

TIAN Feng, HU Xiong, WU Ji. Research progress and prospect of exoplanetary atmospheres and habitable exoplanet sciences (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(6): 815-827. DOI:10.11728/cjss2016.06.815

系外行星大气与宜居系外行星 研究进展及发展趋势^{*}

田 丰^{1,2} 胡 雄³ 吴 季³

1(清华大学地球系统科学研究中心 地球系统数值模拟教育部重点实验室 北京 100084)

2(全球变化研究联合中心 北京 100875)

3(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘 要 探测系外行星的主要目的是研究生命和可供地球生命生存的行星是否普遍存在这一基本科学问题. 近 20 年来已有超过 3000 颗系外行星被发现, 还有几千颗候选系外行星有待确认, 其中疑似宜居系外行星的数量近 20 颗. 未来十年疑似宜居系外行星的数目将大为增加. 尽管目前对宜居系外行星大气观测的能力和科学结果还很有限, 但可以预期未来 20 年对这一类行星大气的观测将成为行星科学研究的重要领域. 本文根据当前系外行星大气科学发展的状态和主要科学问题, 在对中国未来系外行星科学发展方向进行分析的基础上, 提出一种比较可行的建议, 即在近 1~2 年内有针对性地开展系外行星大气普查和系外行星高层大气观测的可行性论证和预研, 并在 5~10 年内择一予以实施.

关键词 系外行星, 行星大气, 宜居性, 生命信号

中图分类号 P 17

Research Progress and Prospect of Exoplanetary Atmospheres and Habitable Exoplanet Sciences

TIAN Feng^{1,2} HU Xiong³ WU Ji³

1(Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Center for Earth System Science,
Tsinghua University, Beijing 100084)

2(Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875)

3(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The most fundamental question driving the search and characterization of exoplanets is whether life and habitable planets are ubiquitous. More than 3000 exoplanets have been discovered since 1995, about 20 of which are potentially habitable and this number could be increased dramatically in the next decade. Observation of the atmospheres of potentially habitable exoplanets

* 国家自然科学基金项目 (41175039/D0504), 教育部留学回国人员启动基金项目和清华大学自主研究计划项目共同资助

2016-02-01 收到原稿, 2016-03-15 收到修定稿

E-mail: tianfengco@mail.tsinghua.edu.cn

is becoming the hot spot in planetary sciences. In this review we summarize the research progress regarding exoplanetary atmospheres and propose a practical roadmap, the implementation of which could accelerate the development of exoplanetary sciences in China in the near future.

Key words Exoplanets, Planetary Atmosphere, Habitability, Biosignature

0 引言

行星科学的终极科学目标是发现和理解太阳系与太阳系外行星、卫星及其他小天体的本质、起源和演化规律,探测地球以外可能存在的生命迹象^[1],在此科学目标的推动下,各国开展了一系列太阳系和系外行星探测的相关研究.近年来对火星等太阳系行星的探测不断深入,距离确切回答生命和适宜生命环境在地球以外是否存在这样一个基本科学问题已经愈来愈近.

就宜居系外行星研究而言,人类正处于一个崭新历史时期的开端:在这个时期之前因为科学和观测技术水平的限制没有可能发现宜居系外行星和可能的系外生命;在这个时期之后进入这一研究领域的科学家们可能会很沮丧地发现太阳系周边的宜居行星和可能的系外生命已被前人发现,而探寻更遥远的宜居世界需要付出的代价可能远远超出当时人类所愿意负担的范围.因此开展宜居系外行星的相关研究不仅要考虑到其巨大的科学意义和技术难度,还要充分考虑国际科学界的竞争和时间因素.

从生命和适宜生命的环境在地外是否存在这个基本问题出发可以引申出以下几个重大科学问题,即系外行星是否存在,何种系外行星宜居,宜居系外行星的位置,宜居系外行星上是否有生命.20年来的系外行星发现,充分证明了系外行星的普遍存在性.确认发现的系外行星总数超过2000颗,其中绝大多数环境和性质与地球截然不同^[2].到目前为止发现系外行星的主要方法有视向速度法(Radial Velocity, RV)、掩星法(Transit)和微引力透镜法(Microlensing)等.视向速度法^[3]通过观测行星对恒星速度的引力扰动所引起的恒星光谱多普勒效应来发现系外行星,是最早发现系外行星的方法,这种方法对质量大并且距离恒星近的系外行星更有效,但是利用这种方法只能得到行星质量的下限,而不能获得行星轨道的全部参数.掩星法^[4]通过观测行星经过恒星与观测者之间(掩星事件)造成的恒星光度降低来发现

系外行星,是目前发现系外行星最多的方法,这种方法对体积大并且距离恒星近的系外行星更有效,缺点是对任一观测者来说能发生掩星事件的行星系统数目比较有限.微引力透镜法^[5-6]通过观测行星对背景天体光线所造成的引力透镜效应来发现系外行星,利用这种方法能够较好地反映系外行星的统计规律,缺点是难以对其所发现的系外行星进行进一步观测.近年来一些新的探测方法不断推出,2013年投入运作的阿塔卡玛毫米/亚毫米波阵列望远镜(ALMA)能够通过观测原行星盘的结构来反演行星的存在.直接成像法可以将行星及其恒星分别成像^[7],目前利用此方法所发现的系外行星数目有限,而且全部是大轨道距离的类木行星.天体测量法通过观测行星对恒星位置在天球上投影的引力扰动来发现系外行星,目前尚无利用此方法发现的系外行星,ESA的GAIA^[8]和中国正在预研中的STEP计划属于此方法.此外发现系外行星的方法还有脉冲星计时法和光学干涉法等.

行星宜居性目前是系外行星研究的热点问题之一.宜居性反映了环境对生命多样性、生产率和空间覆盖率的支持程度.目前研究已充分意识到^[9]:迄今为止地球是所知的唯一存在生命的天体,关于行星宜居性的研究在很大程度上依赖于地球生命的研究;液态水(海洋)的存在是地球生命的必要条件,而非充分条件;没有影响行星表面环境的系外生命无法通过遥感方法探测;宜居行星的适当定义提供了理解系外行星生命迹象或缺乏生命迹象的前提.可以看出,目前相关研究只对地球生命的新陈代谢活动有所了解,对太阳系内或系外可能存在于地外生命天体的研究仍然主要关注的是适宜液态水在行星表面存在的环境^[10-15].

太阳系行星可以分为类地行星、类木行星和冰行星三类,观测到的系外行星依据半径、轨道半长轴和母星金属丰度也有大致对应的三类^[16].根据行星大气和海洋演化理论,通常认为,液态水在类地行星(定义为主要成分是金属和岩石的行星)表面的长

期稳定存在与行星本身的质量及其从母星得到的辐射密切相关, 因此目前对宜居系外行星的通行定义是质量和从其母星得到的辐射都与地球接近的行星. 但由于这样的定义是从理论得出的, 尚未得到系外行星观测的证实, 有时把这样的行星称为疑似宜居系外行星 (potentially habitable exoplanets).

行星的外部特征包括行星的轨道参数、行星质量、半径、密度以及同一行星系统中不同行星之间的关系等, 这些特征可以通过系外行星的发现及后续观测获得^[17]. 系外行星的发现和外部特征描述有助于确定疑似宜居系外行星的位置, 但是认证这些行星的宜居性需要认识行星的内部特征, 例如行星的内部结构和成分、表面圈层 (大气、海洋、岩石圈等) 的成分、物理、化学和动力学状态等. 系外行星的内部结构不能直接观测, 但可以在得到外部特征后结合理论模式工具获得. 观测系外行星表面的海陆分布需要巨型望远镜以提高空间分辨率^[18], 由于技术水平的限制使未来 10~20 年内的系外行星表面圈层特征描述等同于大气观测, 因此系外行星大气、行星宜居性和生命信号的研究将得到极大推进. 本文根据当前系外行星大气科学研究进展, 通过对行星宜居性和生命信号等相关科学问题的分析, 就中国未来有可能开展的观测项目发展方向提出了建议.

