

2022年空间科学与深空探测热点回眸

王赤, 时蓬, 白青江, 王琴, 范全林*

中国科学院国家空间科学中心空间科学与深空探测规划论证中心, 北京 100190

摘要 2022年世界空间科学和探索热点频现。按空间天文、日球层物理、行星科学、空间地球科学和微重力物理与空间生命科学五大领域, 梳理了全球空间科学重要进展, 韦布空间望远镜及其首批成果成为年度最大亮点; 盘点了各国空间科学任务及其代表性成果, 中国空间科学先导专项科学卫星系列以及探月工程“嫦娥五号”样品的研究突破令人瞩目。载人航天是空间科学与应用的重要平台, 中国空间站建成引起世界关注。点评了各国的空间科学中长期规划和国家空间战略相关情况, 展望了2023年即将发射升空的空间科学新任务。

关键词 空间科学; 科学卫星; 深空探测器; 2022年研究热点; 科学发现

2022年12月16日19:46(北京时间), 美国国家航空航天局(NASA)和法国国家空间研究中心(CNES)等联合研发的地表水和海洋测高卫星(SWOT), 搭载SpaceX公司第6次发射的猎鹰9号可回收火箭成功入轨, 预计6个月后开始科学观测。SWOT耗资12亿美元, 采用干涉雷达及卫星测高记录水体表面反射信号, 以突破性的分辨率来测量和跟踪全球地表水的运动乃至海洋中小尺度涡流, 进而改变人们对全球水循环的认知, 提供监测全球变暖的新视角(图1)。

SWOT升空也为2022年全球重要空间科学任务发射计划画上了句号(表1)。商业航天开始涉

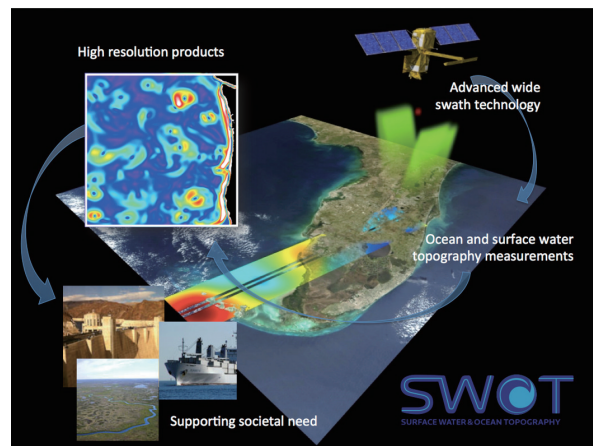


图1 SWOT成为全球水循环研究的新平台
(图片来源: NASA)

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(Y329181AAS); 中国科学院学部咨询评议项目(E22191A11S); 中国科学院光电空天-重大创新领域战略规划研究项目(Y82131A28S)

作者简介: 王赤, 中国科学院院士, 研究员, 研究方向为空间物理和空间天文学, 电子信箱: cw@nssc.ac.cn; 范全林(通信作者), 正高级工程师, 研究方向为空间科学发展战略、政策和规划论证, 电子信箱: fan@nssc.ac.cn

引用格式: 王赤, 时蓬, 白青江, 等. 2022年空间科学与深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 79-102; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.01.005

表1 2022年发射升空的重要空间科学任务

任务名称	科学目标	主要有效载荷	卫星质量与轨道	发射日期	研制方
“赏月号” (KPLO/Danuri)	探测月球环境、地形和 资源	高分辨相机(ShadowCam, NASA提供)、月球地形成像 仪(LUTI)、广角偏振相机 (PolCam)、磁强计(KMAG)、 伽马射线光谱仪(KGRS)等	678 kg, 100 km 绕月轨道	8月4日	韩国航空 宇宙研究院 (KARI)
“夸父一号” (ASO-S)	“一磁两暴”:即观测和 研究太阳磁场、太阳耀斑 和日冕物质抛射(CME) 的起源及三者之间可能 存在的因果关系	全日面矢量磁像仪 (FMG)、硬X射线成像仪 (HXI)、莱曼阿尔法太阳望远 镜(LST)	859 kg, 720 km 太阳同步晨昏轨 道	10月9日	中国科学院
中间层气辉/ 气溶胶层析成 像和光谱探测 卫星(MATS)	探测地球中间层大气 波动和夜光云,揭示高层 大气与近地面天气的相 互作用机制	临边成像仪(Limb Imag- er)、星下点成像仪(Nadir Im- ager)	50 kg, 580 km× 598 km 太阳同步 轨道,倾角97.7°	11月4日	瑞典斯德哥 尔摩大学
地表水和海 洋测高卫星 (SWOT)	全球湖泊、河流等地表 水文调查(TWH),海面高 精度测绘(SSH),监测沿 海过程,测量小尺度洋流 和旋涡等	Ka波段雷达干涉计(KaR- In, NASA)、波塞冬-3C 雷达 高度计(Poseidon-3C, CNES)、先进双波束微波辐 射仪(AMR, NASA)	2200 kg, 890 km 圆轨道,倾角77.6°	12月16日	美国 NASA、 法国 CNES、加 拿大航天局 (CSA)、英国航 天局(UKSA)

足月球探测,日本 Ispace 公司 12 月发射了白兔-R 一号(HAKUTO-R M1)月球着陆器。与世界全年 2200 多个航天器发射入轨相比,即使一并考虑以科学目标立项、搭载升空的近 10 个立方星任务,空间科学卫星(含深空探测器)的数量占比也很小。不过,不以数量论英雄,空间科学仍当之无愧成为世界航天活动的重要标志。以韦布空间望远镜(JWST)为例,2022 年 7 月 11 日它的第 1 张全彩色图像——“韦布第一深场”星系团 SMACS 0723 高质量图像就引起世界轰动。临近年底,《Science》将 JWST 的空间观测评为 2022 年科学突破之首并获首届包米克(Bhaumik)年度突破奖^[1],《Nature》将 JWST 的运控科学家 Jane Rigby 评为 2022 年度十大科学人物之首^[2]。实际上,这些空间科学任务实现了关键核心技术重大突破、提供了大型复杂的科学研究系统,吸引了各国科学家广泛参与研究,成为人类航天活动的新里程碑。

本文纵览全球,梳理了空间科学各领域的重要进展,盘点了各国空间科学任务的代表性成果,以

期为中国加速空间科学发展、建设世界科技强国提供启示。

1 空间天文

由于摆脱了地球大气层的影响,空间望远镜已实现电磁波全谱段观测浩瀚宇宙,关于致密天体、暗物质暗能量和系外行星等重大科学问题或新前沿方向的年度进展可圈可点。

1.1 宇宙演化

哈勃空间望远镜(HST)发现迄今距离地球最远的单个恒星“晨星”。入轨观测 32 年,HST 仍不断带给人们惊喜。2022 年 3 月,它刷新了自己 2018 年创造的记录,探测到一颗距地球 129 亿光年的恒星 Earendel(古英语意为“晨星”),成为目前发现的距离地球最远的单个恒星(图 2)^[3]。Earendel 存在于宇宙大爆炸后的最初 10 亿年,红移高达 6.2。研究表明它是一颗罕见的、大质量的贫金属恒星,可能是在宇宙产生大量重元素之前形成的,值得后随

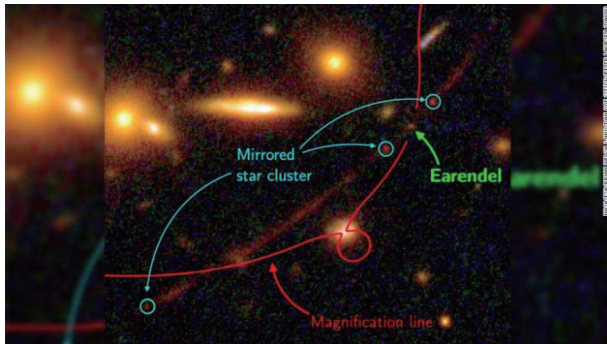


图2 HST观测到迄今距离地球最远的单个恒星“晨星”观测的重点关注。

HST给出迄今最精确哈勃常数 H_0 测量结果。2022年5月,2011年度诺贝尔物理学奖得主Adam Riess团队基于HST近30年的观测结果,在研究宇宙膨胀速率的“与暗能量状态方程相关的超新星及哈勃常数 H_0 ”研究项目(SHOES)资助下,通过测量42颗Ia型超新星标记物,确定 H_0 值为 $(73\pm 1) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$,其不确定度已达1%水平,可谓对 H_0 的重大更新^[4-5],但它却无助于消除哈勃常数危机。因为结合标准宇宙模型和欧洲空间局(ESA)普朗克卫星(Planck)宇宙微波背景辐射测量结果得出的 H_0 较低,为 $(67.5\pm 0.5) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$,这也意味着当今的宇宙学理论仍存在缺失,宇宙的构成仍存在未知。

2022年下半年,JWST成为本年度新主角。有人将JWST视作HST的继任者,但实际上两者的主镜面尺寸、空间位置、科学目标、观测波段等各方面存在很大区别。JWST主要在红外波段观察宇宙,HST集中在可见光和紫外(尽管它有部分红外观测能力),称JWST为HST在科学上的合作者更合适,而某种程度上JWST其实是斯皮策空间望远镜(SST)^[6]的继任者。

2022年7月12日,NASA发布了JWST拍摄的首批5张宇宙深空照片:46亿年前出现的星系团SMACS 0723、距地球1150光年的系外行星WASP-96b(一颗热木星)大气成分光谱、距地球2000光年的垂死恒星喷出物形成的南天环状星云(船帆座NGC3132)、“斯蒂芬五重奏”星系群、船底座大星云中的恒星苗圃和诞生中的恒星。这是迄今最高分辨率的早期宇宙图像,开启了天文学的新时代。

研究暗弱的极冷天体、尘埃物质和深远古老宇

宙,空间红外观测是首选。基于有史以来最大的反射主镜面和红外敏感系统,JWST正在获取前所未有的细节,而且合成照片的速度也比HST快10倍,海量照片将帮助人们窥见更多的宇宙奥秘,有望探测到第一代恒星和星系发出的第一缕光。加之JWST飞行消耗的燃料比预期少很多,所以它很可能在2040年前都是人类获取宇宙深处数据的主要工具。JWST已掀起了天文学界一场新的竞赛,学术论文预印本网站arXiv上已有1600多篇JWST相关的论文,而且几乎每天都有更新。参考此前HST产出22000多篇论文的战绩,JWST可能会更多。JWST更为深远的影响在于它打开了认知宇宙的新窗口,将重塑人类对于宇宙的认识。这也正是JWST获评为2022年度科学突破事件的根本原因。

软X射线探测到一颗处于火球阶段的新星(nova)。俄德联合X射线天文卫星Spektr-RG空间天文台首次捕捉到了经典新星的“火球”阶段,证实了1990年关于新星物理的预测,成为《Nature》封面文章^[7]。当从伴星那里吸积氢的白矮星出现不受控的热核反应时,就会发生新星爆炸。由此释放的巨大能量最终会形成明亮的光源,成为肉眼可见的新星。但理论预测其中一部分能量会在反应早期以强烈的光度闪烁的形式耗散掉,进入火球阶段(fireball),产生可观测的软X射线。科研人员利用Spektr-RG搭载的eROSITA载荷在2020年6—12月的第2次全天空巡天时,发现网罟座新星YZ Reticuli在光谱可见前数小时,发出了一道短促而明亮的软X射线闪光,与新星“火球”阶段的理论模型完全一致。科研人员曾称这次发现非常幸运,因为在Spektr-RG 4年的任务中,预计eROSITA只会探测到1~2个这样的火球。然而,因为乌克兰危机,2022年2月,德国马克斯·普朗克地外物理研究所(MPE)向eROSITA阵列望远镜发出指令,进入安全模式、停止科学运行,已导致Spektr-RG无法进行大部分科学探测,俄罗斯随后大幅调整了观测计划。

Fermi卫星确认超新星(supernova)遗迹是极端宇宙线的来源。时至今日,关于宇宙线的起源、加速机制以及它们在星际空间和星系际空间中的传播等基本问题仍未得到彻底解答。超新星遗迹、恒

