

文章编号: 1000-8349(2009)01-0014-15



# 太阳系外行星探测方法及统计特征

张 牛<sup>1,2</sup>, 季江徽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 太阳系外行星的探测和研究在过去十几年取得了重大进展, 仅 2007 年就发现 62 颗太阳系外行星, 随着行星物理学、天体生物学等学科的兴起, 必将掀起对太阳系外行星研究的一次浪潮。简要回顾了太阳系外行星研究的发展历史, 介绍了探测太阳系外行星的主要方法和手段, 并对方法本身的特点展开分析论述, 列出了各种方法应用的最新进展。对已发现的 270 多颗太阳系外行星进行了统计分析, 得出了一些预见性的结论。

**关键词:** 天体物理学; 太阳系外行星; 探测方法; 统计特性

**中图分类号:** P172      **文献标识码:** A

## 1 引 言

地球是目前人们确认的唯一存在生命的行星, 长久以来科学家一直都希望在太阳系外能够发现适合生命存在的其他类地行星。20 世纪 80 年代, Bradford 和 Richard<sup>[2]</sup> 对绘架座  $\beta$  星进行红外研究时, 发现它周围有一个原始物质 (气体和尘埃) 组成的原恒星盘, 在将来可能形成一个行星系统<sup>[1-3]</sup>。这个发现让人们认识到也许在很多恒星形成初期, 周围都可能存在扁平的物质盘, 而不仅仅是早期太阳系, 这对行星形成的标准吸积模型<sup>[4]</sup> 是个有力的佐证。

Wolszczan 和 Frail<sup>[5]</sup> 在 1992 年对脉冲星 PSR1257+12 的脉冲周期研究时, 发现它周围有其他天体。随后 Rasio 等人<sup>[6]</sup> 对此进行了验证, 后来证实这是个包含了 3 颗行星的多行星系统。脉冲星也是超新星遗迹, 从某种意义上说, PSR1257+12 行星系统是人类发现的第一个太阳系外行星系统。但脉冲星的高能辐射使得在这样的行星上不可能存在生命。人们更关心类太阳 (solar-type) 恒星周围的行星, 特别是类地行星。PSR1257+12 的行星系统是根据中心

**收稿日期:** 2008-03-28; **修回日期:** 2008-05-28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (10573040, 10673006, 10833001, 10203005); 紫金山天文台小行星基金会资助课题

脉冲星脉冲周期的微小变化推测而间接得到的。探测太阳系外行星的方法大部分是间接法, 如在类太阳恒星周围发现的第一颗行星 51 Peg b 是通过恒星视向速度的研究发现的<sup>[7]</sup>。

截至 2008 年 3 月 13 日(下同), 已发现 277 颗太阳系外行星。这些行星的质量大部分与太阳系的气态巨行星相当, 按照目前较为公认的行星形成理论<sup>[8]</sup>, 它们可能是巨行星。巨行星在原恒星盘外围较易形成, 但已发现的太阳系外行星中却有 140 多颗与其中心恒星的距离小于 1AU; 从行星轨道偏心率的大小上看, 太阳系外行星系统和太阳系大不一样, 许多行星轨道具有较大的偏心率。

大量的数值模拟研究了关于行星形成的诸多问题, 如从原恒星盘形成星子, 星子吸积形成行星<sup>[9,10]</sup>, 以及类地行星<sup>[11-14]</sup>在行星系统中的形成和动力学演化。在 21 世纪初, 相关研究表明在原恒星盘中, 类地行星有可能会因大行星的迁移而被散射出行星系统或被俘获在巨行星的共振轨道<sup>[15-19]</sup>。最新的数值模拟则预言由于巨行星的向内迁移, 可导致 1/3 的行星系统在可居住区拥有轨道偏心率较小的类地行星<sup>[20]</sup>。而去年发现的 Gl 581 c<sup>[21,22]</sup>行星更是让天体生物学家兴奋不已, 它可能是第一颗在可居住区发现的类地行星。

现在的探测技术已经可以探测像海王星(15 倍地球质量)那样甚至更小的太阳系外行星, 2005 年拍下了第一张它们的红外照片(2M 1207 b<sup>[63]</sup>)。虽然对太阳系外行星的研究刚刚起步, 但接下来的 10~20 a 无疑是个十分重要的阶段, 美国航天局(NASA)和欧空局(ESA)都有长期的太阳系外行星探测计划, 如 Kepler、TPF、Darwin 等<sup>[62]</sup>。

本文第 2 章介绍了几种常用的探测方法及各种方法应用的最新进展, 第 3 章按太阳系外行星的轨道特征对其进行了分类, 第 4 章对已发现的太阳系外行星进行统计研究。

## 2 探测方法

Perryman<sup>[23]</sup>对太阳系外行星的探测方法做过细致的总结。目前比较成熟的方法有 6 种, 分别是直接观测法、天体测量法、视向速度法、掩星法、微引力透镜效应法和脉冲星计时法。视向速度法和掩星法是目前最成熟、最有效的探测方法, 已发现的太阳系外行星中的大部分都是由这两种方法发现的。所有的方法中除直接观测外, 都是基于引力效应的间接方法, 这也是目前探测方法的一个显著特点。脉冲星计时法常用于探测脉冲星的行星, 而目前研究的对象主要是类太阳恒星周围的行星, 故在此不再讨论。

### 2.1 直接观测法

太阳系外行星由于距离地球遥远, 自身不发光而又在很亮的恒星附近, 就像是聚光灯附近的一只萤火虫, 只有关掉聚光灯, 才可能看到萤火虫。目前基于这种思想的探测方法有两种: 一种是利用物理上的干涉效应, 当两束频率相同的光位相相差半个周期时其叠加的结果是两两相消。目前 Keck 天文台正在做这方面的努力<sup>[62]</sup>, 将两个相距近百米(85 m), 直径 10 m 的望远镜作为干涉仪进行太阳系外行星的探测研究。而 LBTI(Large Binocular Telescope Interferometer)计划<sup>[62]</sup>的两个 8.4 m 的望远镜协调后相当于一个直径 22.8 m 的望远镜, 用于太阳系外行星的探测和研究。欧空局也有基于干涉原理的 Darwin 计划, 该计划是由 6 个空间望远镜和一个数据终端组成的阵列, 投放在太阳与地球的  $L_2$  平动点处, 是最有希望拍下太阳系外行星光谱的计划<sup>[24]</sup>。另一种是受日冕研究的启发, 对日冕仪稍作修改用于探测太阳系外恒星周围的行星。这种方法的原理简单且容易想象, 就像是

用一个挡板把聚光灯遮住,这时聚光灯旁边的景物相对就容易观察了。欧南台(ESO)就用此方法拍下了 AB Pic<sup>[25]</sup> 行星系统的照片。美国航天局的 TPF 空间计划<sup>[62]</sup> 在设计上既有基于干涉消光的设备也有这种修改过的日冕仪用来探测太阳系外行星。不管是哪种方法,都是尽可能滤掉中心恒星的光。

