文章编号: 1000-8349(2012)01-048-63

太阳系外行星系统轨道参数的 统计研究

赵佳^{1,2},赵刚^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 自 1995 年第一颗类太阳恒星周围的系外行星发现以来,随着已发现的系外行星数目的增 多,对系外行星性质的统计分析变得重要和有意义。截至 2011 年 6 月 9 日,共发现系外行星 555 颗。以这些系外行星的轨道参数为依据,对系外行星的性质进行统计分析,得出了一些有意义的 结论。同时简要介绍现有的行星形成与演化模型并依据得出的行星统计性质对其进行检验,这对 于系外行星的进一步探测具有一定的指导作用。

关键 词:太阳系外行星;统计特性;行星形成

中图分类号: P172 文献标识码: A

1 引 言

一直以来"地外生命"是否存在都是人们探讨的热点话题。1992年, Wolszczan 和 Frail 在 PSR 1257+12 附近发现了第一个太阳系外行星系统^[1],但是 PSR 1257+12 是一颗脉冲 星,它的高辐射性导致周围的行星难以有生命存在。直到 1995年,人类发现了第一颗围绕类 太阳恒星运转的行星^[2],这不仅为地外生命的探索提供了重要的观测依据,同时也开启了人 类对于太阳系外行星的科学探索。

太阳系外行星是指具备如下特征^[3, 4]的天体: (1) 天体质量范围在 $10^{-3}M_{\oplus} \sim 10^{3}M_{\oplus}$ 之间; (2) 围绕单一恒星或者多恒星系统运转; (3) 运行轨道不围绕另外一颗行星。

截止 2011 年 6 月 9 日,人类发现的系外行星共 555 颗 [5],具体数据详见表一。

行星本身并不发光,只靠反射恒星光而发出相对于主星极其微弱的光。以光度为 L的恒星为例,绕主星旋转行星的反射光度为 $L_{\rm P} = \frac{AL_*}{8} \left(\frac{R_{\rm P}}{R_*}\right)^2 \Phi(t)$,其中 $\Phi(t) = 1 - 1$

收稿日期: 2011-05-05; 修回日期: 2011-10-10

资助项目: 国家自然科学基金 (10821061, 10803010)

探测方法	系外行星数/颗	系外行星系统数/个	多行星系统数/个
视向速度法/天体测量法	506	424	51
凌星法	(134)	(126)	(11)
微引力透镜法	12	11	1
直接成像法	24	21	1
脉冲星计时法	13	8	4
总计	555	464	57

表 1 截至 2011 年 6 月 9 日发布的系外行星数目

 $\sin i \sin \left(\frac{2\pi t}{P}\right)$ 是一个旋转因子 (*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, *R*_{*} 为主星半径^[6]。即使距离我们最近的恒星拥有的行星系统, 其行星发出的光仍然像 1 000 km 以外灯塔旁的一点微弱的烛光一样难以直接观测^[6], 因此目前探测系外行星的方法主要以间接方法为主。

视向速度法是通过探测恒星视向速度的周期性变化判断系外行星的存在,采用这种方法 探测到的行星占已发现总数的 92.98%。由于不同质量行星对主星视向速度的影响不同 (太 阳系中,木星对太阳的视向速度的影响约为 12.5 m·s⁻¹,地球对于太阳视向速度的扰动约为 8 cm·s⁻¹),此方法对于临近主星的大质量行星更敏感。

早期视向速度的探测精度仅为 1 000 m·s⁻¹, 近年随着仪器稳定性和性能的提高以及新的定标方法的应用, 视向速度的探测精度已经达到 3 m·s^{-1^[6,7]}。欧洲南方天文台的高精度视向速度探测器 (HARPS) 和 Keck 天文台的高分辨率光栅光谱仪 (HIRES) 探测精度已经小于 1 cm·s⁻¹, 能够探测到几倍地球质量的行星。

视向速度方法探测系外行星存在一定的局限性。首先,该方法只能确定行星的最小质量, 需要与凌星法相结合确定行星质量;其次在样本选择方面,该方法要求样本恒星具有丰富的 谱线,同时观测时要求较高的信噪比;另外由于系外行星引起的主星视向速度变化具有周期 性(目前利用该方法探测到的行星周期最长为14002d),因此这种探测方法要求系统具有长 期的稳定性。

从地球观测,当行星经过恒星前方(即行星位于主星与观测者之间)时,会遮挡部分星光 导致恒星的光度降低,这种现象称为凌星。由于恒星与行星的相对大小不同,恒星光度降低 的幅度不等。例如 HD 209458 受行星的影响,光度下降幅度约为 1.7%。通过探测恒星光度的 变化可以判断行星的存在。这种方法的优势是:(1)利用凌星法可以得到行星的体积,与视向 速度方法相结合可得出行星质量,进而获得行星密度。(2)通过凌星法可以分析行星的大气成 分。主要有两种途径,一种是将星光作为背景光,分析星光在经过行星大气时造成的吸收线 获得行星光谱;另外一种是将凌星发生前后的恒星光谱相减得到行星光谱。(3)发生凌星二次 食(行星被恒星遮掩)时,对比恒星在发生二次食前后的光度变化得出行星的光度,根据行星 光度计算出行星的表面温度,甚至得出行星的组成。2005 年,运用这一技术对 Spitzer 空间望 远镜数据进行研究分析,得出 TrEs-1 和 HD 209458 b 的温度分别为1060 K 和1130 K^[8,9]。

