

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.01.02

# 系外行星大气研究现状

田 蕾<sup>1,2</sup>, 季江徽<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 行星科学重点实验室, 南京 210008)

**摘要:** 探测系外行星的最终目的是为了寻找系外生命和宜居行星, 而系外行星大气是人们了解行星宜居特性的窗口, 所以系外行星大气的研究至关重要。近 10 年来, 系外行星大气的理论研究和观测都发展迅速。受观测技术限制, 目前观测到大气的系外行星主要是用凌星法探测到的热木星和超级地球, 还有用直接成像法探测到的离主星较远的年轻气态巨行星。力求在系外行星大气领域飞速发展之际, 对该领域研究现状做简明介绍。首先介绍系外行星大气的观测方法, 随后介绍热木星和超级地球的大气概况和研究现状, 最后对系外行星大气探测的有关项目进行简要介绍, 以展示未来系外行星大气研究的前景。

**关 键 词:** 系外行星大气; 大气模型; 宜居行星

## 1 引 言

截至 2014 年 6 月, 已经有近 1800 个系外行星被确认发现<sup>[1]</sup>。对系外行星的研究最终目的是找到宜居行星, 行星大气影响着行星的热量得失, 也反映行星形成和演化的历史, 是研究行星宜居性的绝佳窗口。人类探索太阳系其他行星大气的历史可追溯至 19 世纪<sup>[2]</sup>。早期的观测发现, 当行星开始通过恒星前方时, 恒星光并非立刻被遮挡, 而是缓缓进行。通过观测还发现行星自转过程中一些表面特征并非呈现规律的周期性变化, 这意味着行星上大气的存在。20 世纪 20 年代, 天文学家观测发现金星大气不含 O<sub>2</sub><sup>[3]</sup>。随着光谱学的应用, 人类对行星大气的认知也逐渐深入。通过光谱学鉴定太阳系内行星大气中的成分, 比如在太阳系内巨行星大气中发现 CH<sub>4</sub><sup>[4]</sup>, 在类地行星中发现 CO<sub>2</sub><sup>[5]</sup> 等。通过这些早期的观测, 行星大气的基本物理化学机制建立。当今系外行星的大气研究也得益于对太阳系行星大气长期建立的观测和理论基础。

2002 年 HST (哈勃空间望远镜) 通过凌星法首次探测到系外行星 HD 209458b 的大气<sup>[6]</sup>,

---

收稿日期: 2014-06-22; 修回日期: 2014-10-30

资助项目: 国家自然科学基金 (11273068, 11473073); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) 资助 (XDB09000000); 中国科学院新兴与交叉学科布局试点项目 (KJZD-EW-Z001); 紫金山天文台小行星基金会资助

通讯作者: 季江徽, jijh@pmo.ac.cn

揭开了系外行星大气研究的序幕。系外行星大气的观测受到理论研究的引导,在首次探测到系外行星大气之前,就已有学者建立并运用热木星大气的温度结构模型,研究其大气受恒星强辐射下的温度结构,建立云模型<sup>[7, 8]</sup>、大气环流模型<sup>[9, 10]</sup>。另外,系外行星相曲线、偏振曲线的计算,特别是透射谱的计算<sup>[11-13]</sup>为基于光谱学研究行星大气做了前期准备,这些先导性工作为之后的系外行星大气研究夯实了基础。

凌星系外行星的发现使得观测系外行星的大气成为可能。系外行星大气的观测是一个新兴而飞速发展的研究领域(见表 1),尤其在近几年,利用各种空间和地面望远镜获得了大量的数据,至今已通过凌星法探测到 50 多个热木星的大气情况,也有若干个离主星较远的行星大气通过直接成像法被探测到,这些观测提供了宽波段的光度测量和分辨率不太高的光谱信息,使我们得以对系外行星大气的成分和热传输过程一窥究竟。对凌星系外行星进行观测,不仅可以得出行星质量与半径的信息,还可以得到行星大气和其主星的光谱。通过行星大气的光谱,我们进而可以研究大气中的各种化学过程和成分、温度结构、大气运动等等;将行星大气光谱与其质量半径相结合还可以为研究行星内部结构提供信息;此外,通过与系外行星宿主恒星光谱进行比较,我们甚至可得到行星形成与演化的信息。

表 1 系外行星探测的若干大事记

年份	事件	参考文献
2003	HST-STIS 探测到 HD 209458b 大气中的 HI, OI, CII 及大气逃逸	[14]
2004	首次由亮星的凌星测光发现的系外行星 TrES-1	[15]
2004	首次由直接成像法发现的系外行星 Fomalhaut b	[16]
2005	Spitzer 观测到的凌星次掩的热发射: TrES-1 b, HD 209458 b	[17, 18]
2005	VLT 直接成像法观测到的绕褐矮星的系外行星: 2M J1207 b	[19]
2006	Spitzer 观测到的昼夜面热发射的变化: $\nu$ And b	[20]
2007	Spitzer 观测到的红外谱: HD 189733 b	[21]
2007	Spitzer-IRAC 观测到 HD 189733 b 大气中有 H <sub>2</sub> O	[22]
2008	HST 观测到 HD 189733 b 大气中有 CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O	[23]
2008	Keck/Gemini 直接成像法发现的系外行星系统: HR 8799	[24]
2008	VLT 直接成像法发现的系外行星: $\beta$ Pic b	[25]
2009	观测到超级地球 GJ 1214b 凌星	[26]
2011	观测到 WASP-12b 的昼面大气中 C/O > 1	[27]
2013	HST WFC3 的数据确认了 GJ 1214b 大气中有云	[28]
2014	Kepler 观测到迄今最类似地球的系外行星 Kepler-186f	[29]

无论在轨道参数、质量、半径,还是在主星性质上,目前已确认的 1800 多颗系外行星都有很大差异,各种性质的分布范围十分广泛。主要包括热木星(离主星很近的气体巨行星)、距主星远的气态巨行星、超级地球等类型。与其他类型的系外行星相比,热木星的大气更易观测,是目前系外行星大气研究的热点课题。随着系外行星探测的空间项目和地面巨型望远镜的发展,将会有越来越多种类的系外行星很快被发现,因此系外行星的大气研究将会蓬勃发展。特别是将通过系外行星的大气观测来研究行星大气中是否有 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 与 O<sub>2</sub>

(或  $O_3$ ) 等适合生命存在的重要化学成分 (即所谓的 chemical fingerprint, “化学指纹”), 从而发现宜居的行星。

本文简要介绍了系外行星大气研究热点问题, 但不包括系外行星高层大气研究, 也不涉及大气的偏振研究。第 2 章介绍了系外行星大气的探测方法, 第 3 章介绍热木星大气的概况与大气模型, 第 4 章简述了超级地球的大气与宜居行星, 第 5 章给出了有关系外行星大气的探测项目。

## 2 系外行星大气的探测方法

### 2.1 直接成像法

系外行星最直接的探测方法是直接成像法, 即直接拍摄其影像, 接收系外行星反射的可见光或者其自身的热红外发射。可见光波段行星大气的谱线特征很多, 比如  $H_2O$ 、 $O_2$ 、 $O_3$  的吸收带等。测量可见光波段的亮度及变化、偏振情况及谱线特征, 可得到系外行星的温度、直径、质量、表面重力与大气压力等信息。在红外波段,  $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $O_3$  的重要分子谱带是鉴定系外生命特征的重要标志。不管在哪个波段, 至少需要  $R \approx 70$  的分辨率才能识别出各种谱线特征。但是目前的直接成像技术仅局限于观测大而亮的年轻大质量行星, 且行星通常距主星很远。目前直接成像技术的主要困难在于行星与其宿主恒星具有极高的恒星与行星亮度比, 恒星与其类地行星在可见光波段的亮度比高达  $10^{10}$ , 而恒星与热木星在红外波段亮度比也达  $10^3$ 。即使是对于最适合的目标恒星, 恒星与行星的光度比也很高, 这就需要通过自适应光学系统和大型地面望远镜 (如 Keck, VLT, Gemini 等) 或空间望远镜 (如 Spitzer 等) 来观测。

