

# NASA 发现“另一颗地球” —— Kepler-452b 解析

王靓, 吴晓姝

中国科学院国家天文台, 北京 100012

**摘要** 2015年7月24日,美国国家航空航天局(NASA)宣布了开普勒空间望远镜发现的一颗新的地外行星——Kepler-452b,因其位于一颗非常类似太阳的恒星周围的“可居住带”中,且半径接近地球,被称为“地球2.0”。本文介绍了开普勒望远镜在系外行星搜寻方面的最新进展,对这颗行星的发现和验证过程进行了详细介绍。

**关键词** 太阳系外行星;类地行星;可居住带

**中图分类号** P157.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.001

## An Interpretation of “Another Earth”——Kepler-452b found by NASA

WANG Liang, WU Xiaoshu

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract** NASA announced the discovery of a new habitable extra-solar planet Kepler-452b, which has the closest match of planet characteristics to Earth. Its host star has a spectral-type of G2, which is the same as the sun. We introduced the latest progress made by the Kepler telescope, and made a detailed explanation of the detection, validation, and habitability of Kepler-452b.

**Keywords** extra-solar planets; Earth-like planets; habitable zone

2015年7月24日,美国国家航空航天局(NASA)召开音频新闻发布会,公布了开普勒空间望远镜在一颗非常类似太阳的恒星周围发现了一颗新的系外行星——Kepler-452b。它的半径只比地球大11%,接收到的来自主星的辐射只比地球高大约10%,因此推测表面温度适宜,位于“可居住带”中,表面可能具备了液态水甚至生命存在的基本条件。这则新闻一经公布就引起了人们的广泛关注,也带动了系外行星研究领域的进一步升温。在我国,Kepler-452b引发了媒体和公众的极高热情,触发了公众对地球环境、人类命运的严肃思考。中央电视台在黄金时间以“善待地球,拯救自己”为题进行了20分钟的报道。那么这颗行星是如何发现的,又是如何被称为“地球2.0”的呢?本文将深入解析Kepler-452b从发现到证认的过程。

### 1 开普勒望远镜

在人类进入太空时代以来,除了著名的哈勃空间望远镜,恐怕没有哪台空间望远镜有“开普勒”如此高的知名度了。作为美国国家航空航天局“发现计划”(Discovery Program)中的一员,开普勒空间望远镜的耗资只有6亿美元,甚至比不上哈勃空间望远镜总耗资的零头,但它近年来做出的一系列发现对公众带来的震撼足可以媲美后者。

开普勒望远镜的前身“地球大小的内行星的频率”计划(Frequency of Earth-Sized Inner Planets,缩写FRESIP)最初是由NASA的工程师William J.Borucki等人在20世纪90年代初提出的<sup>[1]</sup>。当时,天文学家Aleksander Wolszczan和Dale Frail刚刚在一颗“濒死”的恒星——脉冲星周围发现了两颗行星<sup>[2]</sup>,这是人类首次有确切的证据发现太阳系以外的行

收稿日期:2015-08-05;修回日期:2015-08-07

作者简介:王靓,助理研究员,研究方向为系外行星探测,电子信箱:wangliang@nao.cas.cn

引用格式:王靓,吴晓姝. NASA发现“另一颗地球”——Kepler-452b解析[J]. 科技导报, 2015, 33(16): 13-16.

星。但当时没有人确切知道在像太阳这种“正常”恒星周围是否存在其他的“地球”，因此用空间望远镜寻找行星在当时是个非常大胆的提议。在遭到NASA前后4次否决之后，这个方案终于在2001年被批准。这期间两项里程碑式的发现对建造空间望远镜的最终立项起到了决定性的作用：一是1995年瑞士天文学家Mayor和Queloz发现了第1颗环绕类太阳星的系外行星——51 Peg b<sup>[3]</sup>，二是2000年美国天文学家Charbonneau等人确认了第1颗具有“凌星”现象的系外行星HD 209458 b<sup>[4]</sup>。如果一颗行星的公转盘面恰好侧向着我们，那么当行星公转到主星前方，就有一定的几率从恒星的发光圆面前方经过，挡住了一部分主星的光。尽管我们无法分辨出恒星的圆面，但是可以观测到恒星亮度的微小下降，这就是所谓的“凌星”。开普勒望远镜就是通过监测一大批恒星的光度变化，搜寻“凌星”现象来寻找系外行星的。

