



深空探测之前沿科学问题探析

吴伟仁¹, 王赤^{2*}, 刘洋², 秦礼萍³, 林巍⁴, 叶生毅⁵, 李晖², 沈芳², 张哲^{1,6}

1. 深空探测实验室, 北京 100195;

2. 中国科学院国家空间科学中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;

5. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518005;

6. 北京理工大学宇航学院, 北京 100811

* 联系人, E-mail: cw@spaceweather.ac.cn

2022-06-16 收稿, 2022-10-10 修回, 2022-10-11 接受, 2022-11-03 网络版发表

摘要 深空探测的驱动力源于人类探索未知的天性, 是科学研究的前沿领域之一. 自二十世纪六七十年代的月球探测高潮以来, 人类的深空探测任务已经实现了对太阳系八大行星等主要天体的探测, 获得了大量的科学发现, 同时也发现了更多未解之谜. 进入21世纪以后, 人类深空探测迎来了又一次高潮, 参与探测的国家和探测任务的数量都有了巨大提升, 技术的发展也提高了探测的成功率. 从太阳系形成到生命出现并演化到智慧生物, 太阳系经历了复杂的演化过程, 地球和其他行星环境经历了剧烈变化. 要证实和重建这个过程还有大量科学问题有待回答, 需要依赖更多精密计划的深空探测任务去寻找线索. 太阳系的形成与演化、行星宜居性、地外生命探索等是当前深空探测的核心科学内容. 前太阳系物质组成、太阳系的初始状态、行星系统的形成过程是太阳系形成与演化研究的关键科学问题, 类地行星沿不同路径演化的原因是行星宜居性研究的重要方面. 地外生命探测是深空探测的核心内容之一, 生命的起源与演化、地外生命信号识别、地球极端环境类比等是主要的研究内容. 针对已经计划和正在论证的深空探测任务, 系统梳理其中的前沿科学问题及其研究现状和研究手段, 能够为深空探测任务的科学规划提供参考, 孕育更多的科学发现和前沿突破.

关键词 深空探测, 太阳系演化, 月球, 行星, 地外生命

深空探测通常是指对月球及更远的地外天体进行的空间探测活动^[1]. 深空探测是回答关于我们所处的物质世界和人类生命起源等终极问题的必要途径. 从屈原仰天叩问“日月安属? 列星安陈?”到阿姆斯特朗在月表留下人类足迹并采回样品, 探索未知世界、拓展生存疆域一直是人类文明发展和进步的原动力. 自20世纪60年代阿波罗计划实施以来, 人类进行了240余次深空探测活动, 探测了太阳系八大行星等主要天体并实现了对月球和小行星的采样返回, 这些任务大多是

美国航空航天局(NASA)主导实施的. 深空探测任务返回的数据和样品极大地提高了人类对太阳系的认知, 对科技进步和人类文明的发展具有极为重大的意义. 同时, 探测活动也发现了更多未解之谜, 亟待未来的探测任务和科学研究来解答. 探测更深、更远、更广阔的深空已成为人类航天活动的重点方向^[2].

从21世纪初开始, 中国从无到有开展了对月球和火星的探测^[1]. 嫦娥工程六战六捷, 获取了7 m/像素的高分辨率全月影像, 实现了国际上首次月球背面巡视

引用格式: 吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测之前沿科学问题探析. 科学通报, 2023, 68: 606–627

Wu W R, Wang C, Liu Y, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 606–627, doi: [10.1360/TB-2022-0667](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0667)

探测, 返回了最年轻的月海玄武岩样品. 中国首次火星探测任务天问一号同时实现了轨道环绕探测和表面软着陆巡视探测. 利用探月卫星对图塔蒂斯小行星进行了飞掠探测. 在此基础上, 中国正在论证众多后续的探测计划^[1]. 深空探测中的前沿科学主题包括太阳系起源和演化、行星宜居性(包括宜居地球的形成)、生命起源及地外生命探测等, 梳理和归纳这些科学主题中的前沿科学问题, 能够为我国未来深空探测任务提供启示, 促进获得“更多、更好、更大”的科学发现和突破.

1 太阳系的初始状态和行星系统的形成

揭示太阳系起源与演化是当前开展深空探测的核心科学目标之一. 从太阳星云塌缩到行星系统形成, 太阳系经历了复杂的演化过程(图1), 要证实和重建这个过程需要通过深空探测任务在当前的太阳系中寻找蛛丝马迹. 前太阳系物质、太阳系的初始状态、行星系统的形成是主要研究内容. 月球是距离地球最近的天体, 是研究其他天体和开展更远深空探测的前哨站, 对深空探测技术验证和研究太阳系的起源与演化具有特殊意义.

1.1 太阳系的初始状态

目前关于太阳系形成的最为广泛接受的模型是星云模型^[3,4](图1): 太阳星云塌缩收缩, 大部分气体形成中心星, 有一部分气体和尘埃由于自转和离心力无法向中心靠拢, 形成原行星盘, 行星盘在赫姆霍兹收缩作用下不断被加热; 太阳形成之后, 赫姆霍兹收缩作用停止, 气体开始冷却, 不同的物质根据熔沸点的高低先后凝聚出来, 这些物质经历静电胶结和重量不稳定等作用形成小行星, 小行星相互碰撞最终形成行星. 太阳系的原始状态、物质组成以及其在原行星盘上的分布很大程度上决定了各类行星的物质组成和形成过程. 围绕着太阳系初始状态和行星盘物质分布, 前人已经通过大量的研究工作取得了很多新的认识, 但一些关键科学问题仍需要进一步研究.

1.1.1 前太阳系颗粒与星际尘埃

太阳星云物质是由多种前太阳恒星核合成过程的产物混合而成. 这些核合成过程的产物来自不同的前太阳恒星, 被吸积到太阳星云区域. 早期认为太阳系形成过程中的高温环境足以破坏掉前太阳系颗粒物质, 然而随着在球粒陨石中发现了具有极端同位素异常的

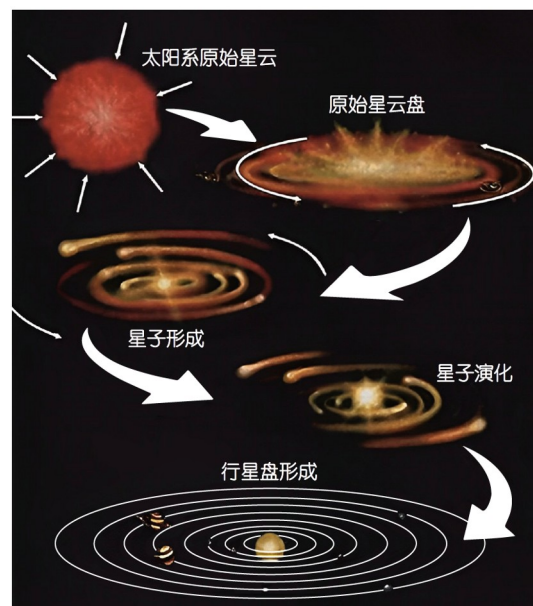


图1 太阳系的初始状态和行星系统形成过程. 原始星云团发生重力塌缩, 形成中心星和原始星云盘, 星云盘内的物质吸积、碰撞形成星子, 星子进一步演化形成行星, 后经轨道迁移重新排布构成现在的行星系统. 修改自文献^[3]

Figure 1 Initial state of the solar system and formation of planetary systems. After the formation of the proto-Sun and protoplanetary disk with cooling and the contraction of the nebula, the evolution processes include dust condensation, planetesimal formation, planet formation, and orbital migration and rearrangement. Image modified from Ref. [3]

前太阳系颗粒, 逐渐打破了传统认识^[5-8]. 前太阳系颗粒既保留了恒星演化的信息, 也是构成原始太阳星云的重要初始物质之一, 是太阳星云演化的基础. 目前已发现的前太阳系颗粒有十余种, 指示了多种恒星来源. 人们发现不同化学群陨石中前太阳系颗粒的丰度相似, 但却不同于采集的行星际尘粒和彗星物质; 而不同恒星来源颗粒的贡献比例在不同小天体中也有差异. 但是, 前人对前太阳系颗粒的研究还主要集中在碳质球粒陨石中, 其代表的是原始行星盘中相对氧化环境的物质组成, 目前仍缺少对极端还原环境中物质组成的研究. 另外, 近十几年来, 随着现代质谱仪的高速发展, 大量的研究发现并证实了在陨石全岩尺度上(也即行星尺度上)存在同位素异常^[9-12]. 虽然全岩同位素异常的变化范围非常小, 但已经成为研究行星物质间继承关系的“指纹”依据. 对于全岩同位素异常产生的原因, 有研究认为这反映了前太阳系颗粒初始分布的不均一性, 也有研究认为反映了星云上发生的热作用对一部分前太阳系颗粒进行了选择性地破坏. 最新的研究表明, 太阳系物质存在着两个同位素异常特征截然不同

的储库^[13], 然而对这两个储库的形成机制现有的研究还没有得到一个清楚的认识.

关于前太阳系颗粒与星际尘埃最重要的科学问题是原始星云盘中前太阳系颗粒的物质组成与空间分布, 以及太阳系行星物质同位素储库二分性(从同位素组成来看, 太阳系行星物质来自两个同位素组成截然不同的储库)的形成机制. 其主要研究内容包括: 鉴别前太阳系颗粒, 识别类型和特征, 分辨恒星来源, 约束不同质量恒星内部的核反应过程以及恒星的形成与演化过程; 研究不同类型前太阳系颗粒在各类小天体的丰度, 确定不同恒星来源物质的相对比例, 认识原始太阳星云的物质组成, 探讨原始星云盘中初始物质的空间分布以及后期的蚀变历史, 反演原始太阳星云盘不同位置星子的物质来源、形成与演化过程; 结合核合成来源不同、化学性质不同的元素的同位素异常研究来制约同位素异常的来源; 研究不同类型陨石的同位素异常特征, 结合同位素定年结果, 认识同位素异常的时间和空间分布规律, 对行星物质同位素储库二分性的原因进行进一步的制约.

1.1.2 水和其他挥发分的分布

水、碳、氮等挥发分的含量是影响行星宜居环境、地质活动、生命演化的关键要素, 因此太阳系形成早期挥发分的时空分布一直是地球科学和行星科学的研究热点之一. 根据模型估算, 类地行星的增生区域(即内太阳系)是贫水的, 现有研究普遍认为, 类地行星挥发分主要来自后增生过程, 即原始行星在核幔分异后小行星或彗星等富含挥发分的物质加入所致^[14,15], 但是对增生发生的时间、机制以及物质来源还没有达成共识. 此外, 目前对各类小行星中水的来源、赋存状态还存在着诸多的争议.

未来需要进一步厘清太阳系初始挥发分的分布, 探明类地行星挥发分的后增生过程、来源和机制. 主要研究内容包括: 不同类型小天体中水的赋存状态和来源, 反演挥发分的演化历史; 类地行星挥发分后增生发生的时间和持续时间, 如地球、月球、火星、灶神星等天体后期增生事件的同位素年代学和同位素示踪; 挥发分后增生的物质来源和性质, 地球等分异型天体的氢、碳、氮、硫等挥发分的来源, 地外物质的高精度同位素分析等; 挥发分后增生的机制, 综合天体动力学、天体化学、天体物理、计算机模拟等学科, 剖析后增生过程的动力学机制, 模拟后增生对行星演化的影响等.

1.1.3 太阳系早期物质的凝聚和分异历史

一般认为, 太阳系行星系统的形成经历了3个阶段: 太阳星云的凝聚和吸积形成小星子; 小星子的碰撞聚合形成原行星; 原行星之间的碰撞形成了太阳系. 近20年来多种灭绝核素体系(如 ^{26}Al - ^{26}Mg 、 ^{53}Mn - ^{53}Cr 、 ^{182}Hf - ^{182}W)得到了长足的发展和广泛的应用, 极大地推动了太阳系早期事件的年代学研究, 使得我们在太阳系中不同行星物质的凝聚和分异时间以及行星形成各个阶段所对应的时间等方面的研究中取得很多新突破^[16-18]. 但随着同位素分析水平的提高, 更加系统和精细的研究工作亟待开展. 另外, 地外样品的非传统稳定同位素测量为各种行星过程(包括星云的凝聚和挥发以及行星的分异过程)提供了新的制约^[14,19].

为了进一步厘清太阳系早期物质的凝聚和分异历史, 主要研究内容包括: 通过更加系统、准确的太阳系早期物质凝聚与分异历史的短半衰期同位素定年结果(如短半衰期同位素体系宇宙射线辐射效应的定量校正、多短半衰期同位素体系结果的系统整合), 制约不同类型小天体物质吸积时间和分异时间, 进一步认识太阳系行星形成与演化的起点, 评估其对太阳系后续演化过程的影响; 测定星云物质和类地行星的非传统稳定同位素组成, 进一步制约星云原始物质组成, 结合高温高压实验模拟, 探讨各类行星过程, 例如挥发与凝聚、核-幔和壳-幔分异过程, 对不同同位素体系分馏的影响.

1.1.4 太阳系早期碰撞历史

撞击作用是太阳系行星形成和演化过程中最重要的物理过程之一. 各类陨石中广泛存在的冲击变质现象, 水星、月球和火星表面遍布的撞击坑, 以及地球大气圈、水圈和生物圈的形成等都与小天体的撞击作用有密切关系. 因此, 研究小行星的冲击碰撞对认识太阳系的演化历史也具有重要的科学意义. 虽然我们目前对月球的后期撞击历史有了比较充分的研究, 特别是月球在后期41~38亿年经历了一次(或多次)小行星密集撞击事件^[20], 但对最早期的小行星撞击历史研究不足. 有学者根据现有的放射性同位素证据指出巨星的迁移开始于~44.8亿年前, 由此导致了太阳系小行星的剧烈扰动和大量撞击事件, 模型估算这个时期外来物质加入地球的通量最高, 随时间递减^[21].

