

NASA 发现地球的“表兄弟”——Kepler-452b

王靓, 吴晓姝, 赵刚*

中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100012

* 联系人, E-mail: gzhao@nao.cas.cn

2015-08-20 收稿, 2014-08-21 接受, 2015-08-31 网络版发表

国家自然科学基金(11233004, 11390370)资助

摘要 2015年7月24日美国国家航空航天局(NASA)宣布开普勒望远镜找到了一颗与地球大小接近、位于一颗和太阳极为相似的恒星周围的“可居住带”里的行星——Kepler-452b。它的轨道公转周期为385天, 距离主星的距离大约为1.05 AU, 接受到的辐射比地球多约10%。这颗行星的主星有效温度为5757 K, 光谱型与太阳相同, 半径是太阳的1.11倍, 年龄比太阳更老, 约为60亿年。二者可以说是目前为止发现的最接近“日-地”系统的系外行星系统。Kepler-452b的质量还无法精确测量, 只能根据经验关系推测质量为地球的5倍左右, 可能是一颗“超级地球”。

关键词

系外行星
Kepler-452b
可居住带
开普勒望远镜

北京时间2015年7月24日子夜, 美国国家航空航天局(NASA)宣布开普勒空间望远镜在搜寻“另一个地球”的道路上取得了又一个里程碑式的发现——在一颗光谱型与太阳相同(G2V)的主序星周围的“可居住带”里发现了一颗直径是地球1.6倍的行星, 被命名为Kepler-452b^[1]。虽然它不是人类发现的第一颗“可居住”行星, 但它的主星与我们的太阳相似度极高。考虑到行星的直径以及到主星的距离, Kepler-452b可以说是目前最有希望获得“另一个地球”称号的系外行星。

搜寻太阳系以外的行星甚至地外生命是人类久远的梦想, 是探索宇宙的“终极目标”之一。由于行星的尺度与恒星相差几个数量级, 系外行星观测犹如在一盏明亮的探照灯周围寻找一只黯淡的萤火虫。目前为止关于系外行星的大部分知识都来自于间接的探测手段, 例如行星对主星的引力扰动, 或者对主星光线的吸收和遮挡。人类第一次有确切的证据发现系外行星是1992年, Aleksander Wolszczan和Dale Frail通过监测一颗脉冲星的信号间隔发现了两颗系外行星^[2]。而1995年瑞士日内瓦天文台的Michel Mayor和Didier Queloz在一颗主序星周围首次发现行

星^[3], 标志着系外行星研究进入了全新的时代。

2009年, 美国国家航空航天局(NASA)发射了专门用于搜寻系外行星的开普勒(Kepler)空间望远镜, 以前所未有的精度对10万多颗恒星进行近乎不间断地监测, 用“凌星”方法筛选出其中带有行星的恒星候选体, 以进行更深入的分析。开普勒望远镜的目标是对银河系恒星做一个“抽样调查”, 分析地球大小的、表面温度适宜生命的行星出现的几率。自升空以来, 开普勒望远镜不断做出重要发现, 刷新着人们对行星多样性的认识。

为了更好地理解Kepler-452b的意义, 我们首先回顾一下2014年开普勒望远镜的另一个重要发现: Kepler-186f。该系统中有5颗行星, 环绕一颗M矮星运行, 其中行星f位于最外侧, 是第一颗被发现位于“可居住带”中的地球大小的行星。M矮星俗称“红矮星”, 质量不到太阳的一半, 温度低于4000 K。由于主星的辐射比太阳弱得多, 维持行星表面液态水的“可居住带”也比太阳周围的更靠近主星。以Kepler-186f的主星为例, 可居住带位于0.22~0.40天文单位(1天文单位=1.5亿千米), 外边缘相当于水星到太阳的距离。因此, M矮星可居住带中的行星被强烈的潮汐作

引用格式: 王靓, 吴晓姝, 赵刚. NASA 发现地球的“表兄弟”——Kepler-452b. 科学通报, 2015, 60: 2362–2366

Wang L, Wu X Z, Zhao G. NASA found Kepler-452b, the Earth's bigger and older cousin (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2362–2366, doi: 10.1360/N972015-00953

