

文章编号: 1000-8349(2005)03-0226-13

太阳系外恒星行星系统的探测与研究进展

刘玉娟, 赵 刚

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 随着对外太空探索脚步的加快, 人类开始对与太阳系具有相似结构的恒星行星系统越来越感兴趣, 因为它们有可能也拥有智慧生命。简单介绍了目前地外恒星行星系统的探测情况, 分析了现在比较常用的几种探测方法的可行性和适用范围, 重点讨论了利用视向速度法得到的结果及其意义。近年来, 各种探索地外行星的小卫星的升空以及探测技术的进步使得大批高质量数据获得成为可能。可以预见, 在未来几年内, 地外恒星行星系统的探索将会进入一个蓬勃发展阶段。

关键词: 天体物理学; 太阳系外行星; 综述; 类木行星; 类地行星

中图分类号: P185

文献标识码: A

1 引 言

千百年来, 人们一直有这样一个问题: 我们在宇宙中是孤独的吗? 太阳在宇宙中是一颗非常普通的恒星, 普通到没有任何特征使得它可以同银河系其他无数恒星区分开来。天文学家对太阳系行星系统的研究表明, 行星系统的形成过程应该伴随着恒星形成同步进行的。这是一种普遍现象, 人们期望在大部分类太阳恒星的周围也存在行星系统。哈勃空间望远镜 (HST) 在探测猎户座星云的恒星周围尘埃盘时证实了这种想法, 几十年来天文学家一直希望能找到并仔细研究这类行星。

1992 年 Wolszczan 和 Frail^[1,2] 发现了第一个地外行星系统。然而, 令人惊异的是, 这个系统并不在像太阳那样的主序星周围, 而是围绕一颗毫秒脉冲星 PSR 1257+12 旋转。第一颗围绕类太阳恒星的行星是 1995 年由 Mayor 和 Queloz^[3] 发现的, 这也是第一个用视向速度方法探测到的地外行星系统。它围绕其主星 51 Pegasi 旋转的周期为 4.23 d。

从笛卡儿时代开始, 由于受到观测条件的限制, 人们只能从太阳系现状来“构造”它的历史。近年来随着各种先进观测设备和探测技术的出现, 人类对地外行星的研究越来越深入。地外行星的观测可以帮助人们更好地理解恒星行星系统的形成机制, 为检验现在流行的行星系统形成理论提供更为严格的约束条件。

收稿日期: 2004-12-20; **修回日期:** 2005-03-18; **特约稿**

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10433010); 国家 973 资助项目 (G1999075406)

本文第 2 节简要介绍地外行星的探测方法; 第 3 节综述目前探测现状; 第 4 节给出一些视向速度搜寻地外恒星行星系统的结果; 第 5 节列举近年来比较主要的类地行星探测计划。

2 地外行星探测技术

对地外行星系统的探测可以通过直接或者非直接方法进行。每一种方法的命名都以可观测到的行星内部物理参数为特征。一种方法是否成功取决于这种方法所采用仪器的可探测极限。以下主要介绍一些目前比较主流的地外行星探测技术, 重点介绍最常用的视向速度法。

2.1 直接探测

行星本身并不发光, 所以只能通过测量它主星的光度来探测其光度。行星围绕光度为 L_* 的主星旋转得到的反射光度

$$L_P = \frac{AL_*}{8} \left(\frac{R_P}{a} \right)^2 \Phi(t),$$

其中, $\Phi(t) = 1 - \sin i \sin(2\pi t/P)$ 是一个旋转相位因子 (i 为旋转倾角, P 为行星围绕恒星绕转的周期), A 为常数, R_P 为行星半径, a 为主星半径。

直接观测行星非常困难。即使观测距离我们最近的恒星行星系统, 也仍然像观测 1000 km 外灯塔旁边一点微弱的烛光一样困难。现在, 地面设备和空间设备都不能达到直接观测的要求。2009 年即将升空的 SIM (Space Interferometry Mission) 卫星有可能用直接观测方法来探测地外行星。

2.2 根据行星引起的主星动力学扰动来探测

行星围绕恒星旋转的同时, 恒星也围绕着它们共同的质心在旋转。虽然恒星的绕转半径很小, $a_* = a \cdot M_P/M_*$, 但其周期等于行星绕转的周期。这种扰动结果造成 3 种可以观测到的效应: 视向速度的周期性变化、角位置变化、信号到达时间的变化。

2.2.1 视向速度法 (多普勒位移法)

主星周围如果存在巨型气体行星, 则行星对主星的视向速度产生影响, 由主星光谱测得其视向速度的周期性变化可以判断行星存在的可能性, 并计算行星的质量下限。目前为止这是用来探测主星为主序星的巨型气体行星的最有效方法。用传统方法测量的视向速度精度为 1000 ms^{-1} , 而木星对太阳视向速度的调制仅有 12.5 ms^{-1} , 这样的精度对于利用视向速度法来探测围绕在小质量恒星周围的亚恒星伴星是不可能的。随着技术的发展, 现在视向速度的测量精度已达到 3 ms^{-1} , 这使得探测类木行星成为可能。

高精度视向速度的测量主要通过两种方法来实现:

(1) 使用气体吸收源。最初 Griffin^[4] 使用钷 (Telluric) 气体, 它的精度可以达到 100 ms^{-1} 。后来 Campell 等人^[5] 用氟化氢 (HF) 气体, 其主要吸收线在 8700 \AA 附近, 用 6 条谱线定标, 定标精度可达到 15 ms^{-1} 。而现在人们常用的是碘 (Iodine) 气体, 它的精度可以达到 5 ms^{-1} 量级^[6~9]。碘气体波长覆盖范围比较宽, 定标的线也比较多。将一块充满碘气体的玻璃器皿放在摄谱仪的狭缝之前, 碘吸收线通过狭缝后叠加在恒星光谱上面, 然后用这些谱线来定标。这种方法的优点是可以消除仪器轮廓、导星误差和摄谱仪失真的影响, 而且也是一种比较容易实现的方法, 只需在原有的摄谱仪前面加一碘气体盒, 而无需调整摄谱仪。另外, 碘气

