

2021年空间科学与深空探测热点回眸

时蓬,白青江,王琴,李明,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 2021年全球空间科学探索与发现热点竞相涌现。聚焦非载人航天,按空间天文、日球层物理、行星科学、空间地球科学等学科领域,梳理了各国空间科学任务的年度重要代表性成果,并对多个空间天文、日球层和行星(含月球)深空探测任务的工程成就和科学回报进行了归纳,包括但不限于人类航天器首次进入太阳大气层、太空台风可能影响地球空间天气、20亿年前玄武岩样品完善月球演化历史、火星地震探测揭秘其内部结构、星际空间发现等离子体波发射、深空望远镜再绘银河系结构图等。面向未来,欧洲空间科学“远航2050”规划、美国科学院2020年代天文学10年调查等给出的战略研判令人关注。尤为重要的是中国空间科学持续走近世界舞台中央,“悟空”科学数据正式公开,“慧眼号”“嫦娥五号”等科学任务助力空间科学家再度产出一批世界级原创成果。

关键词 空间科学;科学卫星;深空探测器;2021年研究热点;科学发现

空间科学以航天器为主要手段,旨在获取关于太阳系、星际空间乃至整个宇宙起源演化的科学数据,揭示其中蕴含的天文、地学、生命、物理、化学现象及其规律,占据当代基础研究前沿。回眸2021年,全球空间科学任务主要包括专用空间科学卫星或搭载其他航天器平台的科学载荷,是人类探索浩瀚太空的主力军和“尖刀连”。本文考虑了高校教学立方星(如“天格计划”^[1]),以及应用卫星(如“风云三号”E星太阳X射线极紫外成像仪与太阳辐照度光谱仪)和商业航天对空间科学研究数据源的可

能贡献。特别需要指出的是,发射科学卫星不是目的,基于科学探测数据揭示宇宙奥秘才是初心。

鉴于载人航天体系庞大,本文聚焦非载人航天。截至2021年12月底,世界全年在轨遂行科学探测的空间科学任务108个,其中大型科学任务18个,立方星任务9个,中国也有11个科学任务在轨(图1)。遵循国际惯例,本文叙述将按空间天文、日球层物理、行星科学、空间地球科学等领域划分展开,并充分考虑深空探测对空间科学诸领域突破的支撑和贡献。深空探测与空间科学的定义不在

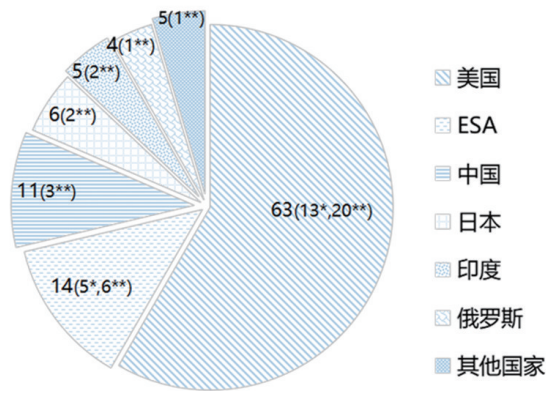
收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-01-07

基金项目:中国科学院空间科学(二期)先导专项(Y7291A1AGS);中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项(Y82131A28S);中国工程院“航天强国发展若干重大问题研究(二期):空间科学”项目(E1J01A0201)

作者简介:时蓬,副研究员,研究方向为空间科学任务规划、空间科学战略,电子邮箱:shipeng@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和政策、空间天气学,电子邮箱:fan@nssc.ac.cn

引用格式: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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2022.01.004



*前的数字表示美欧大型任务数量,**前的数字表示深空任务数量
图1 2021年各国空间科学任务在轨情况

同一个维度上^[2],前者更隐含强调空间技术实现的挑战性,正如国际电信联盟(ITU)、国际空间数据

系统咨询委员会(CCSDS)等均将距离地球 2.0×10^6 km以远的航天活动定义为B类任务,即深空任务。实际上,除了熟知的“嫦娥”任务、“天问一号”等行星科学任务,国际上也有已抵近太阳或飞向恒星际空间的多种其他科学卫星,它们统称深空探测器。

2021年全球累计新发射9个空间科学任务,其中包括2个大型任务以及3个立方星任务(表1)。需要说明的是,美国“飞镖”双小行星重定向测试卫星(DART)将开展人类首个主动行星防御任务技术试验,未搭载科学载荷;2021年6月11日发射的“仰望一号”卫星是中国首个商业天基光学天文望远镜项目,旨在为太空资源开发积累数据。类似任务均未列入表中。

表1 2021年全球新增空间科学任务

名称	主要科学目标	发射日期	来源	领域
“可爱号”科罗拉多紫外凌星实验立方星(CUTE, 6U)	采用凌星法,通过近紫外(NUV)透射光谱表征系外热木星大气,并有望给出系外行星磁场首个证据	9.27 (搭载)	美国NASA天体物理研究和计划(APRA 14)	空间天文
X射线偏振测量卫星(IXPE)	观测活动星系核、微类星体、脉冲星和脉冲星风云、磁星、吸积X射线双星、超新星遗迹和超大质量黑洞等的X射线偏振,探索宇宙起源演化	9.12	NASA探索者计划小型任务(SMEX 14)	
詹姆斯·韦布空间望远镜(JWST)	通过近红外(0.6~5 μm)和中红外(5~28.5 μm)拍照和光谱测量,揭示早期宇宙、第一代恒星和星系、系外行星和太阳系起源	12.25	NASA大型(旗舰级)任务	
“羲和号”太阳Hα光谱探测与双超平台科学技术试验卫星(CHASE)	全日面Hα波段光谱成像观测和多普勒速度测量,研究太阳爆发及低层大气动力学	10.14	中国国家国防科技工业局	日球层物理
“丘比特”极尖区等离子体探测立方星(CuPID, 6U)	对太阳风和地球磁层相互作用的极尖区软X射线成像	9.27 (搭载)	NASA日球层物理学技术与仪器研发计划(H-TIDS)	行星科学
“露西号”小行星探测器(Lucy)	探测主带小行星、木星特洛伊小行星,揭示行星形成和太阳系演变	10.16	NASA发现计划(Discovery 14)	
陆地卫星9(Landsat 9)	获取可见光、近红外和短波红外3种波段地表图像,测量2个热红外波段地表辐射,扩展人类衡量全球地表变化能力	9.27	美国大型任务(NASA与USGS)	空间地球科学
可持续发展科学卫星1号(SDGSAT 1)	实现“人类活动痕迹”精细刻画	11.5	中国科学院	
降水结构和风暴强度时间分辨观测立方星座探路者(TROPICS-01, 3U)	实现热带地区30 min刷新的微波监测,获取整个风暴系统生命周期内中尺度和天气尺度的对流层热力学和降水结构	6.30 (搭载)	NASA地球创投计划(EV)	

得益于在轨科学卫星的精细探测以及退役任务海量数据宝贵遗产,2021年中外科学家在空间科学各领域的研究工作突飞猛进,关于银河系结构、火星地质、木星极光、太阳活动机制等的科学成果引发公众关注。空间科学是关乎人类文明的持久事业,本文也介绍了航天强国对未来发展的规划布局,并展望了2022年的发射任务。

1 空间天文观测揭示宇宙演化新细节

天文是历史悠久的传统学科,长期倚重各类地基望远镜,以可见光和射电波段为主观测天体、研究宇宙。随着人类社会1950年代进入太空时代,各类空间望远镜、探测器成就了人们全电磁波段观测的梦想,打开了X射线、紫外等观测窗口,获得了海量的天体光谱数据,空间天文学应运而生,且取得了多个重大科学突破,而未来利用月球开展天文观测也有望成为可能。实际上,仅在过去10年中,就有6项基于空间-地面天文观测的发现(暗能量、引力波、中微子振荡、系外行星的发现、宇宙学、超大质量黑洞)获得了诺贝尔奖。

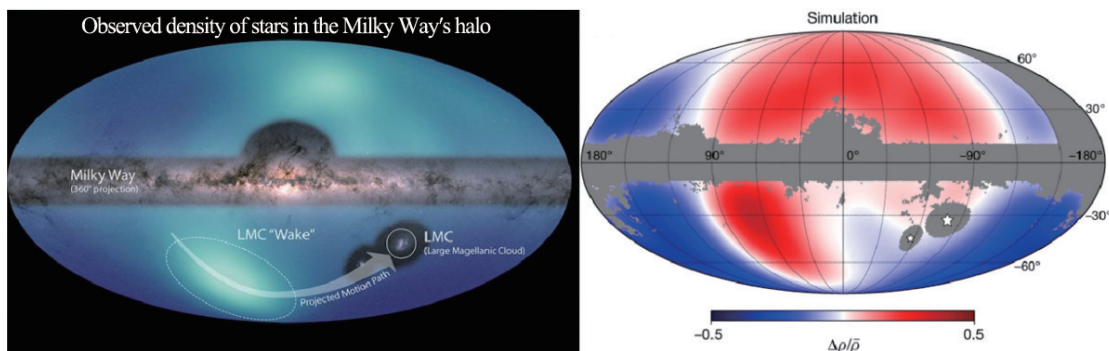
2021年有22个空间天文任务在轨运行,既有哈勃(HST)、钱德拉(CXO)、牛顿(XMM-Newton)和盖亚(GAIA)等5个美欧大型(L)空间天文台,也有2021年新发射的“可爱号”立方星,以及“中国悟空”“慧眼号”和“怀柔一号”3个任务。日地连线L2点是开展深空天文观测的极佳位置,2021年盖亚、俄德联合光谱-伦琴-伽玛(Spektr-RG)两个空间天

文台在此观测。至2021年6月16日,Spektr-RG已完成第3次全天空巡天。历经25年研发,克服了多项巨大的技术挑战,迄今史上最大、最昂贵的红外空间望远镜韦布空间望远镜(JWST)终于在2021年12月25日发射升空,飞往日地L2点。它搭载了近红外相机(NIRCam)、近红外光谱仪(NIRSpec)、精细导星传感器/近红外成像仪和无缝光谱仪(FGS/NIRISS)以及中红外设备(MIRI,相机&光谱仪)等4台套科学有效载荷。如果一切顺利,它将于2022年6月开启观测。

1.1 深空望远镜再绘银河系结构图

如果说太阳系是人类熟悉的天文后院,那人类对自己所处的宇宙大社区银河系的了解却差强人意,“只缘身在此山中”,人类无法跳出银河系回眸银河系全景。令人欣喜的是,基于盖亚卫星的高精度恒星测量,以及斯皮策空间望远镜(SST)、广域红外巡天卫星(WISE)、开普勒空间望远镜(KST)等退役任务的数据,2021年科学家又拂去了笼在银河系上的一层薄纱。

科学家根据2009—2018年GAIA DR3和WISE数据绘制了银河系外围最新全天图,它不仅显示了大麦哲伦星云(LMC)矮星系像一艘船一样在银晕中穿行,并留下了距离银河系中心约20万~32.5万光年的“尾迹”,提供了关于其形状、大小和位置的详细信息(图2),可作为研究银河系及其周边结构的“探针”,未来还有望为暗物质理论提供新的证据^[3]。这也是人类第一次直接观测到星系动力学摩擦产生的高密度尾流。



(a) 观测图

(b) 模拟图

图2 大麦哲伦星云穿行银河系引起了恒星高密度尾流

作为棒旋星系的银河系有多条旋臂。利用斯皮策的“窥视”计划(GLIMPS, 银河系遗迹红外中银道面巡天)数据, 研究人员首次在银河系的人马臂(Sagittarius Arm)中发现一个“断裂”结构: 一批年轻的恒星和正在形成的气体云从银河系人马臂中伸出来, 绵延约3000光年(图3)。这是人类发现的首个方向与旋臂存在巨大差异的主要结构。研究人员还利用GAIA的DR3数据, 确定了恒星距离地球的精确距离, 获得了该结构极复杂的三维视图, 让人们对于银河系有了新认识, 也为理解银河系的大尺度结构提供了新的线索^[4]。

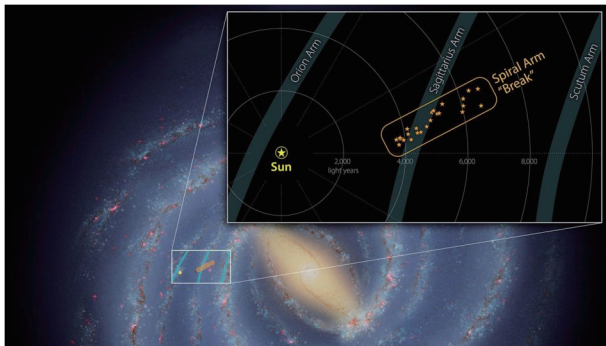


图3 银河系的人马臂(Sagittarius Arm)中发现一个断裂结构(图片来源: NASA/JPL-Caltech)

在银河系漫长的演化中, 它不断与矮星系发生激烈碰撞、吸积并合, 形成了现在丰富多彩的结构。100亿年前发生的盖亚-恩克拉多斯(Gaia-Enceladus/Sausage, GES)并合被认为是银河系远古历史上最重要的事件之一。研究人员基于开普勒的光变曲线数据、GAIA DR2和斯隆数字巡天三期(SDSS III)的DR 14数据, 通过星震学与光谱学相结合确定恒星年龄, 后者实际上是利用阿帕契天文台银河系演化实验(APOGEE)光谱分析恒星化学间接确定恒星年龄, 为破解银河系早期形成之谜提供了迄今最好的证据。研究发现, 当银河系与GES矮星系合并时, 银河系“自产”的恒星最终出现在银盘上, 从GES捕获的恒星则多分布在银晕上; GES成员星与银河系成员星有着相似或稍年轻的年龄, 但化学成分不同^[5]。中国科学家依托郭守敬望远镜(大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜, LAMOST)光谱数据和GAIA DR2数据, 也对GES的化学演化进行了研究。他们借助化学丰度进行

DNA鉴定, 发现GES并合事件不仅带来与银河系化学成分不同的GES成员星, 还带来了富金属的气体, 并触发了新恒星形成, 给银河系带来无限生机, 揭示了在4 kpc(1 kpc \approx 3261光年)处银河系的晕与盘呈现明显分界的物理机制^[6]。

1.2 极端宇宙超乎想象

中国学者将与暗物质、粒子加速、超大质量黑洞、强引力场、强磁场和极高密度相关的6个重要科学问题归纳为极端宇宙——极端起源、极端能量、极端天体、极端引力、极端磁场和极端密度^[7]。既得益于2021年在轨的雨燕(Swift)、核光谱望远镜阵列卫星(NuSTAR, SMEX 11, 核光谱卫星)、“慧眼号”等卫星的科学探测, 也有对已退役的康普顿伽马射线空间天文台(CGRO)数据的挖掘, 人们对黑洞的科学认知又向前迈进。

潮汐破坏事件是极为罕见的现象。研究人员利用雨燕和牛顿卫星的多波段数据以及南极冰立方中微子天文台(IceCube)观测, 首次证实了黑洞撕裂恒星事件AT2019dsg(即潮汐破坏事件)中发射的高能中微子。天体物理学家长期以来认为潮汐破坏事件可能会产生高能中微子, 此次发现则首次将理论与观测证据联系起来, 虽然AT2019dsg事件并没有按照理论预期的时间和方式产生中微子^[8], 但该项工作却确凿证明了多信使(空间)天文学的潜力。

2021年人类可能在X射线波段发现了迄今最遥远的发出最长喷流的超大质量黑洞。该成果是基于钱德拉对喷流的源头, 即一颗名为PSO J352.4034-15.3373(简称PJ352-15)的类星体——一个快速增长的超大质量黑洞, 进行了整3天观测后取得的。科学家在距PJ352-15约16万光年的地方探测到了喷流发射的X射线(图4)。PJ352-15位于距离地球约127亿光年的一个年轻星系的中心, 从PJ352-15的喷流中探测到的X射线是在宇宙大爆炸后9.8亿年时发射的, 这相当于不到它现在年龄的1/10。该发现打破了数个天文观测记录并有助于解释宇宙早期最大黑洞如何生长得如此之快^[9]: 一是将大爆炸后首个10亿年内形成天体中能观测到的最长喷流记录从约5000光年的长度改

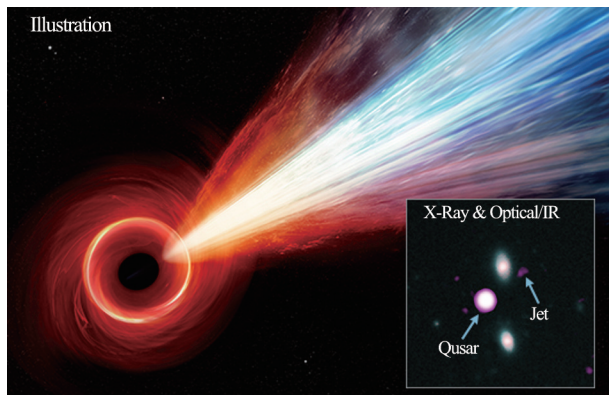


图4 类星体 PJ352-15(特写图中的白紫色圆斑)及其喷流渲染图

写为 16 万光年,甚至超过了银河系约 10 万光年的跨度;二是 PJ352-15 的位置比之前“最遥远的 X 射线喷流”记录还要更远 3 亿光年。

中国学者发现黑洞热吸积流风存在的直接观测证据。他们利用钱德拉和核光谱卫星的数据对大熊座方向旋涡星系 M81(NGC 3031)中心存在热吸积流的超大质量黑洞 M81*进行了研究。黑洞吸积流分“冷”“热”两种,宇宙中大部分黑洞周围是热吸积流,热吸积流中是否存在风曾是该领域争论的焦点问题。科研人员通过钱德拉的高分辨率光谱,发现了铁元素存在红移及蓝移的莱曼-阿尔法(Lyman- α)发射线,相关磁流体动力学(MHD)数值模拟结果与观测高度吻合,证明 M81*中的确存在很强的风。这是人们首次发现热吸积流风存在的直接观测证据,并验证了热吸积流理论预言,有助于深入理解黑洞吸积过程、黑洞与星系的共同演化之谜^[10]。

