

# 2023 年空间科学与深空探测热点回眸

白青江, 时蓬, 宋婷婷, 王琴, 范全林, 王赤\*

中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

**摘要** 空间科学与深空探测为基础科学研究突破提供了第一手的观测数据, 成就诸多有重要影响的新发现和新突破, 不断开拓人类认识宇宙的新边界。主要依据国际顶刊空间科学研究亮点论文, 结合中国空间科学任务情况, 梳理了 2023 年全球空间科学重要进展, 主要涉及宇宙起源和演化、月球和行星探测、系外行星发现与表征、日球层物理和载人航天等学科领域的热点, 展望了 2024 年即将发射升空的空间科学任务。

**关键词** 空间科学; 科学卫星; 深空探测器; 2023 年研究热点

空间科学是以航天器为主要平台, 研究发生在宇宙空间的物理、天文、化学和生命等现象及其规律的科学。空间科学是人类进入太空时代后随着航天技术的进步而迅速发展起来的, 为当代科学和人类文明进步作出了奠基性、革命性贡献<sup>[1]</sup>, 深刻改变了人类的世界观、价值观和发展观。

2023 年, 世界各国科学家利用系列专用空间科学卫星和深空探测器获得的高品质观测数据(样品), 尤其是旗舰型空间天文台詹姆斯·韦布空间望远镜(JWST)的观测结果, 在国际重要期刊上发表了大量论文, 对学科发展和科学认知的影响深远。限于篇幅, 本文撷取其中代表性的原创成果, 以空间天文、月球与行星科学、日球层物理、载人航天等学科领域为主线, 兼顾系外行星交叉前沿, 通过 10 大热点回眸, 以期提纲挈领, 总揽过往, 启迪未来。

## 1 韦布望远镜深化宇宙演化认知

JWST 的核心科学目标之一是研究高红移宇宙亦即早期宇宙, 找寻最遥远的第一代星系甚至第一代恒星, 或者说“第一缕光”。

科研人员根据 JWST 宇宙演化早期辐射科学巡天(CEERS)的首批图像, 发现了 6 个“候选”星系( $7.4 \leq z \leq 9.1$ ,  $z$  表示红移值)。它们大约在宇宙大爆炸后 5 亿~7 亿年出现<sup>[2]</sup>, 其形成速度之快难以用现有天文学理论解释; 此外, 这些“候选”星系的质量比宇宙学标准模型推测的大得多, 一种观点是候选星系的核心存在超大质量黑洞, 但为何宇宙大爆炸后这么快就能形成超大质量黑洞也需解释。

另一个科研团队亦根据 CEERS 的观测, 发现了迄今已知最遥远的类银河系棒状螺旋星系

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-01-05

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)

作者简介: 白青江, 副研究员, 研究方向为空间科学发展战略, 电子信箱: bqj@nssc.ac.cn; 王赤(通信作者), 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为空间物理和空间天气学, 电子信箱: cw@nssc.ac.cn

引用格式: 白青江, 时蓬, 宋婷婷, 等. 2023 年空间科学与深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 87-98; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.005

ceers-2112 ( $z \approx 3$ ), 其已超过 110 亿岁<sup>[3]</sup>。此前认为星系需要几十亿年才能形成有序的星系棒, 但 ceers-2112 的星系棒在宇宙大爆炸后约 10 亿年或更短时间内形成, 这意味着现有星系的形成和演化理论需要修正, 譬如调整会影响早期宇宙星系棒形成速度的暗物质质量。

与 CEERS 类似, JWST 先进深场河外星系巡天 (JADES) 关注的也是遥远的古老星系。科研人员根据 JADES 的观测, 发现了 4 个迄今已知最古老的星系 ( $10.3 \leq z \leq 13.2$ ), 其中最古老的星系 JADES-GS-z13-0 形成于宇宙大爆炸后 3.2 亿年 (图 1)<sup>[4]</sup>, 意味着有益于宇宙再电离的第一批星系迅速形成, 且内部辐射场强烈<sup>[5]</sup>。

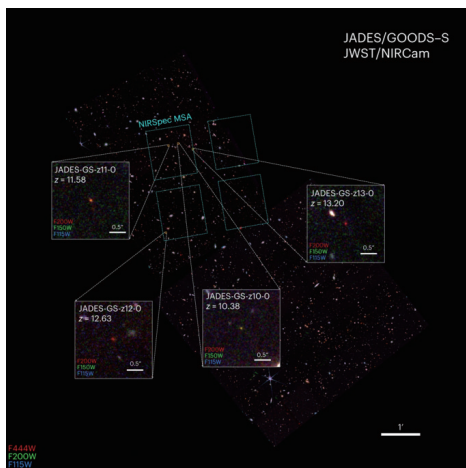


图 1 JWST 观测到 4 个迄今最遥远/最古老的星系

对于遥远星系内发生的各种过程, JWST 开始作出重要贡献。根据 JWST 的观测, 在宇宙大爆炸后不到 15 亿年 ( $z=4.2248$ ) 的星系 SPT0418-47 中, 科研人员发现了目前已知的最遥远多环芳烃大分子 (PAHs), 其辐射在星系中分布并不均匀, 随星系内恒星和尘埃粒的光而变化<sup>[6]</sup>, 意味着早期星系内曾出现过局部的复杂过程, 其背后原因待深究。

根据 JWST 对大爆炸后仅 10 亿年的年轻星系 JADES-GS-z6-0 ( $z \approx 7$ ) 的观测, 科研人员发现该星系存在含碳尘埃<sup>[7]</sup>。一般认为, 只有更古老星系如银河系中才有比氢和氦重的元素。该研究挑战了现有关于星际尘埃形成的假设, 意味着早期星系中碳粒存在快速产生过程, 如来自沃尔夫-拉叶星或超新星喷出物, 亟需提出早期宇宙的星系演化新理论。

## 2 X射线空间天文揭示极端宇宙规律

对黑洞、中子星等致密天体及其极端磁场、极端密度等条件下的物质运动规律研究属于世界空间科学前沿之一。磁星是具有极端磁场的年轻中子星, 可通过空间 X 射线观测。科研人员根据 X 射线偏振成像探测卫星 (IXPE) 对仙后座、距地球约 1.3 万光年的磁星 4U 0142+61 的偏振观测结果, 证实了此前提出的磁星具有超强磁场并且高度极化、磁星拥有裸露的固态外壳等理论猜想, 且倾向于 X 射线主要由中子星表面赤道带发射的模型<sup>[8]</sup>。