用“锁定”，只有一面固定朝向主星，在白昼和黑夜两个半球存在巨大的温差。另一方面，M矮星经常出现剧烈的耀斑和带电粒子爆发，这些都不利于生命的产生、存活和繁衍。2015年以前，已知的“可居住带”行星大多是在M矮星周围发现的，这是因为与太阳相比，类地行星能够对低亮度的M矮星产生更大的遮挡，以及更大的引力扰动，使得探测起来相对更加容易。

显然，人们更感兴趣的是在类太阳星周围存在的地球“孪生兄弟”。通过简单的计算可以得知探测这类行星的难度。凌星方法是通过行星公转到主星的圆面前方，对主星的光线产生遮挡来间接探测系外行星的，因此恒星的亮度下降的程度正比于行星和主星半径之比的平方。对于地球和太阳组成的系统，凌星深度大约是84 ppm($1 \text{ ppm}=10^{-6}$)，信号每365天出现一次，每次持续时间为13小时。此外，只有在平行于公转轨道平面的方向上才能观测到凌星，从统计上来说，如果轨道与视线方向的夹角是随机的，观测到地球凌星信号的几率只有0.47%。开普勒望远镜(图1)的参数即为此而设计，它有能力检测到目标星20 ppm的光度变化，每6秒对视场(图2)中的全部目标

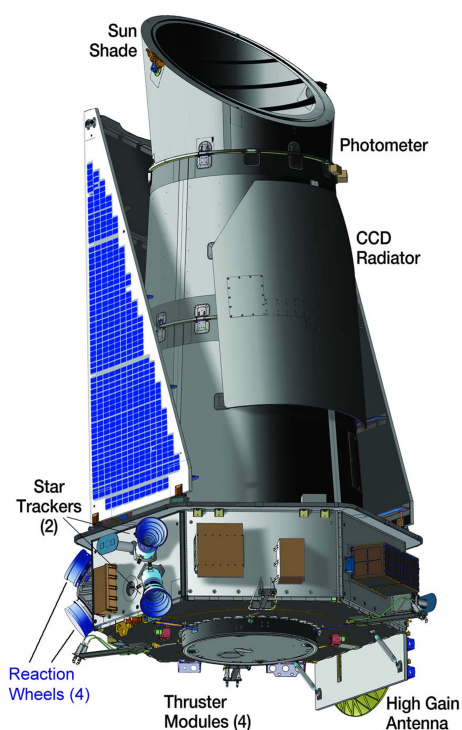


图1 开普勒望远镜结构示意图。来源: NASA/Kepler/Ball Aerospace
Figure 1 Hardware schematic of the Kepler telescope. Credit: NASA/Kepler/Ball Aerospace

星进行一次曝光，在星载计算机上把连续9次曝光叠加起来，成为“短曝光”图像，每270幅连续的短曝光图像叠加起来，成为“长曝光”图像。相邻两幅长曝光图像的时间间隔约为29分钟，保证了地球这样的行星在“凌星”期间能够获得足够多的数据点。开普勒望远镜最初的设计寿命是3.5年，能够对地球这样的行星至少获取3次凌星信号以测定公转周期。由于任务获得了极大成功，2012年NASA决定将开普勒望远镜的工作年限至少延长至2016年。此外，开普勒望远镜是NASA制造的数据产生量最大的卫星，将全部数据传回地球所需的带宽远远超过了NASA所拥有的传输能力，因此开普勒望远镜只保存和传输6%的数据，同时目标星总数被限制在17万。在如此海量的恒星光度曲线中寻找凌星信号对人眼来说是不可能完成的任务，为此开普勒团队开发了高度自动化的软件筛选出感兴趣的目标星以做进一步认证。