2021 年,研究人员还首次看见了黑洞背后的光——他们利用牛顿卫星和核光谱卫星观测 8 亿光年外星系中心超大质量黑洞的 X 射线时,发现了一系列明亮的 X 射线耀斑,以及众多比耀斑亮度更小、发出时间更晚,且具有不同颜色的“光回波”(echo)。正是因为黑洞扭曲时空形成了引力透镜,才使科学家第一次看到了从黑洞背面反射出来的“光回波”(图 5),这将有助于理解黑洞的冕,并探索其是如何产生上述 X 射线耀斑的^[11]。

科研人员深入挖掘康普顿突发和瞬变源实验(BATSE)数据库,在数千个 γ 射线暴中寻找“引力

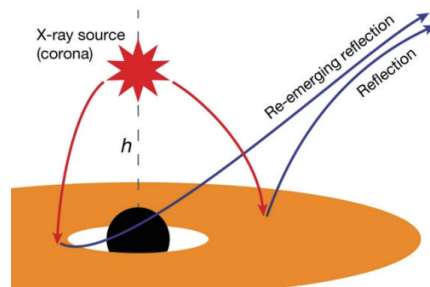


图5 黑洞背后 X 射线反射模型示意

透镜”的迹象,最终利用宇宙早期的一次爆发所产生的光畸变揭示了一个中等质量黑洞(IMBH)的存在。一直以来,能证明中等质量黑洞存在的观测证据极其罕见,而且也并非决定性证据;而测量有多少中等质量黑洞存在,将为理解黑洞的形成及其如何随时间生长提供重要线索^[12]。

2021 年“慧眼号”卫星科学成果不断。银河系快速射电暴(FRB)曾入选 2020 年度《Nature》的十大科学发现、《Science》的十大科学突破。中国科学家根据“慧眼号”对银河系内活跃磁星 SGR J1935+2154 的观测,发现了首个与快速射电暴 FRB 200428 成协的 X 射线暴,在国际上首先证认该 X 射线暴包含的 2 个 X 射线脉冲是快速射电暴的高能对应体。“慧眼号”协同国际伽马射线空间天文台(INTEGRAL)、太阳风卫星(Wind)搭载的 Gama 射线暴探测仪(Konus)、“敏捷号”(AGILE)伽玛射线小卫星,为理解快速射电暴的辐射机制和磁星的爆发机制提供了关键数据,证认了 FRB 200428 来自该磁星,证明快速射电暴可源于磁星爆发,成为理解快速射电暴物理本质的重要里程碑^[13]。

科学家发表了用“慧眼号”看黑洞双星并首次观测到黑洞冕的高速运动变化的成果。他们用“慧眼号”对距地球大约 11300 光年的黑洞 X 射线双星 MAXI J1820+070 在 2018 年 3 月的爆发进行了观测,发现了黑洞双星中逃离黑洞强引力场向外高速运动的相对论喷流(冕),并且首次在黑洞双星中观测到冕的速度演化,这对于理解黑洞吸积过程和相对论效应意义重大^[14]。而根据“慧眼号”卫星于 2019 年对黑洞 X 射线双星 MAXI J1348-630 记录的 1~5 月的 X 射线爆发活动,结合“雨燕”卫星的紫外准同时观测,科学家首次清晰观测到了黑洞双星爆

发过程的全景,揭示了黑洞双星爆发标准图像的产生机制^[15]。

1.3 系外行星观测热度持续

对系外行星的探索改变了人类对我们在宇宙中所处位置的认知,并因2019年度诺贝尔物理学奖颁给1995年发现首个环绕类太阳恒星系外行星的2名瑞士科学家而再度受到各界关注。截至2021年12月23日,主要依靠空间科学卫星与地面望远镜协同,人类已经发现了4884颗系外行星(图6)、3659个行星系统,并有8288颗系外行星候选者待确认。它们当中有冰巨星(neptune-like)、类木行星(gas giant)、超级地球(super earth)、类地行星(terrestrial),也有很多与人类熟知的太阳系行星非常不同,众多的困惑亟待科学回答。

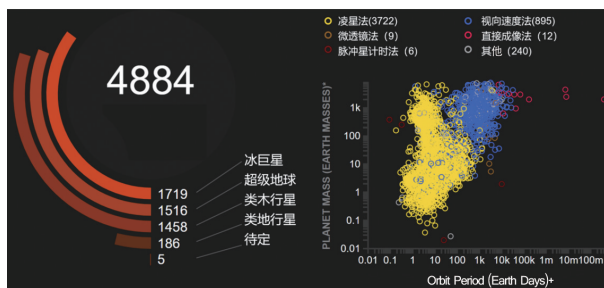


图6 已证认系外行星类型及各种探测方法一览(截至2021年12月23日)

2021年3个系外行星专用科学卫星在轨: NASA探索者计划中型任务(MIDEX 7)“苔丝”凌星系外行星巡天卫星(TESS)、ESA小型任务“基奥普斯”系外行星表征卫星(CHEOPS),以及2021年升空的美国“可爱号”立方星。当然,哈勃等空间天文台也能兼做系外行星观测。与此同时,对于退役任务的数据挖掘和深入研究也很超值,科研人员借助新的ExoMiner神经网络机器学习系统,从开普勒及其后续K2任务档案数据中又确认发现了301颗系外行星,虽然它们均非类地行星或未处于其母恒星的宜居带,但仍是自古以来成批发现系外行星数量最多的一次。

CHEOPS发布了第1项科学成果。研究人员根据CHEOPS观测首次确认在一个恒星系中包含1颗公转周期超过100 d、可观测到凌星现象的行星。母恒星 ν^2 Lupi(HD 136352, G4V)与太阳(G2V)相

似,位于南天豺狼座(Lupus),距地球45.7光年,肉眼可见。欧洲南方天文台(ESO)“高精度视向速度行星搜索器”(HARPS)2019年发现了这个包含3颗行星的恒星系统(ν^2 Lupi b, c, d);随后TESS观测到了3颗行星中靠里面的2颗行星b、c的凌星事件。此次CHEOPS则意外发现了行星d凌星事件(图7)——长周期系外行星轨道距离母恒星很远,在凌星时发现行星的可能性非常小。 ν^2 Lupi d的公转周期为107.2 d,它若处于太阳系的话会在水星和金星之间运行,是研究一颗大气温度适中的系外行星的有利目标。虽然综合CHEOPS的新数据和其他天文台的存档数据揭示这3颗系外行星皆不宜居(b主要是岩石,c和d所含的水可能是高压的冰或高温蒸汽),但其多样性为系外行星的形成和演化提供了新启示^[16]。

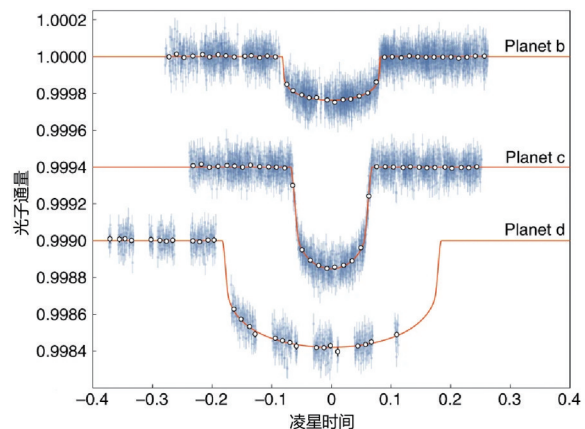


图7 CHEOPS对 ν^2 Lupi行星系统的凌星观测光变曲线

基于“苔丝”数据,研究人员发现一个由4颗行星和2颗年轻恒星组成的系统,提供了行星演化的新线索。这2颗恒星TOI 2076和TOI 1807均为K型,不到太阳年龄的5%,分别位于牧夫座和猎犬座,相距约30光年,距太阳系超过130光年。它们不是双星,但“盖亚”卫星数据表明它们拥有共同的运动是相关的。其中TOI 2076拥有3颗“迷你海王星”型行星,其中最内侧、体积最小的TOI 2076 b大小约是地球3倍,公转周期10 d;TOI 1807仅拥有一颗已知行星TOI 1807 b,大小约为地球2倍,公转周期仅13 h。理论模型表明,在离恒星如此近的

地方形成行星非常困难,它们可能在更远的位置形成,随后逐渐向内迁移。“苔丝”的发现将有助于了解该类型行星的生命周期,获得更多鲜见的行星演化“青少年”阶段的知识^[17]。

凌星法通过宿主恒星非常微弱的光度变化(主要是可见光波段)搜寻系外行星,但这种情况显然不适于探测遥远河外星系中的行星。近期人们利用X射线凌星搜寻,可能发现了首颗河外星系的系外行星,为在更远距离搜索系外行星打开了一个新窗口^[18]。科研人员利用钱德拉和牛顿卫星的存档数据,在银河系外的梅西耶51、101和104(M51/Whirlpool、M101/Pinwheel和M104/Sombrero)3个漩涡星系中开展了X射线凌星搜寻。2012年9月20

日钱德拉观测显示,在距离地球约2300万光年的大熊座M51-ULS-1双星系统中发生了长达3h的X射线凌星的迹象。他们仔细排除了气体和尘埃云团、(白)矮星、施主星(Donor star)等诸多可能性并结合计算机模拟,提出存在一颗行星,是它的凌星导致了双星系统的X射线亮度变化(图8)。候选行星M51-ULS-1b比土星略小,但其围绕双星系统中心运行的距离是土星到太阳距离的2倍。虽然该研究还需更多数据辅助确认——M51-ULS-1b的10 AU(AU为天文单位,1 AU=1.496×10⁸ km)轨道意味着它公转周期很长,在约70年里不会再凌星,但科学家坚信有了第一次,那么下一次类似发现将只是时间问题。

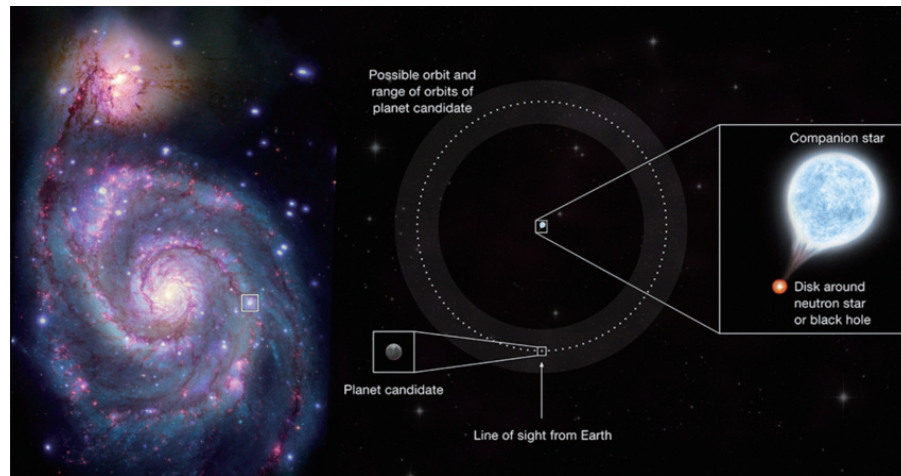


图8 候选银河系外行星M51-ULS-1b在M51(钱德拉X射线与哈勃可见光合成图)的位置(最左侧白框)及其可能的轨道范围(右侧)

1.4 超新星研究破解天文和历史谜团

超新星是中国历史中记录的客星之一(还有新星、彗星等)。超新星主要包括热核坍缩和铁核坍缩两类,介于两者之间的是电子捕获型超新星,但对后者主要是理论研究。科研人员使用拉斯·昆布雷斯特天文台(LCO)的全球望远镜网络等,以及哈勃、斯皮策等空间望远镜,对NGC2146星系中距地球仅3100万光年的超新星SN 2018zd开展了研究,首次发现确凿证据证明其即为新型的电子捕获超新星,证实了40年前提出的电子捕获超新星理论,即由其前身大质量超渐近巨分支(SAGB)恒星的爆炸产生^[19]。更有意思的是,该研究也为天关客星

SN1054爆发的千年之谜提供了新解释。北宋至和元年五月己丑,亦即公元1054年7月4日,银河系诞生了一颗距地球6500光年的超新星SN 1054,其爆炸遗骸形成的蟹状星云更为今人熟悉。新发现启发研究人员:超新星SN 1054可能是一颗电子捕获超新星。

而中国香港大学领衔的国际天文学家团队也破解了中国和日本天文学家记录的公元1181年一颗中国客星(SN1181)的起源,它的爆炸遗骸形成了一个名为Pa30的微弱而快速膨胀的星云。围绕着银河系中最炽热恒星之一帕克星(Parker's star, IRAS 00500+6713)的Pa30符合历史上中国客星的

特征、位置和年龄(图9)。Pa30的光谱数据表明它以超过 1100 km/s 的极端速度膨胀,是迄今为止观测到的唯一能够对剩余恒星和星云进行详细研究

的 Ia_x 超新星(一种微型超新星)。据此推算出该星云大约 1000 岁的年龄,这正好与 1181 年 8 月 6 日新生的亮度堪比土星的中国客星相吻合^[20]。

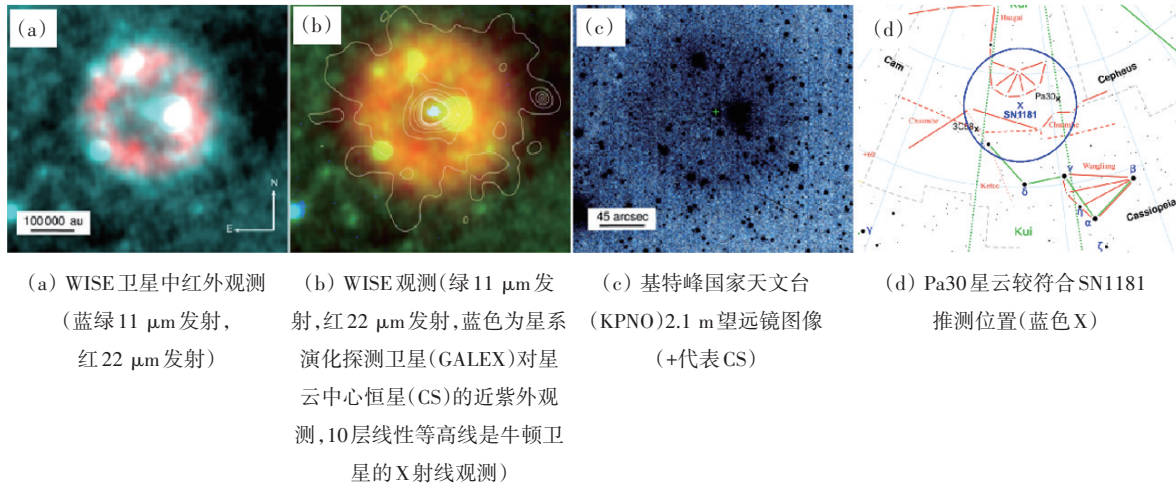


图9 Pa30星云的卫星观测伪彩色图像和天象图位置示意

2 日球层物理揭示太阳活动及其影响

日球层(Heliopause)是太阳和太阳风影响的区域,太阳风和恒星际介质相互作用的边界形成日球层顶。目前,美国的旅行者1号和2号(Voyager 1&2)已分别在2012年8月和2018年11月先后从121 AU和120 AU处飞越日球层顶,进入恒星际空间。空间物理的研究对象已从地球空间、日地空间、行星际空间拓展至整个日球层及以远,这也是美国倡导空间科学界使用日球层物理学概念的内在原因。日球层与人类生存和现代社会发展息息相关,2021年在轨的科学任务也最多,31个任务中有美欧8个探测器在深空轨道运行,包括2个抵近太阳探测任务(PSP、Solar Orbiter)、3个定点日地连线L1点(Wind、ACE和SOHO)。其余在地球空间遂行探测的23个任务中,包括了中国的“张衡一号”和2021年发射的“羲和号”试验卫星。这一年中,“帕克号”(PSP)和旅行者背向疾驰,前者直逼日球层的中心,奔向太阳风的起点,后者挣脱了太阳风主导的空间,不断远离日球层。它们的新发现毫无疑问成为2021年的科学热点。

2.1 “帕克号”掠过日冕首次“触摸”太阳

科学数据分析很耗时。科研人员历时半年之

久才宣布,“帕克号”发射3年后第8次(E8)抵近太阳飞掠时,于2021年4月28日世界时09:33(UT)首次到达太阳大气的最外层——日冕,并在那里停留了5 h,期间它从19.7 R_{\odot} (太阳半径 $R_{\odot} \approx 6.95 \times 10^5$ km)深入到18.4 R_{\odot} ,跨越7°太阳经度(图10),成为第1个“接触太阳”的航天器。这是人类太空探索的里程碑事件。20世纪,阿波罗任务为人类提供了月球形成的绝大部分知识,预期帕克号必将发现关乎太阳及其对太阳系影响的关键信息,而对这颗最近恒星的认知也会让人类更多地了解宇宙中的其他恒星。