体是一种比 HF 气体更安全的气体。Lick 天文台的 3 m 望远镜和 Keck 望远镜的折轴光谱系统就是采用这种定标方法。

(2) 采用同步定标技术。用两根光纤^[3,10]分别将恒星的光和定标吸收源(通常是钷-氩灯)分别引入摄谱仪,再用一个可调的法布里-珀罗(Fabry-Perot)^[11,12]标准具(其上有两面可调节的平面反射镜)干涉仪来定标。这种方法有两个优点:整个光谱范围都可以使用,而不是只有包含碘吸收线的波段;恒星光谱无污染。但是由于定标光路与恒星光路不同,这种方法容易产生带状光行差。而且这种方法实现起来比较难,它需要对原有的摄谱仪进行一些改正,如引进图像扰频仪以消除导星误差的影响,并在扰频仪的输出端连接定标光纤等。有几个寻找地外行星的计划,如 CORALIE(使用 ESO-La Silla 天文台 1.22 m 望远镜)^[13]、AFOE(Advanced

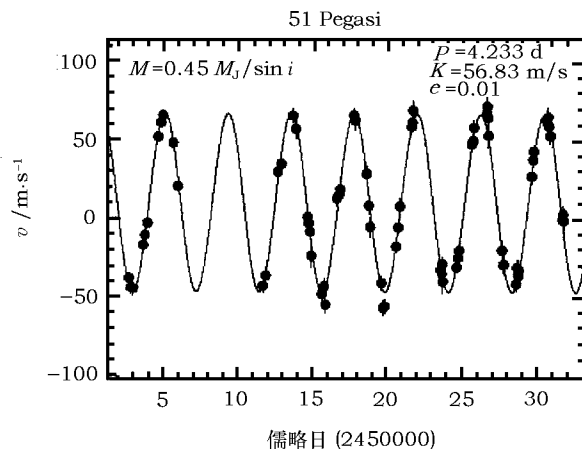


图1 由视向速度法首次测得的行星多普勒速度^[58]

其中, P 为行星绕恒星转动的周期, K 为视向速度变化的半振幅,

e 为行星环绕主星旋转的偏心率。

向速度法测得的多普勒速度。

2.2.2 天体测量方法

Gatewood^[17]、Colavita 和 Shao^[18] 提出用天体测量方法来探测地外行星的存在。这种方法是通过行星对主星位置的周期性扰动来探测行星的。例如,类木行星围绕类太阳恒星旋转,若它的半长轴为 5 AU, 距离为 10 pc, 则行星对恒星位置振幅的影响为 0.5 mas。天体测量方法有两个优点:能得到确定的行星质量和轨道倾角,而这是直接测量方法所不能得到的;对于空间设备来说,例如 2009 年计划升空的 SIM, 它的角分辨率是 $2 \mu\text{as}$, 能探测到 10 pc 范围内围绕 $1 M_{\odot}$ 恒星旋转、公转周期为 1 yr、最小质量为 $6.6 M_{\oplus}$ (M_{\oplus} 为地球质量) 的行星。对于地面设备, Keck 望远镜和欧洲南方天文台 VLTI (Very Large Telescope Interferometer) 的角分辨率是 $20 \mu\text{as}$, 能探测到 10 pc 范围内半长轴为 1 AU、质量为 $66 M_{\oplus}$ 的行星。然而,这种方法的局限性在于恒星的距离远以及由星斑引起的测光中心位置的变化。离地球 10 pc 内只有 33 颗类太阳 (F、G 和 K) 主序单星,而且能探测到的行星还受观测时间限制,因为需要观测至少一个旋转周期的时间。不过 HST 已经通过这种方法证实了一个地外行星系统的存在。

Fiber-Optic Echelle, 使用 Whipple 天文台 1.5 m 望远镜^[14]、HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher, 使用 ESO-La Silla 天文台 3.6 m 望远镜)^[15] 用的都是这种定标方法。

以上两种方法都需要高分辨率光栅摄谱仪。van Eyken 等人^[16] 尝试用 Michelson 干涉仪和中等分辨率摄谱仪的组合来进行探测,且已经探测到一个地外行星系统。这种设备成本比较低,且可同时对几个天体进行观测,有可能成为今后视向速度法探测行星的通用设备。视向速度法的缺点是:受视向速度精度限制,无法探测到地球质量大小的行星。图 1 是 Mayor 和 Queloz^[3] 用视

2.2.3 脉冲到达时间方法

当恒星运动受到行星干扰时，来自恒星的信号到达时间会产生周期性变化。脉冲星不断发出非常有规律的信号，使得人们能准确地监视它的变化，从而探知地外行星系统的存在与否。现在能探测到的毫秒脉冲星周期的精度为几个 μs 。

1992 年首次发现的地外行星系统就是采用这种方法。但是这种行星的主星是脉冲星而不是主序星。由于脉冲星可能形成于超新星爆发，围绕其前身星运转的行星会被爆发产生的激波驱散，所以人们普遍认为行星是在超新星爆发后形成的。这种方法的优点是能探测到接近地球质量大小甚至比地球质量更小的行星。但是这些行星的主星是脉冲星，这对于研究类太阳恒星周围的行星，进而探知类地行星、地外生命没有太多意义，所以这种方法未被普遍采用。