但是凌星法也存在局限性。一方面,只有行星轨道与观测者视向夹角位于一定范围内时 才能观测到凌星现象,而且发生凌星的概率和恒星半径与行星轨道相对大小有关,概率随着 系外行星轨道的增大而降低;另一方面,凌星现象引起的恒星光度变化很小,观测到的恒星 光度变化很可能是由其他原因(如恒星表面的暗斑)造成的,因此凌星法需要与其他方法相 结合并经过其他方法证认^[10]。

微引力透镜效应是指当两颗恒星 (背景恒星、透镜恒星) 和地球几乎位于同一直线时,如 果透镜恒星周围存在行星,背景恒星的光线路径会受另外一颗星的引力影响而改变,从而造 成类似于放大镜的效应,如图 1 所示。



图 1 微引力透镜现象示意图

微引力透镜方法对于轨道半长轴范围在 1~5 AU 范围内的类地、类木型行星比较 敏感^[11]。此外这种方法需要大量的背景恒星以达到一定的行星发现几率,因此比较适用于观 测地球与银心之间的恒星。但是,因为地球与恒星的相对位置不断改变且天体的直线排列几 乎不会重现,因此微引力透镜现象持续的时间只有几天至几周而且不能重复观测;微引力透 镜方法探测到的系外行星一般都在距离地球 kpc 以外,难以用其他方法进行后续观测;但是 如果有足够多的背景星及较高的观测精度,微引力透镜法对于证明地球质量的系外行星普遍 存在具有重要的作用。截止 2011 年 2 月 18 日,通过微引力透镜法共确认了 12 颗太阳系外行 星,其中 1 个是多行星系统。

此外,系外行星的间接探测方法还有脉冲星计时法和天体测量法。脉冲星计时法通过计算脉冲星的脉冲变动来估计太阳系外行星的存在;天体测量法对于大轨道的行星比较敏感,但是由于大轨道行星周期较长,利用该法探测系外行星一般需要很长的时间才能完成一个观测周期。对于 5 AU 范围以外的行星,间接方法探测敏感度明显下降^[12],恒星活动也阻碍了系外行星的搜寻探测^[13, 14]。

尽管行星相对于恒星极为黯淡 (可见光波段为恒星光度的 10⁻⁹, 红外波段为恒星光度的 10⁻⁶), 几乎无法直接观测到。大口径地基望远镜、自适应光学技术以及星冕仪的综合运用 仍使系外行星的直接成像成为可能。利用星冕仪遮挡恒星光,不仅实现了对系外行星的直接 观测,而且可以对行星表面和行星大气进行光谱分析,推断行星的物理性质^[15]。目前利用直 接方法确认的系外行星数目有 15 颗,其中包括 1 个多行星系统 (HR 8799)^[12]。这种方法对于 距离主星较远的行星比较敏感,目前利用此方法探测到的 15 颗太阳系外行星均位于距主星 12 AU 以外。

第2章介绍太阳系外行星的形成与演化理论模型;第3章主要对太阳系外行星和主星的 轨道参数及其关系进行统计分析;最后对现阶段发现的小质量行星性质作简要的分析。

2 行星的形成与演化

早在 18 世纪,人类便开始探究行星是如何形成的,但当时的观测对象仅限于太阳系。20 世纪 80 年代,Bradford 和 Richard 对绘架座 β星 (HD 39060)进行红外观测时,发现它的周 围存在一个原始物质 (气体和尘埃)组成的原恒星盘,将来有可能会形成一个行星系统^[15,16]。 太阳系外行星究竟是如何形成的还不确定,但是现在的行星形成理论认为:行星形成于恒星 盘中,由恒星星盘物质 (主要是气体和尘埃)组成。目前占据主导地位的行星形成模型主要有 核吸积模型和引力不稳定模型。

2.1 核吸积模型

核吸积模型 (Core Accretion Model) 认为行星形成是一个长期的动力学过程,通过恒星 星盘物质的相互碰撞、堆积形成。核吸积模型认为气态巨行星最初由原始大小约为 1~10 km 的星子 (planetesimals) 碰撞、凝结形成行星核球^[17, 18]。当岩态核球达到质量吸积临界值 (约 为 5 M_{\oplus})时,行星大气的压力梯度不能再支撑大气本身重力,导致行星大气向核球表面坍 缩^[19-22]。随后在恒星盘存在的有限时标 (约 10⁷ a)内,固态核球不断吸积星盘气体最终形成 气态巨行星^[23]。

