

寻找另一个地球

周济林[†] 刘慧根 谢基伟

(南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

2021-01-28收到

[†] email: zhoujl@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210302

Searching for “another Earth”

ZHOU Ji-Lin[†] LIU Hui-Gen XIE Ji-Wei

(School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

摘要 系外行星尤其是宜居行星的搜寻与刻画, 是天文学研究的热点前沿问题。寻找另一个地球, 是回答“生命如何起源?”, “人类是否孤独?”等重大科学问题的关键。文章结合理论和观测, 对现有的行星形成演化理论和系外行星探测方法做了简要介绍, 并说明现有的探测技术很难探测到“另一个地球”。此外, 主流的探测方法, 如视向速度法、凌星法, 都是通过恒星变化探测行星, 属于间接探测。未来的系外行星刻画需要直接获取来自行星的光子, 因此直接成像是未来系外行星探测的趋势。合成孔径光干涉成像法可以同时实现高对比度和高空间分辨率, 未来可用于对“另一个地球”的直接成像。中国提出的“觅音”计划, 有望首次实现系外行星的光干涉成像, 在寻找“另一个地球”上取得重大突破。

关键词 系外行星, 宜居带, 直接成像, 光干涉

Abstract The detection of exoplanets, especially the habitable planets, is a hot issue. Searching for “another Earth” is a milestone to answer some crucial scientific issues, e.g. “How was life initiated?”, “Are we alone in the universe?”. In this article, we briefly introduce both the general theories of planet formation and evolution, and different detection methods. Neither the radial velocity or transit method, currently the most popular methods for finding exoplanets, can detect another Earth in another solar system. To characterize exoplanets in the near future, direct imaging is necessary, instead of indirect detection through seeing the changes in their star’s motion. Interferometry via synthetic apertures can achieve both high contrast and high angular resolution, thus it is thought to be the most probable way to image another Earth. China has proposed the “Miyin” project, which aims to be the first to image exoplanets via interferometry, and will try to make a significant breakthrough in finding another Earth.

Keywords exoplanet, habitable zone, direct image, interferometry

两位瑞士科学家 Michel Mayor 和 Didier Queloz 因在 1995 年发现首个围绕类太阳恒星运动的行星, 而分享了 2019 年的诺贝尔物理学奖。太阳系外行星(简称系外行星)的发现, 使人类向认识自身起源及在宇宙中的地位迈出了重要的一步。

在地球近 46 亿年的演化历史中, 最早的地球生命证据是大约 35 亿年前的微生物。“地球上的

生命是如何产生的?”, “宇宙中是否还存在其他有生命的星球?”等问题一直是科学家们的重大关切。美国《科学》杂志在建刊 125 周年时提出了 125 个最具挑战性的科学问题, 其中第 11 个问题是“地球生命在宇宙中是否独一无二?”^[1]。该问题也是美国航空航天局在 2013 年制定的未来 30 年天体物理路线图致力解决的第一大问题。

要回答地球上的生命在宇宙中是否唯一，首先要了解像地球这样适宜生命生存的类地行星在宇宙中是否还存在？从20世纪末开始，天文学家开始了系外行星探索之旅。经过四分之一世纪的努力，人类对系外行星的认识有了飞跃。

1 行星是普遍存在的

说到行星，必须了解行星是从哪里来的。根据现代行星形成理论，行星孕育在恒星早期分子云坍缩形成的原行星盘^[2]。由于角动量守恒，坍缩中的原恒星将不可避免地在其赤道附近形成原行星盘。由于向主星吸积以及盘的粘滞发热主要在红外波段，通过红外望远镜，例如美国的空间红外望远镜Spitzer，可以观测到恒星光谱中由原行星盘产生的红外超现象。原行星盘的物质大致可以分成两类：气体(氢氦气体分子)和重元素物质(氢氦分子之外的所有物质)。根据太阳大气成分分析，形成太阳系的原始星云中气体和重元素物质之比大约为100:1。观测表明，原行星盘的质量范围大约为主星质量的0.1%—10%，中值在1%左右^[3]。

行星形成主要经历4个过程^[4]：

(1)重元素尘埃物质通过分子间作用力和引力不稳定性吸附生长到厘米级颗粒，经过冲流不稳定性(streaming instability)、涡旋、雪球生长^[5]等机制跨过米级障碍，在1万年的时间尺度内，在原行星盘中间层形成千米级别(10^{15} — 10^{19} kg)的星子；

(2)星子相互碰撞，通过雪崩(runaway)和寡头(oligarchic)生长等过程，在1—10万年之间成长到水星到火星量级(10^{23} — 10^{24} kg)的行星胚胎；

