

2021年天文学热点回眸

赵雪杉^{1,2}, 邓舒夏¹, 苟利军^{1,2*}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

2. 中国科学院大学天文和空间科学学院, 北京 100049

摘要 回顾了2021年天文学领域取得的重大进展, 盘点了一系列重大的成果和事件: 在火星探测方面, 多国探测器相继抵达火星并开展科学研究, “洞察号”首次揭秘火星内部构造; 中国高海拔宇宙线观测站(LHAASO)观测到1.4 PeV能量的光子; “悟空号”取得氦核70 GeV至80 TeV能段的精确能谱; 冰立方中微子天文台(IceCube)捕捉到与潮汐瓦解事件相关的中微子并探测到格拉肖共振事件的粒子簇射; 科学家发现宇宙早期暗能量存在的迹象; 发布“嫦娥五号”月球样本的最新研究成果; 在青海冷湖地区发现世界级光学台址, 改善了目前国际所有优良光学天文观测台都位于西半球的局面; 首次探测到明确来自黑洞-中子星并合的引力波; 发现部分快速射电暴可能起源于磁陀星的观测证据, 500 m口径球面射电望远镜(FAST)对FRB 121102进行了深入研究; 在黑洞研究方面, 科学家为超大质量黑洞提供了一种新的质量测量手段, 事件视界望远镜(EHT)发布了M87黑洞偏振图像; 在空间天文学方面, 韦布空间望远镜发射成功, 中国首颗太阳探测科学技术试验卫星“羲和”飞向太阳等。

关键词 火星; 宇宙线; 嫦娥五号; 快速射电暴; 中微子

1 火星探索

火星是地球在太阳系中的近邻行星, 与地球存在许多相似的特性, 了解火星的起源和演化对于人类认知太阳系以及系内行星的形成和演化具有重要的科学价值。许多研究表明, 火星曾经存在水, 并一度出现宜居环境, 火星是否曾经孕育生命也是天文学界的重要议题。自1960年苏联发射人类首颗火星探测器(火星-1960A)的半个多世纪以来,

人类一直奋斗在通往火星的道路上^[1]。

2020年7月23日, “天问一号”探测器搭载长征五号运载火箭在中国文昌航天发射场点火起飞, 执行中国首次自主火星探测任务。2021年2月10日, “天问一号”探测器成功实施近火捕获制动, 进入环火轨道, 成为中国第一颗人造火星卫星, 完成“绕、着、巡”第一步“绕”的目标。无独有偶, 当日凌晨(阿联酋当地时间2月9日20:00许), 阿联酋“希望号”成功进入环火轨道, 由日本H-2A运载火箭

收稿日期: 2021-12-25; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1838114)

作者简介: 赵雪杉, 博士研究生, 研究方向为恒星级黑洞的基本性质, 电子信箱: xszhao@nao.cas.cn; 邓舒夏(共同第一作者), 编辑, 研究方向为科学传播与国际传播, 电子信箱: 821550081@qq.com; 苟利军(通信作者), 研究员, 研究方向为高能天体物理、黑洞和引力波等, 电子信箱: lgou@nao.cas.cn

引用格式: 赵雪杉, 邓舒夏, 苟利军. 2021年天文学热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 52-63; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.01.003

搭载的“希望号”从日本种子岛太空中心发射升空,“希望号”是2020年7月发射的3个(“天问一号”“希望号”以及“毅力号”)目的地为火星的探测器之一,它将持续环绕火星飞行,对火星的大气进行1个完整火星年(约为687个地球日)的分析。美国的“毅力号”火星车于2021年2月19日(美国东部时间2月18日15:55)安全着陆在火星上的耶泽罗陨击坑(Jezero Crater),数十亿年前,这里曾是河流三角洲的所在地。“毅力号”的目标是采集火星岩石样本,搜寻生命存在的痕迹,它已经于2021年9月成功采集到第一个样本。目前美国国家航空航天局(NASA)和欧洲航天局(ESA)正在计划一系列复杂的任务,以期将“毅力号”收集的样本送回地球,

不过这些样本到达地球最早也要到2031年。

2021年5月15日7:18,经过295天的太空飞行后,“天问一号”着陆巡视器与环绕器分离,成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区。“祝融号”火星车于5月22日10:40安全驶离着陆平台,开启火星表面巡视探测工作(图1)^[1]。同时,环绕器继续在中继轨道运行,为火星车的科学探测提供中继通信,兼顾开展环绕探测。截至2021年8月15日,“祝融号”累计在火星表面运行90个火星日(约92个地球日),共计行驶889 m,已经圆满完成既定的巡视任务,获取了大量原始数据,但它并没有停下探索的脚步,而是继续向着着陆平台南部的古海陆交界地带行驶,实施拓展任务。