Kepler-452b的凌星信号(图3)最初是在2014年5月9.1版软件的一次测试中发现的。这颗行星的主星亮度只有13等，远远暗于肉眼所能看到的极限星等，当时只有开普勒输入星表的编号，名为KIC 8311864。程序发现，这颗恒星的光变曲线存在一个周期为384.8天、深度为200 ppm、持续时间为10.5小时的“疑似”凌星信号，对应一颗直径只有地球1.1倍、表面平衡温度为221 K的行星，接近液态水存在的温度范围。在望远镜4年观测里，信号总共出现了4次，最近一次出现是在2013年1月。先前版本的软件把这个信号当作仪器误差引起的“假阳性”事件而排除了，直到新版软件对直径比较小的行星做了进一步优化，这个信号才被挑选出来，其置信水平达到了 9.7σ 。于是这

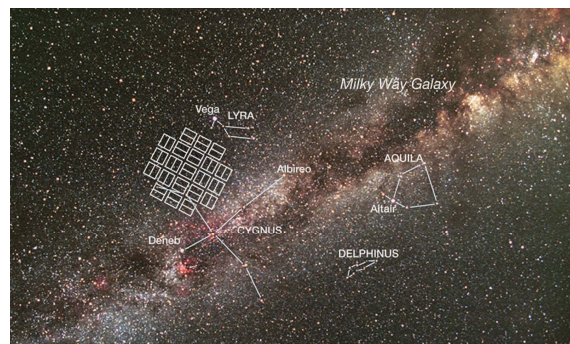


图2 开普勒望远镜的视场被固定在银河系盘上方，位于天鹅座附近的一块区域。来源: NASA/Kepler

Figure 2 Kepler field of view was selected to be an area near the Cygnus constellation, which is slightly above the Galactic disk. Credit: NASA/Kepler

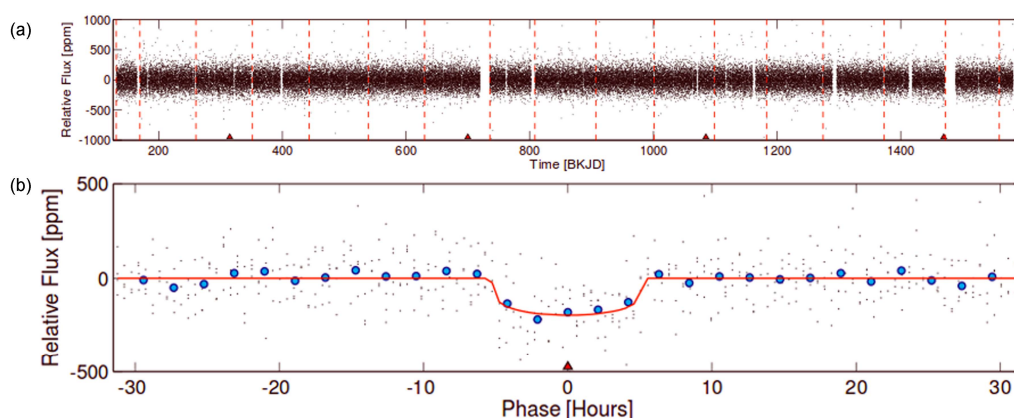


图3 Kepler-452的光变曲线。(a) 经过校正后的光度随时间的变化; (b) 凌星相位折叠后的曲线。红色虚线代表开普勒望远镜每个观测季度的开始和结束, 红色三角代表凌星中心时刻。来源: Jenkins/kepler/IOP

Figure 3 The light curve of Kepler-452 observed by the Kepler telescope. (a) The corrected relative flux of the star; (b) the phase folded flux. The vertical dash lines marked the beginnings and the ends of each quarter, and the triangles represent the time center of transits. Credit: Jenkins/kepler/IOP