理论上在任何波段都能使用直接观测法,但行星不发光,大部分是红外辐射,在红外波段进行观测的效果要比可见光波段好得多。假设行星在可见光波段的反照率是 30%,那么它要比恒星暗 20 亿倍;而在 10  $\mu\text{m}$  的红外波段只比恒星暗 1000 万倍<sup>[26]</sup>。受地球大气的影响,红外波段的观测往往在太空中进行。2003 年发射的 Spitzer 空间望远镜是迄今为止最大的红外望远镜,人们正在用它进行系外行星的探测和研究。美国航天局、欧空局和加拿大航天局联合计划于 2013 年发射的 JWST(James Webb Space Telescope) 将进一步提高红外成像的分辨率,届时将能更好地在红外波段探测太阳系外行星,研究行星的质量、光谱等<sup>[62]</sup>。

目前使用直接观测的方法已经发现了 5 颗<sup>[60]</sup> 太阳系外行星,随着未来地面和空间计划的展开,用这种方法将会探测到越来越多的太阳系外行星。直接观测能获得太阳系外行星的光谱,目前主要是针对那些已知的“热”的类木行星(Hot Jupiter)在红外波段进行研究。对于这类已知的系外行星可以精确计算掩星开始的时间,得到恒星的光谱并和没有发生掩星时的光谱比较来研究其大气的组成以及行星上是否有生命迹象(氧、甲烷、水等),其意义将不亚于第一颗太阳系外行星的发现。不久前 Swain 等人<sup>[27]</sup> 用哈勃望远镜得到一颗太阳系外行星(HD 189733 b)的近红外光谱,研究后发现这颗行星大气中可能存在甲烷,这是第一次在太阳系外行星上发现有机分子,这可能意味着太阳系外生命迹象探索的开始。

## 2.2 天体测量法

由于受到行星的引力作用,恒星和行星一起绕它们的共同质心作圆周运动。天体测量法通过测量恒星空间位置相对星空背景的微小改变来推知行星信息。恒星位置的精确测定与距离有关。已知的 277 个太阳系外行星系统中与地球的平均距离约为 200 pc,而在 10 pc 以内的只有 8 个。如上所述,太阳因木星而引起的位置变化在 10 pc 的地方来看,分辨角大约是毫角秒的量级,达到这种精度在目前还有困难。按目视观测最敏感的波长 0.55  $\mu\text{m}$  来计算, $\theta_v'' = 140''/D$  (其中  $D$  为望远镜的直径,以 mm 为单位),要在地球上分辨出这种变化,需要直径为 140 m 的望远镜。

仅就方法而言,行星的质量越大,轨道越大,恒星的这种位置变化就越明显。所以天体测量法容易发现离地球较近的恒星所拥有的大质量、大轨道行星。遗憾的是在 10 pc 的范围内,适合观测的恒星不到 50 颗<sup>[22]</sup>。截至目前,用该方法还没有直接发现太阳系外行星,但是与其他方法结合对太阳系外行星的研究已经获得了一些进展。Benedict 等人<sup>[28]</sup> 首次利用该方法(结合视向速度)定出了一颗太阳系外行星(GI 876 b)的质量,并且该方法在 55 Cnc e<sup>[29]</sup> 的发现过程中也有重要贡献。在未来的 SIM(Space Interferometry Mission) 探测计划和地基 VLTI(Very Large Telescope Interferometer) 探测计划<sup>[62]</sup> 中有望将测量精度分别提高到 2 个微角秒和 20 个微角秒<sup>[1]</sup>,届时将会有更多的发现。欧空局计划 2011 年发射的 Gaia 将有 2 个望远镜处于太阳轨道对银河系近 10 亿颗(约 1% 的)恒星进行观测,虽然 Gaia 的主要目的不是探测太阳系外行星,但是利用其所获得的关于恒星位置、速度、光度等高精度数据,人们可以采用天体测量法和掩星法(见 2.4 节)发现未知的系外行星,进而还可以得到许多行星的大小及轨道倾角等信息。

### 2.3 视向速度法

目前已发现的太阳系外行星大部分是使用视向速度法发现的。其原理是, 远处的恒星与行星绕共同质心运动, 观测到恒星的光谱发生了变化(谱移)。当恒星向着地球运动时, 光谱向蓝端移动; 当恒星远离地球运动时, 光谱向红端移动。谱移量与视向速度的关系为  $V_R = (\Delta\lambda/\lambda)c$ , (其中  $V_R$  为视向速度,  $\Delta\lambda$ 、 $\lambda$  分别为谱线波长变化量和谱线波长,  $c$  为光速)。例如木星和太阳组成的简单二体系统, 在惯性坐标系中看, 太阳视向速度的变化幅度约为  $\pm 12.47$  m/s, 太阳光谱中的  $H\alpha$  谱线应该有 0.0273 nm 的位移。反过来, 从光谱分析得到谱线位移量的大小可以推知视向速度。恒星有无视向速度的周期变化则预示了它是否拥有可能的行星系统。早在 1952 年 Struve<sup>[30]</sup> 就提出视向速度法是一种简单、可靠的速度测定方法, 并建议对双星系统进行系统的研究。早期视向速度的测量精度在 1000 m/s, 现在的技术可以达到 3 m/s<sup>[1]</sup>。人们正在努力使精度达到 1 m/s, 从而可以探测到像地球大小的行星<sup>[23,24,31]</sup>。

视向速度与轨道速度不同, 轨道面与视向面(即天球切平面)的夹角称作轨道倾角  $i$ , 轨道速度  $V$  与视向速度  $V_R$  的关系为,  $V_R = V \sin i$ 。当视向与轨道面垂直时(Face-on),  $i = 0$ , 得不到视向速度; 当视向在轨道面内时(Edge-on), 得到的视向速度就是轨道速度( $V = V_R$ )。恒星的视向速度蕴含了行星的信息, 由视向速度曲线可直接得出行星的周期, 估计轨道的形状(曲线的形状接近正弦曲线, 表示轨道偏心率较小)。还可以近似推导出轨道的大小以及行星的最小质量。仍以二体问题为例, 由开普勒第三定律可得,

$$(a_s + a_p)^3 = \frac{G(M_s + M_p)}{4\pi^2} P^2 \quad (1)$$

其中,  $P$  为行星周期, 由观测得到; 恒星质量  $M_s$  一般可通过动力学方法或其他方法(如根据质光关系从光度估计, 或利用恒星在赫罗图上的理论演化轨迹估计等)求得; 假设行星质量远小于恒星( $M_p \ll M_s$ ,  $a_s + a_p \approx a_p$ ), 可得行星轨道大小; 结合轨道方程可得行星的最小质量:

$$(M_p \sin i)^3 = M_s^2 K^3 (P/2\pi G)(1 - e^2)^{3/2}. \quad (2)$$

其中,  $K$  为恒星视向速度半幅值,  $e$  可由视向速度公式及开普勒方程解出。实际上该方法除轨道倾角无法得到外, 其他的轨道参数均可得到<sup>[23,24]</sup>。