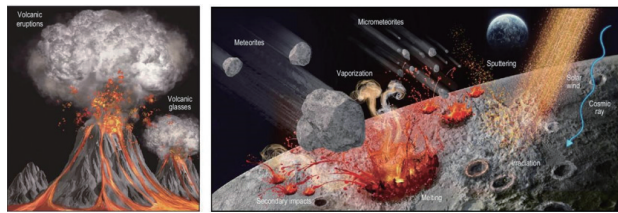
科研人员利用“原子核光谱望远镜阵列” (NuSTAR) 对脉动超亮 X 射线源 (ULX) M82 X-2 进行了 7 年长期观测, 测量了这颗中子星的轨道衰变, 提出这种轨道衰变是由打破“爱丁顿极限” (Eddington limit) 的极端质量传递驱动的<sup>[9]</sup>。如果此推测为真, 那么它将支持一颗高度磁化的中子星的模型。

## 3 嫦娥五号样品继续推动中国月球科学突破

过去两年, 中国 40 余个院所高校对嫦娥五号 (CE-5) 月球样品开展了深入分析, 科研人员在月壤物理性质、玄武岩喷发时间和机制、月幔源区特征、太空风化对月壤的改造等多个方面取得了系列原创成果, 更新了人类对月球的认识<sup>[10]</sup>。

此外, 中国科学家还在月壤样品中发现了多种类型、不同起源的月球玻璃物质 (图 2), 构建了月壤玻璃/非晶相的分类目录, 并从玻璃形成的角度阐释了采样点月球表面的空间环境特征及其对月表物质的改造作用。与阿波罗样品不同的是, CE-5 着陆点月球表面的撞击环境整体上相对温和。对月壤玻璃物质的研究为剖析月球的物质组成、月表的时空演化奠定了基础, 有望为基于月壤资源原位加工制造玻璃材料和器件提供科学依据<sup>[11]</sup>。

在 2023 年第 74 届国际宇航大会 (IAC) 上, 嫦娥五号团队荣获国际宇航科学院 (IAA) “劳伦斯团队奖” (Laurels Team Award); 中国国家航天局 (CNSA) 也在会上宣布 CE-5 月球科研样品将面向国际开放



(a) 火山喷发 (b) 陨石及微陨石撞击、热蒸发沉积以及太阳风/宇宙线辐照损伤等

图2 月球表面各类玻璃物质的固、液、气多种路径起源示意

申请,欢迎各国科学家共同研究,共享成果。

利用嫦娥一号/二号微波探测仪(MRM)的全球首幅“微波月亮”数据,并以月球探勘者(LP)和月球勘测轨道器(LRO)等的观测作补充,美国科研人员发现月背近北极的一座古火山下的岩石仍有高出其他地区的温度,或者说是仍然在释放热量,修正了既往钍元素辐射致该地区热异常的看法<sup>[12]</sup>。鉴于丰富的水和板块构造促进了地球上花岗岩的起源,一般认为在地球以外的太阳系中几乎不存在花岗岩。该研究意味着月球也曾出现过类似地球地质演化的花岗岩系统,而且利用被动辐射数据可以扩展人们对月球和其他行星体地热过程的了解。这侧面反映了中国月球探测工程数据的巨大科学潜力。

#### 4 寻找火星水和揭示火星内部结构有新认知

火星亦位于太阳系宜居带,其宜居性演化、过去或现在是否支持生命存在,是重大科学前沿。寻找水和筛选高宜居环境是火星探测的重要目标。中国“祝融号”火星车的探测证明火星北部平原曾存在海洋。科研人员通过综合分析“祝融号”搭载的多光谱相机(MSCam)的科学数据,首次在火星表面发现海洋沉积岩的岩石学证据,成为支持火星北部平原古海洋(VBF)存在的直接性原位探测证据<sup>[13]</sup>。

美国“毅力号”火星车发现了多种有机物质。“毅力号”搭载了宜居环境有机物和化学物质拉曼与荧光扫描探测仪(SHERLOC),在耶泽罗撞击坑

底的10个目标中探测到了多种有机分子<sup>[14]</sup>。观测结果的多样性提示火星表面有机物的起源与保存有不同方式:可能通过水的沉积,也可能通过与火山物质的合成,意味着火星过去可能存在一个比之前认为的更复杂的化学循环。“好奇号”火星车证明火星上拥有适于生命出现的环境条件。科研人员通过“好奇号”搭载的桅杆相机(MastCam)和化学相机(ChemCam),在38亿至36亿年前的沉积层中发现了呈六角形图案的盐类沉积物,是火星气候持续的、周期性、有规律的干湿季节的首个证据<sup>[15]</sup>。这种环境为形成复杂的生命前体和组成化合物(如RNA)提供了理想条件,为在火星上发现孕育生命自然过程的痕迹提供了线索。

美国“洞察号”着陆器仍是认知火星内部结构的利器,如发现火星可能有个液态内核,火星核比2021年估算值更小更致密。研究人员通过分析“洞察号”(运行时段:2018年5月至2022年12月)火星自转和内部结构试验探测仪(RISE)的无线电跟踪测量数据,发现火星内部质量存在异常,结合地核相关数据可推断造成该现象的原因是火核为熔融液体<sup>[16]</sup>。

另2项独立研究则根据“洞察号”火震+流星撞击数据、模拟计算和地球物理模型的综合分析<sup>[17-18]</sup>,皆提出火星的液态铁核被一层约150 km厚的熔融硅酸盐层包围(图3<sup>[19]</sup>),该表面之前被误认为是火星核的表面,亦即火星核半径缩小了、密度变大了。不过2个团队对熔融火幔层的密度、不可压缩性、成分和起源存在分歧,但不可否认他们的工作依然增进了人们对类地行星形成和组成的理解。

