

编者按 习近平总书记强调,“浩瀚的空天还有许多未知的奥秘有待探索,必须推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展”。党的二十大报告明确“加快建设航天强国”,到2035年我国将“实现高水平科技自立自强,进入创新型国家前列”。为此,由中国科学院牵头,集我国空间天文、日球层物理、月球与行星科学、空间地球科学、微重力物理与空间生命科学领域的相关优势力量,围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星、太空格物等科学主题,开展了10个学科专业的发展战略研究。为让各界了解相关学科发展战略研究的成果,积极参与思考学科发展前沿和提出具有重大科学意义的空间科学任务,《空间科学学报》联合中国科学院国家空间科学中心论证中心,策划了《至2035年空间科学学科发展战略研究》专题,本期推出专题第4篇——周济林等:空间系外行星探测与研究进展。

ZHOU Jilin, XIE Jiwei, GE Jian, JI Jianghui, DOU Jiangpei, DONG Subo, LIU Huigen, WANG Wei, GUO Jianheng, YU Cong, BAI Xuening, FENG Fabo, LIU Beibei. Progress on Exoplanet Detection and Research in Space (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(1): 5–18. DOI:10.11728/cjss2024.01.2024-yg01

空间系外行星探测与研究进展*

周济林¹ 谢基伟¹ 葛健² 季江徽³ 窦江培⁴
东苏勃⁵ 刘慧根¹ 王炜⁶ 郭建恒⁷
余聪⁸ 白雪宁⁹ 冯发波¹⁰ 刘倍贝¹¹

1(南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

2(中国科学院上海天文台 上海 200030)

3(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

4(中国科学院南京天文光学技术研究所 南京 210042)

5(北京大学物理学院天文学系 北京 100871)

6(中国科学院国家天文台 北京 100101)

7(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

8(中山大学物理与天文学院 珠海 519082)

9(清华大学天文系 北京 100084)

10(上海交通大学李政道研究所 上海 201210)

11(浙江大学物理学院 杭州 310030)

* 国家重点研究发展计划项目 (2019YFA0706601, 2019YFA0405100), 国家自然科学基金项目 (11933001, 12150009, 12273011, 11973028, 1803012, 12033010, U2031210, 11827804, 12133005, 11973082, 12288102, 12373071, 12233004, 12325304, 1222230, 12173035, 12111530175), 中国科学院空间科学先导专项 (XDA15020600, XDA15020800, XDB41000000), 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究经费 (CMS-CSST-2021-A11, CMS-CSST-2021-B0, CMS-CSST-2021-B09, CMS-CSST-2021-B12), 民用航天技术预先研究项目 (D050105) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2022-KYY-506107-0001, 226-2022-00216) 共同资助

2023-12-15 收到原稿, 2024-01-13 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

摘要 系外行星学科是近 30 年来迅速发展起来的一门新兴学科. 其主要研究内容和目标包括, 通过发展各种探测技术探测太阳系外行星, 分析行星轨道、成分、大气性质, 评估行星的宜居性, 统计行星的分布规律, 从理论和观测上揭示行星系统的形成和动力学演化机制. 系外行星的研究对于回答宇宙中是否存在其他生命以及人类在宇宙中的地位和意义等问题具有重要意义. 随着 21 世纪空间探测技术的发展, 系外行星的研究进入了崭新及快速的发展阶段. 本文分析了系外行星研究领域的发展态势, 凝练中国在系外行星未来空间探测发展的重点领域, 优化学科布局, 以推进系外行星研究的快速稳步发展.

关键词 系外行星, 发展动态, 战略规划

中图分类号 V476

Progress on Exoplanet Detection and Research in Space

ZHOU Jilin¹ XIE Jiwei¹ GE Jian² JI Jianghui³ DOU Jiangpei⁴
DONG Subo⁵ LIU Huigen¹ WANG Wei⁶ GUO Jianheng⁷
YU Cong⁸ BAI Xuening⁹ FENG Fabo¹⁰ LIU Beibei¹¹

¹(School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023)

²(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

³(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

⁴(Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

⁵(Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

⁶(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

⁷(Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

⁸(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082)

⁹(Department of Astronomy, Tsinghua University, Beijing 100084)

¹⁰(Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201210)

¹¹(School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310030)

Abstract The subject of exoplanets has been a rapidly developing discipline in the past thirty years. Its main research content and objectives include: detecting exoplanets through the development of various detection techniques, analyzing planetary orbits, composition and atmospheric properties, evaluating the habitability of planets, calculating the distribution patterns of planets, and revealing the formation and dynamical evolution of planetary systems from both theoretical and observational perspectives. The study of exoplanets is of great significance in answering questions about the existence of other life forms in the universe and the status of humans in the universe. With the development of space exploration technology in the 21st century, the study of exoplanets has entered a new era. This article summarizes the development trend in the field of exoplanets, condenses China's key areas for future space exploration of exoplanets, optimizes the discipline layout, and promotes high-quality development of exoplanet research.

Key words Exoplanets, Development trends, Strategic planning

0 引言

太阳系外行星探测与研究是国际天文学和空间科学的一个重要前沿领域。“人类在宇宙中是否孤独”是人类诞生文明以来始终探寻的一个基本问题。太阳系外行星探测对理解行星形成和演化、类地行星的宜居性、地外生命及生命起源与演化, 认知人类在宇宙中的地位具有重要意义。自 1995 年人类发现第一颗围绕类太阳恒星运转的系外行星以来^[1], 系外行星领域在近 30 年里取得突飞猛进的发展。进入 21 世纪, 国内外天文界将系外行星探测、宜居行星和生命信号搜寻作为重大战略目标^[2-4]。

对太阳系外行星进行系统性的观测和理论刻画具有极其重要的科学与现实意义。第一, 这将大大加深人们对地球和太阳系的过去与未来的理解, 与人类未来发展休戚相关; 第二, 系外行星的观测提供了检验太阳系的形成和演化理论的关键数据, 这也极大提高了人们对地球和生命起源、太阳系天体 (例如火星) 宜居环境的变化等方面的认识; 第三, 这也将有可能直接回答“人类在宇宙中是否孤独”这一重大科学问题, 并且是搜寻宜居行星乃至建立地外家园的先决条件。

系外行星探测目前主要方法, 例如视向速度、凌星、微引力透镜、直接成像、天体测量等, 都是天文科学与技术发展的结晶。系外行星探测涉及到光学/红外天文、空间科学与空间技术, 这一学科的发展将直接推动空间超高精度测光技术、高灵敏度微弱光谱信号探测技术、高性能成像探测技术、超高对比度成像技术、超高精度天体测量技术、空间光干涉技术、卫星姿态控制技术、卫星编队飞行技术等取得新的突破。

探测地球 2.0, 发现第二个太阳系、地外生命乃至系外文明都是人类文明进程中从 0 到 1 的突破, 这不仅给天文学取得重大突破, 也促进了地质学、行星科学、天体化学、天体生物学, 以及大气科学等学科相关领域的交叉。这些学科的交叉对天文学以及相关学科领域的发展和突破起到了催化剂的作用。

系外行星领域在国际上正在突飞猛进地发展, 国内系外行星领域人才队伍相对比较年轻, 除了国内学者外, 还有一批从国外学成回国的优秀青年, 有的现在仍在参加一些国际大科学项目, 在学术上有很大的

发展空间。适时开展中国自主的系外行星探测空间项目, 并以此开展以我为主的国际合作, 将大大促进国内天文学科的发展, 为中国在该领域从跟跑尽早向并跑乃至领跑转变, 取得科学上的重大突破, 同时为该领域发展培养和储备更多优秀人才。

1 国际现状与发展态势

自 1995 年人类首次探测到围绕类太阳恒星的系外行星以来, 系外行星探测和研究非常活跃, 形成了发现系外行星—>行星系统的精确刻画 (质量、轨道参数、大气成分等)—>宜居行星的发现—>宜居行星的刻画的发展态势。围绕这一系外行星学科发展思路, 国际上已经计划并开展一大批空间和地面望远镜项目, 且在观测和理论方面取得了一些重要进展。系外行星探索中部分重要进展与空间探测望远镜如图 1 所示。

