掩星法原理设计的开普勒空间望远镜^[6]贡献最大,共发现了2734颗系外行星,还有大量候选系外行星有待确认.从图1(a)可以看出,2014和2016年确认的系外行星异常多,并不是因为这两年观测到的系外行星异常多,而是开普勒望远镜累积的观测数据经过分析,在这两年确认了2500颗系外行星.

2 系外行星的多样性

这4000多颗被确认的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1(b)给出的是1623颗系外行星质量-公转周期分布图.首先,从图1(b)看出,许多系外行星的质量比木星大,说明在银河系类木行星并不罕见.图1(b)还表明,绝大多数系外行星的质量比地球大.但这并

不意味着类地行星偏少,而是因为视向速度法和掩星法都偏向于探测到质量或半径较大的行星.其次,公转周期在10 d左右的系外行星也很常见,甚至有公转周期小于1 d的,这与太阳系行星的公转周期有很大差异.在太阳系,距离太阳最近的是水星,其公转周期约为88 d.

图1(c)给出的是系外行星半径-公转周期分布.其中,绝大多数系外行星的半径超过地球半径(6370 km),公转周期绝大多数在100 d之内,说明距离恒星很近的行星并不在少数.读者会发现,在图1(b)和(c)的散点图中,系外行星主要集中在几个区域,这与探测方法有关,并不能反映行星物理属性的倾向性.在图1(b)中,系外行星集中在3个区域,右上角的密集区主要是由视向速度法所发现的系外行星,因为视向速度法更适合发现质量较大、距离恒星相对较远的系外行星.图1(b)左侧两个密集区包含掩星法和视向速度法共同发现的系外行星.在图1(c)中,左侧两个密集区主要是掩星法发现的行星.

系外行星的偏心率也是多样性的(图1(d)).在太阳系中,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,轨道基本都

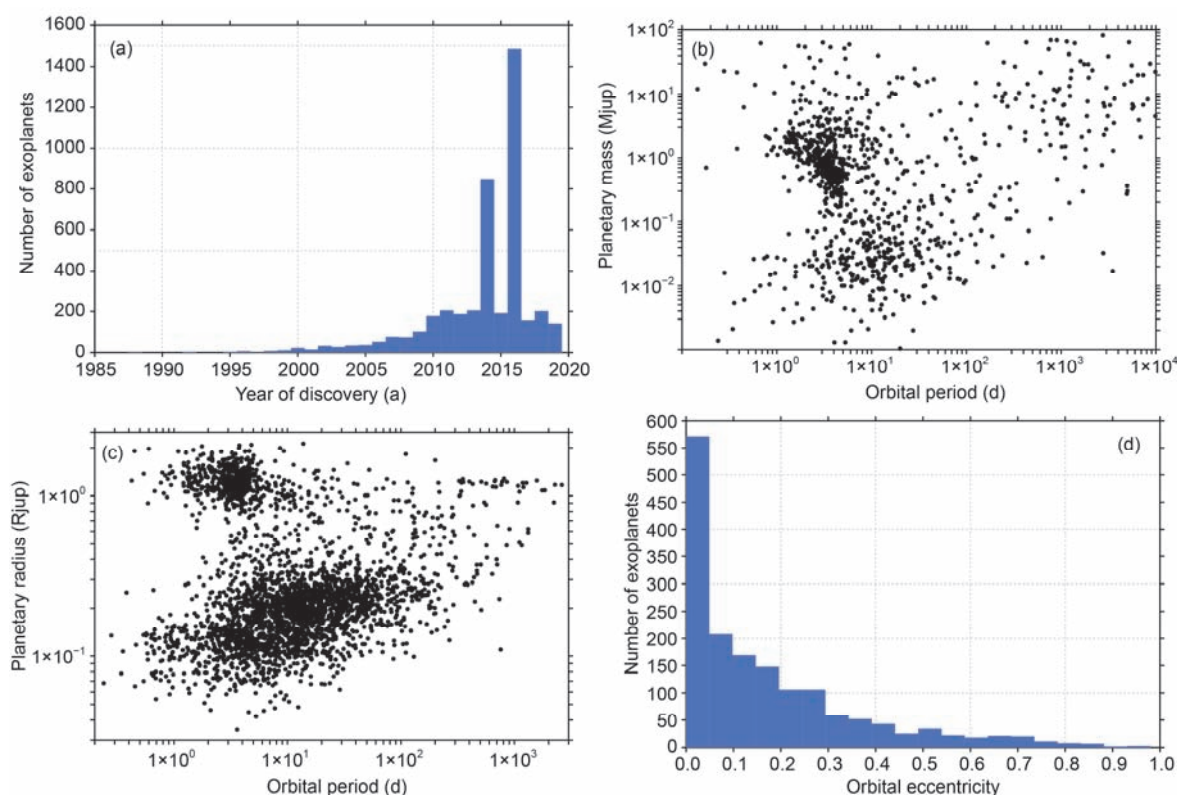


图1 系外行星及其多样性. (a) 历年所确认的系外行星个数; (b) 1623颗系外行星质量-公转周期分布; (c) 3082颗系外行星半径-公转周期分布; (d) 1623颗系外行星公转轨道偏心率分布. 截止日期: 2019年10月17日. 数据来源: The Extrasolar Planets Encyclopedia

Figure 1 Exoplanets and their diversities. (a) Numbers of exoplanets discovered in the past few decades; (b) mass-orbital period distribution of 1623 exoplanets; (c) radius-orbital period distribution of 3082 exoplanets; (d) orbital eccentricity distribution of 1623 exoplanets. Updated date is October 17, 2019. Data source: The Extrasolar Planets Encyclopedia

倾向于圆形. 但如图 1(d)所示, 系外行星的偏心率最大可达到 0.96. 虽然图 1(d)给出的系外行星的偏心率大部分偏小, 这与观测方法有关, 因为目前发现的系外行星大多距离恒星较近. 当行星距离恒星较近时, 引力的潮汐耗散作用使得行星轨道逐渐向圆形轨道演化.

