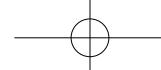


# 我的天文巡天生涯 之系外行星

□ 孙国佑



**孙** 国佑，浙江省乐清人，星明天文台专家组组员，中国天文学会、浙江省天文学会会员，546756号小行星以他的名字命名。热衷于天文巡天发现，曾发现彗星、小行星、系外行星、超新星、新星、亮红新星、矮新星、类新星、强引力透镜、变星、行星状星云、多恒星系统、疏散星团和双星等众多新天体。还曾获得2015年度埃格·威尔逊奖，PSP公众超新星巡天发现奖等奖项。



宇宙这么大，除了地球，还有其他地方有生命存在吗？古往今来，哲学家与天文学家都对系外行星有着各种猜想。寻找地外行星的工作从上世纪80年代开始有了哲思范围以外的发展，终于在90年代，取得了科学突破。两位瑞士天文学家米歇尔·麦耶（Michel Mayor）和他的研究生迪迪埃·奎洛兹（Didier Queloz），为寻找太阳系之外的行星做出了开创性的工作，在1995年他们提出了一种叫做径向速度法的方

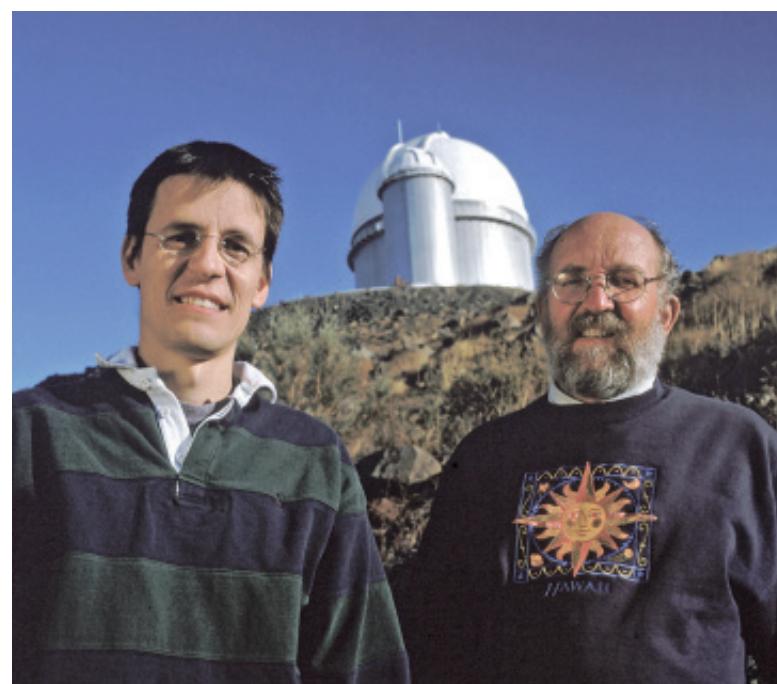


图1 迪迪埃·奎洛兹（左）与米歇尔·麦耶（右）。

法，在飞马座51恒星周围发现了一颗轨道周期为4.2天的行星，这就是我们熟知的飞马座51b（51 Pegasi b），这个发现开创了一个天文新时代，他们也因此荣获2019年度诺贝尔物理学奖。

### ◆ 什么是系外行星

系外行星泛指在太阳系以外的行星，英语称为extrasolar planet或exoplanet。国际天文学联合会（IAU）在2006年定义的“行星”一词仅包含太阳系，因而不适用于系外行星。不过国际天文学联合会也有涉及系外行星的定义，该定义于2001年颁布并在2003年进行了修改。其表述如下：

1. 真实质量低于氘核聚变所需质量下限（对于类似太阳金属丰度的天体，该质量为木星质量的13倍），且围绕恒星或恒星遗骸公转的天体称为“行星”。其质量/尺度下限与太阳系中使用的行星定义的质量/尺度下限相同。