1 系外行星大气观测与理论研究

1.1 系外行星的发现

美国航空航天局 (NASA) 2009 年发射的开普勒卫星通过掩星观测法在 2014 年正式确认发现了约 1000 颗系外行星. 系外行星的普遍存在已被广泛认同, 但确认发现的疑似宜居系外行星很少. 尽管较多开普勒系外行星候选体符合疑似宜居系外行星的条件, 但因为开普勒系外行星大多距离较远, 无法确认其存在, 因此截至 2015 年 9 月疑似宜居系外行星数目仅约 20 颗. 这些疑似宜居系外行星按距离归纳列于表 1 (同时列出了太阳系的 4 颗类地行星). 在本文初稿截稿后又发现了比邻星宜居带内的类地行星, 这一发现将可能极大地加速国际科学界观测系外行星大气的研究步伐^[19].

美国和欧洲都已计划发射空间科学卫星来进一步发现疑似宜居系外行星 (见表 2). NASA 一方面计划利用现有的开普勒卫星在黄道面搜寻轨道周期

小于 27 天的系外行星, 另一方面准备在 2017 年发射 TESS 卫星^[20] 在全天搜索亮星周围的轨道周期小于 10 天的系外行星 (TESS 在 < 2% 的天区可以探测到轨道周期小于 100 天的系外行星). 这两个项目与地基系外行星搜寻项目一起, 预计将在 2020 年之前发现超过一千颗质量在 1.6 倍地球质量和海王星质量之间的小质量系外行星^[17], 而这些系外行星会为未来系外行星大气观测提供目标. 此外 NASA 已经发射的开普勒卫星现在仍然在轨, 虽然因为陀螺失灵问题不能长时间保持固定指向, 不能用于发现类太阳恒星周围的宜居行星, 但仍然有可能发现红矮星周围的宜居行星, 这一被称为 K-2 的项目正在进行中.

欧洲航空航天局 (ESA) 一方面与瑞士合作计划于 2017 年发射 CHEOPS 卫星^[21], 其主要科学目标有两个: 一是在利用视向速度法已经发现的系外行星系统中发现掩星现象, 从而精确测定其大小和密度; 二是对利用地基掩星观测发现了系外行星的母星进行更高精度的观测, 从而发现其周围的小质量系外行星. CHEOPS 将发现的系外行星也会为未来系外行星大气观测提供目标. 另一方面 ESA 预计将于 2024 年发射 PLATO 2.0 卫星^[17]. 尽管 PLATO 2.0 卫星的探测方法与 TESS 卫星均为掩星方法, 但是 PLATO 2.0 对每个母星的观测时间可以保证发现轨道周期小于 200 天的小质量系外行星, 据预计 PLATO 2.0 可能探测到约 100 颗 G-K 型矮星的疑似宜居系外行星.

根据上述发展计划可以预计, 到 2019 年太阳系周围红矮星的疑似宜居系外行星的搜寻将基本完成 (TESS), 到 2028 年太阳质量恒星周围的疑似宜居系外行星也将可能被发现 (PLATO 2.0).

1.2 系外行星大气研究

关于类木系外行星的大气观测和理论研究中国近期已有综合分析^[22], 下面仅提供比较概括的描述.

1995 年首颗主序星周围的系外行星^[3] 被发现后, 由于早期发现的系外行星都是热木星, 太阳系类木行星大气的模式被用来研究热木星在强烈恒星辐射下的温度、压强、环流和高层大气^[23-25], 此外还开展了系外行星的光度相位曲线和透射谱的计算^[26-28]. 由于太阳与地球亮度比在可见光和中红外波段分别为 10^{10} 和 10^9 , 太阳与木星亮度比在可见光和中红外波段分别为 10^9 和 10^7 , 迄今为止直接成像技术仅局限于距主星很远的年轻类木行星^[7], 未来

表 1 已发现的疑似宜居系外行星和太阳系类地行星

Table 1 Potentially habitable exoplanets and terrestrial planets in the solar system

行星名	距离/光年	质量/ M_e	半径/ R_e	恒星类型	表面温度分类	发现状态	发现时间
Venus	—	0.815	—	G	热	—	—
Mercury	—	0.055	—	G	不宜居	—	—
Mars	—	0.107	—	G	寒冷	—	—
Earth	—	1	1	G	适中	—	—
Tau Ceti e	11.9	4.3	—	G	热	未确认	2012
Kapteyn b	12.7	4.8	—	M	寒冷	确认存在	2014
Gliese 832 c	16.1	5.4	—	M	适中	确认存在	2014
Gliese 682 c	16.6	4.4	—	M	寒冷	未确认	2014
Gliese 581 g	20.2	—	—	M	适中	可疑	2010
Gliese 581 d	20.2	6	—	M	寒冷	未确认	2007
Gliese 667 Cc	23.6	4	—	M	适中	确认存在	2011
Gliese 667 Cf	23.6	3	—	M	适中	可疑	2013
Gliese 667 Ce	23.6	3	—	M	寒冷	可疑	2013
Gliese 180 c	39.5	6	—	M	适中	未确认	2014
Gliese 180 b	39.5	8	—	M	热	未确认	2014
Gliese 422 b	41.3	10	—	M	适中	未确认	2014
HD 40307 g	41.7	8.2	2.4	K	适中	确认存在	2012
Gliese 163 c	48.9	7	—	M	热	确认存在	2012
Kepler-438b	470	—	2	M	热	确认存在	2015
Kepler-186f	492	—	0.2	M	寒冷	确认存在	2014
Kepler-22b	619.4	—	5	G	适中	确认存在	2011
Kepler-440b	706.5	—	4	K	热	确认存在	2015
Kepler-174d	878.3	—	0.5	K	寒冷	确认存在	2011
Kepler-61b	1062.8	—	4	M	热	确认存在	2013
Kepler-296f	1089.6	—	1.8	M	寒冷	确认存在	2011
Kepler-62e	1199.7	—	3	K	适中	确认存在	2013
Kepler-62f	1199.7	—	3	K	寒冷	确认存在	2013
Kepler-442b	1291.6	—	3	K	适中	确认存在	2015
Kepler-436b	1339.4	—	6	M	适中	确认存在	2015
Kepler-452b	1402.5	—	3	G	适中	确认存在	2015
Kepler-283c	1496.8	—	4	K	适中	确认存在	2011
Kepler-439b	1914.8	—	4	G	热	确认存在	2015
Kepler-443b	2564.4	—	5	K	适中	确认存在	2015
Kepler-298d	1545	—	5	K	热	确认存在	2012

注 M_e 为地球质量, R_e 为地球半径.