视向速度法直接测量的是恒星光谱的位移量, 信号不随距离地球的远近而变化, 所以在距离地球 100 l.g. 范围内的约 1000 颗类太阳恒星都是探测的对象。该方法较容易探测到小轨道、大质量的太阳系外行星。视向速度的测量精度正接近 1 m/s, 对轨道半长径小于 0.5 AU 的太阳系外行星, 视向速度法将比 SIM 还要灵敏; 对轨道半长径大于 4 AU 的太阳系外行星, 视向速度法也要比 VLTI 灵敏<sup>[24]</sup>。在今后的探测活动中, 视向速度法仍是一种主要方法。对于国内太阳系外行星探测计划也应该优先考虑此种方法, 例如由中国科技大学天体物理中心、美国佛罗里达大学天文学系、南京大学和云南天文台合作的 LiJET 计划就是利用改进后的 ET(Exoplanet Tracker) 与国家天文台南方基地的 2.4 m 望远镜匹配, 进行太阳系外行星的探测, 预期其视向精度能达到 1 m/s。而 LAMOST(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) 的建成也必将快速推动国内系外行星探测的发展<sup>[32]</sup>。

### 2.4 掩星法

从地球看, 如果行星的轨道倾角接近于  $90^\circ$ (Edge-on) 时, 那么行星将会从恒星的表面穿过。虽然无法直接观测到, 但是行星遮住一部分光, 恒星的光度会发生变化, 通过监测恒星光

度的周期性变化来探测太阳系外行星即为掩星法。

掩星法的应用一般可分为两个方面：对轨道已知的，可精确计算掩星开始的时间，一次观测就足以判断轨道面与视向面是否共面，但是研究范围往往在 100 pc 内<sup>[24]</sup>。一旦观测到掩星现象，就可以得出轨道倾角和行星的直径。结合视向速度可得出行星的真实质量，并估计密度，进而推测行星的组成。HD 209458 b<sup>[33]</sup> 是用视向速度法发现的一颗太阳系外行星，利用掩星法得到其轨道倾角为  $86.7^\circ$ ，密度为  $0.27 \text{ g/cm}^3$ ，由此推断它是一颗气态巨行星。另一方面，使用中小型望远镜监视恒星的亮度，对有周期性涨落的恒星再用视向速度法研究，这样做已发现了一些太阳系外行星，但大部分距离在 1000 pc 以上，使得后续研究难以进行。

这种方法有一定的局限性和较大的偶然性。行星系统能否被发现很大程度上取决于行星轨道倾角及轨道半长径的大小。假设行星轨道为圆轨道，轨道半长径为恒星半径的 10 倍，轨道倾角是随机的，那么它有约 10% 的几率从恒星表面经过。显然掩星法适用于发现直径比较大，轨道比较小的太阳系外行星，同时取决于距离地球的远近和对光度的测量精度。这些条件限制了掩星法的应用。但掩星法也有自身的优点，比如距离恒星近意味着行星周期短，这样可以在较短的时间内观测多个周期。目前使用掩星法发现了 30 多颗<sup>[60]</sup> 太阳系外行星，但是没有发现多行星系统。表 1 列出了 8 颗用掩星法发现的太阳系外行星的轨道参数。

表 1 8 颗由掩星法发现的太阳系外行星的轨道特征

行星名称	质量 $M/M_{\text{Jup}}$	周期 $P/\text{d}$	轨道半长径 $a/\text{AU}$	偏心率	倾角 $i/(\circ)$
HD 209458 b	0.69	3.5247	0.045	0.07	86.68
OGLE-TR-56 b	1.29	1.2119	0.0225	0	78.8
OGLE-TR-113 b	1.32	1.4324	0.0229	0	89.4
GJ 436 b	0.072	2.6439	0.0287	0.15	86.5
HD 149026 b	0.36	2.8766	0.0432	0	90
TrES-3	1.92	1.3062	0.0226	—	82.15
WASP-4 b	1.12	1.3382	0.023	0	88.59
CoRoT-Exo-1 b	1.03	1.5089	—	0	85.1

使用这种方法进行探测的计划越来越多，哈勃空间望远镜在进行 SWEEPS(Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search) 时就用掩星等方法发现了 16 个太阳系外行星。EPOCh (Extrasolar Planet Observations and Characterization) 探测器<sup>[62]</sup> 本来是美国航天局在 2005 年发射升空用于研究彗星的，现在人们让它使用掩星法进行系外行星的探测，并在今年一月份已经开始观测。美国航天局还计划在 2009 年发射 Kepler 空间望远镜，Kepler 计划也将使用掩星法探测系外行星，届时有望发现更多地球大小的行星。法国国家空间研究中心 (CNES) 的 CoRoT 卫星于 2006 年 12 月升空，目前已经发现了 2 颗太阳系外行星。该计划的一个主要目标就是用掩星法在  $1.2 \times 10^5$  颗 12~15.5 mag 的恒星周围进行行星探测，这也是第一个利用掩星法探测太阳系外行星的高精度空间计划。空间光度测量的精度可以达到几万分之一，是地面上测量精度的几十倍<sup>[34]</sup>。Bordé 等人<sup>[35]</sup> 认为较小的类地行星主要分布在 14~15 mag 的 K2-M2 型星周围，而较大的巨行星主要分布在 15~16 mag 的 F7-G2 型星周围。CoRoT 卫星不仅能探测到太阳系外的巨行星，还能够探测到较小的类地行星。预期 CoRoT 卫星将会发现

更多的巨行星和几十个较小的类地行星<sup>[64]</sup>。另外值得一提的是 2003 年加拿大航天局进行的 MOST(Microvariability & Oscillations of STars) 计划<sup>[62]</sup>, 该计划同样使用掩星法对系外行星进行探测研究。MOST 是加拿大的第一个空间望远镜, 也是迄今为止最小的空间望远镜(只有手提箱大小), 这样的卫星由于成本较低, 可以长时间的对单一恒星进行跟踪监测, 适合对某一已知的太阳系外行星系统进行详细的研究。以 MOST 为代表一类系外行星探测计划给我们提供了一种太阳系外行星探测研究的新思路, 值得借鉴。

## 2.5 微引力透镜效应法

背景星(Source Star)发出的光沿直线传播, 在经过质量为  $M$  的天体(Lensing Star)附近时会发生偏折(见图 1), 偏折角为  $\alpha = 4GM/c^2r$  ( $G$ 、 $c$  分别为引力常数和光速;  $r$  是碰撞参数, 即光线到  $M$  的最小距离)。此时  $M$  相当于一个“凸透镜”, 背景星的像对观测者的立体角被放大, 而背景星的表面亮度是不变的, 因此观测到的通量变大。其放大率为,

$$A = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad (3)$$

上式中  $u \equiv \theta_s/\theta_E$  ( $\theta_s$  即图 1 中  $\angle SOL$ ;  $\theta_E \equiv \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$  是特征角, 对应的特征长度  $R_E \equiv \theta_E \cdot D_L$  即爱因斯坦半径<sup>[36]</sup>) 作为引入的参数。由于背景星和透镜星之间的相对运动,

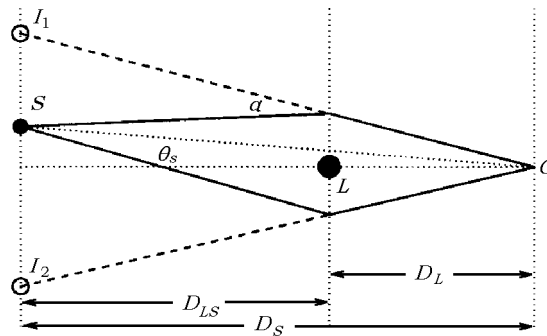


图 1 引力透镜示意图

参数  $u(t)$  与时间有关。背景星的像在垂直于  $OL$ (观测者与透镜的连线) 方向上移过一个爱因斯坦半径的时间为该引力透镜的特征时间尺度, 以  $t_E$  表示, 一般为几天到几周时间。