太阳系早期碰撞历史是研究太阳系早期演化的重要科学问题. 目前, 学界对于太阳系的小行星撞击历史这一科学问题的认识仍然存在很大不足, 主要原因是

已有的研究工作很大程度上集中在月球样品, 采用的定年方法也比较单一(K-Ar法为主)。应优先开展针对太阳系的小行星撞击历史的研究, 力争在前人工作的基础上, 通过对各种类型的陨石样品开展以同位素年代学为主的综合研究, 并结合行星动力学理论模拟, 揭示太阳系形成以来小行星撞击事件的年代学特征和演化规律。

陨石是现阶段研究太阳系和类地行星演化起点最主要的研究对象。陨石大部分来自小行星带, 由于体积小、热历史短暂等因素, 其演化进程“冻结”在太阳系早期。其中一些未分异陨石(如碳质球粒陨石)保留了太阳系演化初始阶段和类地行星原始物质组成的信息, 而经历了岩浆作用的分异陨石样品种类繁多, 反映了不同条件下的分异过程(核幔分异、壳幔分异)。除了陨石, 对小行星直接原位观测和采样能获得未经地球大气和风化改造的小行星信息, 目前隼鸟二号已经成功返回了龙宫小行星样品, 多方面研究正在开展之中; 美国的奥西里斯-REx已经成功对本努小行星进行采样并将在2023年返回地球; 我国也计划2024年对近地小行星2016HO₃进行采样返回并对主带彗星进行探测。随着这些小行星探测计划的顺利执行和相关科学研究的开展, 我们将对太阳系的初始物质状态获得更深刻的认识。最后, 利用多种方法(如空间站的星际尘埃采集装置)收集的宇宙尘和星际物质也是太阳系原始物质研究的辅助研究对象。

1.2 行星系统的形成

生命起源需要行星或其卫星已成为人们的基本认知。为了了解宇宙中生命可能的分布, 研究行星系统的形成和演化过程是非常重要的一环。基于大样本的系外行星系统的观测可管窥行星系统演化所处的不同阶段, 进而揭示行星系统形成与演化的全貌, 追溯太阳系的起源与早期演化历史, 从而为行星形成相关理论模型提供约束。行星形成过程研究涉及多种不同尺度与物理机制, 研究对象的尺度跨度可达17个数量级, 从亚微米级的尘埃颗粒到超过 10^4 km的超级地球或气态巨行星。在不同的尺度与不同的生长阶段, 起作用的物理机制也有所不同^[22]。随着观测技术的发展与观测数据的积累, 人们对行星形成理论的研究取得了很大进展, 但仍有一些关键科学问题需要未来的探测任务来解决。

1.2.1 气态巨行星的成核过程与轨道迁移

要形成类似木星的气态巨行星, 首先要求在原行

星盘内还有大量残留气体前就形成足够质量的固体核(如~10倍地球质量), 这样才有足够的引力将周围的气体快速地吸引过来^[23]。根据核吸积模型的估算, 木星内核生长和吸积气体过程持续时间小于5百万年, 在此过程中需要原行星盘持续提供气体物质以供包层质增长。但是目前的观测研究表明, 年轻恒星周围原行星盘的平均寿命是3~5百万年, 且有一半观测到有行星盘的系统, 其行星盘寿命只有3百万年^[24]。研究者试图用卵石吸积理论来解释气态巨行星内核(十多个地球质量)的形成过程。核吸积模型表明, 原行星盘中有大量在恒星形成初期生成的尘埃和卵石, 星子形成后与气体盘之间的角动量交换将使其发生轨道迁移, 进而逐渐接近或远离中央恒星。星子经历轨道迁移过程中, 将进一步通过引力吸积行星盘中的尘埃和卵石, 像滚雪球一样迅速变大, 最终长成构建气态巨行星的内核^[25]。

现有的行星形成模型可以很好地解释太阳系的行星分布规律, 但是却面临着系外行星观测结果的挑战。以太阳系作为参考会发现, 近距离轨道上分布的都是岩石质行星, 而气态巨行星则都出现在远距离轨道上。太阳形成后, 在其引力作用下, 原始星云盘中较重的物质被吸引到距离太阳更近的区域, 这导致外太阳系的4颗行星在形成之初就主要以气体元素(氢、氦)为主。太阳形成后, 向外持续辐射高能粒子, 即太阳风。现今的观测结果表明, 太阳风可能具有足够的强度来吹走靠近太阳的4颗行星周围的大多数气体, 导致这些雪线以内的行星相对都比较小, 并且只有岩石和金属组分能够较完整地保存下来。外太阳系的4颗巨行星因为距离太阳比较远, 质量大、引力强, 束缚其外层大气, 太阳风的强度不足以吹走这些行星周围的冰和气体, 最终这4颗行星整体以气态形式存在。

迄今, 发现的大量系外行星呈现为大小不一、形态各异的族群, 通常可分为气态巨行星、冰巨星、类地行星(岩石行星)等。此外, 还包括一些特殊的热木星、超级地球等, 揭示了行星形成过程具有多样性和复杂性。尤其是热木星的发现, 这类行星具有与木星相当的质量与半径, 但是其非常靠近中心恒星, 并且轨道周期只有几天。现有行星形成理论模型难以解释热木星的存在, 在如此近距离的轨道上, 来自中心恒星的强烈辐射通常会使气体物质难以聚集。另外, 一般认为, 形成巨行星所需的固体核只有在较远距离轨道上才有可能快速地形成, 因为低温环境中, 星子中水冰占比较多, 在碰撞时有更大的黏附性, 从而加速吸积增生过程。

一种观点认为, 这些热木星是形成于距离恒星较远的轨道, 是后期才迁移到距离恒星较近的位置^[26]. 要解决这一问题, 就需要利用地基和太空望远镜进行更多的天文观测, 尤其是对处于不同演化阶段的系外热木星进行观测, 获取这些行星的质量和大气组成, 进而推测它们的形成和演化过程.

1.2.2 行星形成过程中的径向漂移屏障

径向漂移是行星形成理论中面临的另一大挑战, 一般随着尘埃颗粒逐渐增生, 在环绕原行星盘运动的过程中, 尘埃所受盘中气体的阻力也逐渐增大. 初期微米级的尘埃可通过表面范德华力和静电作用碰撞粘在一起生长, 当颗粒增长到足够大(比如: 1 mm量级或更大)时, 由于气体的轨道速度与固体物质的速度不同, 盘内的固体颗粒将会发生径向漂移, 最终这些固体颗粒会运动到中央恒星表面, 以致无法生长成星子或行星. 径向漂移是否存在可通过对云盘中尘埃与气体的分布进行观测来确认. 尘埃盘与气体盘的大小可以通过毫米尘埃连续发射谱与CO同位素分子线发射谱来进行区分. 通常观测到的尘埃云盘尺寸要比气体云盘尺寸大很多, 表明毫米级颗粒的径向漂移已经发生^[22]. 另外, 在原行星盘中观测到的一些次级结构也表明了径向漂移的存在, 如空洞、环带结构与缝隙.

卵石级颗粒的径向漂移也导致气体云盘中的化学组分呈径向分布. 例如: 原行星盘中CO分子在CO冰点线外会凝结成固体, 但是在冰点线内会升华成气体. 由于一部分C被保存在难熔物质中, 如果没有径向漂移的话, 气体云盘内部到CO冰点线范围内的物质C/H比应该会比恒星的比值(stellar value)要低. 但是, 随着卵石颗粒持续向内迁移, 并且跨过了CO冰点线, 大量的C被带到了冰点线内侧并升华成了气体, 从而使得冰点线内侧物质的C/H比增大^[27]. 最新的观测与研究结果证实了大规模径向漂移的存在^[28].

为了解行星形成理论中的这一难题, 人们提出了不同的猜想, 其中被广泛接受的一种可能机制是: 尘埃捕获(dust trapping)机制, 即原行星盘中能长期存在的涡流将捕获的尘埃颗粒困住以阻止其漂移向盘内侧^[19,29]. 在存在湍流的盘里, 尘埃可在局部聚集形成密度足够高的区域(局部密度可达平均密度的80多倍), 然后经由盘引力不稳定性塌缩形成星子. 以往的观测设备很难观测到此类现象, 但是利用阿塔卡玛大毫米/亚毫米阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)对猎户座V1247星云的观测结果显示, 该星

云包含了一个呈环形、非对称的内盘组分, 以及一个尖锐的呈新月形的结构, 这很可能就是预测中的尘埃旋涡^[30]. 未来更高分辨率的观测数据或将为这一猜想提供更多的支撑. 例如, 如果上述机制是真实存在的, 那么在毫米波段将可以观测到原行星盘中存在特定明亮的非对称结构. 若能获取处于不同演化状态的系外行星盘的结构与物质分布特征等, 将为行星形成理论的发展提供重要支撑.

1.2.3 太阳系内小行星的时空分布演变

在类地行星与气态行星之间存在大量的小行星, 包含了太阳系形成后残存下来的石质、冰及金属质小天体. 小行星区的初始物理-化学条件导致该区域星子生长慢, 可吸积的物质被转移到木星区, 因而星子生长到半成品状态就停顿了, 不能形成大行星. 由于轨道的变化, 小行星带内不断有小天体撞击到内太阳系行星表面. 这些撞击一方面显著改造了行星表面的环境, 一方面可能带去了大量水或其他与生命起源有关的物质. 同时在地球生命漫长的演化历史中, 来自小行星带天体的撞击也可能导致了物种灭绝事件. 通过巡天光谱观测, 我们可以大致了解现今不同类型小行星的分布, 但在这之前各类小行星的分布是怎样的? 撞击到地球等类地行星的小天体类型是怎么演变的? 这些问题对了解太阳系内各天体的轨道演化具有重要意义. 月球上保留了大量的撞击记录, 通过在月壤中寻找以往的撞击体残留物, 或可作为探索上述问题的重要途径.

通过研究前太阳系颗粒、行星幔部陨石、球粒陨石与难熔包体的样品, 可以重塑太阳系形成与演化不同阶段的物理化学条件, 从而为行星形成与演化相关研究提供重要参考. 通过观察前太阳系颗粒的外层与核部的成分差异可以了解在星际环境中所发生的化学过程. 类地行星的形成过程持续时间可以通过短周期放射性同位素元素来进行测定. 其中Hf-W同位素体系被广泛采用, 通过测定现今地球幔部的Hf/W比例可以用来约束行星核部的形成与分异程度. 相关研究表明: 地球核部形成于太阳系形成之后的30~100百万年间^[22]. 基于火星陨石的分析结果表明: 火星形成过程的持续时间在几百万年以内^[22], 与原始太阳星云的存在时间相当. 陨石可以提供研究太阳系早期颗粒生长的关键证据. 在最原始的陨石中存在一些亚毫米至厘米级富含钙铝的包体(calcium-aluminium-rich inclusion, CAI). 这些难熔包体被认为是从早期太阳系星云中凝结的最早固体物质. 基于Pb-Pb同位素的定年分析显示,

这类CAIs形成于45.67亿年前^[31]。CAIs的尺寸可以支持凝聚驱动增生猜想(coagulation-driven growth of condensates)。另外,在球粒陨石中还存在具有火成结构的球状体。这些球粒的典型尺寸在0.1~1 mm之间^[32]。年代学研究表明,有一小部分球粒的形成时代可能与CAIs一样早,大部分球粒形成于CAIs形成之后的2~4百万年间^[31]。这类球粒与CAIs的存在表明太阳系中存在颗粒生长这一过程。

为了更好地了解行星的形成与演化过程,有必要在深空探测任务规划中布局针对火星、小行星等的采样返回任务。此外,在空间站上组建星际尘粒收集平台将极大地扩充与行星形成时间相关的研究样本。

1.3 月球的形成与演化

作为地球唯一的卫星,月球是人类走向深空的前哨站,对其开展探测和研究有助于认识地月系统的过去、现在和未来,对太阳系的形成和演化以及地球生命的生存条件与走向有重要的研究价值。自二十世纪六七十年代美国阿波罗计划实施以来的50多年里,我们对月球形成和演化的认识取得了重大进展,但探索未知、获取新知识永无止境,一些尚未解决的重大科学问题仍需要后续的一系列探测任务来逐一解答。

1.3.1 月球的形成与内部结构

首先是关于月球形成和初始状态的重大科学问题。这些问题的不确定和多解性造成之后一系列问题存在多种演化路径。月球形成的大碰撞成因模式已基本确立^[33],但大碰撞事件的发生时间即月球的年龄还存在争议,也无法进一步回答地月系统究竟是形成于一次什么样的碰撞,迫切需要发展新的模型理论并确定月球的物质主要来源于碰撞体还是地球。目前,多数研究结果认为月球形成于45亿年前,即太阳系形成之后的30~60百万年内^[34]。但数值模拟结果认为,月球早期的岩浆洋冷却固化时间在几十百万年内,按照最后残余富含不相容元素岩浆的成岩时间约43.5~44亿年推算^[35],月球有可能形成于44.2亿年之前^[36]。来自月幔、无后期污染和改造的样品可以解决这一问题,比如大撞击事件有可能挖掘出上月幔的物质,对来自月幔样品的同位素测量可以确定月球是形成于45亿年之前还是之后^[35]。经典的月球大碰撞模型^[33]无法解释地月系统的同位素一致问题,虽然后续一系列模型尝试通过寻找能够使形成月球的物质大部分来源于原始地球地幔的碰撞方式^[37,38],从而满足同位素组成一致的约束

条件,但这些模型又产生了“角动量过剩”等新的缺陷。大碰撞数值模型和理论还不能完全解释月球形成的机制,大碰撞理论的各种约束条件和过程机理还需要更深入地研究和探讨^[39],比如月球内部水和挥发分的制约。因此,进一步甄别月球形成的大碰撞事件的初始状态和物理参数无疑是现今大碰撞领域亟待解决的问题。