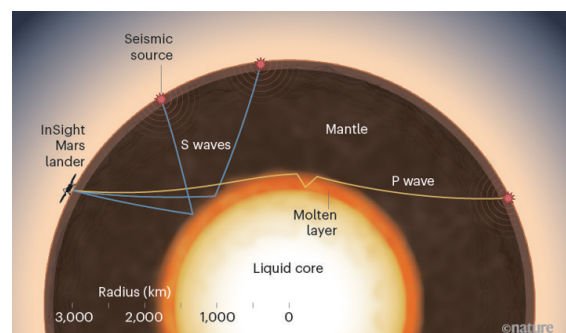


图3 新证据表明火星液态铁核(约1650~1675 km)被150 km厚的熔融硅酸盐层包围

## 5 土卫二发现磷和“龙宫”样品助力太阳系地外生命探寻

2023年,围绕太阳系地外生命探寻,空间科学取得重要进展,集中体现在土卫二上发现生命关键组成元素磷、小行星“龙宫”上发现核酸前体尿嘧啶。

土卫二存在冰下“海洋”,其海底热液喷口的化学能可以维持生物生存。利用“卡西尼”号(运行时段:1997年10月至2017年9月)尘埃分析仪(CDA)的档案数据,科研人员从土卫二地下海洋喷出的冰羽流样本中检测到了以磷酸盐形式存在的磷,成为寻找地外生命方面迈出的重要一步<sup>[20]</sup>。磷酸盐形式的磷对地球所有生命都至关重要,但磷也是生物必需元素中含量最低的,之前尚未在地球以外的海洋中检测到。木卫二的冰下海洋亦是潜在的生命宜居环境。

根据JWST近红外光谱仪(NIRSpec/IFU)的观测,科研人员绘制了木卫二表面的CO<sub>2</sub>图谱<sup>[21]</sup>,分析表明其来源于木卫二内部<sup>[22]</sup>。这些研究都反映了冰卫星表面和地下海洋间的物质交换。这些发现也让人们对木星冰卫星探测器(JUICE)、木卫二快船(Europa Clipper)等抵近科学任务的未来发现更添期待。

“隼鸟2”号2020年12月6日返回地球,其携带的5.4 g近地小行星“龙宫”沙石样本为揭开赋予地球生命的起源以及太阳系诞生历史提供了新研究契机。根据对“龙宫”样品的元素丰度、同位素比率、矿物学、有机分子等的实验室分析,科研人员有多项新发现:“龙宫”样品的成分与Ivuna型碳质球粒陨石(CI)相似,但化学性质比后者更原始<sup>[23]</sup>;长期的化学过程(水蚀变)有助于“龙宫”或其母体上合成种类繁多的可溶性有机物分子(SOM),它们的性质与非生物来源一致<sup>[24]</sup>;“龙宫”样品中的大分子有机物质可能由太阳系形成早期(或之前)形成的原始物质组成,它们的性质可以解释“龙宫”表面的低反照率<sup>[25]</sup>。也有科研团队在龙宫样品中发现了尿嘧啶(Uracil)和烟酸(一种B3维生素),尤其前者是形成RNA的4种核碱基之一<sup>[26]</sup>。这意味着核碱基等益生元分子或由地外起源,可通过包括“龙宫”在内的碳质小行星/陨石输送到早期地球上。

## 6 “飞镖”行星防御试验溢出科学成果印象深刻

“双小行星重定向测试”(DART,飞镖)于2022年9月实施,成功改变了近地小行星(65803)李女星(Didymos)的卫星李小星(Dimorphos)的轨道,为未来保护地球免遭小行星撞击迈出了关键的第一步。DART除了一台光学相机(DRACO)外再无其他任何科学载荷。

虽然DRACO主要用于自主导航定位、测量小行星大小和形状、确定撞击地点及其地质背景,但科研人员通过DART任务的数据以及地面望远镜&雷达、空间望远镜的后随观测,对撞击过程及效果开展了深入解剖,2023年再取得多项重要突破,包括:重建了DART的撞击过程,包括撞击时序、撞击点位置和性质等<sup>[27]</sup>;研究了动能撞击所致的李小星轨道周期变化,且地面望远镜和雷达2种独立观测给出了相同的轨道周期变化值<sup>[28]</sup>;报告了哈勃空间望远镜(HST)对碰撞溅射物的观测结果,认为DART测试为研究因天然撞击形成的活动小行星提供了参考,有望开辟小行星研究的新方向<sup>[29]</sup>;发现了动能撞击的效果不仅源于DART的动量,还来自撞击溅射物的反冲(即后坐力),撞击溅射物为小行星贡献了超过了DART本体所携带的动量<sup>[30]</sup>。此外,各国天文爱好者(citizen scientists)望远镜网络还同步获得了李小星在碰撞之前、期间和之后颜色变化等观测结果<sup>[31]</sup>。

需要提及的是,2024年欧洲空间局(ESA)将发射赫拉小行星任务(Hera)(表1),继续对DART撞击坑进行现场近距离观测,评估行星防御动能撞击器方法。

## 7 系外行星新发现刷新人们认知

从1992年首次发现系外行星(围绕脉冲星运转)至今(截至2023年12月18日),人类已发现5557颗系外行星、4137个行星系统,另有10053个候选体待确认<sup>[32]</sup>。30余年来,除了系外行星数量的增长,更令人振奋的是新科学进展。