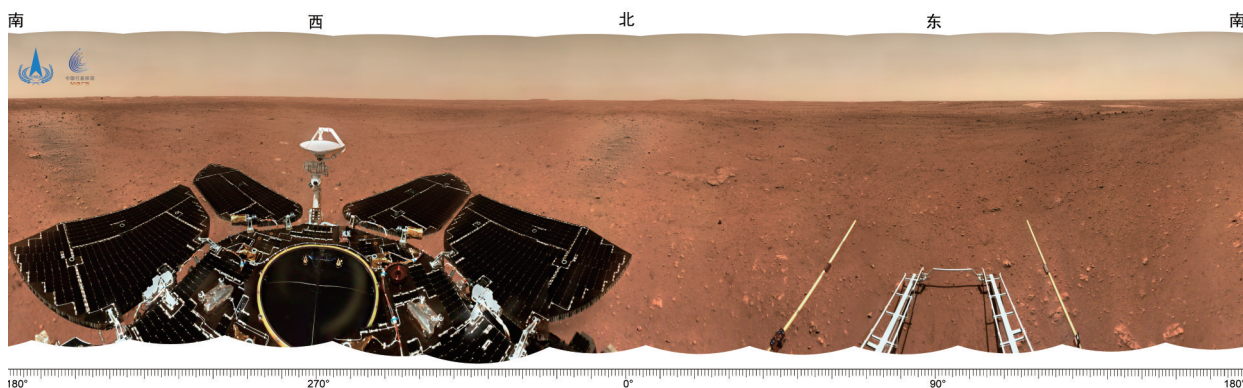


图1 由“祝融号”火星车拍摄的着陆点全景

2021年9月下旬到10月中旬,火星进入日凌期,此时地球、火星、太阳位于一条直线,由于太阳对地火通信的干扰和阻碍,火星探测器和地球失联。日凌阶段结束后,各探测器相继恢复通信,继续工作。火星探测器收集的信息和数据被逐步传回地球,全国各地的科学团队正紧张而有序地开展研究工作,预期未来将发布更多具有科学意义的成果。

未来两年,火星还将迎来一位新客人。俄罗斯宇航局和欧洲航天局联合开展的ExoMars任务计划预计在2022年9月发射,并于2023年6月抵达火星,致力于探索火星上是否曾经存在生命的问题。

另一方面,在美国东部时间2018年11月26日登陆火星的“洞察号”无人探测器也带来了一系列振奋人心的科学成果——2021年7月23日,《Science》杂志发布的系列文章揭示了火星内部的

结构图,并提供了热学和动力学演化的重要线索^[3-6]。研究发现,火星地壳可能有2~3层,从着陆点的数据外推,整个火星地壳的平均厚度大概在24~72 km,地幔相对较薄。火星具有一个半径约为1830 km的液态金属核,其中除了铁和镍外,还溶解了大量较轻的元素。

凭借诸多探测器的帮助,人类正在揭开这颗红色星球的神秘面纱。

2 宇宙线研究进展

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子流的统称,其中绝大部分是质子(氢核,~90%),还包含少数 α 粒子(氦核,~9%)等成分,能量跨越了吉电子伏特(GeV,10亿电子伏特)到拍电子伏特(PeV,千万

亿电子伏特)。它们来源于何处? 为什么会有这么高的能量? 它们在哪里被加速? 这些问题在天文学界仍然未有定论。对于宇宙线及其天体物理起源的研究, 由于涉及了粒子的传播、加速机制、辐射机制和动力学演化等一系列复杂的物理过程, 通常需要联合多信使协同观测, 因此尤为困难。

2.1 开启超高能伽马天文学时代

宇宙线的光谱可以延伸至超过 1 PeV, 这表明宇宙中存在所谓的“PeVatron”, 它可以将粒子加速到 PeV 能量, 比欧洲核子研究中心的大型强子对撞机加速器所能达到的能量还要高约 100 倍。

2021年3月1日, 中日合作团队报告称, 利用中国西藏羊八井 AS γ 实验阵列发现了来自超新星遗迹 SNR G106.3+2.7 方向、能量超过 100 TeV (TeV, 万亿电子伏特) 的伽马射线。对这一观测现象的可能解释是, 被加速到 PeV 的宇宙线 (主要成分是质子) 和附近的分子云碰撞产生中性 π 介子, π 介子衰变产生观测到的高能伽马射线, 因此 SNR G106.3+2.7 成为一个 PeVatron 候选体^[7]。此外, 3月底发表在《Nature Astronomy》的一篇论文中报道, 研究人员使用美国的高海拔水体切伦科夫天文台 (High-altitude Water Cherenkov Observatory, HAWC) 在 1~100 TeV 能区观测到了来自天鹅座 α 的伽马射线^[8]。

天文学家一步步挑战观测的极限, 高海拔宇宙线观测站 (Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO) 在其中发挥了举足轻重的作用 (图 2)^[9]。LHAASO 是中国的国家重大科技基础设施, 位于四川稻城海拔 4410 m 的海子山上, 是西藏羊八井 AS γ 实验的后续项目, 能量范围和灵敏度要比羊八井 AS γ 实验阵列高 1 个数量级以上。LHAASO 的主体工程于 2017 年 11 月动工, 2020 年 1 月完成了 1/2 规模的建设并投入运行, 2020 年 12 月完成 3/4 规模并投入运行。仅仅基于一半的建设规模和不到 1 年的观测数据, LHAASO 就从 12 个超高能伽马射线源中探测到了超过 530 个能量高于 100 TeV 的光子, 其中最高能量的光子来自天鹅座内非常活跃的恒星形成区, 能量可达 1.4 PeV, 是人类迄今观测到的最高能量光子, 相关成果于 2021 年 5 月 17 日发表在《Nature》杂志上^[10]。LHAASO 阵列预计将