表 2 实施中的主要国际系外行星空间探测计划

Table 2 Exoplanet space missions in implementation

项目名称	主要科学目标	发射时间	项目单位
K-2	发现红矮星周围的疑似宜居行星	在轨	NASA
CHEOPS	在利用视向速度法已经发现的系外行星系统中发现掩星现象, 从而精确测定其大小和密度; 对用地基掩星观测发现了系外行星的母星进行更高精度的观测, 从而发现其周围的小质量系外行星	2017 年	瑞士与 ESA 合作
TESS	发现红矮星周围的疑似宜居行星, 发现小质量系外行星	2018 年	NASA
PLATO 2.0	发现 G-K 型矮星周围的疑似宜居行星	2024 年	ESA

直接成像技术将有可能用于红矮星宜居带内的类地行星大气观测^[29-30]。

真正的系外行星大气观测直到系外行星掩星现象发现后^[4]才快速开展起来。当系外行星运行到观测者与恒星之间时将发生掩星, 这时恒星光穿过行星大气的程度依赖于大气成分在不同波段的吸收特性, 因此对透射光谱数据的反演能够给出行星晨昏线附近大气成分和结构的信息^[22-23]。当行星处于恒星背后时, 次蚀发生。通过比较次蚀发生时与次蚀前后的观测数据可以得到行星反射谱和热发射谱, 根据这些谱能够得到类木和类冰系外行星的反射率以及其昼面的温度分布^[31-32]。

至今已探测了 50 颗左右热木星和超级地球系外行星的大气^[33], 目前探测到的系外行星大气温度在 600~3000 K 范围内, 确认存在的大气成分只有水气^[34]、一氧化碳^[35]、钠/钾^[4,36-38]和碳、氧、硅、镁的离子, 其他理论上应该存在的成分, 例如氨、甲烷、二氧化碳、氢氰酸、硫化氢、乙炔、乙烯、氧气、臭氧和氮氧化物等或者没有被观测到, 或者有观测^[39-47]但因光谱质量不尽人意以及大气反演模式的不确定性而不能确定其存在^[33]。

有关类地系外行星大气、气候与系外行星宜居性的研究^[12]近年来出现了一些新的进展。一维模式发现行星宜居带的边界与行星质量的关系较弱^[14], 三维模式中的动力学和云反馈机制, 使得太阳类型恒星周围的类地行星进入失控温室效应所对应的恒星辐射量比原先一维模式得到的计算结果更高^[11], 随后的三维大气环流模式计算发现, 在太阳辐射增高 19% 的情形下地球水逃逸仍然较慢^[48]。

受观测技术限制, 目前对已经发现的小质量系外行星是否为类地行星以及是否有海洋和大气以及是

否有生命信号尚无定论。下一代大口径 (30 m 级) 地基望远镜 (E-ELT, TMT, GMT) 预计将在 2020 年后陆续投入使用, 这些望远镜将对太阳附近的超级地球直接成像, 并将使得研究更多系外行星的大气透射光谱成为可能, 甚至有研究讨论能否利用这些设备在可见光波段探测红矮星疑似宜居行星大气中的氧气含量。NASA 预计在 2018 年发射新一代空间望远镜 JWST (波长范围 0.6~28 μm), 其将具备对类木系外行星和质量稍小于海王星的系外行星进行内部特征描述的能力, 有个别研究认为 JWST 对红矮星周围的近距离地球质量行星也有大气成分探测能力。

1.3 中国系外行星大气观测与理论研究

中国对于系外行星的发现起步较晚, 发展较慢, 迄今仅发现了不多的类木系外行星^[49], 目前正在利用国际大口径地基望远镜的观测阶段进行针对类木系外行星大气方面的研究^[50-52]。在系外行星生命信号探测技术领域开展了一系列通过利用超级自适应光学系统和高对比度星冕仪提高成像对比度的研究^[53]。

对于宜居系外行星的大气、化学和气候理论研究进行了探索^[54-55]。红矮星周围的类地行星因为潮汐锁定的原因可能一面永远面向恒星, 三维大气环流模式计算^[13]发现这类行星的星下点附近随着恒星辐射的增强而出现大量云, 从而增高行星反射率, 导致行星的水逃逸在辐射比地球水平增高很多的情形下仍然不会过快。这类行星的海洋能量传输能够有效暖化其阴影面并避免行星大气在阴影面凝结, 因而有利于行星保持宜居状态^[56]。由于处于红矮星宜居带的类地行星不一定处于公转与自转周期比为 1 的状态, 致使这类行星的气候态有“眼球”和“带状”两种^[57], 未来的观测有可能区分这两种气候模

态. 发现红矮星周围类地行星大气中二氧化碳光解产生氧气的过程远快于太阳类型恒星周围类地行星大气中的类似过程, 因此即使没有生命也有可能累积氧气^[58]. 红矮星的早期演化会造成其周围类地行星的水和氧气含量呈两极化分布^[15,59-60], 可能对行星宜居性产生影响. 另外, 对于系外类地行星高层大气动力学和大气逃逸的研究取得了一定进展^[61-68], 有关系外行星生命信号的探测研究已经起步^[69-71].

2 系外行星大气研究面临的主要问题

2.1 次蚀观测大气成分的不确定性

利用 Spitzer 空间望远镜对 TrES-1 b, HD 209458b 和 HD 189733b 的次蚀进行观测^[72-74]. 热木星表面高温使其自身热辐射与反射恒星光的光谱在一定程度上难以区分, 增加了从次蚀观测导出行星大气信息的难度^[33]. 但是宜居行星的表面温度低, 发射谱与反射谱的峰值是错开的, 因此没有这一问题. 此外, 次蚀观测的系统误差会对推导大气成分、大气温度结构或动力学特征造成很大影响. 利用 Spitzer 在 $6.2\ \mu\text{m}$ 波段对 HD 189733b 进行次蚀观测得到了其大气中有水汽的结论^[75], 但大气反演模式较大的不确定性导致通过次蚀发射谱在其他系外行星大气中发现水汽和其他成分的努力受到影响^[76].

2.2 系外行星亮度的相位变化

在行星轨道不同位置观测恒星和行星可以得到行星亮度的相位曲线进而得到大气环流和能量再分配的信息^[77-78]. Spitzer 空间望远镜在 $8\ \mu\text{m}$ 波段观测得到 HD 189733b 的相位曲线, 并且推导了行星大气粗略的温度分布^[79]. 观测导出的温度分布(最热点与星下点的关系)与模式计算结果^[80]在趋势上一致, 但具体细节不同. 随后 Spitzer 空间望远镜在 3.6 和 $4.5\ \mu\text{m}$ 波段观测得到 HD 189733b 更精细的温度分布^[81-82]. 对 HD 149026b, HAT-P-2b 和 WASP-12b 也开展了类似的观测^[83-86]. 因为距离较近, 2006 年就利用 Spitzer 对非掩星系外行星 Andromedae b 进行了发射谱观测^[87], 在 Spitzer 空间望远镜 $24\ \mu\text{m}$ 波段观测导出的温度分布图中最热点偏离星下点 80° ^[88], 目前尚无合理解释.

2.3 类木和类冰行星大气成分、结构与气溶胶

HD 209458b, HD 189733b, WASP-17b 等热木星中均存在钠^[2,38-39,89-90], 而在 XO-2b 大气中探

测到了钾^[36], 由钠吸收线的压致增宽效应还可推出大气的温度和压强结构^[91], 但观测到的钠和钾的大气含量明显少于理论预期. 有三种可能的解释: 这些行星缺乏钠和钾; 行星大气中的钠和钾因为强恒星辐射处于电离态; 钠和钾的谱特征被气溶胶掩盖. 气溶胶存在于 HD 189733b 大气中的最有力观测证据是多波段掩星观测^[37-38], 这些观测没有发现除钠和水汽之外其他分子存在的迹象. HD 189733b 的次蚀发射谱^[75]缺乏气溶胶粒子的吸收特征, 这可能是由于气溶胶粒子的散射所致. Spitzer, HST 和地基望远镜观测超级地球 GJ 1214b 得到的透射谱比较平滑^[92-94], 可能的原因是 GJ 1214b 的大气主要由氢气组成但含有气溶胶, 因此其他气体的吸收特征被掩盖, 也可能是由于 GJ 1214b 大气的平均分子量较大, 大气标高较小, 因而其透射谱特征较弱^[93,95]. 最近高信噪比的 HST WFC3 观测数据未显示水汽在 1.15 和 $1.4\ \mu\text{m}$ 波段的吸收特征^[96], 这在一定程度上支持了 GJ 1214b 大气包含有氢气及气溶胶成分. 气溶胶还有可能在 GJ 436b, HD 209458b 和 XO-1b 的大气中存在^[97-98]. 需要指出的是, 水汽 $1.4\ \mu\text{m}$ 波段的特征在 HD 209458b 和 XO-1b 的掩星光谱中存在, 但是其 $1.15\ \mu\text{m}$ 的吸收特征却未观测到^[98]. 如果气溶胶的吸收或散射是随波长变化的, 这一观测可以得到解释. 但是最近对土卫六大气的观测表明, 气溶胶对系外行星观测的影响比原先考虑的更为复杂^[99], 因此可能需要重新考虑对上述观测事实的理论解释.