表1 2024年各国主要空间科学卫星和深空探测器任务

所属领域	名称	主要科学目标	主要载荷/航天器	来源
空间天文	爱因斯坦探针(EP)	发现宇宙中的X射线剧变天体;发现和探索宇宙中沉寂黑洞的耀发;探寻引力波源的X射线对应体	宽视场X射线望远镜(WXT)、后随X射线望远镜(FXT)	中国科学院(CAS)
	空间变源监视器卫星(SVOM)	发现和快速定位伽玛暴,揭示其电磁辐射性质,并利用伽玛暴研究暗能量和宇宙演化	法国:硬X射线相机(ECLAIRs)和软X射线望远镜(MXT);中国:伽马射线监视器(GRM)和可见光望远镜(VT)	中国国家航天局(CNSA),法国国家空间研究中心(CNES)
月球和行星科学	嫦娥六号	月球背面南极-艾特肯盆地采样返回任务	主任务:月球着陆探测器、月面巡视器、月面上升器和轨道返回器;搭载氦气探测器(法国)、月表负离子分析仪(ESA)、激光角反射器(意大利)和立方星(巴基斯坦)4台国际载荷;以及鹊桥二号中继通信卫星	中国国家航天局
	环月资源探测卫星(Luna 26)	寻找并量化可用于未来着陆任务的月球自然资源	中子和伽马射线探测器(LGNS);外逸层紫外扫描探测器(LEVUS);红外绘图仪(LUMIS);立体相机(LSTK);探月雷达(RLK-L);磁强计(LPMS-LG);电磁波探测器(LEMI);太阳风探测器(BM-SW-LG);带电粒子探测器(ASPECT-L);离子和中性粒子光谱仪(LINA);无线电接收仪(PKD);超高能宇宙线探测器(LORD);环月尘埃探测器(METEOR-L);数据管理器(SSRN12)	俄罗斯航天国家集团公司(Roscosmos)
	赫拉小行星任务(Hera)	评估行星防御动能撞击器方法,对飞镖(DART)任务撞击双小行星系统之李小时(Dimorphos)形成的撞击坑现场进行近距离观测,探测其表面和次表层/内部特性;探测李大星(Didymos)	主任务载荷:小行星分幅相机(AFC)、热红外成像仪(TIRI)、行星激光高度计(PALT)、“超级童子军”高光谱成像仪(HyperScout)和X波段无线电科学试验设备(X-DST)。搭载2颗立方星开展辅助观测:米兰号(Milani)6U立方星主要利用ASPECT高光谱成像光谱仪观测小行星表面光谱;尤文塔斯6U立方星(Juventas)主要利用JuRa低频雷达探测小行星内部	ESA
	火星卫星探测任务(MMX)	火星一采样返回;揭示火星卫星的起源,以及火星在太阳系中形成的过程;揭示“火星家族”即火星+火星一+火星二的演化过程	取芯&吹气采样器(C-SMP&P-SMP)、地貌望远镜天底成像仪(TENGOO)、光学彩色成像仪(OROCHI)、激光高度计(LIDAR)、近红外光谱仪(MIRS)、伽马射线和中子探测器(MEGANE)、火星尘埃监视器(CMSM)、质谱分析仪(MSA)、行星际辐射环境监视器(IREM)和超高清视频相机(SHV)	日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)

表1 2024年各国主要空间科学卫星和深空探测器任务(续)

所属领域	名称	主要科学目标	主要载荷/航天器	来源
月球和行星科学	火星逃逸探索双星(EscapePADE)	揭示火星大气逃逸与等离子体加速及动力学,包括控制火星磁层结构的过程及影响离子流的方式、从太阳风到火星磁层的能量和动量运输机制、控制能量和物质流入和流出火星大气的过程(图4)	磁强计(EMAG)、静电分析仪(EE-SA)和朗缪尔探针(ELP)	NASA
	木卫二快船(Europa Clipper)	探测木卫二冰壳的厚度以及地下海洋如何与表面相互作用;揭示木卫二的成分,表征木卫二的地质学特征	成像系统(EIS)、热辐射成像系统(E-THEMIS)、紫外光谱仪(E-UVS)、测绘成像光谱仪(MISE)、磁强计(ECM)、磁力测深等离子体仪(PIMS)、重力/无线电科学装置(Gravity/Radio Science)、海洋到近地表评估探测雷达(REASON)、质谱仪(MASPEX)和表面尘埃分析仪(SUDA)	NASA
空间地球科学	浮游生物、气溶胶、云和海洋生态系统(PACE)	地球海洋生态系统和大气特征观测	海洋水色仪(OCI)、行星探测光谱偏振仪(SPEXone)、超角彩虹偏振仪2(HARP2)	NASA
	哨兵-2C(Sentinel-2C)	全球陆地监测	多光谱成像仪(MSI)	ESA
	全球温室气体和水循环观测卫星(GOSAT-GW)	全球温室气体和水循环观测	先进微波扫描辐射计-3(AMSR3)、人为与自然总排放测绘光谱仪-3(TANSO-3)	JAXA
	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)	NASA, 印度空间研究组织(ISRO)
	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与云的输送、云和降水的相互作用	后向散射激光雷达(ATLID)、云廓线雷达(CPR)、多光谱成像仪(MSI)、宽带辐射计(BBR)	ESA
	“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)	ESA

2023年,科研人员首次发现了一颗可能有火山活动的系外行星,确认了首个由6颗“亚海王星”组成的系外行星系统,证实了天体测量法与直接成像法结合在发现新系外行星上的潜力。

根据凌星系外行星巡天卫星(TESS)、斯皮策(Spitzer)空间望远镜和地面望远镜的组合观测结果,1个国际团队在距太阳系约90光年的红矮星LP791-18周围,发现了一颗可能有火山活动的类

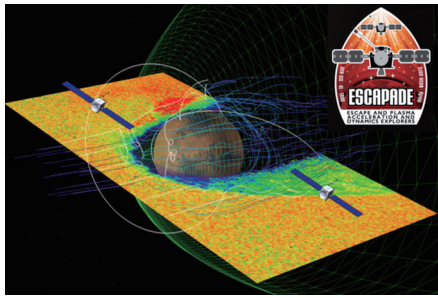
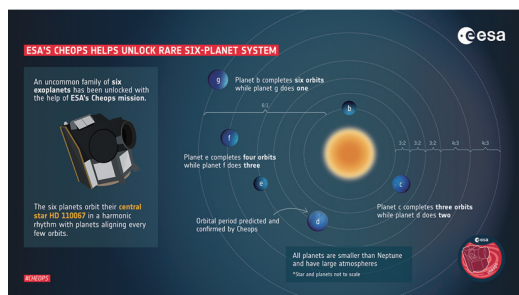


图4 美国火星大气逃逸与等离子体加速及动力学探测双星示意  
(图片来源:NASA)

地系外行星 LP791-18d,其原因可能是因受到了外侧相邻公转轨道上体积和质量都更大的系外行星 LP 791-18c 引力的影响,与太阳系木卫一潮汐加热机制相同<sup>[33]</sup>。