(3)当胚胎质量大于某一临界质量(约10个地球质量)，在引力作用下经过数百万年时间的准静态气体吸积后，气体快速雪崩吸积，形成数百地球质量大小的气态巨行星；

(4)在主星的光致蒸发、星风等过程的作用下，原行星盘在约3百万—1千万年内消失，残余的行星胚胎经过相互之间的巨型碰撞并合，在1千万—1亿年间形成类地行星(10^{24} — 10^{25} kg)。

据观测统计，原行星盘的大小可以到几十至上百个天文单位(AU，日地平均距离，1 AU= 1.5×10^8 km)。如此大的范围使一个原行星盘足可以形成多个行星，例如太阳系就至少形成八个大行星。行星形成后在原行星盘或残余星子盘的作用下，行星会发生大尺度的迁移。根据大回迁(grand tack)和尼斯(Nice)模型，历史上太阳系大行星发生过两次比较大的迁移。

大回迁会对太阳系大行星轨道结构、物质分布产生重要影响(图1)，可能导致行星进入轨道共振，或被散射出系统，形成游荡的行星。

除了迁移、散射这些短时间不稳定性，行星系统在相互引力摄动下轨道将发生长期动力学不稳定性，特别是轨道偏心率的增加^[7]。例如，太阳系八大行星的运动是混沌的^[8]。此外，由于恒星是有寿命的，行星系统最终的形态可能与其长期存在的阶段会大不相同。例如太阳的寿命在100亿年左右，目前处于50亿年的青壮年。再过50亿年左右，

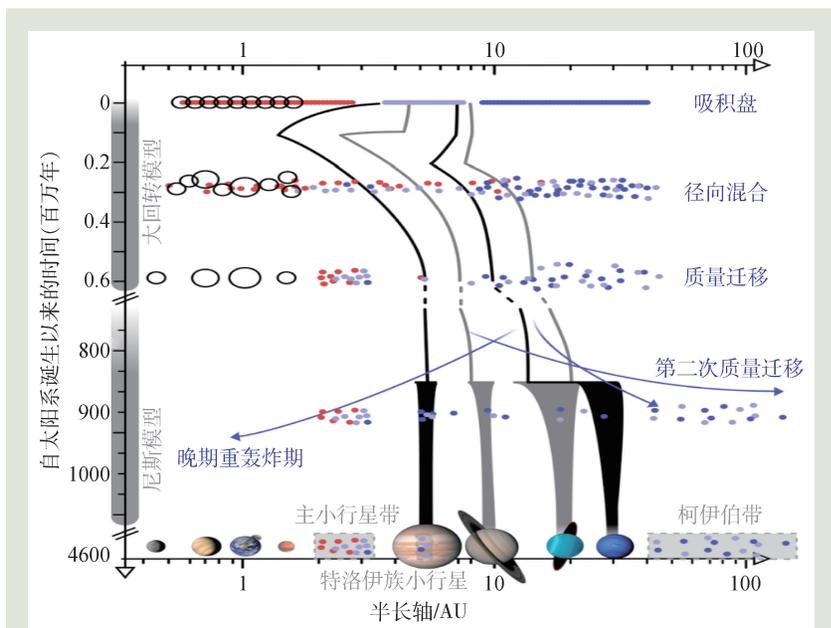


图1 行星迁移对太阳系内物质分布会产生影响^[6]。木星形成后经过向内和向外两次大迁移，带动太阳系大行星轨道发生变化以及太阳系物质的混合

太阳内部的氢燃烧完了，太阳将坍缩后膨胀，抛出近一半的质量，自身演化成白矮星，膨胀气体将吞噬地球以内轨道，导致地球不再宜居。因此，寻找另外一个地球是必要的。

2 探测系外行星之困难与历程

从上述行星形成理论看，伴随着每个中小质量恒星的形成，行星的形成是普遍的，并且在相当长的恒星寿命中，行星系统是相对稳定的。那么，为什么直到20世纪末，人类观测到的行星仅仅局限在太阳系呢？原因主要有两点。

一是相比恒星，行星的温度要低得多，自身热辐射非常小。以太阳系为例，木星温度约为200 K，而太阳表面温度为5800 K，根据 Stefan—Boltzmann 定律， $F=\sigma T^4$ ，单位面积的辐射流量，木星是太阳的 1.4×10^{-6} ，再考虑木星半径是太阳半径的约1/10，放在离地球相同的距离上，望远镜接收到的木星热辐射光度是太阳的约1亿分之一。如果考虑观测太阳—地球系统，地球半径约是太阳的1/100，因此望远镜接收到来自地球的热辐射光度只有太阳的1百亿分之一，亮度十分微弱。