颗恒星与许多其他被发现带有“疑似”凌星信号的候选天体一道被赋予KOI编号KOI-7016, 意为感兴趣的天体, 并进入了下一轮更为严格的甄别和筛选。

除了系外行星, 一些其他的天体也会产生类似的“凌星”信号, 比如在这颗星附近存在一对互相绕转的食双星。这对食双星的轨道平面如果刚好与观测者的方向平行, 在观测者看来, 两颗子星相互遮挡, 就会产生和系外行星几乎一模一样的光变曲线。这对食双星与初步筛选出来的目标星有物理上的联系(即共同组成了三星系统), 也可能距离相差很远只是恰好出现在同一视线方向上(即背景星)。这两种情况分别被称为HTS(分层多星系统中的恒星)和BEB(背景食双星)。此外, 如果产生凌星的是目标星周围的另一颗恒星所带有的行星, 类似地, 根据它是否与我们的目标星存在物理联系, 称为HTP(分层多星系统的凌星行星)和BP(背景恒星的行星)。遗憾的是, 开普勒望远镜为了提高测光精度, 损失了一些空间分辨本领, 因此并不能很好地甄别上述几种情况, 需要地面高分辨率观测配合进行。如今在地面望远镜上广泛使用的自适应光学技术(AO)能够实时地改正大气湍动对星像带来的抖动, 能够有效地提升望远镜的分辨本领, 使之接近衍射极限, 成像效果媲美空间望远镜。开普勒望远镜升空至今已经筛选出了几千颗感兴趣的潜在系外行星候选体, 其中绝大多数都需要用这种方法甄别, 因此工作量极大。开普勒望远镜团队调集了包括利克天文台1 m望远镜、夏威夷10 m Keck望远镜、帕洛玛天文台5 m望远镜, 以及

霍普金斯山6.5 m多镜面望远镜(MMT)在内的多个天文台的资源, 来对众多感兴趣的天体进行逐一后续观测。KOI-7016是2014年6月用Keck望远镜进行高分辨成像观测的, 结果没有发现附近存在其恒星的证据(图4)。与此同时, 开普勒团队使用一种名为“BLEND-ER”的统计方法^[5], 计算得出KOI-7016被上述四种天体(BEB/BP/HTS/HTP)污染的几率不超过1/424。也就是说凌星信号是由一颗系外行星引起的可能性达到了99.76%, 超过了 3σ 。因此被认为得到了充足的证据验证, 恒星被赋予正式编号Kepler-452, 它的行星被命名为Kepler-452b, 代表这颗恒星周围发现的第一颗行星。

接下来, 开普勒团队又用Keck望远镜、麦克唐纳天文台的2.7 m望远镜、以及弗雷德·劳伦斯·惠普尔天文台的1.5 m望远镜拍摄了主星的高分辨率光谱, 得到了主星的精确物理参数, 进一步确认了Kepler-452是一颗非常类似太阳的恒星, 其有效温度为5757 K, 仅比太阳低20 K; 半径是太阳的1.11倍, 质量是太阳的1.037倍。据此得到了行星的更准确参数: 半径是地球的1.63倍, 轨道半长径仅比地球到太阳的平均距离大4.6%, 接收到的来自主星的辐射比地球强约10%。按照乐观的估计^[4], Kepler-452b是一颗位于“可居住带”里的行星, 也是目前为止第一颗在和太阳类似的恒星周围发现的“可居住”行星。因此NASA在新闻稿中称Kepler-452b是地球的“表兄弟”。图5比较了kepler-186, kepler-452和太阳系的宜居带范围。