在波长较长的红外波段观测, 可以尽量降低恒星行星的亮度比。使用大口径望远镜和自适应光学系统可以提高信噪比、减小地球大气对观测的影响; 发射空间望远镜则可以完全避免地球大气对观测的干扰。此外, 星冕仪可以抑制恒星的强光对观测的影响, 后期处理可以消除残余像差, 干涉仪可提高角分辨率, 采用调零干涉法可消除恒星光; 采用这些技术, 可以获得更高分辨率的直接成像。

但总的来看, 目前直接成像法还不适用于大量发现系外行星。通过直接成像法发现的系外行星仅有 2M1207b<sup>[19]</sup>, Fomalhaut b<sup>[30]</sup> (见图 1), Beta Pic b<sup>[31]</sup>, 1RXS J1609 b<sup>[32]</sup>, HR 8799 b, c, d 以及 e<sup>[24, 33]</sup>; 最近发现的有  $\kappa$  And<sup>[34]</sup>, GJ 504<sup>[35]</sup>, HD 106906<sup>[36]</sup>。将来随着观测技术的提高, 利用该方法或许会发现越来越多的系外行星。

### 2.2 凌星法

大量热木星的存在和发现给凌星法观测系外行星提供了绝好的条件。如图 2 所示, 一颗系外行星在其主星前面经过时, 我们称这个现象为凌星主掩 (transit); 当它经过主星的背后, 被主星挡住时, 我们称之为凌星次掩 (secondary eclipse)。系外行星的主掩和次掩为大气探测提供了两种不同的思路。

当行星在绕恒星运行时, 我们观测得出行星与恒星共同的辐射通量关于轨道相的变化曲

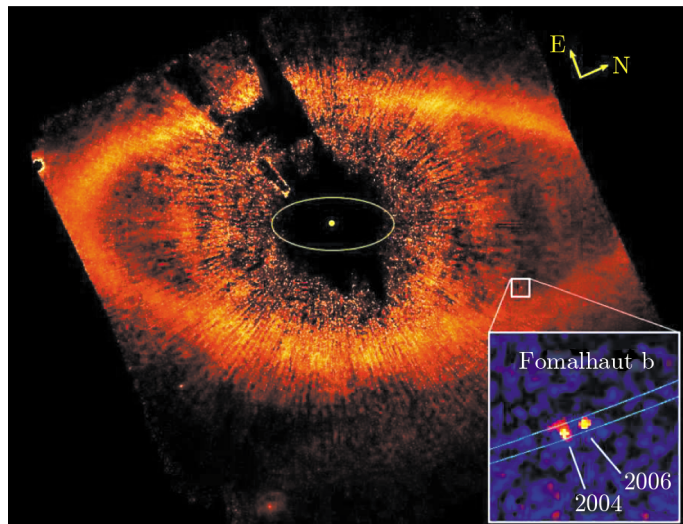


图 1 直接成像法观测到 Fomalhaut b<sup>[30]</sup>

在  $0.6 \mu m$  波段通过 HST 的星冕仪对 Fomalhaut 直接成像，图中可见 Fomalhaut b 在白方框内，图中心亮点为遮板后 Fomalhaut 的位置。其余明显亮点为背景星或假阳性信号。放大图中显示了 Fomalhaut b 在 2004 和 2006 年相对 Fomalhaut 的位置。

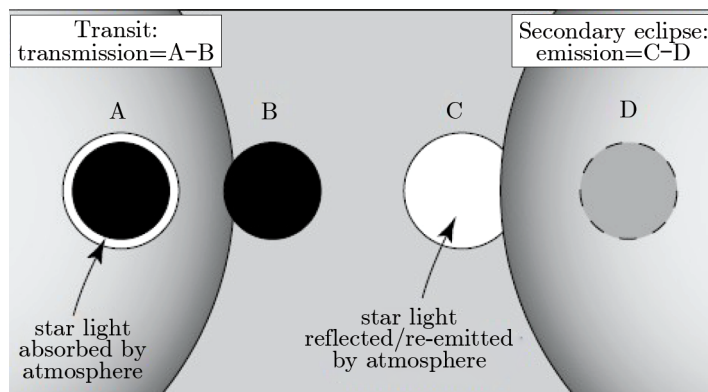


图 2 凌星主掩和次掩位置示意图<sup>[37]</sup>

左侧为凌星主掩，观测到的是行星晨昏线上大气的透射恒星光；右侧为凌星次掩，观测到的是行星昼面大气吸收恒星光的再发射及反射的恒星光。

线叫做相曲线 (见图 3)。行星发生凌星主掩时，主掩深度  $\tau_1$ <sup>[37]</sup> 为：

$$\tau_1 = \left( \frac{R_p + A_H}{R_*} \right)^2, \tag{1}$$

式中  $A_H$  是特定波段测得的环形吸收带的厚度， $R_p$ 、 $R_*$  分别是行星和恒星半径。根据主掩深度随波长的变化，可得到行星大气的透射光谱。

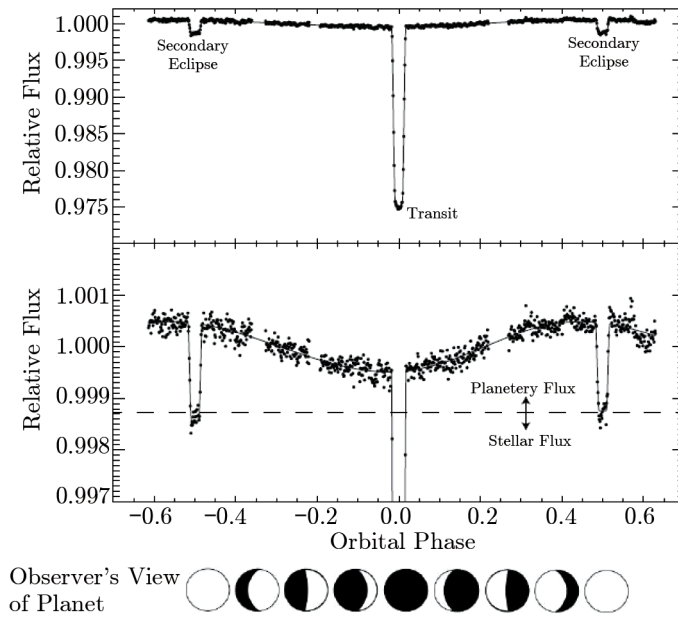


图 3 热木星 HD 189733b 的在  $4.5 \mu\text{m}$  波段的相曲线<sup>[40]</sup>

行星发生凌星次掩时, 次掩深度  $\tau_2$ <sup>[37]</sup> 为:

$$\tau_2 = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \left(\frac{T_p}{T_*}\right), \quad (2)$$

式中,  $T_p$ 、 $T_*$  分别为行星、恒星的有效温度。根据次掩深度随波长的变化, 可得到行星大气的热发射光谱。

当行星发生主掩时, 小部分的恒星光穿过行星外缘的大气, 在大气吸收越强烈的波段, 凌星的主掩深度就越深, 由此得到的透射谱就能用于研究晨昏线上的大气成分<sup>[11, 12]</sup>。当行星发生次掩时, 可以在近红外和中红外波段探测发生次掩前后行星昼面和恒星的光, 以及正发生次掩时单独恒星的光, 从而得到行星的热发射谱; 由行星的发射谱我们可以得到行星昼面大气的温度分布。2005 年, 首次凌星次掩观测应用于观测热木星 TrES-1 和 HD 209458b<sup>[17, 18]</sup>。根据相曲线还可推知温度关于行星经度的函数, 进而可推断其环流模式<sup>[38, 39]</sup>。