二是行星不仅暗，从远处看它们与宿主恒星的张角太小。离我们最近的恒星——比邻星，距离太阳系4.2光年(1光年= 9.46×10^{12} km= 6.3×10^4 AU)，其最近发现的一颗行星 Proxima b，距离主星0.0485 AU，两者之间的角距离约为0.04角秒，这相当于2 m旗杆在10000 km的张角。要探测到来自 Proxima b 自身光子(直接探测)，可以类比为从南京看北京(1000 km)奥运会火炬旁0.2 m处一只亮度为火炬千万分之一的萤火虫。因此目前为止，即使对太阳系近邻恒星的系外行星进行直接探测都是非常困难的。

鉴于直接探测的困难，科学家试图从系外行星对主星的影响上来推断系外行星的存在，也即间接探测。由于行星的存在，宿主恒星将围绕恒星与行星的公共质心做周期运动，假定行星在圆轨道上运动，恒星的视向速度振幅为：

$$K = \mu(2\pi r/P),$$

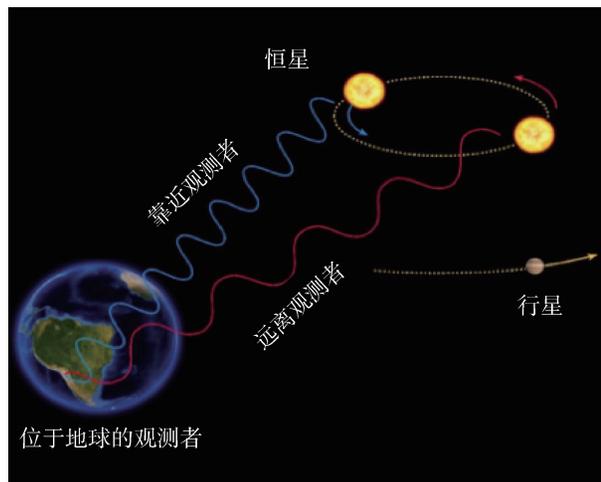


图2 视向速度法探测系外行星的原理(图片来源于欧洲南方天文台)

其中 r 为行星轨道长径， μ 为恒星行星质量比， P 为行星公转周期。以太阳系为例，木星引起的太阳视向速度振幅为12.7 m/s，地球引起的太阳视向速度振幅仅0.09 m/s。

通过观测恒星的特征谱线的多普勒频移(图2)，当恒星远离观测者时光波被拉伸，波长变长或频率变低，称为红移；恒星靠近观测者时光波被压缩，波长变短频率变高，发生蓝移。该变化的周期也就是行星运动的周期，通过振幅可以得到行星的最小质量($M\sin i$ ， i 为视线方向与轨道面法向的夹角)。这种方法被称为视向速度方法。

Mayor和Queloz在1995年正是利用视向速度法探测到了围绕飞马座51的行星(称为飞马座51b)^[9]。该系统离太阳系约50光年。飞马座51b非常奇特，质量虽和木星相当，但与恒星的距离只有木星与太阳距离的百分之一，以至于4.2天就能绕恒星公转一圈，环境温度高达1000多度，因此被称为热木星，太阳系是不存在这类行星的。热木星飞马座51b的发现颠覆了人类对行星系统的认识，开启了系外行星研究的新时代。

视向速度方法是目前最常用的系外行星间接探测方法，原理是恒星与行星在万有引力作用下，共同围绕质心运动，恒星在视线方向上展现出周期性运动特征，通过探测恒星的多普勒频移效应，可以探测到行星的存在。但恒星多普勒频

移的振幅小到一定范围以下(1 m/s以下), 恒星自身的震动会掩盖行星运动引起的平移, 这也限制了目前视向速度方法的探测极限。由于1 AU处的类地行星对于太阳质量的主星引起的振幅为0.1 m/s, 视向速度方法很难探测类太阳的宜居带(1 AU附近)行星。同时, 由于需要对单个恒星长期观测, 效率比较低, 特别是周期在10年以上的长周期行星。到2020年6月为止, 国际上视向速度方法共探测到820颗系外行星。

探测系外行星的间接方法还有凌星法(Transit)、微引力透镜法、脉冲星计时法等, 其中效率最高、目前取得成果最多的是凌星法。凌星是指行星在视线方向上穿过恒星表面而遮住了部分恒星光的现象。因为行星相对恒星发光黯淡, 行星挡住部分恒星时, 星光会比平时暗一些。通过恒星亮度的变暗程度可以间接推断行星的相对大小。如图3所示, 行星越大, 能遮住的恒星面积