系外行星对恒星引起的效应不仅包括光线的遮

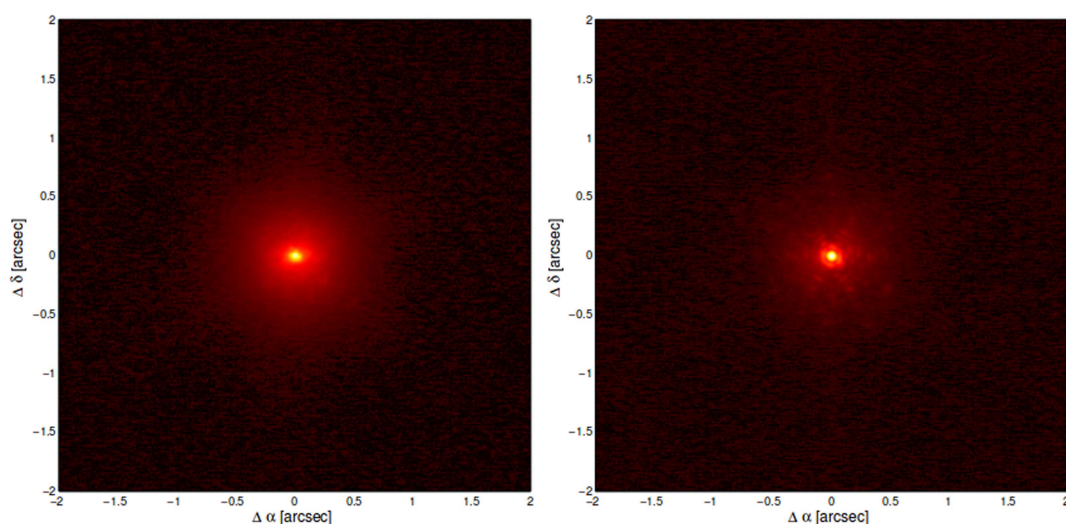


图4 Keck II 望远镜的 NIRC2 相机用自适应光学在红外 J 和 K 波段拍摄的 Kepler-452 的高分辨率图像, 显示其周围不存在背景恒星。来源: Jenkins/kepler/IOP

Figure 4 The images of Kepler-452 taken by NIRC2 with adaptive optics on Keck II telescope. There is no obvious background star surrounding Kepler-452. Credit: Jenkins/kepler/IOP

挡, 还包括引力扰动造成的主星视向速度具有周期性的变化。利用光谱学手段测量恒星的视向速度已经达到了很高的精度, 能够分辨出1 m/s的速度变化, 也因此一度成为最有效的系外行星搜寻手段。特别是能够测量行星的质量, 使得视向速度测量与凌星方法互为补充。有了半径、质量就可以得到行星的密度, 进而能够分析行星的化学组成, 例如, 是一颗像地球一样主要由岩石构成的行星, 还有一颗类似海王星的气态行星。可惜目前还无法测量出Kepler-452的视向速度变化, 也就无法得到行星的准确质量。如果根据已知的行星建立的质量-半径关系, 那么Kepler-452b最有可能是一颗5倍地球质量的行星, 属于一颗“超级地球”, 这也是目前发现数目最多的一类行星。推测其对主星造成的视向速度变化幅度大约为45 cm/s, 小于目前任何仪器所能达到的测量极限, 质量测定极为困难。尽管如此, 开普勒团队还是计算出了Kepler-452b属于岩石行星的可能性大约为50%。

值得注意的是, Kepler-452是一颗比太阳年龄稍老的恒星。太阳的年龄大约是46亿年, 根据恒星演化模型的计算, Kepler-452的年龄很可能已经到达了60亿年, 而它的行星预计已经在“可居住带”中停留了大约50亿年。如果Kepler-452b是一颗岩石行星, 那么已经经历了足够长的时间使得生命得以产生和充分进化。

像太阳和Kepler-452这样的恒星是通过核心的

氢聚变提供能量的, 能够在主序阶段稳定的燃烧100亿年左右。当核心的燃料消耗殆尽, 恒星的半径会开始膨胀, 表面温度降低, 继而脱离主序成为一颗亚巨星甚至红巨星。此时, 恒星辐射出的能量会比温和的主序星阶段大大增加, “可居住带”的范围也必然随着时间而向外推移。那么地球和Kepler-452b的命运届时又将如何? 这是一个非常引人关注的问题。如果Kepler-452系统中不存在其他的行星对它施加额外的引力作用, 那么预计在35亿年后Kepler-452b就会因为温度升高而变得不再适宜居住。哪怕它是一颗岩石行星, 且表面存在液态水, 这些水也会由于高温而蒸发到大气中, 而后被恒星的辐射光解为氢原子和