### 3 热木星大气的概况与大气模型

#### 3.1 热木星大气概况

在系外行星大气的研究中, 热木星一直以来都是主要研究对象。目前已有五十多个热木星大气的观测数据, 这些数据是通过各种空间或地面望远镜得到的宽波段测光数据以及低分辨率的光谱数据。我们借助目前的观测结果和理论模型来简单介绍热木星大气的概况, 本文不讨论高层大气的模式研究。

热木星受到其主星的强烈辐射, 大气非常热。早期的热木星大气模型已经预测了其温度超过  $1000 \text{ K}^{[41]}$ 。Spitzer 空间望远镜的次掩观测也验证了这一点 ( $T \approx 1300 \sim 3000 \text{ K}$ )。由于热木星离主星近且其温度高, 所以很适合大气观测。热木星吸收了大量主星的可见光, 在红外波段有大量的辐射, 但在可见光波段非常暗, 没有云的纯气体大气反射较少, 会更加暗; 所以对热木星的大部分观测都是在红外波段, 也有少数 UV、可见光的观测。通常我们认为热木星大气与太阳系内的木星、土星大气类似, 都是主要由 H、He 构成的原生大气, 这一点可由热木星的质量和半径推断而知<sup>[42, 43]</sup>。另外, 热木星大气中还含有由 O、C、N 等元素组成的物质, 可能由星子撞击对热木星内部核的侵蚀等因素造成, 主要是  $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  等<sup>[23, 44, 45]</sup>。正是这些物质产生了热木星大气的主要特征谱线, 从而反映了大气中的各种物理化学过程和形成历史。对系外行星大气成分的推断, 早期主要依靠 Spitzer 和 HST 宽波段少数几个频道的测光以及光谱的数据。经凌星法次掩观测热木星 HD 209458b 的昼面, 未发现  $\text{H}_2\text{O}^{[18, 46]}$ ; 而经凌星法主掩观测, 在其晨昏线的大气中发现了  $\text{H}_2\text{O}^{[47]}$ 。热木星 HD 189722b 的晨昏线大气中也发现了  $\text{H}_2\text{O}^{[22]}$ 。最初, 利用 HST 的红外光谱仪的观测结果, 天文学家推断出 HD 189733b, HD 209458b, XO-1b 等热木星大气中含有的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  以及  $\text{CO}_2^{[23, 48-50]}$ 。通过 Spitzer 的 IRS 光谱仪数据, HD 189733b 的昼面也被推断出含有  $\text{H}_2\text{O}^{[51, 52]}$ 。近 5 年来, 随着多波段测光观测和理论研究的进展, 对大气成分的研究有了新进展。Spitzer 已对约 20 个热木星次掩的热发射进行了多频道测光观测。Madhusudhan 和 Seager 等人建立反演模型, 用统计学方法从测光数据和光谱数据中反演出大气的元素丰度和温度结构, 推算出 HD 189733b 和 HD 209458b 大气中  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  的含量范围<sup>[27, 45, 53-55]</sup>。

除了我们通常讨论的平衡化学反应, 受恒星辐射不太强烈的行星大气中还存在非平衡化学过程。大气中的非平衡化学过程即恒星辐射引发光化学反应, 因气体混合时标小于平衡反应时标, 大气垂直方向物质不断混合使得化学反应无法达到平衡的过程。在太阳系内巨行星的大气中非平衡化学过程很常见<sup>[56]</sup>, 因而也被认为普遍存在于系外行星大气中<sup>[57-59]</sup>。一系列的研究认为, 非平衡化学过程盛行于平衡温度  $T < 1300 \text{ K}$  的大气中, 而在压强约为  $100 \sim 1 \times 10^5 \text{ Pa}$  的红外可观测区域内,  $T > 2000 \text{ K}$  的大气是处于稳定化学平衡状态的<sup>[27, 57-64]</sup>。最常探测到的非平衡化学过程发生在温度较低的大气中, 垂直物质混合所造成  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  的不平衡, 比如在热木星 HD 189733b 的大气中就可能存在  $\text{CO-CH}_4$  的非平衡化学过程<sup>[40, 62]</sup>。化学平衡时大气中  $\text{CH}_4$  是 C 的主要存在形式,  $\text{CO}$  较少; 而一系列化学反应使垂直的流体运动从更热的大气下层抽调  $\text{CO}$ , 进入可被红外探测到的稍高层。

空间与地面望远镜观测相结合, 观测的波段覆盖  $0.8 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ , 可同时得到大气温度结构、多种分子含量及元素丰度比。Madhusudhan 据此发现了热木星 WASP-12b 的昼面大气中  $\text{C/O} > 1^{[27]}$ ,  $\text{C/O}$  等元素丰度比的确定可以帮助我们了解行星的形成条件。根据 Madhusudhan 的上述发现, Oberg 提出巨行星大气的  $\text{C/O}$  取决于在原行星盘中它的形成位置与雪线 (snow line, 即从原行星盘中心向外起算的一个特定距离, 该距离以外的气盘温度足够低, 以至于 H 的化合物, 如  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{CH}_4$  能凝结成为固体的冰冻颗粒) 的关系<sup>[65]</sup>。利用 HST 和地面设备进行凌星热木星的光谱观测也初见成效: Deming 等人发布了 HD 209458b 和 XO-1b 的高信噪比透射谱, 在 HD 209458b 的大气中发现了  $\text{H}_2\text{O}^{[66]}$ 。利用高

分辨率的红外光谱仪, 我们也可以对非凌星热木星的大气成分进行探测, 目前已探测到非凌星热木星  $\tau$  Bootis 大气中的 CO 及 H<sub>2</sub><sup>[67, 68]</sup>。

Seager 和 Sasselov 早期的热木星大气模型预测了热木星大气中存在 Na 和 K 元素<sup>[11]</sup>。迄今为止, 已在 HD 209458b, HD 189733b, WASP-17b 等热木星中探测到了 Na<sup>[6, 69, 70]</sup>, 在 XO-2b 中探测到了 K<sup>[71]</sup>。此外, 根据压力致宽的 Na 吸收线还可以推测出大气的垂直温度压力结构<sup>[72]</sup>。

热木星吸收了来自主星的强紫外辐射, 外部大气被加热, 导致大气逃逸的发生。有观测显示, HD 209458b 和 HD 189733b 的外围环绕了一层半径超过洛希瓣的中性氢云<sup>[73, 74]</sup>, 这是由于大气中 H 逃逸至行星外围所形成的; 在 HD 209458b 的大气中还探测到了逃逸的 O、C<sup>[14]</sup>、Si<sup>[75]</sup>。近年来还在 WASP-12b, HD 209458b 的外逸层观测到中性和电离的金属元素<sup>[76-78]</sup>。

在温度超过 1000 K 的行星中, 云的存在显著提高了行星的反照率; 如果没有云, 行星会是个非常暗的行星。在观测凌行星的透射谱时, 云对入射的恒星光的影响不容小觑, 谱线特征会因为云的影响而被削弱。Deming 等人在近红外波段发现了 HD 209458b 和 XO-1b 大气中被削弱的水蒸气谱线特征<sup>[66]</sup>, 很可能意味着这两颗行星大气中存在云。但是目前对云的成分还没有定论, 这些云有可能来自于硅酸盐物质的凝结或者一些光化学过程。