如果是行星系统恰好在地球与背景星之间时(见图 2(a)), 背景星的光传向地球, 在行星

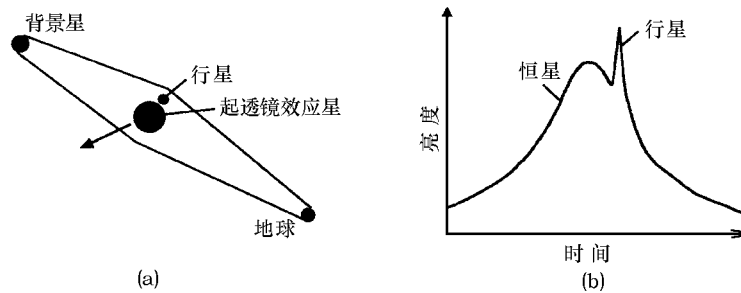


图 2 微引力透镜示意图及光变曲线<sup>[3]</sup>

系统所在处也会发生弯折, 此时的偏折角为  $\alpha = \alpha_1(r_1) + \alpha_2(r_2)$  (下标 1、2 分别指行星系统的恒星和行星)。行星造成的微引力透镜效应持续时间较短, 一般为几个小时, 叠加在一个由恒星造成的强度较强、持续时间较长的放大效应之上, 观测到的背景星的光度因此会在较短的时间内发生畸变, 如图 2(b) 所示是对应的背景星光变曲线示意图。

这种方法需要长时间的监测, 而银河系中心核球中有足够多的恒星充当背景星 ( $D_S \approx 7 \sim 8$  kpc), 使得连续的监测成为可能, 因此适用于探测在地球和银心之间的行星系统 ( $D_L \approx 3 \sim 4$  kpc)。微引力透镜效应法的一个优点是利用现有的技术可以探测像地球般大小的行星。而探测小质量、大轨道的太阳系外行星, 对其他方法来说还是非常困难的。另外对光度的监测在地球上所需的设备相对简单, 众多的小型望远镜就可以担当此任。从 20 世纪 90 年代开始就有好几个这样的计划 (EROS, OGLE, MACHO, MOA) 进行微引力透镜效应的探测, 并已经监测到上千个微引力透镜效应<sup>[36]</sup>。这种构形是特殊的, 具有不可重复性, 一次观测往往不足以发现行星系统。为此人们把地球上不同区域的多个监测点联合起来组成监测网以便提供不间断的监测, 例如 PLANET 计划就是其中之一。截至目前用这种方法已发现 6 颗太阳系外行星, 第一颗小质量、大轨道的太阳系外行星 (OGLE-05-390L b)<sup>[65]</sup> 就是用这种方法发现的。

### 3 太阳系外行星的分类

行星按不同的标准有不同的分类, 本文按照太阳系外行星的轨道特征将其分成大偏心率行星、近圆轨道行星和类 51 Peg b 行星三类。

#### 3.1 大偏心率行星

已发现的太阳系外行星中很多轨道偏心率较大, 其中最大的 HD 80606 b 的偏心率达 0.927。本文将轨道偏心率大于 0.1 的系外行星称为大偏心率行星, 其数目是已知太阳系外行星中最多的, 共有 251 颗<sup>[60]</sup>。由于偏心率较大, 故用视向速度法得到的其中心恒星视向速度曲线不再是接近正弦的形状。如图 3(a) 是 16 Cyg B 的视向速度曲线, 该行星系统中行星的轨道偏心率为 0.68。图 3(b) 是其行星 16 Cyg B b 的轨道与太阳系内行星轨道的比较, 很明显这种大偏心率轨道使得行星表面的温度变化很大, 不适合生命的形成与发展。

大偏心率容易引起系统的不稳定性<sup>[39,40]</sup>, 同时要求在研究轨道演化时应该考虑行星与

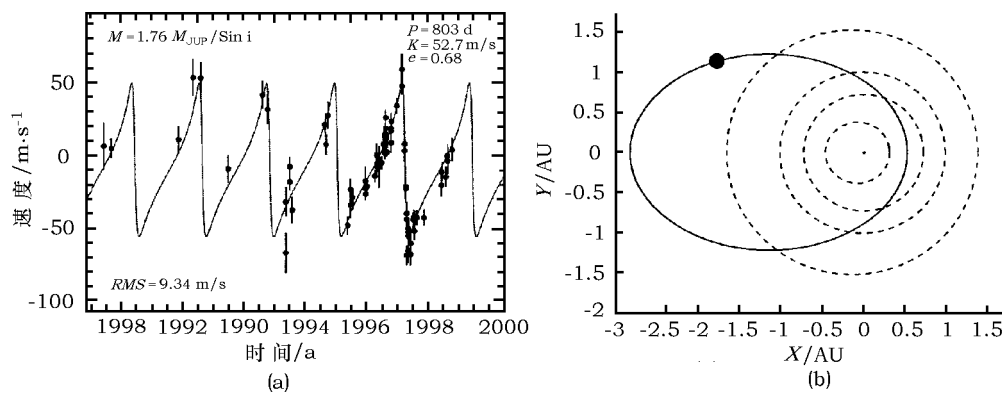


图 3 16 Cyg B 的视向速度曲线及其行星系统轨道示意图<sup>[38,60]</sup>

原恒星盘(早期)以及行星之间的引力相互作用。Chambers<sup>[41]</sup>在1999年提出一种处理近距离相互作用的混合辛算法,使得N体数值模拟在这方面的研究有了很大的进展。对行星系统的形成和演化,目前比较公认的是大行星在行星形成过程中起着重要作用。有一个大质量行星的多行星系统,其构形可以稳定地存在几百万年甚至上亿年,之后轨道会发生混沌,大行星把一些小行星散射到靠近恒星的较小轨道,而另一些则被散射出行星系统<sup>[42]</sup>。16 Cyg B b 偏心率大的原因,有人认为是行星首先在原恒星盘中形成然后通过某种机制演化到大偏心率的状态,而这种机制很可能是16 Cyg A的引力作用<sup>[31,43]</sup>。多行星系统中轨道的长期共振也会激发较小天体的偏心率,而不仅仅局限于上述双星情况。

### 3.2 近圆轨道行星

太阳系中的行星除水星外轨道偏心率都不到0.1,因此行星表面的温度变化相对于大偏心率椭圆轨道行星而言较小。通常把轨道偏心率小于0.1的行星称为近圆轨道行星。太阳系外行星中这类小偏心率近圆轨道行星,如果位于可居住区的话,则无疑是人们关心的对象。而在已知的太阳系外行星中这类行星的数量很少,距离中心恒星在0.2 AU(可以保持它们的偏心率)之外的大约只有10%的轨道为近圆轨道。而地球上出现生命很大程度上得益于木星,水星和月球表面密集的陨击坑,以及冥王星又扁又长的轨道,让人们想到太阳系的早期并不像今天这样,可能每周都会有彗星或者是其他天体撞击地球,生命在这样的环境下是不可能形成和发展的。在太阳系行星中占主导地位(质量大)的木星,可以“保护”靠近里面的类地行星,给生命的形成和发展提供一个相对稳定的环境。类似的在距离恒星0.3~4 AU之外如果没有一颗大质量的行星,基本上可以排除存在生命的可能性<sup>[24]</sup>。已知的太阳系外多行星系统中在4 AU之外有木星质量大小的行星系统也比较少。因为最成功的视向速度法对大质量小轨道的行星灵敏,而且较大轨道的行星周期长,需要长时间的监测,这都是在距离中心恒星较远的地方没有发现类地行星的原因。