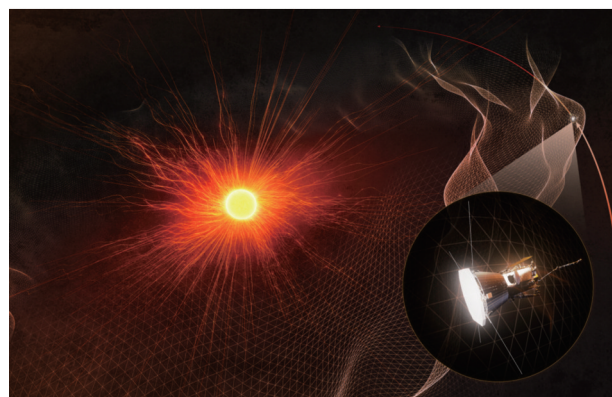


图10 “帕克号”进入太阳大气层示意 (波浪状的红色网格表示日冕)

与地球的固体表面不同,太阳表面是高温等离子体组成的大气层。阿尔文临界面被认为标志着太阳大气的终结和太阳风的开始,也是区分太阳大气($M_A < 1$)和太阳风($M_A > 1$)的边界,是1970年诺贝尔物理学奖获得者瑞典科学家阿尔文(Hannes Alfvén)1942年发表的理论预言^[21]。

在E8飞掠过程中,“帕克号”搭载的太阳风电子、阿尔法粒子与质子探测包(SWEAP),电磁场探测包(FIELDS)对太阳的等离子体和磁场开展了就位探测,持续2.5 d,3次越过阿尔文临界面,其首次越过阿尔文临界面进入太阳大气层、接触到日冕时,距太阳表面最近约 $18.8 R_{\odot}$, $M_{Amin}=0.79$;2021年4月29日08:48 UT第2次时近日点深至 $15.9 R_{\odot}$ 。

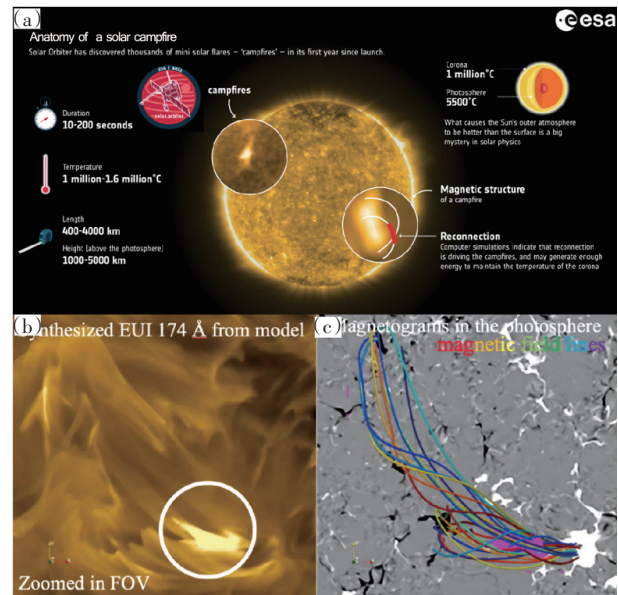
科研人员发现,阿尔文临界面的边界并非包围太阳的光滑球形,相反,它有尖峰和低谷。探测结果表明,尖峰位置与源自太阳表面的活动相一致,对于进一步了解太阳活动如何影响太阳大气层与太阳风很有启发^[22]。随着2020年1月第25太阳活动周新启(峰年可能在2025年7月前后),太阳逐渐活跃,日冕的外缘将扩大,使“帕克号”太阳探测器有更大的机会在日冕内停留更长的时间,将带来更多科学发现。

2.2 中外学者提出日冕加热“篝火”理论模型

日冕加热问题是日球层物理领域长期未能攻克的难题之一,曾与暗物质暗能量等一起被*Science*在2012年2月列为当代天文学八大未解之谜。ESA的太阳轨道器(Solar Orbiter, M1@宇宙憧憬任务)是另一个抵近太阳探测的科学卫星,2020年2月10日发射后已完成2次金星、1次地球引力辅助,目前还在巡航飞行中,尚未正式开始针对太阳的科学观测。不过,它搭载的极紫外成像仪(EUI)于2020年观测到了宁静日冕中存在大量小尺度瞬时增亮现象,这些亮点看起来就像“篝火”,遍布日冕。它们空间尺度约400~4000 km,持续时间仅10 s到几分钟,出现在太阳表面以上几千公里的地方。

为此,中德学者基于数值模拟,提出了日冕“篝火”首个理论模型,不仅揭示了“篝火”背后的物理过程,还表明“篝火”可能对高温日冕的形成有重要作用。研究显示,日冕中的小尺度瞬时增亮现象可

通过分量磁场重联过程产生,期间太阳磁场的能量被释放,加热了局部日冕大气,形成“篝火”。该过程释放的磁场能量与日冕加热所需能量相当,有助科学家进一步揭示“日冕加热”难题(图11)^[23]。研究人员推测,“篝火”可能就是1987年帕克纳耀斑模型(Parker's nanoflare model)预言的能量释放事件,但受限于当前科学数据的分辨率,观测到的“篝火”可能还只是那些尺度较大的少数事件,这也说明开展抵近太阳探测非常必要。



(a) Solar Orbiter 观测; (b) 科学家模拟(白圆); (c) 太阳表面磁场(粉红色对应(b)中白圆“篝火”)

图11 日冕“篝火”的观测和模拟

对日冕的多任务观测进展值得关注。2019—2020年,在为期11年的第24太阳活动周行将结束之际,月船2号(Chandrayaan-2)搭载的太阳X射线监测仪(XSM)对无太阳活动的宁静日冕进行了76天观测,发现并表征了98个“亚A级”X射线微耀斑(microflare),给出了宁静日冕中微耀斑的频率分布,讨论了它们对日冕加热的影响^[24]。

研究人员借助伊里斯号太阳过渡区成像光谱仪卫星(IRIS)和太阳动力学空间观测台(SDO),可能发现了寻觅已久的纳耀斑,并对其开展了首次全生命周期观测。IRIS发现太阳表面一些微小(约100 km)亮环温度比周围环境要高数百万度,其热量分布方式与其他大多数物理系统不同,计算机模

拟指出该现象的最可能机制是用于加热的能量必须来自磁场重联事件。进一步分析SDO搭载的大气成像监测包(AIA)数据,发现了只能在日冕中才有的极热等离子体。在亮环出现后约20 s,其上方的日冕就被加热到了数百万度的高温,充分证实亮环将能量转移到了日冕中(图12)。虽然目前尚不能确定是否应将该现象称为纳米耀斑,但这些微小的太阳爆发加热了太阳大气,是纳米耀斑加热日冕理论的一个令人信服的开始^[25]。

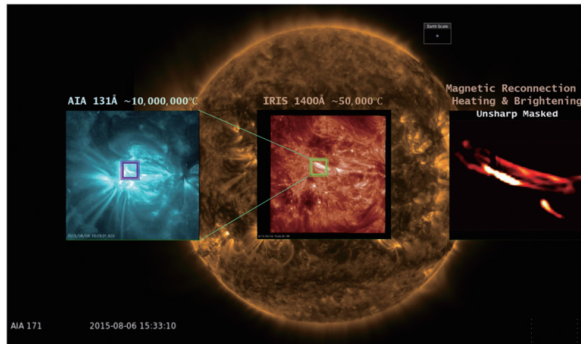


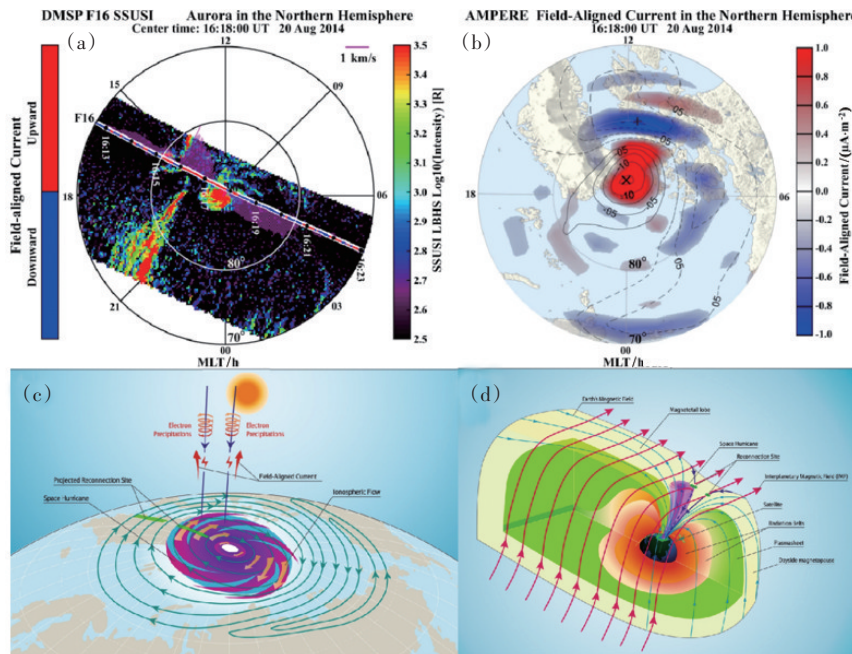
图12 多颗卫星观测太阳表面的亮环特写(最右画面为终极放大的推测存在的纳耀斑)

2.3 “太空台风”关乎地球空间天气

人们对日球层的最直接体验来自太阳爆发对

地球空间环境的影响,尤其是极端空间天气事件直接影响各类高技术系统和人类健康。台风为人们熟悉,空间天气是否存在类似现象?中国学者2021年首次在地球极区电离层磁层中发现了类似台风的现象,将其命名为“太空台风”,并揭示了其形成机制^[26]。

研究团队利用各类卫星和地面台站监测数据,结合高时空分辨率三维太阳风-磁层-电离层耦合磁流体力学模拟(PPMLR-MHD),证认了2014年8月20日地球北磁极点附近发生的一类与台风气旋状相似的、水平尺度超过1000 km、持续近8 h的极光亮斑结构就是科学家一直在寻找的地球高层大气“太空台风”(图13)。它具有与台风非常类似的特征:显著的亮斑状上行场向电流(FAC)、强等离子体对流涡旋剪切(中心速度接近0的“台风眼”)、先负后正的双极磁场结构(预示存在磁通管)、堪比超级磁暴的电子沉降能通量(强电子“雨”)等。该现象非同寻常,一是它发生在一次长时间的地磁极端平静条件下,二是它发生在地球极盖区的磁极点而非纬度较低的极光卵位置,三是它形成了太阳风-磁层-电离层物质能量交换的新通道。



(a) DMSPP卫星极光观测;(b) AMPERE的场向电流观测(从北极上空往下看,地磁与磁地方时坐标系投影);(c) “太空台风”在电离层中的示意;(d) “太空台风”在磁层中的示意

图13 “太空台风”观测及解读

这一成果更新了人们对太阳风-磁层-电离层耦合过程的认识,表明即使整体上全球地磁平静,极区仍可能存在剧烈地磁扰动和能量注入现象,它导致的局域极端空间环境能直接影响相关区域内的极区航线、无线电通信、导航与定位和卫星运行。该研究也凸显了高质量观测数据及其开放共享对科学突破的重要性。这些数据来自科学卫星——阿特弥斯探测器1号(ARTEMIS P1)的太阳风观测,来自业务卫星——美国国防气象卫星计划(DMSP)F16卫星搭载的紫外光谱成像仪(SSUSI)、离子/电子/闪烁探测器(SSIES)、磁强计(SSM),以及商业卫星——依托铱星星座(Iridium satellites)搭载的“主动磁层与行星电动力学响应实验”(AMPERE)获取的极光、等离子体流和全球场向电流分布,以及中国南北极地面台站的监测。

2.4 旅行者1号发现星际等离子体波发射

旅行者1号卫星于1977年9月5日发射升空,2012年8月成为首个离开日球层进入(恒)星际空间的航天器,并开始星际空间环境探测。科研人员

根据它搭载的等离子体波系统(PWS)数据,首次发现了窄带宽、低振幅和多年持续性的星际气体“等离子体波发射”(plasma wave emission),这一成果将助力科学家了解星际介质如何与太阳风相互作用,日球层这一太阳系的保护罩是如何被星际环境塑造和改变的^[27]。

“旅行者1号”自2012年以来已探测到8次日冕物质抛射(CMEs)引发的等离子体振荡事件(POE),其时间跨度从几天到1年不等。本次发现意味着旅行者1号记录到了星际空间背景环境中的等离子体水平。这种等离子体波发射是一种稳定、连续且持久的低频率嗡嗡声,频率带宽比POE窄,稳定在3 kHz左右,带宽限制在40 Hz,是等离子体的证据(图14)。据此可以绘制等离子体沿旅行者1号轨道的空间分布图,了解星际介质中粒子和磁场的相互作用过程。该信号已经持续了近3年,相当于“旅行者1号”飞过了约10 AU的距离,为了解星际等离子体性质提供了关键数据。

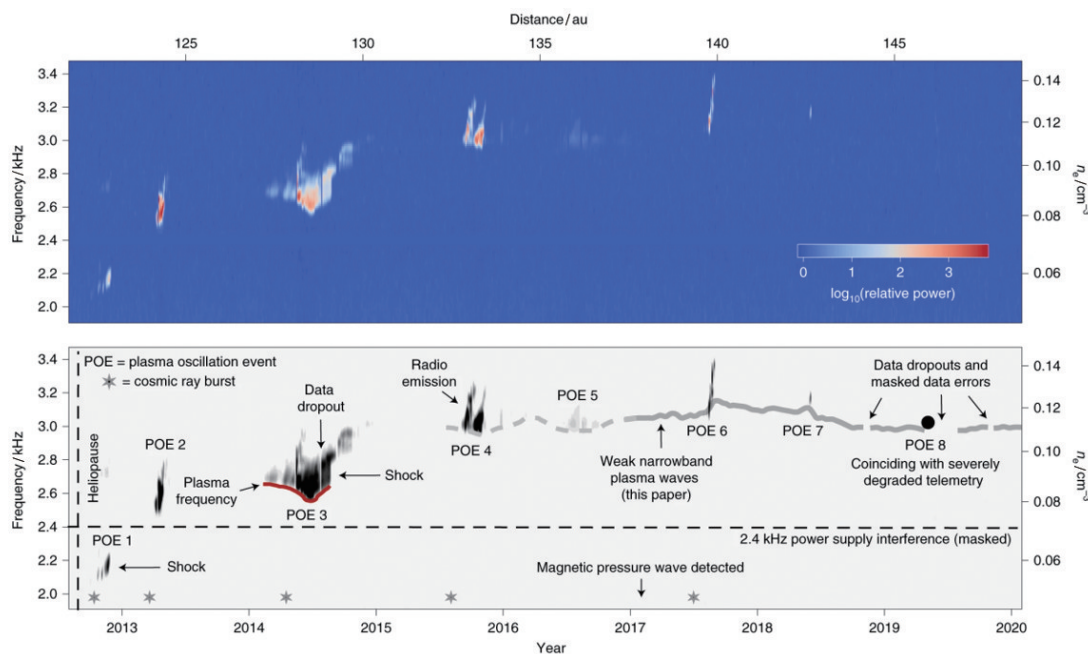


图14 “旅行者1号”探测到的星际空间等离子体振荡事件和等离子体波发射

2.5 SDO卫星长期高分观测更新太阳活动认知

2010年2月11日升空的SDO属于大型(L)科学任务,它运行在轨道倾角为28°的倾斜地球同步

轨道(IGSO)上,已完成了5年设计寿命,进入2次延寿(2015年1月和2017年1月)的任务拓展阶段。10余年来,它不辱“与日同在”(ILWS)计划首发星

的使命,除了每年2次2~3周日食及3次月球阴影事件外,每天都在遂行多波段高时空分辨率太阳观测,加深了对太阳活动的科学认知,提高了空间天气预报水平。

利用SDO大气成像监测包(AIA)171Å观测图像,科研人员首次在大尺度太阳风中观测到了一种小尺度结构——小羽流(plumelet)结构。既往观测已发现冕洞间歇喷发羽流(plume),关系着高速太阳风的产生,塑造了其特性。该研究发现羽流实际上是由更小的小羽流组成的,此次观测的整个羽流延伸约11万km,但每个小羽流的宽度仅在3700~7000km。借助先进图像处理技术,他们以清晰的细节揭示了小羽流的存在及其细微变化,指出小羽流不仅是太阳风羽流的一种特征结构,更是构成羽流的基础结构(图15)。此次研究获得了产生高速太阳风的太阳结构的新见解,将帮助理解太阳风中扰动的形成方式和原因^[28]。

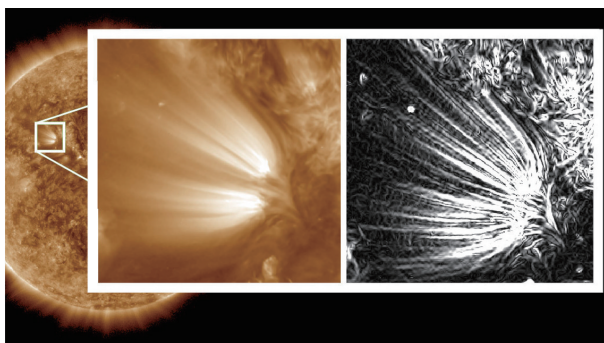


图15 SDO极紫外波段发现太阳风羽流中的小羽流结构(伪彩色)及锐化图像
(2016年7月2日,19:35 UT)