1.1 国际代表性的空间望远镜

1990 年发射的 Hubble (哈勃) 空间望远镜, 2002 年首次探测到了系外行星大气中钠原子的存在^[5]。2008 年在 189733 b 上首次探测到含碳分子 (CH_4) 存在的证据^[6]。2014 年在超级地球 GJ1214 上探测到云的出现^[7]。2021 年探测到一颗类地行星的次生大气^[8]。

2003 年发射的 Spitzer (斯皮策) 红外望远镜, 2006 年和 2007 年测定了密近行星 ν Andromeda b 和 HD 189733 b 的全球表面温度分布, 并限制了行星大气热分配的性质^[9]。2007 年和 2008 年在热木星 HD 18933 上发现水的信号^[10,11]。2019 年探测到了一颗地球大小行星 LHS 3844 b 的岩石表面^[12]。

2006 年欧洲发射的 CoRoT 空间卫星是首颗以系外行星探测为主要科学目标之一的空间卫星, 发现了 30 多颗系外行星和几百颗系外行星候选天体, 包括首次发现一颗岩石类行星 CoRoT-7 b^[13]。

2009 年美国发射的 Kepler 空间望远镜, 2009—2013 年对约 100 平方度的固定天区约 15 万颗恒星进行长期的高精度测光观测, 2014—2018 年开展了黄道带上的 13 个 K2 天区的观测。10 年内 Kepler 发现了 5000 多颗系外行星候选天体, 其中 2700 多颗已经被证认, 成为发现行星最多的望远镜^[14]。

欧空局 (ESA) 的 Gaia 自 2014 年开始观测以来, 已经分三批发布了 10 亿颗恒星的精度达几十个微角

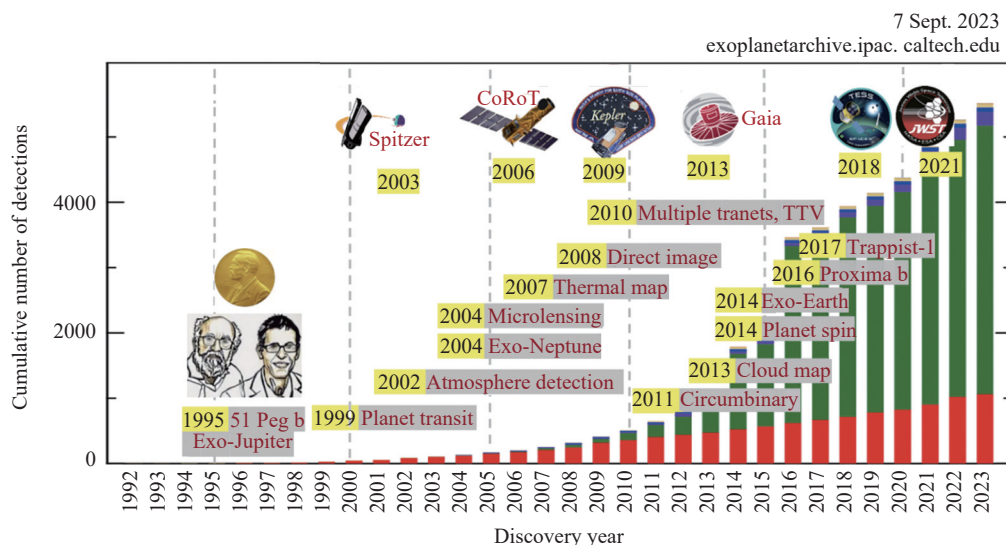


图1 系外行星探索中的重要进展和空间望远镜

Fig. 1 Important developments and space telescopes in exploration of exoplanets

秒的天体测量参数^[15-17]. Gaia 在第三次数据发布中公布了约 60 颗用天体测量法所发现的系外行星^[18,19], 展现 Gaia 在利用天体测量法搜寻冷巨行星的潜力^[20].

2018 年美国发射的 TESS 卫星, 采取 4 台 10 cm 广角望远镜开展全天高精度测光凌星搜寻, 旨在发现围绕距离地球 30~300 光年的恒星系统运转的短周期系外行星.

2019 年欧洲发射的 CHEOPS 卫星, 主要科学任务是对已知系外行星, 包括地面和空间发现的系外行星, 进行细节刻画观测, 测量系外行星的大小, 结合视向速度来确定行星的质量、密度、大气成分, 以及发现新的系外行星.

2021 年美国发射 JWST 空间望远镜. 系外行星是 JWST 的一个重要科学目标之一. 其强大红外探测能力会在系外行星的大气刻画和直接成像等方面发挥巨大作用.

PLATO 是 ESA 于 2017 年正式立项启动的, 计划于 2026 年底发射. PLATO 将采用 24 个口径为 12 cm 的小口径透镜式广角望远镜, 视场大小为 2232 平方度. 当所有 24 个望远镜同时观测同一空间区域时 (这个区域 301 平方度), 集光能力与 60 cm 口径望远镜相当. PLATO 计划 2 年长期凝视两个特定天区以寻找宜居行星.

ESA 的 Ariel 空间望远镜, 预计在 2028 年左右发射, 其将在近红外到中红外波段对上千颗系外行星

进行大气刻画.

Roman 空间望远镜是美国在 JWST 之后的下一个旗舰卫星, 2.4 m 口径, 配备 0.28 平方度视场的宽视场近红外相机, 其主要科学目标之一是利用微引力透镜法在银河中心核球方向开展冷行星和流浪行星巡天; 也将装有星冕仪 CGI 进行系外行星直接成像观测.

LUVOIR 是 NASA 主导的下一代空间通用大型 (10 m 级) 望远镜, 其一个重要目标是宜居带系外行星的直接成像观测.

1.2 国际系外行星研究取得的标志性进展

1.2.1 观测方面

1995 年瑞士的 Mayor 和 Queloz^[1] 通过视向速度法发现了第一颗围绕类太阳恒星运转的系外巨行星——飞马座 51 b, 并于 2019 年获得了诺贝尔物理学奖. 该发现标志着系外行星探索正式拉开帷幕. 视向速度法成为后十几年搜寻系外行星的主要手段.

1999 年 Henry 和 Charbonneau 等^[21,22] 发现第一颗系外行星凌星 HD 209458, 开启了凌星法探测系外行星和研究系外行星大气的新时代.

2002 年 Hubble 空间望远镜首次探测到了系外行星大气化学成分^[5]. 2003 年 Vidal-Madjar 等^[23] 利用 Hubble 空间望远镜在远紫外波段首次探测到一颗热木星的高层大气信号, 并证实这颗行星的大气正在逃逸. 这标志着通过空间探测研究系外行星大气时代

的开始.

2004 年 MOA 和 OGLE 巡天发现第一颗微引力透镜系外行星^[24], 此后, 微引力透镜行星揭示了冷海王星出现率远高于冷木星^[25], 雪线之外的巨行星出现率高于雪线之内^[26], 并发现了流浪行星这个新的族群^[27,28], 开拓了系外行星的新探测空间.

2004 年 Butler 等^[29] 在一颗红矮星周围发现一颗质量约为海王星的系外行星 (GJ 436 b). 几乎同一时刻, McArthur 等在一颗类太阳恒星周围也发现了一颗质量与海王星相当的系外行星 (55 Cnc e)^[30], 从此开启了小质量系外行星的探索时代.

2006 和 2007 年 Harrington^[9] 和 Knutson^[31] 利用 Spitzer 空间望远镜, 限制了行星表面的热辐射性质和动力学性质, 第一次对系外行星的表面进行热辐射成图.

2008—2010 年 Christian Marois 的团队^[32-34] 利用 Keck 和 Gemini 的 8~10 m 级望远镜配备自适应光学 (超级自适应光学) 和星冕仪系统对 HR8799 周围的 4 颗巨行星进行了成像, 标志着直接探测系外行星时代的来临.