### 3.3 类 51 Peg 行星

51 Peg b是第一个在太阳系外类太阳恒星周围发现的行星,它的轨道比较奇特,距离中心恒星0.05 AU(周期为4.23 d),而质量却跟木星差不多。我们也可以把这类以51 Peg b为代表的“热”的太阳系外行星按质量大小细分为Hot Jupiter、Hot Neptune,目前已发现60多颗这样的系外行星。它们的周期从几天到几周不等,轨道半长径较小,质量在0.03~4  $M_{\text{Jup}}$ 范围内,表面温度约1000~1500 K。这是行星形成理论所没有预见到的<sup>[24]</sup>,人们提出两种假设解释这一现象,两种假设都认为行星是在距离原恒星盘中心较远的地方形成的,之后通过某种机制迁移到现在的位置。一种假设认为行星受原恒星盘的阻尼向内迁移,潮汐力和电磁力越来越大,迁移逐渐停止;另一种则认为行星系统中恒星与行星之间的引力相互作用可能导致一个行星散射出行星系统带走部分能量,另外的行星则留在较小的偏心轨道<sup>[24,44,45]</sup>。两种假说中,都可能有一部分行星与恒星相撞,在一定条件下这种事件或其效应有可能被探测到。

这类行星非常接近中心恒星,有较大几率发生掩星现象。用掩星法和视向速度法可以得到它们的直径和密度,进而推断行星的组成。研究发现,这类行星的平均直径比木星大40%左右;平均密度大约是0.35 g/cm<sup>3</sup>,约为土星的一半;主要物质可能与太阳、木星等(氢和氦)类似。其次,如果行星有大气,在发生掩星时拍到的光谱会有吸收线,通过对比可以研究行星大气的组成,这比依靠密度去推测可靠得多,对它们的研究有助于了解行星的形成和演化。



## 4 太阳系外行星的统计特性

### 4.1 中心恒星的金属丰度

目前系外行星的探测方法大部分都是基于对中心恒星进行观测的间接方法,对已发现的太阳系外行星系统的中心恒星进行统计研究有助于回答“哪些恒星周围有行星”这样的问题,并可以指导今后观测对象的选取。图 4 是已知的两百多颗太阳系外行星系统中恒星各参数之间的关系,容易看出已发现的太阳系外行星系统中的恒星有聚集的趋势。由于现在探测精度的限制以及主要研究对象是类太阳恒星周围的行星系统,所以很明显这是一种选择效应。即由于人们观测的是以太阳为中心范围在 300 l.y. 范围内的类太阳恒星,所以发现的行星系统中大部分恒星质量在  $1M_{\odot}$  附近,半径在  $0\sim 3R_{\odot}$ , 距离地球在 100 pc 内。

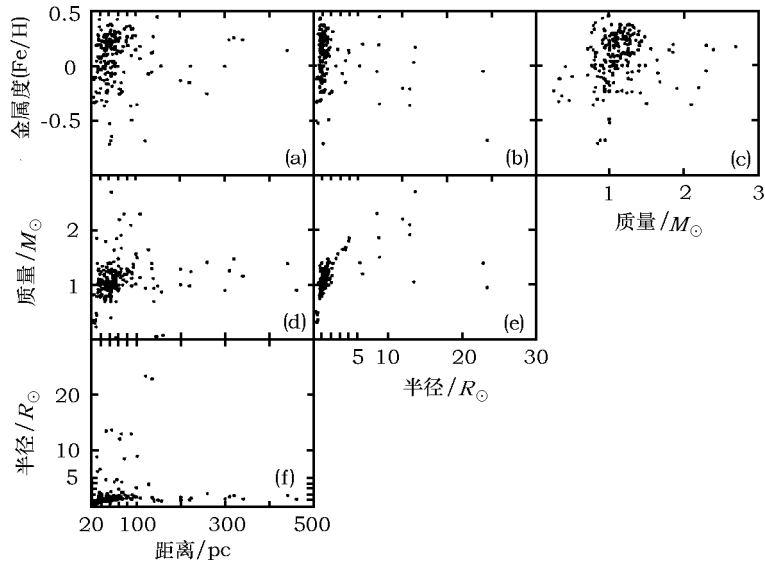


图 4 已知太阳系外行星系统的中心恒星各参数之间的关系<sup>[60]</sup>

图 4(a)–(c) 是关于恒星金属丰度与恒星的其他 3 个参数 (恒星与地球的距离、恒星的半径和质量) 的关系,可以看出大部分恒星的金属丰度大于零。从统计上看,比太阳金属丰度高的恒星为行星系统的概率是金属丰度较低恒星的 3 倍,已发现的系外行星中只有 10% 位于金属丰度低于太阳的恒星周围。即在金属丰度较高的恒星周围发现行星的概率较高。Fischer 和 Valenti<sup>[46]</sup> 曾对太阳系外的 1 040 颗 F、G、K 型恒星的特性进行过系统的研究。他们的样本中金属丰度在  $-0.5\sim 0$  间的恒星中使用视向速度法探测到行星的比例不足 3%,而在金属丰度大于 0.3 的样本中,约有 25% 的恒星有视向速度法可探测的行星;并给出一种假设来解释这种现象,即行星在金属丰度高的环境中形成的较快。这是容易理解的,原始气体分子云中的重元素越多,气体、尘埃就越容易凝结形成原星子,后来演化成行星系统。

### 4.2 行星轨道特征

首先从系外行星的几个参数分布来看,图 5 是系外行星数目在参数空间的分布,图中“●”和“▽”的横坐标分别为地球和木星的参数值。对于半长径、周期和偏心率 (见图 5(a)、(d)、

(b)), 可以看出在零参数值附近有相当多的行星, 这可能是因为在演化过程中, 距离中心恒星较远的地方, 由于恒星巨大潮汐作用引起行星轨道衰减的结果。除去这一部分, 容易发现关于行星轨道半长径和周期分布的包络大致相同, 事实上在同一个行星系统中轨道半长径与轨道周期并不是两个互相独立的参数。由式 (1) 可知在  $M_p \ll M_s$  时,  $a^3/P^2 = k$ ,  $k$  为只与恒星质量有关的一个常数。而样本中恒星的质量大部分在  $1M_\odot$  附近, 故有  $P \simeq a^{3/2}$ , 这再一次反应了研究对象的选择效应。而系外行星的轨道偏心率分布 (见图 5(b)) 却稍有不同, 轨道偏心率大于 0.1 的行星数目占大多数, 而且分布一直到 0.8 甚至接近 1, 且呈金斯分布<sup>[47]</sup>。偏心率较大的原因往往是引力相互作用的结果, 比如行星与原恒星盘的相互作用<sup>[16]</sup>, 双星中行星与另外一颗恒星的相互作用, 行星之间的长期共振<sup>[15]</sup> 等。

