

熟悉又陌生的行星：从太阳系内到太阳系外

谢基伟[†] 周济林

(南京大学天文与空间科学学院 现代天文与天体物理教育部重点实验室 南京 210093)

2014-07-06收到

[†] email: jwxie@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20141101

Old and new: planets in the solar system and beyond

XIE Ji-Wei[†] ZHOU Ji-Lin

(The Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics of the Ministry of Education, School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

摘要 过去几千年人类对行星认识的范围仅仅局限在太阳系内，而数目也仅仅不到十颗。从上世纪末到现在短短的二十来年，人类已经发现了成千上万颗太阳系外行星。古老的行星科学向人们展现了它新的面孔，把人们从太阳系内带到了太阳系外。文章首先简要回顾了人类探索行星的历史，然后介绍太阳系外行星领域的一些重要进展及热门的研究话题，最后谈及对该领域未来的展望和期待。

关键词 太阳系，太阳系外行星，视向速度，凌星，凌星时刻变化

Abstract For thousands of years, our knowledge of planet has been confined within the solar system, which contains only a handful of known planets. Since 1990s, people have made enormous progress in the last 20 years. Thousands of extra-solar planets (exoplanets) have been detected, opening a new era for planetary research and extending our scope beyond the solar system. In this article, we briefly review the history of planetary research, introduce some key progress and hot topics in the field of exoplanet, and discuss its prospects in the near future.

Keywords the solar system, exoplanet, radial velocity, transit, transit time variation

1 悠久的历史

人类对行星的认识和研究有着悠久的历史。离地球最近的能用肉眼分辨的金、木、水、火、土五大行星的发现可以追溯到几千年前人类文明的开始，具体日期和发现者已经无从考证。几千年来人类对行星的认识停留在这五大行星中，直到1781年英国天文学家威廉·赫歇尔发现天王星。这是一个划时代的发现，它是人类认识的第一个新的行星，太阳系的已知界限的第一次扩展，也是第一颗使用天文望远镜发现的行星，标志着行星科学乃至整个天文学的发展进入到一个新的时代。半个多世纪之后，1846年，人类才

迎来了又一个新的行星——海王星的发现。它又被称为“算”出来的行星，原因是它的发现主要归功于法国数学家、天文学家奥本·勒维耶的推导计算。勒维耶根据天王星不寻常的轨道运动，计算并预言了它之外海王星的存在。根据勒维耶的预报，德国天文学家伽勒很快找到了久违的海王星，从而验证了勒维耶的预言。海王星作为太阳系的已知疆界维持了八十多年，终于在1930年被美国天文学家克莱德·汤博发现的冥王星所取代。

冥王星作为太阳系的疆界和第九大行星在此后很长时间都深入人心，但它的地位却在1992年发现第一颗柯伊伯带天体后被逐渐撼动。这之后

很多柯伊伯带天体相继被发现，它们的轨道有的在冥王星轨道附近，有的则比冥王星遥远得多。除此之外，一些柯伊伯带天体，比如阋神星(Eris)，质量和半径还比冥王星大。随着这些发现越来越多，如何定义行星这个基本问题开始困扰天文学家。如果承认冥王星是第九大行星，那么新发现的一些比它还大的柯伊伯带天体就应该是第十、第十一大行星。为了解决这样的困惑，天文学家在2006年的国际天文联合大会上修订了行星的定义。在新的定义下，冥王星不再被称为行星，因为它不能像其他行星一样清空自己轨道周围的天体。冥王星与其他一些大的柯伊伯带天体被叫作矮行星，从此太阳系由九大行星回归到八大行星。

从九大行星返回到八大行星不是意味着天文学的倒退，恰恰相反，它反映了当今天文学的迅速发展和突破。大量的新发现不断让我们的世界观和宇宙观得到更新。图1大致反映了当前人们对太阳系行星系统结构的认识。图1(a)显示了内太阳系即木星轨道以内主要天体的轨道，从里到外包括：中心天体太阳、水星、金星、地球、火星、小行星带以及木星。图1(b)将太阳系从里往外依次延伸至土星、天王星、海王星以及冥王星轨道。右上角的红点是2012年发现的离太阳最远的一颗太阳系内矮行星——赛德娜(Sedna)。赛德娜的轨道非常扁，如图1(d)所示，它的远日点离太阳更加遥远。赛德娜目前离太阳的距离大概80 AU(AU是天文单位，表示距离，1 AU指地球到太阳的距离，约1.49亿千米)左右，是目前人类可观测到的太阳系边界。当然，理论上认为太阳系的边界其实更加遥远。人们认为几千至几万AU以外还有围绕着太阳的奥尔特云。而奥尔特云里到底有什么？是否有未知的大行星存在？这些仍是等待探索的问题。