星形成区和银河系中心的超大质量黑洞等是候选的 1000 TeV 宇宙线加速器 (PeVatrons), 亟待观测验证。高能宇宙线在传播过程中与星际介质碰撞可产生能量约为宇宙线母粒子能量 1/10 的高能伽马射线, 被称为“强子起源”的伽马射线。2022 年 8 月, 科研人员通过分析“费米伽马射线空间望远镜”(Fermi) 连续 12 年的观测数据, 首次确认超新星遗迹是 PeVatron^[8]。他们发现距地球约 2600 光年的仙王座超新星遗迹 SNR G106.3+2.7 可能是新的超新星遗迹群中最亮的一个, 其伽马射线能量通量在万亿电子伏特 (TeV) 能量处达到峰值。中国西藏羊八井 AS- γ 实验阵列于 2021 年也探测到了超新星遗迹 SNR G106.3+2.7 方向存在超过 100 TeV 的伽马射线。它们强烈支持对观测到的伽马射线的强子起源解释, 并证实了长期寻求的银河系 PeVatron 和超新星遗迹之间的关联。

悟空号发现宇宙线硼/碳比能谱新结构, 对经典宇宙线传播模型提出了挑战。通过探测宇宙线核素粒子来研究宇宙线的加速和传播机制是悟空号的核心科学目标之一。和国际上其他类似探测设备相比, “悟空”号具备优异的电荷分辨本领, 可以对高能宇宙线核素粒子进行高精度鉴别。2022 年 10 月, 基于其收集到的前 6 年观测数据, “悟空”号国际合作组获得了 10 GeV/n~5.6 TeV/n 能段的硼/碳 (B/C) 和硼/氧 (B/O) 的精确测量结果 (图 3), 首次以高置信度发现宇宙线 B/C 和 B/O 在相同能量 (约 100 GeV/n) 处出现变硬的行为, 意味着经典的单一幂律分布宇宙线传播理论需要进行重大修改^[9]。该结果对揭示宇宙线的传播机制以及星际介质的湍动属性具有十分重要的意义, 也意味着之前基于反物质宇宙线的暗物质间接探测的天体物理背景需要重新估计。

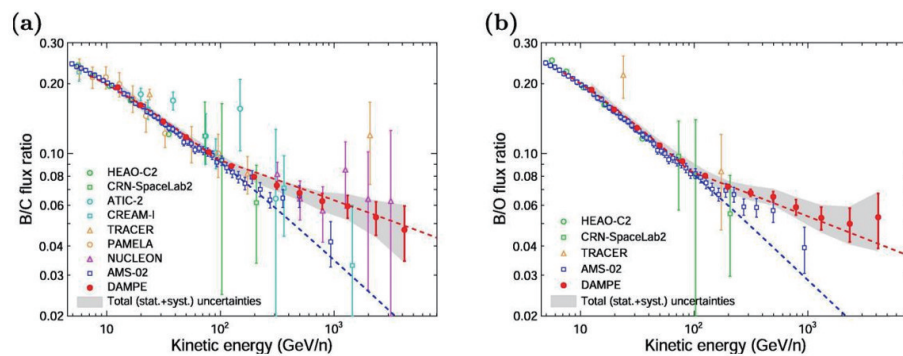


图3 “悟空”号探测的 10 GeV/n~5.6 TeV/n 能段宇宙线硼/碳比(a)和硼/氧比(b)随能量的变化

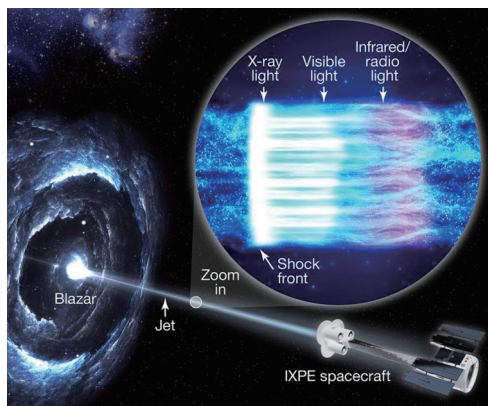
1.2 黑洞与暗物质

距离地球 130 亿光年的超大质量黑洞祖先“现身”。科研人员利用 HST 首次观测到一个古老的红色尘埃物体 GNz7q, 它“一半是星系, 一半是类星体”, 诞生于宇宙大爆炸 7.5 亿年后的“宇宙黎明”时期, 拥有介于尘土飞扬的恒星形成星系和明亮发光的黑洞(类星体)之间的特征, 被称为过渡红色类星体, 理论认为, 存在于早期宇宙中, 但此前从未被观测到。观测结果与理论模拟非常一致, 表明 GNz7q 是首个处于过渡、快速增长阶段的黑洞, 可能是超大质量黑洞的“前兆”或已知最早的祖先, 为理解早

期宇宙中超大质量黑洞如何快速增长提供了新途径^[10]。

2021 年 12 月升空的成像 X 射线偏振探测器 (IXPE) 有望揭开耀变体 (blazar) 这一宇宙最强“粒子加速器”之谜。黑洞难以被直接观测, 而宇宙大部分星系核心都存在着一个超大质量黑洞, 一些活跃的超大质量黑洞可以从核心发射接近光速的相对论喷流并发出明亮的光芒。当喷流朝向地球时人们则将此活动星系核称为耀变体。耀变体喷流 (blazar jets) 粒子的能量最终无疑来自超大质量黑洞, 但它如何被加速到如此高能量却是未解之

谜。2022年3月初和3月底,科研人员利用IXPE对位于武仙座的耀变体 Mrk501 进行了2次观测,并会同其他望远镜开展了可见光、红外、射电等多波段准同时天地联测(图4)。他们发现所有波长的光偏振方向一样、与喷流方向一致,但X射线偏振比可见光更强,后者又比射电波更强,X射线在更接近粒子加速源的地方发射^[11]。将观测结果与理论模型比较,对粒子加速的最可能的解释是喷流中的激波:Mrk501的相对论喷流产生的辐射表明粒子是被喷流向外传播的激波加速的。这一发现有助于人们更加深入理解黑洞系统的高能辐射过程,并继续用不同偏振方法探测超大质量黑洞系统。



喷流中的粒子(蓝色)撞上激波(白色)后通过费米加速机制被加速,同时辐射出X射线

图4 IXPE观测Mrk501示意(图片来源:NASA)

船帆座脉冲星风云X射线偏振趋近同步辐射理论极限。脉冲星风云是快速旋转的脉冲星驱动的星风冲击外部物质产生的高能天体,能够发射出射电、X射线、高能伽马射线等不同波段的辐射。船帆座脉冲星风云(Vela PWN)距离地球约900光年,是距离地球最近的脉冲星风云之一。科研人员利用IXPE探测数据,发现Vela PWN X射线辐射存在极强的偏振,偏振度(PD)趋近同步辐射加速器发射所能产生的理论最大值,是人类目前在高能波段探测到的偏振度最高的宇宙天体^[12]。它表明Vela PWN核心辐射区域的磁场结构高度有序,脉冲星风云中的电子在高度均匀的磁场中被加速,改变了科学家对粒子加速机制的认识。

中国的“慧眼”号再次刷新直接测量宇宙最强

磁场纪录。中子星是宇宙中具有最强磁场的天体,对其X射线能谱的回旋吸收线特征(CRSFs)的探测是目前直接测量中子星表面附近磁场强度的唯一方法。“慧眼”卫星团队在编号为Swift J0243.6+6124的中子星X射线双星发现了能量高达146 keV的回旋吸收线,对应超过16亿特斯拉的中子星表面磁场,这不仅是迄今宇宙天体磁场直接测量的最高纪录,而且也首次在超亮X射线源中直接测量了其中子星的表面磁场^[13]。这也是继2020年慧眼团队直接测量到约10亿T的宇宙最强磁场之后,第3次大幅度刷新了最高能量回旋吸收线和宇宙最强磁场直接测量的世界纪录,表现出“慧眼”卫星在探测天体高能X射线能谱方面具有国际领先的独特能力。

极轻中子星挑战现有恒星物理学。科研人员利用ESA盖亚卫星(Gaia)数据,计算了HESS J1731-347超新星残余中发现的一颗半径约10 km的中子星,其质量仅为太阳的0.77倍,轻于理论预期,或为一种被称为“奇异星”、尚未发现过的天体,扩大了人们对宇宙低温致密物质状态的认知^[14]。

2022年“核光谱望远镜阵列”卫星(NuSTAR)迎来成功发射十周年,NASA盘点了其亮点科学成就^[15]。NuSTAR作为一个探索者计划小型任务(Explorer 93, SMEX 11),采用掠射式聚焦望远镜对宇宙高能X射线(6~79 keV)进行成像观测,可探测黑洞硬X射线辐射、表征超新星爆发残余物、观测宇宙中的其他极端现象如中子星及日冕等X射线源。NuSTAR在黑洞观测领域的最大成就之一是与ESA“X射线多镜面空间天文台-牛顿空间望远镜”(XMM-Newton)合作完成了对黑洞自旋的首次测量,最快为光速的86%,为研究星系演化提供了新视角^[16]。

“悟空”号暗物质粒子探测卫星发表暗物质线谱搜寻结果。弱相互作用大质量粒子(WIMP)是暗物质粒子模型中的重要候选者,一些模型预言WIMP暗物质粒子湮灭或者衰变可以形成GeV-TeV能区的谱线。基于前5年的观测数据,“悟空”号合作组在10~300 GeV的能区内进行了线谱信号搜寻,对暗物质湮灭到双光子通道的截面上限以及

衰变到光子、中微子的衰变寿命下限予以了强限制^[17]。该工作是“悟空”号的首个伽马射线数据分析结果,证明了其高能量分辨探测器在发现暗物质方面的潜力。

1.3 银河系

地面空间望远镜携手揭示银河系早期形成和演化历史。科研人员基于郭守敬望远镜(LAMOST)和Gaia的巡天数据,提出了一种估计恒星年龄、了解银河系形成的新方法,成功获取了迄今最为精确的大样本恒星年龄信息,并按照时间顺序,绘制了银河系幼年和青少年时期的形成与演化图像,更新了人们对银河系早期形成历史的传统认知,成为《Nature》封面文章^[18]。

银河系基本结构包括银河中心的核球、银晕和银盘,而银盘又包括厚盘和薄盘。但银晕和银盘是什么时候、如何形成的? 这些问题是世界诸多地面和空间望远镜大规模巡天观测的主要科学目标。LAMOST发布了千万量级的恒星光谱数据,Gaia则提供了14亿颗恒星的高精度光度和位置参数。基于LAMOST和Gaia的数据,研究人员构建了包含25万颗亚巨星恒星(Subgiant star)的高质量数据样本,并测定了它们的精确年龄和金属丰度,样本平均年龄精度为7%,空间覆盖范围达3万光年。研究发现,银河系的形成和演化历史可分成2个阶段,厚盘恒星要比银晕恒星早20亿年形成:从130亿年前到80亿年前的早期阶段,形成了银河系的厚盘和银晕,期间约110亿年前发生了盖亚-恩克拉多斯矮星系(Gaia-Sausage-Enceladus, GSE)与青少年时期的银河系碰撞并合事件,形成了银晕结构;80亿年前至今的晚期阶段,形成了银河系薄盘。换句话说,138亿年前宇宙大爆炸,130亿年前厚盘开始形成,110亿年前银晕形成,80亿年前至今银河薄盘形成。

Gaia发布第3批观测数据集DR3,绘制了迄今最详尽的银河系多维全景地图。DR3是从2014年7月25日(协调世界时(UTC)10:30)到2017年5月28日(UTC时间08:44)为期34个月的完整观测数据集,包含了对银河系中近20亿颗恒星的位置、速度、化学成分等的最新观测结果^[19]。在对这些数据

的初步分析中,科学家发现了银河系恒星的“星震”、揭示恒星化学成分的恒星“DNA”和不对称运动等新现象,部分与DR3一起发布的研究论文已在2022年出版的《Astronomy & Astrophysics》“Gaia Data Release 3”特刊上集结发表^[20]。作为未来恒星和天体物理研究的基础数据库,DR3对全球天文学发展的影响会在未来10年内持续释放,而对DR3的深入研究将为人类提供更多对恒星、太阳系、银河系和更广阔的宇宙邻居的新见解,具有深远的意义。

1.4 系外行星

1995年飞马座51b的发现,开启了人类发现系外行星的时代。系外行星作为天文学领域的年轻分支,作为天文学与行星科学、天体生物学的交叉科学前沿,在随后的二十多年里得到了蓬勃发展,探测方法不断革新,研究手段有了长足进步,研究内容也更加细致深入。