其次,月球内部结构的研究不仅对研究月球起源与演化有重要意义,而且对研究太阳系其他类似天体的内部结构同样具有重要意义。岩浆洋假说是美国阿波罗计划最重要的成果之一^[40]。岩浆洋初期结晶橄榄石和辉石形成原始月幔,当70%~80%岩浆洋结晶完成时,斜长石开始结晶,并浮到岩浆洋表面形成斜长岩月壳^[41]。这个标准模型可以解释很多月球一级地质地球化学和地球物理特征,比如月海玄武岩表现为Eu异常^[42]。岩浆洋过程奠定了月球的基本圈层结构。但对具体的过程还存在诸多争论,比如,斜长岩月壳的成因及不均一性(地形地貌、表面元素分布以及月壳厚度等)、月球内部水和挥发分对岩浆洋演化的制约、月球内部圈层结构的精确限定等。目前的主流观点认为:(1)月壳平均厚度约为30~40 km;(2)上下月幔的分界线约在深度500 km处,并在1000 km深度可能存在一个熔融层;(3)月核的推测半径可能为150~360 km,但月核的固、液状态还没有定论。要解决以上科学问题,需要更为精准的重力、磁场和月震等多源物理场数据,建立相应的理论模型,精确测量月球内部分界面位置及空间变化细节,并辅以热力学模拟实验和高温高压实验为月球岩浆洋结晶分异过程提供约束。

1.3.2 月球的撞击历史与热演化

月球撞击坑年代学和返回样品、陨石同位素测年方法建立的月球热演化历史也是认识月球和太阳系其他固态天体演化和地质史的基础。月球是目前唯一具有定点采样的类地天体,Apollo、Luna和我国嫦娥五号任务返回的样品提供了几个月球地质单元的同位素年龄。将这些样品与相应的地层联系起来,并统计这些地层上原生撞击坑的大小-频率分布,即可得到年代学方程和撞击坑产率方程,用以估算其他地质单元的绝对年龄。通过校正月球与太阳系其他天体表面的撞击频率,此套定年技术也在其他天体上广泛使用,获得的年龄信息对建立天体地球化学和地球物理演化模型至关重要。关于目前撞击通量建立的年代学曲线,行星科学界存在的主要争议包括:(1)撞击体类型及来源以何种方式发生变化,距今约39亿年前是否存在撞击通量

峰值(即晚期大轰炸^[43]),还是自从行星吸积阶段末期开始撞击通量呈持续单调递减趋势^[44]; (2) 现有撞击年代学函数的准确性有待考验, Apollo和Luna返回的样品缺乏38亿年前及31~10亿年的定标样, 虽然嫦娥五号样品提供了时间节点约20亿年的定标样, 但仍需未来探测任务补充更多不同地点和年龄的样品才能精确标定和优化现有撞击通量年代学曲线。

月球最早的火山作用始于岩浆洋事件末期, 即43亿年之前, 但月球年轻火山作用的时间下限依然未知, 也是月球科学领域长期存在的研究热点。目前的热演化模型显示月球火山作用止于20亿年之前^[45], 这与中国嫦娥五号返回样品的实验室同位素定年结果一致^[46,47]。但撞击坑统计定年分析^[48]和小型火山地貌形貌学测量分析结果^[49]显示月球火山作用可能延伸到距今10亿年内。对一个小型石质天体而言, 如何保持如此长时间的热演化历史? 驱动机制和热源是什么? 这些问题的解决对正确认识月球演化进程、热演化历史和建立月球热演化模型至关重要。要解决月球热演化进程中的年代学问题, 需要对月球撞击坑年代学曲线进一步修正和完善, 而解决该问题的关键是: 遥感观测和分析提供月表潜在的研究目标, 着陆巡视或采样任务对其进行就位勘查、采样返回以及实验室分析, 结合已有科学认知和理论分析, 我们可以建立更为准确的月球热演化模型和历史。

1.3.3 月球的空间环境

月球代表的是一类无气体天体, 它没有浓密大气和全球性磁场保护, 来自周围的太阳风粒子、银河宇宙线、太阳光以及微流体星体等可以直接轰击月面, 并与月表相互作用, 形成了月表复杂的辐射、气体、等离子体、电磁场以及尘埃环境。月球的辐射环境相对来说比较恶劣, 根据嫦娥四号最新观测结果, 月表平均辐射剂量当量为 $1369 \mu\text{Sv/d}$ ^[50], 约为国际空间站剂量当量的2.6倍, 因此在未来探月任务中需要做好辐射防护。另外, 月球虽然没有浓密大气, 但是有稀薄的气体外逸层, 目前已经探明的气体成分有He、Ne、Ar、N₂、CO、CO₂、Na、K、Al、Ca、Fe等, 其中惰性气体占主导, 月表附近数密度可达 104 cm^{-3} , 特征高度约为 10 km ^[51]。月球等离子体环境按尺度可分为大尺度环境和小尺度环境两类。大尺度空间环境包括月球周围的太阳风、地球风以及它们与月球相互作用形成的月球尾迹等^[52]。小尺度空间环境包括太阳风与月表局部剩磁相互作用形成的微磁层^[53]以及靠近月面的等离子

体鞘^[54]等。目前月球微磁层的观测数据多来自卫星观测, 获得的主要是微磁层的磁鞘区, 微磁层内部结构以及它与月面漩涡现象之间的联系都不是很清楚, 有待未来更多探测数据进一步研究。月面等离子体鞘是伴随月面带电而形成的: 在向阳面, 月面电势约为正几伏; 在靠近晨昏线附近, 月表可带负几十伏电势; 在背阳面, 随着周围电子温度的升高, 月表电势可达 -1000 V ^[55]。月表带电会使月表尘埃粒子在静电排斥力作用下离开月面, 形成月面附近稀薄的尘埃外逸层^[56]。阿波罗时期观测到的地平辉光现象表明, 尘埃外逸层密度在 10 km 高处约为 10^4 m^{-3} 。然而, 后续探月任务都没有发现类似辉光现象, 因而月球地平辉光现象的成因一直是个谜^[57]。最近, 有学者发现, 在晨昏线附近撞击坑周围, 尘埃密度会局部增强, 从而提出地形遮挡带来尘埃静电喷泉理论, 并用该理论成功解释了阿波罗时期观测到的地平辉光现象^[58]。此外, 与地形遮挡类似, 人类探测器周围也可能存在局部遮挡效应, 并造成探测器周围电场和尘埃活动的增强, 这将给月面电场及尘埃密度的就位测量带来影响。同时, 这些局部加密的尘埃颗粒也会对人类健康及探测仪器造成伤害。因此, 在未来月面探测任务中, 我们需要对局部遮挡效应的影响区域及程度进行定量评估, 以避免它对仪器测量及人类健康带来的影响。

2 行星宜居性演化

理解行星宜居性演化是当前开展深空探测的另一个核心目标。太阳是影响宜居性的重要因素, 瞬时爆发的太阳活动能够对太阳系空间环境产生重大影响。太阳系各个行星具有不同的环境及演化过程, 虽然目前只能确认地球上存在生命, 但其他天体在演化过程中也可能具有宜居性条件, 理解这些天体的宜居环境演化对理解宜居地球的形成和演化具有重要意义。

2.1 太阳与日球层

太阳在其演化的不同阶段能够产生直接影响地球生命演化的高能粒子, 因此太阳的状态及其演化特征对地球和行星宜居性有着显著影响。太阳表面由于高温电离产生的磁化等离子体被称为太阳风。高速太阳风吹过太阳系行星轨道后, 与邻近星际介质相互作用形成了包裹太阳系天体的巨大磁化等离子体泡, 称之为日球层, 其边界距太阳 $80\sim 150 \text{ AU}$ (1 AU 为太阳到地球的平均距离, 约 1.5 亿km)(图2)。日球层将太阳系的行

星及其磁层和大气层(如果存在的话)包裹起来,控制着它们的结构、动力学和辐射等级,也保护着地球和其他行星免遭来自遥远宇宙高能宇宙射线的轰击,对行星宜居性有巨大的影响。

2.1.1 太阳活动与空间环境

源自瞬时爆发太阳活动的物质,如日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)、太阳高能粒子(solar energetic particle, SEP)等,通常会引起日地空间环境的剧烈变化,对地球的空间环境带来灾害性影响,被称为空间天气(space weather)^[59]。太阳活动所产生的电磁和粒子辐射不仅主导着近地空间环境的变化,也对地球气候和人类活动等产生重要的影响。太阳爆发活动及其对行星际空间造成的扰动,也是影响宜居带行星空间环境的外部关键因素,由此造成的行星空间环境扰动将进一步影响行星宜居性。近年来,围绕太阳物理、太阳活动及空间天气的研究已经取得一系列重要进展,然而仍然存在一些亟待解决的关键科学问题。

近年,国际上连续部署了一系列太阳及日地系统方面的探测计划,如太阳和日球层天文台(SOHO^[60])、日地关系天文台(STEREO^[61])、太阳动力学天文台(SDO^[62])、帕克太阳探针(PSP^[63])、太阳轨道探测器(Solar Orbiter^[64])等多个探测计划。这些计划利用不同波段谱线,不同区域成像探测以及行星际磁场和等离子体的就位探测等方法,在太阳磁场与活动周的演化、日冕加热机制、太阳风起源、太阳爆发活动的触发机制及传播演化规律、灾害性空间天气事件的起源

和预报等关键科学问题上都取得了一系列重要进展,但还有待继续研究。

首先,在太阳活动周的起源和演化研究方面,人们通常认为其与太阳发电机理论相关^[65]。有学者曾尝试解释百年来最弱的第24太阳周的产生机制并对该机制对太阳周预测的影响进行了分析^[66]。基于太阳内部动力学和太阳表面的磁场探测对研究太阳活动的起源和演化是非常必要的手段,然而目前由于探测手段有限,观测数据多为沿日地方向的单点观测,缺乏多视角、多角度的观测是制约太阳活动周起源、日冕加热机制等研究中亟待解决的问题。

其次,太阳爆发活动的触发机制和传播研究方面也取得了若干重要突破。借助于高分辨率高精度的矢量磁场探测数据和紫外成像图像,人们利用日冕三维磁场外推方法定量给出磁场能量和拓扑结构在太阳爆发过程中的演化、重建并模拟了CME源区日冕磁场的观测特征,提出多种太阳爆发模型并模拟重现了多种爆发伴随的观测特征^[67,68]。基于已有的探测数据,人们对CME的动力学演化、CME偏转、相互作用过程以及对地效应等方面有了重大发现,并建立了一系列研究和预报模型^[68~71]。同时,人们对SEP在日冕和行星际空间传播及加速过程方面的研究也有了突破性进展。例如,利用多点探测数据分析指出,激波加速形成的SEP可以在大范围内影响行星际空间环境,提出行星际CME中SEP通量异常增强主要是由于激波与CME相互作用等引起的^[71]。然而在以上研究中,关于CME、SEP

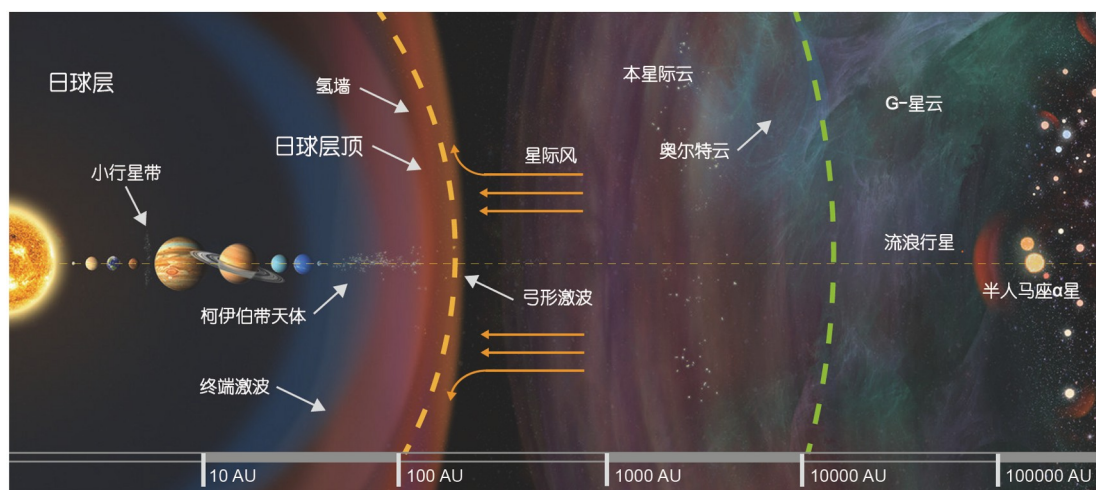


图2 太阳活动及其影响的行星际范围. 改自Charles Carter/Keck Institute for Space Studies, <https://www.nasa.gov/feature/jpl/interstellar-crossing-the-cosmic-void>

Figure 2 Solar activity and planetary environment. Image modified from Charles Carter/Keck Institute for Space Studies, <https://www.nasa.gov/feature/jpl/interstellar-crossing-the-cosmic-void>

等太阳爆发活动的起源、太阳爆发活动对地球及其他行星上游太阳风参数的影响,以及近地空间、行星际空间的变化对人类的影响等关键科学问题仍然尚未解决,仍需结合未来更多的探测任务来实现。如,中国最近发射的太阳综合探测卫星——先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S),以及未来的多角度全方位太阳观测卫星群——太阳环计划(Solar Ring)等^[72]探测任务,有望得到更为丰富、更高分辨率、全日面以及太阳高纬的观测数据。

2.1.2 日球层

早在20世纪70年代末,美国NASA就发射了旅行者1号和2号飞船,开始了探索日球层的漫长之旅。尽管旅行者1号和2号已相继穿过日球层边界进入星际空间,极大地拓展了人类对太阳系天体和外日球层甚至日球层边际的认识,但仍有一些科学谜团有待解决^[73]。