系外行星不仅质量、半径和轨道具有多样性, 其物理属性也具有多样性, 这里仅给出一些极端例子.

(1) 温度最高的热木星. 目前已发现了大量温度超过 1000°C 的热木星, 其中温度最高的是 2017 年发现的 KELT 9b^[7], 其质量是木星的 4.5 倍, 辐射平衡温度高达 3780°C. 这是因为, 一方面 KELT 9b 距离其恒星非常近, 公转周期只有 1.5 d; 另一方面, 其恒星辐射温度比太阳高得多, 高达 9897°C (太阳的辐射温度是 5600°C). 对太阳系木星来说, 其接收太阳的辐射能量与其自身向外发射的能量相当, 而且木星不是潮汐锁相的, 自转周期大约 11 h, 因此其辐射平衡温度是相对均匀的, 温差很小. 但热木星基本都是潮汐锁相的, 其朝阳面和背阳面温差可达 3000°C 以上, 因此风速可超过声速.

(2) 最黑的热木星. TrES 2b 是一颗热木星^[8], 它的质量是木星的 1.2 倍, 辐射平衡温度约为 1186°C. 这颗热木星最为特殊的特征是其表面反照率极低, 小于 0.01 (地球的反照率是 0.3, 木星的反照率是 0.34). 这意味着 TrES 2b 的大气成分由吸收性很强的物质组成, 比黑炭的吸收性能还要强得多, 因此 TrES 2b 被称为最黑的行星. 目前, 人们还不清楚 TrES 2b 的大气是由什么化学成分组成的.

(3) 钻石行星. 55 Cancri e 是一个富含碳的固态星球^[9], 其质量约为地球的 9 倍, 向阳面辐射平衡温度高达 2149°C, 背阳面温度为 1107°C. 我们知道, 钻石是碳在高温高压下的产物, 因此发现者们推测该行星可能由钻石组成. 无论如何, 在如此高温下, 其表面应该是岩浆海洋, 因为大部分岩石在如此高温下都将熔化.

(4) 海洋行星. GJ 1214b 被认为是一颗海洋行星^[10], 其质量大约是地球的 6.5 倍, 密度大约是 1.87 t/m³ (地球的密度大约是 5.6 t/m³), 被称为超级地球. 由于其密度接近水的密度, 许多研究者认为 GJ 1214b 是一颗主要由水组成的行星, 海洋深度可达 6000~10000 km, 其核心部分与地球相似, 由岩石组成. 简单的计算表明, GJ 1214b 的辐射平衡温度约为 200°C. 如果它确实是一颗海洋行星, 那么其大气主要由浓密的水汽组成. 因为液态水被认为是生命存在的首要条件, 因此 GJ 1214b 被广泛关注.

3 对太阳系模型的挑战

系外行星的多样性对传统的太阳系形成模型提出了重大挑战, 我们不得不重新审视对太阳系的传统认识. 根据经典太阳系形成模型^[11,12], 8 颗行星及其现在所处的位置是在太阳系形成之初就已确定的. 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. 经典太阳系模型认为, 在距离太阳较近的区域, 由于温度较高, 易挥发组分 (例如水) 很难存在, 仅留下金属岩石类元素, 逐步汇集形成了太阳系内围的 4 颗固态行星; 而在太阳系外围, 温度相对较低, 水分和其他易挥发组分 (如氨等) 以固态形式存在, 形成气态星球的内核, 当这些内核物质的质量快速增长, 在引力作用下, 这些核心物质能够不断吸引周围分子量较小的气体 (如氢和氦), 形成巨型气态星球. 经典模型还解释了行星的质量首先随离开太阳距离的增加而增加, 在木星位置 (5 AU) 达到最大, 然后随距离的增加而减小.

但系外行星的多样性对传统太阳系形成模型提出了挑战, 首先是热木星的发现. 现在发现的很多热木星距离其恒星很近, 最初这让很多天文和行星科学家感到非常困惑, 因为巨型气态行星不可能在恒星附近形成. 为什么这么多的热木星距离其恒星这么近? 这是一个关乎恒星系统形成的核心问题. 1996 年, 在 51 Pegasi b 被发现之后不久, 轨道迁移理论被提出来, 用于解释为何 51 Pegasi b 距离其恒星这么近^[13]. 轨道迁移理论认为, 巨型气态行星是不可能是在恒星附近形成的, 而是形成在距离恒星较远的地方, 但由于与残余星周盘的相互作用, 大质量的气态巨行星向内侧迁移, 又由于与恒星之间的潮汐作用力, 而停留在距离恒星很近的地方.

虽然该理论能够很好地解释热木星现象, 但如何被证实? 以太阳系为例, 轨道迁移现象是否曾发生过? 根据对月球、水星、火星等的陨石坑观察, 研究者们提出, 在大约 41~38 亿年前, 这些行星和卫星都曾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)^[14]. 研究者们根据地球的地质记录推测, 晚期重轰击也在地球上发生过^[15]. 后来, 尼斯模型 (Nice model) 被提出来解释太阳系早期演化和晚期重轰击事件^[16]. 尼斯模型的基础是轨道迁移理论^[13], 其主要观点是, 太阳系外围大质量行星向外的轨道迁移导致大量小星体向太阳系内围移动, 进而导致了 41~38 亿年前的晚期重轰击事件. 尼斯模型与 Lin 等人^[13]的轨道迁移理论并不一致. Lin 等人^[13]认为, 在行星形成早期, 大质量行星将向内迁移; 而尼斯模型则认为, 在太阳系形成后, 大行星与残留星子盘的相互作用导致大质量行星向内迁移. 尽管两种理论的观点不同, 但两种理论都认为轨道迁移将导致小星体向内迁移, 形成晚期重轰击事件, 并说明太阳系并非一成不变.