在大气中温度随高度而增长的现象叫温度反转, 在太阳系行星的大气中这种现象由 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>3</sub> 吸收主星的 UV 辐射所致。由于热木星大气缺少 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>3</sub>, 关于热木星大气温度反转的预测并不多。大气反转的判断与模型有很大关系。假设大气处于化学平衡和辐射平衡, 则较容易鉴别出温度反转。分析 HD 209458b 和 TrES-4b 的测光和透射谱后, 可发现温度反转现象<sup>[79-81]</sup>。另外, 有研究发现温度反转与 TiO、VO 这些可见光、强紫外波段的强吸收物有关<sup>[57, 82-84]</sup>; 但至今尚无证据显示大气中有此类吸收物, 有待未来高精度观测的验证。

在第 2 章, 我们已提到由系外行星的相曲线可推知它的环流模式, 大气环流是将大气所吸收的恒星辐射能量重新分布的大尺度气体运动。由于受到潮汐锁定作用, 热木星的一面总是向着主星, 是昼面; 另一面总是背着主星, 即夜面。若没有大气的环流作用, 则昼夜面温度差异会很大, 且最热的区域会位于主星直射的星下点。但 Knutson 等人在 2007 年发布了由 Spitzer 在 8  $\mu\text{m}$  观测得到的 HD 189733b 的相曲线, 这个结果显示该行星的昼面温度约 1200 K, 夜面温度约 1000 K, 其昼夜面的温度变化较缓和, 不是一面极冷而一面极热的情况<sup>[85]</sup>; 且相曲线最大值出现在发生次掩之前, 这意味着最热的区域偏离星下点。与之吻合的理论研究是, Showman 在他的大气环流模型中预测了大气环流使得热木星最热的区域偏离了星下点, 在星下点以东的位置<sup>[86]</sup>。目前还有研究通过 WASP-43b 的相曲线得出了行星大气的最热点星下点偏离量与大气高度的相关关系<sup>[87]</sup>。通过目前有限的相曲线样本, 我们也可以粗略估计热木星昼夜面间的能量运输。Cowan 等人的研究发现, 昼面温度低于 2300 K 的行星大气环流量差异很大, 而高于 2300 K 的行星的环流不显著<sup>[88]</sup>。

### 3.2 热木星的大气模型

在过去的十几年, 系外行星大气的理论研究发展飞速。天文学家建立了针对热木星、超级地球等系外行星的各种各样的大气模型, 有一维的, 也有三维的; 有假设化学平衡的, 也

有假设非化学平衡的。建立大气模型是为了推测大气的性质,尤其是垂直压力温度结构、昼夜面温度分布、环流模式、化学成分,以及相应的谱线特征;还有更详细预测各种原子线、分子线在光学和红外谱区域的出现情况,使得理论与观测互相促进。各种不同模型复杂程度不同,主要差异在采用的方程复杂程度不同;假设大气元素丰度不同,则考虑的化学过程也不同。系外行星大气的多波段测光观测催生了最新的参数模型。参数模型<sup>[45]</sup>采用非辐射对流平衡、非化学平衡的假设,大气的压强温度图( $P-T$ 图)和元素丰度都是自由参数。参数模型与统计算法相结合可以从光谱或测光数据中反演出大气的 $P-T$ 图和化学成分。

下面仅简要介绍建立最简单热木星大气模型的基本思想。传统的大气模型<sup>[41, 46, 79, 83, 89, 90]</sup>都首先假设在平行平面大气中辐射-对流平衡、化学平衡、流体静力平衡以及局部热动平衡(LTE)。在辐射对流平衡下,可以由入射的辐射和化学成分计算出压力温度结构;在化学平衡下,可以确定各种大气成分的丰度,进而得出大气的透明度。流体静力学平衡确定了大气压强与垂直高度的关系。根据以上所假设的平衡要素,一个行星的出射谱就能算出。当大气运动和非平衡过程不太影响温度结构和化学组成时,上述的平衡模型可以较准确地反映行星的大气。光化学作用对低质量固态行星大气中物质丰度的影响较大,因为低质量固态行星留不住光化学后的产物,而且大气的温度压强也不足以将产物返回到平衡浓度。大气逃逸会进一步对低质量或者炽热的大气成分产生影响。另外,热木星与主星距离不到0.05 AU,受潮汐锁定作用,一面总是昼面,且受到主星强烈的辐射,为了更好地分析理解热木星的光谱,热木星的大气环流计算也很有必要。

### 3.2.1 理论谱线

辐射转移公式是计算理论谱线的基础,在大气中由于各种物质粒子的吸收发射和反射,入射光在大气中通过时,强度会发射变化。辐射转移方程描述的就是一束光的强度变化,它等于损失的部分 $\kappa I$ 与增加的部分 $\varepsilon$ 之和,辐射转移方程的一维形式为:

$$\mu \frac{dI(z, \nu, \mu, t)}{dz} = -\kappa(z, \nu, t)I(z, \nu, \mu, t) + \varepsilon(z, \nu, \mu, t), \quad (3)$$

式中, $I$ 是这束光的强度; $\kappa$ 是吸收系数,包括被吸收和散射出的光束; $\varepsilon$ 是发射系数,包括发射和散射进的光束。

辐射转移公式的解在恒星大气理论中早有运用,实际处理行星大气和恒星大气辐射转移的最大不同就是大气顶层边界条件的不同,行星大气顶层受到恒星的辐射,而且有可能存在云。辐射转移方程中的吸收系数 $\kappa$ 和发射系数 $\varepsilon$ 与透明度、化学过程、云等因素有关。图4为理论谱线与观测结果的对比图。

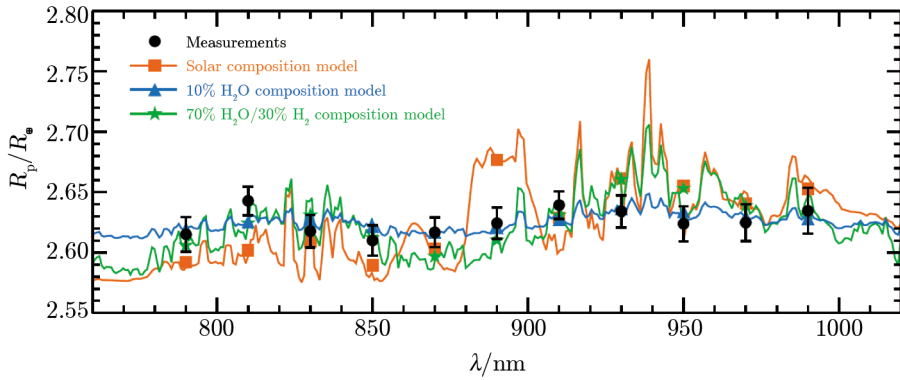
### 3.2.2 温度结构

受到恒星的强烈辐射,其外层大气的温度结构也受到强烈影响。为了描述温度压强结构,我们需要3个基本方程。

- (1) 辐射转移方程,同式(3)。
- (2) 流体静力平衡方程:

$$\frac{dP}{dz} = -g\rho, \quad (4)$$



图 4 理论谱线与观测对比<sup>[93]</sup>

红、蓝、黄线为三种成分不同大气模型得到的 GJ 1214b 理论透射谱, 黑点为实际观测值。

式中  $P$  为大气压强,  $z$  为高度,  $g$  为重力加速度,  $\rho$  为大气密度。

(3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\Delta F(z)}{\Delta z}, \quad (5)$$

式中,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $z$  为高度,  $\rho$  为大气密度,  $c_p$  为定压比热,  $\Delta F(z)$  为净辐射通量。通过这三个方程, 可以得到温度与垂直高度的关系、压强与垂直高度的关系、辐射场关于高度和波长的分布。图 5 是由大气模型得到的  $P-T$  图。