2009年3月7日，开普勒望远镜发射升空，随后进入尾随地球的一条绕日公转的轨道上。和很多空间望远镜不同，它的观测视野被固定在了一块面积为105平方度的区域。这片天区位于天鹅座方向，是经过精心挑选的。首先，太阳系中

的小行星和柯伊伯带天体在背景恒星前方经过时，会产生虚假的“凌星”信号，因此望远镜需要避开这些天体比较集中的黄道带。其次，视野中的恒星不能过于密集，否则远方的恒星会有较大的几率被一颗前景恒星所遮挡，也会产生大量的虚假信号。这些虚假信号会大大增加甄别真正的系外行星的难度。此外，该区域正是太阳围绕银河系中心公转的前进方向，因此“开普勒”的目标星到银河系中心的距离与太阳接近，与太阳一同位于银河系的“可居住带”中。

开普勒望远镜的有效通光口径是95 cm，与很多地面望远镜比起来不算大，但是由于飞行在地球大气层之上，使其具有了不受大气湍动影响的优势。它就像一架巨大的数码相机，每6秒就用附属的9500万像素的CCD对视场中的目标星进行一次曝光，而后将连续9幅图像在望远镜本身携带的计算机上累加起来，成为一幅“短曝光”图像。每270幅“短曝光”图像再次叠加起来称为“长曝光”图像。由于存储设备和传输带宽的限制，开普勒望远镜只选择性地传回6%的像素（约540万个），这就限制了它所能同时监测的目标星的总数大约为17万。

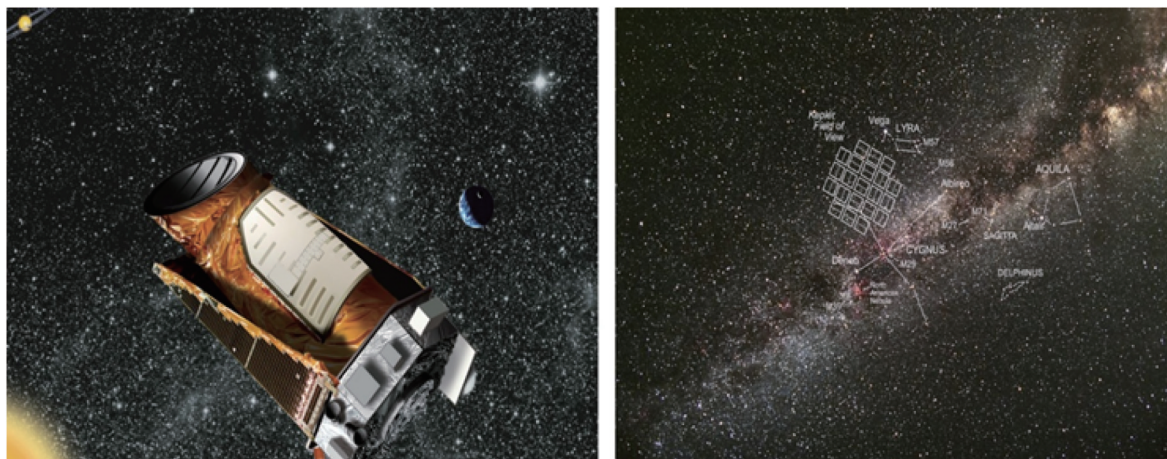


图1 开普勒望远镜(左)及其视场(右)

## 2 发现经过

开普勒望远镜获得的海量恒星的光变曲线用人眼来检查是不现实的，为此，开普勒望远镜团队开发了高度自动化的软件来搜寻可能的凌星行星。起初，Kepler-452b的信号并没有被程序检测出来。2014年5月，开普勒团队测试了最新版的软件，这个版本在寻找直径比较小、周期比较长的行星方面做了优化。结果发现<sup>[5]</sup>，一颗亮度为13等、编号为KIC 8311864的恒星存在凌星信号：每384.8天，亮度下降200 ppm (0.02%)，持续时间为10.5小时。信号的置信度达到了 $9.7\sigma$ ，超过了软件设定的触发阈值 $7.1\sigma$ 。该信号在这颗恒星4年多的光变曲线中只出现了4次。同时，根据预先编纂的开普勒输入星表的记录，恒星KIC 8311864的温度为5578 K，十分接近太阳。这就表明，如果这个信号确实是由一颗行星引