2. 无论形成方式和位置如何，实际质量超过氘核聚变所需质量下限的亚恒星天体称为“褐矮星”。

3. 年轻恒星团中质量低于氘核聚变所需质量下限的自由漂浮天体不叫“行星”，而称为“亚褐矮星”（或其它更合适的名称）。

实际上，随着新的系外行星的不断发现，以上定义也显现出其局限性。有的天文学家建议根据行星形成机制将系外行星和褐矮星以及亚褐矮星区分开来。

## ◆ 系外行星的观测手段

随着技术的进步，人类已经掌握了多种手段进行搜寻系外行星，常用的方法有径向速度法、凌日法、直接成像法和微引力透镜法等等。

### 径向速度法（Radial Velocities，简称RV）

径向速度法也被称为多普勒光谱法。这种方法依赖于观测恒星的光谱来寻找“摆动”的迹象，因系外行星与宿主恒星之间的引力作用，在它们运行到不同相对位置的时候，系外行星会向不同的方向“拉扯”宿主恒星，从而导致恒星光谱发生红移或蓝移。质量越大、离宿主恒星越近的行星这种“拉扯”的效应越明显。从本质上讲，径向速度法不在于寻找行星本身，而在于观察恒星的运动迹象。通过光谱观测来测量恒星的谱线由于多普勒效应而移位的方式，即恒星光谱红移/蓝移的变化，这些变化表明恒星受到行星的引力作用向远离(红移)或靠近(蓝移)地球。根据恒星径向速度的变化，天文学家可以确定行星系统的存在并计算行星的质量。在凌日法大规模运用之前，一直是人类探索系外行星的最重要的手段。

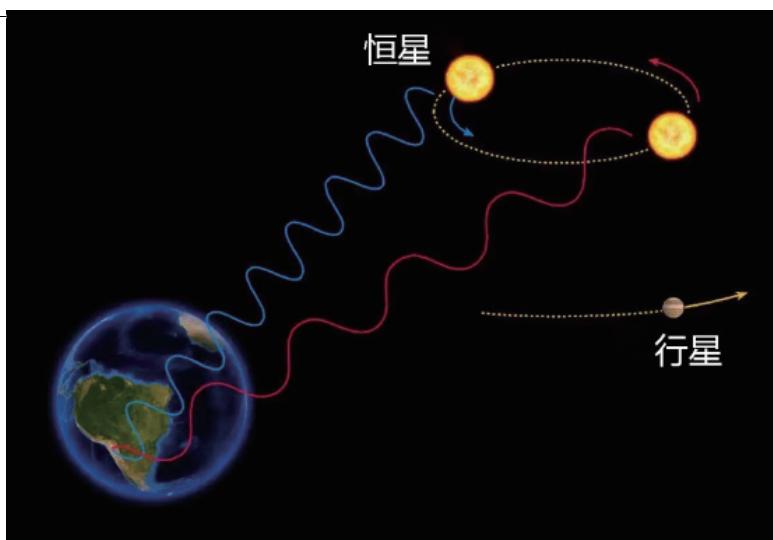


图2 径向速度法原理

### 凌日法（Transit Photometry）

也称凌星法或掩食法，是一种根据产生凌星现象时分析恒星亮度变化从而推算行星轨道及参数的一种观测方法。系外行星通常隐没在宿主恒星发出的光芒中，无法被我们直接观察到。而凌日法是一种间接推断系外行星存在的方法，如果一颗行星从宿主恒星盘面的前方经过时（这一过程称为“凌”），将会观测到恒星的亮

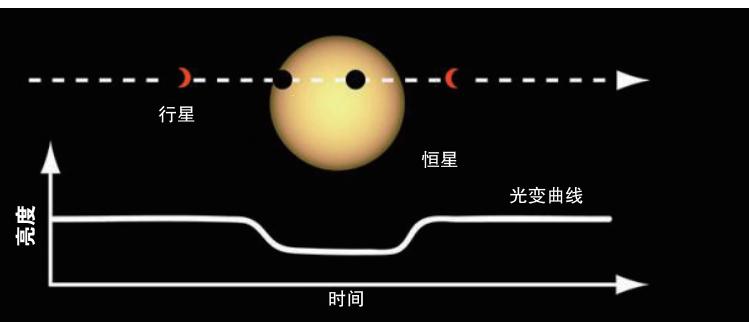


图3 凌日法原理

度略微下降。而这颗恒星变暗的程度取决于行星相对于恒星的大小以及行星与恒星的距离。凌日法是目前应用最广泛的观测系外行星的方法，但凌日法也有其局限性，因为凌日法只能确定行星的半径，而无法确定其质量，凌日法发现的候选体，仍需要使用径向速度法或统计学方法等其他方法来确认质量。