### 3.2.3 大气运动

图 6 为大气环流模型模拟的热木星大气高度全球分布图。大气环流模型基于流体动力学方程组, 最完整的由 4 个方程组成。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (6)$$

(2) 动量守恒方程 (3 维):

$$\frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{U} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{F}_f, \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{U}$  为大气运动的速度矢量,  $\boldsymbol{\Omega}$  为行星的旋转速度,  $\mathbf{F}_f$  为摩擦力, 等式右边第一项为科氏项。

(3) 能量守恒方程, 同式 (5)。

(4) 理想气体状态方程:

$$P = \rho RT. \quad (8)$$

有些研究采用“原始方程”, 用局部流体静力平衡代替垂直动量方程, 因而省去了垂直方向上的加速度项、对流项、科氏项这些对全球尺度环流无关紧要的项。Showman 在研究中采用了非常简化的“浅水方程”<sup>[92]</sup>, 忽略了垂直方向上的动力学过程, 对于大尺度的全球环流的模

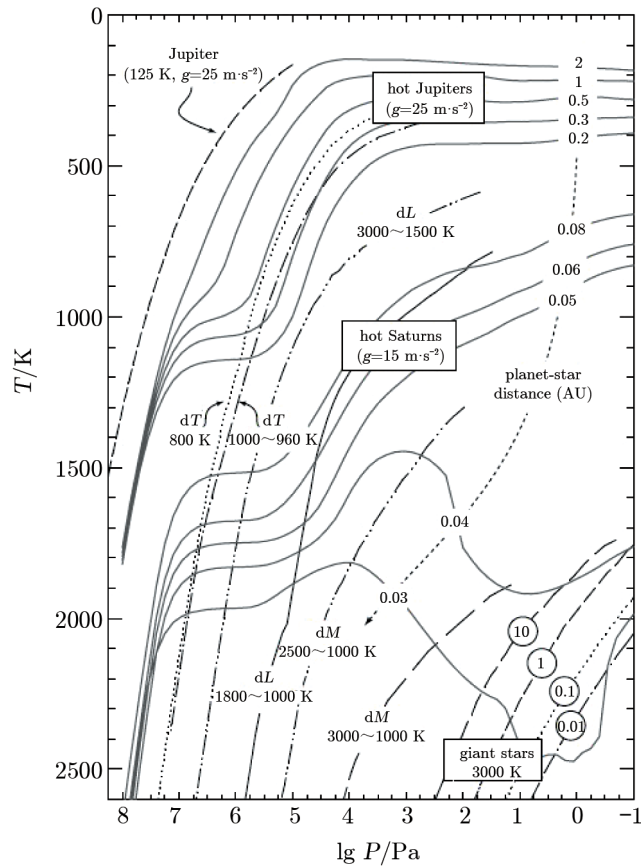


图 5 由大气模型得到的压强温度  $P - T$  图<sup>[91]</sup>

实线为木星、土星质量的行星在距主星不同距离 (单位为 AU) 时的压强温度关系。虚线从左到右表示木星、热木星、巨星的压强温度关系。

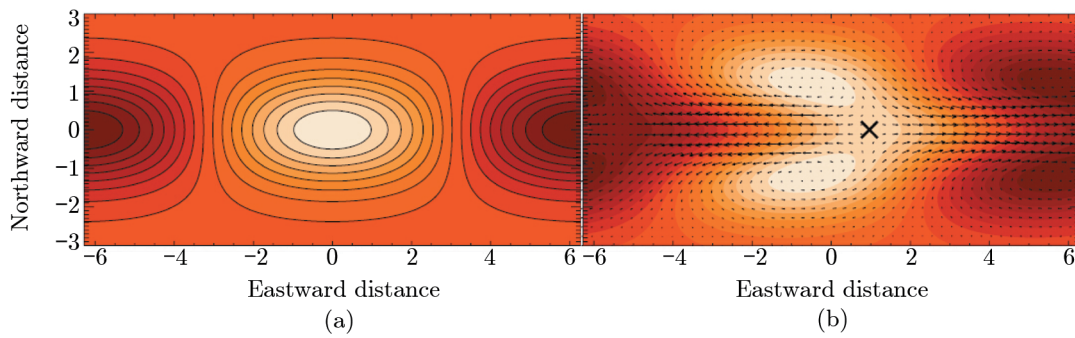


图 6 大气环流下热木星大气高度全球分布图<sup>[92]</sup>

(a) 辐射平衡下的大气高度场分布; (b) 大气环流下大气高度场分布和水平风速分布 (箭头表示),  $\times$  号表示高度最大值的区域。

拟有较好的效果。考虑到目前的观测数据的水平, 计算热木星的谱线并不一定要考虑大气环流。但是在类地行星上, 大气环流对于控制行星表面温度、形成大尺度的云有很大作用。

## 4 超级地球的大气与宜居行星

### 4.1 超级地球的大气

最近几年, 系外行星探测又开辟了新的领域——寻找超级地球。超级地球是个很引人注目的领域, 因为它们的各种属性差异巨大, 并且我们很可能发现某个超级地球适宜居住。目前我们已知的超级地球有五十多个, 观测和研究它们的大气是个很具挑战的领域, 因为和太阳系中的气态巨行星保持原生大气不同, 超级地球的大气形成和演化会产生极大的差异, 使得大气质量和成分都天差地别。通常把质量在  $1\sim 10 M_{\oplus}$  的系外固态行星叫做超级地球。

太阳系中巨行星的大气都是直接吸积而来的原生大气, 主要由 H、He 构成; 而太阳系中的固态行星则有次生大气, 其成分由行星内部而来。目前关于系外行星次生大气的研究比较少, 超级地球的大气既有可能是原生大气, 也有可能是次生大气, 甚至两者的混合。

GJ 1214b 是目前唯一观测到大气的超级地球。单单从 GJ 1214b 的质量和半径来看, 其成分是简并的, 但是可以排除一个太阳成分的无云模型<sup>[93]</sup>; Spitzer、HST WFC3 以及地面望远镜的观测数据也印证了这一点<sup>[94, 95]</sup>。其观测得到的透射谱比较平滑, 特征较弱, 表明两种可能: 大气的平均分子质量较大, 或者大气中存在云。富金属大气是 GJ 1214b 大气的一种可能情况<sup>[96]</sup>, 由于富金属大气的平均分子质量较大, 大气标高小, 且容易形成云, 因而其透射谱特征较弱。最近 Kreidberg 等人通过高信噪比的 HST WFC3 数据确认了 GJ 1214b 的大气中有云<sup>[28]</sup>。与此同时, Knutson 等人确认了另一颗系外行星 GJ 436b 大气中存在云<sup>[97]</sup>。未来在各种 M 型星和类太阳的恒星周围我们会发现很多与 GJ 1214b 质量半径类似的超级地球, 获取更多大气样本之后有助于推进超级地球的大气研究。

