

# 太阳系外行星研究进展

陈 丰<sup>1</sup>, 李雄耀<sup>2</sup>, 王世杰<sup>2</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

**摘 要:**过去的二十年间,利用多种技术(如脉冲时间、径向速度、天文学观测、穿越光度计、反射光度计、微透镜和直接图像)发现了405个太阳系外行星。对这些太阳系外行星的研究首次提供了有关行星生长的信息,诸如星盘结构和演化,星盘性质和大小等。2009年4月对GJ581d行星的观测表明,这个行星处于“宜居区域”内,意味着它有液态水,因此可能有生命存在。

**关 键 词:**太阳系外行星;径向速度;星盘;星尘;GJ581d;宜居区域

中图分类号:P691 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2009)04-0390-04

## Advanced of the Extrasolar Planets

CHEN Feng<sup>1</sup>, LI Xiong-yao<sup>2</sup>, WANG Shi-jie<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, China;
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

**Abstract:**Over the past two decades, 405 exoplanets have been discovered by using multiple techniques (such as pulsar timing, radial velocity, astrometry, transit photometry, reflection photometry, microlensing, and direct Imaging). Studies on these exoplanets have provided first-hand information about planetary growth, e. g., structure and evolution of disk, properties and sizes of dust grain. New observations in April 2009 of GJ581d suggested that this planet is within the habitable zone where liquid water, and therefore, life may exist.

**Key words:**extrasolar planet; radial velocity; disk; dust; GJ581d; habitable zone

近年来,随着对太阳系行星形成和演化研究的深入,以及对地球以外可能存在生命地区星球的关注,太阳系外行星的研究突飞猛进,取得许多重大的成果。

## 1 发现太阳系外行星的技术和研究进展

寻找太阳系外行星所使用的技术见表1。其中径向速度法(Radial Velocity)最为有效,已经发现了300多个太阳系外行星。径向速度法的依据是多普勒效应。多普勒认为,物体辐射的波长因为光源和观测者的相对运动而发生变化。在运动的波源前

面,波被压缩,波长变得较短,频率变得更高(蓝移);在运动的波源后面效果相反,波长变得较长,频率变得较低(红移)。波源的速度越高,所产生的效果越大。根据光波红/蓝移的程度,可以计算出波源循着观测方向运动的速度。

穿越(Transit)光度计(凌日法):连续观测恒星,行星穿越恒星时将阻挡恒星传递过来的光使光度减弱。此法可以测定行星半径。

反射光度计:在地球上观月球,是以上弦月一满月一下弦月一消失方式变化的,与之类似,通过观测不同位置行星所反射的恒星辐照光可以确定行星。

收稿日期:2009-07-20 收到,08-29 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40803019,40873055,40673053);中国科学院知识创新导向项目(KZCX2-YW-110);国家863项目(2008AA12A213)

第一作者简介:陈丰(1933—),男,研究员,研究方向:矿物学、天体化学。

表 1 寻找太阳系外行星的技术

Table 1 Techniques for finding extrasolar planets

方法	质量极限	备注
脉冲时间(Pulsar Timing)	月球	发现第一个系外行星
径向速度(Radial Velocity)	超地球*	非常有用
天文学观测:		
地表:单个望远镜	木星	正在进行
地表:干涉仪	近于木星	发展中
空间:单个望远镜	近于木星	上限
空间:干涉仪	天王星	研究中
穿越(Transit)光度计:地表	近于木星	几个探测器
空间	火星	Kepler 计划
反射光度计(空间)	土星	正在进行
微透镜(地表)	超地球	少数探测器
直接图像:地表	土星	可能探测
空间	地球	正在研究

注:超地球为太阳系外行星研究的常用词,指质量为 5~8 倍以上于地球质量的石质行星。迄今为止,太阳系外行星尚未发现近于或小于地球质量的行星;据文献[1]

微透镜法:微弱(不可见)的前面星越过背景相当弱的星时,前面星的引力增强背景星,使背景星变亮,可以清晰地被看到。如果行星环绕前面星,它同样经过背景星,在信号中看见“光点”。