另一方面,在核心球质量未达到吸积星盘气体的质量下限(10~15 M_⊕)恒星盘已消 失时,核吸积过程也可能停止。此时的行星质量很小,主要由固体颗粒组成。而靠近主星内 部区域的海王星质量的行星可能是因为在不断向主星内向迁移的过程中,巨行星表面大气 层的蒸发^[24-26] 只留下岩态或液态的(由于靠近主星的高温使得核心的冰态物质融化所致) 核心所致。

按照行星系统形成的核吸积模型,在 M 型矮星 (银河系中最多的恒星)周围 1~10 AU 范围内有利于地球质量、海王星质量行星的形成,这与目前观测到的 M 型矮星周围的气态巨行星的数量较少的结果相一致^[17, 27, 28]。

2.2 引力不稳定模型

引力不稳定模型认为气态巨行星是由于星盘气体的引力不稳定性直接堆积、坍缩 形成^[11, 29, 30],随后在星盘与行星间的相互作用下向恒星盘内部迁移^[31, 32]或者停留在初始 位置形成行星^[33]。通过引力不稳定模型有望形成大质量行星^[17],而且,与核吸积模型相比, 形成时标更短。

3 太阳系外行星性质的统计研究

在发现系外行星以前,人们对于行星形成理论的所有了解均来自于人类所知的唯一恒星

行星系统——太阳系^[34]。随着已确认的太阳系外行星数目不断增多,需要不断更新太阳系外 行星的轨道参数性质以及有行星系统恒星的统计性质,寻求对于行星形成和演化理论的限 制。其中最显著的特性是太阳系外行星轨道参数的多样性,这种多样性对传统的行星形成理 论模型提出质疑与挑战^[17]。本文将主要对 2011 年 2 月前视向速度方法探测到的系外行星的 性质进行统计分析。

3.1 视向速度方法探测及样本选择

目前高精度视向速度探测主要通过两种技术来实现:一种是使用气体吸收源,利用其丰富的谱线进行定标,如里克 (Lick) 天文台的 3 m 望远镜和凯克 (Keck) 天文台 10 m 望远镜的高分辨率光谱观测系统;另外一种采用同步定标技术,如欧洲南方天文台 (La Silla) 1.22 m 望远镜 CORALIE 计划^[6,35]。采用同步定标方法得到的恒星光谱基本没有受到污染,而且观测光谱在整个可见光范围均可使用。

视向速度方法的样本具有以下特点:光谱型在 F8-M0 型之间,色球活动不活跃的恒星。 年轻恒星和早型星均不适合作为系外行星探测的样本^[17,36-39],因为早型星谱线较少而且其 自身的快速旋转导致谱线致宽给高精度的视向速度探测增加了难度。

3.2 巨行星的存在率

ELODIE 项目得到的结果显示,在 G-K 型矮星周围的周期小于 5 d 巨行星的比率为 (0.7 ± 0.5) %,周期小于 3 900 d 的巨行星比率为 (7.3 ± 1.5) %^[40]。Keck 探测项目显示的相同 周期的巨行星的存在比率分别为 (0.65 ± 0.40) % 和 (8.6 ± 1.3) %^[41]。在 CORALIE 的非双星探 测样本中,0.8% 的恒星拥有热木星,5.6% 的恒星拥有轨道半长轴小于 4 AU 的巨行星^[17]。在 Lick+Keck+AAT (Anglo Australian Telescope) 的观测样本中,1.2% 的恒星拥有热木 星, 6.6% 的恒星周围有半长轴小于 5 AU 的巨行星^[42]。

利用 Monte-Carlo 数值模拟, 行星的存在率是行星质量和行星轨道周期的函数^[17]。John Asher Johnson 等人依据 CPS(California Planet Survey)的目标源恒星和观测结果, 对恒星 性质和 2.5 AU 范围内巨行星的存在率之间的关系进行研究^[43],得出巨行星的存在率是恒星 质量和金属丰度的函数:

 $f(M_{\rm Star}, [{\rm Fe/H}]) = (0.07 \pm 0.01) \times (M_{\rm Star}/M_{\odot})^{1.0 \pm 0.3} \times 10^{1.2 \pm 0.2 [{\rm Fe/H}]} , \qquad (1)$

从式中可以看出:恒星周围存在巨行星的比率与恒星金属丰度、恒星质量呈正相关关系。

3.3 行星质量、周期(半长轴)、轨道偏心率的分布

3.3.1 行星质量的分布

行星质量是太阳系外行星最基本的参数之一。虽然视向速度方法无法得到行星的精确质量,但行星的最小质量 (*M*_psin *i*) 可以很好地显示行星质量的分布趋势^[44]。