### 直接成像法（Direct Imaging）

也叫直接影像法，顾名思义就是直接对系外行星进行成像，但由于行星反射的光子太少，加上恒星的掩盖，直接拍摄行星的图像非常困难。这需要行星本身的尺寸要足够大，与宿主恒星的距离还不能太近，否则会被其光芒掩盖，更重要的是要有一台足够强大且配有日冕仪的望远镜才能办到。

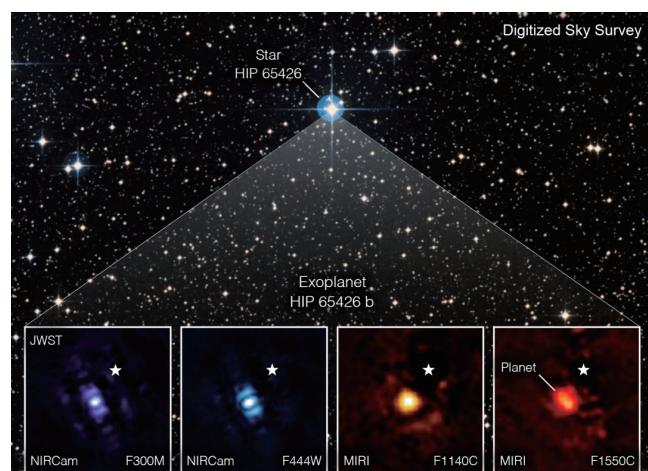


图4 JWST上的NIRCam和MIRI仪器直接拍到的系外行星HIP 65426 b

### 微引力透镜法（Gravitational Microlensing）

微引力透镜法是测量恒星光度变化来探测系外行星的一种方法。引力透镜是爱因斯坦广义相对论预言的一种光学效应。由于时空在大质量天体附近会发生畸变，光线在经过大质量天体附近时会发生弯曲。如

果在观测者到光源的直线上有一个大质量的天体，则观测者会看到由于光线弯曲而形成的一个或多个像，这种现象称之为引力透镜现象。如果前景的天体质量较小，光线的偏转也很小，这时产生的多个像将难以区分，视觉效果就是背景恒星的光度有明显的加强。当前景恒星带着系外行星恰好穿过某一背景恒星时，背景恒星的光度会有所增长，在光变曲线上产生一个峰。系外行星的质量相对前景恒星较小，产生的峰也会比较小，但仍可以观测到原先光变曲线上某个位置

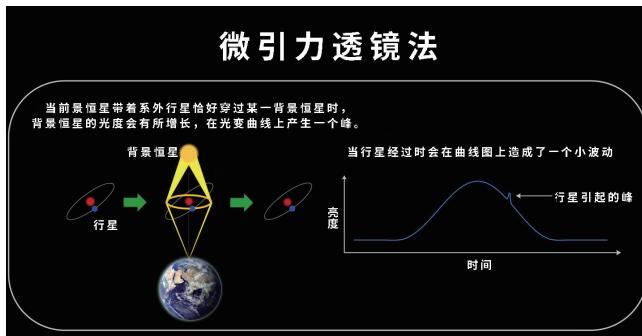


图5 微引力透镜法原理

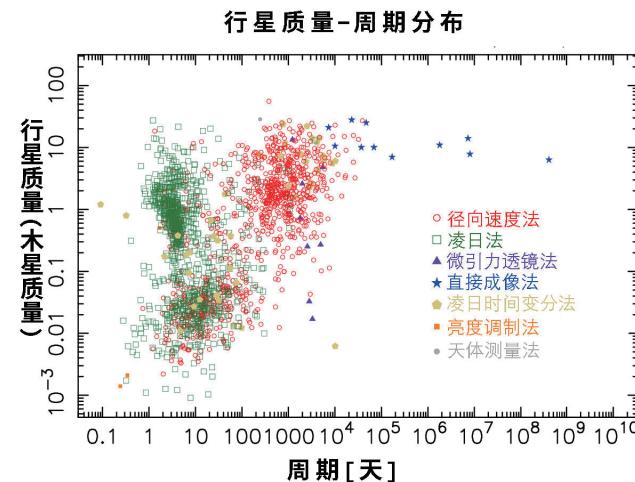
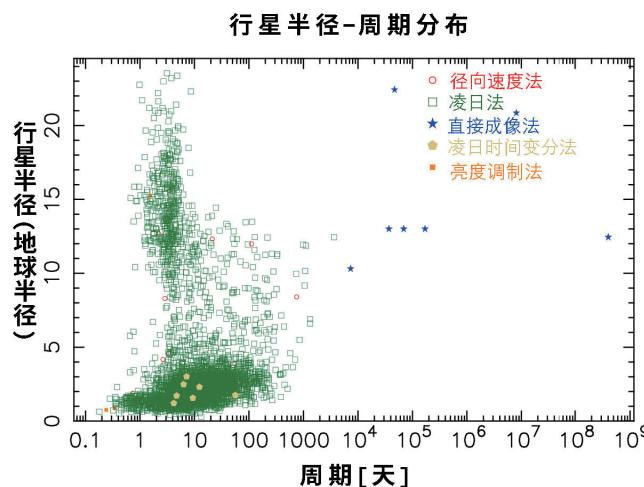