想要了解超级地球上是否可能存在生命, 就要探测其大气中是否具有生物特征。如果我们在大气光谱中发现了水的特征, 则说明该行星可能是宜居的; 如果观测到行星的反照率在光谱的红外方向有增加, 则可能暗示着存在植被<sup>[98]</sup>。但这些都并非确凿的生物特征。20 世纪 60 年代就有些学者认为, 可以用大气中一对氧化物和还原物偏离氧化还原平衡的情况作为生物特征<sup>[99, 100]</sup>, 但是引起这种不平衡情况的因素还可能是光化学等非生物过程<sup>[101]</sup>。生物特征通常指的是能由生物产生而不太可能通过非生物方式产生的一些化学物质。O<sub>2</sub> 是一种反应活性较强的气体, 若行星上没有持续产生 O<sub>2</sub> 的源, 则在行星大气中将不会持续存在。在地球上有绿色植物和光合细菌产生 O<sub>2</sub>, 没有非生物源产生 O<sub>2</sub>; 因而, O<sub>2</sub> 以及它的光化学产物 O<sub>3</sub> 是地球上最强的两种生物特征气体。但目前有研究显示, 在一种特定的 UV 情况下, 无生命的系外行星大气中也可以积累氧, 因而氧也并非总是理想的生物特征<sup>[102, 103]</sup>。N<sub>2</sub>O 也可作为大气中的生物特征, 它可由微生物的氧化还原产生, 在地球上含量微小; 还有些气体虽不能直接反映生物性, 但也能显示行星的一些信息, 比如 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>。CO<sub>2</sub> 可作为类地行星大气指示物, 它在中红外波段有强烈的谱线特征。系外行星通常不会如地球一样有 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O

这些生物特征气体,但我们可以通过建立系外行星的环境模型,计算特定环境下非生物过程可产生的各种气体量<sup>[104, 105]</sup>,实际含量远远超过这个计算结果的一种或多种气体则可以作为生物存在的指示物。当探测到生物特征气体时,也不能断定生命的存在,还需考虑该气体是否还可能通过火山、地质构造等非生物过程产生。最近甚至有学者认为,可以利用人类活动产生的污染物(比如  $\text{CCl}_3\text{F}$ ) 作为系外行星上的生物特征<sup>[106]</sup>。

## 4.2 宜居行星

宜居的超级地球是目前系外行星探测中最引人注目的。地球上的所有生命都需要液态水,所以寻找宜居行星的基本要求是其表面温度适宜液态水存在。一颗恒星的宜居带是根据离主星距离而定义,在此距离范围内液态水可以存在,液态水存在的温度范围是 273 K~373 K,因而恒星的宜居带是一个带状区域(见图 7)。一颗行星的表面温度除了与其恒星的亮度(辐射强度)以及该行星与其恒星的距离有关,还受行星反照率和行星大气温室效应的影响,因为行星反照率降低了行星吸收的恒星辐射,大气的温室效应有助于升高表面温度。位于宜居带的超级地球 HD 40307g 拥有浓厚的大气,有研究表明其  $\text{CO}_2$  含量高于地球,大气压和  $\text{CO}_2$  含量的特定组合可以使 HD 40307g 的全球表面温度与当今地球一样<sup>[108]</sup>。行星本身是一个复杂系统,除了恒星辐射和温室效应,大气圈与其他圈层相互作用、共同演化也会影响行星表面温度。

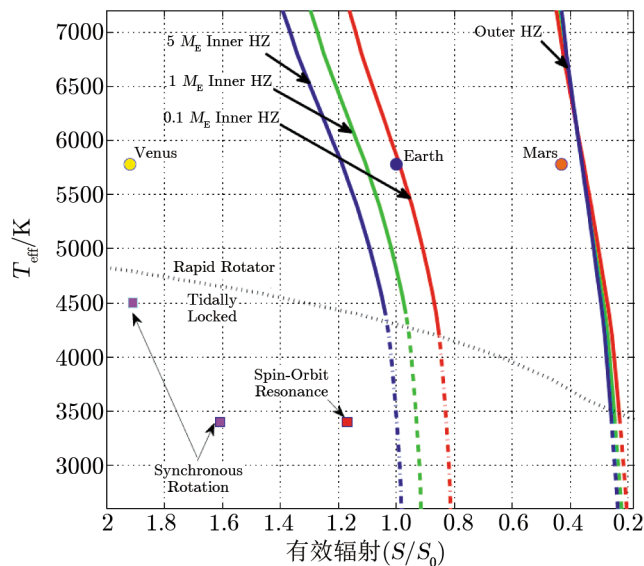


图 7 恒星的宜居带<sup>[107]</sup>

有效温度在 2600~7200 K 范围内的恒星的宜居带,蓝、绿、红线分别为不同质量行星的宜居范围的内外界限。

目前发现的位于宜居带的超级地球中,在质量、温度等方面与地球最类似的有 Kepler-22b、Gliese 667Cc 和 Kepler-186f。Kepler-22b 是迄今为止发现的位于类太阳恒星宜居带中真正的行星,其半径是地球的 2.35 倍,质量尚不明确,接收到的辐射功率是地球的 1.09 倍<sup>[109]</sup>。Gliese 667Cc 的半径约为地球的 1.76 倍,质量大约是地球的 4.39 倍,接收到的辐

射功率是地球的 0.875, 位于 Gliese 667C 的宜居带中靠近内边缘的区域<sup>[110]</sup>。最新发现的 Kepler-186f 约为地球半径的 1.1 倍, 公转周期为 130 d, 围绕一颗红矮星, 接收到的辐射功率是地球的 0.32 左右<sup>[29]</sup>。它们与地球是否具有类似性, 其大气成分如何, 现在还不太清楚, 这些都将影响到它们的宜居性。此外, 曾于 2007 年和 2010 年公布发现的超级地球 Gliese 581d 和 Gliese 581g, 目前被证实并不存在, 所谓的 Gliese 581d 只是由于恒星活动造成的视向速度伪信号, 进而还导致了 Gliese 581g 的误判<sup>[111]</sup>。

在宜居行星的理论研究方面, 我们通过对行星形成进行模拟后发现, 在大倾角的行星系统中存在位于宜居带类地行星的可能性很大<sup>[112]</sup>。

## 5 系外行星大气研究未来展望

各种类型的系外行星探测项目如表 2 所示, 正在和将要为系外行星大气探测做出贡献。迄今为止, 人们收获最为丰富的来自 Kepler 空间望远镜, 目前大部分已探测到的系外行星都是由 Kepler 发现的。这一项目还发现了与地球最为相似的若干类地行星, 为我们探索宜居行星提供了初步认识<sup>[113]</sup>。

表 2 各种类型的系外行星探测项目

项目类型	科学目标	项目名称
凌星法 (地面)	探测短周期的巨行星	XO, TrES, SuperWASP, OGLE III
直接成像 (地面)	观测冷恒星周围的年轻巨行星	VLT, Gemini, Keck, ELT
凌星法 (空间)	探测短周期的巨行星和类地行星, 并分析其组成	CoRoT, Kepler, PLATO, Spitzer, JWST, CHEOPS
直接成像 (空间)	得到巨行星和类地行星的光谱, 并分析其组成	Spitzer, JWST

HST、Spitzer 以及地面望远镜所提供的大量数据, 使我们了解了许多系外行星的大气性质。HST 的中红外光谱仪提供了许多系外行星大气的凌星透射谱, 目前大部分的次掩热发射探测来自 Spitzer 空间望远镜<sup>[114, 115]</sup>, 小部分来自地面的近红外望远镜<sup>[116-118]</sup>。

目前成功的系外行星相曲线测量全都来自于 Spitzer、CoRoT、Kepler 这些空间望远镜。系外行星直接成像法的观测主要来自 Keck、VLT、Subaru、Gemini 等地面望远镜以及 HST 空间望远镜。大量的热木星测光观测数据来自于 MOST、CoRoT、Kepler。

未来 E-ELT、TMT 这些地面大口径望远镜的投入运行, 将会促进人们认识凌星和非凌星的系外行星大气。虽然目前在可见光和近红外波段, 还无法通过光栅光谱仪来观测系外行星大气透射谱, 但是随着这些大口径的新望远镜投入使用, 不久的将来会实现, 甚至还可以观测与地球大小类似的系外行星大气。随着 VLT、Gemini 等地面望远镜上直接成像设备的不断革新, 未来可以获得轨道半长径在 5 ~ 50 AU 范围内系外行星的近红外低分辨率光谱。通过这些望远镜直接成像可以观测到比凌星法更大的轨道范围。