越大。比如地球半径是太阳半径的百分之一, 那么地球能遮住太阳万分之一的面积, 外星人在地球凌日时就会发现太阳光比平时下降了万分之一。地面的望远镜只能看到类木行星凌星, 地球大小的系外行星凌星要靠空间望远镜。美国国家航空航天局的开普勒太空望远镜是凌星法探测系外行星的成功典范, 2009年发射后开始凝视天鹅座附近的区域, 到2018年退役时, 共发现了近3000颗系外行星和另外3000多颗发生凌星现象的疑似行星, 重要的发现包括第一个有多个系外行星的系统(Kepler-9系统), 第一个最像地球的岩质行星(Kepler-10b), 第一个环境温度允许液态水存在的宜居带行星(Kepler-22b), 等等。这些系外行星改变了人类对世界的认识, 使人类意识到行星是普遍存在的, 而且千姿百态多种多样。

我国的系外行星研究虽然起步晚, 但是近些年发展迅速, 研究队伍也不断壮大, 国内很多高校和天文机构都开始涉足系外行星的研究, 包括中国科学院国家天文台、南京大学、中国科学院紫金山天文台、中国科学院云南天文台、北京大学、清华大学、中山大学、山东大学、中国科学院南京天文光学技术研究所和极地研究中心等。其中国家天文台利用北京2.16 m望远镜发现了围绕一颗红巨星的系外行星HD173416b和

多颗褐矮星^[10]。南京大学系外行星团队通过分析南极2016年的观测数据, 发现了100多个系外行星候选体^[11]; 对Kepler太空望远镜的数据进行动力学分析, 确认了几十颗系外行星^[12, 13]。此外, 南京大学还将在四川稻城建造“南京大学时域天文阵列(TIDY)”, 主要用于系外行星搜寻, 观测设备包括6台望远镜: 1台口径1 m、3台口径30 cm、1台口径18 cm的大视场望远镜以及1台口径30 cm的小视场后随观测望远镜。TIDY单次观测可覆盖336平方度的天区, 预计对亮于12等的恒星达到千分之一左右的测光精度, 有能力探测到类木行星和类海王行星。

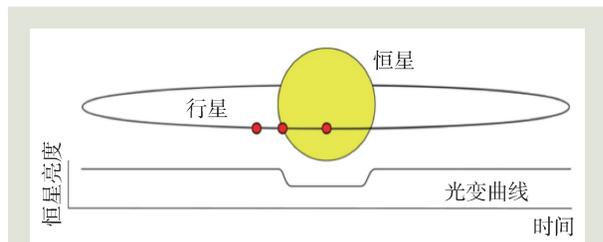


图3 凌星现象示意图(图片来源于网络百科)

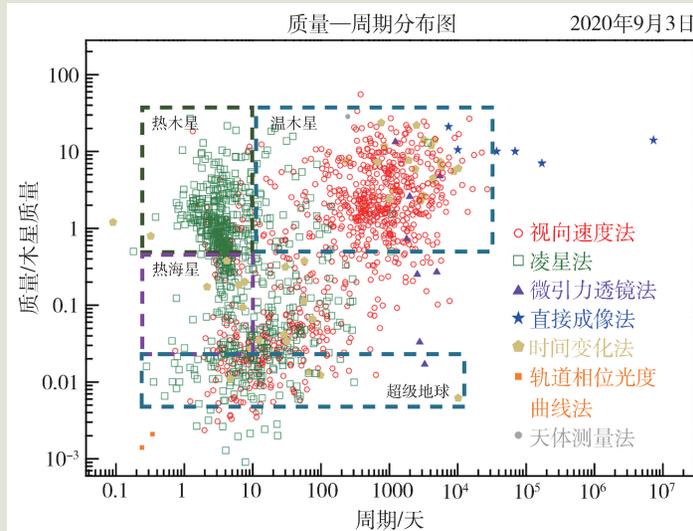


图4 目前发现的行星系统周期和质量的分布图, 图中标出了不同类型的行星, 其中热木星、热海星和超级地球都是太阳系中没有的行星类型(图片来自NASA Exoplanet Archive)

3 系外行星统计特性

我们熟悉的太阳系行星系统，有以下特点：

共面性：以黄道面作为太阳系的基准平面，太阳系八大行星和黄道面具有很好的共面性(其中夹角最大的水星也只有7度左右)。

近圆性：太阳系八大行星大多位于近圆轨道上，除了水星偏心率大于0.1，其余行星的偏心率都小于0.1。

通过地面和开普勒空间望远镜等的探测，目前人类已经发现的系外行星有4000多颗，这些行星的发现，大大拓展了人类对行星的认知，如图4所示，人类发现了三类太阳系没有的新行星：