根据 2009 年 11 月 27 日公示,已发现太阳系外行星 405 个。其中各种方法发现的有重叠,径向速度法发现候选 377 个,其中有 38 个行星系统(有 2 个以上行星);穿越光度计 60 个;微透镜法候选 9 个,直接图像候选 11 个;脉冲时间法候选 8 个。

大部分已知的系外行星都是围绕与太阳类似的恒星,即恒星光谱为 F, G 或 K(分别对应光谱颜色为黄,橙和红色)的主序星,原因之一是搜寻计划都倾向集中研究这类恒星。即使考虑到这点,统计分析也显示低质量恒星(恒星光谱为 M——橙红色的矮星)一般较少拥有行星或只有低质量行星。

已发现太阳系外行星的特点是,以气体大行星居多,还有较多的蒸发(evaporating)行星和偏心行星。大多数行星形成于大质量星形成区(如猎户星座和船底座),它们的原行星盘能被靠近恒星的光辐射所蒸发而远离;如果原行星轨道在临界半径之外,光蒸发将转变大的气体原行星成为冰的大行星;临界半径依赖于宿主星的质量,对于具有太阳质量  $M_{\odot}$  的恒星,临界半径大于 5 AU(AU:太阳到地球的距离),而对于  $0.3 M_{\odot}$  的 M 矮(质量较小)星,临界半径大于 1.5 AU;对于在大质量星形成区的 M 矮星,如果 M 矮星具有大的质量足以经历星盘不稳定,它们的气体大行星原行星轨道在约 1.5 AU 之外,通过光蒸发会使行星质量下降到超地球质量;在小质量星形成区(例如金牛座)它们的大的气体原行星将继续保持为气体大行星。

绝大部分已知的系外行星都是大质量的,其中

90% 超过地球质量的 10 倍,甚至明显比太阳系最重的木星为高。然而这只是一种观测上的选择性偏差,因为所有探测方法都有利于寻找大质量行星。从太阳系外行星质量分布图上看,由低向高呈现指数式衰减,仍有约 25% 的行星质量在  $0 \sim 1 M_{\odot}$  之间。

已知的系外行星中,与太阳系中的大行星一样,绝大多数有大量气体。但这只有使用穿越光度计才可以证实。部分小型的行星被怀疑是由岩石构成,类似于类地行星。

对于 G 型矮恒星而言,15% 有短轨道周期的气体大行星——热木星(hot Jupiter);25% 出现较长轨道周期的气体大行星,类似于太阳系的气体大行星。两者相加,有 40% 的恒星是有气体的大行星,它们处在 10 AU 之内;而 FGK 矮星约 20% 是有气体大行星,轨道距离小于 20 AU。许多大质量星(达  $1.9 M_{\odot}$ )比小质量的矮星有更多的气体大行星。

很多系外行星的轨道都比太阳系的行星小,但这同样是因为观测限制带来的选择性偏差,因为径向速度法对小轨道的行星最为敏感。天文学家最初对这种现象很疑惑,但现在已明白大部分系外行星(或大部分大质量行星)都有很大的轨道。相信在大部分行星系统中,都有一或两个大型行星的轨道半径类似木星和土星的轨道半径。

轨道偏心率是用作形容轨道的椭圆程度,大部分已知的系外行星轨道都有较高的偏心率。这并非选择性偏差,因为侦测的难易程度与轨道偏心率没有太大的关系。这种现象仍是一个谜,因为目前有关行星形成的理论都认为轨道应是接近圆形的。这也显示太阳系可能是不平常的,因为太阳系中所有行星轨道基本上都是接近圆形的。

所有恒星成分都以氢和氦为主,但也有少量比氢和氦原子序数大的元素,如铁等。天文学家通常把这些较重的元素称为金属。恒星的金属性常常用 Fe/H 来衡量。金属性较高的恒星通常拥有较多行星,而且行星也倾向于有较大质量。