2009 年发射的 Kepler 空间望远镜, 发现了两千多颗行星, 为研究系外行星统计分布提供了极佳的均一大样本, 首次揭示了轨道距离约 1 个天文单位之内、小至地球半径行星的出现率, 发现行星在银河系中是普遍存在的^[35-39]. 首席科学家 Borucki W J 凭借 Kepler 空间项目取得的巨大成就, 获得 2015 年邵逸夫奖.

2010 年 Holman 等^[40] 基于 Kepler 卫星观测数据, 第一次探测到多凌星系统, 并第一次探测到凌星时刻变化 (TTV), 从此解锁了通过 TTV 刻画行星系统动力学特征的新方法.

2011 年 Doyle 等^[41] 通过 Kepler 卫星观测数据, 发现第一颗环双恒星的凌星系外行星, Kepler-16 b, 揭开了研究双星系统中行星形成和演化的新篇章.

2011 年坐落在智利的阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列 (ALMA) 首次发现原行星盘存在“子结构”^[42,43], 并进一步发现子结构的普遍性^[44,45]. 这些子结构可能代表了正在形成的行星与行星盘相互作用而留下的踪迹, 对研究行星的早期形成有重大意义.

2013 年 Demory 等^[46] 通过结合 Kepler-7 b 在 Kepler 和 Spitzer 不同波段上给出的相图数据, 第一

次构建出了系外行星 (Kepler-7 b) 表面云的分布图.

2014 年 Quintana 等^[47] 通过凌星法首次在一颗红矮星的宜居带发现地球大小行星 Kepler-186 f.

2014 年 Snellen 等^[48] 第一次测量出系外行星 (Beta Pic b) 的自转速度, 发现其延续了太阳系中质量更大的行星自转得更快的趋势.

2016 年 Anglada-Escude 等^[49] 通过视向速度法在离太阳系最近的恒星—比邻星周围发现一颗类地行星. 该行星位于比邻星的宜居带内, 表面可能有液态水存在.

2016—2017 年 Gillon 等^[50,51] 通过凌星法在一颗温度极低的矮星 TRAPPIST-1 周围发现 7 颗类似地球大小的行星, 其中 3 颗处在宜居带内.

2018 年系外行星凌星巡天卫星 TESS 发射^[52]. 到目前为止 TESS 已经发现了 6000 多颗系外行星候选体, 其中 300 多颗已经得到证认. TESS 的发现进一步展现了系外行星的丰富多样性. 例如 TESS 发现了密度极低和极高的海王星大小行星^[53,54].

2021 年 JWST 空间望远镜发射. 系外行星是一个重要科学目标之一. 目前 JWST 已经对一些系外行星大气的成分 (包括 H_2O , CO_2 和 CO , CH_4) 等做了精确测量^[55-57], 还发现了一批流浪的双行星系统^[58].

1.2.2 理论方面

传统的气态巨行星形成理论有核吸积模型和引力不稳定模型两大类. 核吸积模型认为巨行星先形成约 10 个地球质量的重元素物质核后, 再吸积大量的气体而形成^[59], 而引力不稳定模型则认为气态巨行星直接由原行星盘通过盘不稳定凝聚而成^[60]. 为了解释靠近主星的热木星的存在, 提出了气态巨行星在远离主星的轨道上先形成, 后经轨道迁移至周期为数天的近主星轨道上, 从而形成热木星的行星迁移理论^[61]. 行星迁移理论同时揭示了动力学演化对行星轨道构形塑造的重要性^[62,63], 并提出了热木星形成的高偏心率迁移机制^[64,65].

行星形成中一个重要的问题是米级大小星子的凝聚, 所谓米级障碍. 针对星子的形成和行星生长问题, 近年来提出了原行星盘中尘埃因冲流不稳定性 (Streaming instability) 而聚集坍塌, 并快速形成直径超千米的岩石行星星子理论^[66,67], 以及提出了卵石吸积这一全新的行星胚胎生长模式^[68].

为了解释系外行星特征的多样性, 建立和发展行

星的星族合成理论模型. 通过将大样本的理论模拟行星系统和真实观测样本进行对比来揭示行星形成和演化的机制和规律^[69-75]. 此外, 在原行星盘的研究方面, 建立了盘风驱动盘吸积和演化的新范式^[76].

2 中国现状与发展态势

2.1 系外行星学科研究机构

在系外行星研究领域国内主要的天文研究单位包括(排名不分先后): 中国科学院国家天文台、紫金山天文台、上海天文台、云南天文台、南京天文光学技术研究所、南京大学、北京大学、清华大学、中山大学、上海交通大学、浙江大学、澳门科技大学等. 其中一些重要的实验室包括: 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 中国科学院行星科学重点实验室(上海天文台, 紫金山天文台), 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 中国科学院天体结构与演化重点实验室(云南天文台), 中国空间站工程巡天望远镜长三角地区科学中心(上海天文台), 现代天文与天体物理教育部重点实验室(南京大学).

2.2 国内代表性研究成果

系外行星研究属于天文学过去 20 年发展最为迅速的学科方向. 国内虽然缺乏有效的观测设备, 但几乎所有的天文学研究机构都积极开展了系外行星的探测、形成理论和新观测设备研发等方面的工作. 国内的系外行星探测与研究从无到有、发展迅速, 其中一些代表性成果如下.

系外行星探测. 利用国内仪器设备, 通过视向速度法首次发现系外行星^[77]. 利用中国南极观测设备, 通过凌星法发现 100 多颗系外行星候选体^[78,79]. 利用 KMTNet 和 LCOGT 等国际设备, 领衔国际团队通过微引力透镜法发现多颗系外行星^[80,81]. 结合 Gaia 和视向速度观测数据发现大批系外行星^[82,83].

仪器研制. 中国空间站工程巡天望远镜系外行星成像星冕仪处于初样研制阶段, 为中国首次开展系外冷行星科学研究奠定基础. 南京天光所成功研制地基系外行星成像星冕仪, 与国际 4 m 口径望远镜开展联合观测, 观测到 κ And b 等系外行星高对比度图像^[84]; 正研制百米级差分延迟干涉望远镜阵, 可实现微角秒级天体测量, 用于系外行星质量、半径、轨道参数测定. 上海天文台在非索型干涉仪研究上积累大量经

验, 成功研制了 500 mm 口径斐索型光干涉成像实验装置.

系外行星统计. 结合 LAMOST 和 Kepler 数据, 揭示行星圆轨道的普遍性以及偏心率和轨道倾角的分布规律^[85]. 发现新的行星族群——热海星^[86], 为揭开热木星的起源、检验行星形成理论模型提供了新的线索. 结合 Gaia 和 LAMOST 数据, 揭示动力学演化历史影响行星系统的观测证据^[87], 给出星团中热木星和热海王星沙漠的形成时标限制^[88], 揭示了热木星、超级地球和亚海王星的出现率随时间的演化规律^[89, 90].

原行星盘探测. 定量刻画 HL Tau 原行星盘的精细结构特征^[91], 基于 ALMA 观测和数值模拟研究揭示原行星盘中尘埃环结构成因、旋涡结构证据和旋涡产生的旋臂结构的特征^[92-95].

系外行星大气. 通过多波段测光在国内首次成功刻画了系外行星大气性质^[96], 首次探测到极热木星的延展氢壳层^[97], 经典热木星高层大气加热产生的氢巴尔末吸收^[98]. 首次揭示海洋热量输送和海冰动力对红矮星周围潮汐锁相行星气候与宜居性的重要影响^[99-101].

行星形成和动力学演化. 通过数值模拟建立了磁盘风驱动原行星盘演化的新图景^[76,102]. 针对太阳系起源和动力学演化提出了早期原行星盘演化和小天体形成模型^[103], 自洽地解释了陨石和类地行星的同位素含量分布特性. 同时, 建立了巨行星轨道演化模型, 指出在气体盘耗散的过程中, 四大巨行星通过反向迁移, 依次脱离共振态并引发轨道不稳定^[104]. 此外, 提出了木星形成早期的大撞击理论^[105].