在对 TESS 和 CHEOPS 空间望远镜以及多台地面望远镜的数据进行分析和勘误后,科研人员在银河系后发座距地球仅 100 光年的 K0 型恒星 HD 110067 周边,确认了首个由 6 颗“亚海王星”系外行星组成的共振链(图 5)<sup>[34]</sup>。HD 110067 行星系统自 80 亿年前形成以来一直没有受到干扰,成为了研究行星系统形成和演化的化石,为了解行星系统产生的条件提供了一个独特的机会。此外,美英多家机构通过视向速度法,在离地球约 1300 光年的绘架座方向,发现了绕双恒星(联星)运转的气态巨行星 BEBOP-1c,成为迄今第 2 个被证实拥有多颗行星的联星系统<sup>[35]</sup>,有助于人们深入理解行星的诞生和演化。



它的 6 颗行星每隔几个轨道就对齐一次;最外层行星 g 每完成 1 圈轨道,最内层行星 b 就完成 6 圈轨道

图5 CHEOPS 助力解锁 HD 110067 行星系统  
(图片来源:ESA CC BY-SA 3.0 IGO)

此外,天体测量法与直接成像法结合可发现和表征系外行星。科研人员根据 ESA 依巴谷卫星(Hipparcos)和盖亚空间望远镜(Gaia)的观测数据,利用天体测量法确定了一颗候选宿主恒星,然后通过地面的“昴星团”望远镜(Subaru Telescope)用直接成像法对其进行了研究,发现了一颗质量约为 14 倍木星的系外行星 HIP 99770 b,大气光谱表明它云层较少<sup>[36]</sup>。未来随着盖亚第四版科学数据发布(Gaia DR4),天体测量法发现系外行星有望成为新的研究热点。

系外行星研究不断“刷新”人们的认知。例如,“不该存在的行星”——小熊座 8 b(8 Ursae Minoris b),属于热木星,由韩国于 2015 年用视向速度法发现,并被国际天文学联合会(IAU)以朝鲜半岛最高山脉命名了母恒星和系外行星:白头星(Baekdu)和汉拿行星(Halla)。科研人员利用 TESS 观测了白头星的星震,发现它曾膨胀成一颗红巨星,根据现有理论,白头星膨胀期间“应该”已吞噬了行星,然后又缩小到目前的大小。但事实是,汉拿行星“幸存”至今<sup>[37]</sup>。虽然科研人员试图提出包括白头星最初是双星系统等 3 种猜想予以解释,但也反映出人们并未完全了解行星在它们周围是如何形成的。

而另一研究则让人们提前“看到”了地球的未来——研究人员使用多个地面天文台和美国国家航空航天局(NASA)的近地天体广域红外巡天探测卫星(NEOWISE),对银河系天鹰座方向距离地球约 1.2 万光年的恒星 ZTF SLRN-2020 光学瞬变爆发及相应红外辐射的探测,首次完整地呈现了一颗“垂死”的恒星(红巨星)吞噬行星的过程<sup>[38]</sup>。还好对太阳系和地球而言,这将是 50 亿年之后的事情。

此外,根据对广域红外线巡天探测卫星(WISE)历史数据的分析和模拟,科研人员在年轻的(约 3 亿岁)类太阳恒星 ASASSN-21qj 主导的行星系统中,发现了 2 颗亚海王星系外行星碰撞的余辉和由此产生的残骸云的凌星现象,为研究太阳系形成和演化、冰巨星的内部结构提供了重要线索<sup>[39]</sup>。

## 8 系外行星后随观测表征大气特性

WASP-39b 位于处女座,是颗与土星质量相当的炽热气态巨行星,是热木星型系外行星的典型代表,存在频繁凌星现象,虽然对生命不宜居,但可做宿主恒星辐射对系外行星影响研究的天然实验室。此前 HST、Spitzer 都曾对 WASP-39b 进行过观测,并发现了它大气中的某些成分。因此,JWST 选择 WASP-39b 作为系外行星表征首秀目标很理想。

多个团队分别利用 JWST 的 NIRSpec、NIRISS 和 NIRCам 载荷,仔细考察了系外行星 WASP-39b 的大气层,测试了载荷的可重复性,充分展示了其在表征系外行星新细节方面的空前能力。根据 4 次凌星观测获得的透射光谱数据,他们共同发现了 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、Na 和 K 的特征;确定了云的性质;发现了 WASP-39b 大气雾霾源于 SO<sub>2</sub> 的证据(图 6<sup>[40]</sup>)<sup>[41-45]</sup>。尤其是 SO<sub>2</sub> 分子是迄今首次在系外行星上检测到,根据实验室重现可将其归因于宿主恒星的光化学副产品<sup>[46]</sup>。

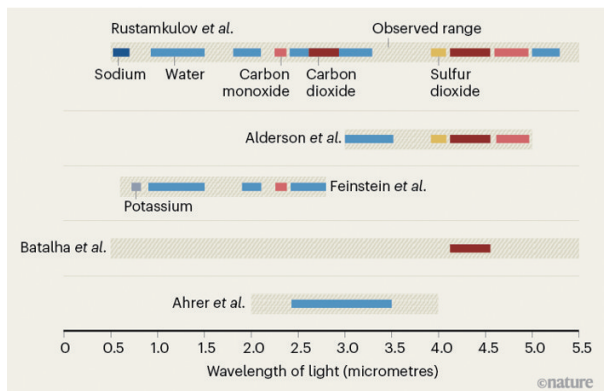


图6 2023年初的5篇《Nature》论文揭示了 WASP-39b 的大气组成,佐证了 JWST 在系外行星表征研究上的空前能力和卓越效力  
(图片来源:Julia V. Seidel, Louise D. Nielsen & Subhajit Sarkar, Nature)

利用 JWST 的中红外探测器(MIRI),科研人员对研究热点 TRAPPIST-1 行星系统进行了高光谱分辨率观测。根据热辐射探测结果,TRAPPIST-1 b 可能没有大气层,也未有 CO<sub>2</sub> 或其他大气成分<sup>[47]</sup>; TRAPPIST-1 c 距离其母恒星更远更冷,似乎有可