一般说来,恒星金属性越高出现行星的几率越大。Fischer 和 Valenti(2005)指出,系外行星对恒星金属性的图示表明行星出现在恒星金属性较高的一侧(Fe/H 为  $0.25 \sim 0.5$ )几率较高。这可以用下列相关关系来解释:较高金属性—较高的光学不透明性—较热的星盘中间平面—较高的声速( $c_s$ )—较厚的星盘( $h$ )—较高的星盘运动学粘度( $\nu = \alpha c_s h$ )对于 2 型向内迁移有较短的时间尺度,是更短的大行星周期。虽然这不能确定这表征了行星形成的本质,还是由于迁移效应的影响,但能正确的解释彼此

之间的相关。短周期木星与恒星金属性相关可以归因于核增生的成因,但是污染也能起作用。

系外行星研究找到围绕低 Fe/H 矮恒星的行星 (HD155358; Fe/H = 0.68 有两个具质量 0.5 和 0.9  $M_{\text{木星}}$  的行星<sup>[2]</sup>; HD171028; Fe/H = 0.49 有一个质量 1.8  $M_{\text{木星}}$  的行星<sup>[3]</sup>; 大多数具系外行星的 M 矮星 (J 176, GJ 876, GJ 317, GJ 436 和 GJ581) 金属性低于太阳 Fe/H = 0.1, -0.12, -0.23, -0.32 和 -0.33, 而仅 GJ 849 的 Fe/H = 0.16<sup>[4]</sup>。

事实上,低 Fe/H 大恒星比高 Fe/H 大恒星有更多的长周期气体大行星;短周期超地球与宿主星的 Fe/H 相关。

系外行星的关键发现是类似太阳质量的恒星在 0.1 AU 内有质量大于土星的行星近于 1%, 在 2 AU 内有质量大于木星的行星约有 7%, 少数有类似木星质量 (0.5~2  $M_{\text{木星}}$ , 范围 4~10 AU) 的伴星, 但其数量不超过 20%。

系外行星研究的结果令人振奋。虽然已发现太阳系外行星的数量已经远多于太阳系内行星, 但关于它们所知甚少; 即使如此, 太阳系外行星提供了许多行星形成的第一手信息; 内部大行星的存在意味着迁移是重要的; 行星-金属相关关系表明大多数大质量行星可能是通过核增生方式而成。今后会利用更多种的技术来观测行星, 将提供更多的重要的数据约束; 发现更加复杂的行星系统多样性。

## 2 太阳系外行星星盘的研究进展

这是首次提供不同时段内星盘的存在, 以及星盘特征和星盘演化的大量证据, 其中包括年青星星盘和主序星星盘的研究。年青星星盘的证据是有过量红外辐射, 旋转曲线和 proplyd (原行星星盘) 图; 其半径 10~100 AU (对大质量恒星甚至更大); 典型质量约 0.01~0.1  $M_{\odot}$ ; 星尘寿命小于 10 Ma; 其中一些显示有间隙。最完美的图像是 1997 年在绘架星座  $\beta$  Pictoris (图 1) 发现环绕恒星的尘状星盘 (以 1.2  $\mu\text{m}$ )<sup>[5]</sup>。

主序星的星盘常常是第二代碎片星盘, 或者说未见到它的母体; 低质量, 气体贫乏; 更多的围绕年轻恒星。碎片星盘的主要性质是: 围绕成熟恒星 (A 星到 M 星) 的尘组成的星盘; 年龄约 0.01~10 Ga; 尺度: 10~100 s (1 光秒  $\approx$  0.002 AU); 质量:  $M_{\text{星尘}}$  到数  $M_{\text{月球}}$ ; 具有低气体/尘比; 星盘形态复杂, 有翘曲状、螺旋状和偏移球形, 亮度反对称和丛块状的环。

对系外行星星盘的研究得出星盘内尘的年龄小



图 1 绘架星座  $\beta$  Pictoris 的尘状星盘<sup>[5]</sup>

Fig. 1  $\beta$  Pictoris Circumstellar Dust Disk at 1.2  $\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>