2.3 掩星法

当行星通过恒星表面时，恒星光度会发生周期性变化，通过测量这种变化可以探测行星是否存在并得到较为准确的行星信息。Hale 和 Doyle^[19] 提出，木星穿过太阳需要几个小时，它使太阳光度变化 1%，这种变化可在地面探测到。在考虑造成上述光度变化原因时，可以排除星斑、闪耀或光球层颗粒波动等恒星自身活动的影响，因为这些因素不足以造成这么大的光度变化。掩星时恒星颜色不变，有一个平坦的低亮度区（如图 2 所示），且具有周期性。类太阳恒星被类木行星掩星的几率是千分之一。这种方法的优点是能直接得到行星的质量，因为行星的旋转倾角接近 90° ($\sin i = 1$)；还能得到行星的半径和密度，从而把巨型气体行星和固体行星区分开。2000 年 Henry 等人^[20] 首次用掩星法观测到地外行星的存在。现在用这种方法已经确定了几个地外行星系统的存在。类地球行星掩星时，会造成其主星光度变化 0.01%，但是现在地面设备还不能测出如此小的光变。法国 2006 年预计发射的 COROT (COncvection ROtation and planetary Transits) 将对 25000 颗恒星进行光变探测，预计可以探测到几十颗类地行星^[17]。

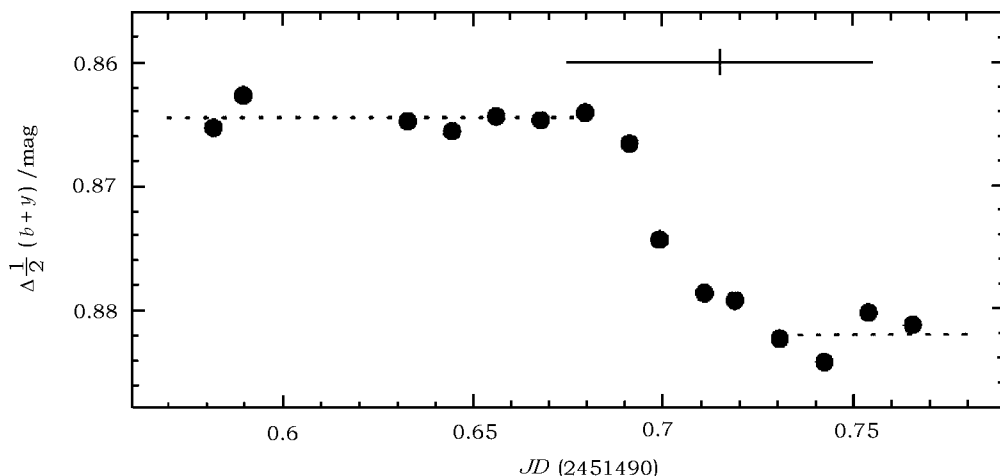


图 2 第一颗由测光证实存在的地外行星系统的恒星 HD 209458 测光数据^[20]

其中，掩星星等变化是 0.017 ± 0.002 ，流量变化是 $1.58\% \pm 0.18\%$ 。

2.4 微引力透镜效应法

在银河系核球中盘星的行星系统可以通过微引力透镜效应法来探测。在微引力透镜事件中，行星对处于其后方的背景恒星的亮度具有放大作用，放大作用的持续时间 T 决定于行星的自行速度^[21]。这种放大是由于恒星发出的光子在传播过程中受到恒星-行星系统影响发生偏转造成的。当行星处于其主星爱因斯坦环范围内时，这种放大效应达到最大。爱因斯坦环半径 $R_E = \sqrt{4GM_*D/C^2}$ ，其中取 $C = 1$ 单位制， $D = D_{OL}D_{LS}/D_{OS}$ (D_{OL} 、 D_{LS} 、 D_{OS} 分别是观测者、透镜天体和源天体之间的距离)， M_* 是源天体的质量。当然，其他背景恒星对背景星的亮度也具有放大效果，不过这种可能性相对较低，约 $(R_E/\delta)^2$ 量级 (δ 是两颗背景星的投影距离)。当发生透镜效应的天体星距星系核球 8 kpc 时，很可能发生微引力透镜效应。因而，微引力透镜效应法所能探测到的行星距离只有 4 kpc。在这个距离上， $1 M_\odot$ 恒星的爱因斯坦环半径大约为 5 AU。

恒星由行星系统造成的光变特征是：一个持续时间很短、较弱的由行星造成的放大效应，叠加上一个持续时间较长、较强的由恒星造成的放大效应。当恒星对背景恒星放大时，在类太阳系中，类木行星与透镜天体的距离为透镜天体与银河系核球距离的一半，行星对背景恒星光度放大 5% 的概率为 20%。这么高的几率是因为类木行星的绕转半径恰好和类太阳恒星的爱因斯坦环相一致。微引力透镜效应法是唯一能在地面上探测到半长轴为几个 AU、围绕主序星旋转的类地行星的方法。

利用微引力透镜效应法，OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) 和 MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) 分别在微引力透镜事件 OGLE 2003-BLG-235、MOA

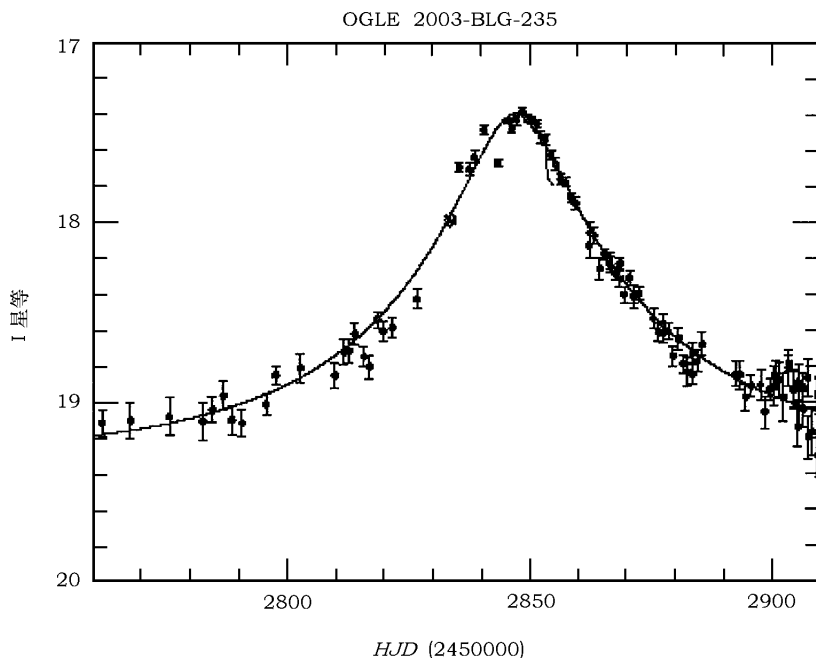


图 3 O235/M53 的光变曲线^[56]