能留住大气层,但探测发现它与 TRAPPIST-1 b 一样也没有富含 CO<sub>2</sub> 的厚大气层、不可能宜居<sup>[48]</sup>;接下来将转向 TRAPPIST-1 e 和 TRAPPIST-1 f。

距地球 400 光年的系外行星 WASP-18 b 属于热木星,太阳系中没有对应物,自 2009 年被发现以来被地面天文台和 HST、Chandra、Spitzer 和 TESS 空间望远镜轮番观测。而利用 JWST 近红外成像和光谱仪(NIRISS),不仅基于星食(Secondary Eclipse)绘制了这颗被潮汐锁相的系外行星向日侧的大气温度图,而且探测到了它炙热大气中幸存的少量水分子<sup>[49]</sup>。

JWST 的近红外照相机(NIRCам)和中红外仪器(MIRI)在猎户座棒(Orion Bar)的星际介质中观测到了重要的碳化合物“甲基阳离子”(CH<sub>3</sub><sup>+</sup>),之前它从未在太阳系外被观测到。在距地球约 1350 光年的小红矮星 d203-506 的一个原行星盘中,科研人员发现了 CH<sub>3</sub><sup>+</sup><sup>[50]</sup>。碳化合物构成了所有已知生命的基础,CH<sub>3</sub><sup>+</sup> 有助于形成更复杂的碳基分子,该研究有望为认知生命在宇宙中如何繁衍生息,乃至系外生命搜索提供线索。

## 9 空间太阳观测任务促进空间天气研究

随着空间科学发展,太阳观测和空间物理已融合发展为日球层物理,综合利用观测、模拟和理论研究,聚焦日球层即太阳和太阳风影响的区域,服务现代社会发展和人类生命健康。

2023 年,中国首颗综合性太阳观测科学卫星“夸父一号”观测数据向国内外同行实行无差别开放和共享,包括太阳硬 X 射线成像仪(HXI)的全部观测数据、全日面矢量磁像仪(FMG)的部分观测数据以及莱曼阿尔法太阳望远镜(LST)的部分观测数据,鼓励基于“夸父一号”观测数据的国际合作研究。

“守望者号”(Vigil)日地 L5 点空间天气卫星将通过偏离日-地连线、侧视太阳爆发提前预报地球空间天气,2023 年在 ESA 空间安全计划(S2P)支持下获得初步开工授权(PATP),继续完成卫星 B2 阶段(Phase B2)工程研制,计划 2030 年代初发射<sup>[51]</sup>。

国际空间站 (ISS) 搭载的美国大气波实验装置 (AWE), 旨在通过气辉观测深入了解大气中间层重力波如何影响地球空间天气<sup>[52]</sup>。

科研人员综合利用“帕克号”太阳探测器 (PSP)、太阳动力学天文台 (SDO) 和地球同步轨道环境卫星-R (GOES-R/SUVI) 以及大熊湖太阳天文台 (BBSO) 的数据, 发现了太阳风起源的重要新线索, 即太阳风可能主要由日冕底部广泛存在的小尺度磁场重联驱动的喷流提供能量和物质来源<sup>[53]</sup>。这些磁重联驱动日冕的间歇性外流, 也提供了日冕底部的磁活动与 PSP 发现的折返太阳风现象间的联系, 助力人们理解太阳风加热和加速机制。

电离层的稳定对导航通信等高技术活动以及影响地球生命的平流层臭氧至关重要。电离层会受高能伽马射线暴 (GRB) 影响增加电离, 但既往仅观测到电离层底部 (60~350 km) 的响应。科研人员利用国际伽马射线天体物理学实验室卫星 (INTEGRAL/SPI&IBIS)、中国电磁监测试验卫星 (CSES/EFD) 和地面基站电离层数据, 首次报告了由 2022 年 10 月 9 日的伽马射线暴 (GRB221009A) 引起的强烈电离层顶侧 (~500 km) 扰动的证据<sup>[54]</sup>, 以及 500 km 处电离层电场的显著变化。

## 10 载人航天助力近地空间科学与应用

2023 年依托中国空间站的国家太空实验室正式运行<sup>[55]</sup>, 中国载人航天完成了神舟十五号返回、天舟六号货运飞船发射、神舟十六号发射和返回、神舟十七号发射。其中, 神舟十六号飞行乘组包括中国首位进入太空的载荷专家桂海潮教授, 负责空间科学实验载荷在轨操作; 空间辐射生物学装置完成全流程暴露实验的首批样品由返回舱携带返回地面, 为后续空间辐射与微重力协同生物学效应提供了基础; 至神舟十七号中国载人航天发射任务实现 30 战 30 捷。空间站进入应用与发展阶段后, 已在轨实施 110 个空间科学研究与应用项目, 部分项目取得了阶段性应用成果: 国际首次实现水稻‘从种子到种子’的全生命周期培养、国际首次实现失重对细胞内钙信号影响的可视化研究, 空间新能源的关键技

术斯特林热电转换技术顺利完成在轨验证等; 未来预期将在超低温量子物态、软物质非平衡动力学、生命起源的分子机制、多波段巡天及宇宙学、天体极端物理过程等前沿科学研究方面取得具有国际影响的科学发现, 为人类知识宝库贡献新内容<sup>[56]</sup>。

国际空间站 (ISS) 第 68 次 (2022 年 10 月至 2023 年 3 月)/69 次 (2023 年 3 月至 2023 年 9 月) 长期考察团 2023 财年共开展 323 项科学研究实验, 其中日本首次在 ISS 成功培养了小鼠胚胎, 未见 DNA 辐射损伤并呈现出正常的结构发育, 旨在探索人类在太空怀孕是否安全<sup>[57]</sup>。此外, 为支撑人类长期太空生存和载人深空探索, ISS 还种植矮化西红柿等可持续作物, 了解微生物如何适应太空以保护宇航员健康, 以及开发能够抵御月球和火星恶劣环境的新型材料<sup>[58]</sup>。

回眸 2023 年, 全球累计完成 10 次科学任务发射, 与我们 2022 年回眸<sup>[59]</sup>中的展望基本一致, 其中 ESA 宇宙憧憬 (2015—2025 年) 规划部署的大型任务 (L1) JUICE 和中型任务 (M2) Euclid 成功升空尤其值得关注; 因研制挑战等原因, 美国的 NISAR、ESA 的 EarthCARE、Biomass 等任务的发射窗口顺延至 2024 年。