3 系外行星研究未来重点发展方向

3.1 前沿科学问题

(1) 地球 2.0 在宇宙中有多普遍. 人类在宇宙中是否孤独, 这是几乎所有人都想知道答案的一个基本问题, 也是当代有望解决的最前沿科学问题之一——寻找到地外生命将最终回答这一问题. 然而, 搜寻地外生命必须首先发现最可能承载生命的地球 2.0, 即处于类太阳恒星的宜居带内的类地行星. 迄今为止, 人类还没有发现一个地球 2.0. 首次发现地球 2.0, 并通过随后大气的观测确定其宜居性, 将是系外行星领域载入史册的重大科学事件. 发现若干地球 2.0 就可以确定这类行星的发生率, 回答地球 2.0 在宇宙中有

多普遍的关键问题.

(2) 行星是如何形成和演化的. 目前的理论认为, 地球及其他类地行星可能是在原恒星气体盘完全消散后, 由剩余的固体物质互相碰撞而成. 但是这个理论还较粗糙, 无法解释很多观测到的类地行星的轨道、质量分布情况, 更无法精确复现太阳系外的类地行星的性质分布 (包括海洋及大气组成等). 此外, 系外行星的大量发现揭示行星和行星系统是丰富多样的, 但这种多样性背后的形成机制目前还不清楚.

(3) 是否存在地外生命. 继地球 2.0 发现之后的下一个系外行星前沿的圣杯将是地外生命的探测, 即通过发现系外行星大气中生命所产生的生命标记分子 (biosignature) 来推断生命的存在. 这将能够解答“宇宙中是否存在其他生命”这一基本科学问题. 目前主要有凌星透射光谱和直接成像两种方法可以实现对行星大气成分的测量. 对类地行星或超级地球行星的大气进行光谱探测和大气成分分析, 有望直接搜寻到地外生命活动释放在行星大气中的微量气体及组成. 直接成像的方法对望远镜的口径、自适应光学以及探测器的性能提出了苛刻要求, 成为目前驱动新一代地基和空间望远镜, 例如 ELT, TMT, GMT 和 LUVOIR 等研发的最重要科学因素之一.

(4) 太阳系在行星系统中到底有多独特. 与发现地球 2.0 相关的领域是探测到第二个太阳系, 即发现多个短周期类地行星和多个长周期巨行星, 并拓宽已有的行星发现参数空间, 探测系外柯伊伯带和奥尔特云天体. 通过探测类太阳系, 人们将第一次得以把太阳系放在系外行星的大样本中来研究, 进而解答太阳系是否独特的千年谜题.

(5) 恒星活动对行星宜居性有怎样的影响. 恒星风带走大量的角动量, 迫使恒星的自转减慢, 从而影响到恒星的短波辐射 (X 射线+UV 辐射) 水平. 恒星强烈的短波辐射除了随年龄整体性下降之外, 还伴随有各种恒星活动, 例如恒星的耀发等. 恒星的短波辐射造成了类地球行星表面水的逃逸, 并可能遗留非生命的氧信号. 另外, 行星大气的化学、气溶胶和温室气体丰度在很大程度上是被主星 X 射线和 UV 辐射、地球板块活动和生物过程决定的. 上述过程极大地影响了行星大气的演化、化学组成和可宜居性. 因此, 充分研究恒星活动性的演变对行星大气的影响是理解类地行星宜居状态的重要前提.

(6) 系外行星在银河系不同子结构及环境中如何分布与演化. 目前发现的系外行星中有年龄仅百万年的“低幼”行星, 也有与银河系一样年迈、年龄超百亿年的“高龄”行星. 其距离也已经从太阳的邻域 (百光年内) 延伸到了上万光年之外, 逐渐扩张到了银河系 (尺度约十万光年) 的各个角落. 系外行星领域已经发展到需要把行星放在一个更广阔的空间背景 (整个银河系) 和更久远的时间背景下 (银河系的诞生之时) 进行研究. 通过分析行星在银河系不同空间位置 and 不同时间年龄的分布特征和规律, 将揭示行星形成演化与整个银河系形成演化的联系.

(7) 流浪行星是如何起源的. 流浪行星是指那些不围绕恒星运动、在银河系内游荡的行星. 微引力透镜观测表明, 银河系中低质量流浪行星可能比绕恒星转动的行星的数量还要多, 目前理论普遍认为, 这些行星是在恒星周围形成、又在形成过程中被动力学散射到星际空间的. 而不同质量流浪行星的发生概率是什么, 流浪行星在银河系的分布特征是什么, 特别是与地球大小类似的流浪地球是如何形成的? 流浪行星的探测不仅关系到刚形成时行星系统的初始状态, 而且也理解行星形成后动力学演化提供重要观测依据. 这些都是系外行星领域尚未解决的前沿问题.

(8) 系外小天体是否普遍存在. 在已发现的 5500 多颗系外行星中还尚未探测到系外行星的卫星 (或称系外月亮). 卫星的形成与演化为行星形成理论提供重要线索, 对行星的演化和宜居性都具有重要作用, 而且卫星若拥有合适的温度和大气也可以孕育生命, 所以系外小天体 (矮行星、卫星、彗星、行星环与尘埃) 的探测将为系外行星开辟一个新的方向.

(9) 如何在观测上捕捉到早期行星形成的踪迹. 行星在原行星盘中形成, 其形成过程将在盘中留下踪迹. 如何在盘中找到行星形成的确凿证据, 又如何通过这些踪迹反推出形成中的行星的基本性质. 更进一步, 如何将盘中行星的性质同成熟的系外行星联系起来, 回答这些问题是在观测上检验行星形成理论的关键.

(10) 原行星盘如何形成以及如何演化. 原行星盘是行星形成的摇篮. 原行星盘伴随恒星形成的过程而形成, 其内部结构和演化对行星的形成有决定性影响. 盘的形成和演化伴随极为丰富的物理和化学过程, 人们距离充分理解这些过程仍相差甚远, 客观上造成了对行星形成认知的局限性.

(11) 行星系统轨道构型的形成与最终的命运. 现代行星形成理论认为, 行星系统形成于恒星形成早期的原恒星盘. 然而, 行星系统中的不同行星 (岩石行星、超级地球、类木行星等) 的轨道构型的形成主要取决于什么因素, 是什么决定了目前观测到的千姿百态的行星系统, 行星系统中不同质量行星的轨道构型最终将影响类地行星的宜居性, 以及系统的长期稳定性和最终命运.

(12) 系外行星大气是如何形成和演化的. 系外行星大气性质的精确刻画可为行星及其大气的形成和演化提供关键的约束条件. 下一代空间或者地基望远镜或将配备高精度、高灵敏度、高稳定性的光谱仪, 能对气态巨行星的大气组分及丰度进行细致刻画, 从观测上约束行星大气的物理和化学性质, 推动对大气环流和大气逃逸的研究. 通过对示踪气体元素丰度和同位素丰度的精确测量, 从而与行星的形成、轨道迁移和演化等重要问题形成统计关联. 通过对类地行星、超级地球等小尺寸系外行星开展大气刻画, 研究从原初大气到次生大气的过渡演化行为, 以及大气逃逸在类地行星宜居性中扮演的角色.

3.2 未来发展总体目标

面向世界空间科学前沿和建设航天强国的国家重大战略需求, 围绕“宇宙和生命的起源和演化”与“太阳系与人类的关系”两大主题, 凝练了极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星和太空格物五个前沿探索方向. 目前, 系外宜居行星探测已成为国际空间科学的重要科学目标, 也为中国空间科学的发展带来巨大的挑战与机遇. 系外行星与空间科学的结合将带来诸如超高精度光度仪、大口径和低畸变大视场空间望远镜技术、紫外、光学和红外天文实测技术、微型光波导光谱仪技术、超高精度天体测量技术、空间干涉仪、星冕仪、卫星超稳定姿控和高精度热控技术、卫星编队飞行、空间大数据传输、大数据处理等设备和技术的研发, 为中国成为空间科技强国奠定基础. 到本世纪中叶, 实现对系外宜居行星的刻画. 对几个和地球高度相似的行星开展从主星到行星本身的精细研究, 力争利用红外探测, 在行星的可宜居性上取得重大突破.