SDO、日地关系空间观测台(STEREO)和太阳与日球层空间观测台(SOHO)等多颗卫星联合观测到了一个被誉为太阳“罗塞塔石碑”的喷发事件(a solar Rosetta Stone explosion)^[29]。它发生在2016年3月12—13日,呈现出“戏剧性的、多阶段的喷发”特征。科研人员综合SDO的AIA、日震与磁成像仪(HMI),STEREO极紫外成像仪(EUVI),以及SOHO的广角光谱日冕仪2(LASCO C2),对它进行了接续观测。他们首先观测到太阳表面NOAA 12488/12501活动区上方的日冕物质喷发,其尺度很大,超过了喷流,但又较窄,不及CME。不到半

小时,太阳表面第2层较冷的物质也开始从同一个地方喷发,但最终作为部分喷发物质回落太阳表面。显然,这个喷发事件是一个包括了日冕物质抛射(CME)、喷流(jet)和部分喷发(partial eruption)3种类型特征的事件,它促使人们认识到,这些喷发是由相同的机制引起的,只是规模不同,是个值得深入研究的新主题。

结合SDO的10年数据和数值建模,科研人员首次发现了太阳的长周期振荡,揭示了太阳发出“深沉低音”(deep low musical notes)的秘密,但它们在本质上不是声学。这种新发现的振荡是共振模式,其周期堪比27d太阳自转周期,主要受太阳较差自转影响,是继5min振荡后40多年来的新发现^[30]。检测太阳的长周期振荡需要对太阳表面的水平运动进行多年的测量,SDO的HMI连续观测成为实现这一目标的利器,由美国、澳大利亚、印度、西班牙和智利的6个太阳观测站组成的全球振荡网络组(GONG)的数据也证实了该结果。科学家认为,本研究对于建立探测太阳内部的新方法、获得有关恒星内部结构和动态的信息具有重要意义。

适逢SDO在轨运行10周年,为进一步促进公众对发展空间科学支持和关注,美国邮政局(USPS)特别设计发行了一套以SDO拍摄的太阳为主题的新邮票(图16),展示了SDO入轨以来所开展的系列科学观测,彰显了空间科学的美轮美奂,给人们留下了深刻印象。

3 行星探测揭示太阳系演化新特点

行星科学最初成长于天文学和地球科学,是高度综合、跨界的学科。当前行星探测的主要对象是除太阳外的太阳系天体,其尺度小至微流星体,大至气态巨行星,系外行星探测仍习惯上纳入空间天文。月球探测与天问一号任务的成功实施,已极大推动了中国行星科学研究,中国起步较晚但正大踏步追赶国际先进水平。2021年11月,国务院学位委员会批准中国科学院大学自主设置行星科学一级交叉学科,对中国继续实施行星探测工程和行星科学研究影响深远。



各样张依次为:冕洞@211 Å,日冕环@304 Å,太阳耀斑@335 Å,活跃的太阳@171 Å,太阳等离子体爆发@304 Å,日冕环@171 Å,太阳黑子@可见光,太阳等离子体爆发@304 Å,太阳耀斑@131 Å,冕洞@193 Å
图 16 太阳活动主题邮票(太阳的颜色是伪彩色,以显示从太阳表面到日冕的不同结构和爆发特征)

虽然普遍认为行星探测任务意味着航天器对月球及以远的目标天体进行飞掠、环绕、着陆、巡视或取样返回,是典型的深空任务,但在地球轨道观测金星、木星的任务也可以纳入行星探测,例如日本的火崎号行星大气光谱观测卫星(Sprint-A/Hisaki)。哈勃的外太阳系行星大气遗产计划(OPAL)通过对比2018、2019、2020年3年拍摄的土星外观,发现土星北半球夏季结束之际,赤道亮度提高了5%~10%,出现了其他季节没有的云带,风速也发生了变化^[31]。

2021年5月10日,“冥王星”小行星采样返回探测器(OSIRIS-REx, NASA New Frontiers 3)辞别贝努(Bennu)小行星启程返回地球,开始了2.5年的回家之旅。2021年10月6日新发射升空的露西(Lucy)任务将探测1颗主带小行星与7颗特洛伊(Trojan)小行星,其巡航阶段很漫长,顺利的话2025年4月才能飞临位于主小行星带的第1个任务目标、全部探测预期历时12年。2021年全球有25个行星探测科学任务在轨,火星任务多至11个,中国“嫦娥四号”继续在月背拓展人们对月球的科学认知。

3.1 火星新发现成为内太阳系探测的亮点

太阳和主小行星带之间的区域又被称为内太阳系,同为类地行星的水星、金星和火星是重要探测对象。2021年,ESA和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)联合的贝皮·科伦布号(Bepi-Colombo)

任务正值前往太阳系最小最内侧水星7.2年航程的中途,10月1—2日它首次借助水星引力辅助远距离飞掠,并首次对水星磁场和粒子环境进行了科学探测。之前它已完成1次地球、2次金星引力辅助,未来它还要再5次借力水星降低轨道,直到2025年12月5日抵达环水星的轨道。目前在轨的专用金星探测器是JAXA的拂晓号(Akatsuki)。关于火星的科学发现尤为瞩目,人类正在一步一步地揭开火星的真面目。

3.1.1 “天问一号”发布首批科学影像图

2021年5月15日,“天问一号”着陆巡视器成功着陆,5月22日,“祝融号”火星车开始巡视探测。6月11日,“天问一号”探测器着陆火星首批科学影像图发布,包括“祝融号”拍摄的着陆点全景、火星地形地貌、“中国印迹”和“着巡合影”等影像图,标志着中国首次火星探测任务取得圆满成功,在世界火星探测史上一步实现“绕落巡”,为人类认知火星提供了新的机遇。

至2021年8月15日,“祝融号”平安度过了90个火星日的设计寿命,圆满完成既定巡视探测任务,进入拓展任务实施阶段,继续驶向乌托邦平原(Utopia Planitia)南部的疑似古海陆交界地带,探寻火星起源与演化的线索。11月8日,“天问一号”环绕器准确进入遥感使命轨道,利用搭载的7台科学载荷获取火星形貌与地质构造、表面物质成分与土壤类型分布、大气电离层、火星空间环境等科学数

据。11月7日开始,中、欧火星探测器开展了系列通信试验(图17),20日“祝融号”与火星快车(MEX)在轨中继通信取得圆满成功。至12月31日,“祝融号”在火星表面工作225个火星日,累计行驶1400 m。12月16日,《Nature》发布2021年度十大人物,中国首次火星探测任务工程总设计师、“火星探索者”(Mars explorer)张荣桥入选。

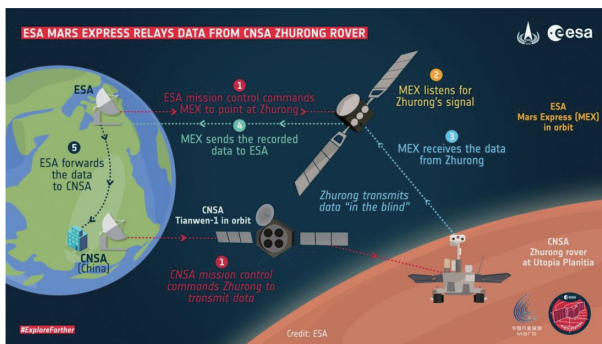


图17 “祝融号”与火星快车在轨中继通信试验示意
(图源:ESA)

“天问一号”轨道器火星离子与中性粒子分析仪(MINPA)发布行星际太阳风探测成果。根据MINPA在地火转移期间就位探测及STEREO、“朱诺号”(Juno, NASA New Frontiers 27)、“信使号”(MESSENGER, NASA Discovery 7)等其他多个科学卫星对同一流相互作用区(SIRs)的监测和档案,科研人员对多个流相互作用区事件进行了对比和分析,为研究行星际多点太阳风探测及其径向演化提供了新输入^[32]。

3.1.2 美国任务揭示火星内部结构发现火表洪水证据

2021年美国多个火星探测任务在役运行,包括2001火星“奥德赛号”(2001 Mars Odyssey)、火星勘测轨道器(MRO)、火星大气与挥发物演化探测器(MAVEN)等3个轨道器,以及“洞察号”着陆器(InSight, Discovery 12)和2个大型(L,旗舰级)任务——“好奇号”(Curiosity)和“毅力号”(Perseverance)火星车。

行星内部蕴藏着行星起源、演化历史的重要线索。2021年1月8日,NASA批准“洞察号”延期运行至2022年12月,重点开展高质量火震数据长期采

集。基于洞察号地震计(SEIS)探测数据完成的火星内部结构的首批研究成果,登上7月23日出版的《Science》封面。3篇论文分别总结了对火星壳^[33]、火星幔^[34]和熔融态火星核^[35]的研究发现,成为人们了解火星形成和热演化的重要一步。相比地球上数以万计的地震仪以及月球上曾运行过的4台月震仪,仅用SEIS单台地震仪进行火星内部结构反演极具挑战。它们也是科学家首次利用地震数据对地球之外其他岩质行星内部结构的首次直接探测,可用于比较行星学研究,加深了对包括地球在内的岩质行星的理解^[36],入选《Science》2021年度十大科学突破。

“洞察号”于2018年11月26日着陆于火星埃律西昂平原(Elysium Planitia)家园洼地(Homestead Hollow)的浅撞击坑。SEIS从2019年2月开始探测,在着陆点业已记录了733次火震事件,其中大约35次强度在3.0~4.0级,为这3篇论文探秘火星内部结构提供了数据。研究人员据此发现,火星壳可能有2层或3层(需更多数据确定),厚度在24~72 km,与地壳厚度相当,它可能富含辅助加热的放射性元素。火星幔在火表下延伸至约1560 km处,比地幔(~2865 km)一半略厚,但它只有一个厚达500 km的岩石圈上层火星幔。火星核呈液态,与以铁镍为主的地核不同,火星核除了铁镍还富含氢氧等轻元素,其直径约1830 km,约为地核半径(~3480 km)的一半(图18)^[37]。这些结果初步揭示了火星内部结构,表明火星的形成和演化与地球不尽相同,为火星的化学和内部动力学研究提供了限制条件。

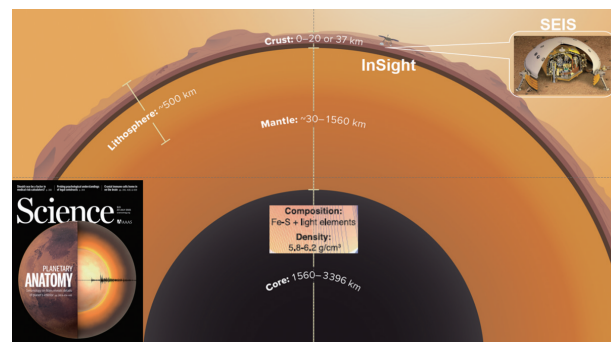


图18 “洞察号”地震仪探测火星内部结构示意

此外,研究人员还利用SEIS的火震数据分析了Elysium Planitia地区的构成,揭示了火星平原地质历史^[38]。对深度达200 m的火星浅次表层分析

表明,在约 20 m 的顶层(3 m 浮土层+15 m 陨石撞击溅射石块)之下有大约 150 m 厚的玄武岩熔岩流,与预期的次表层结构基本一致。但深入研究发现,从大约 30 m 的深度开始,熔岩流之间夹着一个 30~40 m 的较薄沉积层,它可能由夹在西方纪(Hesperian period, 3.0~3.7 Ga, 有广泛的火山活动)和亚马逊纪(Amazonian period, ~3 Ga, 小行星撞击率低)玄武岩之间的沉积物组成,或者由亚马逊纪玄武岩本身的沉积物组成。火表浅层地下的分层细节有助于了解哪里可能仍然含有地下水或冰,能增进人们对火星地质历史的进一步认识。

“好奇号”发现火星上可能存在有机盐和新有机分子。“好奇号”是美国第 7 个火星着陆探测器,第 4 台火星车,也是世界上首辆采用核动力驱动的火星车,2012 年 8 月成功登陆火星盖尔撞击坑(Gale Crater),使命是探寻火星上的生命迹象。

“好奇号”曾在着陆点附近干涸的湖床上对同一时期(35 亿年前)、环境相似(相距仅 400 m)的两处钻孔取样,采集了富含蒙脱石族黏土的古沉积岩样本。科研人员分析发现同套地层中的矿物组成,尤其是黏土矿物含量存在显著的差异,其中一块含量仅为预期一半,却含有大量氧化铁,而正是这种化合物使火星呈现出红锈色。他们提出,部分黏土消失背后的“罪魁祸首”是水和硫酸镁盐渗入,并由此将地质记录甚至生物印记擦除得干干净净^[39],但从另一视角看,盐水涌入带来的化学条件亦是种负反馈,减缓行星干旱化进程,可使更多生命在此处出现,仍是寻找古代生命证据的绝佳场所。

2016 年 12 月“好奇号”上的钻机出现故障后,2017 年 3 月它从火星的拜格诺沙丘(以英国沙漠科学家 Bagnold R. A. 命名)铲取土壤样本,科研人员对它们进行了“火星样品分析仪”(SAM)湿化学实验,虽没有检测到氨基酸衍生物,却首次发现了从未在火星上见过的有机分子苯甲酸和氨^[40]。研究人员称,虽然这项新实验没有发现火星生物标记,但它的价值在于说明了“好奇号”收集样品的方法是正确的,展示了一个进一步搜寻与生物或生命起源相关的极性有机分子的有效工具。

2021 年 2 月 19 日, NASA 新一代火星车“毅力

号”再以“空中吊车”的技术着陆在直径约 45 km 的火星耶泽罗撞击坑(Jezero Crater)——其 35 亿年前可能是一个河流沉积三角洲,是寻找生命的“吉祥之地”。截至 2021 年底,“毅力号”已经实现 4 个里程碑:首次地外天体上制氧气、无人直升机火星飞行、收集第 1 个火星岩石样本等 3 个试验目标,以及首个重要科学成果——火表曾发生洪水。

4 月 20 日,“毅力号”搭载的火星氧气原位资源利用实验(MOXIE)首次实现在地外天体上制氧。MOXIE 经过 1 h 运行,利用火星稀薄大气中的 CO₂ 制取了约 5.4 g 的 O₂,可支持宇航员开展 10 min 的正常活动。此次技术验证的成功意味着在外星球上利用环境要素生存前景可期,不仅可提供人类呼吸所需 O₂,还可减少深空探索任务对推进器燃料运输的需求。

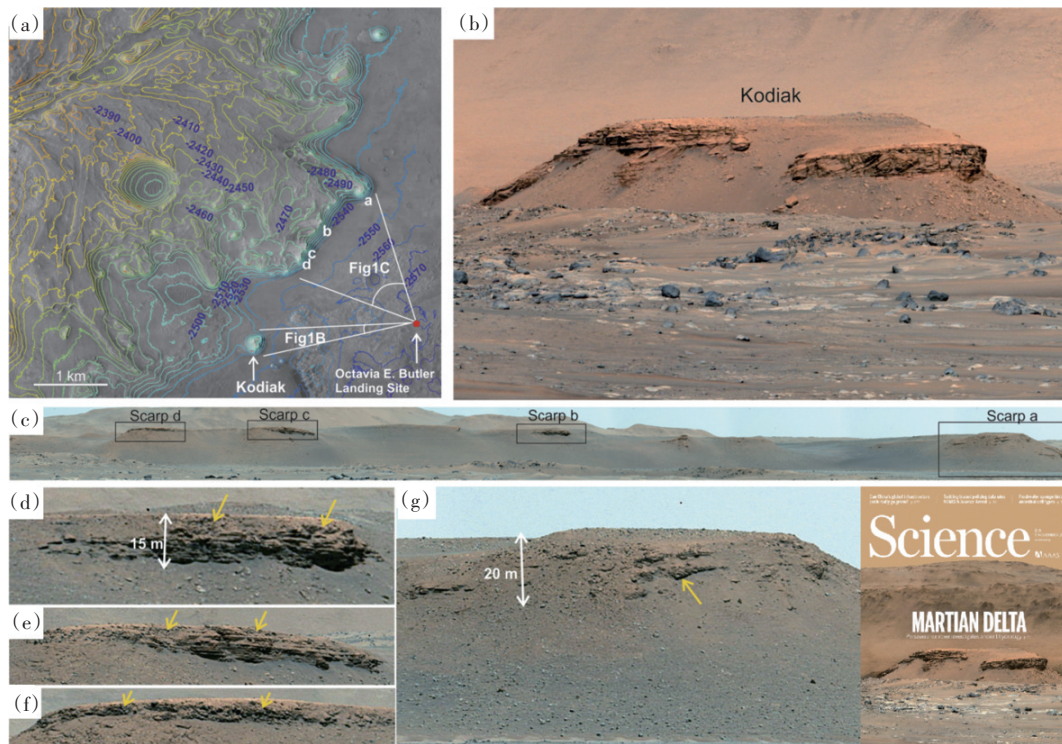
与此同时,其搭载的“机智号”(Ingenuity)火星直升机继 2021 年 4 月 19 日成功首飞后,已圆满实现飞行 5 次的设计目标,从 5 月下旬进入拓展的演示阶段,探索未来的火星车和直升机如何协同工作,至 2021 年 12 月上旬已完成 17 次飞行。“机智号”建立了人类动力飞机地外稀薄大气环境受控飞行的里程碑,虽然它本身未安排任何科学任务。

2021 年 8 月 7 日“毅力号”首次钻孔采样失败,不过 1 个月后它就成功采集到首个火星岩石样本,并将这截比铅笔略粗的岩芯储存在一个密封钛样品管中,未来将由 NASA 主导、ESA 参与的 2030 火星采样返回任务(MSR)期待带回地球,由科学家探寻其火星生物印记^[41]。