2003-BLG-53 中首先探测到了一个行星系统^[22]。在这两次观测中,都探测到了为期 7 d 的光度偏离,这种偏离是由于双星微引力透镜模型产生的,其中两颗星的质量比率是 $1 : 0.0039_{-7}^{+11}$ 。如果引力系统的主星是一颗主序星,则另一颗星的质量为 $1.5 M_J$ (M_J 为木星质量),半长轴约为 3 AU。图 3 给出了 O235/M53 的光度变化。

3 地外行星探测现状

3.1 类太阳恒星行星系统的探测现状

从 Mayor 和 Queloz^[3] 首次用视向速度法探测到地外行星开始,至今主要有 8 个研究小组利用该方法对类太阳恒星的行星进行探测。他们观测了大约 1800 颗类太阳恒星,搜寻到 100 多颗地外恒星行星系统候选体,也就是说,大约 5% 的目标天体可能存在行星系统。如果把观测时间延长(约 15 yr),则将有约 11% 的目标天体可能被探测到有行星系统。如果恒星最小的表面活动都能被最精确的视向速度测量到的话,则将有 25% 的目标天体可能存在行星系统。通过地外行星的子样本分析地外行星质量与周期分布的趋势,由于选择效应有所偏差,可以线性外推至还没完全取样的整个参数空间,人们发现,在 $M \sin i > 0.3 M_J$ 、 $P < 13$ yr 范围内,至少有 9% 的类太阳恒星存在行星系统;在 $M \sin i > 0.1 M_J$ 、 $P < 60$ yr 范围内至少有 22% 的类太阳恒星存在行星系统^[23]。

Eggenberger 等人^[24] 发现,在已知的约 120 颗地外行星系统里,有 19 颗行星是围绕双星系统或多星系统旋转的;大多数短周期大质量行星是围绕多颗恒星旋转的。Zucker 和 Mazeh^[25] 的研究结果表明,当大质量短周期行星围绕多颗恒星旋转的周期小于 40 d 时,它们的轨道偏心率特别小。这暗示了在围绕多颗恒星旋转的短周期行星形成过程中,迁移起着非常重要的作用,而且双星行星系统中的迁移过程和单星行星系统的可能不同。从研究 5 颗短周期、围绕多星旋转的行星结果来看,很难用现在的模型去解释行星形成和演化过程,至少很难用一种机制来解释所有行星的特征。

第一个围绕主序星的多行星系统是 Butler 等人^[26] 在 1999 年发现的,其主星为仙女座 γ 星。在过去两年里,多行星系统变得普遍起来。除了仙女座 γ 星的 3 颗行星外,2002 年 Marcy 等人^[27] 又发现了另外一个三行星系统,其主星是 55 Cnc。目前发现有两颗行星的恒星系统 11 个,如 HD 1684443^[28]、GJ 876^[29]、47Uma^[30] 和 HD 37124^[31] 等。多行星系统为研究行星间动力学的相互作用和共振^[27,32~34],以及理解原初行星盘的演化环境^[35,36] 提供了独一无二的条件。

如果视向速度的精度为 10 ms^{-1} ,则只能探测到周期为 4 d、 $M \sin i \approx 0.5 M_J$ 的行星。土星对太阳视向速度的调制是 2.7 ms^{-1} ,而如果视向速度为 3 ms^{-1} 时就能探测到最小质量比木星质量 M_{SAT} ($1 M_{\text{SAT}} = 0.298 M_J$) 还小的行星系统。通常假设行星的质量是随机分布的,如果小于土星质量的行星作为伴星出现的几率比木星作为伴星出现的几率小,那么木星质量大小的伴星是否真的为行星?太阳系中的行星质量分布峰值不在 $1 M_J$ 左右,行星演化理论中也没有这种峰值理论^[37~39],所以从理论上说能够探测到质量小于土星质量的行星。Marcy 等人^[34] 首次发现两颗最小质量比土星还小的行星(最小质量分别为 $0.22 M_J$ 和 $0.25 M_J$),它们分别围绕主序星 HD 16141 和 HD 46375 旋转。2003 年 Butler 等人^[31] 探测到的到那时为

止的最小行星系统的最小质量为 $0.12 M_J$ 。最近天文学家又发现了 3 颗新的太阳系外行星，它们的质量远小于以前发现的太阳系外行星，与海王星质量相仿，大约是地球质量的 10~20 倍。2004 年 8 月 25 日，一组欧洲天文学家发现了一颗附属于恒星 HD 160691 的行星，其大小约为地球质量的 14 倍。这颗行星围绕恒星的公转周期非常小，只有 9.5 d，公转半径也只有约 1300000 km。2004 年 8 月 31 日，美国航空航天局 (NASA) 又宣布发现两颗新的太阳系外行星。一颗是属于 Gliese 436 的行星，其质量是地球的 25 倍，公转周期只有 2.5 d，公转半径仅约 4100000 km；另一颗是属于 55 Cancri 的行星，其质量是地球的 18 倍，公转周期不到 3 d，公转半径仅约 5600000 km。55 Cancri 以前曾探测到拥有 3 颗行星，而现在它是第一颗探测到拥有 4 颗行星的恒星。

3.2 其他恒星行星系统的探测现状

一般来说，大部分用视向速度法进行地外行星探测的目标是亮的 F、G 和 K 型主序星，因为这样可以得到足够高的信噪比和高分辨率 ($R > 50000$)。到现在为止，利用这种方法已经探测到 100 多颗地外行星候选体。M 型主序星由于亮度低，探测其是否存在行星系统就需要大口径望远镜，但 M 型星是银河系中数量最多、总质量最大的一类星，所以探测它的地外行星系统是有必要的。天文学家 (如 Endl 等人^[40]、Kürster 等人^[41]、Mayor 和 Santos^[42]、Wright 等人^[43]) 至今共探测了大约 200 颗 M 型星，其中两颗具有地外行星系统：GJ 876^[29] 拥有两颗行星，GJ 436^[44] 拥有一颗行星。