2 崭新的面孔

就在人们不断探索太阳系疆界，期待发现新的行星的时候，捷报却从太阳系外传来。20世纪90年代初，不时有太阳系外行星发现的消息传出。特别是1995年瑞士天文学家Mayor和他的学生Queloz在类太阳恒星周围发现了一颗木星大小的行星51 Peg b。该发现^[1]拉开了探索太阳系外行星的序幕。此后几乎每年都有新的系外行星被发现。发现频率从每年的一颗、十颗到最近的几百颗(见图2)。截至2014年6月底，发现并证认的系外行星个数超过1700颗^[1]。探测系外行星的方法主要有视向速度法、凌星法、直接观测法、微引力透镜法、脉冲星法以及天体测位(astrometry)法。其中视向速度(radial velocity, 简称RV)法和凌星(transit)法是目前效率最高、最流行的方法。RV方法主要是通过行星系统中心主恒星的RV变

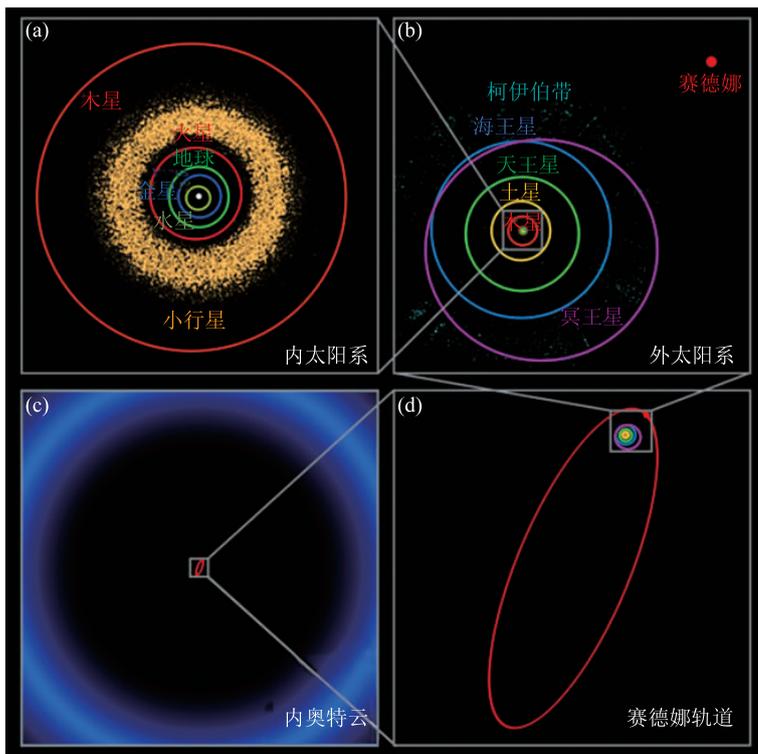


图1 太阳系结构图。(c), (d), (b), (a)逐次放大, 分别为内奥尔特云以内, 矮行星赛德娜(Sedna)轨道以内, 冥王星轨道以内以及木星轨道以内的太阳系(图片来自 NASA/JPL-Caltech/R. Hurt)