起的，那么它到主星的距离应该和地球到太阳的距离差不多，因此接受到的辐射水平也相当，很可能位于恒星的“可居住带”以内。KIC 8311864就这样走进了人们的视野，并被赋予编号KOI-7016。

开普勒望远镜的设计初衷就是寻找“类太阳星周围可居住带里的类地行星”，KOI-7016自然成为最感兴趣的天体之一。尽管已经通过了第1轮的筛选，接下来天文学家还需要用各种手段对它进行检验，排除凌星信号由其他原因引起的可能性。“开普勒后续观测计划”（缩写为KFOP）就是为了证实这些行星候选体而特别成立的工作组，由15位熟悉不同观测技术的成员组成，每位都是各自领域内的专家。

为了提高测光精度，开普勒望远镜对视场中的目标星采取了散焦拍摄的方法，即CCD没有放在望远镜的焦点上，而

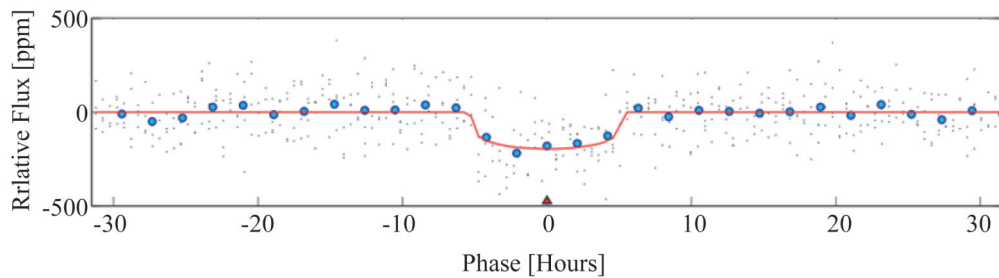


图2 Kepler-452b按照384.84天的周期进行相位折叠后的光变曲线

(黑色点代表观测数据,蓝色实心点是每2.1个小时间隔内进行合并的数据,红色实线是理论拟合,红色三角代表凌星的中心时刻)

是偏离一个很小的距离,使星光分散在大约 $7\times 7$ 像素的面积上。这样做能够避免亮星在CCD上饱和,也能够减轻恒星在CCD上移动带来的光度测量误差。但是这样做就需要在一个相对较大的面积内(通常直径是几个角秒)对亮度进行积分。如此一来,开普勒视场中大部分目标星的亮度都不仅仅是本身的亮度,而是混杂了来自周围天体的光。如果这些混杂的天体恰好有一类食双星,也会造成类似凌星的光变信号。

最容易区分食双星与系外行星的方法是用地面高分辨率成像观测。事实上,开普勒团队先前已经发现一些凌星信号是周期性相互遮挡的双星产生的,这些就需要从行星候选体列表里剔除。反之,如果目标星周围没有找到食双星,那么信号来自行星的可能性就大大增加。高分辨率成像有好几种方法,其中自适应光学系统(AO)以每秒数百次到数千次的频率监测星光被地球大气折射后的波前形状,并在望远镜后端实时改正这种形变。该技术使得地面望远镜在红外波段的成像效果能够媲美空间望远镜。2014年6月,天文学家用坐落在夏威夷的10米口径Keck望远镜,配以自适应光学在近红外的J波段和K波段对KOI-7016进行了观测,结果都显示它是一颗孤立的恒星,没有发现周围存在其他恒星的迹象。

除了恰好位于目标星视线方向的食双星,开普勒望远镜团队还考虑了几种可能引起误判的现象,如果KOI-7016的视线方向上有另外一颗恒星,它有可能与前者有物理联系,处于同一个双星或多星系统中,抑或只是恰好处于同一个视线方向上,那么这颗星就被称为“blender”。有没有可能凌星信号不属于KOI-7016,而是属于这颗“blender”呢?或者引起这个凌星信号的干脆是一颗白矮星或者褐矮星呢?开普勒团队用Guillermo Torres等人提出的蒙特卡洛方法<sup>[6]</sup>对以上几种情况进行了模拟,结果表明,这个凌星信号不属于以上几种“blender”的可能性达到了99.76%,超过了 $3\sigma$ ,因此这颗行星被认为得到了充足的证据验证。研究论文正式发表后,恒星KOI-7016被赋予象征行星宿主恒星身份的正式编号Kepler-452,而它的行星作为这颗恒星周围已知的第1颗也是唯一一颗行星,被命名为Kepler-452b。