由于多普勒探测样本还不完备，现在很难判断是 M 型星与其他 F、K、G 型星形成历史不同，还是因为在赫罗图低质量区行星形成几率不同，或是由于观测样本少而导致 M 型主序星存在行星的比例较低。

大部分寻找地外行星系统的探测都是围绕太阳质量的主序星周围。Sato 等人^[45] 首次探测到中等质量 G 型巨星的行星，发现在 HD 104985 ($1.6 M_{\odot}$) 周围环绕着一颗行星，其最小质量为 $6.3 M_J$ ，周期为 198 d。他们认为这种研究对于发展行星演化理论非常重要，因为中等质量恒星的星周盘的存在时标要比小质量恒星的短^[46,47]，且这种星的巨型气体行星的存在时标限制了巨型行星的形成时标。传统的核吸积行星形成理论认为^[48]，行星的形成需要上百万年或更长的时间。Boss^[49] 则给出另一个巨型气体原行星盘引力不稳定性模型。在这个模型中，行星几千年就可以形成。中等质量星的行星的研究可以检验盘的稳定性时标。很多 B-A 型星 (像织女星和赫比格 Ae-Be 型星) 的周围都存在星周盘，这说明在恒星演化早期存在原行星盘。也就是说，视向速度法搜寻中等质量恒星的行星是一个很有效的方法。然而，从观测角度来说，精确的视向速度测量不适用于主序上的中等质量恒星，因为这些恒星光谱中的吸收线少且被旋转展宽。另一方面，主序上的 K 型及更冷的星的内禀视向速度弥散太大 ($\geq 100 \text{ ms}^{-1}$)，因此只探测到两颗行星围绕上述主星运动，即天龙座 ι 星^[16] 和 HD 47536^[47]。由于 G 型巨星可由其光谱中的很多窄线测得精确的等值宽度，而且它们内禀视向速度的弥散小于 20 ms^{-1} ，所以 G 型巨星是用视向速度法探测中等质量恒星周围行星系统的最佳选择。

4 利用视向速度法得到的结果及讨论

视向速度法是目前为止探测地外恒星行星系统中运用最广泛的方法，本节主要讨论通过

该方法得到的结果及其意义。

4.1 旋转倾角 ($\sin i$)

虽然少数天体可从依巴谷测光数据中查到 i 的上限^[36], 但由于很难精确测定行星围绕恒星旋转的倾角 i , 所以得不到行星候选体的确切质量。因此, 当旋转倾角接近 90° 时, 质量为 $10\sim 80 M_J$ 的褐矮星就会被误认为是行星。在所有行星里, 它们的旋转倾角指向几率 $P(i) = 1 - \cos i$ 。举例来说, $\sin i$ 在 0 到 0.1 的几率为 $1/200$ 。

Han 等人^[50] 对 46 颗恒星候选体的旋转倾角和确切的质量进行了研究, 结果表明, 这 46 颗恒星候选体的旋转倾角普遍都很小。如果候选体的旋转倾角随机分布, 那么倾角小于 10° 的几率仅仅是 1.5%。假设这 46 颗行星候选体的倾角值是准确的, 可以看出用视向速度法探测到的行星的旋转倾角有严重偏小趋势。Han 等人认为, 这 46 颗行星候选体里有 30 颗不是行星, 而是褐矮星或 M 型星。Halbwachs 等人^[51] 对用视向速度法探测到的最小质量在 $17\sim 60 M_J$ 范围内的行星候选体进行了同样的研究, 发现它们中大部分旋转倾角很小。

4.2 探测的有效性 & 选择效应

视向速度法能非常有效地探测对主星视向速度调制大的行星。视向速度变化的半振幅

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{m_p \sin i}{(M_* + m_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}},$$

其中, m_p 是未知伴星 (行星或褐矮星) 的质量, M_* 是主星质量, e 是行星环绕主星旋转的偏心率, P 是公转周期。通过开普勒第三定律, 周期可以用半长轴表示。实际上, 行星对主星视向速度调制的可探测性依赖于视向速度的精度和在一个相位里探测的频度。一般来说, 如果一个相位里有 $20\sim 30$ 个点, 就能探测 $K > 4\sigma$ 的视向速度的扰动。

探测到的地外行星的质量也有选择效应。现在视向速度的精度最高到 $2\sim 3 \text{ ms}^{-1}$, 所以目前还无法探测到地球质量的行星。

4.3 行星的基本参数 (质量、半长轴和偏心率)

图 4 是视向速度法探测到的地外行星的质量分布。从中可以看出, $M \sin i$ 在 $10\sim 20 M_J$ 范围内的行星数量非常稀少, 而在小质量方向数量迅速上升。在 5 AU 范围内, 不到 1% 的类太阳恒星有大于 $10 M_J$ 的伴星。相对地, 褐矮星在类太阳恒星附近很少, 这就是褐矮星缺乏现象, 也是褐矮星区别于行星的另一个特征。一般来说, 行星是这样定义的: 质量位于冥王星质量与能进行氘燃烧反应质量 (小于 $13 M_J$ 的天体不会发生) 之间, 并围绕通过核反应释放能量的天体旋转的天体; 而褐矮星则是这样定义的: 质量范围在氘核能燃烧的质量到天体内部发生核反应的质量之间的天体。

1999 年前, 几乎所有探测到的地外行星的半长轴都在 1 AU 以内, 而现在探测到的行星半长轴大多在 1 AU 以外。

大多数地外行星的轨道都不是圆形的。行星绕主星旋转的半长轴在 0.1 AU 内的轨道接近圆形, 这是因为它们受潮汐力作用影响。太阳系中木星和其他巨行星的偏心率都在 0.05 内。天文学家尝试用各种理论解释轨道偏心率的形成, 但是迄今为止还没有一种理论得到大家的认同。大多数机制认为, 是由于重力扩散作用或是其他行星对它的扰动 (如共振状态或原初行星盘作用) 的结果。