除了上述工程技术成就,“毅力号”首个科学发现——火星曾爆发大洪水也成为 *Science* 封面文章。既往火星轨道器已观测 Jezero 撞击坑包含一个显著的扇形沉积岩体,沉积在其西缘。科学家在“毅力号”着陆后 3 个月内利用桅杆变焦相机系统(Mastcam-Z)、超级分析相机(SuperCam)的远程显微成像仪(RMI)等科学相机拍摄了数万张高分辨率图像,包括西北约 2.2 km 处一系列陡峭斜坡(Scarp a、b、c、d)、西南方科迪亚克山丘(Kodiak butte)等。研究人员测量了每一层的厚度、坡度和横向范围,重建了数十亿年前 Jezero 发生的事情,

提出沉积物由持久湖泊环境持续的水文活动形成,偶发性大洪水将原本不属于该地区的大块砾岩搬运至下游河床,并覆盖在较旧沉积物上(图19)^[42]。之后的火星气候变干和风蚀,留下今天所见撞击坑

及不寻常巨岩。该成果增加了人们对火星古代气候的理解,并为毅力号后续任务提供了输入,譬如探秘洪水的起源。



(a) 西侧等高线图(红点是用已故科幻作家奥克塔维亚·布特勒(Octavia Butler)命名的着陆点);
(b) 西南侧科迪克丘;(c) 西北侧的多个陡峭斜坡;(d)(e)(f)(g)为(c)中陡峭斜坡特写

图19 “毅力号”着陆点 Jezero 撞击坑周边高分辨率图像

现在的火星寒冷且极度干燥。关于火星曾拥有的大量液态水去哪了存在各种解读。一般认为,火星失去磁场保护后,持续的太阳辐射和太阳风使火星大部分的空气和水逃逸至外空。不过,《Science》中的论文提出,火星上30%~99%的水仍被封存在火星壳的矿物质中,挑战了当前的理论。行星的水通过高层大气流失将会导致其大气中明显升高的氘和氢同位素比(D/H)。研究人员结合陨石、“好奇号”以及 MAVEN、MEX 探测数据,对火山喷发、大气逃逸、地壳水合所致的水文循环进行了模拟。他们认为火星在大约41亿~37亿年前的诺亚纪(Noachian period)失去了40%~95%的水,约30亿年前达到目前水平;通过火星壳的矿物质化合吸收水和在高层大气中失去水两种机制结合能

解释火星大气的 D/H 观测值,化学反应可能使30%~99%的火星水被封存于火星壳中,其余的水则逃逸至外空。鉴于火星没有构造板块,火表的“干燥”一旦发生就会是永久性的,这也意味着不可逆的化学风化会增加类地行星的干燥度^[43]。

3.2 嫦娥任务为揭示月球演化奥秘作出重要贡献

2021年全球有2个环月轨道器——月船2号(Chandrayaan-2)和月球勘测轨道器(LRO),以及中国“嫦娥四号”任务仍在役。9月上旬印度空间研究组织(ISRO)组织了2天月球科学研讨会,同步在官网发布了月船2号搭载的有效载荷、数据产品和初步科学成果。需要指出的是,另2颗在环月赤道椭圆轨道运行的科学卫星阿特弥斯探测器1号和2号(ARTEMIS P1&P2, MIDEX 5)旨在探测地球

磁尾和太阳风中湍流演化,以及月球尾流和粒子加速,属于日球层物理的空间探测任务。

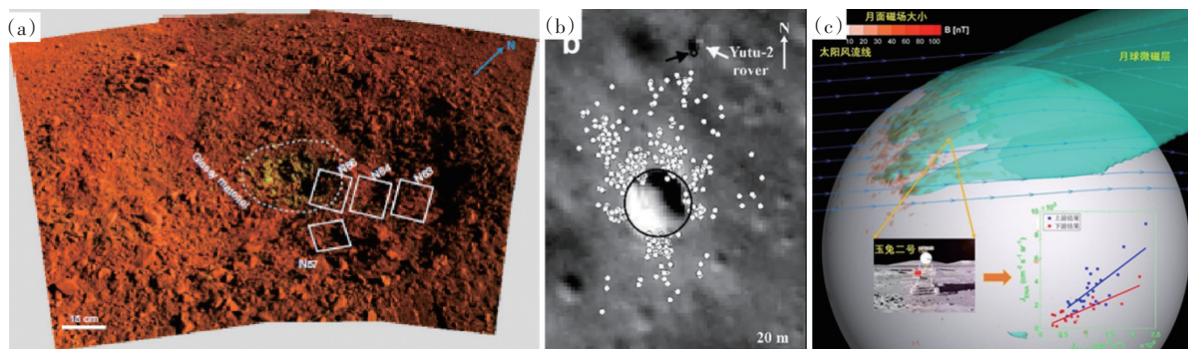
3.2.1 “嫦娥四号”再获月背多项新发现

利用“玉兔2号”月球车全景相机(PCAM)和可见-近红外成像光谱仪(VNIS)获取的超高分辨率的月表影像与高光谱数据($<1\text{ mm/pixel}$),中国科学家首次在月表原位识别出了“天外来客”——年龄在1个百万年以内的碳质球粒陨石撞击体残留物,表明富含挥发分的碳质小行星的撞击可能仍为现在的月球提供水源(图20(a))^[44]。该研究不仅对地月系统撞击体成分和类型的演变提供参考,增进人们对内太阳系撞击历史的了解,而且鉴于“嫦娥五号”返回样品中很可能发现类似的撞击体残留物,届时结合主微量元素与同位素年代学分析,将对撞击体演变进行更好的限定,进一步加深对月球水的来源与分布的认识。

着陆区矿物成分、地形地质演化历史、月壤太空风化程度和浅层地下结构被查明。“嫦娥四号”着陆区被35亿年前形成的芬森撞击坑(73 km Finssen crater)的溅射物覆盖,长期演化使之呈现为厚

约12 m的细粒月壤。“玉兔2号”对巡视区的代表性石块进行了就位探测,其光谱特征说明石块可能源自芬森撞击坑,空间分布特征表明石块是当前撞击坑溅射物(图20(b))——它们由芬森撞击坑溅射过来并被埋于月壤,后期因织女撞击坑(3.8 km Zhinyu crater)溅射物的撞击挖掘作用而暴露在月表并存在了约1600万年^[45]。

“嫦娥四号”首次在月面观测到月球微磁层(LMM)。月球没有全球性内禀磁场,但有分布较广的月壳剩磁/磁异常,理论上它们可与太阳风作用形成微磁层。“嫦娥四号”着陆点位于月球最大磁异常区——雨海对趾区(Imbrium antipode)的东部边缘,提供了在月面就位探测微磁层的机会。科研人员利用“玉兔2号”中性原子探测仪(ENA)实现了月球微磁层的首次月面观测,结合全球Hall MHD模拟揭示了微磁层只有在离子惯性长度足够小($<120\text{ km}$)时才可能形成,它对太阳风的作用主要是偏转和减速,不能完全遮挡太阳风,其平均遮挡效率约为50%(图20(c))^[46]。



(a) 第9月昼全景相机拍摄的新鲜撞击坑可能撞击体残留物(黄绿色,伪彩色图,白框指示成像光谱观测区域);
(b) 第13月昼发现的新鲜撞击坑周围石块空间分布特征;(c) 月球微磁层就位探测与模拟示意

图20 玉兔2号新科学成果

3.2.2 “嫦娥五号”20亿年前玄武岩样品完善月球演化历史

岩浆作用何时停止一直是月球演化史研究的重大科学问题之一。美苏月球样品及地球上月球陨石的研究证实,月球岩浆活动至少持续到约28~30亿年前,喷发留下的黑色玄武岩形成了所见的“月海”。但科学界对月球岩浆活动停止的确切时

间存在争议:美国阿波罗及苏联月球探测器(Luna)样品最年轻玄武岩结晶年龄是31.6亿年,月球陨石样品最年轻玄武岩结晶年龄是28.8亿年。

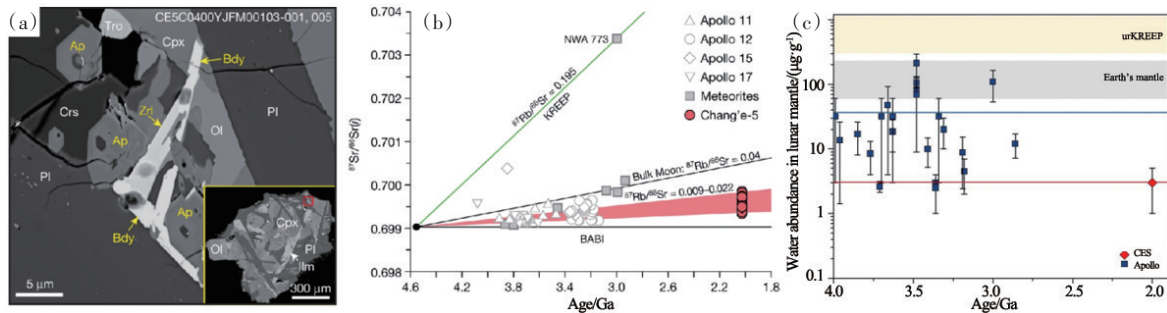
“嫦娥五号”任务采样点位于月表最年轻的月海玄武岩区域,通过表取和钻取两种形式采集到共1731 g月球样品^[47]。中国多个科学团队对“嫦娥五号”科研样品开展了高水平研究,第一批成果就引

起广泛关注。

中国地质科学院领衔的国际团队对“嫦娥五号”月球玄武岩开展了年代学、元素、同位素分析,他们用详尽的微区原位高分辨率二次离子质谱(SHRIMP)定年数据和岩石矿物地球化学数据,证明了月球直至19.6亿年前仍存在岩浆活动,使此前已知的月球地质寿命延长了约10亿年^[48],为完善月球演化历史提供了关键科学证据,可用于修正撞击坑统计定年模型。

中国科学院地质与地球物理研究所联合国家天文台也在“嫦娥五号”月球样品研究方面取得突破性进展(图21)。他们用超高空间分辨率铀-铅

(U-Pb)定年和同位素分析技术,证明“嫦娥五号”月球样品为一类新的月海玄武岩,对着陆区岩浆年龄、源区性质给出全新的认识,月球最“年轻”玄武岩年龄为20亿年^[49],其晚期岩浆活动的源区并不富集放射性元素,排除了“嫦娥五号”着陆区岩石初始岩浆熔融热源来自放射性生热元素克里普矿物(KREEP)的主流假说,揭示了月球晚期岩浆活动过程^[50]。水是生命之源,月球内部到底是“干”或“湿”?他们利用高空间分辨的纳米离子探针技术,发现月幔的水含量仅为1~5 $\mu\text{g/g}$,几乎没有水,排除了月幔初始熔融时因水含量高而具有低熔点,导致该区域岩浆活动持续时间异常延长的猜想^[51]。



(a) 定年矿物次辉绿结构岩屑,斜锆石(Bdy)、钙钛锆石(Zr)和磷灰石(Ap)共生;(b) 锶(Sr)和钕(Nd)同位素(红色)与克里普(绿色)的显著差异;(c) 月球内部的水含量随时间演化轨迹

图21 嫦娥五号玄武岩样品科学成果

实际上,本节仅是首批由中国科学家主导完成的“嫦娥五号”月球科研样品研究成果,为还原月球真实演化历史奠定了基础,反映了中国航天工程技术与科学研究的完美结合。“嫦娥五号”着陆区异常活跃的火山活动成因仍然待揭,也对未来的月球热演化历史科学研究和月球探测提出了新的目标,需要全新的理论框架和演化模型。

3.2.3 月球探索应继续关注月表的月幔样品

岩浆洋(LMO)形成月幔、月幔重力反转等事关月球形成历史,与类地行星及其卫星的演化也密切相关,寻找月球表面暴露的月幔岩石样品是破解该问题的钥匙。NASA科研人员对此进行了评估,综合了实验室实验、月球样品分析以及地球物理/地球化学模型,用于解读月球勘探者卫星(Lunar Prospector, Discovery 3)、月球勘测轨道器(LRO)以及月船1号(Chandrayaan-1)搭载的NASA月球矿

物测绘仪(M3)对月表的最新遥感观测结果。他们发现月球背面南极-艾特肯盆地(SPA)西北部地区的2个撞击坑目前存在大量暴露的月幔物质,并生成了月表可能发现月幔位置的地图(图22)。采集和分析这些来自月球深处的碎片,可更好地了解月球、地球和许多其他太阳系天体是如何演化的。国际科学界认为,“嫦娥四号”任务2019年1月率先着陆于SPA冯·卡门撞击坑(Von Kármán crater),是世界月背探测的一个重要里程碑,而各国未来的月球样品返回计划或月表科研站/大本营样品就位分析探测均应充分关注月球背面的这些关键位置^[52-53]。

3.3 “拂晓号”揭示金星大气环流新机制

金星位于太阳系宜居带内缘,早在1978年NASA的先锋——金星1号和2号(Pioneer Venus 1&2)就对其大气开展了探测。金星“日面”的天气很容易观测到,但其夜间的天气情况,即使在红外

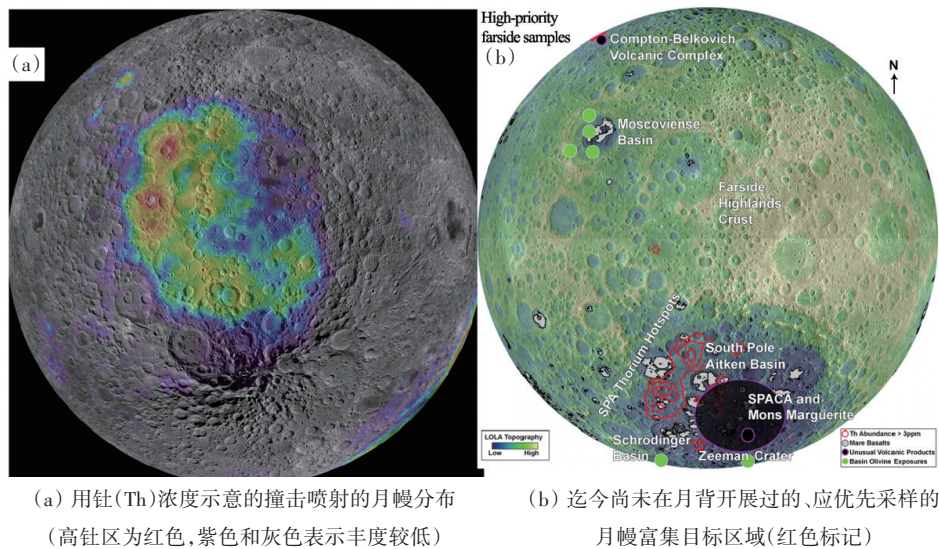


图22 南极-艾特肯盆地最可能揭示月球深层奥秘

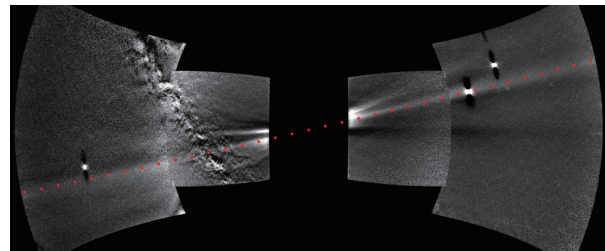
波段也很难清楚。日本利用“拂晓号”首次揭示了金星夜间风吹拂的方向与白天的大相径庭。

他们收集了长波红外相机(LIR)2年内每小时拍摄的金星云层图像数据,并通过叠加和多图像平均法降低温度变化的噪声,发现云层上部存在约0.3℃的温度波动,进而实现了大气运动可视化,再对金星天气系统的运动进行了补偿后,间接“看到”了金星难以捉摸的夜间天气。结果表明,夜间金星云层上部会产生一股与白天相反的、吹向赤道的南北风;昼侧的“两极向流”和新发现的夜侧的“赤道向流”,可能助长了整个行星的超级旋转(super-rotation)。研究还发现,夜侧“赤道向流”风速与日间“两极向流”风速相同,因此昼夜几乎没有净子午向流^[54]。该项研究为金星气象学开辟了一种新方法,有助于建立更精确的金星天气系统模型,也有望揭示金星天气和地球天气一些长期存在的、尚未回答的谜团。

此外,“帕克号”也带来了关于金星轨道存在环太阳的尘埃环、金星的电离层在太阳活动极小期变薄的新发现。

“帕克号”在2019年8—9月第3次轨环日巡航时,其可见光宽视场成像仪(WISPR)首次拍到了邻近金星轨道、环绕太阳的尘埃环的第1个360°完整视图(图23),是继此前德-美联合的“太阳神号”卫星(Helios)和STEREO等发现部分金星尘埃环后的

新成果^[55]。实际上,人们有时从地球上看到太空尘埃反射太阳光形成的黄道光从地平线升起的微弱光柱。



金星尘埃环(红点)从图左下角向右上角,图中白亮点从左到右分别是地球、金星和水星,图左可见部分银河系

图23 帕克号首次拍到完整金星尘埃环 (4帧图像拼图,2019年8月25日拍摄)

2020年7月11日,“帕克号”第3次金星引力辅助飞掠时,其电磁场探测包(FIELDS)监测到了金星大气的低频无线电发射,科研人员据此反演了金星的电离层密度。人们曾于1992年太阳活动峰年时通过先锋-金星轨道器对金星电离层进行过直接探测,而此次测量结果发生在太阳活动低年,两者相比,科学家发现金星的电离层变薄了很多,而电离层的这种变化对于了解金星大气如何随时间演变很关键^[56]。