图6 已发现系外行星半径-周期分布、质量-周期分布

上又叠加了一个更小的峰。我们便可以通过光变曲线产生的二级峰来确定是否有系外行星的存在。

除了以上几种最主流的方法外，还有天体测量法，凌日时间变分法，亮度调制法等多种方法，不过这些方法只有一些零星发现，数量稀少。

截止到2023年2月6日，已确认的系外行星总共有5243颗，其中通过凌日法发现的就有3941颗。另外径向速度法发现1025颗，直接成像法发现62颗，微引力透镜发现152颗。（数据来源NASA系外行星档案[http://https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)）

## ◆ 我的系外行星探索之路

发现一颗系外行星一直是我的梦想，在10年前我就开始探索，利用自有设备进行系外行星发现的可行性，当时我使用星明天文台的设备观测了很多已知的系外行星。

经过几年的经验积累，我对于系外行星和变星的认知水平有了较大的进步，并解决了一些非常关键

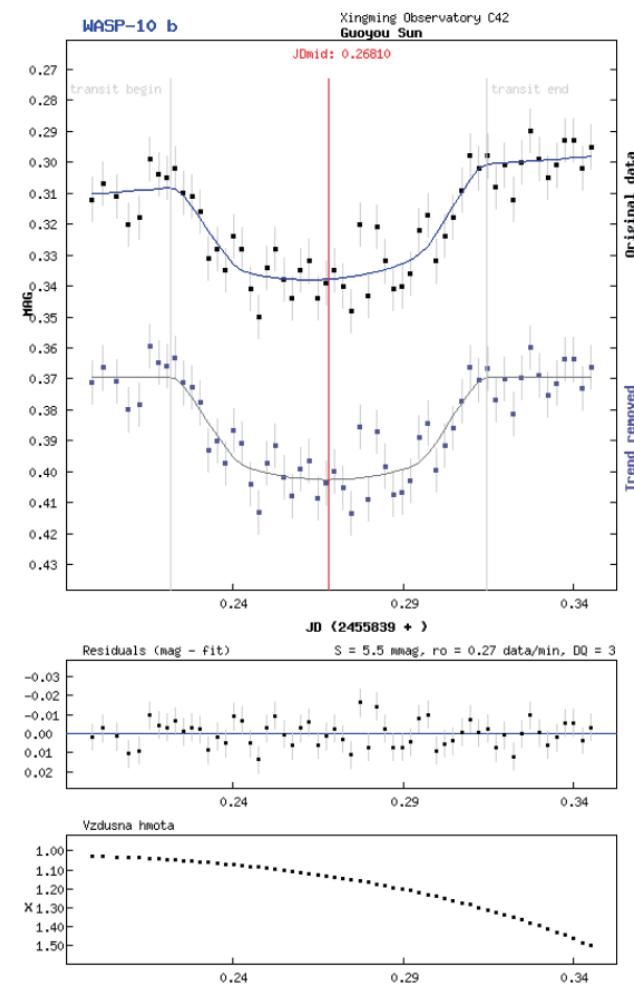


图7 2011年笔者观测WASP-10 b得到的结果

的问题，我和团队小伙伴们也在稳步的推进我们自己的系外行星搜寻项目。但当得知美国宇航局的凌星系外行星巡天卫星（TESS）即将发射升空，系外行星搜寻即将迎来后开普勒时代时，让我感到了极大的压力。因为TESS是做普查式的巡天发现，这将极大的压缩天文爱好者的系外行星搜寻之路。这时我意识到我们自己的系外行星搜寻项目必须尽快上马。在团队小伙伴们们的通力合作下，我们很快上马了星明天文台系外行星及变星搜寻项目（系外行星和变星的发现原理是相同的，都是通过对恒星长时间的测光来发现）。在这期间我们变星发现有了重大的进展，实现了零的突破，并为我们后续的变星搜寻项目奠定了坚实的基础。但很可惜的是在系外行星方面我们进展非常缓慢。