Marcy 等人^[45]于 2005 年、2008 年先后两次对 Lick+Keck+AAT 项目探测到的系外行 星性质进行统计分析,结果显示系外行星的质量分布具有以下特点: (1) 行星的最小质量 $(M_{\rm p} \sin i)$ 在 0.1~10 $M_{\rm Jup}$ 之间,质量分布函数为 $dN/dM \propto M^{1.15}$,与行星轨道倾角无关; (2) 当行星质量大于 12 $M_{\rm Jup}$ 时,行星数目非常少,并指出这一分布现象验证了"褐矮星荒漠" 的存在^[46],同时说明太阳系外行星和褐矮星有不同的形成机制^[46, 47]。 图 2 是 2011 年 2 月前视向速度方法探测到的 490 颗系外行星的质量分布。两幅图横轴 采用不同的质量标度。从图中可以看出: (1) 行星的最小质量在 0~25 *M*_{Jup} 之间,已发现的系 外行星数目整体上随着行星质量的增大而减少; (2) 目前利用视向速度法探测到的系外行星 中,大多数行星的质量约低于 10 *M*_{Jup},质量大于 12 *M*_{Jup} 的行星数目几乎为零,这与 Marcy 等人^[45]发现的结果一致; (3) 系外行星的数目的极值出现在 1 *M*_{Jup} 附近,而后随着行星质量的增大逐渐减少。



图 2 用视向速度法探测到的系外行星质量分布^[5]

3.3.2 行星周期的分布

1999年以前,由于观测的时间周期的限制,探测到的系外行星几乎全部在距离主星1 AU 范围以内。现在系外行星的探测不再局限于距离主星较近的区域,利用视向速度方法探 测到的周期最长的系外行星为 47 Uma d,周期 14 002 d。依据开普勒第三定律: $\frac{a^3}{T^2} = K$,行 星周期的分布趋势也反映行星轨道半长轴的分布。

图 3 是利用视向速度方法探测到的系外行星的周期分布图,图中不同的颜色图示代表不同质量范围行星的周期分布。从图中可以看出:

(1) 行星周期呈现"双峰"分布,峰值分别出现在周期为3d、300d附近^[42, 48, 49]。

在短周期巨行星被发现之前,人们普遍认为巨行星形成于距离主星几个 AU 处^[17]。它们 的发现对传统的行星形成理论提出了挑战,应该如何解释?核吸积模型认为行星在形成过程 中不断吸积周围气体尘埃,在这个过程中,原行星受气体盘的作用不断向内迁移,在靠近主 星的位置停止内向迁移^[17]。关于热木星在靠近主星的位置停止内向迁移的原因,目前有 3 种 解释:1)在星盘靠近主星的位置存在中心空腔^[31,50],阻碍行星的内向迁移;2)"热木星"受 到快速旋转的主星的潮汐力影响,使行星停止内向迁移^[32,51];3)行星停止内向迁移是由于 受到洛希瓣 (Roche Lobe) 的外向喷流影响^[51,52]。

(2) 当行星周期为 10~250 d 时, 系外行星分布几乎没有变化。随着周期的增大, 行星数目迅速增多, 在周期为 300 d 左右时出现峰值。理论和数值模拟分析显示:轨道半长轴 3 AU以外的区域存在大量的太阳系外行星 (即长周期行星数目较多)^[53],因此出现这种分布现象很



图 3 用视向速度方法探测到的系外行星的周期分布

可能是由观测效应引起的。

(3) 当行星周期超过约3000d时,系外行星数目几乎为零,这主要是受目前有效观测的时限影响。目前系外行星的视向速度探测项目持续探测时间较短,已探测到的系外行星不足以解释全部行星周期的分布规律。如果探测的轨道半长轴更长时,利用 Monte-Calo 数值模拟,可以推断出行星的存在比率会是目前的2倍^[42],这表明在3~20 AU 范围内仍存在大量木星质量的行星尚未被发现。正因如此,一些基于大望远镜,如甚大望远镜(VLT),双子座望远镜(Gemini)和哈勃空间望远镜(HST)的系外行星直接成像探测更有意义。

(4) 由图 3 可以看出目前已经得到证认的海王星质量的行星数目很少,这主要是受观测 精度的限制,因为质量较小的行星对主星视向速度的扰动也较小,很难探测到。但是通过观 测发现的有限候选体,我们可以看出质量低于海王星质量的行星的周期分布同样在 $P \simeq 3$ d 附近出现峰值,而后随着周期的增加,数目有递减的趋势,当然这不能排除受观测效应的影 响。目前利用视向速度方法探测到的质量最小的行星为 GJ 581e^[53],最小质量 ($M_p \sin i$)为 1.9 M_{\oplus} ,周期为 3.15 d。

3.3.3 行星轨道半长轴-质量关系

图 4 是利用视向速度方法,探测到的系外行星的轨道半长轴和行星的最小质量之间的关系。横轴为行星的轨道半长轴 (单位为 AU),纵轴为行星的最小质量 (单位为 M_{Jup})。从图 4 可以看出如下特征:

(1) 在距离主星较近处 (*a* < 0.03 AU) 发现的大质量行星数目比较少。由于视向速度方法 对于近邻大质量行星最为敏感,因此可以排除观测效应的影响。目前对于这种现象的解释大 多引入行星形成过程中的 II 型迁移的影响,行星形成的 II 型迁移的时标为^[54]:

$$\tau_{\rm mig} = 0.6 {\rm Ma} \left(\frac{\alpha_{\rm eff}}{10^{-4}}\right) \left(\frac{a}{1 {\rm AU}}\right) \left(\frac{M_*}{M_{\odot}}\right)^{-1/2} \times max \left(1, \frac{M_{\rm p}}{2\Sigma_g {\rm a}^2}\right) \quad , \tag{2}$$

随着行星质量 (*M*_p) 的增大, II 型迁移的时标将增大, 质量大的行星比质量小的行星迁移 慢。因此相比于小质量的行星, 大质量行星的轨道半长轴更长。而且当行星迁移至主星附近 时, 受到主星--行星间相互作用的影响, 会有部分行星物质转移到主星, 甚至行星整体落入 主星^[17]。另外还有一种解释认为, 由于主星温度很高, 大质量行星迁移至主星附近时行星表 面大气蒸发, 仅遗留行星核球或低质量行星。



图 4 轨道半长轴 (周期) 与行星质量之间的关系

(2)随着行星轨道半长轴的增大,大质量行星数目增多^[49]。一般认为大质量行星形成于 原行星盘中距主星距离较远的位置并通过与星盘的相互作用向内部迁移,但由于星盘被行星 的惯性影响扰乱,行星的内向迁移终止^[29],最终大质量行星"停留"在距离主星较远处。

除了以上两点,图中随着轨道半长轴的增大,行星质量的最小值增大(即图中的斜率存 在下限)。这是由视向速度探测法的观测极限造成的。

3.3.4 行星质量-轨道偏心率关系

图 5 是太阳系外行星质量与轨道偏心率之间的关系图, O、△、★分别代表视向速度法 探测到的距离主星 0.1 AU 范围外、距离主星 0.1 AU 范围内的行星以及太阳系行星。从图中 可以看出:与太阳系行星不同,系外行星的轨道偏心率几乎覆盖整个 (0,1) 区间,偏心率的 平均值为 0.20,轨道半长轴小于 0.1 AU 的行星轨道偏心率明显低于 0.1 AU 范围以外的行星, 我们认为出现这种分布的主要原因是与主星距离较近行星受潮汐力影响发生"轨道圆化"。

小质量行星 (M < 0.1 M_{Jup}) 的轨道偏心率总体偏低,不存在轨道偏心率大于 0.5 的行



图 5 行星质量与轨道偏心率之间的关系

○为视向速度法探测到的 0.1 AU 范围外的行星; △为视向速度法探测到的轨道半长轴小于 0.1 AU 的系外行星; ★为太阳系行星。

星,因为相比于大质量行星,小质量行星更易受到主星作用发生轨道圆化。如果行星最初在 圆形轨道形成,在行星与星盘相互作用的过程中大质量行星的惯性较大,很难逃脱初始的圆 轨道。但是实际观测中大质量行星轨道偏心率反而更高,因此系外行星可能并非形成于圆轨 道,行星的周期(或轨道半长轴)与行星的轨道偏心率是相关的两个参数。

3.3.5 行星轨道偏心率-周期关系

不同质量、周期范围的行星的轨道偏心率明显不同。图 6 是太阳系外行星的周期--轨道 偏心率关系图,黑色点、红色点、蓝色三角分别代表行星质量位于 21 M_{\oplus} ~ 15 M_{Jup} 之间, 大于 15 M_{Jup} 以及质量小于 21 M_{\oplus} 的行星。从图中可以看出: (1) 随着行星周期增长,行星 的轨道偏心率整体增高; (2) 当行星周期短于 10 d 时,几乎不存在轨道偏心率高于 0.5 的行 星; (3) 小质量行星的轨道偏心率明显低于大质量行星。

图 7 是已知的系外行星、双星、太阳系行星的周期--轨道偏心率分布图^[27]。图中横轴为 周期,纵轴为轨道偏心率,不同图示代表不同的天体。从图中可以看出周期大于 6 d 的行星 轨道偏心率明显大于太阳系行星;虽然系外行星与双星是由完全不同的机制形成,但是两者 的周期--轨道偏心率分布并没有明显的区别。

4 太阳系外行星系统主星性质

太阳系外行星在恒星星盘中形成,恒星的一些性质为行星形成提供了重要信息。目前的研究表明系外行星的性质与恒星性质(质量、金属丰度)有关。



图 6 行星周期与轨道偏心率关系图



图 7 不同类型天体的轨道偏心率关系图 [24]