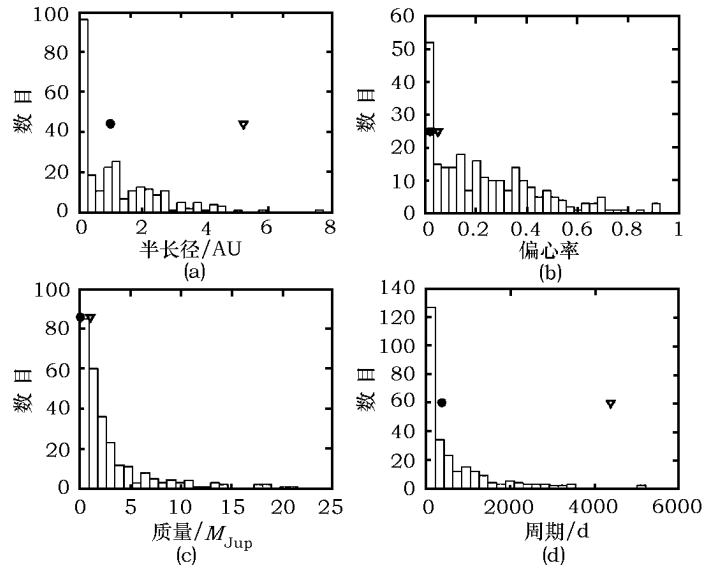


图 5 已知太阳系外行星数目在参数空间的分布<sup>[60]</sup>

图 5(c) 是质量分布, 已发现的大部分太阳系外行星的最小质量小于  $10 M_{\text{Jup}}$ , 与行星定义相吻合。另外, 理论上应该是大质量行星较容易被发现, 可是最小质量在  $0 \sim 1 M_{\text{Jup}}$  的行星却发现得最多, 这可能是行星形成过程中大质量行星容易与其他行星或原恒星盘发生相互作用, 寿命较短的缘故; 也可能是因为一些行星在离恒星较远的区域 (大于 4 AU) 未被发现。比较质量分布和周期分布, 似乎两者之间也有某种相关性。Tabachnik 等人<sup>[48]</sup> 在 2002 年曾对 72 颗太阳系外行星的质量和周期分布进行研究, 当把质量和周期当作两个相互独立的变量进行幂律拟合时发现这两个不确定度存在耦合。Mazeh 等人<sup>[49]</sup> 更是发现在对数坐标中周期和质量的关系很重要。鉴于当时的研究样本非常少, 不能排除是偶然的結果。Jiang 等人<sup>[50]</sup> 在 2007 年利用较多的样本 (233 颗) 对周期和质量的分布重新研究后发现在对数坐标中两者存在较明显的正相关性, 即大质量行星在距离中心恒星较远的地方。这与行星形成的标准模型并不矛盾, 但本文认为还应该考虑原恒星盘初始质量分布及轨道迁移对这种相关性的影响。

Ida 等人<sup>[51]</sup> 利用数值模拟的方法对行星的核吸积模型进行研究时发现, 太阳系外行星在  $a-m$  空间分布中, 不同类型的行星分布在不同区域。气态巨行星 (Gas Giant) 在图的上方、下方分别是类地行星 (Rocky Planet) 和冰冻行星 (Icy Planet); 在 10~100 倍地球质量范围内半

长径小于 3 AU 的行星数量明显较少, 他们形象地称这一区域为“行星沙漠” (Planet Desert)。图 6 是 272 颗太阳系外行星的  $a-m$  分布, 图中不同类型系外行星的分布与 Ida 等人的结

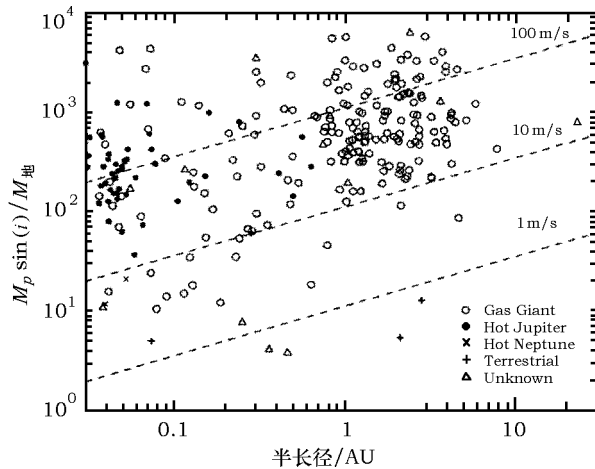


图 6 已知太阳系外行星的轨道半长径和质量分布<sup>[61]</sup>

果基本一致。图中虚线是视向速度不同精度的探测范围, 可以预测随着探测精度的不断提高, 人们将会发现越来越多的类地行星。行星的这种  $a-m$  分布似乎隐含了行星形成与演化的某些信息, 但是这个统计结果是否为探测方法的选择效应或是某些未发现的行星对观测精度要求更高的原因, 还有待进一步验证。如果行星的  $a-m$  分布可以代表行星的形成和演化过程, 那么这个发现对行星的形成和演化理论是极具意义的。对于那些已发现的但是类型还不确定的 (Unknown Type) 系外行星, 可以由它们在图 6 中的位置推测它们的类型。

图 7 是目前已知太阳系外行星各参数之间的关系。图 7(a)–(d) 图是行星轨道倾角与

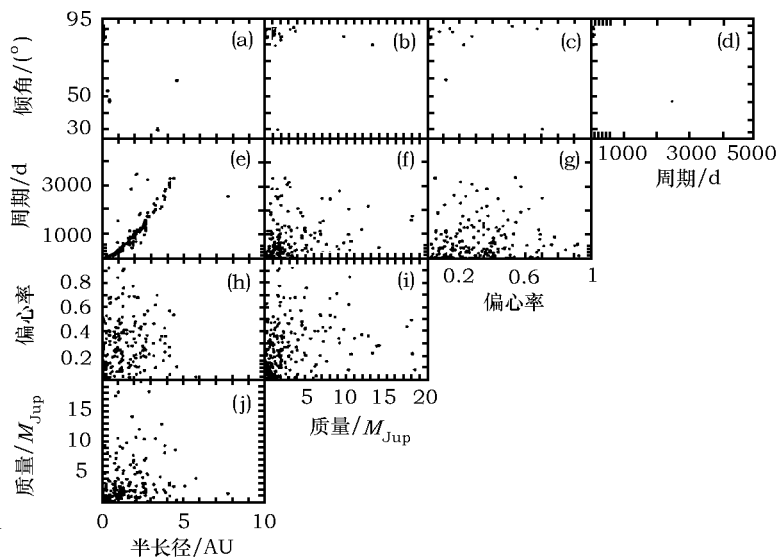


图 7 已知太阳系外行星各参数之间关系<sup>[60]</sup>

其他参数的关系,可以看出关于轨道倾角有两个较明显的特点:(1)轨道倾角不容易得到,即样本数太少。对于太阳系外行星,只有个别的借助天体测量或掩星法才能得到。(2)全部都在 $(25^\circ\sim 55^\circ)$ 和 $(75^\circ\sim 95^\circ)$ 两个区域,即在参数空间有明显的空隙,或者说是聚集。这种聚集由样本数目较小造成的可能性较小,而由于观测方位的不同和测量误差是不会改变这一统计结果的,这有待于深入研究。图 7(e)是轨道周期与半长径之间的关系,两者之间有 $P \simeq a^{3/2}$ 的关系。因此轨道周期和其他参数的关系与轨道半长径和其他参数的关系有相似性,如图 7(g)与(h), (f)与(j)。关于行星质量和轨道半长径/周期之间的关系(见图 7(j)/(f))如上所述(见 4.2 节)在线性/对数坐标中表现出较弱/强的正相关,在多行星系统中能否依据行星在 $a/P - m$ 空间的位置获得行星形成以后演化过程中的某些(迁移)信息呢?行星的轨道偏心率与其他参数的关系(见图 7(c)、(g)—(i))似乎看不出任何简单的相关性,但是大偏心率行星轨道的形成和稳定机制应是一个值得研究和关注的问题。