事后我们进行了总结，我们发现现有设备观测精度不够高，较难达到系外行星搜寻的要求，通过凌日法我们虽勉强可以区分出恒星光变曲线中2%左右的亮度变化，但绝大部分的系外行星凌星造成的宿主恒星的亮度变化要远低于这个水平，个人认为可以区分1%以内的光变是一个基本的门槛。再者可使用的软件比较少，没有自动化的软件，搜寻效率实在太低，项目运行了大半年后被迫停止。

无法通过自有设备发现系外行星让我很沮丧。心想难道系外行星发现的梦想真的就没办法实现了吗。就在这时我偶然间看到了一篇论文，得知国外一些天

### ◆超链接

宇宙动物园zooniverse是全球最大、最受欢迎的公众科学平台，最早是通过星系动物园发展而来，在这个平台有包括天文、物理、化学等等各式各样的公众科学项目。

文爱好者，通过宇宙动物园旗下的科学公众项目TESS行星猎人计划（简称PHT）发现了新的系外行星。我了解后发现，PHT是宇宙动物园旗下一个非常优秀的科学项目，这个项目是由牛津大学天体物理学博士诺拉·艾斯纳（Nora Eisner）发起，旨在通过公众力量深度挖掘TESS数据来发现系外行星，人工筛查的方式可以发现很多电脑程序无法发现的系外行星候选体。另外PHT计划并不是TESS官方的巡天项目，是一个独立的第三方公众巡天项目。该项目会处理TESS的原始数据并将数据分发给参与者，参与者可以分析并发现系外行星候选体。如果参与者发现的系外行星候选体被证实是真实的系外行星，参与者将被邀请成为相关论文的合著者。这让我又燃起了希望，这或许是目前唯一可以走通的路。

从2019年开始，我深度参与了TESS行星猎人计划，截止到2022年我在PHT计划上已经分类了超过4万条光变曲线，这期间也协助发现了很多的系外行星候

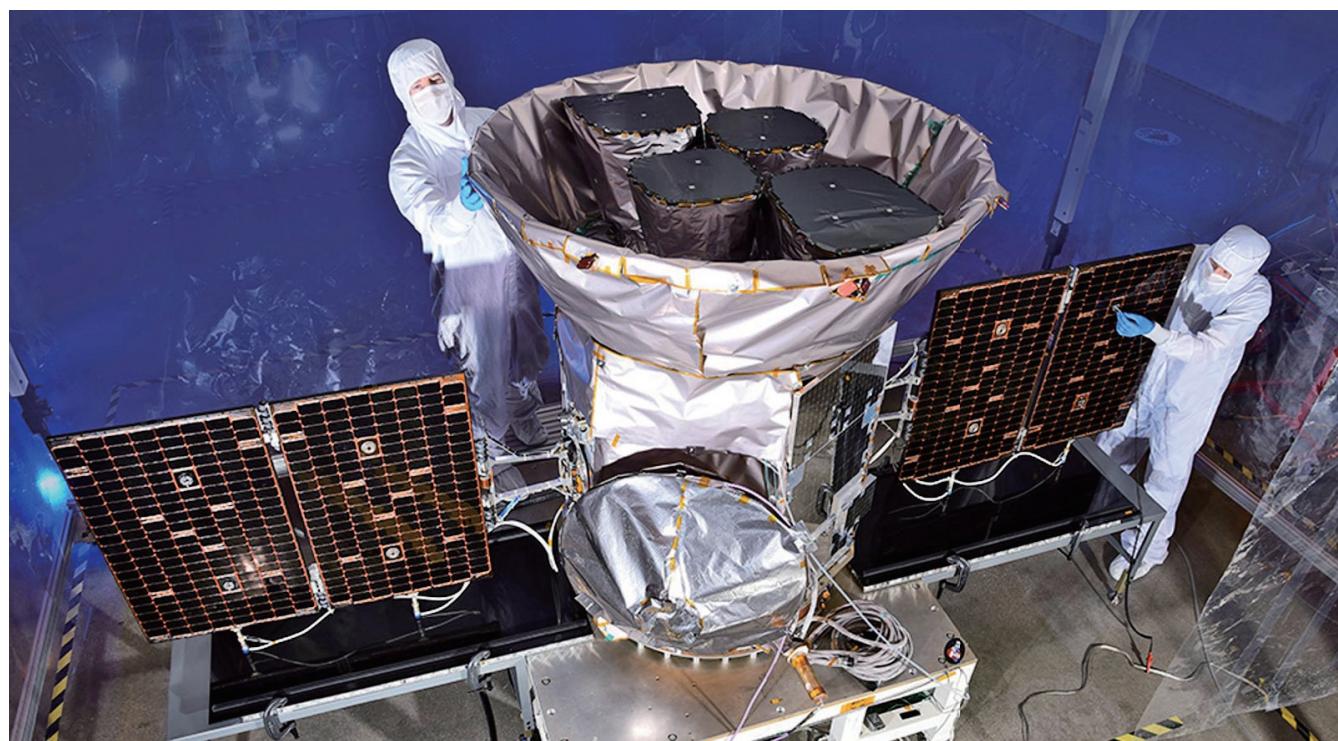
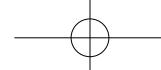