未来的空间项目如 TESS、PLATO 的运行将会为我们提供系外行星大气观测的目标, CHEOPS、JWST 等将对系外行星大气进行大量观测。美国航空航天局 (NASA) 的 TESS 将于 2017 年发射, 旨在搜索大量小型的凌星系外行星, 为 JWST 提供目标。欧洲航天局 (ESA) 的 CHEOPS 也将于 2017 年发射, 将对已知拥有行星的亮恒星进行搜索, 发现其小型行星的凌星现象。NASA 的 JWST 计划于 2018 年发射, 其口径达到 6.5 m, 波长范围为 0.6~28  $\mu\text{m}$ , 可以提供极高信噪比和分辨率的凌星谱线, 更加严格地推断出系外行星大气的各种性质。不久前, ESA 宣布在 2024 年发射 PLATO 卫星。该卫星将会监测邻近的明亮恒星, 通过凌星法寻找其宜居区内的超级地球及地球大小的系外行星。TESS 和 PLATO 都将会是 Kepler 的升级版, 它们将搜索更大的范围。

此外, 中国的空间微角秒级天体测量卫星项目 STEP 也正在筹备中, STEP 计划的科学目标之一就是搜索太阳系附近的类地行星以及探测太阳系附近的行星系统, 将加强和覆盖 TESS 计划的科学目标, 与 TESS 探测结果对比甄别, 会大大增强对类地行星的探测能力。STEP 在取得类地行星探测结果后, 可以和 JWST 以及地面大型光学望远镜等形成配合, 对部分 STEP 的探测目标进行后续的高分辨率光谱观测。

以前, 各种系外行星探测项目都将注意力放在发现新的系外行星, 以及获取行星的统计特征、密度、轨道等外部特性; 如今这些项目的注意力正逐渐转为对特定的行星和行星系统的特性研究, 不仅探测它们的外部特性, 还研究它们的内部结构、大气组成等, 以深入了解和更好地解释行星的形成和多样性<sup>[119]</sup>。这些地面和空间计划将直接推动系外行星大气的观测及研究, 可以预见, 在未来 10 年系外行星大气研究将取得重要的进展。

#### 参考文献:

- [1] <http://exoplanet.eu/catalog/>, 2014
- [2] Russell H N. ApJ, 1899, 9: 284
- [3] St. John C E, Nicholson S B. ApJ, 1922, 56: 380
- [4] Adel A, Slipher V M. Phys. Rev., 1934, 46: 902
- [5] Adel A. ApJ, 1937, 85:345
- [6] Charbonneau D, Brown T M, Noyes R W, et al. ApJ, 2002, 568: 377
- [7] Ackerman A S, Marley M S. ApJ, 2001, 556: 872
- [8] Cooper C S, Sudarsky D, Milsom J A, et al. ApJ, 2003, 586: 1320
- [9] Showman A P, Guillot T. A&A, 2002, 385: 166
- [10] Cho J K, Menou K, Hansen B, et al. ApJ, 2003, 587: 117
- [11] Seager S, Sasselov D. ApJ, 2000, 537: 916
- [12] Brown T M. ApJ, 2001, 553: 1006
- [13] Hubbard W B, Fortney J J, Lunine J I, et al. ApJ, 2001, 560: 413
- [14] Vidal-Madjar A, Desert J M, Lecavelier des Etangs A, et al. ApJ, 2004, 604: L69
- [15] Alonso R, Brown T M, Torres G, et al. ApJ, 2004, 613: L153
- [16] Kalas P, Graham JR, Clampin M. Nature, 2005, 435: 1067
- [17] Charbonneau D, Allen L E, Megeath S T, et al. ApJ, 2005, 626: 523
- [18] Deming D, Seager S, Richardson L J, et al. Nature, 2005, 434: 738

- 
- [19] Chauvin G, Lagrange A M, Zuckerman B, et al. *A&A*, 2005, 438: L25
- [20] Harrington J, Hansen B, Luszcz S H, et al. *Science*, 2006, 314: 623
- [21] Grillmair C J, Charbonneau D, Burrows A, et al. *ApJ*, 2007, 658: L115
- [22] Tinetti G, Vidal-Madjar A, Liang M C, et al. *Nature*, 2007, 448: 169
- [23] Swain M R, Vasisht G, Tinetti G, et al. *ApJ*, 2009, 690: L114
- [24] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. *Science*, 2008, 322: 1348
- [25] Lagrange A M, Gratadour D, Chauvin G, et al. *A&A*, 2009, 493: L21
- [26] Charbonneau D, Berta Z K, Irwin J, et al. *Nature*, 2009, 462: 891
- [27] Madhusudhan N, Harrington J, Stevenson K B, et al. *Nature*, 2011, 469: 64
- [28] Kreidberg L, Bean J L, Desert J M, et al. *Nature*, 2014, 505: 69
- [29] Quintana E V, Barclay E, Raymond S N, et al. *Science*, 2014, 344: 277
- [30] Kalas P, Graham J R, Eugene C, et al. *Science*, 2008, 322: 1345
- [31] Lagrange A M, Bonnefoy M, Chauvin G, et al. *Science*, 2010, 329: 57
- [32] Lafrenière D, Jayawardhana R, van Kerkwijk M H. *ApJ*, 2010, 719: 497
- [33] Marois C, Zuckerman B, Konopacky Q M, et al. *Science*, 2010, 468: 1080
- [34] Carson J, Thalmann C, Janson M, et al. *ApJ*, 2013, 763: L32
- [35] Kuzuhara M, Tamura M, Kudo T, et al. *ApJ*, 2013, 774: 11
- [36] Bailey V, Meshkat T, Reiter M, et al. *ApJL*, 2014, 780: L4
- [37] Seager S. *Exoplanet Atmospheres*. Princeton: Princeton University Press, 2010: 40
- [38] Cowan N, Agol E. *ApJ*, 2008, 678: L129
- [39] Cowan N, Agol E. *ApJ*, 2011, 726: 82
- [40] Knutson H A, Lewis N, Fortney J J, et al. *ApJ*, 2012, 754: 22
- [41] Sudarsky D, Burrows A, Hubeny I. *ApJ*, 2003, 588: 1121
- [42] Fortney J J, Marley M S, Barnes J W. *ApJ*, 2007, 659: 1661
- [43] Seager S, Kuchner M, Hier-Majumder C A, et al. *ApJ*, 2007, 669: 1279
- [44] Swain M R, Vasisht G, Tinetti G. *Nature*, 2008, 452: 329
- [45] Madhusudhan N, Seager S. *ApJ*, 2009, 707: 24
- [46] Seager S, Richardson L J, Hansen B, et al. *ApJ*, 2005, 632: 1122
- [47] Barman T S. *ApJ*, 2007, 661: L191
- [48] Swain M R, Bouwman J, Akeson R L, et al. *ApJ*, 2008, 674: 482
- [49] Swain M R, Tinetti G, Vasisht G, et al. *ApJ*, 2009, 704: 1616
- [50] Tinetti G, Deroo P, Swain M, et al. *ApJ*, 2010, 712: 139
- [51] Grillmair C J, Burrows A, Charbonneau D, et al. *Nature*, 2008, 456: 767
- [52] Barman T S. *ApJ*, 2008, 676: L61
- [53] Madhusudhan N, Seager S. *ApJ*, 2010, 725: 261
- [54] Lee J M, Fletcher L N, Irwin P G J. *MNRAS*, 2012, 420: 170
- [55] Line M R, Zhang X, Vasisht G, et al. *ApJ*, 2012, 749: 93
- [56] Yung Y, Demore W B. *Photochemistry of Planetary Atmospheres*. NY: Oxford Univ. Press, 1999: 3
- [57] Zahnle K, Marley M, Lodders K, et al. *ApJ*, 2009, 701: L20
- [58] Moses J, Visscher C, Fortney J J, et al. *ApJ*, 2011, 737: 15
- [59] Moses J, Line M R, Visscher C, et al. *ApJ*, 2013, 777: 34
- [60] Cooper C S, Showman A P. *ApJ*, 2006, 649: 1048
- [61] Line M R, Liang M C, Yung Y L. *ApJ*, 2010, 717: 496
- [62] Visscher C, Moses J. *ApJ*, 2011, 738: 72
- [63] Kopparapu R, Kasting J F, Zahnle K J. *ApJ*, 2012, 745: 77
- [64] Venot O, Hebrard E, Agundez M, et al. *A&A*, 2012, 546: A43
- [65] Oberg K, Murray-Clay R, Bergin E A. *ApJL*, 2011, 743: L16
- [66] Deming D, Wilkins A, McCullough P, et al. *ApJ*, 2013, 774: 95
- [67] Brogi M, Snellen I A G, de Kok R J, et al. *Nature*, 2012, 486: 502