2022年,天文学家发现了新的“系外卫星”候选者。鉴于天然卫星在太阳系的气态巨行星/冰巨星周围极为常见,科研人员分析了开普勒空间望远镜(Kepler)凌星法发现的70个类木系外行星,在Kepler-1708 b周围发现了一个凌星时刻变化(TTV)信号。对这个信号的最佳解释是Kepler-1708 b周围存在一颗系外卫星(Exomoon)Kepler-1708 b-i,且这仅有1%的可能性是个伪信号^[21]。Kepler-1708是颗黄白矮星,属F型恒星,距地球5500光年;Kepler-1708 b发现于2021年,在类火星轨道上绕Kepler-1708公转,轨道半径1.6 AU,公转周期2年;Kepler-1708 b-i半径为地球半径的2.61倍,和宿主行星的距离相当于行星半径的12倍,和木星系中木卫二的半长轴与木星半径的关系相似。当然,目前也有少数其他系外卫星候选者。期待通过JWST、罗曼空间望远镜(Nancy Grace Roman)^[22]或柏拉图系外行星凌星和恒星振荡卫星(PLATO)^[23]等的后随观测和深化研究,进一步证明Kepler-1708 b-i信号的真实性,并确认其系外卫星的可能身份,为破解系外行星系统的形成与演化提供新线索。

空间-地面望远镜联合观测揭示了系外类木

行星形成过程,或颠覆行星成因主流理论。科研人员利用昴星团望远镜(Subaru Telescope)和HST观测了大小类似木星、质量是木星9倍的系外行星御夫座AB b(AB Aurigae b)在距年轻恒星御夫座AB较远处的(~ 93 AU,约为冥王星与太阳距离的2倍)气体盘内的形成过程^[24],观测结果支持巨行星可由大团坍缩气体通过盘(引力)不稳定性形成的观点,而并非只能按主流标准的核吸积模型来形成。御夫座AB b这颗原行星形成后,由尘埃和气体组成的原行星盘中仍可见明显的螺旋结构,符合盘不稳定模型预测。了解类木行星的早期形成阶段对进一步了解大质量气态巨行星的演化具有重要意义,也有助于天文学家更好地认知太阳系的历史。科研人员还计划借助JWST等进一步研究AB Aurigae b等原行星的化学组成。

JWST首次发现系外行星大气存在CO₂的确切证据。科研人员利用JWST近红外光谱仪(NIRSpec),在700光年外环绕一颗类太阳恒星的系外行星WASP-39 b的大气层光谱中观察到了波长4.1~4.6 μm 的CO₂特征峰。这是迄今首个系外行星大气存在CO₂的确凿证据,为了解系外行星组成和形成提供了重要依据,这个重要发现也证明了JWST有能力探测直径更小、大气更薄的类地系外行星的大气成分。2011年,地面的“广域行星搜索”项目(WASP)用凌星法发现了热木星WASP-39 b。此前,包括HST、SST在内的空间望远镜观测显示,WASP-39b大气层中存在水蒸气、钠和钾。JWST的NIRSpec于2022年7月10日观测了WASP-39b大气的透射光谱,揭示了系外行星大气存在CO₂的第1个明确证据(图5)^[25]。

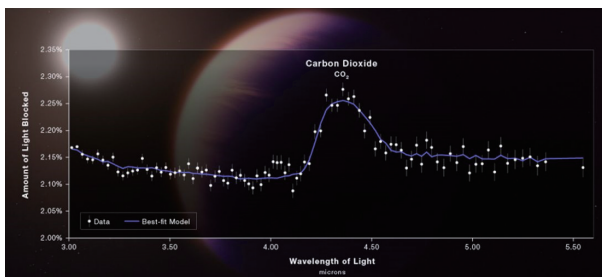


图5 JWST发现了系外行星WASP-39b大气存在CO₂的首个明确证据

此外,科研人员用JWST的近红外相机(NIRCam)和中红外成像仪(MIRI)对系外行星HIP 65426 b直接成像,完成了其系外行星成像能力测试^[26],发现JWST的性能比预期好10倍,而且比之前的任何望远镜都灵敏。HIP 65426 b于2017年由地面望远镜发现,其质量约相当于9个木星,围绕一颗距离地球355光年的恒星运行。科研人员期待JWST对体积更小(即土星大小甚至海王星大小)的系外行星进行成像。

实际上,JWST的一项主要科学任务就是系外行星研究:观测系外行星的大气并进行光谱分析,对系外行星直接成像揭示其细节特征,并期待最终发现一颗与地球大气相似的行星。显然,从发现到表征再到精细刻画,系外行星研究正在不断缩短人类寻找“我们在宇宙中是否唯一”这一问题答案的时间。

2 日球层物理

日球层(Heliopause)是太阳和太阳风影响的区域,与人类生存和现代社会发展息息相关。日球层物理是对空间物理与太阳物理的集成和新发展,研究对象涵盖了从地球空间、日地空间、行星际空间拓展至整个日球层及以远的广袤空间。2022年基于磁层多尺度探测星座任务(MMS)的研究进展成为年度亮点。

MMS任务2015年3月发射升空,是由4颗相同自旋稳定卫星组成的卫星编队,在地球空间形成金字塔型四面体结构,可以提供高达7.5 ms的等离子体数据。MMS是NASA日地探测计划的第4个任务(STP 4),以地球磁层为天然实验室,致力于探索无碰撞等离子体磁场重联的基本物理规律。

揭示空间跨尺度能量传输新机制。利用MMS数据,发现空间离子可以同时和宏观尺度的超低频波、微观尺度的电磁离子回旋波相互作用。跨尺度波动—粒子相互作用,可导致能量从宏观尺度到微观尺度的快速输运。这一机制有助于解释空间和天体系统中的能量耗散问题及等离子体加热和加速问题。此外,跨尺度波动—粒子相互作用还可导致不同尺度的动态过程相互耦合^[27]。这些发现为

进一步理解极光、地磁脉动以及空间高能粒子的产生提供了新思路。

发现行星际太阳风中湍动磁场重联的直接证据。基于MMS的高精度、高时间分辨率数据,首次发现行星际太阳风中湍动磁场重联^[28]。研究人员进一步分析了2017年10月至2019年5月MMS卫星的行星际太阳风数据,发现76个湍动磁场重联事例。统计研究发现,太阳风中的湍动经常发生,其发生率会随背景太阳风风速的增大而快速增加,表明快速太阳风中湍动磁场重联可能扮演着重要角色,可以有效加速和加热行星际等离子体。行星际太阳风中湍动磁场重联是非常普遍的现象,突破了之前普遍认为的太阳风磁场重联是准稳态的认知。

MMS任务团队提出了一种快速磁重联理论,用以解释星际空间发生磁重联的位置,无碰撞等离子体在霍尔效应的作用下,以可预测的恒定速率发生快速磁重联^[29]。未来几年,研究团队将利用MMS的观测数据验证该新理论,助力深入了解核聚变,并更好地预测来自太阳、可能影响地球的粒子风暴。

2022年1月,《Nature Astronomy》介绍了“夸父一号”/ASO-S卫星的科学目标、载荷构成及目前状态^[30]。2022年12月13日,“夸父一号”发布首批科学图像,公布了自2022年10月9日卫星成功发射以来获取的若干太阳科学观测图像(图6),在轨验

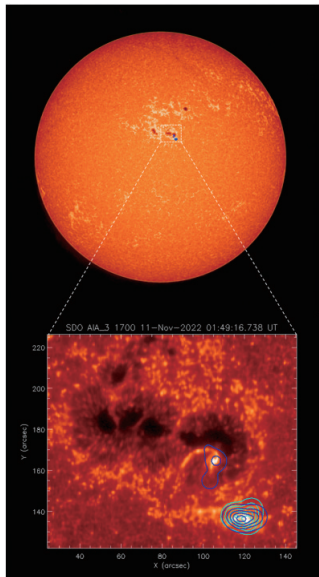


图6 “夸父一号”硬X射线成像仪(HXI)观测到的“双11”耀斑

证了3台有效载荷的观测能力和先进性。聚焦“一磁两暴”科学目标,利用太阳活动第25周峰年契机,“夸父一号”标志着中国开启综合性太阳空间观测的新时代。

此前,关于“羲和号”太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星的5篇论文在《中国科学》集中刊发^[31],概述了“羲和号”卫星的科学目标,技术指标及其在轨观测数据及其科学标定过程,双超新型卫星平台,科学载荷H α 成像光谱仪,搭载载荷太阳原子鉴频测速导航仪等。

3 行星科学

行星科学主要研究除太阳外的太阳系天体,其研究对象小至微流星体,大至气态巨行星,但系外行星探测仍习惯上纳入空间天文。2022年基于月球与火星探测的科学产出不断,找到月壤水、发现嫦娥石、揭秘月球年轻火山成因等,“嫦娥五号”月壤样品的返回引发了新一轮的月球研究热潮。

3.1 月球探测

“嫦娥五号”返回器于2020年12月17日携带1731 g月球样品返回地球后,中国即启动了系统的月壤样品实验室研究,分析月壤结构、物理特性、物质组成,获得一系列原创性成果,深化了人类对月球成因和演化历史及太阳系的认知,也为月球资源评价和开发提供了科学依据。

太阳风成因水是月表水来源之一。太阳风中带正电的氢离子不断轰击月球表面,会与月表物质中的氧原子结合,从而在月表生成羟基或水分子。2022年两项研究成果都指出嫦娥五号月壤存在大量的太阳风成因水。

“嫦娥五号”月壤样品矿物表层中存在大量的太阳风成因水。辉石、斜长石和橄榄石矿物作为嫦娥五号月壤中的主要组成物质,是探究太阳风成因水储量的最佳载体。科研人员通过红外光谱和纳米离子探针分析,发现月壤矿物表层中存在大量的太阳风成因水,估算出太阳风质子注入为月壤贡献的水含量至少为 170×10^{-6} 。结合透射电镜(TEM)图像与能谱分析,研究揭示了太阳风成因水的形成

与保存主要受矿物的暴露时间、晶体结构和成分等的影响^[32]。该研究证实了月表矿物是水的重要“储库”，为月表中纬度地区水的分布提供了重要参考，为未来月表水资源利用提供了依据，并为研究太阳系无大气天体（如水星、小行星）太阳风成因水的形成机制和分布规律提供了借鉴。

“嫦娥五号”月壤样品揭示月表中纬度高含量的太阳风成因水。科研人员利用纳米离子探针-透射电镜分析技术对月壤颗粒进行了氢(H)含量和同位素分析以及微观结构研究。根据测定的H含量以及月壤样品的粒径分布,估算的“嫦娥五号”着陆区太阳风来源水含量约为 46×10^{-6} ,与遥感结果一致。基于“嫦娥五号”月壤矿物和玻璃中发现的、具有不同形状分布的H含量深度剖面结果,结合阿波罗已有的实验数据,构建了一个太阳风H注入和加热扩散丢失的动态平衡模型,预测高纬度区域月壤颗粒表层含有很高的太阳风成因水(图7)^[33]。该研究结果为月表不同纬度/温度下,月壤颗粒中太阳风H的注入和迁移提供了约束,对于未来月球水资源的利用具有重要意义。

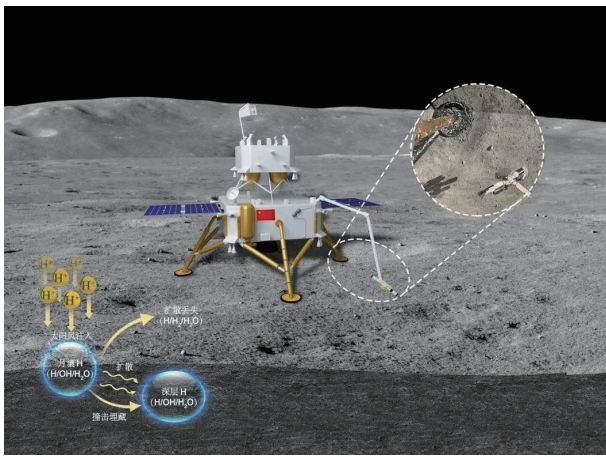


图7 月表太阳风氢的注入、保存与扩散丢失示意
(图片来源:中国科学院地质与地球物理研究所)

“嫦娥五号”找到月球有“本地水”证据。除了采集月球样品返回地球之外,嫦娥五号的另一个重要任务是在原位条件下获取采样区的形貌与物质成分,解析月表水特征。“嫦娥五号”着陆器携带的月球矿物光谱分析仪(LMS)对着陆点的月壤和一块形成于月球深部的岩石进行了反射率光谱测量,

根据 $2.85 \mu\text{m}$ 处的明确水(羟基)光谱吸收特征,首次提供了月球上水的原位探测证据。科研人员进行分析得出,“嫦娥五号”采样区的水含量在 120×10^{-6} 以下,而岩石中的水含量约为 180×10^{-6} ^[34]。这也使“嫦娥五号”成为目前世界唯一既成功带回了月球土壤又获取到了月球表面光谱数据的探测器。水在月球、地球以及行星演化中具有重要作用,该成果提供了月球内生水存在的重要证据,对于研究太阳系的起源和演化具有重要意义。与此同时,鉴于月表水的探测对于约束月球的形成过程、月球科研站建设和原位资源利用等都至关重要,该研究也将为后续“嫦娥六号”“嫦娥七号”继续探测月表水含量、分布的科学目标提供预研基础。