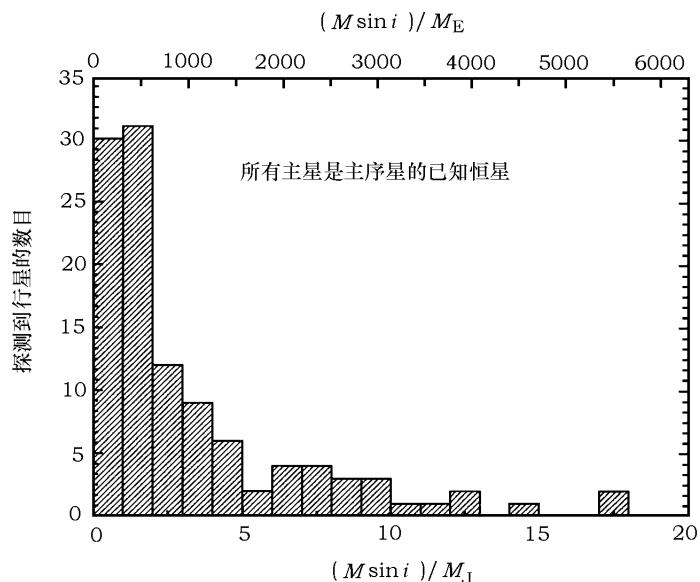


图4 用视向速度法探测到的地外行星的质量分布^[57]

探测到的行星数目从5个木星质量开始向小质量方向递增,可以看出小质量行星比大质量行星更普遍。

4.4 金属丰度

随着最初几颗地外行星的发现,人们得知有行星系统的恒星的金属丰度比场星的平均金属丰度要高^[18,26,28]。

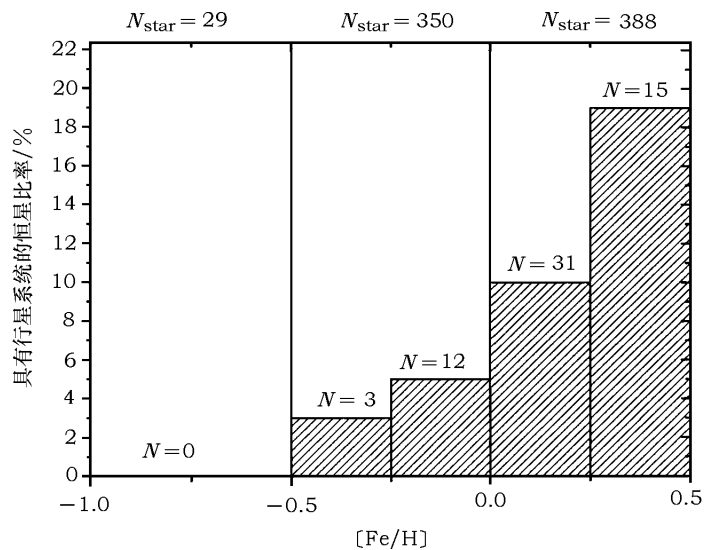


图5 754颗星的行星出现几率及金属丰度分布^[52]

其中 N 为探测到的地外行星的个数, N_{star} 为所探测的样本大小。可以看出,行星出现的几率与金属丰度密切相关。

Fischer 等人^[52]在 2004 年 IAU S219 会议上发表了他们最新的研究成果。他们分析了 754 颗 FGK 型星的光谱, 给出了一个主星金属丰度 (行星绕主星旋转的周期在 3 yr 以内), 以及探测到的巨型气体行星数目的无偏差的相关性关系 (见图 5): 金属丰度越高, 行星出现的几率也越高。与太阳丰度类似的恒星存在巨型气体行星的几率是 5%~10%; 金属丰度是太阳 3 倍的恒星, 其存在行星的几率可以达到 20%; 金属丰度是太阳 1/3 的恒星, 其存在行星的几率只有 3%。这 754 颗星中, 有 61 颗恒星具有行星系统, 所以这项研究排除了因选择效应而导致的结果偏差。

至于高丰度恒星为何容易产生行星, 目前主要存在两种理论模型: 一种认为, 巨型气体行星由于与星周盘相互作用而向里迁移, 恒星吸引原初行星盘的物质和可能的原初行星, 重元素落在对流层表面, 污染了对流层且使其丰度偏高; 另一种认为, 产生恒星的星云里金属丰度本来就比较高, 这样的星云比较容易产生行星^[53,54]。Zhao 等人^[55]通过研究 15 颗有行星系统的恒星的丰度认为, 第一种理论模型不能支持他们测得的金属丰度超丰的程度。Fischer 等人^[52]的研究也不支持第一种理论模型。

Fischer 等人^[52]还解释了金属丰度高的恒星比较容易形成行星的原因。他们首先假设重元素比较容易结合, 这样就可以使得尘埃、岩石以及最终的行星核在新产生的恒星周围诞生。由于年轻的恒星与周围的尘埃和气体有着同样的成分, 从恒星观测到的金属丰度反映了原初物质的金属丰度, 这些金属元素可以在盘中形成行星。

5 类地行星探测计划

传统观点认为, 生命可以在恒星周围可居住带范围内的类地行星上生存 (其表面温度约 300 K)。探测有生命存在的类地行星是一个非常具有挑战性的工作, 也是天文学下一个重大发展方向。这样的探测需要分如下步骤进行: (1) 探测巨型地外行星; (2) 探测类地行星; (3) 寻找生物存在的信号; (4) 确定这种信号是生物活动发出的。

由于类地行星的质量很小, 因此很难在类太阳恒星周围找到。现在可能探测到类地行星的方法是微引力透镜效应法和掩星法。近些年即将发射的几颗卫星将有可能发现大批的地外行星, 特别是类地行星。