1) <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

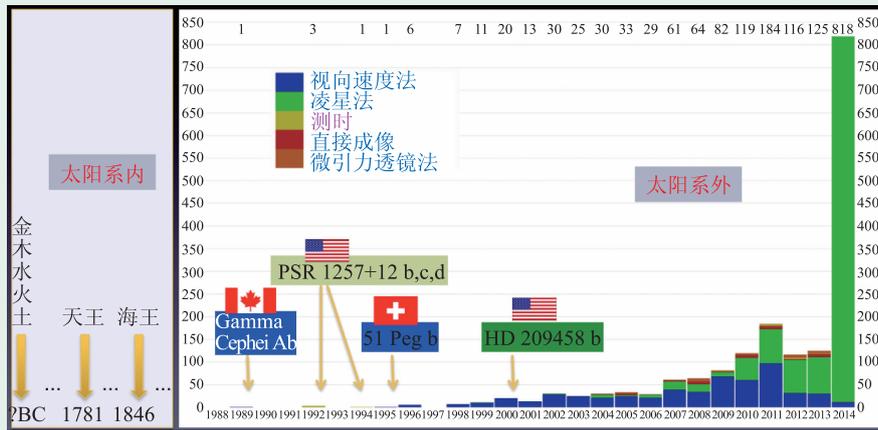


图2 行星发现简史。左图显示太阳系内八大行星的发现是在20世纪之前；右图显示每年发现的太阳系外行星个数，不同颜色表示不同的探测方法(此图来自 wikipedia.org 由 Aldaron 提供)

行星的轨道和质量等信息。51 Peg b 就是通过 RV 方法发现的(见图3)。在这之后的十多年，RV 方法几乎是探测系外行星唯一有效率的方法，直到2006年以后凌星方法崛起。凌星方法也是一种间接探测系外行星的手段。当一些行星的轨道平面与我们的视线方向夹角足够小时，将会发生凌星现象(或者叫掩食现象)，即行星

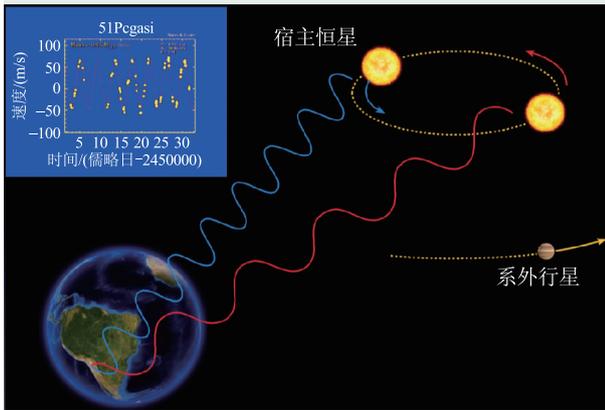


图3 通过视向速度(RV)方法探测系外行星的示意图。在看不见的系外行星引力作用下，恒星绕它们的共同质心来回运动。它的光谱周期性地蓝移(朝向我们)和红移(远离我们)。通过光谱的移动测量出其视向速度的变化(左上角的小图以 51 Peg b 为例)从而得到系外行星的质量和轨道等信息(此图来自 European Southern Observatory (ESO))

星周期性地穿过其宿主恒星面，遮挡其一部分光形成周期性的光变。通过光变的周期和深度，可以推算出行星轨道的周期和大小等信息(见图4)。第一次通过凌星现象成功探测到系外行星是在2000年^[2]。而凌星方法迅速崛起成为探测系外行星最主要的方法是在2006年之后空间探测系外行星卫星 CoRoT 和 Kepler 的升空。到目前为止，Kepler 卫星发现了4200^[2]多个系外行星的候选天体，其中被证认的达977颗。证认主要通过RV方法、统计排除法以及凌星时刻变化法。

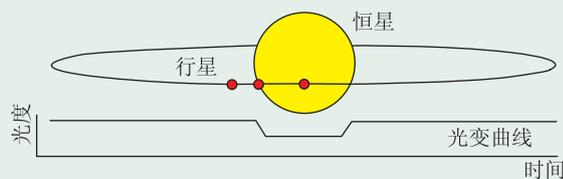


图4 利用凌星方法探测系外行星的示意图。上方显示的是行星轨道，下方显示的是相应的恒星光变曲线。光变曲线凹槽即为凌星事件，它的深度与行星的大小相关，凹槽之间的间隔决定行星的轨道周期(此图来自 wikipedia.org)

大量系外行星的发现给我们展现了一个崭新的行星世界。在这个世界里，行星的种类和属性都是丰富多样的。如图5所示，已知系外行星的质量跨度达4个量级，从小至地球质量到大至十几个木星质量。而系外行星的轨道也有4个多量级的跨度，从小于0.1 AU到接近1000 AU。离宿主恒星远的大质量系外行星可以通过成像法直接观测到，而较近的系外行星一般是通过RV方法和凌星方法探测到。RV和凌星是互补的两种方法，前者给出行星质量的信息，后者给出行星半径大小限制。二者结合可以得到行星密度，从而推测其内部结构。此外，通过研究系外行星凌星(包括主掩和次掩)前后的光度和光谱变化，可以推测行星的大气结构和成分。因此发现了一些系外行星中水和有机分子存在的证据^[3]。