展望 2024 年, 以 NASA 月球有效载荷快递服务 (CLPS) 计划为代表的大量商业登月器已列入发射计划, 包括直觉机器公司的 IM-1/2/3 三次任务、天体机器人公司的游隼号 PM-1/狮鹫号 GM-1 二次任务等, 其中 GM-1 将搭载 NASA 蝰蛇号 (VIPER) 极地挥发物探测月球车, 着陆在月球南极穆顿山 (以 NASA 早期无名英雄/人力计算员 Melba Roy Mouton 命名)。当然, 我们更关注表 1 中各国 2024 年将实施的近 10 次空间科学任务发射。

浩瀚的空天还有许多未知的奥秘有待探索, 道阻且长但行则将至。我们相信, 包括中国在内的世界航天国家会久久为功, 研发一茬又一茬的科学卫星和深空探测器, 不断突破极限, 为回答极端条件下的物理规律、日地系统多圈层耦合、行星系统是如何形成与演化的等前沿问题持续奠定坚实的物质技术基础<sup>[1]</sup>。我们也相信, 空间科学与深空探测必将不断取得革命性发现, 深化人类对宇宙的认知。

## 参考文献(References)

- [1] 王赤. 空间科学突破的前瞻和中国的贡献[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1050-1065.
- [2] Labbé I, van Dokkum P, Nelson E, et al. A population of red candidate massive galaxies ~600 Myr after the Big Bang[J]. *Nature*, 2023, 616: 266-269.
- [3] Costantin L, Pérez-González P G, Guo Y, et al. A Milky Way-like barred spiral galaxy at a redshift of 3[J]. *Nature*, 2023, 623: 499-501.
- [4] Curtis-Lake E, Carniani S, Cameron A, et al. Spectroscopic confirmation of four metal-poor galaxies at  $z=10.3-13.2$  [J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 622-632.
- [5] Robertson B E, Tacchella S, Johnson B D, et al. Identification and properties of intense star-forming galaxies at redshifts  $z>10$ [J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 611-621.
- [6] Spilker J S, Phadke K A, Aravena M, et al. Spatial variations in aromatic hydrocarbon emission in a dust-rich galaxy[J]. *Nature*, 2023, 618: 708-711.
- [7] Witstok J, Shivaie I, Smit R, et al. Carbonaceous dust grains seen in the first billion years of cosmic time[J]. *Nature*, 2023, 621: 267-270.
- [8] Taverna R, Turolla R, Muleri F, et al. Polarized x-rays from a magnetar[J]. *Science*, 2022, 378(6620): 646-650.
- [9] Bachetti M, Heida M, Maccarone T, et al. Orbital Decay in M82 X-2[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, 937(2), doi: 10.3847/1538-4357/ac8d67.
- [10] Chen Y, Hu S, Li J, et al. Chang'e-5 lunar samples shed new light on the Moon[J]. *The Innovation Geoscience*, 2023, 1(1): 100014.
- [11] Zhao R, Shen L Q, Xiao D D, et al. Diverse glasses revealed from Chang'E-5 lunar regolith[J]. *National Science Review*, 2023, 10(12): nwad079.
- [12] Siegler M A, Feng J, Lehman-Franco K, et al. Remote detection of a lunar granitic batholith at Compton-Belkovich[J]. *Nature*, 2023, 620: 116-121.
- [13] Xiao L, Huang J, Kusky T, et al. Evidence for marine sedimentary rocks in Utopia Planitia: Zhurong rover observations[J]. *National Science Review*, 2023, 10(9): nwad137.
- [14] Sharma S, Roppel R D, Murphy A E, et al. Diverse organic-mineral associations in Jezero crater, Mars[J]. *Nature*, 2023, 619: 724-732.
- [15] Rapin W, Dromart G, Clark B C, et al. Sustained wet-dry cycling on early Mars[J]. *Nature*, 2023, 620: 299-302.
- [16] Le Maistre S, Rivoldini A, Caldiero A, et al. Spin state and deep interior structure of Mars from InSight radio tracking[J]. *Nature*, 2023, 619: 733-737.
- [17] Samuel H, Drilleau M, Rivoldini A, et al. Geophysical evidence for an enriched molten silicate layer above Mars's core[J]. *Nature*, 2023, 622: 712-717.
- [18] Khan A, Huang D, Durán C, et al. Evidence for a liquid silicate layer atop the Martian core[J]. *Nature*, 2023, 622: 718-723.
- [19] Lee S van der. Deep Mars is surprisingly soft[J/OL]. *Nature*, 2023. [2023-12-18]. <https://www.nature.com/articles/d41586-023-03151-x>.
- [20] Postberg F, Sekine Y, Klenner F, et al. Detection of phosphates originating from Enceladus's ocean[J]. *Nature*, 2023, 618: 489-493.
- [21] Trumbo S K, Brown M E. The distribution of CO<sub>2</sub> on Europa indicates an internal source of carbon[J]. *Science*, 2023, 381: 1308-1311.
- [22] Villanueva G L, Hammel H B, Milam S N, et al. Endogenous CO<sub>2</sub> ice mixture on the surface of Europa and no detection of plume activity[J]. *Science*, 2023, 381: 1305-1308.
- [23] Yokoyama T, Nagashima K, Nakai I, et al. Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites[J]. *Science*, 2023, 379: eabn7850.
- [24] Naraoka H, Takano Y, Dworkin J P, et al. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu[J]. *Science*, 2023, 379: eabn9033.
- [25] Yabuta H, Cody G D, Engrand C, et al. Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) Ryugu[J]. *Science*, 2023, 379: eabn9057.
- [26] Oba Y, Koga T, Takano Y, et al. Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1292.
- [27] Daly R T, Ernst C M, Barnouin O S, et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence[J]. *Nature*, 2023, 616: 443-447.