逆温层是在大气中温度随高度上升而升高的现象区域, 地球的平流层和热层都是如此, 但成因不同. HD 209458b 和 TrES-4b 透射谱观测显示, 这些行星大气中存在逆温层^[100-101]. 地球大气逆温层的存在是因为有臭氧, 但这些行星都是类木行星, 大气不应该有臭氧. 有研究认为, 这些行星大气中的逆温层可能与 TiO 和 VO 或气溶胶等可见光与紫外波段的强吸收物有关^[100,102-104], 但对这些吸收物的性质还不了解.

2.4 系外行星高层大气

热木星 HD 209458b 的氢原子包层和行星风均是通过哈勃空间望远镜 (HST) 的紫外观测发现的^[105], 随后在 HD 189733b^[106], WASP-12b^[107] 和 GJ 436b^[108-109] 上也发现了行星风. 据估计 WASP-12b 的行星风可以在 10 亿年的时间尺度里使这颗行星完全蒸发^[110], 而 HD 209458b 的行星

风则不会导致行星质量的明显变化^[109,111-112]。强烈的行星风应该能够携带较重的元素到距行星较远的地方,而在上述热木星周围氢包层中也确实是在紫外波段观测到了这些元素^[107,113-114]。根据观测数据还可以模拟 HD 209458b 的行星风和磁场与恒星风的相互作用^[115-116]。系外行星高层大气的观测、Kepler 发现的多行星系统和大量系外行星统计数据对研究大气逃逸起到了促进作用,近年来的模式工作逐渐增多^[66]。尽管如此,目前模式中包含的大气成分也以氢气为主的居多。构建类地系外行星高层大气模式以研究系外行星宜居性和太阳系类地行星的演化所面临的主要问题有:如何较准确计算在较高恒星辐射环境下的类地行星高层大气的加热率和冷却率;如何较准确地计算次级电子和离子在行星高层大气中的运动、碰撞和能量转化;行星内禀磁场是如何影响行星高层大气中带电粒子的;大气成分如何影响行星大气逃逸;行星高层大气的三维模拟。

2.5 系外类地行星的大气、气候与宜居性

在理论和模式方面分析系外类地行星大气和气候,目前的研究多针对较小偏心率和轨道倾角的情况,当这些轨道参数偏离理想情形时系外类地行星的气候如何响应是一些正在进行的重点。此外,有关大气化学-气候的耦合模拟尚未充分展开。目前非常缺乏系外类地行星大气的观测数据,此情况有望在 3~5 年内通过 JWST 和地基望远镜对 TESS 卫星所发现的掩星系外类地行星(非宜居行星)的观测得到一定程度缓解,这些观测也很有可能提供行星宜居性的新信息。对除 Proxima Centauri b 之外的宜居行星大气的观测尚需等待 10 年以上的时间。

虽然 NASA 最近飞越冥王星的 New Horizon 探测器对冥王星高层大气的掩星观测也能增进对行星高层大气逃逸的理解,但只有对系外行星的观测才能够反映快速大气逃逸现象的实际情况。2017 年 TESS 卫星发射后将会发现一大批已经经历过或者正处于大气快速逃逸过程中的系外类地行星,观测相关的高层大气对于系外行星宜居性的研究将具有非常重要的意义。

3 宜居系外行星和生命信号探测

近年来行星宜居性和地外生命问题越来越受到关注。解决这些问题要求跨学科综合研究能力和大

量覆盖不同空间和时间尺度的信息,以增进对宜居行星和环境的形成和演化过程、影响行星宜居性的参数及在何种参数范围内宜居行星能够存在等问题的理解。发展新的研究工具以分析太阳系内天体当前或过去曾经存在的宜居环境,将不仅有助于选择未来太阳系探测的目标,还有助于选择最有价值的疑似宜居系外行星观测目标。未来 10~20 年在宜居系外行星和生命信号探测领域将重点开展以下方面的科学研究。

(1) 什么样的行星为宜居行星

理论上解答这个问题需要理解决定行星宜居性关键的内部和外部要素是什么。内部要素方面需要研究行星的质量、物质组成等基本参数如何通过影响行星的形成、早期(热)演化、生命所需关键元素和矿物在行星内的总量、分布和地球化学、板块构造等过程来影响行星宜居性。在外部要素方面,原行星盘的物质构成、分布、氧化还原态和总质量等能够在很大程度上影响行星的形成和早期演化。恒星的特性及演化能够影响行星表面圈层(水圈、大气圈、岩石圈、气候等)的稳定性及这些圈层之间的相互作用。行星系统的轨道动力学演化不仅能够影响行星的轨道参数(半长轴、偏心率、轨道倾角等),从而影响行星的气候态,还能改变行星遭受小行星撞击的频率和质量分布。

类木系外行星周围可能存在地球质量范围的卫星,如果类木系外行星处于宜居带的话,这些卫星的宜居性及其演化也是值得研究的。另外,行星系统所处的环境也可能影响其宜居性。靠近银河系核的区域更可能发生恒星之间的交汇,从而影响行星的轨道稳定性;远离银河系核的区域金属丰度可能较低,从而减少了行星上碳、氮、氧等元素的总量并影响到行星宜居性。

这些理论工作一方面将指导未来 10~20 年的宜居系外行星探测,明确概略的目标搜寻区域才能够有目的地设计并实施探测方案;另一方面,未来宜居系外行星探测和大气观测将为理解行星的宜居性提供验证。这涉及到如何确认行星的宜居性。如上所述,地球生命是目前唯一为人类所知的生命,而地球生命依赖于地球表面的水,因此目前系外行星宜居性等同于系外行星表面存在液态水的可能性,所以在系外行星大气中观测水汽和直接观测系外行星表面的海洋成为确认系外行星宜居性的关键。近年来的研究表

明,类地行星上有过多的水并不一定有利于生命的起源和发展。

(2) 系外行星生命的搜寻

在发现了疑似宜居系外行星并通过观测其大气中的水汽确认宜居性之后,这些行星上是否有生命存在将是重点科学问题。在发现其他生命形式并理解其新陈代谢机制之前只能局限于对类似地球生命的搜寻。理论上需要理解影响宜居系外行星生命信号的形成、保存和销毁的过程以及探测方法。从发射到太阳系的探测器上观测地球,最明显的生命特征是无无线电信号、夜晚的灯光、地球陆地植被反射谱中叶绿素的谱特征、大气中处于化学不平衡的氧气和甲烷以及包括氧化亚氮在内的一些由生物产生的痕量气体。这些地球生命信号中的前两种不仅说明地球上存在生命,而且反映出地球上存在智慧生命的信息。但观测位于几光年外的系外行星上夜晚的灯光在可见的未来不可能,而探测系外智慧生命所发出的无线电信号已经进行了几十年(SETI),中国即将建成的FAST大型射电望远镜也有类似探测计划。叶绿素的谱特征很大程度上依赖于有光合作用对太阳光的吸收,系外行星上发生的生命是否也产生同样的吸收光谱是值得探讨的问题。