大质量行星的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. 但太阳系形成模型表明^[11], 地球在形成时很可能贫水, 至少并没有现在这么多. 最新观点认为, 地球的水分是晚期重轰击期间彗星带来的. 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. 当然, 折中的观点认为, 地球形成之初就包含一些水分, 晚期重轰击期间, 大量的彗星撞击又带来了另一部分水分. 到目前为止, 关于地球

水分的来源还没有确切的定论, 无论哪一个观点都还需要更多的证据来证实。

太阳系拥有 4 颗固态行星, 而红矮星 TRAPPIST-1 则至少拥有 7 颗固态行星^[17,18]。图 2 是 TRAPPIST-1 行星与太阳系固态行星对比的示意图。红矮星 TRAPPIST-1 的质量只有太阳的 8%, 其 7 颗行星的质量均与地球质量相当, 而且 3 颗行星位于宜居带之内。这说明, 在恒星的周围, 有可能拥有多于 4 颗的固态行星。现已确认的 4122 颗系外行星是在 3063 个恒星系统发现的, 而且 669 颗恒星至少拥有 2 颗以上的行星。这些结果表明, 太阳系行星的分布并不具备代表性, 仅是宇宙或银河系恒星系统的一个特例。总之, 众多系外行星所展示的多样性颠覆了传统的太阳系模型^[19]。

4 宜居行星和系外生命

生命存在需要许多条件, 但目前的共同认识是液态水是首要必需条件, 没有液态水存在, 其他条件都无足轻重。保证液态水存在的条件是行星表面的温度应该介于 0~100°C。其实, 液态水在行星表面存在的条件更为苛刻。理论研究表明, 当行星的辐射平衡温度超过 80°C 时, 行星将进入温室逃逸状态^[20], 大气永远不会饱和, 直至液态水完全蒸发并被光解。现有研究认为, 金星曾具有液态水甚至海洋, 但随着太阳辐射加强, 金星进入温室逃逸状态, 以至于现在金星完全没有液态水, 辐射平衡温度高达 480°C。因此, 保证液态水存在的条件是

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

其中, T_s 是全球平均行星辐射平衡温度。

因为行星的辐射平衡温度在很大程度上取决于它与恒星之间的距离, 所以式(1)所定义的温度范围实际上是恒星周围的一个带状区域, 只有当行星位于该带状之内时, 其辐射平衡温度才能够维持液态水存在。如果距离其恒星太远, 行星的辐射平衡温度将低于 0°C 而进入全冰封状态; 而如果距离恒星太近, 则行星温度太高, 进入温室逃逸状态。该带状区域通常被称为恒星的宜居带^[21,22], 也被称为液态水带。图 3 是根据式(1)所定义的恒星宜居带示意图。对于类太阳恒星而言, 宜居带位于大约 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。对于红矮星, 宜居带大约位于 0.1 AU 的地方。位于红矮星宜居带的行星, 自转周期一般在 20 d 左右, 通常是潮汐锁相的。

宜居行星的另一个判据是行星的质量。如果一颗行星的质量大于地球质量的 10 倍, 这颗行星很可能是气态行星, 如海王星、木星、土星。此外, 如果行星的质量小于地球质量的 0.1 倍, 该行星很可能无法吸附足够厚的大气层。例如, 火星(质量是地球的 11%)大气压只有 6 hPa, 不足地球大气的 1%, 一个重要原因是火星的质量太小。因此, 行星质量是判断行星宜居性的第二个条件。目前, 较为宽松的判据是

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

其中, M 是行星质量, M_E 是地球质量。较为保守的判据是

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

根据判据(1)和(2), 在目前所发现的 4122 颗系外行星中, 宜居行星只有 10 多颗, 表 1 列出了其中 11 颗可能的宜居行星。在这 11 颗可能的宜居行星中, 有 3 颗位于 TRAPPIST-1