于  $10^4 \sim 10^6$  a。在星盘内清除尘的时间尺度计算方法有 Poynting-Robertson 式, 颗粒之间碰撞和辐射压力法。尘的年龄远小于恒星年龄 ( $10^7$  a)。显然, 星尘不是原始的, 并为星子碰撞作用所补充。间接证据表明, 行星形成的第一步发生在其它星体内。相比之下, 太阳系同样有碎片星盘。例如冷尘星盘 (Kuiper 带) 和暖尘星盘 (小行星带)。

进行了许多星盘组成的观测, 从散射光到中红外图和红外光谱, 以至准 mm 辐射。散射光观测以多波长 ( $\lambda = 0.8, 1.0, 1.6$  和  $3.8 \mu\text{m}$ ) 散射光的高角度分辨图探测星盘的表面层; 其中发现了星尘被清理证据: 即星盘表面大颗粒的存在和颗粒大小的垂直成层<sup>[6]</sup>。

星盘红外光谱显示 10  $\mu\text{m}$  附近的特征峰, 表明硅酸盐尘粒的存在, 以及粒度为 1~2  $\mu\text{m}$  的结晶硅酸盐。2003 年和 2005 年先后得到 TTS、HaeBe 和 BDs 星盘和实验对比的 8~12  $\mu\text{m}$  剖面<sup>[7~9]</sup>, 反映出各星盘的粒度分布, 颗粒尺寸从星际介质到数  $\mu\text{m}$  (对更大的颗粒不灵敏), 较大颗粒显示较低的峰/谱比 (peak flux over continuum flux); 从非晶质到结晶颗粒中, 结晶颗粒含量较多部分的混合物具有较大的 11.3/9.6 ( $\mu\text{m}$ ) 值, 所有系统中都是不同结晶程度颗粒的混合物。

近红外干涉仪探测表明, 星盘内部很薄, 仅边缘处较厚, 探测到在星盘非常靠内部位的尘, 星盘边框位置和形态仅依赖于颗粒性质<sup>[10]</sup>。

星盘的 mm 波探测得出, 在长波区环绕恒星星盘尘粒的热发射使星盘变得光学透明; 在大多数情况下, mm 波观测对星盘中间平面的尘粒聚集是有用的探针; 观测到的 mm 波能量分布谱仅依赖于尘粒的数量、温度和发射。mm 波长探测可证实, 在散射光看到 AB Aur 星的螺旋结构与星盘上的密度反

差图相似<sup>[11]</sup>。

对星盘中尘粒演化的研究给出了大颗粒 (cm 级)mm 谱,它近似于黑体谱<sup>[12]</sup>。

上述探测表明,星盘演化是存在的,有星盘内过量红外源部分的演化;在 1~2 Ma 内约 50% 红外源消耗在它们的内盘;在 5~10 Ma 碎片盘开始出现;星盘上有颗粒生长和沉降;颗粒演化极快,看到的围绕物体高速生长的颗粒全部时间在 1~10 Ma;但是,难以得到颗粒演化的完整图像,因为不同的探针观察不同的星盘区,并且取样量不足;在非常短的时间尺度内大颗粒应当被拖拉到中间平面,而现在可以看到它们到处都有,这需要提高星盘内颗粒生长径向关系的分辨率;大多数尘中包含有“砾石”(pebbles),如果有更大的物体,它们一直到 5~10 Ma 时在星盘固体质量上不占优势;生长到砾石级非常快,但转变到星子级看来有相当大的难度(或者说要求更多的时间)。

### 3 发现处于“宜居区域”的太阳系外行星 (Gliese 581 d)

宜居区域是指生命可以存活的空间范围。理论上的可居住范围是行星表面允许存在液态水的空间范围。如果行星靠恒星太近,水就蒸发了,生命就无法存活;太远则二氧化碳的温室效应又不足以让水的温度高于冰点。一般认为,太阳系的宜居范围的内边界是 0.7~0.9 AU,外边界是 1.7~2.4 AU。