其余的生命信号都在行星大气中,因此研究行星大气在不同外部和内部条件下可能出现的化学成分对系外行星生命信号探测而言是重要的。具体地说,在无生命过程介入的情况下能够在行星大气中出现的氧气、甲烷、氧化亚氮等气体有可能构成伪生命信号,这方面的研究正在逐步深入。

与系外行星生命信号探测相关的还有两个问题。一是行星系统的外部环境可能对行星上的生命起源和演化过程具有一定影响。靠近银河系核的区域有较频繁的超新星爆发,这一区域的行星可能更频繁地经历生物灭绝事件;远离银河系核的区域金属丰度可能较低,由于碳、氮、氧、硫、磷等元素对地球生命是不可或缺的,这些区域的生命起源和演化过程可能与地球不同。二是如何在恒星-行星光度比悬殊的条件下获得行星光谱并通过分析得到行星大气中生命信号的特征。就目前国际科学研究的动态来分析,对太阳系附近比较明亮的恒星周围宜居行星生命信号的探测可能在2035—2040年通过发射大型空间望远镜取得重要进展。

4 系外行星大气观测的未来发展

系外行星大气研究是国际基础科学前沿。从2018年起国际上将开展利用JWST对部分类木和类冰系外行星的大气进行观测,对掩星系外行星通过红外波段观测发现大气成分、温度结构和气溶胶的物理性质将成为可能。因此有关低层大气科学问题(第2节内容)将会取得较大研究进展,中国将利用国际大口径地基望远镜的观测时间获取经验,为未来利用30m级地基望远镜观测系外行星大气做准备。

另外,JWST空间望远镜用于系外行星的观测时间尚不确定,有可能无法对大量类木和类冰系外行星的大气进行观测,这表明即使能够对某些个别系外行星的大气有所了解,但并不能做到全面系统。针对这个问题,国际上提出了ECHO/ARIEL空间望远镜计划,以降低光谱分辨率为代价而得到上百颗类木和类冰系外行星的大气普查信息。这一计划是否能得到立项还有待ESA的决定。

目前绝大多数确认存在的疑似宜居系外行星是Kepler行星(包括Kepler 452b^[117]),其距离在500~1500光年之间。对于这些目标,很难通过未来的观测得到其大气信息,因此其宜居性难以证实或证伪。TESS项目所能够发现的疑似宜居行星主要在红矮星周围,目前关于这些行星的宜居性还有较大争议^[55-56,65,118-120]。近期观测到的掩红矮星超级地球GJ 1132b^[121]进一步证明太阳附近(30 pc以内)存在相当数量的近地类地行星,对这一类行星高层大气的观测将能促进行星宜居性这一科学问题的突破性发展。由于JWST空间望远镜没有紫外波段,而有紫外波段的HST服役期将近,对太阳附近系外行星高层大气的观测能力在HST退役后将可能出现一个空白期。

因此,中国最近10年有机会在系外行星大气普查和系外行星高层大气观测这两个方向有所突破并取得国际领先地位。如果ESA选择ARIEL空间望远镜计划,中国应该以系外行星高层大气观测作为核心科学目标,与国际已有的和将要开展的K-2, CHEOPS, TESS, PLATO 2.0, ARIEL等项目形成很好的互补关系。如果ARIEL计划不能实施,系外行星大气普查和系外行星高层大气观测仍然可以作为中国系外行星大气观测的近期核心科学目标,具体选

择方向需要依据技术成熟程度而定。

在更长的时间尺度上, 宜居系外行星和生命信号探测必然是国际系外行星科学研究的重点。太阳质量恒星疑似宜居系外行星的大量发现最早将由 PLATO 2.0 在 2028 年左右完成, 届时利用地基 30 m 级望远镜对类太阳恒星疑似宜居行星大气的观测研究将逐步开展。地基望远镜具有集光面积大与容易维护等优势, 但即使能够通过主动光学技术克服地球大气扰动, 由于系外行星宜居性的确认和系外生命信号探测所针对的大气成分与地球大气成分相似, 利用地基望远镜开展相关观测仍可能有一定限制。为了研究宜居行星大气, 国际上已经提出两个可能的空间望远镜概念: 一是专门的宜居行星观测者 (HABEX), 二是多用途大型空间望远镜 (HDST)。两个项目的预期实现时间都是 2035—2040 年, 这为中国宜居系外行星大气观测和生命信号研究达到并领先国际水平提供了时间条件。

2013 年列入空间科学先导专项背景型号任务的系外类地行星探测计划 (STEP) 提出对太阳附近的类太阳恒星进行高精度天体测量普查, 从而达到发现疑似宜居行星和了解行星系统构成的目标。这一具有重大科学意义的计划目前正在开展实验室论证。如果 STEP 项目成功, 宜居系外行星大气观测的空间项目将以 TESS, PLATO 2.0 和 STEP 所发现的宜居系外行星为目标。可以预计国际上对除 Proxima Centauri b 之外的宜居系外行星大气观测将于 20 年后开展, 因此中国可以利用这段时间发展 STEP 计划。另一方面, 在 10 年内开展不依赖于 STEP 计划的系外行星大气普查或系外行星高层大气项目作为近期 (10 年内) 中国系外行星大气项目的核心科学目标, 将有助于推动中国系外行星科学在近期实现跨越式发展。

国际空间天文计划中任何大的成功项目都要提前 20 年左右提出概念并开展预研, 逐步完成从小到大, 从简单到复杂的积累和转变。从这个角度分析, 在 1~2 年内积极开展系外行星大气普查和系外行星高层大气观测的可行性论证和预研, 并且在 5~10 年内择一予以实施是中国在宜居系外行星观测领域在 2035 年领先国际水平的必要条件。从可行性方面分析, 这两个研究方向都属于中小型项目, 在中国空间天文先期项目经验的基础上有较大成功实现的可能性, 具体内容需要进行详细的可行性论证和预研。

5 结语

根据当前系外行星大气科学发展的状态和主要科学问题, 从宜居系外行星和系外生命信号探测的角度, 在对系外行星大气科学研究领域近期和长期发展进行分析的基础上, 提出了一种比较可行的发展路线建议, 即利用国际空间天文观测仪器探测尚未启动的时机, 在近 1~2 年内有针对性地开展系外行星大气和高层大气普查以及系外行星高层大气观测的可行性论证和预研, 并在 5~10 年内择一予以实施。这一设计既能够在短期内做出具有国际领先水平的突破性科学贡献, 又能够为长期探测系外行星生命信号的总目标完成科研和技术经验方面的积累。