化来探测其周围行星的存在。由于行星的引力作用，恒星和行星绕其共同质心周期运动。通过监测其周期性的RV变化，可以推算出围绕其运动

2) <http://kepler.nasa.gov/>

3 热门的话题

系外行星学属于一门交叉学科，涉及的学科知识非常广，研究课题非常丰富，下面我们仅对这方面的观测与理论研究的热点话题进行部分举例。

(1)行星系统拥有率的研究。目前结合RV法和Kepler卫星的凌星数据发现，大体上10%左右的类太阳恒星在3 AU内拥有类木巨行星，20%—30%左右的类太阳恒星拥有地球半径(质量)以上大小的中小行星^[4]，并且超过20%的这些行星系统是多行星系统^[5]。之前发现拥有类木行星的宿主恒星的重元素丰度较高^[6]，最近发现中小质量行星的拥有率则可能与宿主恒星的重元素丰度无关^[7]。此外，随着系外行星样本的迅速增大，研究系外不同类型行星系统(比如根据行星的大小和周期分类)的拥有率与宿主恒星的其他属性，如质量^[8]、自转^[9]、光谱型^[10, 11]、年龄^[12]，成为了研究行星形成的另一个新的突破点。另外，与拥有率密切相关的是观测数据本身的完整性^[13]、偏差^[14]和假阳性率^[15, 16]。对它们的理解和研究为开展系外行星的深入研究提供了最基本的观测基础。

(2)系外行星系统的轨道动力学构型及其形成演化的研究。系统轨道构型最基本的几个参数包括系统内行星的个数、大小、质量、周期、轨道偏心率和倾角以及行星的分布。目前Kepler卫星的观测发现了大批多行星系统。这些行星系统大部分是由中小行星(大小在4个地球半径以下)组成^[17]。和太阳系相比，这些行星系统内的行星的轨道基本相互共面^[18, 19]，不同的是，大多数行星聚集在离宿主恒星非常近的区域，形成非常紧凑的轨道构型。通过凌星时长的统计研究显示，Kepler发现的行星的轨道偏心率总的来说平均在0.1左右^[20]。而通过凌星中心时刻变化(TTV)给出的处在平运动共振(MMR)附近的行星偏心率则更小，平均在0.01左右^[21]。通过对多行星系统中的行星周期比分布研究显示，行星的周期分布大体上符合随机分布，但在一些平运动共振(即两行星

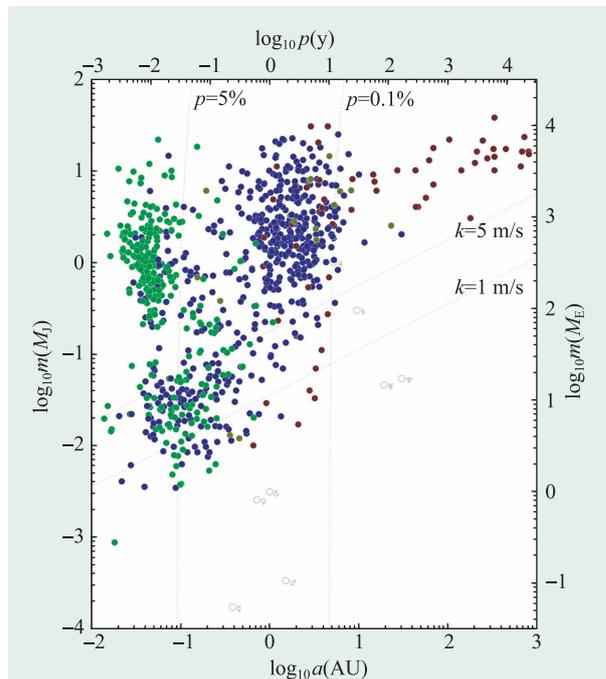


图5 截止到2014年2月发现的系外行星(有质量测定的部分)在质量 m 和轨道半长径 a 以及轨道周期 p 上的分布(纵坐标中的 M_J 和 M_E 分别代表木星和地球的质量)。不同颜色的点代表利用不同方法发现的行星(同图2)。灰色的圆圈代表太阳系内的行星。从左到右的虚线显示的是假设中心恒星为太阳的情况下视向速度振幅为5 m/s和1 m/s的等值线。从上到下的虚线是相应情况下发生凌星的等概率线(此图来自wikipedia.org由Aldaron提供)