(1)热木星：在距离一些质量较大主星非常近的地方(几天的轨道周期)，可能会有木星质量大小的气态巨行星，由于其温度比较高(2000—3000 K)，因此被称为热木星，例如首颗被发现的行星飞马座51b。在行星系统中，热木星比例大约占0.5%。由于在恒星附近温度高，气体不容易凝聚，一般认为它们是在远处(雪线以外)形成后通过原恒星盘向内迁移或者通过散射等形成高偏心率轨道，在潮汐阻尼作用下停留在现有轨道^[14]；

(2)热海星，若在靠近主星的地方存在的是海王星大小的行星，则称为热海星。我国学者利用LAMOST望远镜的光谱数据发现热海星与热木星类似，有两个重要的共同特征，即它们的宿主恒星的金属丰度都很高，且它们附近很少有其他行星共存。这些共同特征预示热海星和热木星的起源可能有密切联系^[15]；

(3)超级地球：通过Kepler望远镜观测，发现了一批质量在1—10倍地球质量(或者行星半径在1—2倍地球半径)的行星，根据行星形成理论，这些行星很可能是岩质行星，被统称为超级地球。

目前发现的系统中，有相当比例的行星系统是多行星系统，最多的有8颗行星。如TRAPPIST-1系统，主星是一颗温度只有2550 K的红矮星，其附近有7颗行星，组成一个“葫芦娃”行星系统。对于多行星系统，人们很关心它们与太阳系是否有类似的轨道构型，例如轨道是否近圆、轨道共面性等。我国学者通过LAMOST望

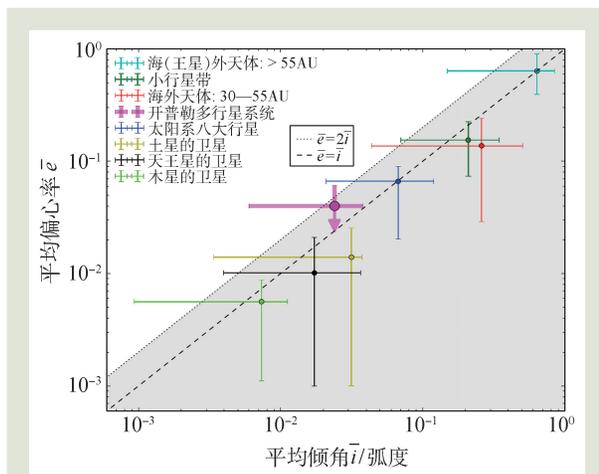


图5 Kepler卫星观测到的多行星系统与太阳系各类天体的轨道偏心率 e 和倾角 i 都符合 $e=(1-2)\times i$ 的规律^[16]

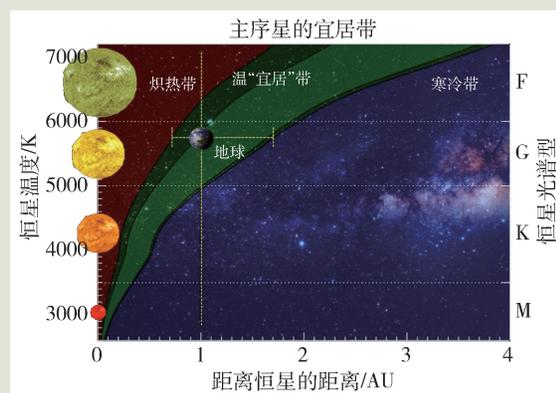


图6 恒星周围的宜居带位置随主星温度的变化(图片来自NASA)

镜的数据，统计研究了700多个Kepler行星的轨道偏心率分布，发现大多数(~80%)Kepler行星系统为近圆和共面的，且和太阳系内行星的轨道偏心率和倾角符合一个共同的线性关系^[16](图5)。这些结果表明太阳系轨道构型在宇宙中并非独特的。

4 未来目标——宜居行星搜寻

随着系外行星的不断发现，是否存在另外一个地球——“宜居行星”是近年系外行星科学家最感兴趣的课题之一，尤其是类太阳恒星周围的宜居带行星。适宜人类生存的行星需要有陆地和液态水，这要求行星表面处于合适的温度。在恒星的辐射下，行星表面温度主要取决于行星与恒

星的距离。行星系统中与恒星距离适宜、温度能使水以液态形式存在的区域称为宜居带。根据Kopparapu等人2013年的定义,太阳系的宜居带从地球轨道内侧延展到火星轨道外侧。如图6所示,绿色区域为宜居带。宜居带以外的区域因为离恒星太远而变冷,宜居带以内靠近恒星的区域又太热。宜居带距离主星的距离随主星变化,主星亮度越大,宜居带越靠外。宜居带是行星宜居的必要条件之一,只有行星位于宜居带内,才更合适生命产生和维持。行星的宜居性还有其他必要条件,例如:行星磁场保护行星上的生命免遭高能粒子的辐射,合适的行星大气促进行星物质、能量循环等。探测太阳系附近的宜居行星对研究生命起源等有重要意义,已经成为系外行星探测的主旋律,目前已经探测到十余颗位于宜居带内的类地行星(表1)。