### 4.3 多行星系统

太阳系是一个典型的多行星系统,人们对多行星系统亦十分关注,因为对多行星系统可以进行动力学上更为细致的研究,进而更深入了解太阳系的形成与演化。目前已探测到的太阳系外多行星系统大约有 20 多个<sup>[60]</sup>,系统中包含的行星数目从 2 颗到 5 颗不等。目前认为金属丰度较高的原始分子云形成的恒星容易演化为行星系统;金属丰度越高多行星系统中行星的总质量越大;原恒星盘的初始质量及其分布对行星系统演化很重要。

多行星系统中如果行星的周期满足简单整数比即通约,而轨道共振会对其运动的稳定性有较大的影响<sup>[52,53]</sup>。太阳系有很多轨道共振的例子,如木星和土星之间的近 5:2 共振,以及海王星和冥王星之间的 3:2 共振<sup>[54]</sup>等。系外行星系统中也有很多共振的例子,如 HD 82943 系统中的 2:1 共振<sup>[55,56]</sup>、55 Cnc 系统中的 3:1 共振<sup>[57,58]</sup>等。其中 Gl 876 多行星系统中两颗大行星轨道周期分别是 30.1 d 和 61.0 d,接近 2:1<sup>[15,18]</sup>,正是对其系统残差进行研究,发现了该系统的第 3 颗行星<sup>[59]</sup>。但并非每一个共振位置都会有天体存在,而且对它们的探测受到技术上的限制。共振效应的研究对发现新的系外行星和探讨系外行星的稳定性有重要意义。图 8 是目前太阳系外行星数目最多的 55 Cnc 行星系统的轨道示意图,与太阳系比较,可以看出 55 Cnc 行星系统的空间分布和太阳系有着相似之处,最外面 55 Cnc d 轨道半的长径和太阳系的木星差不多,而其他的则在靠近中心恒星的地方,似乎

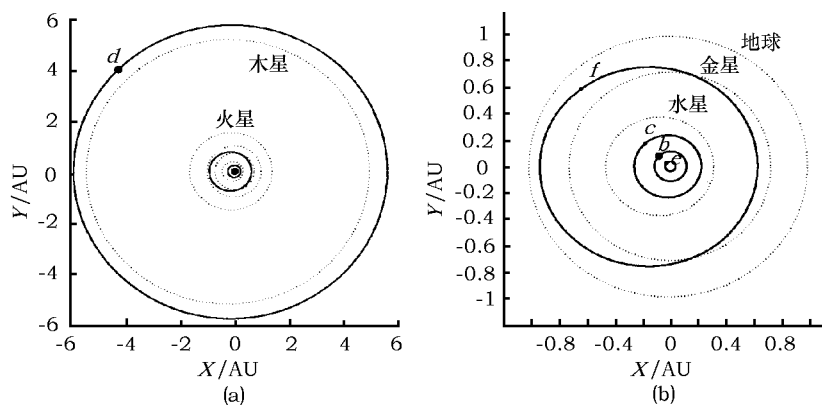


图 8 55 Cnc 多行星系统与太阳系的轨道比较<sup>[60]</sup>

可以将它们分别称为外行星、内行星。55 Cnc 行星系统的 5 颗行星除了 55 Cnc f 外, 其他 4 颗行星的轨道偏心率都小于 0.1。可以说 55 Cnc 行星系统是与太阳系最相像的系外行星系统。55 Cnc 行星系统在空间的分布很容易让人们推测在 55 Cnc d 的三角平动点会不会有两个小行星群呢?

早期行星系统中应该有很多是多行星系统, 随着时间的演化, 有些行星可能被恒星吞噬, 有些可能被散射出系统。太阳系外多行星系统应远比已知的要多, 特别是现在已经发现有一颗轨道偏心率较小, 距离恒星又不太远的系外行星, 如果系统是稳定的, 则意味着“内行星”的外面存在着充当它们“保护神”的类木行星。

## 5 结 语

短短十几年的时间, 系外行星的研究取得了巨大进展。系外行星的探测方法已经发展到 10 余种, 并且探测精度越来越高; 关于行星形成和演化的理论快速发展, 人们对太阳系外行星的认识也逐步深入。现在诸如“哪些恒星周围有行星”, “哪些行星上有生命”这样的问题正是促使人们不断研究的动力, 从各个组织、行星学家的工作进展中可以预见系外行星的研究将走向更加辉煌的又十年。

**致谢** 非常感谢审稿人的细致审阅及有意义的建议。本文得到国家自然科学基金(10573040, 10673006, 10833001, 10203005)和紫金山天文台小行星基金会资助。

### 参考文献:

- [1] 刘玉娟, 赵 刚. 天文学进展, 2005, 23(3): 224
- [2] Bradford A S, Richard J T. Science, 1984, 226: L421
- [3] Ulmschneider P. Intelligent life in the universe: from common origins to the future of humanity. Berlin: Springer-Verlag, 2004, 39: 49
- [4] Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, et al. Icarus, 1996, 124: 62
- [5] Wolszczan A, Frail D A. Nature, 1992, 355: 145
- [6] Rasio F A, Nicholson P D, Shapiro S L, et al. Nature, 1992, 355: 325
- [7] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
- [8] Cassen P. Extrasolar Planet. Queloz D, Udry S, Mayor M, et al. eds. Berlin: Springer-Verlag, 2006, 369: 448
- [9] Kokubo E, Ida S. ApJ, 2002, 581: 666
- [10] Michikoshi S, Inutsuka S, Kokubo E, et al. ApJ, 2007, 657: 521
- [11] Chambers J E. Icarus, 2001, 152: 205
- [12] Mandell A M, Raymond S N, Sigurdsson S. ApJ, 2007, 660: 823
- [13] Ji J H, Liu L, Kinoshita H, et al. ApJ, 2005, 631: 1191
- [14] Ji J H, Kinoshita H, Liu L, et al. ApJ, 2007, 657: 1092
- [15] Lee M H, Peale S J. ApJ, 2002, 567: 596
- [16] Kley W, Lee M H, Murray N, et al. A&A, 2005, 437: 727
- [17] Zhou J L, Aarseth S J, Lin D N C, et al. ApJ, 2005, 631: L85
- [18] Ji J H, Li G Y, Liu L, et al. ApJ, 2002, 572: 1041
- [19] Ou S L, Ji J H, Liu L, et al. ApJ, 2007, 667: 1220
- [20] Raymond S N, Mandell A M, Sigurdsson S. Science, 2006, 313: 1413
- [21] Udry S, Bonfils X, Delfosse X, et al. A&A, 2007, 469: L43