Gliese 581 是一颗位于天秤座的 M2.5 V 红矮星,距离地球约 20.4 光年 ( $193.9 \times 10^{12}$  km)。在所有已知的恒星系统中,它是第 87 位最接近地球的星体,质量约为太阳的三分之一。2007 年 4 月这个恒星系统中发现了一颗曾经认为处于适合生存区的小质量行星,编号为 Gliese 581 c。但其公转周期为 12.9 d,距太阳太近。

2009 年 4 月 21 日瑞士科学家报道<sup>[13]</sup>,欧洲南方天文台 3.6 m 望远镜用 HARPS 仪器发现第五个行星“Gliese 581 e”。这是迄今最小的太阳系外行星(体积为地球的 1.9 倍)。尽管 Gliese 581 e 公转周期为 3.15 d,太热,不适于生命存在,但它是大自然能产生如此小行星的证据。研究表明,Gliese 581 d 处于存在潜在生命的最佳地点,水在行星表面可以保持液态。其公转周期不是以前认为的 83.6 d,而是 66.8 d。其半主轴位于小质量星的宜居区域<sup>[13]</sup>。

#### 参考文献 (References):

[1] Jack J. Lissauer. What exoplanets tell us about planet forma-

tion, [http://lasp.colorado.edu/education/journalists/extrasolarplanets/ws/Presentations/Sat morn talks/Jack%20Lissauer/ExoplanPF.ppt.pdf](http://lasp.colorado.edu/education/journalists/extrasolarplanets/ws/Presentations/Sat%20morn%20talks/Jack%20Lissauer/ExoplanPF.ppt.pdf).

- [2] Cochran W D, Endl M, Robert A, Wittenmyer R A, Bean J L. A planetary system around HD 155358: The lowest metallicity planet Host Star [J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 665: 1407—1412.
- [3] Santos N C, Mayor M, Bouchy F, Pepe F, Queloz D, Udry S. The HARPS search for southern extra-solar planets XII. A giant planet orbiting the metal-poor star HD 171028 [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 474 (2): 647—651.
- [4] Butler R P, Wright J T, Marcy G W, Fischer D A, Vogt S S, Tinney C G, Jones H R A, Carter B D, Johnson J A, McCarthy C, Penny A J. Catalog of nearby exoplanets [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 646: 505—522.
- [5] Mouillet D, Larwood J D, Papaloizou J C B, Lagrange A M. A planet on an inclined orbit as an explanation of the warp in the  $\beta$  Pictoris disc [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1997, 292: 896—904.
- [6] Duchêne G, Beust H, Adjali F, Konopacky Q M, Ghez A M. Accurate stellar masses in the multiple system T Tauri [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2006, 457, L9—L12.
- [7] van Boekel R, Min M, Waters L B F M, de Koter A, Dominik C, van den Ancker M E, Bouwman J. A 10  $\mu$ m spectroscopic survey of Herbig Ae star disks: Grain growth and crystallization [J]. *Astronomy and Astrophysics*. 2005, 437: 189—208.
- [8] Bouwman J, de Koter A, Dominik C, Waters L B F M. The origin of crystalline silicates in the Herbig Be star HD100546 and in comet Hale-Bopp [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2003, 401: 577—592.
- [9] Apai D, Pascucci I, Bouwman J, Natta A, Henning T, Cornelis P, Dullemond C P. The onset of planet formation in brown dwarf disks [J]. *Science*, 2005, 310: 834—836.
- [10] Isella A, Natta A. The shape of the inner rim in proto-planetary disks [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, 438: 899—907.
- [11] Corder S, Eisner J, Sargent A. AB Aurigae resolved: Evidence for spiral structure [J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 622: L133—L136.
- [12] Beckwith S V W, Sargent A I. Particle emissivity in circumstellar disks [J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, 381: 250—258.
- [13] Mayor M, Bonfils X, Forveille T, Delfosse X, Udry S, Bertaux J-L, Beust H, Bouchy F, Lovis C, Pepe F, Perrier C, Queloz D, Santos N C. The HARPS search for southern extra-solar planets XVIII. An Earth-mass planet in the GJ 581 planetary system, [http://www.exoplanets.ch/GJ581\\_preprint.pdf](http://www.exoplanets.ch/GJ581_preprint.pdf)