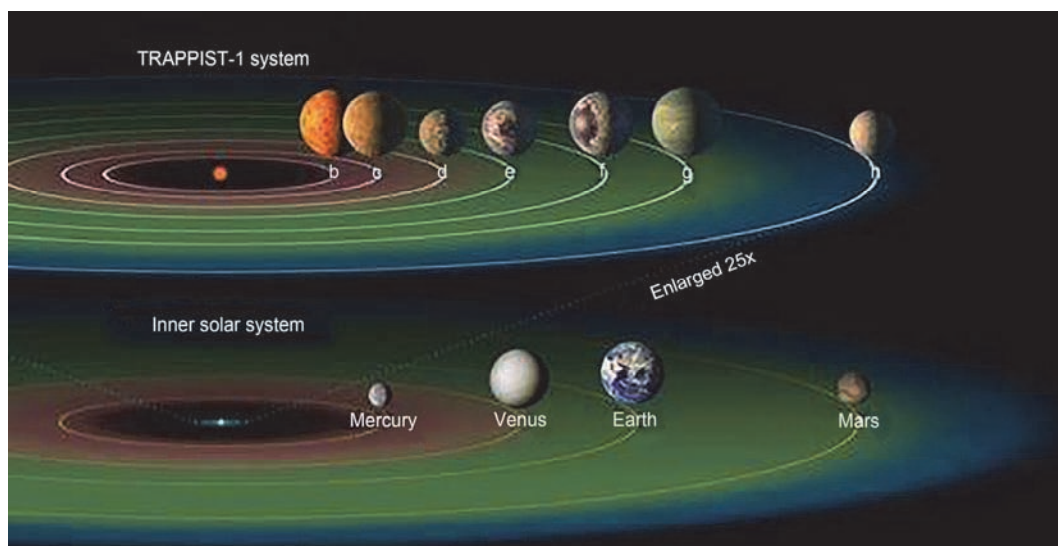


图 2 TRAPPIST-1 恒星系统行星分布及其与太阳系固态行星对比。绿色带状区域为宜居带。图片来源: 欧洲航天局

Figure 2 The TRAPPIST-1 system and its comparison with the solar system. The green zone is the habitable zone. Source: European Space Agency

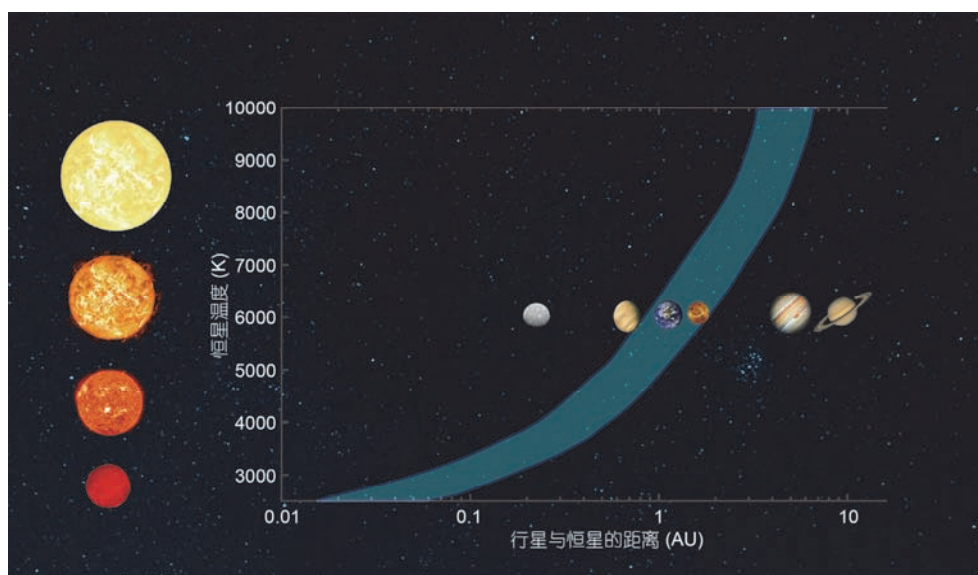


图3 恒星宜居带示意图. 蓝色带状区域为不同类型恒星的宜居带

Figure 3 Schematic plot of the habitable zone. The blue band indicates the habitable ozone for different stars

表1 目前所现的可能宜居的系外行星名称、与地球的距离及其恒星类型

Table 1 List of potentially habitable exoplanets, distances from their stars, and the types of the stars

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

的宜居带(图 2). 距离我们最近的宜居行星是 Proxima Centauri b^[23], 约 4.2 光年, 它的质量大约是地球的 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 452b, 被称为“地球的表兄”、“第二个地球”等, 距离我们大约 1400 光年, 比地球的生命还长 15 亿年. 在与地球大气成分类似的条件下, Kepler 452b 的全球平均温度约为 293 K^[24], 比地球全球平均温度(288 K)高 5 K.

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, 这是由于两个方面的原因. 首先, 宇宙中红矮星的数量最多, 占恒星总数的 80%^[25], 所以红矮星附近

的宜居行星远超其他类型恒星. 其次, 红矮星附近的宜居行星距离恒星较近, 且行星与恒星的亮度比与质量比都大于其他行星系统的对应值, 容易被探测到. 此外, 其公转周期较短, 容易被确认.

尽管在红矮星附近发现宜居行星的概率较其他类型恒星高得多, 但红矮星附近可能宜居行星的宜居性却一直存在争议. 它主要涉及两个问题.

首先, 红矮星频发的耀斑活动会产生强烈的高能粒子喷发(恒星风)和超紫外辐射^[26], 恒星风对行星的大气层有强烈的剥蚀作用, 有可能导致宜居带内的行星不具备大气层. 另外, 超紫外辐射对有机生命有强杀伤作用, 即使这些宜居带内的行星像地球大气一样具备臭氧层, 能够屏蔽紫外辐射, 但臭氧层无法屏蔽超紫外辐射. 目前, 关于红矮星耀斑活动对附近宜居行星的影响还存在争论, 行星的磁场对大气的保护作用也是一个争论的焦点.