4.1 恒星金属丰度

图 8 是利用视向速度法探测到有行星系统随恒星的金属丰度分布图,从图中可以明显 看出,在所有已发现的有行星系统的恒星中,大多数为富金属型恒星。实际上,在第一颗 太阳系外行星发现后,不久天文学家们便注意到相比于太阳,有行星系统的恒星金属丰度 较高^[37,55]。行星的发现率随金属丰度的增高而增大^[29]。



图 8 有行星系统的恒星的金属丰度分布图

图 9 是有行星系统的恒星率与恒星金属丰度的关系图^[46],虚线部分是 Santos 等人在 2004 年得到的结果^[56],实线部分是 Fischer 和 Valenti 在 2005 年得出的结果^[57]。如图所示: 在金属丰度为 0.3 dex 的恒星中,约有 25% 的恒星具有行星系统;而在金属丰度与太阳相当 的恒星周围,只有 5% 左右的恒星拥有行星。



图 9 有行星系统的恒星比率与金属丰度的关系^[49]

对于这种现象有 2 种解释:一种解释认为原行星盘较高的金属丰度有利于促进行星的形成;另一种解释认为行星的富金属物质坠落到主星,导致主星外壳层丰度增高。大部分的分

析认为有行星系统恒星的较高金属丰度反映了原行星盘的富金属性^[58-60]。这个结论与行星 形成的核吸积模型一致,说明行星形成的引力不稳定模型受金属丰度的影响不明显。

4.2 恒星质量

太阳系外行星质量与恒星质量相关:在 M 型矮星周围很少发现巨行星^[61],但是在中等质量的恒星周围巨行星却很常见。Lovis 等人指出"行星系统平均质量 (average mass of planetary system)"^[62]的分布趋势反映了主星质量与行星质量的关系。虽然"行星系统平均质量" 是一个与行星质量相关的量,但是仍能说明主星质量越大,周围行星质量越大。如果恒星的星 盘质量与恒星质量成正比,恒星质量与行星质量的关系也支持行星形成的核吸积模型。

图 10 是利用视向速度法探测到的系外行星质量与主星质量关系图,由图可见: (1) 有行 星系统恒星质量集中分布在 1 M_{\odot} 附近,这主要是因为目前视向速度法探测系外行星的样本 恒星大多为类太阳型恒星; (2) 恒星质量大于 1 M_{\odot} 时,行星质量与恒星质量正相关; (3) 恒 星质量约小于 0.7 M_{\odot} 时,有行星系统恒星数目很少。我们认为出现这种现象并非受选择效 应影响,因为相比于大质量恒星,小质量恒星受到视向速度的影响更显著,更易探测,因此 我们认为小质量的主星周围的巨行星数目很少,这与 Endle 等人^[61] 的结论相一致,同样这 种分布趋势与系外行星形成的核吸积模型相吻合。



同时值得注意的是, Pasquini^[63] 与 Takeda 等人^[64] 发现:有巨行星的 G-K 型亚巨星 并不具有类似于 F-G-K 型矮星的富金属性。这可能是因为金属丰度与恒星的质量共同影 响着行星的形成过程, 但是关于两种因素对于行星形成的影响程度, 还需要更多的样本进 行分析。 5 小质量行星 (*M* < 20 *M*_⊕)

对于太阳系外行星的研究最初源于人类对地外生命的探索,因此寻找类似地球质量、适于生命存活的行星是搜寻的主要目标。按照标准行星形成模型,存在大量的类地球的岩态太阳系外行星^[30]。但是由于这类行星的质量很小,对主星视向速度的影响极为微小,因此在视向速度探测过程中,需要达到很高的探测精度,如在类太阳恒星周围探测到地球质量的行星需要视向速度探测精度达到 8 cm·s⁻¹。目前所有已发现系外行星中,质量小于 20 M_{\oplus} 的行星共有 54 颗,其中质量最小的为脉冲星计时法发现的 PSR1257 12b,质量为 0.022 M_{\oplus} ,其主星为一颗脉冲星。

图 11 是已知质量低于 20 M_⊕ 的行星轨道偏心率-半长轴关系图,从图中可以看出小质 量行星不同于其他行星的是行星的轨道偏心率很低 (均小于 0.4),平均值为 0.1;此外这些行 星轨道半长轴较小,大部分位于距主星距离 1 AU 范围内。图 12 是这些行星的质量-周期分 布图,虽然目前已发现的小质量行星样本很少,但是仍可从图中看出:随着行星周期的增大, 系外行星质量呈现整体上升的趋势。



图 11 小质量行星轨道半长轴和轨道偏心率关系

图 12 小质量行星的周期和行星质量的关系

6 总结与展望

文中我们对利用视向速度方法发现的太阳系外行星的性质进行统计分析,进而对系 外行星的形成理论及模型进行验证。文中采用的样本数据主要来源于系外行星百科网站 (http://exoplanet.eu/catalog.php)。