3.3 重点发展方向

(1) 地球 2.0 的探测. 这是几乎所有人都想知道答案的一个基本问题, 也是 *Science* 杂志评出的最前

沿的科学问题之一. 寻找地外生命是当代天文学的重大使命之一, 而搜寻宇宙中最可能的生命载体——地球 2.0, 则是找到地外生命的关键一步. 因此找到第一个地球 2.0, 限制地球 2.0 的发生率, 是当代系外行星领域最关键的科学问题之一. 尽管国际上已经有过诸多尝试, 但目前为止依然没有在宇宙中发现地球 2.0. 天文学界的共识是, 这并不意味着地球非常特殊, 而是之前的搜索技术有限. 通过对 Kepler 的数据进行仔细分析表明, 距离找到地球 2.0 只有一步之遥. 未来中国的空间探测计划将有望在这方面实现突破^[106].

(2) 类地行星的形成和演化. 地球 2.0 只是类地行星的一个特例. 最新数据揭示类地行星不仅在宇宙中普遍存在, 而且可能存在于非常广的轨道范围, 从灼热的恒星附近一直到极寒的太空. 但目前已知的类地行星样本仅有 300 多颗, 且大多数的轨道周期都集中在 30 天以内. 这些样本固然珍贵, 但不足以帮助理解一个重要的科学问题——地球起源. 目前, 理论界认为, 地球及其姐妹行星 (例如金星、火星) 可能是在原恒星气体盘完全消散后, 由剩余的固体残渣互相碰撞而成. 但是这一理论还较粗糙, 无法解释这些行星的轨道分布及质量大小, 更无法预测太阳系外的类地行星特质 (包括海洋、大气组成等). 要理解地球起源, 需要一个类地行星的大样本. 通过结合凌星法、视向速度法和微引力透镜法, 未来中国的系外行星空间探测任务将发现大批类地行星. 这些行星环绕不同种类的恒星, 轨道周期将跨越几个数量级, 从小于一天上至百年, 甚至包括流浪行星 (包括流浪地球). 这将对目前所知极微的类地行星的第一次种群普查, 旨在解答地球是如何形成和演化的以及流浪地球又是如何起源的.

(3) 恒星活动和行星大气逃逸对行星形成、演化和宜居性的影响. 恒星辐射是决定行星大气物理和化学性质的重要因素. 由 X 射线和紫外辐射推动的大气逃逸现象深刻地影响了行星的形成、演化和可宜居性. 在行星形成的早期, 大气逃逸可以剥离或者减少低质量行星气态外壳, 使行星的演化路径发生重大变化. 另外, 在寻找太阳系外地球的过程中, 目前所发现的类地行星其所处的环境和地球所处的环境有较大不同. 例如有些类地行星的主星比太阳小得多, 可宜居带比地球到太阳的距离近得多. 同时, 这些矮星有很强的活动从而导致紫外辐射的变化. 这些紫外辐射

将影响行星的大气环境并进一步导致表面水流失的变化. 因此, 在探讨一个类地行星是否“宜居”之前, 必须评估其表面的水是否可以保留.

(4) 太阳系近邻宜居带类地行星探测. 行星形成理论^[107]认为恒星周围的行星系统是普遍存在的, 且系统内行星质量分布与太阳系行星的分布相类似. 自从发现第一颗围绕主序星运行的行星以来, 迄今天文学家共发现 5000 余颗系外行星, 但距太阳系约 10 pc (pc 为秒差距, 1 pc=3.26 光年) 以内的行星数量仅仅约占 2%, 人类仍然对太阳系近邻恒星周围的行星知之甚少. 在未来一二十年里, 太阳系近邻恒星周围的宜居行星是唯一可以通过观测大气成分发现系外行星生命信号的最佳对象, 探测发现太阳系附近恒星周围的宜居带类地行星是人类探索地外生命的首要目标^[108]. 太阳系周围是否存在宜居带类地行星、如何分布、概率有多大, 太阳系近邻系外行星系统的完备性、轨道特征、形成和演化历史如何, 这些问题的解决将有助于解决“太阳系是具有普遍性还是独特性”“地球是否独一无二”“行星如何成为生命的摇篮”等重大科学问题. 多种探测手段包括视向速度、凌星、直接成像以及天体测量都将有望在太阳系近邻恒星周围发现宜居的类地行星.

(5) 系外行星大气的刻画. 行星大气的探测为行星的形成、演化和宜居性提供了至为关键的约束, 是行星可宜居性和系外生命探测的重要手段^[109]. 到 2030 年左右, 下一代空间望远镜上应具有高精度的光谱仪, 能对气态巨行星的大气组分及丰度进行细致刻画, 从观测上约束行星大气的物理和化学性质, 并对伴随恒星演化的多类型行星大气组分及丰度进行细致刻画、推动大气环流和大气逃逸的研究. 通过对示踪气体元素丰度和同位素丰度的精确测量, 从而与行星的形成、轨道迁移和演化等重要问题相关联. 通过对类地行星、超级地球等小尺寸系外行星开展大气刻画, 研究从原初大气到次生大气的过渡演化行为, 以及大气逃逸在类地行星宜居性中扮演的角色. 发展下一代空间大型望远镜 (6~10 m) 的星冕仪和高对比度直接成像光谱、光干涉技术, 对大量近邻恒星的宜居带行星开展观测, 从行星反射谱或者热发射谱上确认是否为孪生地球、研判其宜居性并搜寻潜在的生命特征信号.

(6) 探测系外卫星. 卫星的形成是行星系统起源

的关键环节之一, 而且行星卫星的存在对行星可宜居性有重要影响. 目前系外卫星的搜索尚属起步阶段, 国际上一些团队已经用凌星法发现了一些卫星候选体, 但是由于假阳性可能性高, 难以得到确认. 未来空间凌星望远镜将通过进一步观测 Kepler 候选系外行星系统来证认这些卫星, 并可通过延长 Kepler 探测极限发现大量长周期巨行星. 由于长周期行星更易拥有大质量卫星, 未来有望发现这些冷巨行星周围的大质量卫星. 此外, 发展微引力透镜卫星阵列将利用微引力透镜法在从 0.5 倍天文单位到数万个天文单位间搜索低至 0.5 倍月球质量的行星、矮行星以及卫星, 从而通过探测卫星研究行星宜居环境, 并能发现流浪月球. 随着地面和空间直接成像技术的进一步发展以及高精度测光和视向速度法的结合, 有望利用多种手段发现被直接成像行星周围的卫星.

(7) 探测第二个太阳系. 太阳系由四大类地行星和四大冷巨行星组成. 类地行星的小质量和巨行星的长周期超出了一般探测技术的极限. 未来空间凌星望远镜可与 Kepler 以及地面的凌星巡天结合来探测长周期行星的凌星信号; 另外, 未来系外行星空间探测望远镜的天体测量数据可与 Gaia 数据结合达到 20 年的观测基线, 并结合 JWST 和未来 CSST, ROMAN, LUVOIR 的微引力透镜和直接成像技术, 可以发现并确认类木星和类海王星以及冷类地行星, 进而找到拥有多个巨行星的系统. 在这些系统中寻找宜居地球, 将首次使得人类可以揭开太阳系是否独特的千年谜题.

(8) 研究宜居行星和探测地外生命. 行星宜居性是多学科交叉的前沿研究课题, 天文学家尤其关心生命信号的定义和对应的光谱特征, 因为这是未来寻找地外生命的关键. 目前, 即使是 JWST, 其探测能力也只能对类太阳恒星周围比地球大的超级地球的 (大气透射) 光谱特征进行探测, 未来的 LUVOIR, HabEx 希望借助更大口径的望远镜, 进行直接成像探测. 中国未来发展系外行星空间干涉和成像观测, 将对近邻行星系统进行搜寻与特征刻画, 期望获得宜居带类地行星的特征, 并结合恒星长期活动性和系外行星大气模式的研究, 以及交叉学科对生命信号的定义等的进展, 揭示类地行星的宜居性.