### 3 可居住的行星

大多数系外行星都是用它们对主星的影响而间接探测到的,其质量和半径主要依靠与主星的相对比率获得。例如,行星与主星的质量比通过主星视向速度的变化幅度获得,而半径之比则依赖于凌星深度。因此,测量宿主恒星的质量、半径、温度、表面重力等参数对测定系外行星的特征尤为重要。天文学家注意到开普勒输入星表给出的KOI-7016的表面重力加速度值高达 $\log g=4.99$ ,是太阳的3.5倍,据此得到的恒星半径比太阳小21%,这对于一颗温度与太阳接近的恒星来说是比较反常的,因此决定拍摄高分辨率光谱来精确测定这颗恒星的物理参数。2014年5月和6月,开普勒团队分别使用McDonald天文台的2.7米望远镜和Fred Lawrence Whipple天文台的1.5米望远镜获取了KOI-7016的高分辨光谱,分辨本领分别为6万和4.4万。但是由于这颗星本身的亮度太暗,几乎是2米级望远镜所能拍摄高分辨光谱的亮度下限了,光谱信噪比很低,只有31和24。2014年7月,开普勒团队使用10米Keck望远镜拍摄了KOI-7016的光谱,分辨率为6万,信噪比达到了40。利用这条光谱,开普勒团队计算出了主星的物理参数:有效温度 $5757\pm 85$  K,表面重力 $\log g=4.32\pm 0.09$ ,半径为太阳的1.11倍,质量只比太阳大约3.7%,这些数据都显示,这是一颗和太阳极为接近的恒星,只是半径稍大,金属元素的含量比太阳高约60%。根据Dartmouth恒星演化理论的估计<sup>[7]</sup>,它的年龄大约为 $6\pm 2$  Gyr,比太阳要更年轻一些。

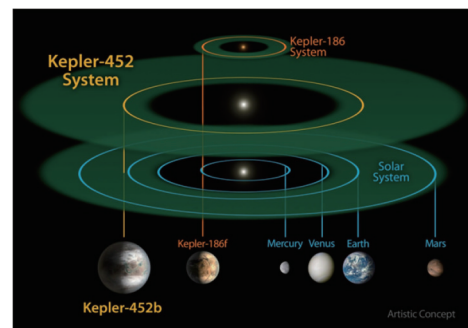


图3 从上至下分别为Kepler-186、Kepler-452以及太阳系行星的轨道示意图。(绿色表示可居住带的范围)

值得一提的是,我国重大科学工程“郭守敬望远镜”(LAMOST)也于2014年9月在巡天中观测了主星 Kepler-452 的低分辨光谱,并据此独立得到了这颗恒星的参数。2010年我国天文学家及国际合作者共同向 LAMOST 科学委员会建议了 LAMOST-Kepler 项目<sup>[8]</sup>,得到批准后正式纳入 LAMOST 银河系巡天项目中,截止到目前已经获得了 1900 多个开普勒行星候选体的光谱。

凌星信号的深度取决于行星遮挡住的恒星圆面的面积,据此计算出行星的半径大约是地球的 1.6 倍,但质量仍然无法确定。根据已知的其他行星建立的半径-质量关系<sup>[9,10]</sup>,可以计算出 Kepler-452b 的最可能质量是地球的 5 倍,属于一类被称为“超级地球”的行星。它所引起的恒星的主星的视向速度振幅大约只有 45 cm/s,如此小的速度变化用现有的技术仍旧很难测量到。因此行星的密度还是一个未知数,也就无法定量地计算它的化学组成,只能估计出由岩石构成的可能性在 49%~62%之间。