其次, 红矮星附近的宜居行星通常是潮汐锁相的. 这是因为, 这些行星距离其恒星非常近, 恒星与行星之间强的引力力矩将导致行星被潮汐锁相, 也就是行星的自转周期和公转周期相同, 行星的一面永远面对红矮星(永久白天), 而另一面永远背对红矮星(永久黑夜). 例如, 月球就被地球潮汐锁相, 所以我们在地球上永远只能看到月球的一面, 而看不到其另一面. 这一特殊的行星与其恒星之间的运行方式势必造成行星的朝阳面和背阳面之间的加热不均匀. 即使朝阳面因一直被恒星照射而温度较高, 但背阳面因得不到恒星辐射则有可能极端寒冷. 由此而产生的问题是, 虽然朝阳面温度适于液态水存在, 但其背阳面由于极端寒冷有可能导致所有的大气成分和水分都被冻结在背阳面, 形成所谓的大气坍塌现象, 以至于这些行星不

适宜生命存在^[27]。大气坍塌现象其实已经在火星被观测到。火星大气成分的 95% 是 CO_2 ，由于极夜期间极地温度低达 -120°C 以下，大气 CO_2 在极区凝结成干冰并沉降地面，每年冬季冻结在极地的 CO_2 大约是火星大气总质量的 25%~30%。当夏季到来时， CO_2 干冰又升华进入大气层。据此，人们担心潮汐锁相行星背阳面也有可能发生大气坍塌现象。

但对于地球气候来讲，地球的两极在极夜期间温度并不是非常低，南极的最低温度大致在 -60°C ，这主要是大气和海洋不断把热量自热带向两极输送造成的。火星两极之所以会出现 CO_2 凝结的现象，一部分原因是火星全球温度偏低，而且火星大气非常稀薄(表面大气压不足地球的 1%)，不足以向两极输送足够多的热量。对于红矮星附近的宜居行星，数值模拟实验表明，在大气成分和质量与地球类似，而且有海洋存在的条件下，大气坍塌现象并不会发生^[28]。大气和海洋环流把热量自朝阳面向背阳面输送，因此背阳面温度将远高于 CO_2 的凝固温度。图 4 所示的是使用修改过的地球海气耦合气候模式模拟的位于红矮星系 Gliese 581 宜居带内的一颗行星的辐射平衡温度和海冰覆盖率^[28]。在大气条件与地球大气相同的情况下，朝阳面温度是 4°C ，背阳面温度大约是 -40°C (图 4(c)和(d))。如果不考虑海洋热量输送(图 4(a)和(b))，朝阳面的最高温度高于 8°C ，背阳面的温度大约是 -70°C 。

上面的结果表明，大气与海洋热量输送足以把潮汐锁相行星的背阳面加热到大气各主要成分的凝固点之上，亦即潮汐锁相行星不会产生大气坍塌的现象。但还存在一个

问题：水分是否会完全冻结在潮汐锁相行星的背阳面？因为水的凝固温度(0°C)比大气成分的凝固点高得多。如果朝阳面液态水不断蒸发，通过大气环流输送到潮汐锁相行星的背阳面，水汽在背阳面凝固并形成降雪，在背阳面形成冰川，最后导致液态水全部冻结在背阳面。如果水分完全冻结在背阳面，即使朝阳面的温度在 0°C 之上，因为朝阳面没有液态水，行星也是不适宜生命存在的。

数值模拟表明，海洋热量输送可使背阳面海洋足够温暖，不会出现海洋完全冻结在背阳面的极端情况。图 5 所示的是模拟的海冰厚度分布图，朝阳面是开放的海域，背阳面赤道附近的海冰大约厚 1 m，最大海冰厚度基本小于 5 m，位于背阳面副极地地区。海冰很薄的原因是，海洋环流把大量的热量输送到背阳面，温暖的海水从海冰下面加热冰层，使得海冰不能向下增长。模拟结果还表明，即使大气 CO_2 浓度降低到 3.6 ppmv，背阳面最大海冰厚度也不会超过 10 m^[28]。

5 系外生命探测

随着越来越多的可能宜居行星被发现，人们希望找到确实存在生命信号的宜居行星。其实，早在 20 世纪 70 年代，人们曾期望接收到系外文明发来的无线电信号，并在飞向太阳系外的“旅行者号”上存放了展示地球人类文明的光盘。现在看来，这种试图发现系外文明的思路可行性并不高。试想，地球有 46 亿年的历史，人类出现只是 300 万年前的事情，而人类文明也只有 1 万年的历史，能够发射无线电波更是最近 200 年的事情。依此可推测，一个星球

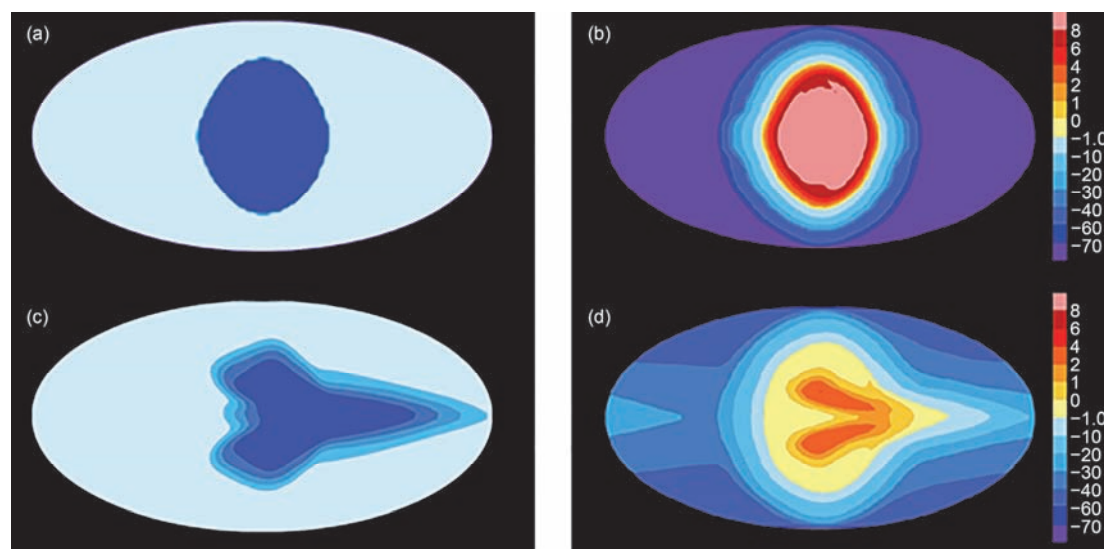


图4 气候模式模拟的海冰覆盖率和辐射平衡温度分布。(a), (b) 静止海洋条件下的模拟结果; (c), (d) 动态海洋条件下的模拟结果。(a), (c) 海冰覆盖率, 蓝色表示开放海域, 白色表示冰封海域。(b), (d) 辐射平衡温度, 彩色标尺的单位是 $^\circ\text{C}$ 。恒星直射点位于图中央。图片来自文献^[27]