首先,日球层内太阳风的动力学过程和特性仍有待揭示。观测表明,太阳风在外日球空间传播过程中会不断地减速,并且其温度的衰减要慢于绝热过程的温度变化^[74]。这种局地加热过程与太阳风湍流以及拾起过程的关系、背后的物理过程和机制仍有待深入研究。此外,异常宇宙线的强度在日球层鞘区中还在不断增加^[75],终止激波下游仍保持“超声速”^[76]等,这些现象都大大超过科学理论预期,仍待更先进载荷的就位探测来研究。其次,对邻近星际空间环境特性仍缺乏深入认识。一些遥感反演的方法发现,日球层边际的星际H、He和O的丰度分布并不重合^[77]且不同环境下的Ne/O比也不相同^[78]。星际磁场的就位探测还相当缺乏,旅行者号的磁场探测结果还存在很大的不确定性^[79]。此外,太阳风与星际介质相互作用规律仍不清晰。日球层整体结构似乎偏离地球磁层的“水滴状”,而更接近球形^[80],日球层外没有发现典型的弓激波结构^[81],能段在1 keV左右的能量中性原子在日球层边界存在明亮飘带状(ribbon)分布结构^[82],这些现象也与传统理论预测不相符合。星际介质的电离率对日球层结构和位置的具体影响等,也亟待新的观测和理论认知。

为了深入理解太阳风动力学演化及其与星际介质相互作用机制、太阳系演化与外太阳系天体分布特征等日球层物理的重要科学前沿问题^[73],国际上提出了一系列关于日球层边际和邻近星际空间探测的卫星概念,如美国最新的星际探针计划^[83],以及中国的太阳系边际探测计划^[2],旨在通过专门设计的先进载荷的就位观测,探索新发现、提供新认知。

2.2 行星环境与演化

行星环境及其演化规律与行星的宜居性和生命起源密切相关,是开展深空探测的重要内容和科学研究目标。太阳系行星主要包括内太阳系类地行星(水星、金星、地球和火星)和外太阳系巨行星(木星、土星、天王星和海王星)。它们的成分、结构、地质活动和空间环境等是否在一定时期满足宜居性,蕴含着理解宜居地球形成和生命起源与演化的关键信息。

2.2.1 类地行星

水星、金星和火星同地球一样具有硅酸盐成分的壳层,是太阳系的类地行星。火星是距离地球最近的类地行星,火星和地球存在多个相似之处,位于太阳系的潜在宜居带,但如今火星成为大气稀薄、寒冷干旱的沙漠星球。是什么让一颗行星处于潜在的宜居带,又能在漫长的地质时期保持宜居性?与地球和金星不同,火星前十亿年的大部分地壳被保存在地表或近地表的地层环境中,提供了理解宜居性早期演化所需的地质记录。与月球、水星或冰冷的卫星不同,火星早期的地壳记录了一个有浓密大气和液态水的岩石天体演化。

自20世纪60年代以来,人类对火星的探测从未停止,对火星的形成与演化认识取得了重要的进展^[84]。现今火星没有全球磁场,但在诺亚纪南部高原的部分地区具有强烈的局部磁异常,这指示火星过去存在“发电机”^[85]。但目前对火星内部结构的理解尚不清晰,对古代“发电机”开始和停止时间仍不清楚。了解火星古代“发电机”的开始与停止时间对理解火星内部热演化与古大气环境有重要意义。由于火星比地球小,相对表面积与体积成反比而较大,因此火星核心也冷却得比地球的快,地质活动趋缓,磁场和板块运动消逝,太阳风带走大气成分导致大气变薄、气压偏低,造成液态水在低温就会沸腾、无法稳定存在^[86]。火星大气逃逸以中性H原子金斯逃逸为主,这一过程对逃逸面处的H原子密度和温度十分敏感,展现出丰富的变化性。虽然目前对火星H原子逃逸获得了丰富的认知,但依然存在一些问题,如基于理想逃逸面假设的传统金斯理论能在何种程度上反映真实的火星H原子逃逸状况,火星H冕结构是否存在额外的非热成分,在太阳系演化早期火星H原子逃逸如何发生以及如何影响火星气候演化历程^[87]。火星早期气候特点对理解火星生命起源的宜居条件至关重要。目前存在两种尚存争议的主流气候模型:一种认为火星长期暖湿,曾经有全球性

的海洋、河流、湖泊,适宜生命形成和保存;另一种认为火星长期干冷,只有间歇性的暖湿气候,适宜生命形成的条件有限^[88]。在火星漫长的演化进程中,偶发性变暖事件背后的驱动机制仍不清楚,如撞击、火山活动和轨道自转轴倾角变化等,都可能起到了重要作用。火山喷发的热液环境与火星的宜居性有密切的联系^[89]。目前对中心式火山建造和熔岩平原的活动时间缺乏较为系统的时间约束^[90],对热液环境及其活动的区域、火山喷发物的体积以及超级火山^[91]缺乏系统的认识。水是宜居环境的必备条件之一,水文地貌和含水矿物记录了火星早期水环境对地壳侵蚀的证据,如古海洋、河谷网络和冲积三角洲以及含水矿物。多种证据表明,火星北部可能存在过古海洋,但古海洋形成时的气候条件,水活动范围和时间,水的去向等问题仍不明确。针对河谷网络,前人提出了与大气降水、地下水、冰川融水等相关的多种水源供给模型^[92],但对河谷网络的形貌及其与水源类型的关系缺少系统的研究,对于不同区域、不同时代古湖泊的水源供给特征尚待查明。目前在火星的沉积物中发现了层状硅酸盐、硫酸盐等多种含水矿物^[93],但对火星沉积剖面的研究,包括其记录的火星早期水的持续时间、活动范围、化学活性的认识不足。

以上尚未解决的重大科学问题亟需后续探测任务来回答,如更高分辨率的轨道器、灵活的空中平台直升机或气球、分析能力更强的就位巡视器,进行天-空-地立体观测。为了解早期和现在的火星环境,圈定潜在宜居区域,需要开展多项关键观测:(1)对火星撞击通量、地下结构和磁场的更高分辨率测量以及绝对年龄测定将为火星空间环境和圈层结构提供新认识;(2)结合火星主要火山省喷发通量及大气环流模型限定火山活动对早期气候的影响;(3)巡视器对岩石和土壤原位岩石学测量,研究地幔温度随时间的变化规律,约束火星岩浆洋分异演化机制;(4)原位稀土元素和惰性气体同位素分析,约束地表和大气之间挥发分和尘埃的交换过程;(5)评估火星过去和现在水及其他挥发性储层时空分布,寻找沉积物和沉积环境中保存的生命标志物。

与火星一样,距离太阳平均距离为0.72 AU的金星,也处于太阳系的潜在宜居带内。金星被称为地球的“孪生星”,却沿着截然不同于地球的路径演化,成为一个环境极端且地表不具宜居性的星球。初始金星是否与地球类似?早期金星表面是否存在大量的液态水甚至海洋?控制金星演化路径的关键因素是什么?金星与

地球的差异如何产生、何时产生?金星是否曾经孕育过生命?现在的金星气候是地球的昨天还是明天?已有探测获取了金星大气的主要物质组成和大气分层结构及温度剖面,研究了金星各层大气热力学结构、初步物质成分和大气环流特征,发现金星存在比地球更为有效的温室效应(“超温室效应”)^[94]。金星快车和拂晓号还获取了金星诱发磁层特征、电离层粒子运动、云霾层物质组成、厚度及变化,以及大气逃逸离子的主要形式;绘制了金星全球表面温度图、金星大气的热剖面和热结构、大气化学组成剖面,发现了新的大气组分(O_3 和 OH);为大气的动力学过程及火山活动提供了重要数据^[95]。拂晓号发现了金星大气中存在大尺度的弓形特征;首次报道了赤道区域上方低云层中存在的急流风;发现上云层和中云层之间过渡带附近存在小颗粒的厚层云^[96];提出了金星大气超旋的维持机制^[97]。

目前金星探测研究仍存在亟待解决的重大科学问题。首先,金星大气与气候是金星探测研究最为深入的领域,但仍然处于观测数据积累阶段。大气关键现象和特征及其成因机理和时空分布演化,仍是未来探测的重点。其次,固体金星的内外动力演化过程,如金星表面地质地貌特征、变化及其成因、地层划分和地表重塑历史等,仍待解决。再次,金星地表与大气的相互作用及耦合过程是理解金星气候演化和原因的关键,其中金星近地表12 km高度以内的深层大气和火山是探测研究的重点区域。最后,金星早期演化和潜在宜居性仍是未解之谜。在早期地球孕育地球生命的同时,金星有没有产生生命,是关系生命起源和产生的重大科学问题。针对金星生命形式和潜在生命相关的挥发组分的时空分布(H_2O 、 PH_3 、 NH_3 等)是金星宜居性探测的关键。目前,金星重新进入了深空探测热点研究的行列,NASA已经规划了两次探测任务,分别是VERITAS和DAVINCI+,而欧洲航天局(ESA)也规划了EnVision金星探测任务。同时,中国科学院战略性先导科技专项空间科学卫星金星火山和气候探测任务(Venus Volcano Imaging and Climate Explorer, VOICE)已经处于工程立项的遴选阶段。这些任务的成功实施将对金星的大气气候和地质演化历史进行综合探测和研究。

水星是太阳系中体积最小、净密度最大、表面反照率最低、距离太阳最近的行星。目前,对水星科学的认识主要来自信使号探测任务和地基雷达观测获取的数据。水星的核部富铁,由硅酸盐矿物组成的壳和幔的

厚度小于420 km^[98]. 水星表面的Fe含量远低于2wt%, Ti含量低于0.8wt%, 但是S含量高达4wt%, Mg含量高达10wt%^[99]. 水星表面的岩石类似于玻古安山岩和科马提岩, 独特的地球化学特征指示了极其还原的内部环境^[98]. 水星极低的氧逸度、极高的C和S含量、内部富Fe而表面贫Fe等观测事实难以用传统的太阳系原始星盘内的物质分布解释. 关于水星的科学问题主要包括以下几个方面. (1) 水星的形成过程: 形成水星的原始物质是什么? 与形成其他类地行星的原始物质有什么差异? 大撞击、行星迁移和所处位置对水星的结构和成分有何影响? 水星的全球元素组成和稳定同位素组成是怎样的? 水星的成分对认识原始行星盘有何启示? (2) 水星的分异及其内部结构: 水星的高金属-硅酸盐比值是如何产生的? 水星内部分层结构(如固态和液态的核、幔和其他层)的成分约束是什么? 水星有岩浆洋吗? 如果有的话, 它的结晶如何影响后期演化? 水星的核是何时形成的? (3) 水星的磁场演化及其产生机制: 水星内部弱的、轴对称而半球不对称磁场的起源是什么? 水星壳剩余磁化强度如何分布? 年龄是多少? 什么矿物质在水星上具有磁化作用? 水星内部磁场一直在运转吗? 水星古磁场的几何结构和强度与现在有何差异? (4) 水星挥发分的来源、演化历史和含量: 挥发物在水星壳的内部熔融、岩浆上升和输运, 以及表面喷发方式中都扮演了什么角色? 水星氧逸度低的原因是什么? 挥发分是否在其中起作用? 水星极区沉积物的来源是什么? 水星逃逸层能提供关于挥发分随时间再分布的哪些信息? 水星的挥发分丰度能告诉我们哪些关于它们在内太阳系和原行星盘内的分布情况? 目前, ESA和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)联合实施的BepiColombo任务正在飞往水星, 计划2025年进入水星轨道, 将对水星的磁场、磁层以及内部和表面结构等进行全面探测. 新的探测任务有望全面提升对水星的地质、地球化学、地球物理和空间环境的认识. 另一方面, 在地球上的陨石样品库中仍然没有发现确切的水星陨石, 而遥感观测的多解性需要样品信息作为约束. 因此, 软着陆和采样返回将是未来水星探测的发展趋势.

2.2.2 外太阳系巨行星

太阳系的小行星带以外在大约5、10、20和30 AU处有4颗巨行星, 按照化学成分和物态又可以分为气态巨行星(木星和土星)和冰巨星(天王星和海王星). 在太阳系形成的初期, 雪线以内的吸积盘演化成了类地行星, 雪线之外的吸积盘物质则演化成了巨行星. 巨行星

的漫长演化过程中会有大范围的迁移, 木星甚至曾经到达雪线以内的火星轨道附近. 大迁移理论可以解决一些观测和数值模拟结果之间的分歧. 巨行星的组成、结构、形成和演化历史对太阳系的早期历史以及类地行星和其他天体的形成都具有重要意义.

木星和土星的成分主要是氢和氦, 因为任何其他元素都不可能在同样的条件下达到同样低的密度. 这两种元素在“气态”巨行星内部的主要形态并不是气态, 由于内部高压形成的金属氢是其磁场的来源. 模拟结果显示, 天王星和海王星的成分可能是水、甲烷、硫化氢和氨, 它们在行星内部主要以流体而非固态存在. 冰巨星也有可能主要由氢/氦和岩石组成^[100]. 气态巨行星形成于新诞生的恒星周围气体和尘埃组成的原行星盘中^[101]. 大多数学者接受的一个模型是内核不稳定性(core instability)模型: 行星成长的初始阶段与类地行星近似, 由小行星体聚合成行星胚胎, 当内核足够大时(通常几个地球质量), 它开始从周围的原行星盘中聚集气体. 与木星和土星相比, 天王星和海王星还有更少的氢和氦, 暗示冰巨星从来没有达到失控气体吸积条件, 可能是因为较慢的小行星体吸积^[23]. 由于行星和原行星盘之间的角动量交换, 行星的演化过程中可能会发生大迁移, 在这个过程中行星捕获附近的小行星体和气体在迁移轨道所达到的范围内形成一个空白地带. 外太阳系的吸积与内太阳系类地行星成长过程有质的差异, 因为更大的行星胚胎质量和较低的轨道速度使得它们更容易被引力散射. 太阳系早期在星云雪线附近产生的较大天体可能是巨行星形成的主要种子小行星体. 这些种子星体可以在没有竞争的情况下实现失控增长. 对巨行星系统的探测提供了巨行星形成之后的演化信息, 但无法帮助验证上述巨行星形成的模型. 太阳系内的小天体(小行星、彗星、微流星、尘埃)保留了太阳系形成初期的信息. 对这些小天体的直接探测采样分析有助于揭示太阳系以及巨行星形成的过程. 对系外行星开展天文观测(开普勒、TESS、韦伯太空望远镜)可以发现正在形成中的巨行星, 帮助我们验证巨行星形成和太阳系演化理论.