3.4 木星极光成因及作用是认知外太阳系的新成果

木星是外太阳系最靠内的气态巨行星,1979年旅行者1号首次发现它有X-射线极光,成为认

识宇宙空间X-射线辐射机制的样本。哈勃的第三代广域相机(WFC3)接续观测木星30余年,让学界能够在紫外波段精准刻画木星极光的特征。

继“伽利略号”木星轨道器(Galileo, 1989年10月18日至2003年9月21日)后,“朱诺号”是目前唯一在轨的木星专用探测器。2021年1月,NASA批准“朱诺号”延期运行至2025年9月,除继续探测木星外,还将对木星系统包括对木星环和木卫三(Ganymede)、木卫二(Europa)和木卫一(Io)进行目标观测和近距离飞越探测;6月7日“朱诺号”掠过冰封的木卫三,成为20年来与之最近的航天器。

2021围绕木星极光的成因及作用,行星科学家利用“朱诺号”“牛顿号”和“火崎号”卫星探测,结合美国夏威夷凯克天文台(W. M. Keck Observatory)等的地面观测,给出了近乎完美的拼图,极大加深了人们对木星空间环境中物质能量循环过程的理解,其中中国年轻学者研究成绩斐然。

3.4.1 “朱诺号”破解木星磁层极光之谜

木星强极光因何而致?如何解释木星极盖区频繁的软X射线耀斑?“朱诺号”对木星磁层的就位探测成为破解木星极光产生之谜的钥匙。

中外科研人员根据2017年7月牛顿望远镜的多次遥感观测,同步配合“朱诺号”穿越木星磁层的就位探测,最终揭示了木星软X射线极光产生的完整链条。木卫一火山喷发的大量 SO_2 逃逸至木星空间环境中,通过光致电离等过程产生氧离子和硫离子,它们再与木星磁层的复杂电磁场相互作用完成充能。木星磁场捕获这些重离子,并通过电磁离子回旋波(EMIC)等行星尺度的等离子体波,周期性将其输送至南北两极,撞向木星大气分子和原子、发生电荷交换产生光学辐射,并释放大量能量,表现为人们看到的X射线耀斑(图24),整个过程与地球极光惊人地相似,但鉴于地磁场相对较弱,木星极光要比太阳风高能带电粒子注入所致的地球极光强烈得多,两者时间、空间和能量尺度的数量级不同^[57]。

更进一步,中外科学家利用“朱诺号”紫外成像光谱仪(UVS)以及哈勃成像光谱仪(STIS)的新数据揭示了木星极光晨暴的起源和演化。1994年,

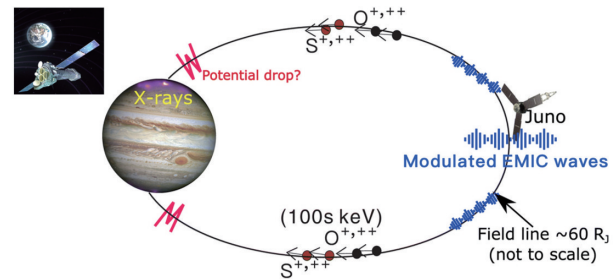
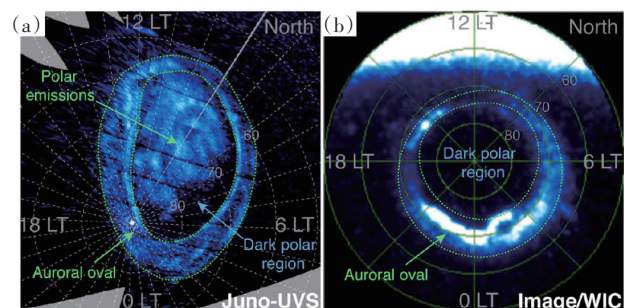


图24 Juno就位探测与XMM-Newton遥感观测揭示木星X射线耀斑产生机制

哈勃原搭载的暗天体相机(FOC)从侧面观测到木星极光晨暴,即木星南北极光卵在黎明时分短暂剧烈变亮并加宽现象。“朱诺号”首次拍摄到木星夜侧极光及其完整发展过程,显示极光晨暴诞生于木星背阳侧,随着木星自转随之进入向阳侧,分析表明其与地球的极光亚暴过程具有惊人的相似^[58]。

木星极光明亮持久过程活跃,木星磁层未见地球磁层的黑极盖区(图25)。这一不寻常的极光现象意味着行星的磁层拓扑结构不同,木星极盖区持续受到外界扰动。研究人员考虑了木星磁层与行星际介质的相互作用、来自木卫一的质量输运以及电离层-磁层耦合,通过木星磁层全球磁流体(MHD)数值模拟揭示了木星极区的磁力线为闭合磁力线,可在木星晨侧磁层中约束能量粒子;木星晨侧的磁鞘等离子体流和木星磁层旋转等离子体流方向相反,因而持续产生剧烈扰动,与极区对应的活跃极光也是一致的^[59]。



(a) 朱诺号紫外成像光谱仪(UVS)拍摄的木星极光(2017年5月19日) (b) 磁层顶-极光全球成像卫星(Image)宽带相机(WIC)拍摄的地球极光(2001年1月14日)

图25 木星极光与地球极光

持续半个多世纪的木星“能源危机”有望圆满解决,木星强大的极光是整个行星热量来源。根据木星接收到的太阳辐射推算,其高层大气的平均温度约为 -73°C ,但地面天文台或科学卫星对木星赤道大气的实测值却飙升升至约 426°C ,木星全球加热的额外热量来源是谁?大红斑加热等猜想均无法描述木星全球加热的完整机制。2021年科研人员给出了新的推断。他们在2016年4月和2017年1

月的2个晚上通过Keck II望远镜的近红外光谱仪(NIRSPEC)对示踪木星大气热流的 H_3^+ 发射谱进行了5 h观测,并利用“朱诺号”“火崎号”卫星观测木星极光活动和木卫一。基于上述多仪器高空间分辨率联测,科研人员得出结论:木星极光能使热量跨越全球传导到赤道区,作为太阳系最强极光,它负责将整个木星高层大气加热到令人惊讶的高温(图26)^[60]。

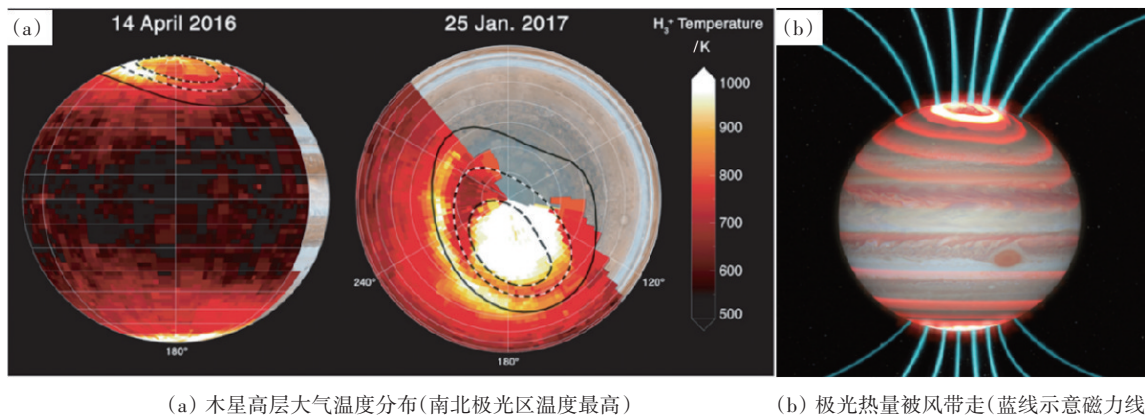


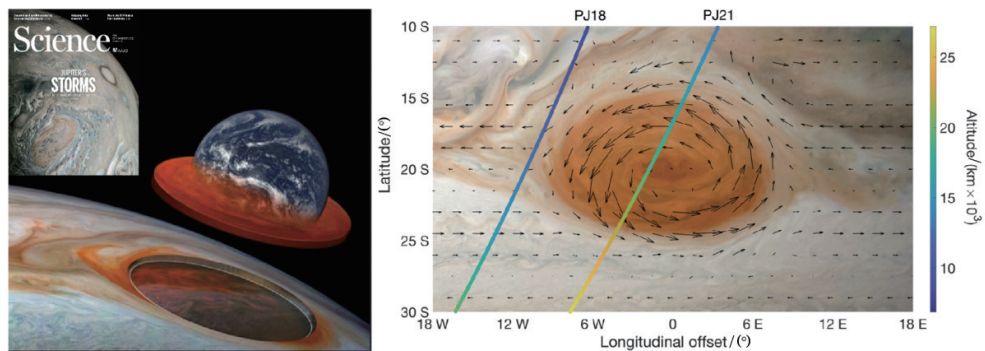
图26 极光加热木星全球的观测及示意

3.4.2 朱诺号发现“大红斑”比预期更深

研究人员利用2017—2019年“朱诺号”微波辐射计(MWR)和重力测量(Gravity)数据,继续深入研究木星大气结构。他们发现已肆虐了几个世纪的大红斑(GRS)几乎“深”不可测,远超预期:大红斑延伸到距离木星大气层顶部240 km的云层之下,超过了水和氨预计凝结的深度^[61],风暴深度可能达500 km^[62],这意味着大红斑与木星深层大气有

关(图27)。科学家还发现,另外2个较小的风暴亦有数百公里深,而组成木星大气层顶部彩色条纹的喷射流深度可达3000 km。“朱诺号”将在拓展任务中对更多风暴深入观测。

迄今发现的系外行星中有1458颗被认为是类木行星(图6),深入探测和认知木星必将有助于人们更好地了解系外行星世界。



(a) 木星大红斑(其直径与地球直径尺度相当)

(b) 重力测量的大红斑构型及其速度场

图27 木星大红斑示意与观测

4 空间地球科学揭示全球变化趋势

空间对地观测革新了地球科学的研究方式,推动了地球系统科学的诞生与发展,并成为其重要数据源。空间地球科学卫星是航天国家为迎接全球变化挑战而发展的专用对地观测卫星,使人类能够从空间甚至从深空视角全面、综合、整体地观察、研究和预测行星地球,并为实现联合国可持续发展目标(SDGs)等重大需求作出科学贡献^[63]。2021年世界新增3个在轨空间地球科学任务,分别是中国的“可持续发展科学卫星1号”(SDGSAT-1),以及美国的大型任务“陆地卫星9号”(Landsat 9)、立方星任务降水结构和风暴强度时间分辨观测立方星座“探路者”(TROPICS pathfinder, 3U)。

4.1 中美各自新发射空间地球科学卫星

SDGSAT-1是全球首颗专门服务《联合国2030年可持续发展议程》的地球科学卫星,2021年11月5日在太原卫星发射中心搭乘长征六号火箭升空。SDGSAT-1曾称“广目”地球科学卫星(CASEarth),由中国科学院地球大数据科学工程先导专项研制,纳入空间科学先导专项管理,主用户是可持续发展大数据国际研究中心(CBAS)。SDGSAT-1搭载了热红外、微光和多波段成像仪3个光学载荷,运行在505 km的太阳同步轨道,倾角97.5°,具有多载荷协同观测及单载荷观测等模式。3个载荷均拥有300 km幅宽的数据获取能力,11 d可实现全球覆盖。SDGSAT-1为表征人与自然环境交互作用的指标研究提供科学支撑,是中国实质性贡献联合国2030年议程的重要体现、向国际社会展现大国担当的具体行动。

美国对地观测卫星序列添新丁。始于1972年的陆地卫星(Landsat)系列迎来了Landsat 9,其中NASA承担约85%经费,负责卫星平台、有效载荷、发射和测试等空间段任务;地质调查局(USGS)承担其余15%经费,负责数据处理、运控等地面段任务。目前Landsat 7和8仍在轨工作,Landsat 9正式运行后Landsat 7将退役。ESA哥白尼计划(Copernicus)的哨兵-2系列(Sentinel 2 A/2B,双星共轨但相差180°)重访周期为5 d。随着Landsat 9的运

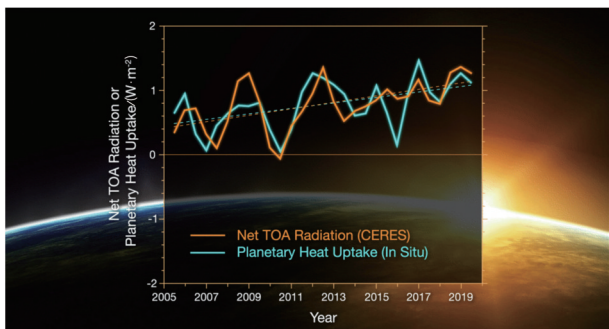
行,陆地卫星和哨兵-2的组合将实现2 d的全球重访周期,对全球环境变化遂行快速高分辨率监测。

4.2 卫星观测揭示全球水循环和全球变暖加速

气候变暖已成世界共识,但对地球水循环及能量失衡的全球测量一直是重大挑战。

2021年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)长达17年(2003—2019年)的观测数据档案,发现全球陆地蒸散量(ET)增加10%,高出原估计值的2倍,这意味着全球陆地上的水分流失增加,对水资源、气候和农业影响巨大,同时也揭示了全球水循环随气候变暖而加速^[64]。他们认为,全球陆地蒸散变率与厄尔尼诺-南方振荡(ENSO)正相关,但主要驱动力是不断升高的地表温度。观测全球尺度的陆地蒸散量难度较大,通过模型或局地测量再将结果放大至全球存在很多不确定性。鉴于GRACE和GRACE-FO能精确测量地球重力场,而地表和地下水质量的局部变化将影响地球重力信号,因此可通过重力卫星观测全球海洋与陆地间的水质量变化,进而获得对全球蒸散量的更精确估计。该结果也反映了地球观测连续性的重要性,通过科学卫星对全球水循环连续观测,为研究和保护宜居地球提供了必要的长期科学记录。

来自NASA和NOAA研究人员的另一项研究成果显示,2005—2019年,地球热量失衡(地球吸收的太阳辐射与发射到外太空的长波辐射之差)表现为正失衡(positive energy imbalance),全球陆地、海洋和大气层所吸收的热量在短短14年内翻了一番(图28),导致全球变暖加速^[65]。科研人员比较了2组独立测量数据,一是NASA的“地”卫星(TERRA)、“水”卫星(AQUA)搭载的云与地球辐射能量系统(CERES)对地球吸收净辐射能的观测结果,另一个是NOAA全球海洋剖面浮标观测网(Argo)的数据,其能准确估计世界海洋的变暖速度。它们都揭示从2005年年中到2019年年中,10年尺度的地球能量吸收率呈上升趋势,且地球热量正失衡的过剩能量约有90%最终进入了海洋。他们还发现太平洋年代际涛动(PDO)从冷相到暖相的翻转可能在能量失衡的加剧中发挥了重要作用。这不仅预



橙线表示卫星观测数据(CERES),青线表示地球气候系统就位监测数据(Argo),虚线为最小二乘线性回归拟合值

图28 地球热量正失衡

示着全球变暖的速度比预期的要快,也凸显研究地球热量正失衡的大小和变化对了解地球气候变化至关重要。不过与地球漫长的气候历史相比,14年的时间并不长——研究人员仍须收集数据,甄别其中的人为因素和自然变化,以期获得关于地球热量失衡的完整拼图。

5 多国空间科学战略规划前瞻未来发展

2021年中国相关部委开展了航天强国纲要、航天强国发展若干重大问题、空间科学强国路线图等多项事关空间科学未来发展的重大战略研究。例如,《2021—2030地球科学发展战略:宜居地球

的过去、现在与未来》强调地球宜居性的科学内涵和规律是21世纪的前沿科学问题,深空视野下的地球宜居性对未来10—15年空间地球科学发展愿景很有启发^[66]。美、欧、俄等国家/地区的空间科学发展规划动态也值得关注。

5.1 欧洲空间科学“远航2050”规划正式发布

ESA于2021年6月发布了“远航2050”,它是继地平线2000、地平线2000+和宇宙憧憬之后欧洲的第四轮空间科学中长期规划(表2),引发国际空间科学界广泛关注。新规划聚焦重大科学前沿,前瞻未来技术创新,确定了探索太阳系巨行星的卫星、系外行星或银河系,以及早期宇宙新物理等3个大型(L)空间科学任务方向,梳理了18个中小型(M和S)空间科学任务候选方向,提出了为实施这些任务或取得更长远的突破性科学回报而必须超前研发的有效载荷和关键共性技术,强调了面向未来培养下一代空间科学人才的重要性。

需要说明的是,3个大型任务的科学方向,仅意味着选定了空间科学任务的科学领域,并非已遴选出具体的科学任务。L4着眼于太阳系地外生命探寻,探测巨行星卫星的地下海洋乃至生命必需的成分,进一步探寻地外生命证据。L5致力于探索早期宇宙的物理规律,通过宇宙微波背景辐射或空间引力波,研究宇宙结构和起源。L6任务有望通过近红外波段直接观测系外行星大气,实现类地宜