的轨道周期趋于简单的整数比，如2:1，3:2等)附近会有些聚集。更有趣的是，这些聚集以MMR中心(轨道周期比刚好等于整数比值的地方)呈现非对称分布^[22, 23]。此外，通过对TTV的统计研究发现，TTV的出现率与系统内行星的个数成正相关，表明Kepler卫星发现的行星样本在动力学上的构型起源不是单一性的而是多样的^[24]。总之最近几年，特别是Kepler项目以来，系外行星样本迅速增大，为系外行星系统的轨道动力学构型及其形成演化研究提供了前所未有的丰富观测资料。

(3)系外行星的内部结构组成及大气成分的研究。行星的半径大小一般可以通过凌星测量得到，而行星质量则一般可以通过RV和TTV估算出来。二者结合可以估算出行星密度，并进而推算行星本身的物质结构组成。目前有密度估计的行星候选天体已经超过200个。总的特征呈多样性——最大和最小密度跨越2个量级，即使同一

系统相邻两个行星的密度也能有一个量级以上的差别^[25]。这些样本行星的大小以1.5—2倍地球半径为界线呈双峰分布^[26]。小于1.5倍地球半径大小的行星一般认为主要以纯岩石类行星为主；而大于2倍地球半径大小的行星一般由一个岩石类的核以及一个气体包层组成。行星的密度组成及其分布的研究对了解行星形成早期原行星盘的组成和演化，行星—恒星之间的潮汐演化以及行星大气蒸发^[27]提供了非常重要的线索。

(4)行星系统中宿主恒星的赤道面倾斜度。一般认为，恒星的赤道面和其周围的行星系统轨道面应该是基本共面的。这种猜想符合我们来自太阳系的经验，同时也符合现在行星形成理论的大框架——行星诞生于绕恒星旋转的原恒星盘中。但是观测发现有的系统并不共面，有些相互倾角甚至大于90°。更多的观测还显示，倾角大的系

统多在质量大、表面温度高的恒星周围^[28]。在对宿主恒星的赤道面倾斜度分布的解释上目前存在着多种模型，主要涉及恒星与原恒星盘的相互作用^[29]，行星的轨道迁移，行星间相互散射^[30]和长期相互摄动^[31]，伴星对主星行星系统扰动以及潮汐演化^[32, 33]等。测量恒星赤道面倾角的传统方法主要是通过视向速度的Rossiter—Mclaughlin效应观测得到^[34]，近几年来，在Kepler数据的推动下，发展出了借助恒星表面黑子和星震等新的方法来探测恒星赤道面倾角^[35, 36]。最近重要的进展是，发现了第一个具有高赤道面倾角的多行星系统(见图6)^[37]。随着观测资料的迅速增加，这方面的研究也更加丰富和深入，同时对各种理论模型给出了新的约束和启发^[38]。

(5)宿主恒星基本属性的精确化诊断研究。Kepler卫星通过凌星观测找到了几千个系外行星的候选天体。由于凌星观测直接得到的是行星对其宿主恒星的相对大小，要获取行星自身的大小、质量等基本属性，需要对其宿主恒星的基本属性有一个比较精确的测量。传统的方法是对目标恒星进行高分辨率光谱观测分析^[39]，但是这往往对亮星更加有效，且需要大量的望远镜时间。近几年来，借助Kepler数据，在诊断恒星上有了重大进展，发展了通过测量恒星自转^[40]、恒星震动^[41]、恒星光变^[42]来推测恒星属性的方法。这些方法的应用对准确刻画行星系统，探索行星与恒星的关系以及恒星本身的结构和演化产生了深远影响。目前，这方面的一个发展方向是，如何综合各种方法应用到更加暗的恒星——因为Kepler探测的目标大多是非常暗的恒星。

(6)双星或者多恒星系统中的行星形成和演化研究。这个研究方向的重要性不言而喻，因为超过一半的恒星诞生在多恒星系统中^[43]。在Kepler卫星升空之前，这个方向发展比较缓慢，主要是因为探测系外行星的方法由视向速度法主导，但视向速度法对探测多星系统中的系外行星效率较低。Kepler上天之后发现了大量的掩食双星^[44]，并确认了第一颗围绕双星的行星系统^[45]——目前Kepler已经发现了一批这样的系统(见图7)。此