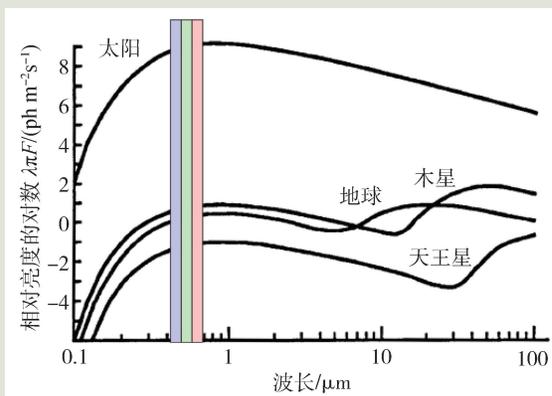


图7 太阳与地球、木星、天王星在不同波段的对比度

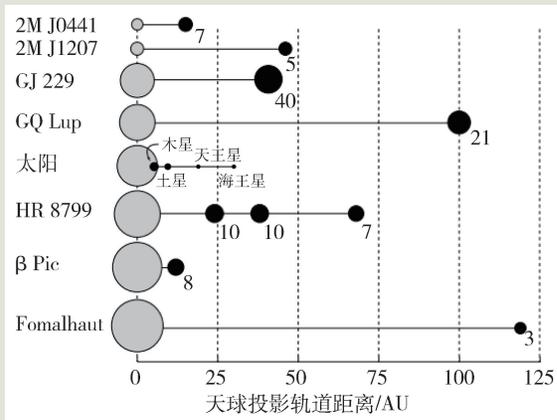


图8 星冕仪直接成像法探测到的系外行星,黑色实心代表行星,行星右下角数字代表行星质量(以木星质量为单位)。注:HR 8799还发现了第四颗行星e,距离主星约100 AU

对于类太阳恒星,宜居带范围为0.99—1.7 AU,如果恒星距离我们10 pc(秒差距,1 pc=3.26光年),观测所需的角分辨率至少是0.05角秒,如果采用传统光学望远镜,需要口径 ≥ 3 m的空间望远镜,才可能分辨行星与恒星。如果主星是温度较低的红矮星,宜居带还将更靠近主星,需要的望远镜口径更大。此外行星与恒星的亮度差异巨大,可见光波段太阳和地球的对比度达到 2×10^9 ,即使是地球辐射最强的中红外波段(10 μm),其对比度也会达到 10^7 左右(图7)。因此传统望远镜很难对系外行星进行直接成像。无论国外还是国内,探测宜居带行星都是一大挑战。国际上目前仅通过视向速度法,利用专用的系外行星搜寻望远镜如HARPS等,探测到了如比邻星周围的宜居带类地行星Proxima b。我国缺乏专用的系外探测望远镜,在宜居带行星探测上还处于起步阶段。

利用直接成像法搜寻宜居带行星,需要克服三大困难,即高分辨率、高对比度、高灵敏度。其中,高分辨率探测是未来天文发展的趋势,实现高对比度下的弱光成像(可见光波段 5×10^{-10} 的对比度下,暗于31等的行星成像)也是实现宜居带行星探测的关键技术之一。目前国际上提出的未来大型望远镜(如TMT, ELT等),都将宜居带行星成像列为其科学目标。目前直接成像有两种主要实现途径:一是采用传统的星冕仪技术,二是干涉成像技术。

传统的星冕仪技术是利用星冕仪遮挡恒星的光,降低对比度,实现系外行星的成像。国外目前在光学波段实际观测可以实现约 10^{-6} 对比度的成像,用于对近邻木星大小的行星直接成像,已经发现了10余颗距离主星较远的行星(图8)。Caltech等实验室在实验室内实现了 10^{-9} 对比度成像,但距离实际天文应用还有距离。星冕仪技术主要用于大型望远镜,分辨率受限于望远镜口径。未来的系外行星探测空间望远镜已经提高到15 m口径的级别,如美国正在规划的LUVUOIR望远镜。

我国在星冕仪研究上采取国际合作的形式,南京天文光学技术研究所团队与美国加州州立大

表1 目前已经发现的位于宜居带的部分类地行星(数据源于维基百科): 即质量小于6倍地球质量, 半径小于1.6倍地球半径, 且位于主星宜居带内的行星(包括地球)