参考文献

- [1] National Aeronautics and Space Administration. NASA Strategic plan 2014 [OL]. [2016-04-30]. www.nasa.gov/sites/default/files/files/FY2014_NASA_SP_508c.pdf
- [2] Exoplanet team. The Extrasolar Planets Encyclopedia [OL]. [2016-05-31]. <http://www.exoplanet.eu>
- [3] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a Solar-type star [J]. *Nature*, 1995, **378**(6555): 355-359
- [4] CHARBONNEAU D, BROWN T M, NOYES R W, *et al.* Detection of an extrasolar planet atmosphere [J]. *Astrophys. J.*, 2008, **568**(1): 377-384
- [5] MAO S, PACZYNSKI B. Gravitational microlensing by double stars and planetary systems [J]. *Astrophys. J.*, 1991, **374**(2): L37-L40
- [6] GOULD A, LOEB A. Discovering planetary systems through gravitational Microlenses [J]. *Astrophys. J.*, 1992, **396**(1): 104-114
- [7] MAROIS C, MACINTOSH B, BARMAN T, *et al.* Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799 [J]. *Science*, 2008, **322**(5906): 1348-1352
- [8] LIU C, BAILER-JONES C A L, SORDO R, *et al.* The expected performance of stellar parameterization with Gaia spectrophotometry [J]. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 2012, **426**(3): 2463
- [9] SEAGER S, BAINS W. The search for signs of life on exoplanets at the interface of chemistry and planetary science [J]. *Sci. Adv.*, 2015, **1**(2): 1500047
- [10] KASTING J F, WHITMIRE D P, REYNOLDS R T. Habitable zones around main sequence stars [J]. *Icarus*, 1993, **101**(1): 108-128
- [11] LECONTE J, FORGET F, CHARNAY B, *et al.* Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth-like planets [J]. *Nature*. 2013, **504**(7479): 268-271

- [12] HU Yongyun. Atmosphere and climate of extra Solar planets. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2013, **37**(2): 451-446 (胡永云. 太阳系外行星大气与气候[J]. 大气科学, 2013, **37**(2): 451-466)
- [13] YANG J, COWAN N B, ABBOT D S. Stabilizing cloud feedback dramatically expands the habitable zone of tidally locked planets [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2013, **771**(2): 332-341
- [14] KOPPARAPU R K, RAMIREZ R M, SCHOTTELKOTTE J, *et al.* Habitable zones around main-sequence stars: dependence on planetary mass [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2014, **787**(2): 1664-1674
- [15] FENG T, IDA S. Water content of Earth-mass planets around M dwarfs [J]. *Nature Geosci.*, 2015, **8**(3): 177
- [16] BUCHAVE L A, BIZZARRO M, LATHAM D W, *et al.* Three regimes of extrasolar planet radius inferred from host star metallicities [J]. *Nature*, 2014, **509**(7502): 593-595
- [17] RAUER H, CATALA C, AERTS C, *et al.* The PLATO 2.0 mission [J]. *Exp. Astron.*, 2014, **38**(1): 249-330
- [18] COWAN B, AGOL E, MEADOWS V S, *et al.* Alien maps of an ocean-bearing world [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **700**(2): 915-923
- [19] ANGLADA-ESCUDE G, AMADO P J, BARNES J, *et al.* A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri [J]. *Nature*, 2016, **536**: 437. DOI:10.1038/nature19106
- [20] RICKER G R. The transiting exoplanet survey satellite mission [J]. *JAAVSO*, 2014, **42**(1): 234
- [21] BROEG C, FORTIER A, EHRENREICH D, *et al.* CHEOPS: a transit photometry mission for ESA's small mission [J]. *Hot Planets Cool Stars*, 2013, **47**: 03005
- [22] TIAN Lei, JI Jianghui. Current Investigations on Exoplanetary Atmospheres [J]. *Progress Astron.*, 2015, **33**(1): 27-43 (田蕾, 季江徽. 系外行星大气研究现状[J]. 天文学进展, 2015, **33**(1): 27-43)
- [23] ACKERMAN A S, MARLEY M S. Precipitating condensation clouds in substellar atmospheres [J]. *Astrophys. J.*, 2001, **556**(2): 872-884
- [24] SHOWMAN A P, GUILLOT T. Atmospheric circulation and tides of "51 Pegasus b-like" planets [J]. *Astron. Astrophys.*, 2002, **385**(1): 166-180
- [25] CHO J Y, MENOU K, HANSEN B, *et al.* The changing face of the extrasolar giant planet HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2002, **587**(2): L117-L120
- [26] BROWN T M. Transmission spectra as diagnostics of extrasolar giant planet atmospheres [J]. *Astrophys. J.*, 2001, **553**(2): 1006-1026
- [27] HUBBARD W B, FORTNEY J J, LUNINE J I, *et al.* Theory of extrasolar giant planet transits [J]. *Astrophys. J.*, 2001, **560**(1): 413-419
- [28] SEAGER S, SASSELOV D D. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits [J]. *Astrophys. J.*, 1999, **537**(2): 916-921
- [29] EHRENREICH D, TINETTI G, ETANGS A L D, *et al.* The transmission spectrum of Earth-size transiting planets [J]. *Astron. Astrophys.*, 2005, **448**(1): 379-394
- [30] KALTENEGGER L, TRAUB W A, JUCKS K W. Spectral evolution of an Earth-like planet [J]. *Astrophys. J.*, 2006, **658**(1): 598-616
- [31] MARLEY M S, GELINO C, STEPHENS D, *et al.* Reflected spectra and albedos of extrasolar giant planets. I. Clear and cloudy atmospheres [J]. *Astrophys. J.*, 1998, **513**(2): 879-893
- [32] SUDARSKY D, BURROWS A, PINTO P. Albedo and reflection spectra of extrasolar giant planets [J]. *Astrophys. J.*, 2000, **538**(2): 885-903
- [32] BURROWS A S. Highlights in the study of exoplanet atmospheres [J]. *Nature*, 2014, **513**(7518): 345-353
- [34] SING D K, FORTNEY J J, NIKOLOV N, *et al.* A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion [J]. *Nature*, 2015, **529**(7584): 59
- [35] KOK R J D, BROGI M, SNELLEN I A G, *et al.* Detection of carbon monoxide in the high-resolution day-side spectrum of the exoplanet HD 189733b [J]. *Physics*, 2013, **554**(6): 393-403
- [36] SING D K, DESERT J M, FORTNEY J J, *et al.* Gran Telescopio Canarias OSIRIS transiting exoplanet atmospheric survey: detection of potassium in XO-2b from narrowband spectrophotometry [J]. *Astron. Astrophys.*, 2011, **527**(9): 793-797
- [37] PONT F, KNUTSON H A, GILLILAND R L M, *et al.* Detection of atmospheric haze on an extrasolar planet: the 0.55~1.05 μm transmission spectrum of HD 189733b with the Hubble Space Telescope [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2008, **385**(1): 109-118
- [38] PONT F, SING D K, GIBSON N P, *et al.* The prevalence of dust on the exoplanet HD 189733b from Hubble and Spitzer observations [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2012, **432**(4): 2917-2944
- [39] SEAGER S, RICHARDSON L J, HANSEN B M S, *et al.* On the dayside thermal emission of hot jupiters [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **632**(2): 1122-1131
- [40] TINETTI G, VIDAL-MADJAR A, LIANG M C, *et al.* Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet [J]. *Nature*, 2007, **448**(7150): 169-171
- [41] BARMAN T. Identification of absorption features in an extrasolar planet atmosphere [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **661**(2): L191-L194
- [42] SWAIN M R, VASISHT G, TINETTI G, *et al.* Molecular signatures in the near-Infrared dayside spectrum of HD189733b [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2008, **690**(2): L114-L117
- [43] SWAIN M R, TINETTI G, VASISHT G, *et al.* Water, methane, and carbon dioxide present in the dayside spec-