通过分析我们发现目前利用视向速度法发现的行星分布具有以下特点。

(1) 行星的最小质量范围在 0~25 M_{Jup} 之间,系外行星的数目在 1 M_{Jup} 附近出现极值, 质量大于 12 M_{Jup} 的行星数目几乎为零。(2) 行星周期呈现"双峰"分布,探测的系外行星数 目分别在周期为3d和300d附近出现极值;质量小于海王星质量的行星数目同样在周期为3d附近出现峰值。(3)与主星距离0.03AU范围内几乎不存在大质量行星,而且随着轨道半长轴的增大,已发现的大质量行星比例逐渐增多。(4)经过分析发现:轨道半长轴和行星质量是影响行星轨道偏心率的两个重要因素,距离主星较近、质量较小的行星相应的轨道偏心率比较低。(5)对于F-G-K型星,行星更多的出现在富金属恒星周围;质量较大的主星周围的行星系统质量较大,当恒星质量大于太阳质量时,行星质量与主星质量正相关。(6)对目前已经发现的小质量(*M* < 20*M*_{Jup})行星的部分性质进行了统计分析,尽管样本数目很少,还是可以发现低质量行星的轨道偏心率很低(均低于0.4),而且随着行星公转周期的增大,行星质量整体增大。

随着探测技术和观测精度的提高,将有越来越多的系外行星被发现,这将为研究系外行 星的性质提供更多的样本,对于完善行星的形成与演化模型具有重要的意义。现阶段对于系 外行星的研究已经拓展到对于行星光谱的研究,通过研究行星光谱学,可以分析出行星的大 气成分,为"地外生命"的搜寻奠定基础。随着已发现系外行星数目的不断增加,人们对系外 行星的认识不断深化,相信未来系外行星的研究一定会有更大的发展。

参考文献:

- [1] Wolszczan A, Frail D A. Nature, 1992, 355: 145
- [2] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
- [3] Quirrenbach A. Detection and characterization of extrasolar planets. In: Mayor M, Queloz D, Udry S and Benz W ,eds. Extrasolar planets. Saas-fee Adv Courses, 2006, 31: 1
- [4] Boss A P. Butler R P. Hubbard W B. et al. IAU Transactions, 2007, 26A: 183
- [5] http://exoplanet.eu/catalog.php, 2011
- [6] 刘玉娟, 赵刚. 天文学进展, 2005, 23(3): 224
- [7] 张牛, 季江徽. 天文学进展, 2009, 27(1): 14
- [8] Deming D, Seager S, Richardson J, et al. Nature, 2005, 434(7034): 740
- [9] Charbonneau D, Allen L E, Megeath S Thomas, et al. ApJ, 2005, 626: 523
- [10] O'Donovan F, Charbonneau D, Torres G, et al. ApJ, 2006, 644: 1237
- [11] Beaeulieu J P, Bennett D P, Fouque P, et al. Nature Letters, 2006, 439(26): 437
- [12] Christian M, Bruce M, Travis B, et al. Science, 2008, 332(5906): 1348
- [13] Dumusque X, Udry S, Lovis C, et al. A&A, 2011, 525: A140
- $\left[14\right]$ Boisse I, Bouchy F, Hébrard G, et al. A&A, 2011, 528: A4
- [15] Bradford A S, Richard J T. Science, 1984, 226: L421
- [16] Ulmschneider P. Intelligent life in the universe: from common origins to the future of humanity. Berlin: Spring-Verlag, 2004, 39: 49
- [17] Wetherill G W. ARA&A, 1980, 18: 77
- [18] Hayashi C, Nakazawa K, Nakazawa Y. Protosatars and planets II, ed. Tucson: Univ. Arizona Press, 1985: 1100
- [19] Mizuno H. Progress of Theoretical Physics, 1980, 64(2): 544
- [20] Bodenheimer P, Pollack J B. Icarus, 1986, 67: 391
- [21] Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, et al. Icarus, 1996, 124: 62
- $\left[22\right]$ Ikoma M, Nakazawa K, Emori H. Ap
J, 2000, 537: 1013