目标行星	宿主恒星	恒星光谱型	质量/ M_{\oplus}	半径/ R_{\oplus}	流量/ F_{\oplus}	平衡温度/K	周期/天	距离/ly
地球	太阳	G2V	1.00	1.00	1.00	255	365.24	—
Proxima Centauri b	Proxima Centauri	M6Ve	≥ 1.3	$1.1^{+0.3}_{-0.3}$	0.65	234	11.186	4.22
Gliese 667 Cc	Gliese 667 C	M3V	≥ 3.8	$1.5^{+0.5}_{-0.4}$	0.88	277	28.143 ± 0.029	23.62
Kepler-442b	Kepler-442	K?V	$2.3^{+5.9}_{-1.3}$	1.34	0.70	233	112.3053	1291.6
Kepler-452b	Kepler-452	G2V	$4.7^{+15.1}_{-2.8}$	1.50, 1.63	1.11	265^{+15}_{-13}	384.8	1402
Wolf 1061c	Wolf 1061	M3V	≥ 4.3	$1.6^{+0.4}_{-0.5}$	0.60	223	17.9	13.8
Kepler-1229b	Kepler-1229	M?V	$2.7^{+7.1}_{-1.5}$	1.4	0.49	213	86.8	769
Kapteyn b*	Kapteyn	sdM1	≥ 4.8	$1.6^{+0.5}_{-0.4}$	0.43	205	48.6	13
Kepler-62f	Kepler-62	K2V	$2.8^{+7.4}_{-1.6}$	1.41	0.39	244	267.291	1200
Kepler-186f	Kepler-186	M1V	$1.5^{+3.2}_{-0.9}$	1.17	0.29	188	129.9459	561
GJ 273b	Luyten's Star	M3.5V	$2.89^{+0.26}_{-0.26}$	—	1.06	206—293	18.650	12.36
TRAPPIST-1e	TRAPPIST-1	M8V	0.6	0.9	0.67	230	6.1	39
TRAPPIST-1f	TRAPPIST-1	M8V	0.7	1.0	0.38	200	9.2	39
TRAPPIST-1g	TRAPPIST-1	M8V	1.3	1.1	0.26	182	12.4	39

学合作研发, 研制出的Ex-AO系统, 以客座仪器的形式用于欧洲南方天文台的3.6 m口径望远镜, 实测成像对比度达到 10^{-5} , 具备开展系外行星(类木行星)成像的能力。但星冕仪探测系外行星要求望远镜有较高分辨率, 即较大口径, 国内缺乏大口径(大于4 m)望远镜, 因此后续研究、实验都依赖国外大型望远镜时间的申请, 或者有偿使用国际望远镜时间等方式获取。目前该团队利用Ex-AO对已经发现的系外行星进行了实验验证, 尚未独立发现系外行星。未来空间站2 m望远镜上已经布置了直接成像的星冕仪。

干涉成像法利用不同望远镜收集同一恒星的光进行干涉, 降低恒星一行星的对比度, 同时通过拉长基线获得远高于望远镜口径的高分辨率, 来获得行星光子。从20世纪90年代开始, 世界上几个最大的望远镜项目都考虑了多个望远镜利用光学/红外波段进行干涉, 取得高分辨率图片的方案。其中凯克天文台(Keck)两个10 m望远镜的干涉仪未能成功, 大型双筒望远镜干涉仪(LBT)历经磨难才投入科学使用, 性能并未达到预期目

标, 而甚大望远镜(VLTI)作为目前最成功的地面干涉望远镜阵列(4个8 m级望远镜), 终于在2017年开始使用到GRAVITY仪器上, 在近红外波段(2.0—2.4 μm), 进行了成功的高分辨率观测, 在天文领域取得了丰硕的科学成果, 如银河系中心超大黑洞周围恒星非常接近最后稳定圆轨道的超精确观测测量, 猎户座大星云内大质量恒星形成区中大质量年轻恒星双星比例的精确测量, 恒星微引力透镜成像的首次分辨观测等。但地面望远镜受大气影响, 光子相干时间很短, 地面仅能对非常亮的天体进行干涉成像。目前地面的干涉法成像设备大多无法探测暗于11等的天体。

目前世界上还没有任何空间干涉的天文望远镜在运行, 美国提出的SIM、TPF等计划因为JWST严重超出预算, 都未能实施。去年, 在美国提到的天体物理未来30年规划中, 又重新提到了光学干涉, 计划在2038年左右开始实施干涉成像探测系外行星项目。我国也结合宜居行星探测的重大科学需求, 提出了“觅音”计划, 以光干涉实现高对比度下的暗弱目标干涉成像, 具备极