- [68] Rodler F, López-Morales M, Ribas I. *ApJ*, 2012, 753: L25
- [69] Redfield S, Endl M, Cochran W D, et al. *ApJ*, 2008, 673: L87
- [70] Wood P L, Maxted P F L, Smalley B, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 2376
- [71] Sing D K, Desert J M, Fortney J J, et al. *A&A*, 2011, 527: A73
- [72] Huitson C M, Sing D K, Vidal-Madjar A, et al. *MNRAS*, 2012, 422: 2477
- [73] Vidal-Madjar A, Lecavelier des Etangs A, Desert J M, et al. *Nature*, 2003, 422: 143
- [74] Lecavelier des Etangs A, Ehrenreich D, Vidal-Madjar A, et al. *A&A*, 2010, 514: A72
- [75] Linsky J L, Yang H, France K, et al. *ApJ*, 2010, 717: 1291
- [76] Fossati L, Haswell C A, Froning C S, et al. *ApJ*, 2010, 714: 222
- [77] Astudillo-Defru N, Rojo P. *A&A*, 2013, 557: A56
- [78] Vidal-Madjar A, Huitson C M, Bourrier V, et al. *A&A*, 2013, 560: A54
- [79] Burrows A, Ibgui L, Hubeny I. *ApJ*, 2008, 682: 1277
- [80] Knutson H A, Charbonneau D, Allen L E. *ApJ*, 2008, 673: 526
- [81] Knutson H A, Charbonneau D, Cowan N B, et al. *ApJ*, 2009, 703: 769
- [82] Hubeny I, Burrows A, Sudarsky D. *ApJ*, 2003, 594: 1011
- [83] Fortney J J, Saumon D, Marley M S, et al. *ApJ*, 2006, 642: 495
- [84] Burrows A, Budaj J, Hubeny I. *ApJ*, 2008, 678: 1436
- [85] Knutson H A, Charbonneau D, Allen L E, et al. *Nature*, 2007, 447: 183
- [86] Showman A P, Fortney J J, Lian Y, et al. *ApJ*, 2009, 699: 564
- [87] Stevenson K, Desert J M, Line M, et al. *Science*, 2014, 346: 838
- [88] Cowan N, Agol E. *ApJ*, 2011, 729: 54
- [89] Barman T S, Hauschildt P H, Allard F. *ApJ*, 2005, 632: 1132
- [90] Burrows A, Hubeny I, Budaj J, et al. *ApJ*, 2007, 668: L171
- [91] Lodders K. *Formation and Evolution of Exoplanets*. US: Wiley, 2010: 157
- [92] Showman A P, Polvani L M. *ApJ*, 2011, 738: 71
- [93] Bean J L, Miller-Ricci Kempton E, Homeier D. *Nature*, 2010, 468: 669
- [94] Desert J M, Bean J, Miller-Ricci Kempton E, et al. *ApJ*, 2011, 731: L40
- [95] Berta Z K, Charbonneau D, Desert J M, et al. *ApJ*, 2012, 747: 35
- [96] Fortney J J, Mordasini C, Nettelmann N, et al. *ApJ*, 2013, 775: 80
- [97] Knutson H A, Benneke B, Deming D, et al. *Nature*, 2014, 505: 66
- [98] Seager S, Turner E L, Schafer J, et al. *Astrobiology*, 2005, 5: 372
- [99] Lederberg J. *Nature*, 1965, 207: 9
- [100] Lovelock J E. *Nature*, 1965, 207: 568
- [101] Zahnle K, Haberle R M, Catling D C, et al. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 2008, 113: 11004
- [102] Tian F, France K, Linsky J L, et al. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 385: 22
- [103] Li T, Tian F. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2012, 8(S293): 39
- [104] Seager S, Bains W, Hu R. *ApJ*, 2013, 777: 95
- [105] Seager S. *PNAS*, 2014, 111: 12634
- [106] Lin H W, Abad G G, Loeb A. *ApJ*, 2014, 792: L7
- [107] Kopparapu R, Ramirez R K, SchottelKotte J, et al. *ApJ*, 2014, 787: L29
- [108] 田丰. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43: 2099
- [109] Kipping D M, Forgan D, Hartman J, et al. *ApJ*, 2013, 777: 134
- [110] Anglada-Escudé G, Tuomi M, Gerlach E, et al. *A&A*, 2013, 556: 126
- [111] Robertson P, Mahadevan S, Endl M, et al. *Science*, 2014, 345: 440
- [112] Ji J H, Jin S. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2012, 8: 238
- [113] Lissauer J, Dawson R I, Tremaine S. *Nature*, 2014, 513: 336
- [114] Knutson H A, Howard A W, Isaacson H. *ApJ*, 2010, 720: 1569
- [115] Seager S, Deming D. *A&A*, 2010, 48: 631
- [116] Sing D K, López-Morales M. *A&A*, 2009, 493: L31



- [117] Croll B, Albert L, Lafreniere D, et al. ApJ, 2010, 717: 1084  
[118] Bean J L, Desert J M, Seifahrt A, et al. ApJ, 2013, 771: 108  
[119] Pepe F, Ehrenreich D, Meyer M R. Nature, 2014, 513: 358

## Current Investigations on Exoplanetary Atmospheres

TIAN Lei<sup>1,2</sup>, JI Jiang-hui<sup>1,3</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The ultimate goal for detecting exoplanets is to search for extraterrestrial life and habitable terrestrial planets. The exoplanetary atmosphere acts as a good window to understand exoplanet's characteristics and habitability. Hence, such investigation is one of the most significant frontiers in astronomy. In the last decade, tremendous achievements have been made on the theories of the exoplanetary atmosphere, and observations through photometric and spectroscopic methods using a variety of space-borne and ground-based observational facilities. However, currently the atmosphere observations mainly come from transiting hot Jupiters, super-Earths and direct imaging giant planets, because of limitation in current observational techniques.

The present review attempts to succinctly summarize current investigations in this field. First, we briefly describe the methods of observing exoplanetary atmospheres. Next, we review the fundamental facts, nowadays research progress of atmospheres for hot Jupiters and super-Earths. Finally, we present an introduction of the projects, which are involved in exoplanetary atmosphere detection to show the bright prospects for future investigation.

**Key words:** exoplanetary atmosphere; atmospheric model; habitable planets