表2 ESA四轮空间科学规划大型任务

规划	大型任务	所属领域
地平线2000(Horizon 2000, 1985—2005)	X射线多镜面空间天文台-牛顿空间望远镜(XMM-Newton) ¹	空间天文
	赫歇尔空间望远镜(Herschel) ²	
	太阳和日球层空间观测台(SOHO) ¹	日球层物理
	星簇计划(Cluster) ¹	
地平线2000+(Horizon 2000 Plus, 1995—2015)	罗塞塔彗星探测计划(Rosetta) ²	行星科学
	盖亚卫星(Gaia) ¹	空间天文
	贝皮-科伦布水星探测器(BepiColombo) ¹	行星科学
宇宙憧憬 (Cosmic Vision, 2015—2025)	L1:果汁号木星冰卫星探测器(JUICE) ³	空间天文
	L2:雅典娜先进高能天体物理空间望远镜(Athena) ³	
	L3:丽莎引力波探测激光干涉空间天线计划(LISA) ³	
远航2050 (Voyage 2050, 2035—2050)	L4:太阳系巨行星之卫星探测 ⁴	行星科学
	L5:早期宇宙的新物理观测 ⁴	空间天文
	L6:温润的系外行星(temperate exoplanets)或银河系观测 ⁴	

注:¹表示在轨;²表示退役;³表示研发;⁴表示规划。

居系外行星的精细刻画与表征。

5.2 美国天文学新10年调查前瞻空间天文任务

2021年11月,美国科学院(NAS)空间研究委员会(SSB)、物理和天文学委员会(BPA)发布了第7版天文10年调查Astro2020(表3),涉及大型(含

旗舰级)空间望远镜、时域/多信使天文学、地面天文台、引力波/第二代中微子观象台等的项目规划,事关NASA、美国国家科学基金会(NSF)和能源部(DOE)的天基和地基天文未来任务及科学研究预算安排,对各方面影响极大。

表3 美国科学院天文10年调查报告回顾

10年调查报告名称	发布年份	重点推荐的大型空间科学任务示例
地基天文学十年规划 Ground-based Astronomy a ten-year program	1964	—
1970年代的天文学和天体物理学 Astronomy and Astrophysics for the 1970s	1972	哈勃空间望远镜(HST)
1980年代的天文学和天体物理学 Astronomy and Astrophysics for the 1980s	1982	钱德拉空间望远镜(CXO)
天文学和天体物理学十年发现 The decade of discovery in Astronomy and Astrophysics	1991	斯皮策空间望远镜(SST)
新世纪的天文学和天体物理学 Astronomy and Astrophysics in the new millennium	2001	韦布空间望远镜(JWST)
天文学和天体物理学的新世界、新视野 New worlds, new horizons in Astronomy and Astrophysics	2010	罗曼空间望远镜(RST)
2020年代天文学和天体物理学发现之路 Pathways to discovery in Astronomy and Astrophysics for 2020s	2021	红外/可见光/紫外空间望远镜(IR/O/UV)

例如,第6版天文10年调查Astro2010推荐的高型任务均在按计划推进中。大型任务罗曼空间望远镜(RST)计划于2026年发射;关于4个探索者任务,即2个中型探索者任务苔丝(TESS, MIDEX 7)、宇宙历史和再电离时代及水冰分光光度计探测卫星(SPHEREx, MIDEX 9),以及2个小型探索者任务X射线偏振测量卫星(IXPE)、康普顿光谱和成像卫星(COSI),其中TESS和IXPE分别于2018年4月19日、2021年12月9日发射,前者已有诸多科学发现;4个机遇任务(MO)已确定3个,包括银河系/河外星系超长航时气球光谱太赫兹观测台(GUSTO)、“爱丽尔号”系外行星大气红外遥感大型巡天卫星(ARIEL)载荷捐助任务(CASE)、中子星内部组成探测器(NICER,国际空间站ISS搭载),第4个在“卓越号”引力波紫外对应体成像立方星(GUCI)和“跃进号”大面积爆发式偏振仪(LEAP,ISS搭载)两者间择优确定。

Astro2020明确了从2023年至2032年未来10年间的3大优先领域:(1)发现和表征宜居系外行

星,通过高对比度直接成像搜寻生命证据;(2)利用多信使探索早期动态宇宙的新窗口;(3)揭示星系成长的驱动因素。就空间天文领域而言,Astro2020建议研发下一代6 m口径红外/可见光/紫外空间望远镜(IR/O/UV),以及高分辨率X射线成像望远镜(X-ray)和远红外光谱或成像望远镜(Far-IR)任务,其中前者拥有最高优先级,预估需投入110亿美元,在2020年代前期开始研发,2040年代前期发射,对应优先领域(1);后两者同等重要,分别投入约30亿~50亿美元,在2020年代中期开始研发。

鉴于空间天文任务挑战性更高,Astro2020提出了在未来10年里安排12亿美元建立大型任务研发的新程序“大型空间天文台任务和技术成熟计划”,以应对科学技术和预算风险。同时还建议在NASA天体物理学部设立一条新的任务线,即每10年竞争择优遴选一项符合优先领域的中型空间探测器任务,其投资约15亿美元,介于探索者任务(<3亿美元)和大型任务(30亿~110亿美元)之间,类似于行星科学的朱诺号木星任务那样的中型“新

疆域”(New Frontiers)项目,既可以进行科学观测,也可为大型空间天文台研发积累经验。Astro2020还呼吁加强对天文学家及其团队的资助,为年轻科研人员提供更好的支持等。

5.3 月球探索将是未来国际合作重点之一

以阿尔忒弥斯计划(Artemis Plan)、国际月球科研站为代表的本世纪新一轮月球探测,将是未来空间科学国际合作的重点领域(图29)。

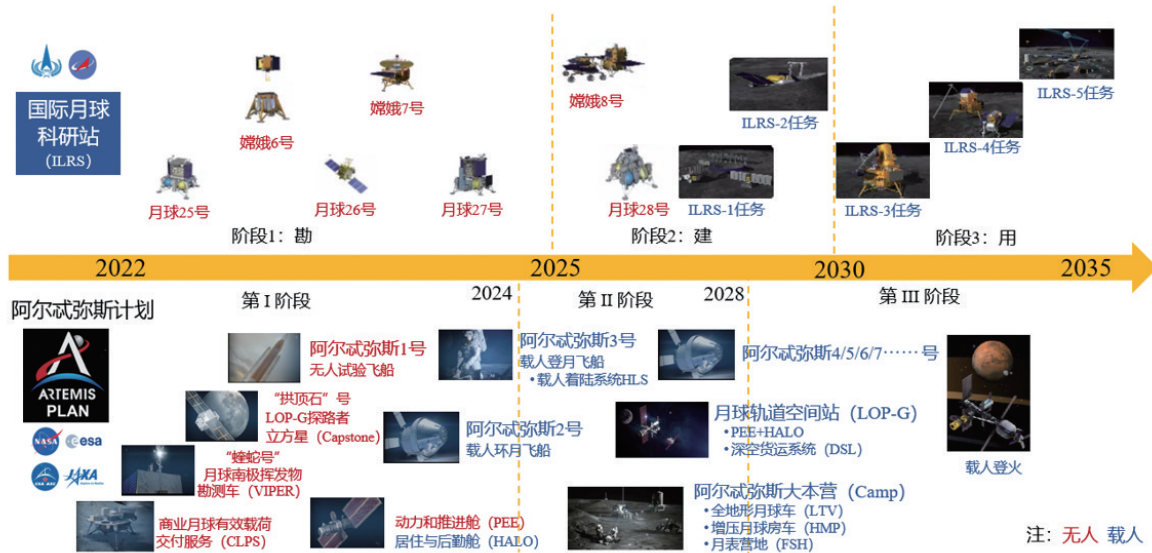


图29 国际月球科研站和阿尔忒弥斯计划简明对比

美国2020年9月发布《可持续的月球探索 and 开发计划》(亦即阿尔忒弥斯计划的大纲),提出将于2024年载人重返月球并登陆月球南极、为商业航天公司建立月球经济奠定基础,最终将人类宇航员送往火星。与此同时,美国在2020年10月主导发起了有关月球探索的阿尔忒弥斯协议(The Artemis Accords),至2021年10月已有澳大利亚、巴西、加拿大、意大利、日本、卢森堡、新西兰、波兰、韩国、乌克兰、阿联酋、英国等12个国家先后签署。

2021年3月,中俄联合发布了《国际月球科研站路线图(V1.0)》和《国际月球科研站合作伙伴指南(V1.0)》,邀请其他国际伙伴在国际月球科研站的规划论证、设计研制、实施、运营等阶段开展广泛合作。国际月球科研站建设分为勘、建、用3个工程阶段,科学目标重点聚焦月球地形地貌与地质构造、月球物理与内部结构、月球化学、地月空间环境、月基天文和对地观测、月基生物医学实验,以及月球资源原位利用等。

5.4 2021年面向未来遴选多项空间科学任务

空间科学任务全生命周期长,从遴选、立项、研

制、发射,到科学运行或实验、产出成果,往往长达十几年、几十年。空间科学任务征集、遴选是万里长征第一步。2021年暑期,中国科学院国家空间科学中心启动了面向“十四五”的空间科学卫星工程项目征集,旨在加快推动中国空间科学卫星系列接续健康发展,围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星四大主题开展前沿探索和研究,实现更多原创重大突破。此外,美欧等也有多项空间科学任务通过遴选(表4)。

2021年10月,NASA完成了Astro2010规划的第2个小型探索者任务(SMEX)遴选,COSI经过历时2年的项目建议征集18进4、任务概念研究4进1的2轮竞争后,成功转入策划阶段(formulation phase)^[67](大致对应中国的立项论证和方案设计),继续研发。COSI扣除发射成本(运载火箭尚未选定)的预算上限1.45亿美元,发射窗口定于2025年。

2021年3月,为了确定未来载人登火的候选着陆点,美意加日4国发起了国际火星冰测绘卫星任务(I-MIM)。而正如我们曾在2020年展望“金星任务或成为下一个热点”那样,2021年NASA和ESA

表4 2021年空间科学领域遴选新任务

任务名称	科学目标	主要科学载荷	任务来源	所属领域
康普顿光谱和成像卫星(COSI)	开展软伽马射线(0.2~5 MeV)巡天,研究恒星诞生和死亡历史,以及银河系化学元素形成	康普顿光谱仪和成像仪	NASA 探索者计划小型任务(SMEX 17)	空间天文
国际火星冰测绘卫星(I-MIM)	探测火星地表浅层冰沉积物的位置、深度、空间范围和丰度,绘制水冰资源地图	L波段极化SAR	美国(NASA)、意大利(ASI)、加拿大(CSA)和日本(JAXA)	
达芬奇+(DAVINCI+)	研究金星大气起源及演化,金星早期是否存在海洋,金星地质构造、火山、气候的演化	紧凑型紫外至可见光成像光谱仪、可见光相机、激光光谱仪、大气结构探测器等	NASA 发现计划(Discovery 17)	行星探测
“真理”号(VERITAS)	研究金星地质演化,探究地质过程和活跃度,搜寻金星过去和现在存在水的证据,绘制金星全球高分辨率地形图	干涉合成孔径雷达、发射率映射器、重力科学仪器包	NASA 发现计划(Discovery 18)	
“展望”号(EnVision)	聚焦金星大气,并发现金星表面可能存在火山活动热点区域	S波段合成孔径雷达,地下雷达探测仪,红外成像仪,红外/紫外光谱仪	ESA 宇宙憧憬规划 M5 任务	
“和谐”地球科学卫星(Harmony)	观测和评估海-气界面的最小运动,例如风、浪和表层流以及构造变形、高度变化等固体地球变化	2颗,无源合成孔径雷达,多光束红外热像仪	ESA 地球探索者计划(Earth Explorer 10)	空间地球科学
水文全球导航卫星系统反射测量卫星(HydroGNSS)	测量关键水文气候变量,包括土壤湿度、冻土冻融状态、洪水和湿地以及地上生物量	GNSS反射计	ESA 侦查兵计划(Scout-2)	

牵头的3个金星探测任务(表4)均在6月获得支持,承载了科学界通过金星这个“失落的宜居世界”更好地了解宜居地球和系外行星的愿望。

为应对全球变化挑战,美欧空间地球科学卫星持续前瞻布局。

根据美国科学院2018年1月发布的空间对地观测10年调查报告建议,2021年5月NASA宣布实施由系列科学卫星组成的“地球系统空间观象台”(Earth System Observatory)任务,绘制从地球基岩到大气三维(3D)整体视图,为全球能量平衡、气候变化、减灾、地表生物学和地质学等研究提供关键信息。该任务的核心观象台即将进入策划阶段,而NASA与ISRO合作的双频合成孔径雷达卫星

(NISAR)作为首发任务,预计2023年初发射。

2021年2月,ESA从3项候选任务中遴选出“和谐”地球科学卫星(Harmony,2颗星),作为地球探索者计划第10项任务(Earth Explorer-10),旨在解决海洋、冰和陆地变化相关科学问题。作为地球探索者计划补充的侦查兵任务(Scout),继2020年12月批准首发任务——地球系统过程大气监测立方星座(ESP-MACCS,3颗12U立方星)后,2021年3月又遴选出第2项任务——水文全球导航卫星系统(GNSS)反射测量卫星(HydroGNSS)。此外,6月ESA还从15项提案中遴选出4项作为“地球探索者”第11项任务的候选项目进入初步可行性研究阶段(pre-feasibility study),它们分别是“凯尔特

号”大气变化红外层析成像卫星(Cairt,爱尔兰语,意为天气图)、“氮”卫星(Nitrosat)、测云风速雷达卫星(Wivern)和“海洋之星”卫星(Seastar)。

我们注意到,尽管美国已经发展了类型完备、学科全面的空间科学计划,但它依然不断拓宽空间科学任务渠道。NASA 2020年开始新设立针对小型空间天文任务的先锋计划(The Pioneers Program),用于支持研发小型卫星、科学气球搭载大型有效载荷和国际空间站搭载中型有效载荷,以填补独立的探索者计划和亚轨道平台间的空白,该渠道虽与气球、火箭和探索者计划的机遇项目(MO)有重叠,但其独特之处在于提供了高达2000万美元的资助额度,专为职业生涯起步至中期的科研人员首次领导空间或亚轨道科学任务而设计,对于加速培养探索者计划新首席科学家、产出重要科学成果均有重要意义。2021年1月,NASA首次遴选4个

项目开展任务概念研究:“苦旅号”(Aspera)星系演化远紫外探测小卫星、“潘多拉号”(Pandora)系外行星大气可见光/红外探测小卫星、“星爆”(StarBurst)中子星并合伽马射线暴小卫星等3个小型科学卫星,以及南极气球中微子探测“鸚号”(PUEO)超高能观测有效载荷。

5.5 2022年多个空间科学任务发射值得期待

2022年已初步明确的空间科学任务发射逾10次(含搭载),世界空间科学主要国家/地区悉数登场,沿着重大科学目标牵引的主路阔步向前。其中,空间天文任务将聚焦宇宙加速膨胀、高能天体等科学前沿,日球层物理将见证中国打开Lyman- α 成像观测新窗口,空间地球科学领域将针对地球系统多要素开展综合探测。韩国月球轨道器“探路者”(KPLO)属于新面孔(表5)。

表5 2022年世界新增主要空间科学发射任务

任务名称	科学目标	主要科学载荷	任务来源	领域
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,更好地理解暗能量和暗物质	可见光成像仪,近红外光谱仪和光度计	ESA宇宙憧憬规划中型任务(M2),NASA提供部分载荷	空间天文
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	软X射线光谱仪和成像仪	JAXA和NASA联合,ESA参与	
先进天基太阳天文台(ASO-S)	聚焦“一磁两暴”,国际首次开展全日面矢量磁场、耀斑非热辐射成像和Lyman- α 波段CME近日面传播的同时观测,研究三者间的相互关系	全日面矢量磁像仪、Lyman- α 望远镜、硬X射线成像仪	中国科学院空间科学先导专项	日球层物理
火星生命探测计划2022(ExoMars 2022)	研究火星气候、大气和辐射,通过钻取火表2 m以下原始土壤样本寻找生命迹象	罗莎琳德·富兰克林号火星车,哥萨克号着陆器	ESA与Roscosmos联合,NASA提供火星有机分子分析仪等载荷	
韩国月球轨道器探路者(KPLO)	探测月球环境、地形和资源	月球地形成像仪、广角偏振相机、磁强计、 γ 射线谱仪、高分辨相机	韩国航空宇宙研究院(KARI),NASA提供高分辨相机(ShadowCam)	行星科学
“灵神号”小行星探测卫星(Psyche)	探测位于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、 γ 射线和中子星光谱仪等	NASA发现计划任务(Discovery 15)	
地表水和海洋测高卫星(SWOT)	全球地表水调查(TWH),海面高精度测绘(SSH),评估陆地水资源、跟踪区域海平面变化、监测沿海过程,观测尺度洋流和涡流等	Ka波段雷达干涉仪	美国(NASA)和法国(CNES)联合,加拿大(CSA)和英国(UKSA)参与	空间地球科学

由于预算不足、技术困难及新冠疫情等诸多原因而推迟的欧俄联合“火星生命探测计划 2022”(ExoMars 2022)、俄罗斯“月球 25 号”(Luna-Glob)和印度“月船三号”(Chandrayaan-3)探测任务,以及日本月球探测智慧着陆器(SLIM)高精度软着陆技术验证任务各自表示列入 2022 年发射计划,可参见 2020 年回眸^[68]。

ExoMars 2022 任务,即原 ExoMars 2020 任务,包括“罗莎琳德·富兰克林号”(以英国发现 DNA 双螺旋结构的女科学家命名)火星车及“哥萨克号”着陆器,ESA 负责火星车研制及着陆器 GNC 部分设备,Roscosmos 负责提供着陆器大部分硬件设备。任务发射窗口从 2022 年 9 月 20 日开启并持续 12 d,预计 2023 年中抵达火星。