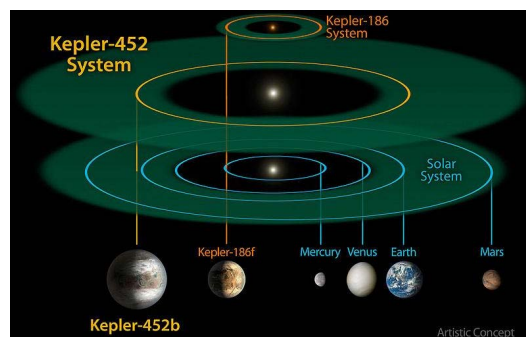


图5 Kepler-186, Kepler-452 以及太阳周围的行星系统比较。绿色是可居住带的范围。来源: NASA/Kepler

Figure 5 A comparison of planetary systems around Kepler-186, Kepler-452 and our solar system. The green belts are the habitable zones. Credit: NASA/Kepler

氧原子。接着,氢原子会由于较轻而逃逸到太空中,多余的氧元素会与碳元素结合形成二氧化碳,反进一步加速原本已经很严重的温室效应,行星表面会变得更加干涸……如此下去,行星表面会变成一个炙热而严酷的世界,类似于我们今天所看到的金星。同样的事情将会发生在地球上,届时人类向地球外侧的行星——火星进行移民或许是最方便的选择。虽然人类社会目前面临许多更为迫切的问题,但无论如何,Kepler-452b的发现也大大拓宽了人们的视野。

20世纪90年代初,人们对系外行星的认识还停留在想象和理论探索阶段,随着过去20年(1995~2014)系外行星领域的飞速发展,已经有2000多颗的系外行星得到证认,以及数千颗候选体等待

进一步观测。已知的系外行星系统表现出了令人瞩目的多样性,反映出行星在形成、演化过程中受到了多种复杂物理机制的影响。人们逐渐认识到,虽然太阳看上去是银河系中一颗普通的恒星,但太阳系却和许多已知的行星系统不同,例如除最内侧的水星外,所有大行星处于近乎相同的轨道平面上,且偏心率接近于0,暗示太阳系自形成之初未受到过外来天体的剧烈扰动,而木星凭借引力保护了地球等内行星免遭彗星的频繁撞击。所谓的“稀有地球假说”认为生命在地球上出现是一系列罕见和偶然的条件结合的产物。研究系外行星,特别是寻找类似太阳系、地球这样的行星系统,为人类提供了一个前所未有的视角认识宇宙和生命现象,激发更多关于自身命运与地球环境的思考。

参考文献

- 1 Jenkins J M, Twicken J D, Batalha N M, et al. Discovery and validation of Kepler-452b: A 1.6-Re super earth exoplanet in the habitable zone of a G2 star. *Astron J*, 2015, 150: 56
- 2 Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12. *Nature*, 1992, 355: 145–147
- 3 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 4 Kopparapu R K, Ramirez R, Kasting J F, et al. Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates. *Astrophys J*, 2013, 765: 131
- 5 Torres G, Fressin F, Batalha N M, et al. Modeling Kepler transit light curves as false positives: Rejection of blend scenarios for Kepler-9 and validation of Kepler-9 d, A super-earth-size planet in a multiple System. *Astrophys J*, 2011, 727: 24

NASA found Kepler-452b, the Earth's bigger and older cousin

WANG Liang, WU XiaoShu & ZHAO Gang

Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

NASA announced the discovery of Kepler-452b detected by the Kepler space telescope. Its size is close to the Earth, and it locates in the habitable zone around a G-class star which is very similar to our Sun. The planet has an orbital period of 385 days and a semi-major axes of 1.05 AU, and receives 10% more flux than the earth. The host star has an effective temperature of 5757K, with the spectral type of G2. It is 11% larger and 1.5 Gyr older than the sun. The planetary system has the closest match to the earth. According to the mass-radius relation, Kepler-452b has a probable mass of $5 M_{\oplus}$, making it another “super-Earth”. However, its accurate mass remain unknown.

extra-solar planet, Kepler-452b, habitable zone, Kepler telescope

doi: 10.1360/N972015-00953