图8 美国宇航局凌星系外行星巡天观测卫星TESS



### TOI-4562b: A Highly Eccentric Temperate Jupiter Analog Orbiting a Young Field Star

Alexis Heitzmann<sup>1,11</sup>, George Zhou<sup>1</sup>, Samuel N. Quinn<sup>2</sup>, Chelsea X. Huang<sup>1</sup>, Jiayin Dong<sup>3,4,5,37</sup>, L. G. Bouma<sup>6,38</sup>, Rebekah I. Dawson<sup>4,5</sup>, Stephen C. Marsden<sup>1</sup>, Duncan Wright<sup>6</sup>, Pascal Petit<sup>7</sup>, Karen A. Collins<sup>2</sup>, Khalid Barkaoui<sup>8,9,10</sup>, Robert A. Wittenmyer<sup>10</sup>, Edward Gillen<sup>11,12,39</sup>, Rafael Brahms<sup>13,14</sup>, Melissa Hobson<sup>14,15</sup>, Coel Hellier<sup>16</sup>, Carl Ziegler<sup>17</sup>, César Briceño<sup>18</sup>, Nicholas Law<sup>19</sup>, Andrew W. Mann<sup>19</sup>, Steve B. Howell<sup>20</sup>, Crystal L. Gniipa<sup>20</sup>, Colin Littlefield<sup>20,21</sup>, David W. Latham<sup>2</sup>, Jack J. Lissauer<sup>22</sup>, Elisabeth R. Newton<sup>23</sup>, Daniel M. Krolikowski<sup>24</sup>, Ronan Kerr<sup>24</sup>, Rayna Rampalli<sup>25</sup>, Stephanie T. Douglas<sup>25</sup>, Nora L. Eisner<sup>26</sup>, Nathalie Guedi<sup>27</sup>, Guoyou Sun<sup>27</sup>, Martin Smit<sup>27</sup>, Marc Huten<sup>27</sup>, Thorsten Eschweiler<sup>27</sup>, Lyu Abe<sup>28</sup>, Tristan Guillot<sup>28</sup>, George Ricker<sup>29</sup>, Roland Vanderspek<sup>29</sup>, Sara Seager<sup>29,30,31</sup>, Jon M. Jenkins<sup>20</sup>, Eric B. Ting<sup>20</sup>, Joshua N. Winn<sup>32</sup>, David R. Ciardi<sup>33</sup>, Andrew M. Vanderburg<sup>29,34</sup>, Christopher J. Burke<sup>29</sup>, David R. Rodriguez<sup>35</sup>, and Tansu Daylan<sup>32,36</sup>