关于巨行星演化尚有许多问题需要回答. 巨行星聚合3个不同阶段(不受控固体吸积、固体和气体吸积、不受控气体吸积)的时间尺度是怎样的? 巨行星是否有过大迁移? 如何迁移? 挥发物以什么形态(冰或窗格体)被捕获? 如何解释木星形成过程中对小行星体的低温捕获? 巨行星以及系外行星的内核大小. 目前, 这

些问题的研究主要依靠理论计算、数值模拟和非常有限的观测数据。在未来的行星探测任务中,一个关键的测量参数是巨行星的元素及同位素丰度比值。未来下降式就位探测器可以对天王星、海王星进行更准确的测量。朱诺和卡西尼的精确重力测量可以帮助我们更好地了解气态巨行星的内部结构。

巨行星大气的探测主要基于光学遥感,通过光谱分析确定巨行星大气的化学成分和元素丰度。卡西尼惠更斯着陆器对土卫六泰坦的大气和表面成分进行了就位探测,轨道器也获得了土星大气的成分、光化学和总体循环的宝贵信息^[102,103]。巨行星大气的元素丰度与太阳比较,结果如何?木星与土星对流层中的氧/氢比要比太阳的小,木星的这个异常被归因于局部天气效应,土星的是否也是如此?巨行星内部循环的机制是怎样的?另一个挑战的问题是天王星和海王星的差异。为什么天王星没有内部能量?为什么天王星的涡流扩散系数比海王星的小很多?为什么海王星的平流层中有更多的CO和HCN?它们的来源是什么?赫歇尔太空望远镜、哈勃太空望远镜和詹姆斯韦伯望远镜已经或者即将为巨行星及卫星的大气组成等提供重要观测数据。此外,地基亚毫米阵列和光学望远镜也可以帮助我们研究巨行星及卫星的大气环境。

太阳系巨行星都具有内秉磁场,巨行星内部的磁场“发电机”可以产生足够强的磁场将太阳风挡在十几到几十个行星半径之外。每个巨行星磁层都是射电源,并且存在极光现象和辐射带。其中木星的十米波射电由木星磁场和木卫一相互作用产生,因此受木卫一相位调制。十米波射电可以利用地面天线阵列观测,为系外行星射电探测提供重要参考。与类地行星相同,巨行星系统的运转也要依靠重力和电磁力来耦合行星和其卫星、磁层中的等离子体、尘埃。巨行星系统都有多个卫星,并且个别卫星存在活跃的地质活动,成为巨行星磁层中等离子体的来源,如木卫一和土卫二。与类地行星磁层主要受太阳风驱动不同,由于太阳风的影响在外太阳系逐渐减弱,巨行星磁层中的能量和物质循环主要是由行星快速自转和引力导致的卫星地质活动所驱动。不过太阳风对巨行星磁层中的能量释放依然存在重要影响,甚至对巨行星快速能量释放过程(极光、射电等现象)有所调制^[104,105]。

巨行星磁层系统展现出丰富的多样性。木星和土星的磁轴与自转轴夹角较小,所以形成了类似于地球磁层结构的相对稳定的空间磁层构型。这两个磁层已

经被多个航天器任务探测过,而天王星和海王星仅被旅行者二号飞船造访过。冰巨星自转轴和磁轴之间的夹角很大,使得整个磁层绕着自转轴持续“翻转”。天王星的自转轴几乎在黄道面内,因此磁层的结构会有很大的季节差异。国际上对未来探测冰巨星的探讨已经越来越多^[106,107]。冰巨星内部更高的重元素含量导致其内部特殊的结构和动力学过程,尤其是冰巨星独特的磁场,使冰巨星的空间环境与地球或者土星/木星都有巨大差异。因此,冰巨星的空间环境提供了独特的磁化等离子体环境,帮助我们研究磁重联等基本等离子体物理问题。目前,已知的5000多颗系外行星大部分与太阳系的冰巨星特征接近,冰巨星的探测会为系外行星研究提供至关重要的基本事实依据。NASA刚刚公布的10年调查报告将天王星系统探测确定为下一个10年的首要任务目标,预计2031~2032年发射一个环绕探测器和一个天王星大气沉降式探针。如果计划顺利实施将提供关于天王星内部结构、物质组成、重力场、磁场、空间环境、天王星卫星Miranda等的关键信息。

此外,对于木星伽利略卫星,有丰富的科学问题值得去研究。这些卫星的环境呈现多样化,例如, Io有着活跃的火山喷发, Europa、Ganymede、Callisto都具有地下海洋, Ganymede的内秉磁场与木星磁场相互作用形成一个微磁层, Europa在木星变化的磁场作用下形成诱导磁层,土卫六Titan表面有湖泊,土卫二Enceladus存在地下海洋及羽流喷泉^[108]。木星和土星的多颗卫星上存在表面或内部的液态海洋/湖泊,因此是太阳系生命信号搜索的关键目标。未来对木星、土星的探测都聚焦在这些卫星上,譬如探测木卫二的地下海洋、土卫二南极冰层下面的液态海洋以及冰火山的能量来源^[109,110]。土卫二轨道降落器(Enceladus Orbilander)在NASA十年调查报告考虑的6个旗舰级探测计划中排列第二,仅次于天王星探测计划,并且很可能作为其他级别的计划实施。行星形成的时间尺度为百万年,而行星的卫星的形成时间尺度仅为万年。由于形成时间较晚,木卫四(Callisto)的轨道距离木星较远,没有与其他伽利略卫星形成轨道共振。木星的潮汐力对木卫四内部结构演化的影响有限,所以木卫四的内部没有形成分异结构。因此,木卫四保留了太阳系和木星系统形成初期物质组成的关键信息。针对木卫四的环绕探测器或者携带地震仪和光谱质谱分析载荷的着陆器将揭示木星系统形成初期的秘密,增进对太阳系初期演化过程的理解。

3 地外生命

地外生命探测是深空探测中的一项重要科学内容,对探索宇宙中生命的起源、演化、分布和未来等具有深远意义(图3)。自20世纪60年代以来,全球开展了一系列针对金星、火星、小天体、巨行星及其卫星等太阳系内天体以及系外天体的探测任务,人们对于地外生命搜寻有了新的认知,然而探索地外生命仍任重道远^[111]。当前地外生命信号探测研究中亟待解决的重要科学问题主要涉及四个方面:生命起源与演化、地外宜居环境、生命信号识别、地球极端环境类比。相关的科学问题主要有:前生命化学反应如何实现向生命反应跨越?生命的早期如何演化?宜居环境如何界定?太阳系宜居环境如何分布?如何定义生命?如何探测并有效识别生命信号?生命的生存极限是什么以及如何适应?这些科学问题的深入研究将为地外生命探测提供重要参考。

3.1 生命起源与演化

生命如何起源,即前生命化学反应如何演化到生命反应,是地外生命探测研究中的重要科学问题。地球是目前已知唯一存在生命的星球,对地球生命起源的研究是开展地外生命探测的前提和基础。目前普遍认为,地球从非生命到生命演化的过程中存在着一个前

生命时期,该时期的地球是缺氧、高辐射、富铁的环境,其主要特点是前生命分子的出现和增多^[112]。早期地球大气-海洋环境的模拟实验(即米勒实验及其变体)揭示,辐射光化学反应可以诱导小分子无机物产生大量前生命分子(如氨基酸、核苷酸、糖类、羟基酸)^[113]。高辐射环境在太阳系其他天体上也较普遍存在,因此在这些天体上也发现了类似的有机物^[114]。

有研究表明,在前生命分子生成后,黏土矿物表面可能为单体氨基酸或核糖核酸(RNA)之间共价键的生成提供了催化媒介,但关于前生命分子组装以及演化成最早生命的过程仍然未知^[115]。这个过程中有机分子可能会逐渐产生对同手性的偏好,即地球生命中的脱氧核糖核酸(DNA)双链几乎都是右手螺旋,其结构单元单糖都是右手性;而组成蛋白质的结构单元氨基酸几乎都是左手性的。同手性产生的驱动力可能是不对称自催化反应,但同手性是否是生命的固有特征还有待进一步探索^[116]。由于RNA既可作为能够自我复制且携带遗传信息的载体,也能够作为催化生化反应的核酶,还可作为遗传物质表达的调节因子,因此有学者提出了RNA世界学说(RNA World),认为在DNA和蛋白质出现之前还存在一个以RNA为主要生命分子的世界,尽管该学说被较广泛地接受,但仍然存在一些争议^[117]。此外,还有学者提出了基于氰化氢(HCN)和硫化氢

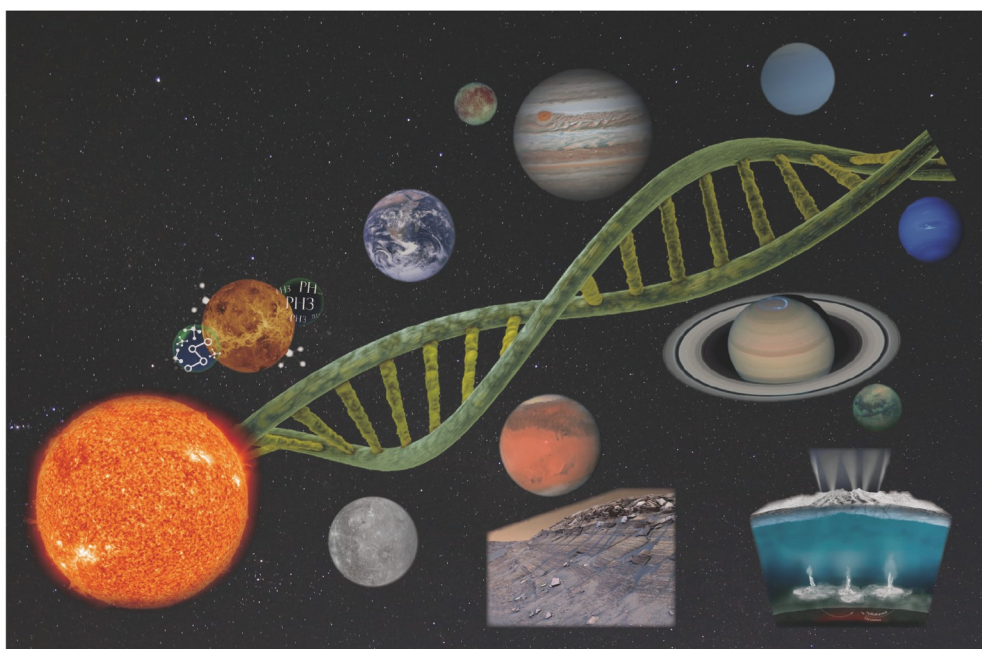


图3 太阳系地外生命探测

Figure 3 Exploration for extraterrestrial life in solar system

(H₂S)合成氨基酸、脂类和RNA前体的前生命化学反应模型^[118]。在火星及其他天体的地外生命研究中,探索RNA世界学说和前生命化学是当前的前沿研究方向^[119]。

3.2 地外宜居环境

早期生命如何与环境相互作用并协同演化是另一个引人关注的问题,对了解生命的过去与未来具有重要意义。在地质历史早期,地球环境演化中最瞩目的事件是两次大氧化事件和多次冰期事件^[120],在这些事件中,早期生命与环境不仅协同演化,而且相互影响。古元古代大氧化事件使适应氧气的生物开始繁盛,而新元古代大氧化事件可能促进了早期动物的出现和分化^[121]。然而还有许多问题亟待约束,如地球表层氧化与生物演化如何相互影响?海洋氧化促进生物演化,还是生物促进海洋氧化?生物生存的需氧极限是多少?地球的氧化历程在其他天体上是否存在?上述问题的深入研究不仅有助于更好地理解生命与环境的协同演化过程,而且为探索地外宜居天体提供了新认识。在地质历史早期,磷被认为是限制海洋和陆地生产力的重要营养元素。已有研究表明,古元古代休伦冰期和新元古代雪球事件中陆地磷输入增加,使得海洋总体初级生产力结构发生变化,可能逐步建立起与现今海洋类似的生物地球化学循环^[122]。雪球事件和地球生态系统转变在时间上存在一定的关联,但其关系仍需要进一步探究,这将为认识太阳系冰天体(如木卫二、土卫二)中潜在生命及其演化提供参考。

地外生命探测的重要前提是确认目标天体是否具有可能的宜居环境,因此宜居环境的界定及其在太阳系内和系外的分布是地外生命探测中的重要科学问题。在天体生物学研究中,宜居环境通常被认为需要具备液态水、能量、生源要素(C、H、N、O、P、S)、适宜的理化环境等基本条件。此外,轨道参数、天体质量、大气成分、磁场、板块运动等也是衡量环境是否宜居的重要参数^[123]。除了刻画这些宜居要素外,从时间尺度与空间尺度上对宜居环境进行深入界定不可或缺^[124]。例如,虽然现今火星的环境极端恶劣,但是地质学和地球化学等证据表明,火星在大约38亿年前存在大量的液态水,可能具备演化出生命的一些基本条件^[125]。这表明天体在不同的演化阶段可能具有不同的环境,因此需要从时间演化上来探讨目标天体的宜居潜力。另一方面,宜居环境在空间尺度上的界定也至关