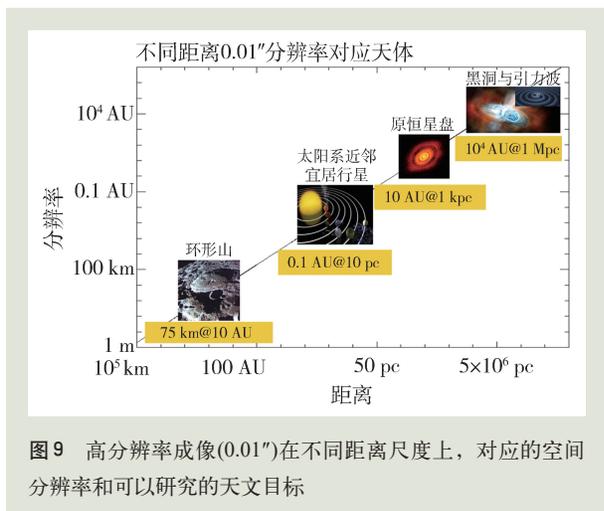


图9 高分辨率成像(0.01'')在不同距离尺度上,对应的空间分辨率和可以研究的天文目标

高的空间分辨率,比美国6.5 m的空间望远镜JWST还要高1个量级,可以实现对近邻恒星周围的宜居带类地行星进行直接成像。不仅可以在国际上首次发现另一个“地球”,还可以对太阳系天体进行系统的反射光谱巡天,揭示水的分布。此外,“觅音”计划的高空间分辨率特征(图9),还有助于揭示宇宙各层次天体的演化规律,在两暗(暗物质、暗能量)、一黑(黑洞)、三起源(宇宙起源、天体起源、生命起源)等重大天文前沿领域发挥重要作用。通过“觅音”计划的实施,期望能率先实现高对比度下的暗弱目标的干涉成像,首次通过干涉成像法探测到另一个“地球”,彰显我国空间科学强国地位。

参考文献

- [1] Kerr R A. *Science*, 2005, 309(5731): 88
- [2] Wetherill G W. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1990, 18: 205
- [3] Williams J P, Cieza L A. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2011, 49(1): 66
- [4] Zhou J L, Xie J W, Liu H G *et al.* *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(8): 1081
- [5] Xie J W *et al.* *The Astrophysical Journal*, 2010, 724(2): 1153
- [6] DeMeo F E, Carry B. *Nature*, 2014, 505(7485): 629
- [7] Zhou J L, Lin D N C, Sun Y S. *The Astrophysical Journal*, 2007, 666(1): 423
- [8] Laskar J. *Nature*, 1989, 338(6212): 237
- [9] Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378(6555): 355
- [10] Liu Y J *et al.* *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2009, 9(1): 1
- [11] Zhang H *et al.* *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 240(2): 17
- [12] Xie J W. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2014, 210(2): 25
- [13] Yang M, Liu H G, Zhang H *et al.* *The Astrophysical Journal*, 2013, 778(2): 110
- [14] Nelson B E *et al.* *The Astronomical Journal*, 2019, 154(3): 106
- [15] Dong S B, Xie J W, Zhou J L *et al.* *Proceedings of the National Academy of Science*, 2018, 115(2): 266
- [16] Xie J W, Dong S B, Zhu Z H *et al.* *Proceedings of the National Academy of Science*, 2016, 113(41): 11431

5 未来的征程

系外行星是天文学研究的热点,“另一个地球”的搜寻则如同皇冠上的明珠。觅音计划的实施结合“人类在宇宙中是否孤独?”,“生命如何产生?”等重大科学关切,以搜寻“另一个地球”为目标,通过空间合成孔径望远镜阵列干涉成像等新手段,获得超越传统望远镜的观测能力,可能获得人类首张宜居带行星的照片,真正看到“另一个地球”,有望在天文领域获得重大科学突破,取得广泛的国际影响,彰显我国空间科学强国的科研实力。此外,推动我国大型的空间天文望远镜项目,在实施过程中的一系列关键技术攻关和技术积累,掌握自主可控的空间技术,也是我国迈向空间强国的必经之路。

回顾人类发展的历史,在大航海时代,欧洲人在地球上积极进行全球探索,发现了新大陆,促进了工业革命的发展,中国失去了良机。近现代,在太阳系深空探测领域,欧美苏率先进行了月球载人登陆,金星、火星无人探测,中国也制定并实施了一系列深空探测,如嫦娥、天问等,正在奋力赶超。未来,在太阳系近邻的宜居行星探索中,全世界都处于同一起跑线,我国应该抓住机遇,锐意创新,在“另一个地球”的搜寻中取得领跑地位。