(9) 造访并研究系外天体. 虽然国际深空探测自旅行者号发射以来已经蓬勃发展了几十年, 但是目前

几乎所有对系外行星的研究都是基于被动观测而非主动探索. 基于地面激光阵列或者太阳辐射加速的光帆微型探测器将有可能在 21 世纪上半叶改变这一现状. 重量在克量级的微型探测器将可在几分钟内加速到太阳系逃逸速度, 进而探索诸如 Oumuamua 之类的系外小天体, 对其活动性、形状、成分进行分析. 随着地面激光技术和材料科学以及摩尔定律所预言的芯片的进一步微型化, 微型探测器将可能被加速到 10% 光速, 进而实现星际航行, 到达太阳系近邻 α -Cen 系统, 并首次近距离对该系统行星进行成像. 目前美国突破摄星计划 (Breakthrough Starshot) 项目已经投入上亿美金用于早期研发, 中国可投入相当数量的资金用于微型星际探测器的研发, 也可与突破摄星计划合作充分利用并带动中国深空探测、芯片产业、材料科学和激光技术的发展.

4 结语

过去 10 年以 Kepler 为代表的系外行星空间探测任务将系外行星这一新兴的前沿领域推向了一个前所未有的高潮. 紧随其后 Gaia, TESS, Cheops 和

JWST 等空间卫星的发射标志着系外行星空间探测时代的全面来临 (见图 2). 系外行星空间探测大体按照—发现系外行星—行星系统的精确刻画和统计—宜居行星的发现和刻画—发现地外生命—系外行星的脉络向前发展. 不久的将来, 美国和欧洲还在系外行星空间探测之路上部署了多项探测计划 (例如 PLATO, Roman 和 Ariel 等). 可以预见, 系外行星空间探测将迎来一个充满期待的未来.

中国虽然在系外行星领域方面的研究起步较晚, 但在系外行星探测、统计、大气及形成和动力学等方面也取得了显著的成果, 并培养了一批专业的系外行星研究队伍. 未来, 在中国航天和空间探测技术进步的推动下, 要抓住机遇, 瞄准当前和未来系外行星领域的重大科学问题, 积极开展系外行星的空间探测研究. 力争在 2035 年前, 发射 3~5 颗系外行星探测卫星, 发现一批红矮星宜居带类地行星和首次探测到类日恒星周围宜居带内类似地球的行星 (地球 2.0), 首次探测到摆脱了恒星引力束缚的类地流浪行星和流浪月球. 到 2050 年前, 再发射 3~5 颗系外行星探测卫星, 对太阳系近邻地球 2.0 在内的宜居行星的大气和宜居性进行刻画和普查, 探测地外生命产生的大气

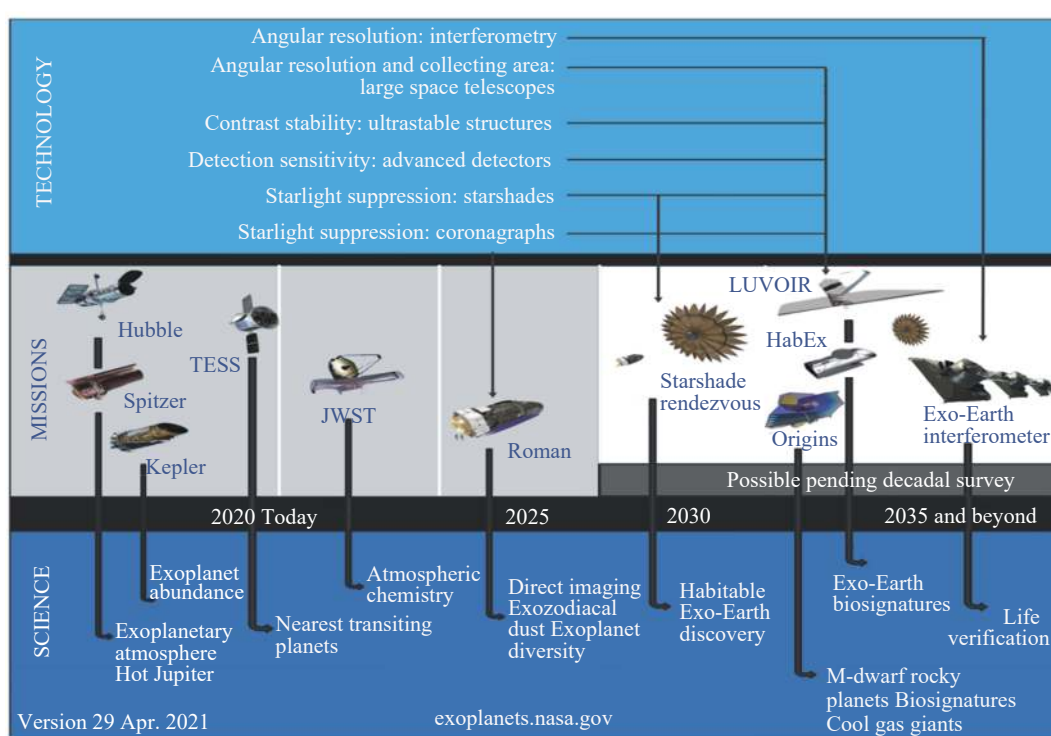


图 2 与系外行星相关的空间探测任务的时间表

Fig. 2 Timeline of Space Missions related to Exoplanets

分子信号. 通过在系外行星空间探测中的不断进取, 为理解行星系统的起源和演化、刻画宜居行星环境、搜寻宜居行星、探测系外生命的前沿贡献中国的智慧和力量.

参考文献

- [1] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, **378**(6555): 355-359
- [2] The Project Team of Research on Development Strategies of Chinese Disciplines and Frontiers (2021-2035). Development Strategy of Chinese Astronomy 2035[M]. Beijing: Science Press, 2023 (中国学科及前沿领域发展战略研究(2021-2035) 项目组. 中国天文学 2035 发展战略 [M]. 北京: 科学出版社, 2023)
- [3] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s[M]. Washington: The National Academies Press, 2021
- [4] FAVATA F, HASINGER G, TACCONI L J, *et al.* Introducing the *Voyage 2050* White Papers, contributions from the science community to ESA's long-term plan for the Scientific Programme[J]. *Experimental Astronomy*, 2021, **51**(3): 551-558
- [5] CHARBONNEAU D, BROWN T M, NOYES R W, *et al.* Detection of an extrasolar planet atmosphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, **568**(1): 377-384
- [6] SWAIN M R, VASISHT G, TINETTI G. The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet[J]. *Nature*, 2008, **452**(7185): 329-331
- [7] 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
- [8] SWAIN M R, ESTRELA R, ROUDIER G M, *et al.* Detection of an atmosphere on a rocky exoplanet[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **161**(5): 213
- [9] HARRINGTON J, HANSEN B M, LUSZCZ S H, *et al.* The phase-dependent infrared brightness of the extrasolar planet υ Andromedae b[J]. *Science*, 2006, **314**(5799): 623-626
- [10] 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
- [11] GRILLMAIR C J, BURROWS A, CHARBONNEAU D, *et al.* Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD 189733 b[J]. *Nature*, 2008, **456**(7223): 767-769
- [12] KREIDBERG L, KOLL D D B, MORLEY C, *et al.* Absence of a thick atmosphere on the terrestrial exoplanet LHS 3844 b[J]. *Nature*, 2019, **573**(7772): 87-90
- [13] LÉGER A, ROUAN D, SCHNEIDER J, *et al.* Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7 b: the first super-Earth with measured radius[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, **506**(1): 287-302
- [14] BORUCKI W J, KOCH D, BASRI G, *et al.* Kepler planet-detection mission: introduction and first results[J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 977-980
- [15] Gaia Collaboration, PRUSTI T, DE BRUIJNE J H J, *et al.* The *Gaia* mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **595**: A1
- [16] Gaia Collaboration, BROWN A G A, VALLENARI A, *et al.* *Gaia* data release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **595**: A2
- [17] Gaia Collaboration, BROWN A G A, VALLENARI A, *et al.* *Gaia* early data release 3. Summary of the contents and survey properties[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **649**: A1
- [18] Gaia Collaboration, ARENOU F, BABUSIAUX C, *et al.* *Gaia* data release 3: stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **674**: A34
- [19] HOLL B, SOZZETTI A, SAHLMANN J, *et al.* *Gaia* data release 3. Astrometric orbit determination with Markov chain Monte Carlo and genetic algorithms: systems with stellar, sub-stellar, and planetary mass companions[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, **674**: A10
- [20] PERRYMAN M, HARTMAN J, BAKOS G Á, *et al.* Astrometric exoplanet detection with *Gaia*[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **797**(1): 14
- [21] HENRY G W, MARCY G W, BUTLER R P, *et al.* A transiting "51 Peg-like" planet[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, **529**(1): L41-L44
- [22] CHARBONNEAU D, BROWN T M, LATHAM D W, *et al.* Detection of planetary transits across a sun-like star[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, **529**(1): L45-L48
- [23] VIDAL-MADJAR A, DES ETANGS A L, DÉSSERT J M, *et al.* An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD 209458 b[J]. *Nature*, 2003, **422**(6928): 143-146
- [24] BOND I A, UDALSKI A, JAROSZYŃSKI M, *et al.* OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: a planetary microlensing event[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **606**(2): L155-L158
- [25] GOULD A, UDALSKI A, AN D, *et al.* Microlens OGLE-2005-BLG-169 implies that cool Neptune-like planets are common[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, **644**(1): L37-L40
- [26] GOULD A, DONG S B, GAUDI B S, *et al.* Frequency of solar-like systems and of ice and gas giants beyond the snow line from high-magnification microlensing events in 2005-2008[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, **720**(2): 1073-1089
- [27] MRÓZ P, UDALSKI A, SKOWRON J, *et al.* No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass

- planets[J]. *Nature*, 2017, **548**(7666): 183-186
- [28] MRÓZ P, RYU Y H, SKOWRON J, *et al.* A Neptune-mass free-floating planet candidate discovered by microlensing surveys[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, **155**(3): 121
- [29] BUTLER R P, VOGT S S, MARCY G W, *et al.* A Neptune-mass planet orbiting the nearby M dwarf GJ 436[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **617**(1): 580-588
- [30] MCARTHUR B E, ENDL M, COCHRAN W D, *et al.* Detection of a Neptune-mass planet in the ρ^1 cancri system using the hobby-eberly telescope[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **614**(1): L81-L84
- [31] KNUTSON H A, CHARBONNEAU D, ALLEN L E, *et al.* A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733 b[J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 183-186
- [32] 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
- [33] MAROIS C, ZUCKERMAN B, KONOPACKY Q M, *et al.* Images of a fourth planet orbiting HR 8799[J]. *Nature*, 2010, **468**(7327): 1080-1083
- [34] SERABYN E, MAWET D, BURRUSS R. An image of an exoplanet separated by two diffraction beamwidths from a star[J]. *Nature*, 2010, **464**(7291): 1018-1020
- [35] HOWARD A W, MARCY G W, BRYSON S T, *et al.* Planet occurrence within 0.25 AU of solar-type stars from Kepler[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2012, **201**(2): 15
- [36] DONG S B, ZHU Z H. Fast rise of “Neptune-size” planets ($4-8 R_{\oplus}$) from $P \sim 10$ to ~ 250 days—statistics of Kepler planet candidates up to ~ 0.75 AU[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **778**(1): 53
- [37] PETIGURA E A, HOWARD A W, MARCY G W. Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(48): 19273-19278
- [38] FRESSIN F, TORRES G, CHARBONNEAU D, *et al.* The false positive rate of Kepler and the occurrence of planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **766**(2): 81
- [39] BURKE C J, CHRISTIANSEN J L, MULLALLY F, *et al.* Terrestrial planet occurrence rates for the Kepler GK dwarf sample[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **809**(1): 8
- [40] HOLMAN M J, FABRYCKY D C, RAGOZZINE D, *et al.* Kepler-9: a system of multiple planets transiting a sun-like star, confirmed by timing variations[J]. *Science*, 2010, **330**(6000): 51-54
- [41] DOYLE L R, CARTER J A, FABRYCKY D C, *et al.* Kepler-16: a transiting circumbinary planet[J]. *Science*, 2011, **333**(6049): 1602-1606
- [42] VAN DER MAREL N, VAN DISHOECK E F, BRUDERER S, *et al.* A major asymmetric dust trap in a transition disk[J]. *Science*, 2013, **340**(6137): 1199-1202
- [43] ALMA Partnership, BROGAN C L, PÉREZ L M, *et al.* The 2014 alma long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL tau region[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **808**(1): L3
- [44] ANDREWS S M, HUANG J, PÉREZ L M, *et al.* The disk substructures at high angular resolution project (DSHARP). I. Motivation, sample, calibration, and overview[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **869**(2): L41
- [45] LONG F, PINILLA P, HERCZEG G J, *et al.* Gaps and rings in an ALMA survey of disks in the Taurus star-forming region[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **869**(1): 17
- [46] DEMORY B O, DE WIT J, LEWIS N, *et al.* Inference of inhomogeneous clouds in an exoplanet atmosphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **776**(2): L25
- [47] QUINTANA E V, BARCLAY T, RAYMOND S N, *et al.* An earth-sized planet in the habitable zone of a cool star[J]. *Science*, 2014, **344**(6181): 277-280
- [48] SNELLEN I A G, BRANDL B R, DE KOK R J, *et al.* Fast spin of the young extrasolar planet β Pictoris b[J]. *Nature*, 2014, **509**(7498): 63-65
- [49] 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**(7617): 437-440
- [50] GILLON M, TRIAUD A H M J, DEMORY B O, *et al.* Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1[J]. *Nature*, 2017, **542**(7642): 456-460
- [51] GILLON M, JEHIN E, LEDERER S M, *et al.* Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star[J]. *Nature*, 2016, **533**(7602): 221-224
- [52] RICKER G R, WINN J N, VANDERSPEK R, *et al.* Transiting exoplanet survey satellite[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2014, **1**(1): 014003
- [53] YOSHIDA S, VISSAPRAGADA S, LATHAM D W, *et al.* TESS spots a super-puff: the remarkably low density of TOI-1420 b[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **166**(5): 181
- [54] NAPONIELLO L, MANCINI L, SOZZETTI A, *et al.* A super-massive Neptune-sized planet[J]. *Nature*, 2023, **622**(7982): 255-260
- [55] ALDERSON L, WAKEFORD H R, ALAM M K, *et al.* Early release science of the exoplanet WASP-39 b with JWST NIRSpec G395H[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 664-669
- [56] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 649-652
- [57] MADHUSUDHAN N, SARKAR S, CONSTANTINOU S, *et al.* Carbon-bearing molecules in a possible hycean atmosphere[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **956**(1): L13