重要,宜居环境的空间范围可以大至一个行星系统,也可以小至微尺度环境^[124]。例如,虽然现今火星的表面不适宜生命的生存,但是火星的地下可能具有支持生命生存的潜在条件,因此火星地下环境的生命探测是近年来火星研究的热点。此外,金星虽然由于失控的温室效应使其表面环境不具有宜居性,但其大气的部分区域推测可能适合一些嗜酸微生物生存^[126]。综上所述,在未来的深空探测中,从时间与空间的角度对地外天体的宜居环境进行综合评估将是地外生命研究的重要方向。

3.3 生命信号

生命信号的识别与解译是当前地外生命探测亟须解决的难题。首先,生命很难被准确定义,在实际探测中,NASA将生命定义为是能够进行达尔文式演化的一种自我维持的化学系统(self-sustaining chemical system capable of Darwinian evolution)。根据该定义,病毒就不是生命,因为病毒无法独立复制和繁衍^[127]。此外,有别于目前已知生命的氮基、硅基、砷基或硫基生命是否可能存在,也需要深入研究。鉴于对生命的定义尚未达成共识,有学者提出可以将化学系统的复杂性作为一个相对客观的生命判定标准^[128]。

目前国际公认的生命信号包括但不限于细胞与胞外基质形态、化石、生物矿物、有机分子、有机物对映体过剩率、同位素信号、生命过程产物、遥感特征信号、时间变异性、高等文明科技信号等^[129]。由此可见,生命信号种类多样,如何划分信号的优先等级以及如何科学地配备探测载荷是开展地外生命信号探测时重要的科学和工程考量。近期,有天体生物学家提出,如果在地外天体上探测到疑似的生命信号,需要进行一系列后续研究进行验证:首先要排除污染并确认所有已知的非生命过程无法在该环境背景下产生相同的信号,其次至少需要另一种生命信号来佐证,最后还需要其他研究团队的独立验证^[130]。近年来,随着国际深空探测任务的增多,地外生命信号的合理筛选和有效识别以及多个生命信号的协同解译是未来地外生命探测中应重点发展的方向。

3.4 地球极端环境类比

除了对地外天体开展原位和飞掠探测之外,地球上的极端环境与地外天体环境的类比研究也可以为地外生命探测提供新思路。地球上具有许多可以类比地

外天体的极端环境,如酸性、碱性、高盐、干燥、高温、低温、高压、高辐射等自然环境,并且在这些类地外天体的极端环境中大都发现了生命(主要是微生物)的存在,这些研究和发现拓展了人们对地球生命生存边界的认知^[131].当前对微生物适应不同极端环境的机制已经有了较系统的认识,但还需要进一步的研究.值得注意的是,许多地外天体的环境往往是复杂的,在此背景下,地球上单一的极端环境就不能很好地类比这些地外天体环境,因此未来有必要开展综合极端环境下的生命研究.此外,地外天体具有在地球上不常见的地貌和地质体,其形成机制和形成条件各不相同,利用比较行星学思路来研究这些地质体的形成和演化,将有助于深入理解地外天体在特定时间和空间的宜居环境演化.以火星为例,火星表面存在众多含铁矿物,其中子午线平原的赤铁矿小球成因及其天体生物学意义有待进一步的约束^[132],火星地表碳酸盐岩主要分布在超基性地台上,由陆相碳酸镁矿物组成,其成因也尚不清楚^[133],火星拥有众多的卤水沉积,这些卤水沉积是否有利于生命信号的保存也是未来重要的研究方向^[134].对地球上类地外天体环境和地貌的研究有望为上述问题的解决提供新途径.

3.5 火星生命探测

火星是地外生命探测研究的热点,被认为是最有可能发现生命的地外天体之一.火星生命探测的重要科学问题主要包括火星环境演化(即火星是否具有支持生命存在的宜居环境)和生命信号探测(即火星是否存在过生命).

在火星环境演化研究方面,1997年的火星探路者(Mars Pathfinder)在火星阿瑞斯谷的探测任务中发现火星土壤的颜色接近铁的氧-氢氧化态,支持早期火星更加温暖湿润的理论^[135].同年到达的火星全球探勘者(Mars Global Surveyor)探测了火星全球的磁场特征、气候和大气的热构造,并研究了火星表面矿物、岩石和冰的组成与分布,完成火星地形数据采集^[136].2001年,火星奥德赛号(Mars Odyssey)探测卫星到达火星,调查了整个火星表面的元素分布和亚表面的氢含量(用于计算水含量),获得了表面矿物成分的高清图像和光谱,研究了火星表面辐射对人体的危害,为未来人类登陆火星做准备^[137].火星探测漫游者(Mars Exploration Rover)任务发射了两辆火星车——勇气号(Spirit)和机遇号(Opportunity),于2004年初分别成功着陆在古瑟夫

撞击坑和子午线高原鹰撞击坑.此次任务的主要科学目标是寻找并鉴定受到水活动影响的岩石和土壤,寻找含水矿物或水成矿物(如含铁碳酸盐),探索火星早期存在液态水环境的证据,评估着陆点周围环境是否适宜生命生存^[138].火星勘测轨道器(Mars Reconnaissance Orbiter)于2006年到达火星轨道,主要观测火星气候、大气循环和环境的季节变化,寻找过去和现在水的痕迹,理解水分影响火星地貌的机制.凤凰号(Phoenix)火星探测器于2008年成功降落在火星北部平原,其科学目标是研究火星的气候变迁和水存在的地质历史,以及评估地表冰-土壤交界层的宜居性.凤凰号发现火星大气中的卷云有降雪现象,表明部分云是由水冰组成的^[139];发现高氯酸盐作为一类比较活跃的电子受体,可以作为潜在的能量源供生命利用;发现碳酸盐和碳酸氢盐的存在,表明该地区在早期地质历史处于温暖湿润的环境^[139].2012年抵达火星盖尔撞击坑的好奇号(Curiosity)火星车以评估着陆点宜居性为主要科学目标,探寻生命信号、有机物的储备量、表面与近表面物质化学/同位素/矿物组成、大气进化过程、水/二氧化碳的分布与循环以及表面广谱辐射等.研究发现,盖尔撞击坑保存有旧河床遗迹和生命所必需的元素,并在火星原位探测到了岩石中的氯苯和大气中的甲烷^[140].2021年降落在火星耶泽罗撞击坑的毅力号(Perseverance)火星探测器将鉴别可能支持微生物生存的古环境,在特殊的岩石种类里寻找生命信号,收集岩心和基岩样品返回地球,为未来人类登陆火星做准备.我国于2020年7月成功发射了天问一号,其环绕器和巡视车共携13套科学载荷.2021年5月15日,祝融号火星车成功着陆火星乌托邦平原南部,开始开展火星地质、水冰、浅表物质、大气、粒子辐射、磁场及内部结构等就位探测.

已有火星探测研究表明,火星曾经具有过较宜居的环境,现代火星的局部区域也可能可以支持微生物等生命生存,但人类目前尚没有在火星上发现生命存在的确切证据.1976年着陆火星的海盗1号和2号(Viking 1和Viking 2)的主要探测目标就是寻找生命存在的证据,携带探测生命的实验设备包括热解释放实验设备、标记释放实验设备、气体交换实验设备,并同时携带一个气相色谱质谱仪用以测量火星土壤中有有机物的组成和丰度.尽管部分实验组发现了疑似阳性信号,但至今未能证实这些信号一定来自于生命^[141].1996年,美国学者在火星陨石ALH84001上发现了多个疑似生

命信号的证据,但后来这些信号被证明可以通过化学过程或地球生物污染而形成^[142]。2003年,ESA的火星快车号(Mars Express)探测卫星侦测到火星大气中存在甲烷,且后续多个遥感观测支持了这一发现,但始终未能明确甲烷的产生和变化是否来源于生命过程^[143]。时至今日,火星生命信号的探测、识别和解译仍然是火星研究的热点。

多生命信号探测和火星样品返回有望实现火星生命探测的突破。欧洲航天局ExoMars 2022罗莎琳德·富兰克林号(Rosalind Franklin)将携带多款国际联合研发的地外生命探测仪器开展火星生命探测。这些仪器包括火星有机分子分析仪、红外高光谱显微镜、拉曼激光光谱仪、深达2 m的土壤钻探设备和内置于钻头的火星亚表层多光谱成像仪等^[144]。规划中的火星采样返回任务是具有跨时代意义的创举,NASA与ESA联合的土壤返回计划自2021年9月毅力号收集到第一批火星样品开始,已在稳步推进中,毅力号与未来发射的罗莎琳德·富兰克林号会将采集的样品运送至火星轨道,随后于2031年前后,由ESA主导研发的火星探测卫星回收样品并返回地球。基于嫦娥五号月壤顺利返回的成功先例,我国也计划将于2028年前后开展火星采样返回任务,并于2030年左右携土壤返回地球。可以预见,这些规划中的火星任务将开辟火星探测的新篇章,火星生命研究有望在未来10~20年内取得新突破。

4 未来探测与展望

无论是国内还是国外,深空探测已经成为科学研究的重要领域,吸引了越来越多的国家参与其中,为解决以上前沿科学问题提供了重要基础,也为推动技术发展和资源开发利用提供了重要机会。NASA以重返月球并为火星探测提供中转为目标的Artemis计划规划了一系列探测任务,将建立月球空间站和月球表面基地并探测月球极区水冰资源^[145]。NASA还将通过Artemis计划发展一批商业公司,为将来的探测和资源开发培养力量。美国白宫国家航天委员会2020年发布的蓝皮书指出:“美国在新一轮的太空探索运动中将增加商业公司在其中扮演的角色,培养和发展一批商业公司,以发展太空经济,扶持新工业和新技术,增加就业机会并培养高技能劳动力”(https://spp.fas.org/eprint/new-era-2020.pdf)。蓝皮书将NASA开展探测的科学主题总结为地球生命的起源、火星宜居性、太阳历史及其与地球相互作用、射电天文等方面。其他即将实施的科学探

测任务主要还包括探测金星的VERITAS和DAVINCI+任务、与ESA联合的火星采样返回、探测小行星的Psyche任务、探测木卫二的Europa Clipper任务,以及探测土卫六的Dragonfly任务等。ESA一直以来都是深空探测的主力之一,未来一方面将参与NASA的Artemis计划等探测活动,另一方面也将努力发展自己主导的探测任务。ESA在2021年发布了面向2035~2050年的新版空间科学中长期规划《远航2050》(Voyage 2050)白皮书,涉及三类不同量级的科学任务,包括3个旗舰任务(L级)、6~7个中型任务(M级)和若干小型任务(S级),涉及空间天文、行星科学、日球层物理,以及空间基础物理实验^[146]。ESA即将实施的探测任务主要包括探测金星的EnVision任务、与NASA联合的火星采样返回任务、探测木星系统的JUICE任务,以及与NASA联合开展小行星防御技术验证的Hera任务等。

虽然起步较晚,但中国的深空探测发展迅速,未来主要围绕两大主题开展:“宇宙和生命是如何起源和演化的”及“太阳系与人类的关系是怎样的”^[147]。《2021中国的航天》(<http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1719689/1719689.htm>)白皮书明确指出:“深空探测……未来5年,中国将继续实施月球探测工程,……继续实施行星探测工程,发射小行星探测器、完成近地小行星采样和主带彗星探测,完成火星采样返回、木星系探测等关键技术攻关。论证太阳系边际探测等实施方案。”在空间科学探索方面,白皮书指出:“未来5年,中国将围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星等科学主题,研制空间引力波探测卫星、爱因斯坦探针、先进天基太阳天文台、太阳风-磁层相互作用全景成像卫星、高精度地磁场测量卫星等,持续开展空间天文、日球物理、月球与行星科学、空间地球科学、空间基础物理等领域的前瞻探索和基础研究,催生更多原创性科学成果。”中国已经立项启动探月工程四期任务,包括嫦娥六号、嫦娥七号和嫦娥八号任务,这3个任务将在未来10年之内陆续实施,实现月球南极区域的采样返回,并初步建立国际月球科研站(ILRS)。未来将与俄罗斯合作完成月球科研站的全部建设,服务月球探测与开发。国际月球科研站的科学目标主要包括月球地形地貌与地质构造、月球物理与内部结构、月球化学(物质成分与年代学)、地月空间环境、月基天文观测、月基对地观测,及月基生物医学实验。中国已经确定了“天问二号”任务,将进行小行星采样返回,并与彗星会合探测。小行星样品保留



图4 中国深空探测任务计划与月球科研站. 修改自文献[148]

Figure 4 China's deep space exploration and the International Lunar Research Station (ILRS). Image modified from Ref. [148]

了太阳系早期的记录, 将为认识太阳系的演化提供关键信息. 未来还将开展“天问三号”火星采样返回任务, 为研究火星的地质演化与行星宜居性等科学问题提供重要支撑. 正在论证的“天问四号”木星系探测任务, 将为行星系统的形成和地外生命等科学问题寻找答案. 此外, 中国正对太阳系边际探测进行论证, 探测任务将有助于回答日球物理、星际空间物理和太阳系演化等有关的重要科学问题.

深空探测是揭示自然和宇宙奥秘的重要途径, 也是技术发展的重要推力, 在未来的科技发展中将扮演越来越重要的角色. 我国已经在此领域取得了一系列进展, 奠定了坚实的基础, 是国际上开展深空探测的核心成员之一. 目前, 中国和国外已经规划了大量深空探测任务(图4), 它们的顺利实施将极大提高人类关于太阳系起源与演化、行星宜居性和生命起源等科学问题的认识, 促进人类文明的进步.

致谢 感谢汪毓明教授、季江徽研究员、胡森研究员、张锋研究员、赵宇鹄研究员、肖智勇教授、刘倍贝研究员、郭弟均副研究员、杨亚洲副研究员、谢良海副研究员和徐于晨副研究员对本文提出的宝贵意见.