中国首次在月球上发现新矿物“嫦娥石”。科研人员通过X射线衍射等一系列技术手段,在14万个月球样品颗粒中分离出一颗约 $10 \mu\text{m}$ 大小的柱状单晶颗粒,并成功解译其晶体结构。经国际矿物学协会(IMA)新矿物分类及命名委员会(CNMNC)投票通过,由中国核工业集团公司北京地质研究院团队发现的月球新矿物确为一种新磷酸盐矿物,并被命名为“嫦娥石”,英文名 Changsite-(Y)^[35]。它是人类在月球发现的第6种新矿物,使中国成为世界上第3个在月球发现新矿物的国家。对“嫦娥石”形成条件的研究有助于认识月球起源与演化,极具科学价值。

“嫦娥五号”玄武岩揭秘月球年轻火山成因。2021年,中国科学家对“嫦娥五号”玄武岩的研究证实了月球火山活动可以一直持续到20亿年前^[36],不仅刷新了人类对月球岩浆活动和热演化历史的认知,也引发新的未解之谜:月球火山活动为什么持续如此之久?针对这一问题,中国科研人员选取了27颗具有代表性的“嫦娥五号”玄武岩岩屑,采用了最新研发的扫描电镜能谱定量扫描技术分析岩屑的全岩主要成分,结合一系列岩石学和热力学模拟计算,成功复原了“嫦娥五号”月壤中年轻的玄武岩富钙富钛物质及古老的阿波罗低钛玄武岩的初始岩浆成分,进而提出了新的月球热演化模型:月球岩浆洋晚期结晶的易熔物质不断加入月幔,不仅为月幔“补钙补钛”改变其物质组成,还降

低了月幔的熔点,克服了月球内部的缓慢冷却,进而诱发年轻火山的形成,引发长期持续的月球火山作用^[37]。

“嫦娥五号”月壤样品中外来火成岩屑提供月壳组成及岩浆活动多样性证据。“嫦娥五号”着陆区为20亿年前形成的中钛玄武岩单元,比美国 Apollo 和苏联 Luna 任务采样区地质单元(>30 亿年)更年轻,嫦娥五号月壤为研究月球年轻地质单元上物质改造和物质组成提供了新的时间窗口。由于月球表面长期遭受小天体的撞击改造作用,月表物质不断被破碎、翻耕、迁移、混合,使得“嫦娥五号”采样区的月壤中含有一定量其他区域的溅射物(图8)。科研人员通过分析超过3000颗“嫦娥五号”月壤颗粒,识别出7颗特殊的火成岩碎屑,指示月球上存在目前尚未了解的火山喷发活动,为揭示月壳组成多样性及岩浆活动多样性提供了证据^[38]。研究表明,月球上仍存在未被认识的地质单元,有望为规划未来的月球采样或遥感探测任务提供科学支撑。

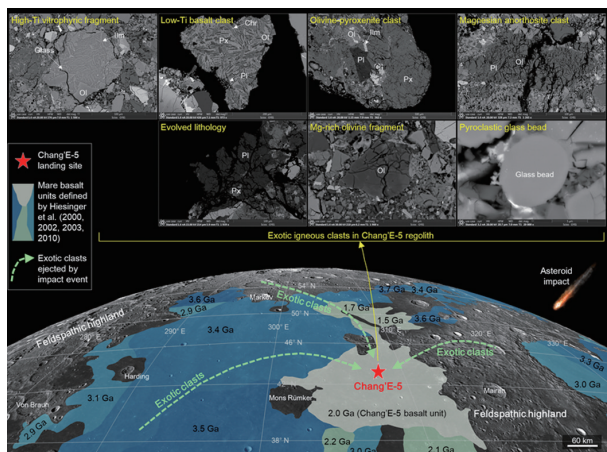


图8 “嫦娥五号”采样区含有月球其他地质单元外来岩屑示意

“嫦娥五号”月壤样品建立新月球年代函数模型。在月球和行星科学研究中,确定重要地质单元和重大地质事件的年龄至关重要。嫦娥五号月壤年龄为月球年代函数的改进提供了一颗珍贵的“金钉子”。科研人员基于高分辨月球遥感影像的撞击坑统计分析结果和“嫦娥五号”月壤的同位素年龄,建立了更精确的新年代函数模型,其定年的精度优于1983年建立的经典哈特·纽库姆(Gerhard Neu-

kum)年代函数模型,既可用于今后月球地质单元的定年,也可据此推演火星、水星等其他地外行星的新年代函数^[39]。新月球年代函数是一把更精确的时间标尺,将在月球和行星科学研究中发挥重要作用。

“嫦娥五号”月壤玻璃微珠揭示月球被撞击历史。小行星撞击是人类文明未来面临的潜在灾难之一。地球形成45亿年以来撞击通量呈指数下降。那么,地月系统小行星撞击频率是否一直平稳衰减?月壤中含有大量玻璃球粒,其撞击成因和年龄分布是了解内太阳系早期撞击历史的重要切入点,能够反映月壳物质组成和内太阳系的撞击动力学。科研人员通过将“嫦娥五号”带回的月壤中的玻璃球粒与附近撞击坑相关联,精确重建月球撞击历史,证实月球20亿年以来撞击频率随着时间变化^[40]。研究发现撞击玻璃球粒年龄与小行星带内多组撞击事件年龄相同,其中一个年龄与恐龙灭绝事件吻合,代表当时撞击频率突增,蕴含恐龙灭绝奥秘。未来有必要开展更多月壤分析和其他区域撞击坑交叉对比,从撞击通量背景中区分具有重要意义的全月事件。

利用“嫦娥五号”月壤样品有望实现地外人工光合成。中国研究团队在详细分析“嫦娥五号”月壤样品的元素和矿物结构后发现,月壤中的一些富含铁和钛元素的活性化合物具有良好的催化性能。科研人员以其为催化剂,利用人工光合成技术,借助模拟太阳光,成功将水和二氧化碳转化为氧气、氢气、甲烷、甲醇。在此基础上,进一步提出了利用月壤实现地外人工光合成的策略与步骤^[41]。该研究为建立适应月球极端环境的原位资源利用系统提供了潜在方案,并且只需月球上的太阳能、水和月壤。未来人类或可实现“零能耗”的地外生命保障系统来支持月球探测、研究和旅行。

在月背开展探测的“嫦娥四号”在2022年也有科学新发现。科研人员基于“嫦娥四号”月表中子与辐射剂量探测仪(LND)数据,在国际上首次获得月球表面的宇宙射线通量及能谱^[42]。人类在月球表面的活动受到以宇宙射线(CRs)为主的空间辐射的严重制约。月表辐射环境非常复杂,除了宇宙线以外,还有宇宙线与月表相互作用产生的反照辐

射,以及月表天然放射性核素衰变释放的 γ 射线和低能 α 粒子。它们会对宇航员健康安全和精密仪器的可靠性构成严重威胁。研究发现,LND和近地航天器测得的质子能谱与广泛使用的CR₆ME模型的预测能谱之间存在显著差异,LND给出的³He与⁴He通量比值与GALPROP模型的预测存在显著差异,这些差异既能为模型改进提供约束,也能为其他相关理论模型提供检验。此外,LND对月球表面宇宙线能谱晨昏对称性的证实将为载人登月着陆时间和宇航员月表出舱时间的选择提供科学实测数据支撑。

3.2 火星探测

火星一直是各国行星探测的主要目标。关于火星环境和生命的探索,不仅关乎对生命起源的追问,更关系将它改造成人类的第二家园,实现人类跨星球生存的梦想。2022年美国、中国和欧洲的多个火星探测器均有重要科学发现。

中国首次火星探测任务“天问一号”产出系列科学成果,揭示了风沙与水活动对火星地质演化 and 环境变化的影响,为火星乌托邦平原曾经存在海洋的猜想提供了有力支撑。

“祝融号”着陆区典型地貌综合研究。“祝融号”成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区。乌托邦平原是火星最大的撞击盆地,曾可能是个古海洋,预示着火星早期可能存在过宜居环境。利用“天问一号”环绕器高分辨率相机(HiRIC)生成的数字正射影像图(DOM)和数字高程模型(DEM),科研人员研究了着陆区周边 $150 \times 60 \text{ km}^2$ 区域的壁垒撞击坑(Rampart craters)、凹锥(Pitted cones)、山脊(Ridges)、沟槽(Troughs)和横向风成脊(TARs)等地貌特征^[43]。了解它们的形成机制,有助于了解着陆区内的历史火山作用、水/冰活动及风的活动,并有望揭示古火星环境的特征和演变,并推动对古火星宜居性的探索。

“祝融号”火星着陆点比其他区域更具火星地貌特征。科研人员分析了“祝融号”轮子与下方地形的相互作用力以及避障相机拍摄的轮辙影像,推断出着陆地区火表土壤具有较高的承压强度且摩擦参数较低,还辨别出该区域符合风蚀特性的地貌

(如沙脊、波纹、侵蚀坑以及岩石纹理等),其中风成床面形态以横向沙脊为主,当地风向为东北方向。同时,着陆地区显示出平缓的地形状况,其地表主要地质特征包括风成床面形态、小陨石坑和岩石^[44]。这些发现表明,相较于其他火星着陆点,“祝融号”火星车着陆位置的地貌特征更明显、更易于研究,有望对火星北半球低地的表面环境演化带来更多见解。

“祝融号”揭秘火星乌托邦平原浅表精细结构和物性特征。科研人员对前113个火星日的“祝融号”火星车次表层探测雷达(RoPeR)的低频通道巡视数据展开了深入分析,获得了1171 m巡视路径下的浅表高精度结构分层图像和地层物性信息,发现该区域土壤层之下存在2套向上变细的沉积层序,可能反映了约35亿年前至32亿年前以来多期次与水活动相关的火表改造过程。此外,“祝融号”巡视路径下方0~80 m深度范围未发现液态水存在的证据,但不排除存在盐冰的可能性^[45]。该研究为深入认识火星地质演化与宜居环境变迁提供了依据。

“祝融号”火星车发现火星近期水活动迹象。科研人员利用“祝融号”火星车火星表面成分探测仪(MarSCoDe)获取的短波红外光谱和导航与地形相机(NaTeCam)数据,在地质年代较为年轻的着陆区发现了一种形貌上类似沉积岩的板状硬壳(duricrust),分析光谱数据发现它们富含含水硫酸盐等矿物。研究团队推断这些硬壳层可能是由地下水涌溢或者毛细作用蒸发结晶出的盐类矿物胶结了火星土壤后经岩化作用形成(图9),这也标志着“祝融号”实现了国际首次利用巡视器上的短波红外光谱仪(SWIR)在火星原位探测到含水矿物^[46]。“祝融号”的发现表明火星在亚马逊纪时期的水活动可能比以往认为的更活跃。“祝融号”着陆区(以及火星北部平原的广泛区域)可能含有大量以含水矿物形式存在的可利用水,可供未来载人火星探测的原位资源利用。

“天问一号”火星能量粒子分析仪(MEPA)在地火转移轨道中观测到太阳高能粒子事件,相关研究成果^[47]被美国天文学会(AAS)选为亮点工作予以专题报道。MEPA是中国首个用于研究行星际

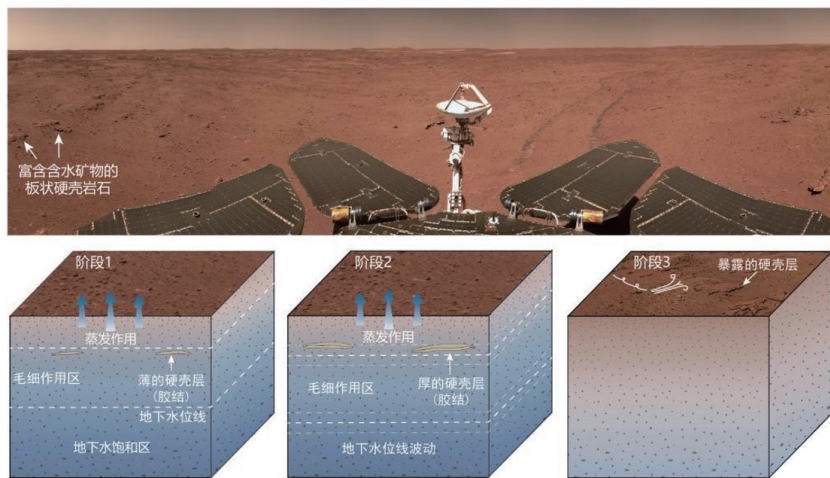


图9 “祝融号”着陆区发现板状硬壳岩石及其在地下水作用下的形成过程示意

和近火星空间辐射环境的载荷,2020年11月29日它在地火转移轨道距太阳1.39AU处,观测到了第25个太阳活动周的首个大范围太阳高能粒子(SEP)事件。当时天问一号与地球近似处于同一磁力线上,使得“天问一号”和其他运行在地球空间的科学卫星虽隔数千万公里仍能观测来自相同源区的SEP,提供了研究SEP沿磁力线在行星际空间传播的宝贵机会。科研人员发现和天问一号关联的磁力线并没有连接到太阳表面的爆发源区和行星际激波,意味着SEP必须跨越磁力线才能到达“天问一号”和近地航天器;两个航天器位置处观测到的质子能谱均表现为双幂律谱,意味着它很可能是在激波加速源区产生的。