- [22] Schilling G. *Science*, 2007, 316: 528
- [23] Perryman M. *Reports on Progress in Physics*, 2000, 63: 1209
- [24] Butler R P. *Planets and Life: the Emerging Science of Astrobiology*. Woodruff T S, Sullivan III, John A B, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 444: 458
- [25] Chauvin G, Lagrange A M, Zuckerman B, et al. *A&A*, 2005, 438: L29
- [26] Quirrenbach A. *Swiss Society for Astrophysics and Astronomy*. Queloz S, Udry S, Mayor M, et al. eds. Berlin: Springer, 2006, 1: 42
- [27] Swain M, Vasisht G, Tinetti G. *Nature*, 2008, 452: 329
- [28] Benedict G F, McArthur B E, Forreillet T, et al. *ApJ*, 2002, 581: L115
- [29] McArthur B E, Endl M, Cochran W D, et al. *ApJ*, 2004, 614: L81
- [30] Struve O. *The Observatory*, 1952, 72: 199
- [31] Cochran W D, Hatzes A P, Butler R P, et al. *ApJ*, 1997, 483: 457
- [32] Liu Y J, Sato B, Zhao G, et al. *ApJ*, 2008, 672: 553
- [33] Henry G W, Marcy G W, Butler R P, et al. *ApJ*, 1999, 529: L41
- [34] 邹振隆. *天文学进展*, 2003, 21(3): 269
- [35] Bordé P, Rouan D, Léger A. *A&A*, 2003, 405: 1137
- [36] Quirrenbach A. *Extrasolar planets*. Mayor M, Queloz D, Udry S, et al. Berlin: Springer, 2006, 31: 1
- [37] Bennett D P, Anderson J, Bond I, et al. *ApJ*, 2006, 647: L171
- [38] Hauser H M, Marcy G W. *PASP*, 1999, 111: 757
- [39] Bames R, Quinn T. *ApJ*, 2001, 550: 884
- [40] Zhou J L, Sun Y S. *Dynamical evolution of extrasolar planetary systems*, *Proceedings of IAU col.* 197. Knezevic Z, Milani A, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, 29: 40
- [41] Chambers J E. *MNRAS*, 1999, 304: 793
- [42] Levison H F, Lissauer J J, Duncan M J. *AJ*, 1998, 116: 1998
- [43] Mazeh T, Krymowski Y, Rosenfeld G. *ApJ*, 1997, 477: L103
- [44] Rasio F A, Ford E B. *Science*, 1996, 274: 954
- [45] Weidenschilling, S J, Marzari F. *Nature*, 384: 619
- [46] Fisher D A, Valenti J. *ApJ*, 2005, 622: 1102
- [47] Zhou J L, Lin D N C, Sun Y S, *ApJ*, 2007, 666: 423
- [48] Tabachik S, Tremaine S. *MNRAS*, 2002, 335: 151
- [49] Mazeh T, Zucker S. *ApJ*, 2003, 590: L115
- [50] Jiang I G, Yeh L C, Chang Y C, et al. *AJ*, 2007, 134: 2061
- [51] Ida S, Lin D N C. *ApJ*, 2004, 604: 388
- [52] Laughlin G, Adams F C. *ApJ*, 1999, 526: 881
- [53] Laughlin G, Chambers J E. *ApJ*, 2001, 551: L109
- [54] Wan X S, Huang T Y. *A&A*, 2001, 368: 700
- [55] Ji J H, Liu L. *Chin. Astron. Astrophysics*, 2006, 30: 75
- [56] Ji J H, Kinoshita H, Liu L, et al. *CeMDA*, 2003, 87: 113
- [57] Ji J H, Kinoshita H, Liu L, et al. *ApJ*, 2003, 585: L139
- [58] Zhou L Y, Ferraz-Mello S, Sun Y S. *MNRAS*, 2004, 350: 1495
- [59] Rivera D J, Lissauer J J, Butler R P, et al. *ApJ*, 2005, 634: 625
- [60] <http://exoplanet.eu/catalog.php>, 2008
- [61] [http://planetquest.jpl.nasa.gov/atlas/atlas\\_search.cfm](http://planetquest.jpl.nasa.gov/atlas/atlas_search.cfm), 2008
- [62] [http://planetquest.jpl.nasa.gov/missions/missions\\_index.cfm](http://planetquest.jpl.nasa.gov/missions/missions_index.cfm), 2008
- [63] <http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-2005/pr-12-05.html>, 2008
- [64] <http://smc.cnes.fr/COROT/>, 2008
- [65] <http://ogle.astrouw.edu.pl/ogle3/blg235-53.html>, 2008

## The Detection Methods and Statistical Characteristics of Exoplanet

ZHANG Niu<sup>1,2</sup>, JI Jiang-hui<sup>1</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Since the first extrasolar planet was discovered in 1995, the detection and research of extrasolar planets has taken a big step forward in the last decade. To date, more than 270 planets orbiting solar-type stars were discovered, 62 of which were reported in 2007.

The detection method developed rapidly. The paper briefly introduced several dominant detection methods (e.g., Direct imaging, Astrometry, Radical velocity, Transit and Microlensing) of extrasolar planets. The radical velocity technique is most popular. It could yield all orbital elements except the orbital inclination. Most of the known planets were revealed by this method. Additionally, if the orbital inclination was obtained by transit/astrometry, then we could infer the composition of the extrasolar planet by computing their density. The Direct imaging is powerful. The spectrum of extrasolar planet could give direct clues of composition of the planet; however the measurement is very challenging. The planetary system can be detected far beyond our solar system even the planet is pretty smaller as our Earth, by using Microlensing method. The detailed principle and advantages/disadvantages of each method were discussed and the latest progress was also presented.

The paper classified the known extrasolar planets into three categories (Planets in oblate orbit, Planets in quasi-circular orbit, 51 Peg-like planets) according to their orbital characteristics. In addition, the paper made a statistical study of the extrasolar planetary system using the latest data. The data shows: (1) mass, radii and distance from earth of the known extrasolar planets' center star are gathered, obviously this is a selection effect; (2) center stars with higher metallicity have more probability of harboring planet; (3) orbital characteristics of known planets are not the same as the theory predicts based on classical planetary formation, many of them have larger eccentricity and/or small semi-major axis; (4) distribution of known planets in a-e space is likely to imply some information on planet formation and/or evolution; (5) orbital inclination was not easy to obtain, and the known orbital inclination of extrasolar planets are all concentrated in ( $25^\circ - 55^\circ$ ) and ( $75^\circ - 95^\circ$ ) region. Finally, the orbital configuration and stability in multiple planetary systems was simply discussed.

With the development of Planetary Physics and Astrobiology, enormous works have been devoted to the study of extrasolar planets. There will be a prospective era of extrasolar planet in the near future.

**Key words:** Astrophysics; Extrasolar planets; Detection methods; Statistical properties