- trum of the exoplanet HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **704**(2): 1511-1516
- [43] MADHUSUDHAN N, SEAGER S. On the inference of thermal inversions in hot Jupiter atmospheres [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **725**(1): 261-274
- [45] MADHUSUDHAN N, HARRINGTON J, STEVENSON K B, *et al.* A high C/O ratio and weak thermal inversion in the atmosphere of exoplanet WASP-12b [J]. *Nature*, 2011, **469**(7328): 64-67
- [46] LEE J M, FLETCHER L N, IRWIN P G J. Optimal estimation retrievals of the atmospheric structure and composition of HD189733b from secondary eclipse spectroscopy [J]. *MNRAS*, 2011, **420**(1): 170-182
- [47] LINE M R, ZHANG X, VAISHT G, *et al.* Information Content of Exoplanetary Transit Spectra: An Initial Look [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **749**(1): 1277-1281
- [48] WOLF E T, TOON O B. The evolution of habitable climates under the brightening Sun [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015, **120**(12): 5775-5794. DOI:10.1002/2015JD-023302.
- [49] LU Yan. Modern Astrophysics [M]. Beijing: Peking University Press, 2014 (陆燾. 现代天体物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014)
- [50] WANG W, BOEKEL R V, MADHUSUDHAN N, *et al.* Ground-based detections of thermal emission from the dense hot Jupiter WASP-43b in H and Ks-bands [J]. *Astrophys. J.*, 2013, **806**(2): 8
- [51] CHEN G, BOEKEL R V, WANG H, *et al.* Broad-band transmission spectrum and K-band thermal emission of WASP-43b as observed from the ground [J]. *Astron. Astrophys.*, 2014, **563**(3): 242-251
- [52] CHEN G, BOEKEL R V, WANG H, *et al.* Observed spectral energy distribution of the thermal emission from the dayside of WASP-46b [J]. *Astron. Astrophys.*, 2014, **567**(2): 196
- [53] DOU Jiangpei, ZHU Yongtian, REN Deqing. Current research status of exoplanets [J]. *Chin. J. Nature*, 2014, **36**(2): 124-128 (窦江培, 朱永田, 任德清. 太阳系外行星的研究现状 [J]. 自然杂志, 2014, **36**(2): 124-128)
- [54] HU Y, DING F. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d [J]. *Astron. Astrophys.*, 2011, **526**: A135
- [55] FENG T. Atmospheric Pressure and CO₂ Concentration of Potential Habitable Planet HD40307g [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2014, **57**(6): 1403-1406
- [56] HU Y, YANG J. Role of ocean heat transport in climates of tidally locked exoplanets around M dwarf stars [J]. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 2013, **111**(2): 629-634
- [57] WANG Y W, TIAN F, HU Yongyun. Climate patterns of habitable exoplanets in eccentric orbits around M dwarfs [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2014, **791**: L12
- [58] TIAN F, FRANCE K, LINSKY J L, *et al.* High stellar FUV/NUV ratio and oxygen contents in the atmospheres of potentially habitable planets [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014, **385**(1): 22-27
- [59] TIAN F. Observations of exoplanets in time-evolving habitable zones of pre-main-sequence M dwarfs [J]. *Icarus*, 2015, **258**: 50-53
- [60] TIAN F. History of water loss and atmospheric O₂ buildup on rocky exoplanets near M dwarfs [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2015, **432**: 126-132
- [61] TIAN F, KASTING J F, LIU H, *et al.* Hydrodynamic planetary thermosphere model: 1. The response of the Earth's thermosphere to extreme solar EUV conditions and the significance of adiabatic cooling [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(E5). DOI: 10.1029/2007JE002946
- [62] TIAN F, S C SOLOMON, L QIAN, *et al.* Hydrodynamic planetary thermosphere model: 2. Coupling of an electron transport/energy deposition model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(E7): 3562-3585
- [63] TIAN F. Atmospheric pressure and CO₂ concentration of potential habitable planet HD40307g [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2014, **57**(6): 1403-1406
- [64] TIAN F. Conservation of total escape from hydrodynamic planetary atmospheres [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, **379**(5): 104-107
- [65] TIAN F. Thermal escape from super Earth atmospheres in the habitable zones of M stars [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **703**(1): 905-909
- [66] TIAN F. Atmosphere escape from solar system terrestrial planets and exoplanets [J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2013, **43**(1): 15.1-15.18
- [67] GUO J H. Escaping particle fluxes in the atmospheres of close-in exoplanets. I. Model of hydrogen [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **733**: 98107
- [68] GUO J H. Escaping particle fluxes in the atmospheres of close-in exoplanets. II. Reduced mass-loss rates and anisotropic winds [J]. *Astrophys. J.*, 2013, **766**(2): 38
- [69] TIAN T L F. Detection of O₂ produced abiotically on habitable but lifeless planets around M-dwarfs [J]. *Proc. Int. Astron. Union*, 2012, **8**(S293): 39-45
- [70] WANG Y W, TIAN F, LI L, *et al.* On the detection of carbon monoxide as an anti-biosignature in exoplanetary atmospheres [J]. *Icarus*, 2015, **266**(12): 15-23
- [71] LI T, TIAN F, WANG Yuwei, *et al.* Distinguishing a hypothetical abiotic planet-moon system from a single inhabited planet [J]. *Astrophys. J.*, 2016, **817**: L15
- [72] CHARBONNEAU D, ALLEN L E, MEGEATH S T, *et al.* Detection of thermal emission from an extrasolar planet [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **626**(1): 523-529
- [73] DEMING D, SEAGER S, *et al.* Infrared radiation from an extrasolar planet [J]. *Nature*, 2005, **434**(7034): 740-743
- [74] GRILLMAIR C J, CHARBONNEAU D, BURROWS A, *et al.* A Spitzer spectrum of the exoplanet HD 189733b [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **658**(2): L115-L118
- [75] GRILLMAIR C J, BURROWS A, CHARBONNEAU D,