“天问一号”火星离子和中性粒子分析仪(MINPA)在奔火阶段对太阳风观测的2项研究成果被美国地球物理学会会刊《Eos》作为“编辑亮点”进行报道^[48]。中国2个科研团队分别对奔火阶段的太阳风数据开展了深入分析和研究,根据MINPA对太阳风等离子体的首次观测结果捕捉到了太阳风等离子体的特性和变化^[49];将MINPA探测数据与NASA OMNI数据集的近地观测数据、NASA的火星大气与挥发物演化探测器(MAVEN)任务以及ESA的火星快车(Mars Express)任务的太阳风观测数据进行比对,验证了它们之间的一致性^[50]。

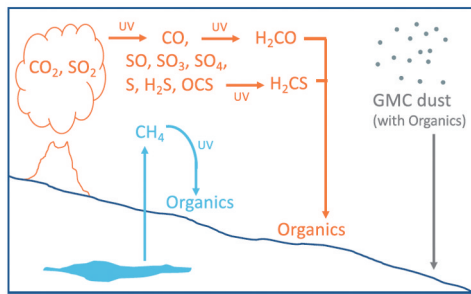
“天问一号”火星探测任务团队获2022年度“世界航天奖”。2022年9月,在法国巴黎召开的第

73届国际宇航大会(IAC 2022)上,中国首次火星探测“天问一号”任务团队获国际宇航联合会(IAF)年度最高奖“世界航天奖”。此前“嫦娥四号”任务团队代表曾获此奖项。

美欧多个火星探测器在2022年持续产出新科学发现。

“好奇号”(Curiosity)成功运行10年并延寿3年。2012年8月,“好奇号”成功登陆火星表面,其使命是探寻火星上的生命元素。它是美国第7个火星着陆器、第4台火星车,也是世界上第1辆采用核动力驱动的火星车。

2022年初,“好奇号”发现部分火星岩石富含¹²C。科研人员利用“好奇号”火星样品分析仪(SAM),对采集自盖尔陨石坑(Gale)5个位置的24个样本加热到850℃,用SAM的可调谐激光光谱仪(TLS)测量样本加热释放的气体,发现近一半样本含有大量¹²C。鉴于在地球上¹²C参与动物食物代谢或植物光合作用过程,通常被认为是生物化学指征,这个发现令人振奋。科研人员对此提出3种可能解释(图10),即古代火星细菌排放甲烷(CH₄)的生物学解释,以及另2种非生物学解释:或是由紫外线与火星大气CO₂相互作用产生,或是数亿年前太阳系穿越一个富碳的巨型分子云(GMC)时所留。他们强调,鉴于人们对火星碳循环的了解还不够,火星上的¹²C是否与生物过程相关还无法得出明确结论^[51]。

图10 火星岩石 ^{12}C 的3种可能起源示意

“洞察号”(Insight)完成对火星长达4年多的科学探测之后退役。与“毅力号”(Perseverance)等大型旗舰型任务不同,“洞察号”是NASA行星科学的小型任务(Discovery 12),2012年任务获批,旨在通过火星地震(火震)观测研究火星深层内部结构,设计寿命约为2年。它于2018年11月26日着陆火星埃律西昂平原西部(Elysium Planitia,具体坐标 4.50°N 、 135.62°E),2022年12月21日因太阳能电池能量耗尽任务正式终结。

“洞察号”在2022年5月4日探测到了迄今强度最高的火震,达到5级^[52]。这对地球而言仅为中等规模地震,但已接近科学家预估的火震等级上限,亟待深入研究。除了监听火震信号,“洞察号”还首次在地球以外的行星上记录到了地震面波信号。火震面波可以很好地揭示火星壳幔结构变化,利用面波成像技术开展火星横向壳幔结构研究、通过多个火震事件信号叠加来增强面波信号,将是未来揭开火星壳幔演化奥秘的关键^[53]。

依托于“洞察号”记录的火震面波数据和火星勘测轨道器(MRO)火表彩色成像仪(MARCI)拍摄的图片,2个科研团队分别报告了2021年9月18日和12月24日发生的2次陨石撞击事件(S1000a、S1094b),发现了陨石撞击激发的火震面波信号,得到了不同于以往的火壳结构细节和火壳结构变化证据,为火星壳幔结构的研究开辟了新方向。他们发现,着陆点下方的地壳分层可能无法代表火星壳层的普遍结构,仍需更深入揭示火星南北半球的地质差异,证认火星二分法理论^[54];陨石坑和着陆点之间的平均火壳密度比着陆点处火壳的密度高,并且后一次陨石撞击暴露出了火星表面以下大块水冰,

也是迄今直接观测到距火星赤道最近(35°N)的水冰(图11)^[55]。

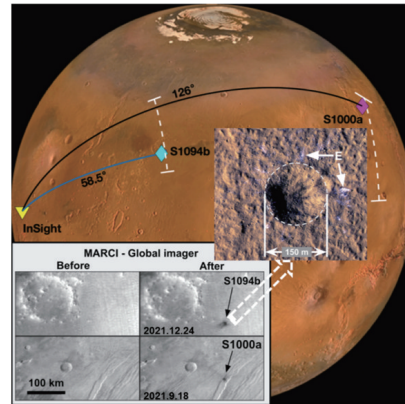


图11 洞察号(黄色三角)及陨石撞击激发火震面波示意(E指示撞击后暴露的水冰)

“洞察号”揭示火山活动仍在塑造火星表面,即在地球动力学意义上火星内部目前仍是活跃的。科研人员分析“洞察号”逾千次火震数据,发现其中20余次火震的震中源于刻耳柏洛斯堑沟群(Cerberus Fossae)的最内部,而对比该地区的火星全球勘测者(MGS)的激光高度计(MOLA)观测图像,发现在围绕刻耳柏洛斯槽沟地幔单元周围的多个方向上都有较深的尘埃沉积。一般认为Cerberus Fossae是火星埃律西昂平原上一个以大裂谷为特征的古老火山区。该研究说明在过去5万年内这里可能发生过火山活动,“洞察号”探测到的可能是这个曾经活跃的火山地区的最后残余,火星内部可能仍然存在岩浆,火山作用可能仍与火星表面的形成有关^[56]。另一个科研团队对“洞察号”和刻耳柏洛斯堑沟群所在的埃律西昂平原地区的地形、引力和地质构造进行分析后,也认为火星的埃律西昂平原底下可能有一个直径约4000 km的活跃地幔柱,该地幔柱能引发局部的持续地质活动,会引起火星壳抬升,并将热岩浆送到火星表面,引发被“洞察号”探测到的火震,同时也是刻耳柏洛斯堑沟群底下火星壳缓慢裂开的原因^[57]。

此外,ESA的“火星生命探测计划2016任务”(ExoMars-2016)的“痕量气体轨道器”(TGO)搭载的高分辨率超热中子探测器(FREND)发现了火星赤道南侧的水手号峡谷群(Valles Marineris)地下

埋藏着大量水冰^[58]。科研人员利用ESA“火星快车”(Mars Express)可见和红外矿物测绘光谱仪(OMEGA)及NASA“火星勘测轨道器”(MRO)小型火星勘测成像光谱仪(CRISM)的观测数据,绘制了新的火星水地图,发现了水合矿物普遍存在,改变了对火星水历史的认识,并为未来在火星低纬度地区开展载人火星探索提供了有用信息^[59-60]。

3.3 小天体探测

小天体采样返回为研究太阳系早期物质和地球生命起源提供样本。日本、美国都有相关科学任务实施,中国也规划了“天问二号”小行星采样返回与主带彗星环绕探测。NASA第1个小行星采样返回探测器“冥王号”(OSIRIS-REx, NASA New Frontiers 3)在对近地小行星贝努(Bennu)成功采样后已踏上返回之旅,预计2023年9月24日返回。日本的“隼鸟二号”任务“龙宫”(Ryugu)样本科学研究产出多项原创成果,成为全球小行星探测年度亮点。此外,深入分析“新视野号”探测器(New Horizons, NASA New Frontiers 1)档案数据发现冥王星上存在冰火山。

对“龙宫”样本进行化学和同位素分析发现其土壤与Ivuna型碳质陨石(以发现地坦桑尼亚同名小镇命名)相似,但更接近太阳系形成初期的原始物质成分^[61];在土壤样本中发现了23种氨基酸^[62],是首次在地球以外确认生命之源氨基酸的存在。在岩石样本中首次获得了珍贵的来自“龙宫”的原始气体^[63]。“龙宫”仍然含有太阳系早期的惰性气体和同位素,以及类似于Ivuna型陨石的氮组分;其中一种稀有气体是由太阳风产生的,另一种是由银河宇宙射线辐射产生的^[64]。

“龙宫”的一些样品具有和Ivuna型陨石相同的铁同位素不规则性;发现了在没有碳质小行星的地方形成的铁同位素,表明“龙宫”可能来自比理论预测更遥远的土星或木星轨道之外;巨型行星的生长和迁移路径对星子产生了破坏稳定的影响,其中一些将物质(可能包括“龙宫”)喷射到主带中(图12)^[65]。

关于“龙宫”的形成与演化,返回样品提供了直接证据^[66]:“龙宫”的母星极有可能诞生在远离太阳

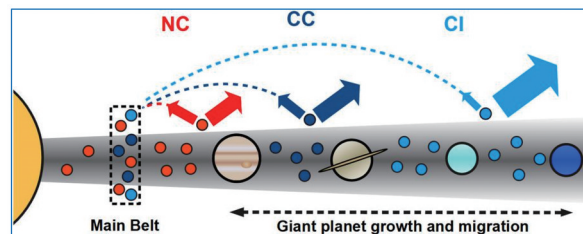


图12 “龙宫”小行星/碳质(CI)球粒陨石可能源区示意
(NC和CC分别指代非碳质和碳质陨石群)

的黑暗星云气体中,在太阳系形成约200万年后吸积形成;拥有含盐和有机物的碳酸水,支持“龙宫”或其母星小行星与地球碰撞时带来地球生命的假说;“龙宫”母星直径约为100 km,摧毁它的撞击物直径小于10 km;龙宫诞生之时,内外太阳系之间发生了大规模的物质混合,现在的“龙宫”由远离撞击点的物质组成,随着巨行星的迁移被抛到地球附近。“龙宫”样品也提供了无大气天体表面的太空风化(Space weathering)证据。“龙宫”表面熔融层下方至少1~2 μm 的黏土显著脱水,证明其表面正经历着太空风化^[67]。但由于“龙宫”拥有大量含水硅酸盐矿物,其太空风化和无水的月球以及“糸川”小行星的太空风化都不同,有望推动对含水小行星反射光谱的解释。

“冥王号”采集的(250±101)g贝努小行星样本仍在返回地球的途中,但科研人员分析了“夜莺”(Nightingale)采样点图像中可见的岩屑量,查看了探测器采样时的加速度数据,发现:贝努的表面与科研人员根据地面和空间望远镜观测预期光滑沙滩地形不同,采样过程形成一个9 m长的椭圆撞击坑,贝努表面被激起了一面巨大的“碎片墙”;热辐射谱仪(OTES)数据显示粘在探测器上的微粒类似于水蚀变的碳质陨石^[68];构成贝努外表面的碎石松散堆积,形成接近零内聚力的颗粒床,呈现出类似于液体的流动性^[69]。关于贝努表面的这些精确信息可以帮助人们更好地解释对其他小行星的望远镜观测,改进未来地外天体防御任务方案设计,保护地球免受小行星撞击。“冥王号”将样本送回地球后,将执行拓展任务,继续探测潜在危险小行星(PHA)毁神星(Apophis),并更名为冥王号-毁神星