参考文献

- Ye P J, Zou L Y, Wang D Y, et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration (in Chinese). *Space Int*, 2018, 10: 4–10 [叶培建, 邹乐洋, 王大珩, 等. 中国深空探测领域发展及展望. *国际太空*, 2018, 10: 4–10]
- Wu W R, Yu D Y, Huang J C, et al. Exploring the solar system boundary (in Chinese). *Sci Sin-Inf*, 2019, 49: 1–6 [吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1–6]
- Marov M. *The Formation and Evolution of the Solar System*. Oxford: Oxford University Press, 2018
- Woolfson M M. The solar-system: Its origin and evolution. *Q J R Astron Soc*, 1993, 34: 1–20
- Lin Y, Guan Y, Leshin L A, et al. Short-lived chlorine-36 in a Ca- and Al-rich inclusion from the Ningqiang carbonaceous chondrite. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 1306–1311
- McKeegan K D, Aleon J, Bradley J, et al. Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science*, 2006, 314: 1724–1728
- Xu Y C, Lin Y T, Zhang J C, et al. The first discovery of presolar graphite grains from the highly reducing Qingzhen (Eh3) meteorite. *Astrophys J*, 2016, 825: 111
- Kodolányi J, Stephan T, Trappitsch R, et al. Iron and nickel isotope compositions of presolar silicon carbide grains from supernovae. *Geochim Cosmochim Acta*, 2018, 221: 127–144
- Qin L, Alexander C M O D, Carlson R W, et al. Contributors to chromium isotope variation of meteorites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2010, 74: 1122–1145

- 10 Fischer-Gödde M, Kleine T. Ruthenium isotopic evidence for an inner solar system origin of the late veneer. *Nature*, 2017, 541: 525–527
- 11 Dauphas N. The isotopic nature of the Earth's accreting material through time. *Nature*, 2017, 541: 521–524
- 12 Budde G, Burkhardt C, Kleine T. Molybdenum isotopic evidence for the late accretion of outer solar system material to Earth. *Nat Astron*, 2019, 3: 736–741
- 13 Kruijer T S, Burkhardt C, Budde G, et al. Age of Jupiter inferred from the distinct genetics and formation times of meteorites. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 6712–6716
- 14 Varas-Reus M I, König S, Yierpan A, et al. Selenium isotopes as tracers of a late volatile contribution to Earth from the outer solar system. *Nat Geosci*, 2019, 12: 779–782
- 15 Fischer-Gödde M, Elfers B M, Münker C, et al. Ruthenium isotope vestige of Earth's pre-late-veneer mantle preserved in Archaean rocks. *Nature*, 2020, 579: 240–244
- 16 Qin L, Dauphas N, Wadhwa M, et al. Rapid accretion and differentiation of iron meteorite parent bodies inferred from ^{182}Hf - ^{182}W chronometry and thermal modeling. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 273: 94–104
- 17 Dauphas N, Pourmand A. Hf-W-Th evidence for rapid growth of Mars and its status as a planetary embryo. *Nature*, 2011, 473: 489–492
- 18 Luu T H, Young E D, Gounelle M, et al. Short time interval for condensation of high-temperature silicates in the solar accretion disk. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 1298–1303
- 19 Shen J, Xia J, Qin L, et al. Stable chromium isotope fractionation during magmatic differentiation: Insights from Hawaiian basalts and implications for planetary redox conditions. *Geochim Cosmochim Acta*, 2020, 278: 289–304
- 20 Bottke W F, Norman M D. The late heavy bombardment. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2017, 45: 619–647
- 21 Mojzsis S J, Brasser R, Kelly N M, et al. Onset of giant planet migration before 4480 million years ago. *Astrophys J*, 2019, 881: 44
- 22 Liu B, Ji J. A tale of planet formation: From dust to planets. *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 164
- 23 Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, et al. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas. *Icarus*, 1996, 124: 62–85
- 24 Haghighipour N. The formation and dynamics of super-Earth planets. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2013, 41: 469–495
- 25 Ji J H. Protoplanetary disks surrounding the stars: The birth cradle of planets (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2369–2373 [季江徽. 环绕恒星的原行星盘: 行星的“诞生摇篮”. 科学通报, 2019, 64: 2369–2373]
- 26 Storch N I, Anderson K R, Lai D. Chaotic dynamics of stellar spin in binaries and the production of misaligned hot Jupiters. *Science*, 2014, 345: 1317–1321
- 27 Krijt S, Schwarz K R, Bergin E A, et al. Transport of CO in protoplanetary disks: Consequences of pebble formation, settling, and radial drift. *Astrophys J*, 2018, 864: 78
- 28 Zhang K, Bosman A D, Bergin E A. Excess C/H in protoplanetary disk gas from icy pebble drift across the CO snowline. *Astrophys J Lett*, 2020, 891: L16
- 29 Lambrechts M, Johansen A. Rapid growth of gas-giant cores by pebble accretion. *Astron Astrophys*, 2012, 544: A32
- 30 Kraus S, Kreplin A, Fukugawa M, et al. Dust-trapping vortices and a potentially planet-triggered spiral wake in the pre-transitional disk of V1247 Orionis. *Astrophys J*, 2017, 848: L11
- 31 Connelly J N, Bizzarro M, Krot A N, et al. The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 2012, 338: 651–655
- 32 Simon J I, Cuzzi J N, McCain K A, et al. Particle size distributions in chondritic meteorites: Evidence for pre-planetesimal histories. *Earth Planet Sci Lett*, 2018, 494: 69–82
- 33 Canup R M, Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature*, 2001, 412: 708–712
- 34 Tartèse R, Anand M, Gattacceca J, et al. Constraining the evolutionary history of the Moon and the inner solar system: A case for new returned lunar samples. *Space Sci Rev*, 2019, 215: 1–50
- 35 Snape J F, Nemchin A A, Bellucci J J, et al. Lunar basalt chronology, mantle differentiation and implications for determining the age of the Moon. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 451: 149–158
- 36 Connelly J N, Bizzarro M. Lead isotope evidence for a young formation age of the Earth-Moon system. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 452: 36–43
- 37 Reufer A, Meier M M M, Benz W, et al. A hit-and-run Giant Impact scenario. *Icarus*, 2012, 221: 296–299
- 38 Rufu R, Aharonson O, Perets H B. A multiple-impact origin for the Moon. *Nat Geosci*, 2017, 10: 89–94
- 39 Agnor C B, Canup R M, Levison H F. On the character and consequences of large impacts in the late stage of terrestrial planet formation. *Icarus*, 1999, 142: 219–237
- 40 Elkins-Tanton L T. Magma oceans in the inner solar system. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 113–139
- 41 Warren P H. Lunar anorthosites and the magma-ocean plagioclase-flotation hypothesis importance of FeO enrichment in the parent magma. *Am Mineral*, 1990, 75: 46–58
- 42 Wood J A. Moon over Mauna Loa: A review of hypotheses of formation of Earth's Moon. In: *Proceedings of the Origin of the Moon*. 1986. 17–55

- 43 Marchi S, Bottke W F, Kring D A, et al. The onset of the lunar cataclysm as recorded in its ancient crater populations. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 325-326: 27–38
- 44 Morbidelli A, Nesvorny D, Laurenz V, et al. The timeline of the lunar bombardment: Revisited. *Icarus*, 2018, 305: 262–276
- 45 Ziethe R, Seiferlin K, Hiesinger H. Duration and extent of lunar volcanism: Comparison of 3D convection models to mare basalt ages. *Planet Space Sci*, 2009, 57: 784–796
- 46 Che X, Nemchin A, Liu D, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374: 887–890
- 47 Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. *Nature*, 2021, 600: 54–58
- 48 Braden S E, Stopar J D, Robinson M S, et al. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. *Nat Geosci*, 2014, 7: 787–791
- 49 Zhang F, Head J W, Wöhler C, et al. The lunar mare ring-moat dome structure (RMDS) age conundrum: Contemporaneous with Imbrian-aged host lava flows or emplaced in the Copernican? *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e2021JE006880
- 50 Zhang S, Wimmer-Schweingruber R F, Yu J, et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface. *Sci Adv*, 2020, 6: eaaz1334
- 51 Benna M, Mahaffy P R, Halekas J S, et al. Variability of helium, neon, and argon in the lunar exosphere as observed by the LADEE NMS instrument. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 3723–3729
- 52 Halekas J S, Saito Y, Delory G T, et al. New views of the lunar plasma environment. *Planet Space Sci*, 2011, 59: 1681–1694
- 53 Lin R P, Mitchell D L, Curtis D W, et al. Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: Results from Lunar Prospector. *Science*, 1998, 281: 1480–1484
- 54 Stubbs T J, Farrell W M, Halekas J S, et al. Dependence of lunar surface charging on solar wind plasma conditions and solar irradiation. *Planet Space Sci*, 2014, 90: 10–27
- 55 Halekas J S, Lin R P, Mitchell D L. Inferring the scale height of the lunar nightside double layer. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 2117
- 56 Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. A dynamic fountain model for lunar dust. *Adv Space Res*, 2006, 37: 59–66
- 57 Feldman P D, Glenar D A, Stubbs T J, et al. Upper limits for a lunar dust exosphere from far-ultraviolet spectroscopy by LRO/LAMP. *Icarus*, 2014, 233: 106–113
- 58 Xie L, Zhang X, Li L, et al. Lunar dust fountain observed near twilight craters. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL089593
- 59 Temmer M. Space weather: The solar perspective an update to Schwenn (2006). *Living Rev Sol Phys*, 2021, 18: 4
- 60 Domingo V, Fleck B, Poland A I. The SOHO mission: An overview. *Sol Phys*, 1995, 162: 1–37
- 61 Kaiser M L, Kucera T A, Davila J M, et al. The STEREO mission: An introduction. *Space Sci Rev*, 2008, 136: 5–16
- 62 Pesnell W D, Thompson B J, Chamberlin P C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 3–15
- 63 Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. The Solar Probe Plus mission: Humanity's first visit to our star. *Space Sci Rev*, 2016, 204: 7–48
- 64 Muller D, St Cyr O C, Zouganelis I, et al. The Solar Orbiter mission: Science overview. *Astron Astrophys*, 2020, 642: A1
- 65 Karak B B, Jiang J, Miesch M S, et al. Flux transport dynamos: From kinematics to dynamics. *Space Sci Rev*, 2014, 186: 561–602
- 66 Jiang J, Cao J. Predicting solar surface large-scale magnetic field of Cycle 24. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2018, 176: 34–41
- 67 Barczynski K, Aulanier G, Janvier M, et al. Electric current evolution at the footpoints of solar eruptions. *Astrophys J*, 2020, 895: 18
- 68 Feng X. *Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona and Heliosphere*. Singapore: Springer, 2020
- 69 Riley P, Mays M L, Andries J, et al. Forecasting the arrival time of coronal mass ejections: Analysis of the CCMC CME scoreboard. *Space Weather*, 2018, 16: 1245–1260
- 70 Zhang J, Temmer M, Gopalswamy N, et al. Earth-affecting solar transients: A review of progresses in solar cycle 24. *Prog Earth Planet Sci*, 2021, 8: 1
- 71 Shen F, Shen C L, Xu M J. Propagation characteristics of coronal mass ejections (CMEs) in the corona and interplanetary space. *Rev Mod Plasma Phys*, 2022, 6: 8
- 72 Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. Concept of the solar ring mission: An overview. *Sci China Technol Sci*, 2020, 63: 1699–1713
- 73 Wang C, Li H, Guo X C, et al. Scientific objectives for the exploration of the boundary of Solar system (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 517–524, 535 [王赤, 李晖, 郭孝城, 等. 太阳系边界探测项目的科学问题. *深空探测学报*, 2020, 7: 517–524, 535]
- 74 Wang C, Richardson J D. Energy partition between solar wind protons and pickup ions in the distant heliosphere: A three-fluid approach. *J Geophys Res*, 2001, 106: 29401–29407
- 75 Cummings A C, Stone E C, McDonald F B, et al. Anomalous cosmic rays in the heliosheath. In: *Proceedings of the Particle Acceleration and Transport in the Heliosphere and Beyond: 7th Annual International AstroPhysics Conference*. 2008. 343–348
- 76 Li H, Wang C, Richardson J D. Properties of the termination shock observed by Voyager 2. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19107
- 77 Möbius E, Bochsler P, Bzowski M, et al. Direct observations of interstellar H, He, and O by the interstellar boundary explorer. *Science*, 2009, 326: 969–971
- 78 Bochsler P, Petersen L, Möbius E, et al. Estimation of the neon/oxygen abundance ratio at the heliospheric termination shock and in the local