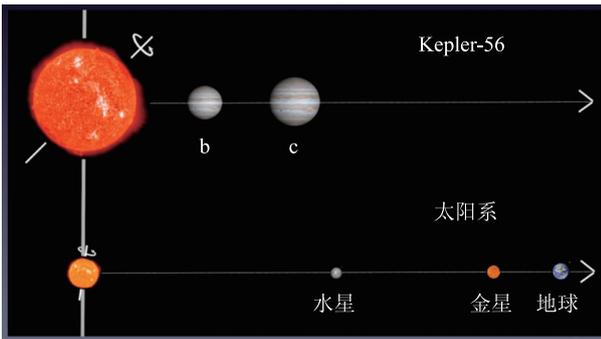


图6 Kepler-56行星系统与太阳系对比。太阳系中水星、金星、地球的轨道平面几乎与太阳的赤道面平行，而Kepler-56系统中恒星的赤道面与行星的轨道面有一个明显大的倾角(此图来自 mahalonotrash.blogspot.com 由 John Johnson 提供)

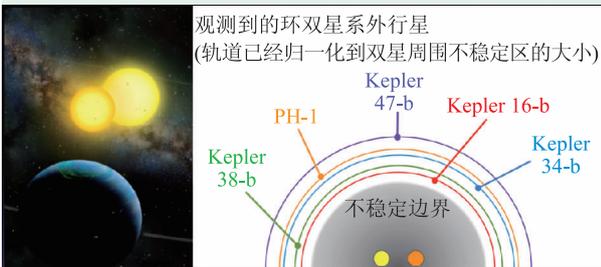


图7 观测到的环双星系外行星。左图为环双星系外行星艺术假想图——“两个太阳”。右图为Kepler卫星观测到的环双星系外行星的轨道分布——大部分行星的轨道比较接近内部不稳定边界(此图来自 www.stefanom.org 由 Stefano Meschiarri 提供)

外, Kepler还发现了第一颗处在四星系统中的行星^[46]和第一颗处在疏散星团中的行星^[47]。这些发现极大地开拓了人们对各种恒星环境下行星形成和演化的新视野。

(7)类地行星、宜居行星的搜寻和刻画研究^[48]。探测太阳系外行星的一大推动力来自于人类对地球以外生命和文明的向往。随着近些年太阳系外行星探测的蓬勃发展, 公众们在这方面的兴趣得到前所未有的激发。这方面的里程碑目标是, 首先寻找到第一颗类似地球的大小且处在宜居带的行星(此图来自www.nasa.org)^[49, 50], 进而估算整个太阳系附近以及整个银河系宜居行星的拥有率, 然后对一些宜居行星进行各种详细的后续诊断研究, 以得到它们的结构组成、大气信息和生命存在证据。目前Kepler已经探测到100多个宜居行星的候选天体, 并等待进一步确认。此外, 关于如何定义和刻画宜居行星也成为了这方面的研究热点^[51]。总的来说, 对宜居行星的探测和研究目前热度空前, 且有逐渐向多个学科(如地质学、生物学等)综合发展的趋势。

4 期待的未来

短短二十来年, 系外行星的研究取得了一系列革命性的突破, 发展可谓迅猛。我们从中不难看出它的发展有以下几个趋势:

(1)在系外行星搜寻方面, 探测已经从单个地面望远镜巡天发展到地面多个望远镜组网(如SuperWASP和HATNet计划)巡天, 再到空间望远镜搜寻(如CoRoT和Kepler计划以及未来的TESS和PLATO计划)。

(2)在系外行星刻画方面, 行星系统物理特征刻画以空间望远镜为主(如现在的Hubble, Spitzer以及未来的JWST), 辅以地面大型望远镜(如现在的Keck等, 以及未来的TMT等)。