探测器(OSIRIS-APEX)。毁神星将在2029年接近地球。

实际上,世界上首次行星防御技术演示试验已成功。2022年9月26日,NASA的飞镖“双小行星重定向测试”(DART)任务以大约6 km/s的相对速度“动能撞击”目标小行星,并成功偏转其原有轨道^[70]。DART的撞击目标是迪迪莫斯(Didymos)双小行星系统,它对地球没有威胁。DART撞击了围绕Didymos旋转的迪莫弗斯(Dimorphos),改变后者在双星系统内的轨道。试验将Dimorphos的轨道周期从11 h 55 min缩短到11 h 23 min,远超缩短1%的预期,标志着人类有能力改变可能与地球相撞的小行星的轨道,成为行星防御与地球生命演化历史的分水岭。6500万年前,恐龙在一颗直径约10 km的小行星撞击地球后灭绝。人类正以实际行动避免类似灾难发生。

“新视野号”发现矮行星冥王星上的巨大冰火山。科研人员分析了“新视野号”探测器返回的冥王星斯普特尼克号平原(Sputnik Planitia)冰盖西南方区域的图像和组成数据,发现该区域几乎没有撞击坑,存在很多由冰火山作用造成的不规则的巨大山丘,其类型和规模迄今为止是冥王星所独有的,而且物质组成主要为水冰^[71]。其中的莱特山(Wright Mons)火山体积相当于夏威夷的冒纳罗亚火山(Mauna Loa),后者是地球上最大的火山之一。他们推测该地区的冰火山活动发生在冥王星较近的地质时代,冥王星的内部结构仍存有余热,在很长一段时间内保持着活跃,而其年轻的冰火山地形也为冥王星可能存在地下海洋提供了支持。2015年7月,“新视野号”成功完成了对冥王星系统的首次探索并发回图像,目前它已飞抵冥王星以外的柯伊伯带,未来将飞越日球层顶进入星际空间。

4 空间地球科学

空间对地观测为地球科学研究提供了全新的研究手段和发展思路,使得人类能够从空间全面、综合、整体地观察、研究和预测行星地球,应对全球变化等重大挑战。美欧合作“哨兵6-迈克尔·弗雷

利希号”卫星(Sentinel-6 Michael Freilich)于2020年11月成功发射,2022年3月它正式成为全球海面测量官方基准卫星,其他卫星的海面测高数据将与“哨兵-6”的高精度数据进行比较,以确保其准确性^[72]。“哨兵-6”保障了海面高度数据30多年来的连续性,对于理解和监测全球气候变暖和海面上升对世界的影响至关重要,其后继任务“哨兵-6B”将于2025年发射。

开发了监测地下水流失的新方法。科研人员利用全球重力场测量和气候实验卫星(GRACE)及其后续任务(GRACE-FO)的地下水流失数据,以及“哨兵-1”(Sentinel-1)的地面高度变化数据,以重度灌溉农业区加州中央山谷(Central Valley)的图莱里盆地(Tulare Basin)的地面沉降变化为例进行了研究。他们将遥感数据和数值模型结合,发现在月际变化时间尺度上几乎所有的地面沉降/隆起都可以用含水层的变化来解释(图13):若地下水损失来自承压含水层(confined aquifer),它们被抽干后将无法恢复,若地下水损失来自非承压含水层(unconfined aquifer),则可通过几年的正常降水得到补充。该成果可用于改善地下水管理,对干旱地区的生活和农业都至关重要^[73]。将于2023年发射的双频合成孔径雷达卫星(NISAR)比“哨兵-1”的分辨率更高,研究团队期待他们的新数值模型能与NISAR及GRACE-FO的数据相结合,以造福全球农业。

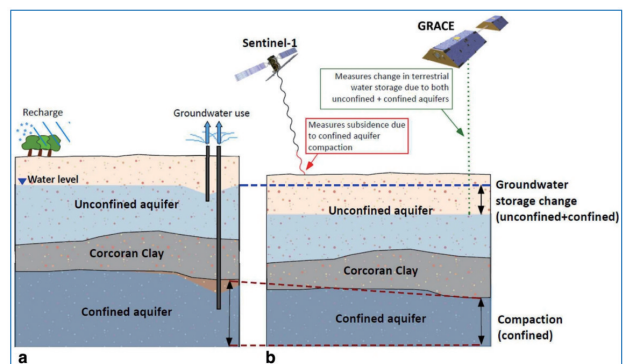


图13 Tulare盆地地下水流失类型及卫星监测示意

发现全球变暖加剧南极冰盖损失。科研人员利用1997年以来多颗对地观测卫星的可见光、热红外和雷达遥感数据,合成了南极洲大陆的卫星图

像。深入研究发现,在过去25年中,南极冰盖的崩解已显著改变了南极洲的海岸线;冰山的脱落速度已经远超自然冰架的生成速度,冰架的进一步后退将加速全球海平面上升的速度;研究还表明,更大的损失或将接踵而至,未来10~20年内还将发生重大的冰山崩解事件^[74]。结合7个星载雷达和激光高度计近30亿个数据点,科研人员制作了1985年至今南极冰盖高度变化数据集,以前所未有的细节展示了南极冰层随着海冰融化变薄的过程,提供了迄今为止南极冰封大陆随时间变化的最完整视图,有助于了解导致南极冰层流失的过程,改善对海平面上升的评估^[75]。

5 微重力物理与空间生命科学

2022年,空间基础物理、微重力物理和空间生命科学研究持续深化人类对基础科学的认知,载人航天任务功不可没。

2022年的诺贝尔物理学奖颁发给了量子科技领域的科学家,在诺贝尔奖官方对3位获奖人之一的安东·塞林格(Anton Zeilinger)的介绍中,大量引用了中国科研团队的成果与贡献,并出现了“墨子号”的身影。

2016年,中国发射了全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”。2022年5月,“墨子号”又创新世界记录,首次实现了地球上相距1200 km的2个地面站之间的量子态远程传输,向构建全球化量子信息处理和量子通信网络迈出重要一步^[76]。空间量子科学实验成果使中国占据了世界空间量子科学研究领域的主导和引领地位(图14)。



图14 “墨子号”量子科学实验产出诺奖级科学成果

2022年“墨子号”团队应邀在国际《现代物理评论》上发表综述论文^[77],对“墨子号”在国际上率先完成一系列星地量子科学实验进行了系统性的阐述和总结,指出“墨子号”的成功激励了国际空间量子科学的研究热潮,美欧日等随后皆开始探索各自的广域量子通信之路,未来空间量子科学研究必将从低轨道平台跨越到中高轨平台,甚至是深空平台。

2022年,中国国家太空实验室正式成型。问天实验舱和梦天实验舱分别在2022年7月底和10月底发射升空,中国空间站“T”字基本构型在轨组装完成(图15),中国载人航天器综合性能达到国际先进水平。未来10年,中国空间站将开展4个领域1000余项空间科学与应用任务:空间生命科学与人体研究、微重力物理、空间天文与地球科学、空间新技术与应用,部署了2 m口径巡天空间望远镜(CSST)、高能宇宙辐射探测设施(HERD)空间站重大科学研究设施^[78]。



图15 中国空间站“T”字基本构型示意
(图片来源:中国航天科技集团)

国际空间站(ISS)已建成22年,2022财年各航天机构共开展307项科学实验(未含俄罗斯)^[79],较2021财年基本持平,涉及技术开发与验证、物理科学、生物学与生物技术、教育和文化活动、人体研究及地球与空间科学6大领域,空间科学与应用实验(物理、生物、人体、地球与空间科学)占比56%。NASA开展197项,技术领域实验最多,其次为生物和物理领域实验。ESA和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)总实验数接近,分别为55项和50项,其中ESA关注技术和人体研究,JAXA集中在技术和生物领域。CSA支持实验5项,集中在人体研究

实验领域。

2022年,ISS多项空间科学与应用实验取得重要进展。为量化拉曼可检测生物分子的稳定性,ISS开展了长达469 d的模拟火星环境生物分子暴露实验,以支持“好奇号”和“毅力号”火星车更好地就位生命信号探测^[80]。星载热辐射计分析不同植物在空间环境的水利用效率,以研究生态系统功能随气候的变化^[81]。利用ISS对2012—2013年和2014—2020年欧洲各地照明光谱数据,分析区域性光谱变化^[82]。对比14名宇航员在轨飞行和回到地球后的血液特征变化,研究长时间空间飞行导致贫血的机制^[83]。利用冷原子实验设施,探索微重力环境下超冷原子系统的几何、拓扑、维度和相互作用,推动了对量子系统理解的飞跃^[84]。此外,ISS乘组也开展了微重力条件下混凝土硬化、高抗性棉花基因、太空饮食对人体免疫功能和肠道微生物组的影响、燃料温度对材料可燃性的影响、空间飞行对心肌细胞特性的影响、微重力环境下生物打印等多项代表性科学实验^[85-86]。

ISS上搭载的多个空间科学实验装置也取得多项研究成果。2022年,科学家利用全天X射线图像监测仪(MAXI)、中子星内部组成探测器(NICER)、第2代的阿尔法磁谱仪(AMS-02)、量热电子望远镜(CALET)等的探测数据,发表科学论文近百篇。其中AMS-02任务由诺贝尔物理学奖得主丁肇中主持,旨在搜寻宇宙中反物质、暗物质存在的迹象,并对宇宙线环境进行精确探测^[87]。

2022年7月,NASA地球创投载荷地表矿尘源监测仪(EMIT, EVI-4)成功发射至ISS,将通过全面测量地球尘埃源区的矿物成分,了解它们所致的辐射强迫加热和冷却效应;2022年11月,美国载人重返月球计划“阿尔忒弥斯1号”(Artemis 1)发射升空,开展无人绕月飞行测试,同时搭载了10颗6U立方星,开展月球科学探测或测试低地球轨道以外的关键技术。

6 战略规划和路线图研究

空间探索,战略先行。多个航天国家发布空间

科学中长期规划或相关战略与政策,对各自空间科学未来发展至关重要。

国务院新闻办公室于2022年1月发布《2021中国的航天》白皮书,阐释了未来5年拟开展的空间科学探索 and 空间环境下的科学实验,并广泛开展国际空间交流与合作。中国正在加紧制定首个国家空间科学中长期发展规划,针对极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星、太空格物等科学主题,勇闯“无人区”开展前沿探索,构建空间科学、空间技术、重大工程融合的新格局,加速空间科学发展,加快建设航天强国^[88]。中国科学院面向“十四五”的空间科学“新地平线计划”进展顺利,遴选了一批科学目标合理、预期成果重大、探测方案先进的卫星工程项目^[89]。

空间科学强国指标体系研究指出中国空间科学世界第3,面对加快建设航天强国的“国之大者”根本要求,必须抓住未来15~30年的有限时间窗口,通过国家空间科学投入双15%占比(至2035年,空间科学占整个航天总投入的15%;非工程类的研究经费占空间科学总投入的15%)的增长引爆空间科学原创力^[90](图16),从根本上改观“空间技术发展最好,空间科学相对最弱”的现状,实现全面发展^[91]。

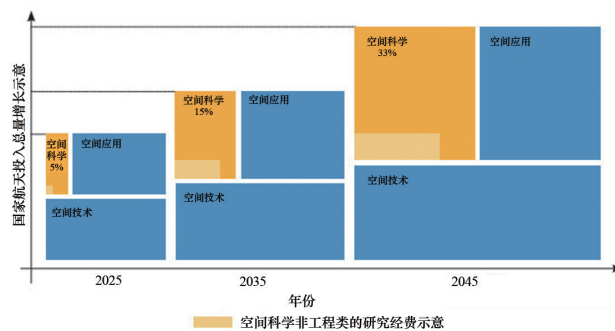


图16 努力推动中国实现空间科学国家财政投入未来30年稳定增长

在战略规划方面,NASA对2020年5月发布的《科学2020—2024:卓越科学愿景》科学规划进行了重要更新^[92],原隶属载人探索和运行任务部(HEOMD)的生物和物理科学处被调整到科学任务部,亦即在天体物理学、地球科学、日球层物理学、

行星科学四大领域外,新增了生物和物理科学领域,新版的生物和物理科学“十年调查”报告有望在2023年发布。此外,NASA正式发布了《载人月球至火星探索战略目标》报告,明确了科学研究、基础设施、运输和居住、建造运营四大领域,提出了跨领域的9条宗旨和63个领域目标,为开展可持续的载人深空探索活动制定了目标牵引的发展路线图^[93]。ESA发布了欧洲载人航天《“新世界”2030+战略路线图》^[94],向欧洲航天决策者描述了ESA面向近地轨道、月球、火星的载人和无人空间探索活动长期发展愿景,提出“新世界”(Terra Nova)空间探索计划在2025—2030年框架下的候选新任务及其所需的技术,期待在2030年前将首位欧洲航天员送上月表,在2040年前实现欧洲航天员探索火星。