Figure 4 Spatial distributions of simulated sea-ice coverage and surface air temperatures climate models. (a), (b) Simulation results with a slab ocean; (c), (d) simulation results with a dynamic ocean. (a), (c) Sea-ice coverage, blue colors indicate open ocean, white indicates ice. (b), (d) Surface air temperatures, and color scale is $^\circ\text{C}$. The substellar point is at the equator and 180 degree in longitude. This figure is from Ref. [27]

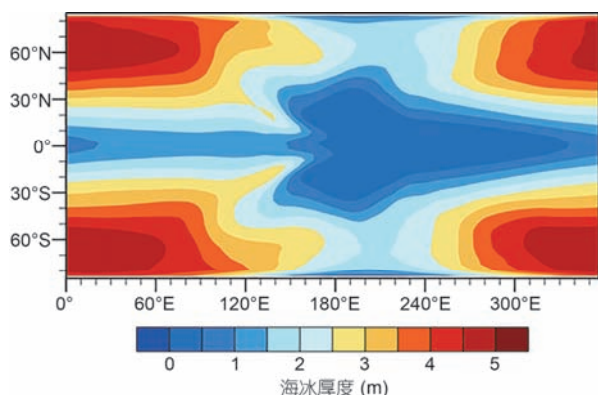


图 5 海气耦合模式模拟的潮汐锁相行星的海冰厚度. 该模拟实验中的 CO_2 浓度是 355 ppmv (即 100 万体积中含 355 体积). 彩色标尺间隔是 1 m. 图片来自文献[28]

Figure 5 Sea-ice thickness simulated by coupled atmospheric and oceanic model. CO_2 concentration is set to 355 ppmv in the simulation. Color interval is 1 m. This figure is adopted from Ref. [28]

从生命的产生到掌握高技术文明的出现需要漫长的时间演化, 1 万年或者 200 年相对于一颗行星的历史仅仅是一瞬间, 由此可见, 发现系外现代文明何其困难.

关于发现系外文明的概率, 最著名的是 Frank Drake 于 1960 年给出的公式, 也称为 Drake 方程:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_L \times f_i \times f_c \times L, \quad (4)$$

其中, N 是银河系能够发射无线电波的文明数目, R^* 是银河系恒星的数目, f_p 是每颗恒星拥有行星的概率, n_e 是恒星拥有的宜居行星的数目, f_L 是宜居行星能够演化出生命的概率, f_i 是演化出高智生命的概率, f_c 是高智生命能够发射无线电信号的概率, L 是类地现代文明所持续的时间在行星生命史中所占的比例. 由于这些参数的每一个都具有几个数量级的不确定性, 很难给出关于 N 的确切答案. 有人曾试图给出估计, 结论是银河系中具有现代人类文明的数目不足 2000 个. 目前, 一个比较有代表性的观点是, 类地系外生命存在的概率比较高, 但具有人类文明的生命存在的

概率则极低.

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. 可以想象, 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, 在数光年之外的距离, 现有的地基或空间望远镜是无法直接探测生命信号的, 而只能通过间接方法探测生命信号.

目前, 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^[29,30]. 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 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 6 给出了这些气体的吸收谱^[31]. O_2 在 $0.7 \mu\text{m}$ 附近有吸收带, O_3 在近红外和红外部分有吸收线, 尤其在 $9.6 \mu\text{m}$ 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. 如果能够在宜居带固态行星大气中探测到这些气体, 就可以大致确定该行星是宜居的.

但需要指出的是, 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 能稳定存在, 说明有生命过程在不断地产生 CH_4 .

如图 6 所示, 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. 而且, 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. 我国的 FAST(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)望远镜是射电望远镜, 其探测的波段是无线电波段, 并不是为探测气体成分而设计的. 美国著名的哈勃望远镜观测的波段主要是紫外-可见光-近红外波段, 因此对系外生命的探测帮助有限. 目前, 欧美正

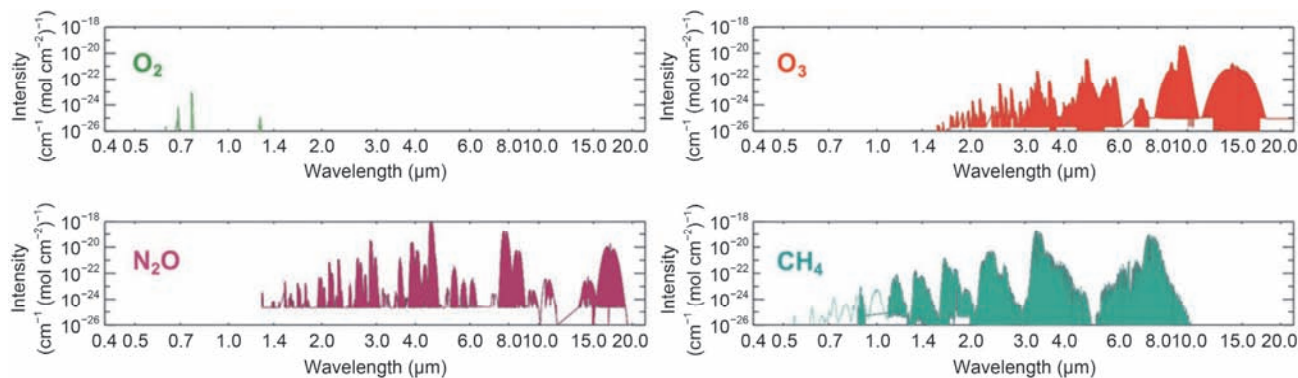


图 6 包含生命信号的气体的吸收谱. O_2 , O_3 , N_2O , CH_4 线吸收强度. 图片来自文献[31]