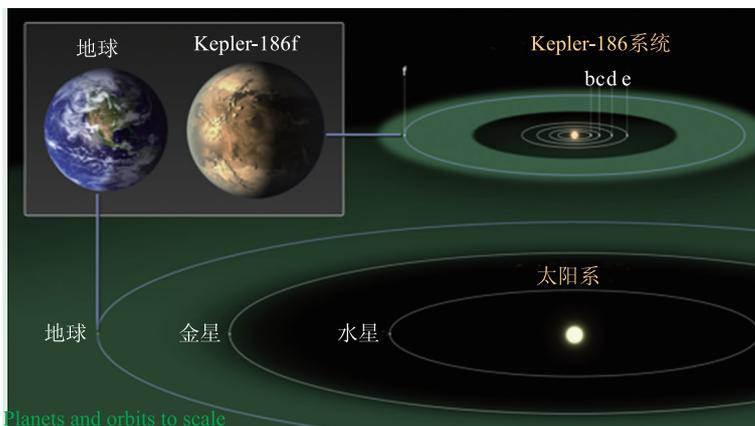


图8 行星系统Kepler-186与太阳系对比图。图中的绿色部分为两个系统的宜居带。Kepler-186f是发现的第一颗类似地球大小且处在宜居带的行星(此图来自www.nasa.org)

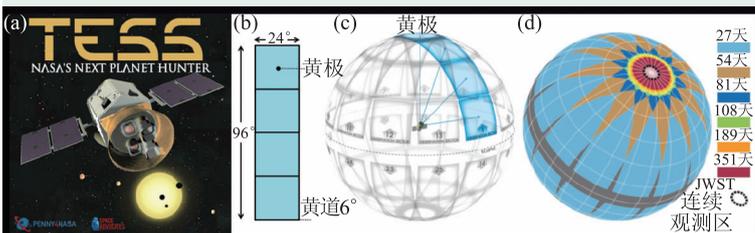


图9 TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间卫星计划简介 (a)TESS的效果图; (b)TESS的4个相机在同一时刻的视场; (c)TESS对全天区分26个部分进行扫描; (d)整个天区被TESS观测的时间分布(此图来自www.nasa.org和文献[52])

(3)在系外行星理论方面, 随着大批系外行星系统的发现, 理论方面已经不再满足于对单个行星系统的理解和解释, 而是扩展到对行星系统的分类和统计性质的研究上来, 从而给出一个整体的行星系统的物理图像。

Kepler计划已经将系外行星的研究推向到一个前所未有的高度。Kepler卫星现在已经完成了它为期4年多的常规搜寻计划, 并已进入到后续的观测阶段(简称K2)。虽然K2的观测精度较之前有所下降, 但是它搜寻的天区会大大增加, 相信也会带来不少令人振奋的发现。

Kepler卫星虽然发现了大批系外行星, 但是由于Kepler视场小而深, 发现的行星系统离地球都非常远, 以致于现在地面上或空间上的大型望远镜都很难对它们做进一步的后续观测刻画。不过值得我们期待的是, 2017年美国国家航空航天局(NASA)将要发射TESS卫星(见图9)。TESS与

Kepler 刚好互补, 它的视场大而浅, 将对地球附近几乎所有亮星做系外行星凌星搜寻, 预计可以发现大批离地球比较近的系外行星。这些近的系外行星将是大型地面和空间望远镜理想的后续观测目标。利用现有的 Keck 和 Hubble 等望远镜, 甚至未来的 TMT 和 JWST 望远镜, 我们可以期待在这些行星系统中发现另一个适合居住的地球。

此外, 一个近在眼前的期待是, 刚刚在 2013

年底发射的 GAIA 空间卫星。GAIA 虽然也可以给我们带来不少系外行星的发现, 但是更加重要和让人期待的是, 它能对宇宙中大批恒星的物理属性和动力学参数进行精确测定。GAIA 对恒星的观测将全面帮助我们刻画每一个行星系统, 并回答行星与其宿主恒星的关系, 以及行星形成演化与恒星形成演化的关系等一些基本问题。