- [58] MCCAUGHREAN M J, PEARSON S G. A JWST survey of the trapezium cluster & inner Orion Nebula. I. Observations & overview[OL]. arXiv preprint arXiv: 2310.03552, 2023
- [59] POLLACK J B, HUBICKYJ O, BODENHEIMER P, *et al.* Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas[J]. *Icarus*, 1996, **124**(1): 62-85
- [60] BOSS A P. Giant planet formation by gravitational instability[J]. *Science*, 1997, **276**(5320): 1836-1839
- [61] LIN D N C, BODENHEIMER P, RICHARDSON D C. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location[J]. *Nature*, 1996, **380**(6575): 606-607
- [62] RASIO F A, FORD E B. Dynamical instabilities and the formation of extrasolar planetary systems[J]. *Science*, 1996, **274**(5289): 954-956
- [63] HOLMAN M, TOUMA J, TREMAINE S. Chaotic variations in the eccentricity of the planet orbiting 16 Cygni B[J]. *Nature*, 1997, **386**(6622): 254-256
- [64] WU Y, MURRAY N. Planet migration and binary companions: the case of HD 80606 b[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **589**(1): 605-614
- [65] FABRYCKY D, TREMAINE S. Shrinking binary and planetary orbits by Kozai cycles with tidal friction[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **669**(2): 1298-1315
- [66] YOUDIN A N, GOODMAN J. Streaming instabilities in protoplanetary disks[J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, **620**(1): 459-469
- [67] JOHANSEN A, OISHI J S, MAC LOW M M, *et al.* Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks[J]. *Nature*, 2007, **448**(7157): 1022-1025
- [68] ORMEL C W, KLAHR H H. The effect of gas drag on the growth of protoplanets. Analytical expressions for the accretion of small bodies in laminar disks[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, **520**: A43
- [69] IDA S, LIN D N C. Toward a deterministic model of planetary formation. I. A desert in the mass and semimajor axis distributions of extrasolar planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **604**(1): 388-413
- [70] MORDASINI C, ALIBERT Y, KLAHR H, *et al.* Characterization of exoplanets from their formation. I. Models of combined planet formation and evolution[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, **547**: A111
- [71] LIU B B, LAMBRECHTS M, JOHANSEN A, *et al.* Super-Earth masses sculpted by pebble isolation around stars of different masses[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, **632**: A7
- [72] OWEN J E, WU Y Q. *Kepler* planets: a tale of evaporation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **775**(2): 105
- [73] JIN S, MORDASINI C, PARMENTIER V, *et al.* Planetary population synthesis coupled with atmospheric escape: a statistical view of evaporation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **795**(1): 65
- [74] FULTON B J, PETIGURA E A, HOWARD A W, *et al.* The California-*Kepler* survey. III. A gap in the radius distribution of small planets[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **154**(3): 109
- [75] VAN EYLEN V, AGENTOFT C, LUNDKVIST M S, *et al.* An asteroseismic view of the radius valley: stripped cores, not born rocky[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **479**(4): 4786-4795
- [76] BAI X N, STONE J M. Wind-driven accretion in protoplanetary disks. I. Suppression of the magnetorotational instability and launching of the magnetocentrifugal wind[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **769**(1): 76
- [77] LIU Y J, SATO B, ZHAO G, *et al.* A substellar companion to the intermediate-mass giant 11 comae[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **672**(1): 553-557
- [78] WANG S H, ZHANG H, ZHOU X, *et al.* Photometric variability in the cstar field: results from the 2008 data set[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, **218**(2): 20
- [79] ZHANG H, YU Z Y, LIANG E S, *et al.* Exoplanets in the Antarctic sky. II. 116 transiting exoplanet candidates found by AST3-II (CHESPA) within the southern CVZ of TESS[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, **240**(2): 17
- [80] ZANG W C, Jung Y K, Yang H J, *et al.* Systematic KMTNet planetary anomaly search. VII. Complete sample of $q < 10^{-4}$ planets from the first 4 yr survey[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **165**(3): 103
- [81] WU Z X, DONG S B, YI T, *et al.* Gaia22dkvLb: a microlensing planet potentially accessible to radial-velocity characterization[OL]. arXiv preprint arXiv: 2309.03944, 2023
- [82] FENG F B, BUTLER R P, JONES H R A, *et al.* Optimized modelling of *Gaia-Hipparcos* astrometry for the detection of the smallest cold Jupiter and confirmation of seven low-mass companions[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, **507**(2): 2856-2868
- [83] FENG F B, BUTLER R P, VOGT S S, *et al.* 3D selection of 167 substellar companions to nearby stars[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, **262**(1): 21
- [84] ZHU Y T, DOU J P, ZHANG X, *et al.* Portable adaptive optics for exoplanet imaging[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, **21**(4): 082
- [85] XIE J W, DONG S B, ZHU Z H, *et al.* Exoplanet orbital eccentricities derived from LAMOST-*Kepler* analysis[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(41): 11431-11435
- [86] DONG S B, XIE J W, ZHOU J L, *et al.* LAMOST telescope reveals that Neptunian cousins of hot Jupiters are mostly single offspring of stars that are rich in heavy elements[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(2): 266-271

- [87] DAI Y Z, LIU H G, AN D S, *et al.* Planet occurrence rate correlated to stellar dynamical history: evidence from Kepler and Gaia[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(2): 46
- [88] DAI Y Z, LIU H G, YANG J Y, *et al.* Understanding the planetary formation and evolution in star clusters (UPiC). I. Evidence of hot giant exoplanets formation timescales[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **166**(6): 219
- [89] CHEN D C, XIE J W, ZHOU J L, *et al.* The evolution of hot Jupiters revealed by the age distribution of their host stars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, **120**(45): e2304179120
- [90] YANG J Y, CHEN D C, XIE J W, *et al.* Planets across space and time (PAST). IV. The occurrence and architecture of Kepler planetary systems as a function of kinematic age revealed by the LAMOST-Gaia-Kepler sample[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **166**(6): 243
- [91] JIN S, LI S T, ISELLA A, *et al.* Modeling dust emission of HL tau disk based on planet-disk interactions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **818**(1): 76
- [92] HUANG P H, DONG R B, LI H, *et al.* The observability of vortex-driven spiral arms in protoplanetary disks: basic spiral properties[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **883**(2): L39
- [93] HUANG P H, ISELLA A, LI H, *et al.* Identifying anticyclonic vortex features produced by the rossby wave instability in protoplanetary disks[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **867**(1): 3
- [94] HUANG P H, LI H, ISELLA A, *et al.* Meso-scale instability triggered by dust feedback in dusty rings: origin and observational implications[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **893**(2): 89
- [95] JIN S, ISELLA A, HUANG P H, *et al.* New constraints on the dust and gas distribution in the LkCa 15 disk from ALMA[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **881**(2): 108
- [96] WANG W, VAN BOEKEL R, MADHUSUDHAN N, *et al.* Ground-based detections of thermal emission from the dense hot Jupiter WASP-43 b in the H and K_S bands[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **770**(1): 70
- [97] YAN F, HENNING T. An extended hydrogen envelope of the extremely hot giant exoplanet KELT-9 b[J]. *Nature Astronomy*, 2018, **2**(9): 714-718
- [98] CHEN G, CASASAYAS-BARRIS N, PALLÉ E, *et al.* Detection of Na, K, and $H\alpha$ absorption in the atmosphere of WASP-52 b using ESPRESSO[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **635**: A171
- [99] HU Y, YANG J, LIU Y, *et al.* Can water be frozen on the nightside of tidal-locking exoplanets[C/OL]. American Geophysical Union, Fall Meeting 2014. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014AGUFM.P53C4034H/abstract>
- [100] YANG J, DING F, RAMIREZ R M, *et al.* Abrupt climate transition of icy worlds from snowball to moist or runaway greenhouse[J]. *Nature Geoscience*, 2017, **10**(8): 556-560
- [101] YANG J, JI W W, ZENG Y X. Transition from eyeball to snowball driven by sea-ice drift on tidally locked terrestrial planets[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**(1): 58-66
- [102] BAI X N. Global simulations of the inner regions of protoplanetary disks with comprehensive disk microphysics[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **845**(1): 75
- [103] LIU B B, JOHANSEN A, LAMBRECHTS M, *et al.* Natural separation of two primordial planetary reservoirs in an expanding solar protoplanetary disk[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(16): eabm3045
- [104] LIU B B, RAYMOND S N, JACOBSON S A. Early Solar System instability triggered by dispersal of the gaseous disk[J]. *Nature*, 2022, **604**(7907): 643-646
- [105] LIU S F, HORI Y, MÜLLER S, *et al.* The formation of Jupiter's diluted core by a giant impact[J]. *Nature*, 2019, **572**(7769): 355-357
- [106] GE J, ZHANG H, ZANG W C, *et al.* ET white paper: to find the first Earth 2.0[C/OL]. arXiv preprint arXiv: 2206.06693, 2022
- [107] LIU B, JI J. A tale of planet formation: from dust to planets[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**: 164
- [108] JI J H, LI H T, ZHANG J B, *et al.* CHES: a Space-borne astrometric mission for the detection of habitable planets of the nearby solar-type stars[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, **22**(7): 072003
- [109] ZHANG X. Atmospheric regimes and trends on exoplanets and brown dwarfs[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**: 099

作者简介



周济林 男, 1969年12月出生于浙江金华。现为南京大学天文与空间科学学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为天体力学、太阳系动力学、太阳系外行星探测与动力学等。

E-mail: zhoujl@nju.edu.cn