Figure 6 Biosignature gas absorption features. Line intensities for O_2 , O_3 , N_2O , and CH_4 . This figure is from Ref. [31]

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), JWST 的主要波段是红外和近红外波段, 最适合探测以上的气体成分含量。JWST 的发射几经推迟, 预计将于 2021 年发射。另外, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的 ARIEL(Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey)太空望远镜主要是为探测生命信号而设计的, 将于 2028 年发射。这些太空望远镜将为揭示系外行星大气的化学成分和包含生命迹象气体的存在提供观测证据。

6 结论和展望

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, 他们的研究方向并非是天文学的热门方向或者主流方向。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。系外行星探测与引力波观测非常类似, 在成功之前经历了长期的沉寂, 几乎没有进展可言。这需要研究者们无限坚守和执着信念。幸运的是, 他们都坚持下来了。Mayor 和 Queloz 的获奖又一次证实了最原创的科研成果并不一定来自本领域的热门方向, 而且成功需要研究者们坚守和不懈努力。

4000 多颗系外行星所展示的丰富多样性是人们始料不及的, 这些多样性迫使我们重新审视传统的太阳系形成和演化的认识。系外行星的多样性包括轨道动力学方面和行星的物理化学性质方面。从轨道动力学方面来讲, 如此多的热木星被发现, 说明在一个恒星系统演化的过程中, 行星轨道迁移是普遍现象, 而大质量行星的轨道迁移将对恒星系统的演化带来重要影响。目前, 普遍认为太阳系晚期重轰击事件与木星的轨道迁移有关, 重轰击事件很可能为地球带来至少部分水分。大偏心率行星的发现对太阳系形成模型是一个巨大挑战, 因为太阳系 8 颗行星的轨道偏

心率普遍较小, 近乎圆形轨道。在三恒星系统和双恒星系统中也发现了系外行星。这在过去是很难想象的, 因为传统观点认为, 在三星和双星系统中, 行星将很难维持稳定的轨道。目前的观测方法能够很好地确定新型轨道的偏心率, 但还无法确定行星的自转轴倾角。

行星的物理化学性质也具有多样性。有极炎热的固态行星, 其表面呈熔融状的岩浆海洋, 有富含碳的钻石行星, 也有疑似富含水的海洋行星。对于巨型气态行星, 其主要化学成分是氢和氦, 与木星和土星的大气化成成分类似, 而固态行星的化学成分则呈现较大差异。行星的密度是否存在两极分离的现象也是目前的一个研究热点, 也就是说, 是否存在密度介于固态和气态行星之间的行星。就现有的观测结果来看, 似乎存在密度分离现象, 只是还不清楚这是否与观测方法偏差有关。

展望未来, 探测宜居行星和系外生命是系外行星研究的下一个核心目标, 这将回答地球人类自始至终的疑问——我们在宇宙中是否是孤独的? 可以毫不夸张地说, 宜居行星和系外生命的发现将是未来诺贝尔奖的有力竞争者。目前所发现的十多颗可能宜居行星大多位于红矮星附近。现有研究表明, 潮汐锁相并不会危及这些行星维持稳定的大气层和液态水存在, 不确定性较大的是红矮星频发的耀斑活动是否危及这些行星大气层的存在, 其伴随的超紫外辐射是否危及行星表面有机生命的存在。距离我们最近的可能宜居行星是 Proxima Centauri b, 这颗行星将是未来的探测重点。其实, 我们对地球生命的起源也并不清楚, 系外生命的发现将有助于我们理解地球生命的起源。

目前的探测技术还无法直接探测生命存在的信号, 只能通过间接方法探测。探测行星大气中与生命过程有关的气体成分是希望所在, 这些气体包括 O_2 , O_3 , CH_4 , N_2O 等。另外, CO_2 和 CH_4 的季节变化与光合作用有关, 也可以被用来探测系外生命的信号。这些气体的主要吸收谱都在近红外和红外波段, 新一代空间望远镜将通过对红外波段的探测来确定系外生命的信号。

推荐阅读文献

- 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. 2019
- 2 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355
- 3 Marcy G W, Butler R P. A planetary companion to 70 Virginis. *Astrophys J*, 1996, 464: L147
- 4 Butler R P, Marcy G W. A planet orbiting 47 Ursae Majoris. *Astrophys J*, 1996, 464: L153
- 5 Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 +12. *Nature*, 1992, 355: 145
- 6 Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. *Science*, 2010, 327: 977
- 7 Gaudi B S, Stassun K G, Collins K A, et al. A giant planet undergoing extreme-ultraviolet irradiation by its hot massive-star host. *Nature*, 2017, 546: 514–518
- 8 Heng K, Demory B O. Understanding trends associated with clouds in irradiated exoplanets. *Astrophys J*, 2013, 777: 100
- 9 Demory B O, Gillon M, de Wit J. A map of the large day-night temperature gradient of a super-Earth exoplanet. *Nature*, 2016, 532: 207–209