“欧几里得”(Euclid)空间望远镜主镜口径 1.2 m,质量为 2.16 t,运行在日地拉格朗日 L2 点。先进天基太阳天文台(ASO-S)是中国首颗综合性太阳观测科学卫星,质量约 1 t,运行在高度为 720 km 的晨昏太阳同步轨道。

此外,2022 年 NASA 的“阿尔忒弥斯 1 号”无人试验飞船、月球轨道空间站(LOP-G)“探路者”立方星拱“顶石号”(Capstone)将发射,其商业月球有效载荷交付服务(CLPS)也计划分别发射天体机器人公司(Astrobotic)的“游隼号”(Peregrine)着陆器、直觉机器公司(Intuitive Machines)的新星-C 月球着陆器(Nova-C)(IM-1&2 计 2 次任务,月球极地资源与冰开采实验 Prime -1 为主载荷),这些空间活动将成为“阿尔忒弥斯”计划第一阶段的重要进展。

6 结论

空间科学与深空探测是人们仰观天文俯察地理的时代选择。如果说 1609 年伽利略第 1 次把望远镜指向星空拉开了现代科学革命序幕,那么 1957 年太空时代的开启则让空间科学开始涉及几乎全部自然科学领域,日益成为天文、地理、物理、化学和生命等传统学科前沿方向或重要分支的集

大成者,是新知识、新理论、新发现的试验田。空间天文台不仅仅是人视觉的一种拓展,更是人类思想的一种延伸,让我们去探究星系、恒星、行星乃至生命的诞生演化,关乎“我是谁,我从哪里来”的科学和哲学思考。空间科学探索,表面看是一颗卫星、一辆漫游车在月球、火星或行星际空间游弋,实际更是成就它们的航天工程师和空间科学家群体的延伸,它们在地外世界竖起了人类意识的闪亮灯塔,是人类上下求索“梦与远方”。

2021 年诺贝尔物理学奖首次颁给大气与海洋领域的 3 位科学家,其中德国科学家克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)因“建立地球气候的物理模型、量化其可变性并可靠地预测全球变暖”而获奖。他被 ESA 尊称为欧洲第 1 个空间对地观测任务“欧洲遥感卫星 1 号”(ERS-1)的父辈之一,正是这颗卫星奠定了人类认知行星地球的关键,为陆地、海洋和大气、冰监测领域的现代空间技术铺平了道路,而 ERS-1、ERS-2 卫星编队在轨 30 年来已为 5000 多个项目提供了数据支撑,产出了 4000 余篇科学论文,极大增进了地球系统科学发展,加深了对人类活动影响环境的认识。

当前,空间科学正大踏步迈入多信使探索新时代(图 30)。“中国在该领域虽然在近几年取得了长足的进步,但仍处于起步阶段,与航天强国相比还有巨大差距”,中国空间科学领军人物对此有着清晰的判断,“我们不能局限于现在的天问一号和嫦娥五号,我们要走得更远,走得更高”,让发达的空间科学成为本世纪中叶中国航天强国、科技强国建成的先行标志^[69]。在暗物质与暗能量、中低频引力波、宇宙黑暗时代等这些关乎时空本质的重大基础前沿上,中国空间站巡天望远镜即将升空^[70]，“太极一号”“天琴一号”完成了探路者技术试验……与世界空间科学强国对标,加快自身发展既是国家战略,也是科学界共识。2021 年过去了,但空间科学探索仍让我们对未知保持好奇、对未来充满想象,矢志更深更远,一起向未来。

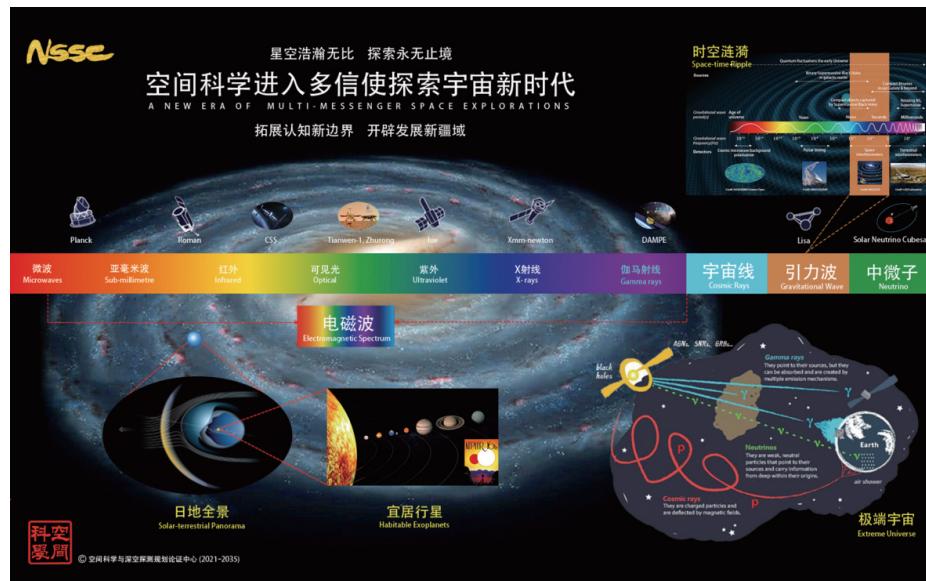


图30 空间科学进入多信使探索宇宙新时代

参考文献 (References)

- [1] Wang X Y, Zheng X T, Xiao S, et al. GRB 210121A: A typical fireball burst detected by two small missions[J]. The Astrophysical Journal, 2021, doi: 10.3847/1538-4357/ac29bd.
- [2] 范全林, 白青江, 时蓬. 关于空间科学概念的若干考证[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 100-114.
- [3] Conroy C, Naidu R P, Garavito-Camargo N, et al. All-sky dynamical response of the Galactic halo to the Large Magellanic Cloud[J]. Nature, 2021, 592(7855): 534-536.
- [4] Kuhn M A, Benjamin R A, Zucker C, et al. A high pitch angle structure in the Sagittarius Arm[J]. Astronomy & Astrophysics, 2021, doi: 10.1051/0004-6361/202141198.
- [5] Montalbán J, Mackereth J T, Miglio A, et al. Chronologically dating the early assembly of the milky way[J]. Nature astronomy. 2021, 5: 640-647.
- [6] Zhao G, Chen Y Q. Low- α metal-rich stars with sausage kinematics in the LAMOST survey: Are they from the Gaia-Sausage-Enceladus galaxy?[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2021, 64(3): 13-26.
- [7] 徐玉朋, 陈勇, 董永伟. 探索极端宇宙——从HXMT到eXTP和HERD[J]. 现代物理知识, 2021, 33(2): 12-21.
- [8] Stein R, van Velzen S, Kowalski M, et al. A tidal disruption event coincident with a high-energy neutrino[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(5): 510-518.
- [9] Connor T, Bañados E, Stern D, et al. Enhanced X-ray emission from the most radio-powerful quasar in the universe's first billion years[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2021, 911(2): 120-131.
- [10] Shi F Z, Li Z Y, Yuan F, et al. An energetic hot wind from the low-luminosity active galactic nucleus M81* [J]. Nature Astronomy, 2021, 5(9): 928-935.
- [11] Wilkins D R, Gallo L C, Costantini E, et al. Light bending and X-ray echoes from behind a supermassive black hole[J]. Nature, 2021, 595(7869): 657-660.
- [12] Paynter J, Webster R, Thrane E. Evidence for an intermediate-mass black hole from a gravitationally lensed gamma-ray burst[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(6): 560-568.
- [13] Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(4): 378-384.
- [14] You B, Tuo Y L, Li C Z, et al. Insight-HXMT observations of jet-like corona in a black hole X-ray binary MAXI J1820+070[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1025.
- [15] Weng S S, Cai Z Y, Zhang S N, et al. Time-lag between disk and corona radiation leads to hysteresis effect observed in black hole X-ray binary MAXI J1348-630[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2021, 915(1): L15.
- [16] Delrez L, Ehrenreich D, Alibert Y, et al. Transit detection of the long-period volatile-rich super-Earth ν^2 Lupi d with CHEOPS[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(8): 775-787.

- [17] Hedges C, Hughes A, Zhou G, et al. TOI-2076 and TOI-1807: Two young, comoving planetary systems within 50 pc identified by TESS that are ideal candidates for further follow up[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, 162(2): 54.
- [18] Stefano R, Berndtsson J, Urquhart R, et al. A possible planet candidate in an external galaxy detected through X-ray transit[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(12): 1297-1307.
- [19] Hiramatsu D, Howell D, Van Dyk S D, et al. The electron-capture origin of supernova 2018zd[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(9): 903-910.
- [20] Ritter A, Parker Q A, Lykou F, et al. The remnant and origin of the historical supernova 1181 AD[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 918(2): L33.
- [21] Alfvén H. Existence of electromagnetic-hydrodynamic waves[J]. *Nature*, 1942, 150(2): 405-406.
- [22] Kasper J C, Klein K G, Lichko E, et al. Parker Solar Probe enters the magnetically dominated solar corona[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(25): 255101.
- [23] Chen Y J, Przybylski D, Peter H, et al. Transient small-scale brightenings in the quiet solar corona: A model for campfires observed with Solar Orbiter[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 656: L7.
- [24] Vadawale S V, Mithun N P S, Mondal B, et al. Observations of the quiet sun during the deepest solar minimum of the past century with Chandrayaan-2 XSM: Sub-a-class microflares outside active regions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 912: L13.
- [25] Bahaiddin S M, Bradshaw S J, Winebarger A R. The origin of reconnection-mediated transient brightenings in the solar transition region[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 237-245.
- [26] Zhang Q H, Zhang Y L, Wang C, et al. A space hurricane over the Earth's polar ionosphere[J]. *Nature communications*, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-21459-y.
- [27] Ocker S K, Cordes J M, Chatterjee S, et al. Persistent plasma waves in interstellar space detected by Voyager 1 [J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(8): 761-765.
- [28] Uritsky V M, Deforest C E, Karpen J T, et al. Plumelets: Dynamic filamentary structures in solar coronal plumes [J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 907(1): 1.
- [29] Mason E I, Antiochos S K, Vourlidas A. An observational study of a "Rosetta stone" solar eruption[J]. *The Astrophysical Journal Letter*, 2021, 914(1): L8.
- [30] Gizon L, Cameron R H, Bekki Y, et al. Solar inertial modes: Observations, identification, and diagnostic promise[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 652: L6.
- [31] Simon A A, Hueso R, Sánchez-Lavega A, et al. Midsummer atmospheric changes in Saturn's northern hemisphere from the Hubble OPAL program[J]. *The Planetary Science Journal*, 2021, 2(2): 47.
- [32] 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.
- [33] Knapmeyer-Endrun B, Panning M P, Bissig F, et al. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 438-443.
- [34] Khan A, Ceylan S, Driel M, et al. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 434-438.
- [35] Stähler S C, Amir K, Banerdt B W, et al. Seismic detection of the Martian core[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 443-448.
- [36] Cottar S, Koelemeijer P. The interior of Mars revealed [J]. *Science*, 2021, 373(6553): 388-389.
- [37] Mars from the InSight out[EB/OL]. [2021-12-07]. <https://eos.org/articles/mars-from-the-insight-out>.
- [38] Hobiger M, Hallo M, Schmelzbach C, et al. The shallow structure of Mars at the InSight landing site from inversion of ambient vibrations[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6756.
- [39] Bristow T F, Grotzinger J P, Rampe E B, et al. Brine-driven destruction of clay minerals in Gale crater, Mars [J]. *Science*, 2021, 373(6551): 198-204.
- [40] Millan M, Teinturier S, Malespin C A, et al. Organic molecules revealed in Mars's Bagnold Dunes by Curiosity's derivatization experiment[J]. *Nature Astronomy*, 2021, doi: 10.1038/s41550-021-01507-9.551): 198-204.
- [41] 王琴, 时蓬, 范全林. 21世纪火星探测科学发现与未来展望[J]. *现代物理知识*, 2020, 32(6): 3-17.
- [42] Mangold N, Gupta S, Gasnault O. Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars[J]. *Science*, 374(6568): 711-717.
- [43] Scheller E L, Ehlmann B L, Hu R Y, et al. Long-term drying of Mars by sequestration of ocean-scale volumes of water in the crust[J]. *Science*, 2021, 372(6537): 56-62.
- [44] Yang Y Z, Li S, Zhu M H, et al. Impact remnants rich in carbonaceous chondrites detected on the Moon by the

- Chang'e-4 rover[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(11): 1–18.
- [45] Gou S, Yue Z Y, Di K C, et al. Geologically old but freshly exposed rock fragments encountered by Yutu-2 rover[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(3), doi: 10.1029/2020JE006565.
- [46] Xie L H, Li L, Zhang A B, et al. Inside a lunar mini-magnetosphere: First energetic neutral atom measurements on the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, doi: 10.1029/2021GL093943.
- [47] Li C L, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by Chang'e-5 mission[J]. *National Science Review*, 2021, doi: 10.1093/nsr/nwab188.
- [48] Che X C, Nemchin A, Liu D Y, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5[J]. *Science*, 2021, 374(6569): 887–890.
- [49] Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 54–58.
- [50] Tian H C, Wang H, Chen Y, et al. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 59–63.
- [51] Hu S, He H C, Ji J L, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 49–53.
- [52] Moriarty III P, Dygert N, Valencia S, et al. The search for lunar mantle rocks exposed on the surface of the Moon[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4659.
- [53] Moriarty D P, Watkins R N, Valencia S N, et al. Evidence for a stratified upper mantle preserved within the South Pole-Aitken Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 126(1), doi: 10.1029/2020JE006589.
- [54] Fukuya K, Imamura T, Taguchi M, et al. The nightside cloud-top circulation of the atmosphere of Venus[J]. *Nature*, 2021, 595(7868): 511–515.
- [55] Stenborg G, Gallagher B, Howard R, et al. Pristine PSP/WISPR observations of the circumsolar dust ring near Venus's orbit[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 910(2): 157.
- [56] Collinson G, Ramstad R, Glozer A, et al. Depleted plasma densities in the ionosphere of Venus near solar minimum from Parker Solar Probe observations of upper hybrid resonance emission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(9): e2020GL092243.
- [57] Yao Z H, Dunn W R, Woodfield E E, et al. Revealing the source of Jupiter's x-ray auroral flares[J]. *Science Advances*, 2021, 7(28): eabf0851.
- [58] Bonfond B Z, Yao Z H, Gladstone G, et al. Are dawn storms Jupiter's auroral substorms? [J]. *AGU Advances*, 2021, 2(1): 1–14.
- [59] Zhang B, Delamere P A, Yao Z H, et al. How Jupiter's unusual magnetospheric topology structures its aurora[J]. *Science Advances*, 2021, 7(15): eabd1204.
- [60] O' Donoghue J, Moore L, Bhakyaipaul T, et al. Global upper-atmospheric heating on Jupiter by the polar aurorae[J]. *Nature*, 2021, 596(7870): 54–57.
- [61] Bolton S J, Levin S M, Guillot T, et al. Microwave observations reveal the deep extent and structure of Jupiter's atmospheric vortices[J]. *Science*, 2021, 374(6570): 968–972.
- [62] Parisi M, Kaspi Y, Galanti E, et al. The depth of Jupiter's Great Red Spot constrained by Juno gravity overflights[J]. *Science*, 2021, 374(6570): 964–968.
- [63] 苏晓华, 时蓬, 白青江, 等. 空间地球科学卫星发展及应用[J]. *卫星应用*, 2021(7): 21–29.
- [64] Pascolini-Campbell M, Reager J T, Chandanpurkar H A, et al. A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019[J]. *Nature*, 2021, 593(7860): 543–547.
- [65] Loeb N, Johnson G, Thorsen J, et al. Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, doi: 10.1029/2021GL093047.
- [66] 2021—2030 地球科学发展战略研究组. 2021—2030 地球科学发展战略: 宜居地球的未来、现在与过去[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [67] 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.
- [68] 时蓬, 王琴, 白青江, 等. 2020 年深空探测热点回眸[J]. *科技导报*, 2021, 39(1): 69–87.
- [69] 范全林, 宋婷婷, 时蓬, 等. 发达的空间科学是航天强国的重要标志[J]. *航天政策研究*, 2021(4): 2–7.
- [70] Gu Y D. China space station: New opportunity for space science[J]. *National Science Review*, 2021, doi: 10.1093/nsr/nwab219.

Review of 2021 global space science activities

SHI Peng, BAI Qingjiang, WANG Qin, LI Ming, FAN Quanlin*

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

Abstract Space science exploration in 2021 achieved fruitful outcoming. In this article we review the major results based on the data of space science missions, mainly in categories of astrophysics, heliophysics, planetary science and space earth science. Besides, we analyze the outstanding engineering success and science achievement of several solar system probes. These results include but not limited to: the man-made satellite for the first time touched the solar corona, a space hurricane in the Earth polar cap region was detected, two-billion-year-old lunar basalts sampling helped to better understand the lunar evolution history, Martian seismic data revealed the deep interior of Mars, persistent plasma waves were detected in interstellar space, and a new all-sky map of Milky Way was charted. Looking into the future, we also analyze two very important strategic plans released in that year, i.e., European Space Agency's Voyager 2050 and National Academy of Sciences' Astro2020. As to new-born Chinese space science missions, the science data of DAMPE mission was released, and science missions like Insight-HXMT and Chang'e 5 were yielding world-class output.

Keywords space science; scientific satellite; solar system probe; 2021 hotspot; discovery ●



(责任编辑 王丽娜)