美国新发布了第3份用于指导太阳系探索未来10年发展的学科规划文件《起源、世界和生命:2023—2032年行星科学和天体生物学》,聚焦行星起源、太阳系天体(不含太阳)的结构和演化、生命和宜居性三大科学主题,建议美国新实施大中小型系列空间科学任务、继续推进既往《愿景和远航:2013—2022年行星科学》推荐的在研任务,并力争在探寻太阳系地外生命交叉学科前沿领先取得重大突破。该报告内容丰富前瞻,引起各界关注^[95]。与此同时,作为对2021年发布的《21世纪20年代天文学和天体物理学的发现之路》十年调查报告的响应,NASA宣布将新设“空间天文中型探测器任务”(Astrophysics Probe Program)计划,每项任务的成本上限为15亿美元,每10年实施一项,旨在为未来的大型空间望远镜奠定基础,同时填补旗舰任务(大型)和小型探测器计划之间的空白^[96]。预计2024年初遴选2~3项任务概念进行A阶段概念研究,每项概念将获得500万美元资助;首次任务概念征集将聚焦远红外成像/光谱空间望远镜,或X

射线任务(有望与ESA的“先进高能天体物理望远镜”(ATHENA)开展协同观测)。

7 2023年展望

人类在浩瀚的宇宙面前是渺小的,但人类的空间科学探索精神是伟大的。回眸2022,世界空间科学与深空探测的诸多成就注定将载入史册。中国空间科学与探索的发展进入新时代,站在新历史方位上,重大科学目标引领、重大科学成果导向已成为中国空间科学任务的主要原则^[97]。

与2022年相比,即将到来的2023年将有逾10个重要空间科学任务升空(表2),主要来自NASA、ESA和中国(图17^[98]),恰好反映了世界空间科学领域第一方阵的主要构成。这些任务都经历了5年以上的研制,克服了诸多创新技术挑战,个别国家的任务已反复延期,迄今仍面临着发射窗口变更等不确定性。NASA的商业月球有效载荷快递服务(CLPS)也将实施多个2022年延期的任务。



图17 EP卫星以爱因斯坦为名,高度概括其科学目标并向人类历史上最伟大的科学家致敬(图片来源:NSSC)

让我们共同期待空间科学在2023年的“兔”飞梦见,不断开拓人类知识体系的新疆域。

表2 全球 2023 年预计发射的重要空间科学任务

领域	任务名称	主要科学目标	主要科学载荷	轨道	任务来源/类型
空间天文	爱因斯坦探针(EP)	在软 X 射线波段对宇宙天体开展高灵敏度实时动态巡天监测,发现和探索宇宙中沉寂黑洞的耀发、探寻来自引力波源的 X 射线信号、发现宇宙中 X 射线剧变天体	宽视场 X 射线望远镜(WXT)、后随 X 射线望远镜(FXT)	600 km 近地轨道,倾角 30°	中国科学院空间科学先导专项
	“欧几里得”空间望远镜(Euclid)	通过大视场巡天,绘制宇宙几何形状,精确测量宇宙加速度,更好地理解暗物质暗能量	1.2 m 三镜柯式(Korsch)望远镜、可见光成像仪(VIS)、近红外光谱-光度计(NISP)	围绕日地 L2 点的大幅(1×10 ⁶ km)李萨如(Lissajous)轨道	ESA 中型任务(M2)
	X 射线成像和光谱探测卫星(XRISM)	通过高通量成像和高分辨率光谱探测,研究宇宙中 X 射线天体	微量热软 X 射线光谱仪(Resolve)、宽视场软 X 射线成像仪(Xtend)	550 km 近地轨道,倾角 31°	JAXA 与 NASA 联合、ESA 参与,纳入 NASA 探索者计划机遇任务(MO)
日球层物理	全球中层大气波动探测仪(AWE)	通过观测中间层的气辉,研究全球重力波特征及其对电离层-热层-中间层(ITM)的影响,揭示驱动地球空间天气的各类因素	先进中间层温度测绘仪(AMTM)	国际空间站(ISS)搭载	NASA 探索者计划机遇任务(MO)
	阿迪蒂亚号日地 L1 点太阳观测卫星(Aditya L1)	观测日冕物质抛射、太阳耀斑起源及其行星际传播,提供空间天气预报数据	可见光日冕仪(VELC)、太阳紫外成像望远镜(SUIT)、太阳风粒子探测仪(ASPEX)、等离子体探测包(PAPA)、太阳低能 X 射线谱仪(SOLEXS)、太阳高能 X 射线谱仪(HELIOS)、磁强计	日地 L1 点	印度空间研究开发机构(ISRO)
行星科学	“果汁”号木星冰卫星探测器(JUICE)	了解木星系及其卫星的复杂关系,探索 3 颗具有地下海洋的卫星木卫三/四/二的宜居性	光学相机系统(JANUS)、木卫和木星(可见光-红外)成像光谱仪(MAJIS)、紫外成像光谱仪(UVS)、亚毫米波(外差)光谱仪(SWI)、木卫三激光测高仪(GALA)、冰卫星次表层探测雷达(RIME)、磁通门磁强计(J-MAG)、粒子环境探测包(PEP)、无线电和等离子体波探测包(RPWI)、木星及其伽利略卫星重力场和地球物理场探测器(3GM)、行星射电干涉仪和多普勒试验(PRIDE)	木星系多次飞掠,及环木卫三轨道	ESA 大型任务(L1)

表2 全球2023年预计发射的重要空间科学任务(续)

领域	任务名称	主要科学目标	主要科学载荷	轨道	任务来源/类型
行星科学	月船三号 (Chandrayaan-3)	验证月球软着陆技术, 探测月球外逸层, 拍摄月球照片	着陆器、月球车	地月转移轨道至月表着陆	ISRO
	“灵神号”小行星探测卫星 (Psyche)	探测主小行星带的铁镍金属小行星: 灵神星	磁强计、多光谱成像仪(MSI)、 γ 射线和中子谱仪(GRNS)、深空光通信(DSOC)试验(技术验证)	主带小行星轨道	NASA 小型任务(Discovery-15)
空间地球科学	双频合成孔径雷达卫星 (NISAR)	对生态系统失衡、自然灾害、冰盖塌陷、农业和森林生物量等地表变化及其原因进行全球尺度测量	S波段极化合成孔径雷达(S-SAR, ISRO)、L波段极化合成孔径雷达(L-SAR, NASA)	747 km 近地轨道, 倾角 98.4°	NASA-ISRO 合作大型任务
	极地辐射能远红外实验双立方星 (PRE-FIRE 2)	观测地球远红外辐射的变化, 探寻其与北半球变暖、海冰流失和冰盖融化的关系	小型化热红外光谱仪(TIRS)	2 颗立方星, 470 km 近地轨道, 倾角 82°	NASA 小型任务地球创投载荷(EVI-4)
	云、气溶胶和辐射监测卫星 (Earth-CARE)	全球范围观测自然和人为气溶胶特性及其与云、大气辐射的相互作用、大气液态水和冰的垂直分布和云的输送、云和降水的相互作用	后向散射激光雷达(ATLID, ESA)、云廓线雷达(CPR, JAXA)、多光谱成像仪(MSI, ESA)、宽带辐射计(BBR, ESA)	400 km 近地轨道, 倾角 97°	ESA 地球探索者核心任务(EE-6), JAXA 参与
	“生物量”卫星 (Biomass)	观测全球林业的现状和动态, 揭示林业在地球碳循环和气候变化中的作用	P波段合成孔径雷达(P-Band SAR)	660 km 太阳同步轨道	ESA 地球探索者核心任务(EE-7)
	“澳科一号”双星 (Macao Science 1, MSS-1)	观测地球南大西洋上空地磁场异常区(SAA)磁场变化的精细特征, 实现地磁场中近期变化预报, 获取辐射带高能电子宽能带能谱分布等信息	A星: 高精度矢量磁力仪、高精度标量磁力仪等 B星: 太阳 X 射线探测器、能量电子谱仪等	450 km 近地轨道, 倾角 41°	中国国家航天局(CNSA)和澳门特别行政区政府

参考文献(References)

- [1] Clery D. Golden eye, a new space telescope makes a spectacular debut after a troubled gestation[J]. Science, 2022, 378(6625): 1160-1161.
- [2] Witze A. Nature's 10 people who helped shape science in 2022[J]. Nature, 2022, 612: 611-625.
- [3] Welch B, Coe D, Diego J M, et al. A highly magnified star at redshift 6.2[J]. Nature, 2022, 603(7903): 815-818.
- [4] Hubble reaches new milestone in mystery of universe's expansion rate[EB/OL]. [2022-12-15]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/hubble-reaches-new-milestone-in-mystery-of-universes-expansion-rate>.
- [5] Riess A G, Yuan W, Macri L M, et al. A comprehensive

- measurement of the local value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 934: 1.
- [6] 范全林, 时蓬, 王琴, 等. 斯皮策空间望远镜实现最大化科学产出[J]. *科技导报*, 2020, 38(20): 113-122.
- [7] König O, Wilms J, Arcodia R, et al. X-ray detection of a nova in the fireball phase[J]. *Nature*, 2022, 605: 248-250.
- [8] Fang K, Kerr M, Blandford R, et al. Evidence for PeV proton acceleration from Fermi-LAT observations of SNR G 106.3+ 2.7[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(7): 071101.
- [9] DAMPE Collaboration. Detection of spectral hardenings in cosmic-ray boron-to-carbon and boron-to-oxygen flux ratios with DAMPE[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(21): 2162-2166.
- [10] Fujimoto S, Brammer G B, Watson D, et al. A dusty compact object bridging galaxies and quasars at cosmic dawn[J]. *Nature*, 2022, 604: 261-265.
- [11] Lioudakis I, Marscher A P, Agudo I, et al. Polarized blazar X-rays imply particle acceleration in shocks[J]. *Nature*, 2022, 611: 677-681.
- [12] Xie F, Di M A, La M F, et al. Vela pulsar wind nebula X-rays are polarized to near the synchrotron limit[J]. *Nature*, 2022, 612: 658-660.
- [13] Ling-Da K, Zhang S, Zhang S N, et al. Insight-HXMT discovery of the highest-energy CRSF from the first galactic ultraluminous X-Ray pulsar Swift J0243.6+6124 [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 933: L3.
- [14] Neutron star HESS J1731-347 may be a 'strange' star [EB/OL]. [2022-12-17]. <https://phys.org/news/2022-10-neutron-star-hess-j1731-strange.html>.
- [15] NASA's NuSTAR mission celebrates 10 years studying the X-Ray Universe[EB/OL]. [2022-12-15]. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-s-nustar-mission-celebrates-10-years-studying-the-x-ray-universe>.
- [16] NASA's NuSTAR helps solve riddle of black Hole Spin [EB/OL]. [2022-12-17]. <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-nustar-helps-solve-riddle-of-black-hole-spin>.
- [17] DAMPE Collaboration. Search for gamma-ray spectral lines with the DArk Matter Particle Explorer[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(7): 679-684.
- [18] Xiang M, Rix H W. A time-resolved picture of our Milky Way's early formation history[J]. *Nature*, 2022, 603: 599-603.
- [19] Gaia archive[EB/OL]. [2022-12-17]. <https://gea.esac.esa.int/archive/>.
- [20] Gaia data release 3 papers[EB/OL]. [2022-12-17]. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3-papers>.
- [21] Kipping D, Bryson S, Burke C, et al. An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 367-380.
- [22] 白青江, 范全林, 时蓬, 等. 关于新一代旗舰型科学卫星 WFIRST发展的分析[J]. *科技导报*, 2021, 39(11): 38-45.
- [23] 王赤, 时蓬, 宋婷婷, 等. 远航2050:欧洲空间科学规划及启示[J]. *科技导报*, 2022, 40(4): 6-15.
- [24] Currie T, Lawson K, Schneider G, et al. Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 751-759.
- [25] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere[J]. *Nature*, 2022, doi: 10.1038/s41586-022-05269-w.
- [26] Carter A L, Hinkley S, Kammerer J, et al. The JWST early release science Pprogram for direct observations of exoplanetary systems I: High contrast imaging of the exoplanet HIP 65426 b from 2-16 μm [J/OL]. [2022-12-17]. <https://arxiv.org/abs/2208.14990>.
- [27] Liu Z Y, Zong Q G, Rankin R, et al. Simultaneous macroscale and microscale wave-ion interaction in near-earth space plasmas[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5593.
- [28] Wang R, Wang S, Lu Q, et al. Direct observation of turbulent magnetic reconnection in the solar wind[J]. *Nature Astronomy*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01818-5>.
- [29] Liu Y H, Cassak P, Li X, et al. First-principles theory of the rate of magnetic reconnection in magnetospheric and solar plasmas[J]. *Communications Physics*, 2022, 5 (1): 1-9.
- [30] Gan W Q, Feng L, Su Y. A Chinese solar observatory in space[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 165.
- [31] Fang C, Ding M, Li C, et al. Editorial[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65: 289601.
- [32] Zhou C, Tang H, Li X, et al. Chang'E-5 samples reveal high water content in lunar minerals[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5336.
- [33] Xua Y, Tian H C, Zhang C, et al. High abundance of solar wind-derived water in lunar soils from the middle

- latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, doi: 10.1073/pnas.2214395119.
- [34] Lin H L, Li S, Xu R, et al. In situ detection of water on the Moon by the Chang'E-5 lander[J]. *Science Advances*, 2022, 8(1), doi: 10.1126/sciadv.abl9174.
- [35] Changesite-(Y)[EB/OL]. [2022-12-20]. <https://www.mindat.org/min-470369.html>.
- [36] 时蓬, 白青江, 王琴, 等. 2021年空间科学与深空探测热点回眸[J]. *科技导报*, 2022, 40(1): 64-95.
- [37] Su B, Yuan J Y, Chen Y, et al. Fusible mantle cumulates trigger young mare volcanism on the cooling Moon [J]. *Science Advances*, 2022, 8(42), doi: 10.1126/sciadv.abn2103.
- [38] Zeng X, Li X, Liu J. Exotic clasts in Chang'e-5 regolith indicative of unexplored terrane on the Moon[J]. *Nature Astronomy*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01840-7>.
- [39] Yue Z, Di K, Wan W, et al. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 541-545.
- [40] Long T, Qian Y Q, Norman M D, et al. Constraining the formation and transport of lunar impact glasses using the ages and chemical compositions of Chang'e-5 glass beads[J]. *Science Advances*, 2022, 8(39), doi: 10.1126/sciadv.abq2542.
- [41] Yao Y F, Wang L, Zhu X, et al. Extraterrestrial photosynthesis by Chang'E-5 lunar soil[J]. *Joule*, 2022, 6(5): 1008-1014.
- [42] Luo P W, Zhang X P, Fu S, et al. First measurements of low-energy cosmic rays on the surface of the lunar far-side from Chang'E-4 mission[J]. *Science Advance*, 2022, 8(2), doi: 10.1126/sciadv.abk1760.
- [43] Liu J, Li C, Zhang R, et al. Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 65-71.
- [44] Ding L, Zhou R, Yu T, et al. Surface characteristics of the Zhurong Mars rover traverse at Utopia Planitia[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 171-176.
- [45] Li C, Zheng Y, Wang X, et al. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar [J]. *Nature*, 2022, 610: 308-312.
- [46] Liu Y, Wu X, Zhao Y Y, et al. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars[J]. *Science Advances*, 2022, 8(19), doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn8555>.
- [47] Fu S, Ding Z Y, Zhang Y J, et al. First report of a solar energetic particle event observed by China's Tianwen-1 mission in transit to Mars[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 934(1), doi: 10.3847/2041-8213/ac80f5.
- [48] First solar wind plasma observations from the Tianwen-1 mission[EB/OL]. [2022-12-20]. <https://eos.org/editor-highlights/first-solar-wind-plasma-observations-from-the-tianwen-1-mission>.
- [49] Zhang A B, Kong L G, Li W Y, et al. Tianwen-1 MIN-PA observations in the solar wind[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2022, 6(1): 1-9.
- [50] Fan K, Yan L, Wei Y, et al. The solar wind plasma upstream of Mars observed by Tianwen-1: Comparison with Mars Express and MAVEN[J]. *Science China, Earth Sciences*, 2022, 65: 759-768.
- [51] House C H, Wong G M, Webster C R, et al. Depleted carbon isotope compositions observed at Gale crater, Mars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(4): e2115651119.
- [52] NASA's InSight records monster quake on Mars[EB/OL]. [2022-12-16]. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-s-insight-records-monster-quake-on-mars>.
- [53] Yang Y J, Chen X F. A seismic meteor strike on Mars [J]. *Science*, 2022, 378(6618): 360-361.
- [54] Kim D, Banerdt W B, Ceylan S, et al. Surface waves and crustal structure on Mars[J]. *Science*, 2022, 378: 417-421.
- [55] Posiolova L V, Lognonné P, Banerdt W B, et al. Largest recent impact craters on Mars: Orbital imaging and surface seismic co-investigation[J]. *Science*, 2022, 378: 412-417.
- [56] Stähler S C, Mittelholz A, Perrin C, et al. Tectonics of Cerberus Fossae unveiled by marsquakes[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 1376-1386.
- [57] Broquet A, Andrews-Hanna J C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>.
- [58] Mitrofanov I, Malakhov A, Djachkova M, et al. The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars[J]. *Icarus*, 2022, 374: 114805.
- [59] Riu L, Carter J, Poulet F. The M3 project: 3-Global abundance distribution of hydrated silicates at Mars[J]. *Icarus*, 2022, 374: 114809.
- [60] Carter J, Riu L, Poulet F, et al. A Mars orbital catalog of aqueous alteration signatures (MOCAAS) [J]. *Icarus*,

- 2022, 389: 115164.
- [61] Yokoyama T, Nagashima K, Nakai I, et al. Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites[J]. *Science*, 2022, doi: 10.1126/science.abn7850.
- [62] Nakamura E, Kobayashi K, Tanaka R, et al. On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: A comprehensive geochemical perspective[J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2022, 98(6): 227–282.
- [63] Okazaki R, Miura Y N, Takano Y, et al. First asteroid gas sample delivered by the Hayabusa2 mission: A treasure box from Ryugu[J]. *Science Advances*, 2022, doi: 10.1126/sciadv.abo7239.
- [64] Okazaki Y, Marty B, Busemann H, et al. Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution[J]. *Science*, 2022, doi: 10.1126/science.abo0431.
- [65] Hopp T, Dauphas N, Abe Y, et al. Ryugu's nucleosynthetic heritage from the outskirts of the Solar System[J]. *Science Advances*, 2022, doi:10.1126/sciadv.add8141.
- [66] Nakamura T, Matsumoto M, Amano K, et al. Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples[J]. *Science*, 2022, doi: 10.1126/science.abn8671.
- [67] Noguchi T, Matsumoto T, Miyake A, et al. A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu[J]. *Nature Astronomy*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01841-6>.
- [68] Laretta D S, Adam C D, Allen A J, et al. Spacecraft sample collection and subsurface excavation of asteroid (101955) Bennu[J]. *Science*, 2022, 377(6603): 285–291.
- [69] Walsh K J, Ronald-Louis B, Erica R J, et al. Near-zero cohesion and loose packing of Bennu's near subsurface revealed by spacecraft contact[J]. *Science Advances*, 2022, 8(27), doi: 10.1126/sciadv.abm6229.
- [70] NASA's DART mission hits asteroid in first-ever planetary defense test[EB/OL]. [2022-12-20]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-dart-mission-hits-asteroid-in-first-ever-planetary-defense-test/>.
- [71] Singer K N, White O L, Schmitt B, et al. Large-scale cryovolcanic resurfacing on Pluto[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1542.
- [72] International sea level satellite takes over from predecessor[EB/OL]. [2022-12-22]. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/international-sea-level-satellite-takes-over-from-predecessor>.
- [73] Vasco D W, Kim K H, Farr T G, et al. Using Sentinel-1 and GRACE satellite data to monitor the hydrological variations within the Tulare Basin, California[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 3867.
- [74] Greene C A, Gardner A S, Schlegel N J, et al. Antarctic calving loss rivals ice-shelf thinning[J]. *Nature*, 2022, doi: 10.1038/s41586-022-05037-w.
- [75] Nilsson J, Gardner A S, Paolo F S. Elevation change of the Antarctic Ice Sheet: 1985 to 2020[J]. *Earth System Science Data*, 2022(14): 3573–3598.
- [76] Li B, Cao Y, Li Y H, et al. Quantum state transfer over 1200 km assisted by prior distributed entanglement[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(17), doi: 10.1103/PhysRevLett.128.170501.
- [77] Lu C Y, Cao Y, Peng C Z, et al. Micius quantum experiments in space[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94: 035001.
- [78] Gu Y D. The China Space Station: A new opportunity for space science[J]. *National Science Review*, 2022, 9(1): nwab219.
- [79] Let's explore space station science[EB/OL]. [2022-12-22]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/index.html#.
- [80] Baque M, Backhaus T, Meesse J, et al. Biosignature stability in space enables their use for life detection on Mars[J]. *Science Advances*, 2022, 8(36), doi: 10.1126/sciadv.abn7412.
- [81] Cooley S S, Fisher J B, Goldsmith G R. Convergence in water use efficiency within plant functional types across contrasting climates[J]. *Nature Plants*, 2022, 8: 341–345.
- [82] Miguel A S D, Bennie J, Rosenfeld E, et al. Environmental risks from artificial nighttime lighting widespread and increasing across Europe[J]. *Science Advances*, 2022, 8(37), doi: 10.1126/sciadv.abl6891.
- [83] Trudel G, Shahin N, Ramsay T, et al. Hemolysis contributes to anemia during long-duration space flight[J]. *Nature Medicine*, 2022, 28: 59–62.
- [84] Carollo R A, Aveline D C, Rhyno B, et al. Observation of ultracold atomic bubbles in orbital microgravity[J]. *Nature*, 2022, 606: 281–286.
- [85] NASA's big 2022: Historic moon mission, Webb telescope images, more[EB/OL]. [2022-12-23]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-big-2022-historic-moon-mission-webb-telescope-images-more>.
- [86] National Aeronautics and Space Administration, Canadian Space Agency, European Space Agency, et al. Inter-

- national space station benefits for humanity 2022[R]. Huntsville: International Space Station Program Science Forum, 2022.
- [87] Aguilar-Benitez M, Cavazonza L A, Ambrosi G, et al. Properties of daily helium fluxes[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(23): 231102.
- [88] 王赤. 加速空间科学发展 建设航天强国——中科院科研院所负责人谈“四个面向”[N]. *科技日报*, 2022-12-29(5).
- [89] Wang C, Song T T, Shi P, et al. China's space science pProgram (2025-2030): Strategic priority program on space science (III)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(4): 514-518.
- [90] 范全林, 宋婷婷, 时蓬, 等. 空间科学强国指标体系研究及其启示[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(8): 1076-1087.
- [91] 王赤. 加速空间科学发展 建设世界科技强国[J]. *红旗文稿*, 2022, 19: 16-19.
- [92] National Aeronautics and Space Administration. Science 2020-2024: A vision for scientific excellence in 2021 [R]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2022.
- [93] National Aeronautics and Space Administration. Moon to Mars objectives[R]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2022.
- [94] Earth orbit, Moon, Mars: ESA's ambitious roadmap[EB/OL]. [2022-12-20]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Earth_orbit_Moon_Mars_ESA_s_ambitious_roadmap.
- [95] 王赤, 白青江, 时蓬, 等. 美国行星科学 2023—2032 年规划及启示[J]. *科技导报*, 2022, 40(15): 6-15.
- [96] NASA to start astrophysics probe program[EB/OL]. [2022-12-05]. <https://spacenews.com/nasa-to-start-astrophysics-probe-program/>.
- [97] 王赤, 宋婷婷, 时蓬, 等. 10 年见证中国空间科学发展进入新时代[J]. *科技导报*, 2022, 40(19): 6-14.
- [98] 袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的 X 射线宇宙[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(3): 039502.

Review of 2022 global space science advances

WANG Chi, SHI Peng, BAI Qingjiang, WANG Qin, FAN Quanlin*

Space Science and Deep Space Exploration Study Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Hot spots in global space science and exploration emerged frequently in 2022. This paper summarizes significant accomplishments in the five disciplines of space science, namely astrophysics, heliophysics, planetary science, earth science, and biological and physical sciences in space. James Webb Space Telescope and its first batch of groundbreaking images became the highlight of the year. The representative achievements of space science missions of various countries are listed, in which the breakthroughs by missions under CAS's Strategic Priority Program on Space Science and the research of Chang'e-5 sample are particularly impressive. Manned spaceflight has provided an important platform for space science and exploration. The construction of China's space station (CSS) completed at late 2022, which has attracted worldwide attention, and CSS is preparing to host 1,000 scientific experiments in the coming 10 years. The space science long-term planning and national space strategies of space powers are presented, and the space missions in 2023 are also prospected in the end of the review.

Keywords space science; scientific satellite; solar system probes; 2022 hotspot; discovery ●



(责任编辑 王丽娜)