5.1 COROT

COROT 的科学目标主要有两个: 一是探测恒星的星震; 二是寻找地外行星系统。它用掩星法探测地外行星, 具有很高的测光精度, 并计划长期 (几个月) 观测目标星。但是由于望远镜的口径小, 所以它不用来专门探测类地行星。恒星星震和地外行星系统观测主要难在剔除像恒星本身活动引起的测光变化, 而 COROT 根据行星引起的恒星光度变化同恒星本身活动引起的变化在色差信号上有很大不同来区分。这种方法对 150 d 内发生一次或两次掩星的恒星非常有效。

COROT 计划 2006 年升空, 对至少 30000 颗 (可能的话是 60000 颗) 主序星进行光变测量, 能探测到 1 h 内 $7 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ 的光变, 预计可探测到几十个地外行星系统。欧洲航天局 (ESA) 和美国宇航局 (NASA) 都在致力于寻找可居住的行星和生命存在迹象, 而 COROT 对类地行星的探测将设立一个类地行星存在法则, 这个法则对于 ESA 和 NASA 的探测有着重

要的战略意义。

5.2 Darwin

Drawin 是一颗 ESA 计划于 2014 年发射的卫星。它的主要科学目标是寻找类地行星，并分析它们的大气成分和生物存在的化学信息。它将搜索 1000 颗离我们最近的恒星，寻找小的岩态行星。在光学波段，恒星与围绕其旋转的类地行星的光度比为 $10^9 : 1$ ，为了克服这个困难，Drawin 将在中红外波段进行观测，在这个波段上述光度比将下降到 $10^6 : 1$ ，这使得探测变得简单一些。而且生命活动在红外波段也会存在一些可探测的迹象。地球上生物的活动会产生气体，比如植物会产生氧气而动物会排出二氧化碳，这些气体与大气相混合，且像其他物质（例如水）一样会吸收一定波段的红外光而留下生命存在的证据。Drawin 就是通过探测并分析行星的大气成分来探知生命存在的可能性。

另外，NASA 也计划发射一颗与 Drawin 相似的卫星 TPF (Terrestrial Planet Finder)。不过 ESA 也可能和 NASA 合作共同发射一颗 Darwin/TPF 卫星。

5.3 Kepler

Kepler 是 NASA 计划发射的一颗专门用来探测类地行星的卫星。它的科学目标是探测行星系统的结构和多样性。具体课题是：(1) 探测各种光谱型恒星的类地行星，以及其他在邻近可居住带、更大一点行星的出现几率；(2) 探测这些行星的大小和半长轴分布；(3) 探测多恒星系统的行星出现几率及恒星轨道分布；(4) 探测短周期巨星的半长轴、反照率、质量和密度分布；(5) 使用视向速度法，确认每个通过测光发现的地球外行星系统是否还存在其他不发生掩星现象的大质量伴星；(6) 探测有行星系统恒星的特征。

Kepler 的探测极限是具有地球质量、大小为地球直径、半长轴为 1 AU 内、围绕 $m_V = 12$ mag 类太阳恒星旋转的行星，行星的掩星时间需在 6.5 h 内，信噪比需大于 8。值得注意的是，虽然它的主要目标是探测可居住带的类地行星，但是也能探测 K 和 M 型像水星大小的行星。Kepler 计划 2012 年升空，将对 100 万颗恒星进行探测，可探测到几百颗类地行星。

5.4 SIM

SIM 计划在 2009 年升空，将探测恒星的距离和位置，它的精度比以前所有项目都至少高百倍，因而可以探测到银河系中任一恒星的距离，并且可以确定某些近邻星是否拥有地球质量的行星。

SIM 寻找地球外行星的目标可分为 4 个：(1) 探测 8 pc 以内、 $1 \sim 3 M_\odot$ 的类地行星，这要求测光精度很高，角分辨率为 $1 \mu\text{as}$ 。该范围内大约有 250 颗恒星；(2) 探测 8~30 pc 以内、 $3 \sim 20$ 个地球质量的类地行星。这个范围内大约有 2000 颗恒星；(3) 测量已经用视向速度法探测到的行星的真实质量，并寻找其他行星；(4) 探测已知的多行星系统中是否还有其他行星存在。

SIM 计划可以解决有关行星特性的很多关键问题，如有行星系统的恒星比例为多少？一个典型的恒星行星系统中有几颗行星？它们的质量和半长轴分布如何？圆形轨道的几率有多大？恒星行星系统与太阳系相同的几率有多大？

6 总结和展望

目前，行星系统的探测主要基于地面设备和视向速度法。但是用视向速度法寻找行星系

统需要几年甚至几十年长时间跨度的观测,而且一般每次只能观测一颗恒星,因此现阶段地面上为数不多的望远镜实在很难满足大批地外行星的寻找。另外,由于受视向速度测量精度的影响,以及小质量行星对主星视向速度影响特别小特点的约束,视向速度法不能探测到地球质量的行星;另一方面,在地面,掩星法的探测精度也不能实现对类地行星的探测,因此只能寄希望于空间设备。第5节介绍的空间设备的测光本领都比较强,它们能探测到类地行星。大部分天文卫星用掩星法和微引力透镜法来探测行星系统,但也有卫星通过某些技术采用直接方法进行观测。

即使探测到类地行星,与寻找到地外生命的目标还相差很远。为此,天文学家研究某些行星候选体的大气成分,以寻找生命存在的迹象。他们假设其他行星上的生命结构同地球上的相同,都是以碳原子为基础的。但是是否其他生命构成确实同地球上的生命构成相同?如果不同,应该去寻找何种大气成分的行星?这是天文学家将面临的复杂问题,也是他们希望研究的挑战性课题。

参考文献:

- [1] Wolszczan A, Frail D A. *Nature*, 1992, 355: 145
- [2] Wolszczan A. *Science*, 1994, 264: 538
- [3] Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378: 355
- [4] Griffin R. *MNRAS*, 1973, 162: 243
- [5] Campell B, Walker G A H, Yang S. *ApJ*, 1988, 331: 902
- [6] Cochran W D, Hatzes A P. *Ap&SS*, 1994, 212: 281
- [7] Marcy G W, Butle R P. *PASP*, 1992, 104: 270
- [8] Bulter R P, Marcy G W, Williams E *et al.* *PASP*, 1996, 108: 500
- [9] Noyes R W, Jha S, Korzennik S G *et al.* *ApJ*, 1997, 483: L111
- [10] Brown T M, Noyes R W, Nisenson P *et al.* *PASJ*, 1994, 106: 1285
- [11] McMillan R S, Smith P H, Perry M L *et al.* *Proc. SPIE*, 1990, 1235: 601
- [12] McMillan R S, Moore T L, Perry M L *et al.* *Ap&SS*, 1994, 212: 271
- [13] Queloz D, Mayor M, Naef D *et al.* In: Bergeron J, Renzini A eds. *From Extrasolar Planets to Cosmology: The VLT Opening Symposium*, Berlin: Springer-Verlag, 2000: 548
- [14] Brown T M, Noyes R W, Nisenson P *et al.* *PASP*, 1994, 106: 1285
- [15] Pepe F, Mayor M, Delabre B *et al.* *Proc. SPIE*, 2000, 4008: 582
- [16] van Eyken J C, Ge J, Mahadevan S. *ApJ*, 2004, 600: L79
- [17] Gatewood G D. *AJ*, 1987, 94: 213
- [18] Colavita M, Shao M. *Ap&SS*, 1994, 212: 385
- [19] Hale A, Doyle L R. *Ap&SS*, 1994, 212: 335
- [20] Henry G W, Marcy G W, Butler R P *et al.* *ApJ*, 2000, 529: L41
- [21] Mao S, Paczynski B. *ApJ*, 1991, 374: L37
- [22] Bond I A, Udalski A, Jaroszynski M *et al.* *ApJ*, 2004, 606: L155
- [23] Charles H L, Daniel G. *ApJ*, 2003, 598: 1350
- [24] Eggenberger A, Udry S, Mayor M. *A&A*, 2004, 417: 353
- [25] Zucker S, Mazeh T. *ApJ*, 2002, 568: L113
- [26] Butler R P, Marcy G W, Fischer D A *et al.* *ApJ*, 1999, 526: 916
- [27] Marcy G W, Butler R P, Fischer D A *et al.* *ApJ*, 2002, 581: 1375
- [28] Marcy G W, Butler R P, Vogt S S *et al.* *ApJ*, 2001, 555: 418
- [29] Marcy G W, Butler R P, Fischer D A *et al.* *ApJ*, 2001, 556: 296

- [30] Fischer D A, Marcy G W, Butler R P *et al.* ApJ, 2002, 564: 1028
- [31] Butler R P, Marcy G W, Vogt S *et al.* ApJ, 2003, 582: 455
- [32] Laughlin G, Chambers J E. ApJ, 2001, 551: L109
- [33] Lee M H, Peale S J. Bull. Am. Astron. Soc., 2002, 34: 933
- [34] Marcy G W, Bulter R P, Vogt S S. ApJ, 2000, 536: L43
- [35] Chiang E I, Murray N. ApJ, 2002, 576: 473
- [36] Ford E B, Tremaine S. PASP, 2003, 115: 1171
- [37] Lissauer J J. Icarus, 1995, 114: 217
- [38] Boss A P. Science, 1995, 267: 360
- [39] Levison H F, Lissauer J J, Duncan M J. AJ, 1998, 116: 1998
- [40] Endl M, Cochran W D, Tull R G. AJ, 2003, 126: 3099
- [41] Kürster M, Endl M, Rounesnel F *et al.* A&A, 2003, 403: 1077
- [42] Mayor M, Santos N C. In: Shaver P A, Lella L Di, Gimenez A eds. Astronomy, Cosmology and Fundamental Physics, Proceedings of ESO-CERN-ESA Symposium, Garching: springer, 2003: 359
- [43] Wright J T, Marcy G W, Butler R P. ApJS, 2004, 152: 261
- [44] http://exoplanets.org/neptune_web/gl436.pdf
- [45] Sato B, Ando H, Kamei E *et al.* ApJ, 2003, 597: L157
- [46] Haisch K E Jr, Lada E A, Lada C J. AJ, 2001, 121: 2065
- [47] Haisch K E Jr, Lada E A, Lada C J. ApJ, 2001, 553: L153
- [48] Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P *et al.* Icarus, 1996, 124: 62
- [49] Boss P B. ApJ, 1998, 503: 923
- [50] Han I, Black D C, Gatewood G. ApJ, 2001, 548: L57
- [51] Halbwachs J L, Arenou F, Mayor M *et al.* A&A, 2000, 355: 581
- [52] Fischer D, Valenti J A, Marcy G. In: Dupree A K ed. Stars as Suns: Activity, Evolution and Planets, IAU S219, San Francisco: ASP, 2004, in press
- [53] Gonzalez G. MNRAS, 1997, 285: 403
- [54] Gonzalez G. A&A, 1998, 334: 221
- [55] Zhao G, Chen Y Q, Qiu H M. AJ, 2002, 124: 2224
- [56] <http://www.astrouw.edu.pl/~ogle/ogle3/ews/2003/blg-235.html>
- [57] <http://exoplanet.org>
- [58] <http://exoplanets.org/almanacframe.html>

The Progress of Exploring Extra-Solar Planetary Systems

LIU Yu-juan, ZHAO Gang

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

Abstract: With the advance of the space exploring, the study of the extra-solar planetary systems becomes an interesting topic since such system may exist the life or even the modern civilization. In this paper we give a brief introduction on the discovery of extra-solar planetary systems, and discuss the feasibility of detection techniques and methods developed in recent years. In particular, we present detailed interpretations of the results by the radial velocity method. With the launch of some specific small satellites, we can predict the discovery of a large number of candidates of the extra-solar planetary systems. We can expect that the exploring of extra-solar planetary systems will have a prospective era in the near future.

Key words: astrophysics; extra-solar planet; review; Jupiter like planet; terrestrial planet