- 10 Charbonneau D, Zachory K B, Irwin J, et al. A super-Earth transiting a nearby low-mass star. *Nature*, 2009, 462: 891–894
- 11 Raymond S N, Quinn T, Lunine J I. High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus*, 2006, 183: 265
- 12 de Pater I, Lissauer J J. *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010
- 13 Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location. *Nature*, 1996, 380: 606–607
- 14 Wetherill G W. Late heavy bombardment of the moon and terrestrial planets. In: *Proceeding of 6th Lunar Science Conference*, March 17–21. Houston, TX, 1975. 1539–1561
- 15 Bottke W F, Norman M D. The Late Heavy Bombardment. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2017, 45: 619–647
- 16 Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 2005, 435: 466–469
- 17 Gillon M, Jehin E, Lederer S M, et al. Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star. *Nature*, 2016, 533: 221–224
- 18 Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*, 2016, 536: 437
- 19 Morbidelli A, Raymond S N. Challenges in planet formation. *J Geophys Res*, 2016, 121: 1962–1980
- 20 Ingersoll A P. The runaway greenhouse: A history of water on Venus. *J Atmos Sci*, 1969, 26: 1191–1198
- 21 Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 1993, 101: 108–128
- 22 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. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 12641–12646
- 23 Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*, 2016, 536: 437–440
- 24 Hu Y, Wang Y, Liu Y, et al. Climate and habitability of Kepler 452b simulated with a fully coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Astrophys J Lett*, 2017, 835: L6
- 25 Rodonò M. The atmospheres of M dwarfs: Observations, the M-type stars. In: Johnson H R, Querci F R, eds. *The M-Type Stars*. Washington DC: NASA, SP-492, U.S. Govt, Printing Office, 1986
- 26 Vida K, Kővári Zs, Pál A, et al. Frequent flaring in the TRAPPIST-1 system—Unsuited for life? *Astrophys J*, 2017, 841: 124
- 27 Hu Y Y. The habitability of extra-solar planets (in Chinese). *Adv Meteorol Sci Technol*, 2016, 6: 110–114 [胡永云. 关于太阳系外行星的宜居性. *气象科技进展*, 2016, 6: 110–114]
- 28 Yang J, Liu Y, Hu Y, et al. Water trapping on tidally locked terrestrial planets requires special conditions. *Astrophys J Lett*, 2014, 796: L22
- 29 Meadows V S. Reflections on O₂ as a biosignature in exoplanetary atmospheres. *Astrobiology*, 2017, 17: 1022–1052
- 30 Schwieterman E W, Kiang N Y, Parenteau M N, et al. Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life. *Astrobiology*, 2018, 18: 663–708
- 31 Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2013, 130: 4–50

Summary for “系外行星和系外生命——兼谈 2019 年诺贝尔物理学奖”

Searching for exoplanets and exo-life: On the 2019 Nobel Prize in Physics

Yongyun Hu

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
E-mail: yyhu@pku.edu.cn

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 Earth's place in the cosmos. They are professor James Peebles at Princeton University “for theoretical discoveries in physical cosmology” as well as 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).

Mayor and Queloz's discovery of an exoplanet is a milestone for planetary science and astronomy. Since after, searching for exoplanets has become a hot research area for both planetary scientists and astronomers. So far, there have been more than 4000 exoplanets confirmed. These exoplanets demonstrate large diversities in physical and chemical properties as well as orbital eccentricity. The rich-full diversities greatly challenge the classical model of the formation of our own solar system. One example is that so many hot Jupiter-like exoplanets are so close to their parent stars, just like the one discovered by Mayor and Queloz. There are also many super-Earth exoplanets. These require us to re-examine our traditional understanding of the Solar system.

Among the more than 4000 exoplanets, 10 to 20 are considered potentially habitable. These exoplanets are located in the habitable zone of their parent stars and have the mass that is comparable to Earth's. They could maintain liquid water on their surface, which is the crucially necessary condition for life existence. It is important to note that most of these potentially habitable exoplanets are around M dwarfs that are cool stars. Due to such close distances, terrestrial exoplanets in the habitable zone of M dwarfs are tidally locked, causing very uneven heating between the day and night sides. Is there atmosphere collapse or water trapping on the extremely cold nightside of these tidally locked exoplanets? It is of great concerns by planetary scientists. Numerical simulations showed that both atmosphere and ocean would transport heats from the day side to the night side of tidal locking exoplanets. It would warm up the nightside although the nightside does not receive any stellar radiation, so that atmosphere collapse and water trapping do not happen.

At present, it is unlikely to directly detect exo-life over exoplanets. However, indirect methods can be applied to detecting biosignatures over these potentially habitable exoplanets. One way is to observe gases that are related to biological processes, such as oxygen, ozone, methane, and so on. These gases have significant absorptions at infrared bands. The next generation of infrared space telescopes shall provide us with evidence of biosignatures. It shall win another Nobel Prize if any exoplanet is confirmed with biosignature.

In the present paper, we shall first introduce the scientific accomplishment by Mayor and Queloz and their important impacts on planetary sciences and astronomy. Then, we will present a brief review of the diversity of exoplanets and its great challenges to our traditional understanding of the formation of the Solar system. We shall also introduce the progresses on potentially habitable exoplanets and the search for exo-life. At the end of the paper, we summarize the ongoing extensive studies of exoplanets and look forward to the discovery of habitable exoplanets and exo-life.

exoplanets, habitable exoplanets, exo-life, planetary science, Nobel Prize in Physics, astronomy

doi: 10.1360/TB-2019-0720