- interstellar medium from IBEX observations. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 198: 13
- 79 Burlaga L F, Ness N F. Observations of the interstellar magnetic field in the outer heliosheath: Voyager 1. *Astrophys J*, 2016, 829: 134
- 80 Dialynas K, Krimigis S M, Mitchell D G, et al. The bubble-like shape of the heliosphere observed by Voyager and Cassini. *Nat Astron*, 2017, 1: 134
- 81 McComas D J, Alexashov D, Bzowski M, et al. The heliosphere's interstellar interaction: No bow shock. *Science*, 2012, 336: 1291–1293
- 82 McComas D J, Allegrini F, Bochsler P, et al. Global observations of the interstellar interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX). *Science*, 2009, 326: 959–962
- 83 McNutt Jr R L, Wimmer-Schweingruber R F, Gruntman M, et al. Near-term interstellar probe: First step. *Acta Astronaut*, 2019, 162: 284–299
- 84 Carr M H, Head Iii J W. Geologic history of Mars. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 294: 185–203
- 85 Langlais B, Purucker M E, Manda M. Crustal magnetic field of Mars. *J Geophys Res*, 2004, 109: E02008
- 86 Ehlmann B L, Anderson F S, Andrews-Hanna J, et al. The sustainability of habitability on terrestrial planets: Insights, questions, and needed measurements from Mars for understanding the evolution of Earth-like worlds. *J Geophys Res Planets*, 2016, 121: 1927–1961
- 87 Cui J, Gu H, Huang X. Present-day atomic hydrogen escape on Mars and its variability (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2022, 52: 239502 [崔峻, 顾浩, 黄旭. 当前火星大气氢原子逃逸及其变化性. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2022, 52: 239502]
- 88 Wordsworth R D. The climate of early Mars. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2016, 44: 381–408
- 89 Skok J R, Mustard J F, Ehlmann B L, et al. Silica deposits in the Nili Patera caldera on the Syrtis Major volcanic complex on Mars. *Nat Geosci*, 2010, 3: 838–841
- 90 Werner S C. The global martian volcanic evolutionary history. *Icarus*, 2009, 201: 44–68
- 91 Michalski J R, Bleacher J E. Supervolcanoes within an ancient volcanic province in Arabia Terra, Mars. *Nature*, 2013, 502: 47–52
- 92 Fassett C I, Head Iii J W. The timing of martian valley network activity: Constraints from buffered crater counting. *Icarus*, 2008, 195: 61–89
- 93 Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the martian surface. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 291–315
- 94 Taylor F W. The Scientific Exploration of Venus. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- 95 Drossart P, Montmessin F. The legacy of Venus Express: Highlights from the first European planetary mission to Venus. *Astron Astrophys Rev*, 2015, 23: 5
- 96 Nakamura M, Titov D, McGouldrick K, et al. Special issue “Akatsuki at Venus: The first year of scientific operation”. *Earth Planets Space*, 2018, 70: 144
- 97 Horinouchi T, Hayashi Y Y, Watanabe S, et al. How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere. *Science*, 2020, 368: 405–409
- 98 Zolotov M Y, Sprague A L, Hauck II S A, et al. The redox state, FeO content, and origin of sulfur-rich magmas on Mercury. *J Geophys Res Planets*, 2013, 118: 138–146
- 99 Nittler L R, Starr R D, Weider S Z, et al. The major-element composition of mercury's surface from MESSENGER X-ray spectrometry. *Science*, 2011, 333: 1847–1850
- 100 Hubbard W, Podolak M, Stevenson D. The interior of Neptune. *Nept Triton*, 1995, 109: 109–138
- 101 Wuchterl G. Extrasolar giant planets: Masses and luminosities from *in-situ* formation theories. In: *Proceedings of the From Extrasolar Planets to Cosmology: The VLT Opening Symposium*. Berlin and Heidelberg: Springer, 2000. 408–414
- 102 Young R E, Smith M A, Sobeck C K. Galileo Probe: *In situ* observations of Jupiter's atmosphere. *Science*, 1996, 272: 837–838
- 103 Serigano J, Horst S M, He C, et al. Compositional measurements of Saturn's upper atmosphere and rings from Cassini INMS. *J Geophys Res Planets*, 2020, 125: e2020JE006427
- 104 Gurnett D A, Kurth W S, Hospodarsky G B, et al. Control of Jupiter's radio emission and aurorae by the solar wind. *Nature*, 2002, 415: 985–987
- 105 Yao Z H, Grodent D, Kurth W S, et al. On the relation between Jovian aurorae and the loading/unloading of the magnetic flux: Simultaneous measurements from Juno, Hubble Space Telescope, and Hisaki. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 11632–11641
- 106 Fletcher L N, Simon A A, Hofstadter M D, et al. Ice giant system exploration in the 2020s: An introduction. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2020, 378: 20190473
- 107 Blanc M, Mandt K, Mousis O, et al. Science goals and mission objectives for the future exploration of ice giants systems: A Horizon 2061 perspective. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 1–59
- 108 Spilker L. Cassini-Huygens' exploration of the Saturn system: 13 years of discovery. *Science*, 2019, 364: 1046–1051
- 109 Phillips C B, Pappalardo R T. Europa Clipper mission concept: Exploring Jupiter's Ocean Moon. *Eos Trans AGU*, 2014, 95: 165–167
- 110 Lunine J I. Ocean worlds exploration. *Acta Astronaut*, 2017, 131: 123–130
- 111 Tian F. Habitable planetary environments and extraterrestrial life (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2093–2100 [田丰. 宜居环境与地外生命. *科学通报*, 2016, 61: 2093–2100]
- 112 Cleaves H J. Prebiotic chemistry: What we know, what we don't. *Evo Edu Outreach*, 2012, 5: 342–360
- 113 Barge L M, Rodriguez L E, Weber J M, et al. Determining the “biosignature threshold” for life detection on biotic, abiotic, or prebiotic worlds.

- [Astrobiology](#), 2021, 22: 481–493
- 114 Kate I L T. Organic molecules on Mars. [Science](#), 2018, 360: 1068–1069
 - 115 Erastova V, Degiacomi M T, Fraser D G, et al. Mineral surface chemistry control for origin of prebiotic peptides. [Nat Commun](#), 2017, 8: 2033
 - 116 Blackmond D G. Asymmetric autocatalysis and its implications for the origin of homochirality. [ChemInform](#), 2004, 35: 5732–5736
 - 117 Neveu M, Kim H J, Benner S A. The “Strong” RNA World Hypothesis: Fifty years old. [Astrobiology](#), 2013, 13: 391–403
 - 118 Rimmer P B, Thompson S J, Xu J, et al. Timescales for prebiotic photochemistry under realistic surface ultraviolet conditions. [Astrobiology](#), 2021, 21: 1099–1120
 - 119 Mojarro A, Jin L, Szostak J W, et al. In search of the RNA world on Mars. [Geobiology](#), 2021, 19: 307–321
 - 120 Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. [Sci Adv](#), 2017, 3: e1600983
 - 121 Knoll A H, Nowak M A. The timetable of evolution. [Sci Adv](#), 2017, 3: e1603076
 - 122 Planavsky N J, Rouxel O J, Bekker A, et al. The evolution of the marine phosphate reservoir. [Nature](#), 2010, 467: 1088–1090
 - 123 Cockell C S, Bush T, Bryce C, et al. Habitability: A review. [Astrobiology](#), 2016, 16: 89–117
 - 124 Lin W, Li Y L, Wang G H, et al. Overview and perspectives of astrobiology (in Chinese). [Chin Sci Bull](#), 2020, 65: 380–391 [林巍, 李一良, 王高鸿, 等. 天体生物学研究进展和发展趋势. 科学通报, 2020, 65: 380–391]
 - 125 Solomon S C, Aharonson O, Aurnou J M, et al. New perspectives on ancient Mars. [Science](#), 2005, 307: 1214–1220
 - 126 Seager S, Petkowski J J, Gao P, et al. The Venusian lower atmosphere haze as a depot for desiccated microbial life: A proposed life cycle for persistence of the Venusian aerial biosphere. [Astrobiology](#), 2021, 21: 1206–1223
 - 127 Gil-Garcia M, Iglesias V, Pallarès I, et al. Prion-like proteins: From computational approaches to proteome-wide analysis. [FEBS Open Bio](#), 2021, 11: 2400–2417
 - 128 Pross A. What is Life? How Chemistry Becomes Biology. Oxford: Oxford University Press, 2016
 - 129 Voytek M A. NASA astrobiology strategy 2015. [Astrobiology](#), 2016, 16: 654–656
 - 130 Green J, Hoehler T, Neveu M, et al. Call for a framework for reporting evidence for life beyond Earth. [Nature](#), 2021, 598: 575–579
 - 131 Merino N, Aronson H S, Bojanova D P, et al. Living at the extremes: Extremophiles and the limits of life in a planetary context. [Front Microbiol](#), 2019, 10: 780
 - 132 Jiang Z, Liu Q, Roberts A P, et al. The magnetic and color reflectance properties of hematite: From Earth to Mars. [Rev Geophys](#), 2022, 60: e2020RG000698
 - 133 Bosak T, Moore K R, Gong J, et al. Searching for biosignatures in sedimentary rocks from early Earth and Mars. [Nat Rev Earth Environ](#), 2021, 2: 490–506
 - 134 Bristow T F, Grotzinger J P, Rampe E B, et al. Brine-driven destruction of clay minerals in Gale crater, Mars. [Science](#), 2021, 373: 198–204
 - 135 Smith P H, Bell I J F, Bridges N T, et al. Results from the Mars Pathfinder camera. [Science](#), 1997, 278: 1758–1765
 - 136 Albee A L, Arvidson R E, Palluconi F, et al. Overview of the Mars Global Surveyor mission. [J Geophys Res](#), 2001, 106: 23291–23316
 - 137 Saunders R S, Arvidson R E, Badhwar G D, et al. 2001 Mars Odyssey mission summary. [Space Sci Rev](#), 2004, 110: 1–36
 - 138 Crisp J A, Adler M, Matijevic J R, et al. Mars exploration rover mission. [J Geophys Res](#), 2003, 108: 8061
 - 139 Hecht M H, Kounaves S P, Quinn R C, et al. Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix lander site. [Science](#), 2009, 325: 64–67
 - 140 Freissinet C, Glavin D P, Mahaffy P R, et al. Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars. [J Geophys Res Planets](#), 2015, 120: 495–514
 - 141 Klein H P, Horowitz N H, Levin G V, et al. The Viking biological investigation: Preliminary results. [Science](#), 1976, 194: 99–105
 - 142 McKay D S, Gibson Jr E K, Thomas-Keppta K L, et al. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. [Science](#), 1996, 273: 924–930
 - 143 Yung Y L, Chen P, Neelson K, et al. Methane on Mars and habitability: Challenges and responses. [Astrobiology](#), 2018, 18: 1221–1242
 - 144 Leslie M. Three new missions head for Mars. [Engineering](#), 2020, 6: 1336–1338
 - 145 Smith M, Craig D, Herrmann N, et al. The Artemis Program: An overview of NASA’s activities to return humans to the Moon. In: Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2020. 1–10
 - 146 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. [Exp Astron](#), 2021, 51: 551–558
 - 147 Wang C, Shi P, Song T T, et al. Voyage 2050: ESA science’s long-term plan and enlightenment (in Chinese). [Sci Technol Rev](#), 2022, 40: 6–15 [王赤, 时蓬, 宋婷婷, 等. 远航2050: 欧洲空间科学规划及启示. 科技导报, 2022, 40: 6–15]
 - 148 Liu J Z, Hu C B, Pang F C, et al. Strategy of deep space exploration (in Chinese). [Sci Sin-Tech](#), 2020, 50: 1126–1139 [刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1126–1139]

Summary for “深空探测之前沿科学问题探析”

Frontier scientific questions in deep space exploration

Weiren Wu¹, Chi Wang^{2*}, Yang Liu², Liping Qin³, Wei Lin⁴, Shengyi Ye⁵, Hui Li², Fang Shen² & Zhe Zhang^{1,6}

¹ Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100195, China;

² State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

⁴ Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁵ Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518005, China;

⁶ School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100811, China

* Corresponding author, E-mail: cw@spaceweather.ac.cn

Deep space exploration is one of the frontiers of scientific research and driven by human instincts to explore the unknown. Since the Moon Race in the 1960s and 1970s, deep-space probes have explored many celestial bodies in our solar system, including eight planets. These explorations have yielded tremendous scientific discoveries, but they also revealed many more unsolved mysteries. The 21st century has witnessed a remarkable increase in deep-space exploration activities, with several new agencies launching their spacecraft in the past few decades. As a result of technological advancement, exploration success rates have improved significantly.

A systematic review of frontier scientific questions can provide invaluable references for mission planning strategies and boost scientific discoveries and breakthroughs in the future. In general, these questions are related to three primary scientific subjects: (1) One of the primary scientific objectives of deep-space exploration is to study the origin and evolution of the solar system. From the collapse of the solar nebula to the formation of the planetary system, the solar system has undergone a complex evolutionary process. The components of the current solar system, particularly the residual presolar material, can provide critical information for understanding the initial conditions and evolution of the solar system. The Moon, being the nearest celestial body to Earth, serves as an outpost for exploring other planetary bodies and is especially important for testing deep-space exploration equipment and studying solar system evolution. (2) Another objective of deep space exploration is to better understand the evolution of planetary habitability. The Sun is an important factor affecting habitability, and eruptions of solar activities can have a substantial impact on the space environment of the solar system. The environment of the Earth and other planets has changed dramatically over billions of years of evolution. Although life has only been confirmed on Earth, other celestial bodies might also have had habitable conditions along the evolutionary process. Decoding the evolution of the habitable environment of solar system planetary bodies is of great significance for understanding the formation and evolution of habitable Earth and the origin of life on Earth. (3) Extraterrestrial life detection is a critical scientific topic in deep space exploration, with far-reaching implications for understanding the origin, evolution, and distribution of life in solar and extrasolar systems. The current scientific challenges in the detection of extraterrestrial life primarily involve four aspects: the origin and evolution of life, extraterrestrial habitable environments, life signal identification, and analogy of terrestrial extreme environments.

In endeavors to answer these scientific questions, more well-planned deep-space exploration missions are required to collect evidence. In order to outpace opponents in the continuing space exploration endeavor, the National Aeronautics and Space Administration (NASA), the European Space Agency (ESA), and other rising roles have made their ambitious roadmaps. NASA will encourage commercial companies to join future missions through the Artemis program, and has planned missions to explore Venus, asteroids, and icy bodies. The ESA proposed tens of missions in its white paper *Voyage 2050*. In the coming decades, China will lay the groundwork for the International Lunar Research Station through three Chang'e and four Russian Luna missions. Furthermore, Tianwen-2 and Tianwen-3 will return samples from asteroids and Mars, respectively; Tianwen-4 is intended to explore the Jupiter system. The success of these missions will yield unprecedented information for deciphering the mysteries of the solar system and life, as well as considerably expanding our knowledge of the universe we live in.

deep space exploration, solar system evolution, the Moon, planet, extraterrestrial life

doi: [10.1360/TB-2022-0667](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0667)