- et al.* Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD189733b [J]. *Nature*, 2008, **456**(7223): 767-769
- [76] BURROWS A, HUBENY I, SUDARSKY D. A theoretical interpretation of the measurements of the secondary eclipses of TrES-1 and HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **625**(2): 125-128
- [77] COWAN N B, AGOL E. Inverting phase functions to map exoplanets [J]. *Astrophys. J.*, 2008, **678**(2): L129-L132
- [78] COWAN N B, AGOL E. A model for thermal phase variations of circular and eccentric exoplanets [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **726**(2): 380-391
- [79] KNUTSON H A, CHARBONNEAU D, ALLEN L E, *et al.* A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b [J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 183-186
- [80] SHOWMAN A P, FORTNEY J J, YUAN L, *et al.* Atmospheric circulation of hot Jupiters: coupled radiative-dynamical general circulation model simulations of HD 189733b and HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **699**(1): 564-584
- [81] KNUTSON H A, LEWIS N, FORTNEY J J, *et al.* 3.6 and 4.5 μm phase curves and evidence for non-equilibrium chemistry in the atmosphere of extrasolar planet HD 189733b [J]. *Astrophys. J.*, 2012, **754**(1): 22-37
- [82] MAJEAU C, AGOL E, COWAN N B. A two-dimensional map of the extrasolar planet HD 189733b [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2012, **757**(2): L20-L24
- [83] KNUTSON H A, CHARBONNEAU D, NICOLAS B, *et al.* The 8 μm phase variation of the hot Saturn HD 149026b [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **703**: 769-784
- [84] COWAN N B, AGOL E. The statistics of Albedo and heat recirculation on hot exoplanets [J]. *Astrophys. J.*, 2011, **729**(1): 2770-2791
- [85] COWAN N B, MACHALEK P, CROLL B, *et al.* Thermal phase variations of WASP-12b: defying predictions [J]. *Astrophys. J.*, 2012, **747**(1): 833
- [86] LEWIS N K, KNUTSON H A, SHOWMAN A P, *et al.* Orbital phase variations of the eccentric giant planet HAT-P-2b [J]. *Astrophys. J.*, 2013, **766**(2): 95-117
- [87] HARRINGTON J, HANSEN B M, LUSZCZ S H, *et al.* The phase-dependent infrared brightness of the extrasolar planet upsilon Andromedae b [J]. *Science*, 2006, **314**(5799): 623-626
- [88] CROSSFIELD I J M, HANSEN B M S, HARRINGTON J, *et al.* A new 24 micron phase curve for upsilon Andromedae b [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **723**: 1436-1446
- [89] REDFIELD S, LINSKY J L. The structure of the local interstellar medium. IV. Dynamics, morphology, physical properties, and implications of cloud-cloud interactions [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **673**(1): 283-314
- [90] WOOD P L, MAXTED P F L, SMALLEY B, *et al.* Transmission spectroscopy of the sodium 'D' doublet in WASP-17b with the VLT star [J]. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 2011, **412**(4): 2376-2382
- [91] HUITSON C M, SING D K, VIDAL-MADJAR A, *et al.* Temperature-pressure profile of the hot Jupiter HD 189733b from HST sodium observations: detection of upper atmospheric heating [J]. *MNRAS*, 2012, **422**(3): 2477-2488
- [92] BEAN J L, KEMPTON E M, HOMEIER D. A ground-based transmission spectrum of the super-Earth exoplanet GJ 1214b [J]. *Nature*, 2010, **468**(7324): 669-672
- [93] DESERT J M, BEAN J, KEMPTON M R, *et al.* Observational evidence for a metal-rich atmosphere on the Super-Earth GJ1214b [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2011, **731**(2): 67-72
- [94] BERTA Z K, CHARBONNEAU D, DÉSSERT J M, *et al.* The flat transmission spectrum of the Super-Earth GJ1214b from wide field camera-3 on the Hubble space telescope [J]. *Astrophys. J.*, 2012, **747**(1): 833
- [95] FORTNEY J J, MORDASINI C, NETTELMANN N, *et al.* A framework for characterizing the atmospheres of low-mass low-density transiting planets [J]. *Astrophys. J.*, 2013, **775**(1): 162-170
- [96] KREIDBERG L, BEAN J L, DÉSSERT J M, *et al.* Clouds in the atmosphere of the super-Earth exoplanet GJ 1214b [J]. *Nature*, 2014, **505**(7481): 69-72
- [97] KNUTSON H A, BENNEKE B, DEMING D, *et al.* A featureless transmission spectrum for the Neptune-mass exoplanet GJ 436b [J]. *Nature*, 2014, **505**(7481): 66-68
- [98] DEMING D, WILKINS A, MCCULLOUGH P, *et al.* Infrared transmission spectroscopy of the exoplanets HD 209458b and XO-1b using the wide field camera-3 on the Hubble space telescope [J]. *Astrophys. J.*, 2013, **774**(2): 1201-1205
- [99] ROBINSON T D, MALTAGLIATI L, MARLEY M S, *et al.* Titan solar occultation observations reveal transit spectra of a hazy world [J]. *Proc. Nat. Acad. Sci. United States Am.*, 2014, **111**(25): 9042-9047
- [100] BURROWS A, IBGUI L, HUBENY I, *et al.* Optical albedo theory of strongly irradiated giant planets: the case of HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2008, **682**(2): 1277-1282
- [101] KNUTSON H A, CHARBONNEAU D, ALLEN L E, *et al.* The 3.6~8.0 μm broadband emission spectrum of HD 209458b: evidence for an atmospheric temperature inversion [J]. *Astrophys. J.*, 2007, **673**(1): 526-531
- [102] HUBENY I, BURROWS A, SUDARSKY D. A possible bifurcation in atmospheres of strongly irradiated stars and planets [J]. *Astrophys. J.*, 2015, **594**(2): 1011-1018.
- [103] FORTNEY J J, SAUMON D, MARLEY M S, *et al.* Atmosphere, interior, and evolution of the metal-rich transiting planet HD 149026b [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **642**(1): 495-504
- [104] ZAHNLE K, MARLEY M S, FREEDMAN R S, *et al.* Atmospheric sulfur photochemistry on hot jupiters [J]. *Astrophys. J.*, 2009, **701**(1): L20-L24

- [105] VIDAL-MADJAR A, DES ETANGS A L, DÉSSERT J M, *et al.* An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b [J]. *Nature*, 2003, **422**(6928): 143-146
- [106] DES ETANGS A L, EHRENREICH D, *et al.* Evaporation of the planet HD 189733b observed in H I Lyman-alpha [J]. *Astron. Astrophys.*, 2010, **514**(10): 2083-2096
- [107] FOSSATI L, HASWELL C A, FRONING C S, *et al.* Metals in the EXOSPHERE OF THE HIGHLY IRRADIATED PLANET Wasp-12b [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **714**(2): L222-L227
- [108] KULOW J R, FRANCE K, LINSKY J, *et al.* Lyman- α transit spectroscopy and the neutral hydrogen tail of the hot Neptune GJ 436b [J]. *Astrophys. J.*, 2014, **786**(2): 132-140
- [109] EHRENREICH D, DESERT J M. Mass-loss rates for transiting exoplanets [J]. *Astron. Astrophys.*, 2011, **529**(1): 251-264
- [110] EHRENREICH D, BOURRIER V, WHEATLEY P J, *et al.* A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b [J]. *Nature*, 2015, **522**(7557): 459-461
- [111] TIAN F, TOON O B, PAVLOV A A, *et al.* Transonic hydrodynamic escape of hydrogen from extrasolar planetary atmospheres [J]. *Astrophys. J.*, 2005, **621**(2): 1049-1060
- [112] YELLE R V. Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances [J]. *Icarus*, 2004, **170**(1): 167-179
- [113] VIDALMADJAR A, DESERT J M, ETANGS A L D, *et al.* Detection of oxygen and carbon in the hydrodynamically escaping atmosphere of the extrasolar planet HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2004, **604**(1): L69-L72
- [114] LINSKY J L, YANG H, *et al.* Observations of mass loss from the transiting exoplanet HD 209458b [J]. *Astrophys. J.*, 2010, **717**(2): 1291-1299
- [115] HOLMSTROM M, EKENBACK A, SELSIS F, *et al.* Energetic neutral atoms as the explanation for the high-velocity hydrogen around HD 209458b [J]. *Nature*, 2008, **451**(7181): 970-972
- [116] KISLYAKOVA K G, HOLMSTROM M, LAMMER H, *et al.* Magnetic moment and plasma environment of HD 209458b as determined from Ly alpha observations [J]. *Science*, 2014, **346**(6212): 981-984
- [117] JENKINS J M, TWICKEN, JOSEPH D, *et al.* Discovery and validation of Kepler-452b: a 1.6 R_e super Earth exoplanet in the habitable zone of a G2 star [J]. *Astron. J.*, 2015, **150**(2): 56
- [118] LAMMER H, LICHTENEGGER H I, KULIKOV Y N, *et al.* Coronal Mass Ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. II. CME-induced ion pick up of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones [J]. *Astrobiology*, 2007, **7**(1): 185-207
- [119] RAMIREZ R M, KALTENEGGER L. The habitable zones of pre-main-sequence stars [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2012, **798**(1): L25
- [120] LUGER R, BARNES R. Extreme water loss and abiotic O₂ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs [J]. *Astrobiology*, 2015, **15**(2): 119-143
- [121] BERTATHOMPSON Z K, IRWIN J, CHARBONNEAU D, *et al.* A rocky planet transiting a nearby low-mass star [J]. *Nature*, 2015, **527**(7577): 204-207