恒星周围的可居住带被定义为固态行星表面可以存在大量的液态水的范围。这个概念最初是由华裔天文学家黄授书在 20 世纪 50—60 年代提出的<sup>[11]</sup>,但是关于可居住带的范围如何精确计算,学术界仍然持不同的观点,其中一个观点认为,可居住带的内边缘取决于不会发生“失控温室效应”的最短距离,而外边缘则取决于不会发生“失控冰河作用”的最远距离<sup>[12,13]</sup>。在失控温室效应下,液态水会由于高温完全蒸发,而后被光解为氢原子和氧原子,最终氢原子逃逸到太空中,成为“第 2 个”金星;而在失控冰河作用下,二氧化碳气体会由于低温发生永久性冻结,使得温室效应难以维持,类似于火星上发生的情况。开普勒团队用两种不同的方法估算了 Kepler-452 周围可居住带的范围,结果发现,如果按照最乐观的估计,即根据金星和火星两个极端情况作为限制条件,Kepler-452b 有高达 96.8% 的可能性是位于可居住带里面的。但是按照比较保守的估计,位于可居住带里的几率只有 28%。

由于主星是一颗非常类似太阳的恒星,并且年龄达到 60 亿年,因此这个行星系统代表着我们太阳系将来的样子。根据恒星演化理论,像太阳和 Kepler-452 这样的恒星将在主序阶段度过大约 100 亿年的时间,而后半径在短时间内膨胀,变成红巨星。到了那时,由于光度增加,可居住带的范围也会大大向外移动,Kepler-452b 就会变得太热而不适宜居住。据计算,如果 Kepler-452 系统中不存在其他行星对它施加的引力作用,Kepler-452b 还将有 35 亿年的时间位于可居住带里,而我们的地球还会更长一些。假使人类文明能够延续足够长的时间,我们的后代可以通过观察 Kepler-452b 的演化预言太阳成为红巨星后地球的命运。

#### 4 结论

虽然 Kepler-452b 不是在可居住带里发现的第 1 颗行星,

但却是首次在与太阳相同类型的恒星周围找到的“可居住”行星。人类在宇宙中是否孤独,是否存在地球以外的生命甚至智慧生命,是人类自古以来所思考的“终极问题”之一。近年来我们惊喜地看到,系外行星领域的蓬勃发展已经使人类朝着答案迈出了坚实的一步。从 1995 年首次在太阳系以外探测到类木行星,到发现类太阳星周围可居住带的行星,仅仅过去了 20 年时间,在人类历史上只是很短的一瞬。虽然开普勒望远镜已调整了科学目标,但它在最初的任务中已经找到了 4000 多个行星候选体,其中仍然有 3/4 等待证认,这是一个富庶的金矿,足够天文学家忙碌很多年。从地球大小的行星,到环绕双星公转的行星,再到可居住带里的行星……我们相信,未来几年,开普勒望远镜的数据还将不断地给我们带来新的惊喜。

#### 参考文献(References)

- [1] Borucki W J, Dunham E W, Koch D G, et al. FRESIP: A Mission to Determine the Character and Frequency of Extra-Solar Planets Around Solar-Like Stars [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 241(1): 111-134.
- [2] Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12[J]. *Nature*, 1992, 355: 145-147.
- [3] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, 378: 355-359.
- [4] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star[J]. *Astrophysical Journal*, 2000, 529(1): L45-L48.
- [5] 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[J]. *Astronomical Journal*, 2015, 150(2): 56.
- [6] 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 [J]. *Astrophysical Journal*, 2011, 727(1): 24.
- [7] Dotter A, Chaboyer B, Jevremovic D. The Dartmouth Stellar Evolution Database[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2008, 178(1): 89-101.
- [8] Peter De Cat, Jianning Fu, Xiaohu Yang, et al. LAMOST observations in the Kepler field[DB/OL]. arXiv, 2014, 1411.0913.
- [9] Weiss L M, Marcy G W. The Mass-Radius Relation for 65 Exoplanets Smaller than 4 Earth Radii[J]. *Astrophysical Journal*, 2014, 783 (1): L6.
- [10] Wolfgang A, Rogers L A, Ford E B. Probabilistic Mass-Radius Relationship for Sub-Neptune-Sized Planets[DB/OL]. arXiv, 2015, 1504. 07557.
- [11] Huang S-S. Life Outside the Solar System[J]. *Scientific American*, 1960, 202(4): 55-63.
- [12] Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable Zones around Main Sequence Stars[J]. *Icarus*, 1993, 101(1): 108-128.
- [13] Kopparapu R K, Ramirez R, Kasting J F. Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates[J]. *Astrophysical Journal*, 2013, 765 (2): 131.

(责任编辑 李娜)