- [28] Thomas C A, Naidu S P, Scheirich P, et al. Orbital period change of Dimorphos due to the DART kinetic impact [J]. *Nature*, 2023, 616: 448–451.
- [29] Li J Y, Hirabayashi M, Farnham T L, et al. Ejecta from the DART-produced active asteroid Dimorphos[J]. *Nature*, 2023, 616: 452–456.
- [30] Cheng A F, Agrusa H F, Barbee B W, et al. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos[J]. *Nature*, 2023, 616: 457–460.
- [31] Graykowski A, Lambert R A, Marchis F, et al. Light curves and colours of the ejecta from Dimorphos after the DART impact[J]. *Nature*, 2023, 616: 461–464.
- [32] Exoplanet exploration: Planets beyond our Solar System [EB/OL]. [2023–11–12]. <https://exoplanets.nasa.gov>.
- [33] Peterson M S, Benneke B, Collins K, et al. A temperate Earth-sized planet with tidal heating transiting an M6 star[J]. *Nature*, 2023, 617: 701–705.
- [34] Luque R, Osborn H P, Leleu A, et al. A resonant sextuplet of sub-Neptunes transiting the bright star HD 110067[J]. *Nature*, 2023, 623: 932–937.
- [35] Standing M R, Sairam L, Martin D V, et al. Radial-velocity discovery of a second planet in the TOI-1338/BE-BOP-1 circumbinary system[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 702–714.
- [36] Currie T, Brandt G M, Brand T D, et al. Direct imaging and astrometric detection of a gas giant planet orbiting an accelerating star[J]. *Science*, 2023, 380: 198–203.
- [37] Hon M, Huber D, Rui N Z, et al. A close-in giant planet escapes engulfment by its star[J]. *Nature*, 2023, 618: 917–920.
- [38] De K, MacLeod M, Karambelkar V, et al. An infrared transient from a star engulfing a planet[J]. *Nature*, 2023, 617: 55–60.
- [39] Kenworthy M, Lock S, Kennedy G, et al. A planetary collision afterglow and transit of the resultant debris cloud [J]. *Nature*, 2023, 622: 251–254.
- [40] Seidel J V, Nielsen L D, Sarkar S. JWST opens a window on exoplanet skies[J]. *Nature*, 2023, 614(7949): 632–633.
- [41] Rustamkulov Z, Sing D K, Mukherjee S, et al. Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM[J]. *Nature*, 2023, 614: 659–663.
- [42] Alderson L, Wakeford H R, Alam M K, et al. Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec G395H[J]. *Nature*, 2023, 614: 664–669.
- [43] Feinstein A D, Radica M, Welbanks L, et al. Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRISS[J]. *Nature*, 2023, 614: 670–675.
- [44] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere[J]. *Nature*, 2023, 614: 649–652.
- [45] Ahler E M, Stevenson K B, Mansfield M, et al. Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRCам[J]. *Nature*, 2023, 614: 653–658.
- [46] Zack Savitsky. Lifting the veil[J]. *Science*, 2023, 379(6628): 130–133
- [47] Greene T P, Bell T J, Ducrot E, et al. Thermal emission from the Earth-sized exoplanet TRAPPIST-1 b using JWST[J]. *Nature*, 2023, 618: 39–42.
- [48] Zieba S, Kreidberg L, Ducrot E, et al. No thick carbon dioxide atmosphere on the rocky exoplanet TRAPPIST-1c [J]. *Nature*, 2023, 620: 746–749.
- [49] Coulombe L P, Benneke B, Challener R, et al. A broadband thermal emission spectrum of the ultra-hot Jupiter WASP-18b[J]. *Nature*, 2023, 620: 292–298.
- [50] Berné O, Martin-Drumel M A, Schroetter I, et al. Formation of the methyl cation by photochemistry in a protoplanetary disk[J]. *Nature*, 2023, 621: 56–59.
- [51] Giuseppe Mandorlo. VIGIL: ESA space weather mission to L5[EB/OL]. [2023–12–01]. [https://lws.larc.nasa.gov/vfmo/pdf\\_files/04b\\_VFMO\\_PPC\\_Mandorlo\\_and\\_Bramanti\\_Vigil\\_Overview.pdf](https://lws.larc.nasa.gov/vfmo/pdf_files/04b_VFMO_PPC_Mandorlo_and_Bramanti_Vigil_Overview.pdf).
- [52] AWE launching to space station to study atmospheric waves via airglow[EB/OL]. [2023–11–23]. <https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/awe-launching-to-space-station-to-study-atmospheric-waves-via-air-glow>.
- [53] Raouafi N E, Stenborg G, Seaton D B, et al. Magnetic reconnection as the driver of the Solar wind[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, 945: 28.
- [54] Piersanti M, Ubertini P, Battiston R, et al. Evidence of an upper ionospheric electric field perturbation correlated with a gamma ray burst[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7013.

- [55] 中国国家太空实验室正式运行 建立起近地空间科学与应用体系[EB/OL]. [2023-11-25]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content\\_6899018.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content_6899018.htm).
- [56] 中国空间站应用取得阶段性成果 部分项目为载人登月“蓄力”[EB/OL]. [2024-01-04]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content\\_6899020.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content_6899020.htm).
- [57] Wakayama S, Kikuchi Y, Soejima M, et al. Effect of microgravity on mammalian embryo development evaluated at the International Space Station[J]. *iScience*, 2023, 26(11): 108177.
- [58] Three experiments heading to space station aim to support deep-space missions[EB/OL]. [2023-12-05]. <https://science.nasa.gov/science-research/biological-physical-sciences/three-experiments-heading-to-space-station-aim-to-support-deep-space-missions>.
- [59] 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.

## Review of 2023 global space science advances

BAI Qingjiang, SHI Peng, SONG Tingting, WANG Qin, FAN Quanlin, WANG Chi\*

National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** Space science and explorations provide the first-hand data for possible science breakthroughs and continue to push forward the frontiers of knowledge. The paper analyzes the global top discoveries which are grouped in 10 categories, based on the publications mainly in *Nature* and *Science* as well as major achievements by Chinese missions and experiments in 2023. These discoveries cover hot spots in the origin and evolution of the early universe, the lunar and planetary explorations, the search for exoplanets and characterization, heliophysics and manned spaceflight. The coming missions in 2024 are also prospected.

**Keywords** space science; scientific satellite; solar system probe; 2023 hot spots ●



(责任编辑 王丽娜)