总之, 系外行星的研究已经进入了一个高潮, 而下一个高潮看似也不远了。

参考文献

- [1] Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378: 355
- [2] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W *et al.* *ApJL*, 2000, 529: L45
- [3] Swain M R, Vasisth G, Tinetti G. *Nature*, 2008, 452: 329
- [4] Mayor M, Marmier M, Lovis C *et al.* 2011, arXiv: 1109. 2497
- [5] Fabrycky D C, Lissauer J J, Ragozzine D *et al.* 2012, arXiv: 1202. 6328
- [6] Fischer D A, Valenti J. *ApJ*, 2005, 622: 1102
- [7] Buchhave L A, Latham D W, Johansen A *et al.* *Nature*, 2012, 486: 375
- [8] Johnson J A, Aller K M, Howard A W *et al.* *PASP*, 2010, 122: 905
- [9] McQuillan A, Mazeh T, Aigrain S. *ApJL*, 2013, 775: L11
- [10] Bonfils X, Delfosse X, Udry S *et al.* *A&A*, 2013, 549: A109
- [11] Dressing C D, Charbonneau D. *ApJ*, 2013, 767: 95
- [12] Walkowicz L M, Basri G S. *MNRAS*, 2013, 436: 1833
- [13] Christiansen J L, Clarke B D, Burke C J *et al.* *ApJS*, 2013, 207: 35
- [14] Gaidos E, Mann A W. *ApJ*, 2013, 762: 41
- [15] Morton T D, Johnson J A. *ApJ*, 2011, 738: 170
- [16] Fressin F, Torres G, Charbonneau D *et al.* *ApJ*, 2013, 766: 81
- [17] Batalha N M, Rowe J F, Bryson S T *et al.* *ApJS*, 2013, 204: 24
- [18] Figueira P, Marmier M, Boué G *et al.* *A&A*, 2012, 541: A139
- [19] Fang J, Margot J L. *ApJ*, 2012, 761: 92
- [20] Moorhead A V, Ford E B, Morehead R C *et al.* *ApJS*, 2011, 197: 1
- [21] Wu Y, Lithwick Y. *ApJ*, 2013, 772: 74
- [22] Lithwick Y, Wu Y. *ApJL*, 2012, 756: L11
- [23] Batygin K, Morbidelli A. *AJ*, 2013, 145: 1
- [24] Xie J W, Wu Y, Lithwick Y. 2013, arXiv: 1308.3751
- [25] Carter J A, Agol E, Chaplin W J *et al.* *Science*, 2012, 337: 556
- [26] Hadden S, Lithwick Y. 2013, arXiv: 1310.7942
- [27] Owen J E, Wu Y. *ApJ*, 2013, 775: 105
- [28] Albrecht S, Winn J N, Johnson J A *et al.* *ApJ*, 2012, 757: 18
- [29] Lai D, Foucart F, Lin D N C. *MNRAS*, 2011, 412: 2790
- [30] Nagasawa M, Ida S, Bessho T. *ApJ*, 2008, 678: 498
- [31] Wu Y, Lithwick Y. *ApJ*, 2011, 735: 109
- [32] Wu Y, Murray N. *ApJ*, 2003, 589: 605
- [33] Naoz S, Farr W M, Lithwick Y *et al.* *Nature*, 2011, 473: 187
- [34] Ohta Y, Taruya A, Suto Y. *ApJ*, 2005, 622: 1118
- [35] Sanchis-Ojeda R, Fabrycky D C, Winn J N *et al.* *Nature*, 2012, 487: 449
- [36] Chaplin W J, Sanchis-Ojeda R, Campante T L *et al.* *ApJ*, 2013, 766: 101
- [37] Huber D, Carter J A, Barbieri M *et al.* 2013, arXiv: 1310.4503
- [38] Trianaud A H M J, Collier Cameron A, Queloz D *et al.* *A&A*, 2010, 524: A25
- [39] Valenti J A, Fischer D A. *ApJS*, 2005, 159: 141
- [40] van Saders J L, Pinsonneault M H. *ApJ*, 2013, 776: 67
- [41] Chaplin W J, Basu S, Huber D *et al.* 2013, arXiv: 1310.4001
- [42] Bastien F A, Stassun K G, Basri G *et al.* *Nature*, 2013, 500: 427
- [43] Raghavan D, McAlister H A, Henry T J *et al.* *ApJS*, 2010, 190: 1
- [44] Slawson R W, Prvsa A, Welsh W F *et al.* *AJ*, 2011, 142, 160
- [45] Doyle L R, Carter J A, Fabrycky D C *et al.* *Science*, 2011, 333: 1602
- [46] Schwamb M E, Orosz J A, Carter J A *et al.* *ApJ*, 2013, 768: 127
- [47] Meibom S, Torres G, Fressin F *et al.* *Nature*, 2013, 499: 55
- [48] Seager S. *Science*, 2013, 340: 577
- [49] Seager S. *Nature*, 2012, 490: 479
- [50] Quintana E V, Barclay T, Raymond S N *et al.* *Science*, 2014, 344: 277
- [51] Kaltenegger L, Sasselov D. *ApJL*, 2011, 736: L25
- [52] Ricker G R. *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, 2014, 42: 234