- [23] Ida S, Lin D N C. ApJ, 2004, 604: 388
- [24] Lecavelier des Etangs A, Vidal-Madjar A, McConnell J C, et al. A&A, 2004, 418: L1
- [25] Baraffe I, Selsis F, Chabeier G, et al. A&A, 2004, 419: L13
- [26] Baraffe I, Chabeier G, Barman T, et al. A&A, 2005, 436: L47
- [27] Laughlin G, Bodenheimer P, Adams F C. ApJ, 2004, 612: L73
- [28] Ida S, Lin D N C. ApJ, 2004, 616: 567
- [29] Stephane U, Nuno C S. ARA&A, 2007, 45: 397
- [30] Bennett D P, Lin D N C. ApJ, 2004, 616: 567
- [31] Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Nature, 1996, 380: 606
- [32] Trilling D E, Benz W, Guillot T, et al. ApJ, 1998, 500: 428
- [33] Bodenheimer P, Hubickyj O, Lissauer J. Icarus, 2000, 143: 2
- [34] Nuno C Santos. New Astronomy Reviews, 2008, 52: 154
- [35] Queloz D, Mayor M, Naef D, et al. Proceedings of the 13th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, ESA SP-560, Hamburg: European Space Agency, 2005: 833
- [36] Saar S H, Donahue R A. ApJ, 1997, 485: 319
- [37] Santos N C, Israelian G, Mayor M. A&A, 2000, 363: 228
- [38] Paulson D B, Saar S H, Cochran W D. ApJ, 2002, 124: 572
- [39] Wright J T. PASP, 2005, 117: 657
- [40] Naef D, Mayor M, Beuzit J-L, et al. From Extrasolar Planets to Cosmology: The VLT Opening Symposium, Berlin: Spring-Verlag, 2000: 548
- $\left[41\right]$ Cumming A, Butler R P, Marcy G W, et al. PASP, 2008, 120: 531
- [42] Marcy G W, Butler R P, Fischer D, et al. Progress of Theoretical Physics Supplement, 2005, 158: 24
- $\left[43\right]$ Johnson A J, Aller K M, Howard A W, et al. PASP, 2010, 122(894): 905
- $[44]\,$ Jorissen A, Mayor M, Udry S. A&A, 2001, 379: 992
- [45] Marcy G W, Butler R P, Vogt S S, et al. Physica Scripta, 2008, 130: 014001
- [46] Eggenberger A, Udry S. EAS Publications Series, 2010, 41: 27
- [47] Zuckmer S, Mazeh T. ApJ, 2001, 562: 1038
- [48] Cumming A, Marcy G, Butler P. ApJ, 1999, 526: 890
- [49] Udry S, Mayor M, Santos N C. A&A, 2003, 407: 369
- [50] Kuchner M J, Lecar M. ApJ, 2002, 574: L87
- [51] Patzold M, Rauer H. ApJ, 2002, 568: L117
- [52] Gu P-G, Lin D N C, Bodenheimer P H. ApJ, 2003, 588: 509
- [53] Mayor M, Bonfils X, Forveille T, et al. A&A, 2009, 507: 487
- [54] HuiGen Liu, Ji-Lin Zhou, Su Wang. ApJ, 2011, 732: 66
- [55] Gonzalez G. MNRAS, 1997, 285: 403
- [56] Santos N C, Israelian G, Mayor M. A&A, 2004, 415: 1153
- [57] Fischer D A, Laughlin G, Butler P. ApJ, 2005, 620: 481
- [58] Livio M, Pringle J E. MNRAS, 2003, 346: L42
- [59] Pinotti R, Arany-Prado L, Lyra W, et al. MNRAS, 2005, 364: 29
- [60] Santos N C, Israelian G, Mayor M. A&A, 2003, 398: 363
- [61] Endl M, Cochran W D, K ürster M, et al. ApJ, 2006, 649(1): 436
- [62] Lovis C, Mayor M. A&A, 2007, 472: 657
- [63] Pasquini L, Doellinger M P, Weiss A, et al. A&A, 2007, 473: 979
- [64] Takeda Y, Sato B, Murata D. PASJ, 2008, 60: 781

A Statistical Survey of Orbital Parameters of Extra-Solar Planets System

ZHAO Jia^{1,2}, ZHAO Gang¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Since the first extra-solar planet around a Sun-like star was detected in 1995, the number of known extra-solar planets has been growing, which makes statistical surveys of characteristics of extra-solar planets and their host stars very important. By February 18 of 2011,527 planets had been discovered. In this paper, major techniques used for detections of extra-solar planets are introduced.

Based on the physical and orbital parameters of these extra-solar planets, a statistical analysis has been carried out to investigate their properties, obtaining a number of meaningful conclusions.

(1) The minimum mass of planets ranges from 0 to 25 M_{Jup} , with a peak around 1 M_{Jup} . There are very few planets beyond 12 M_{Jup} .

(2) A bimodality is shown in the period of extra-solar planets with peaks at 3 days and 300 days and a "flat" distribution in between.

(3) There are very few large-mass planets beyond 0.03 AU and the proportion of largemass planets become larger as the orbital semi-major axis increases.

(4) The orbital semi-major axis and planet mass are two key factors that affect the orbital eccentricity of the planet. The orbital eccentricity decreases as the orbital semi-major axis and planet mass decreases.

(5) For F-G-K stars, planets tend to be detected around metal-rich stars. When the star is more massive than the Sun, the mass of its planet is in direct proportion to the star's mass.

(6) We have discussed the properties of low-mass ($M < 20 M_{\bigoplus}$) planets and found that their orbital eccentricities are lower than 0.4.

In this paper, we briefly introduce current models of planet formation and evolution and test the models with the derived statistical properties of planets. It therefore provides a reference for future detections of extra-solar planets.

Key words: extra-solar planet; detection method; statistical properties; planet formation