图9 TOI 4562 b论文截图

| Source                        | Heitzmann et al. 2022                              |
|-------------------------------|--|
| $a/R_\star$                   | 147.40 <sup>+1.44</sup> <sub>-1.26</sub>           |
| $T_{\text{eq}} (\text{K})$    | 318±4  |
| $b$                           | 0.60 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>             |
| $\omega (\text{deg})$         | 60±9   |
| $M_p (\text{M}_\oplus)$       | 732 <sup>+152</sup> <sub>-149</sub>                |
| $M_p (\text{M}_{\text{Jup}})$ | 2.30 <sup>+0.48</sup> <sub>-0.47</sub>             |
| $e$                           | 0.76±0.02  |
| $i (\text{deg})$              | 89.06±0.04   |
| $P (\text{days})$             | 225.11781 <sup>+0.00025</sup> <sub>-0.00022</sub>  |
| $\rho (\text{g/cm}^3)$        | 2.06 <sup>+0.42</sup> <sub>-0.44</sub>             |
| $R_p (\text{R}_\oplus)$       | 12.53±0.15   |
| $R_p (\text{R}_{\text{Jup}})$ | 1.118 <sup>+0.014</sup> <sub>-0.013</sub>          |
| $R_p/R_\star$                 | 0.099800 <sup>+0.000840</sup> <sub>-0.000920</sub> |
| $K (\text{m/s})$              | 106 <sup>+24</sup> <sub>-26</sub>                  |
| $a (\text{au})$               | 0.768±0.005  |
| $\delta (\%)$                 | 0.99610 <sup>+0.01670</sup> <sub>-0.01840</sub>    |
| $T_{14}$ (hours)              | 4.32±0.04  |
| $T_c$ (days)                  | 2458456.87168±0.00101                              |
| $s (S_\oplus)$                | ---  |

图10 系外行星TOI 4562 b 的参数 图片来源：NASA系外行星档案

选体。但系外行星证认是一个非常复杂的过程，TESS项目运行已经超过4年，截止到2023年2月21日，已发现系外行星候选体6176颗，但到目前获得证认的只有291颗，进度相当缓慢，我参与了数年的PHT计划都没有任何成果落地，我一直期待着我发现的系外行星候选体早日获得证认。

经过几年的努力，2022年7月喜讯终于传来，诺拉·艾斯纳博士给我发来邮件，告诉我澳大利亚南昆士兰大学的一个团队撰写了一篇关于系外行星TOI 4562 b的论文（TOI 4562 b是绕着一颗年轻的恒星运行的高偏心率类木行星，半径约为1.118倍木星半径，质量约为2.3倍木星质量，周期长达225.11781天），因为我是

该系外行星候选体的发现者之一，特邀请我成为该论文的合著者。这篇论文于2023年1月24日被学术期刊The Astronomical Journal接收，这意味着我用了3年多的时间，终于成功实现了发现系外行星的梦想，我也有幸成为国内第一位发现系外行星的天文爱好者，感谢诺拉·艾斯纳博士和PHT团队。

这几年通过参与TESS行星猎人计划，我学习到了很多系外行星的知识，渐渐地学会了TESS原始数据的处理方法，一年前我决定开始自行处理TESS的数据进行分析搜寻系外行星，经过不懈努力，我成功发现了一批系外行星候选体，也有不少候选体获得了TOI编号，即TESS项目组感兴趣的候选体。我一个人独自进行数据处理效率不高，为了提高效率尽可能多发现一些系外行星候选体，今年7月我组建团队启动了全新的星明天文台系外行星搜寻项目，简称XESP，项目专门从事系外行星的搜索发现。主要挖掘TESS、开普勒等公共项目数据及星明天文台自有数据寻找系外行星候选体，并利用星明天文台各类型望远镜进行后随观测。团队成员均是有丰富经验的星明天文台核心成员，依靠这个优秀的团队，我们可以在1周内对TESS发布的一整个扇区两万条恒星光变曲线进行分类，效率远超同行。经过几个月努力，我们已经发现上报了41颗候选体，目前已有24颗候选体获得了TOI编号，数据详见 <http://xjltlp.china-vo.org/xesp.html>，这些发现有望在不久的将来被证认。

星明天文台系外行星搜寻项目已渐入佳境，目前正在顺利开展中。虽然目前是依靠分析TESS的数据来获得发现，但我们不会放弃利用自有设备发现系外行星的梦想，待条件成熟我们一定会重启自有设备的系外行星搜寻，祝愿我们早日梦想成真。■

图片来源：ESO；NASA；wikipedia

（责任编辑 李时雨）