图2 LHAASO 观测基地全景航拍

于 2021 年底全面建成, 并投入长期运行, 随着持续不断的数据积累, 必将给我们展现出一个全新的超高能宇宙。

2.2 “悟空号”对宇宙线能谱的精确探测

“悟空号”暗物质粒子探测卫星 (Dark Matter Particle Explorer, DAMPE) 于 2015 年 12 月 17 日在酒泉卫星发射中心搭载长征二号丁运载火箭发射升空, 它具有先进的科学探测指标——观测能段宽, 空间和能量分辨率高, 粒子鉴别能力强, 具备精确探测电子、伽马射线及核素等宇宙高能射线的的能力。因此, “悟空号”肩负着探究宇宙线物理的使命。

自运行以来, “悟空号”积累了大量高质量的观测数据。2019 年, “悟空号”基于前 2 年半的观测数据, 发布了质子宇宙线 40 GeV~100 TeV 能段的精确能谱, 并以高置信度在 14 TeV 附近观测到能谱的拐折, 这一研究于 2019 年 9 月 27 日发表在《Science》的子刊《Science Advances》上^[11]。2021 年 5 月, 基于前 4 年半的在轨观测数据, “悟空号”再次取得了突破性的成果, 得到了宇宙线氦核 70 GeV 至 80 TeV 能段的精确能谱, 并在 34 TeV 附近发现一拐折结构, 相关研究发表于《Physical Review Letters》上^[12]。质子能谱和新得到的氦核能谱中均出现了拐折结构, 拐折的位置表现出了电荷依赖的特征, 这预示着二者可能来自于邻近地球的某个宇宙线加速源, 而拐折结构对应于该源的加速上限。目前“悟空号”进入了二次延寿运行阶段, 卫星的各个载荷运行状态良好, 各项指标均很正常, 有望为破解高能宇宙线起源和加速之谜作出重要贡献。

2.3 高能中微子助力追溯宇宙线源

中微子是构成物质世界最基本的粒子之一。目前学界广泛承认的被准确定位的中微子天体物

理源共有2个,分别是太阳和位于大麦哲伦云中的超新星SN 1987A(图3)^[13],两者的中微子均来自于天体内部的热核反应过程,能量在兆电子伏特(MeV,百万电子伏特)量级。此外,高能宇宙线在源或传播路径中,会与光子或周围物质粒子发生相互作用,产生高能中微子(能量可达TeV~PeV量级)。宇宙线与光子的相互作用能产生不稳定且带电荷的 π^+ 介子, π^+ 介子会衰变产生 μ^+ 子及相应的中微子,而 μ^+ 子会进一步衰变产生正电子及相应的中微子。宇宙射线与原子核粒子的相互作用能产生带电荷的 π^\pm 介子,进而衰变产生中微子。值得一提的是,正如前文中所涉及的,这些过程中会伴随产生中性 π 介子,而 π 介子的衰变则会产生高能伽马光子。



图3 哈勃太空望远镜拍摄的超新星遗迹SN 1987A
(遗迹位于图片的中心,2017年1月)

对于追溯宇宙线起源天体、揭秘宇宙线加速机制而言,高能中微子具有其他信使所不具备的优越特质:不带电,不会在磁场作用下发生偏转,而质子的指向性就差得多;高能中微子几乎不与其他物质发生相互作用,而光子在通过大气层时会发生簇射。

目前在运行的最高灵敏度和高分辨率的中微子探测器,是位于南极阿蒙森-斯科特站冰盖以下的冰立方中微子天文台(IceCube Neutrino Observatory, IceCube),它利用的是中微子和冰相互作用产生的带电粒子在穿过传感器时发出的切伦科夫辐射光。自2010年以来,IceCube一直在探测高能中微子,迄今为止虽然已经捕获了许多例高能中微子

事件,但很难准确定位它们的来源。此前在2018年,天文学家报道了一个可能与耀变体TXS 0506+056成协的高能中微子事件(能量约为290 TeV,是IceCube在2017年9月22日捕捉到的)。2021年2月,一项发表于《Nature Astronomy》的研究提出了新一类的宇宙射线源——潮汐瓦解事件^[14-15]。中微子IC191001A是由IceCube于2019年10月1日探测到的,它的能量约为0.2 PeV,被认为可能来源于潮汐瓦解事件AT2019dsg。

观测技术和设备的更新换代推进了探测极限,中微子和超高能伽马光子天文学的发展开拓了探测的空间,引领我们一步步探索和发现银河系内外宇宙线的加速机制和基本物理。

3 发现宇宙反中微子存在的痕迹

在中微子探测方面,IceCube(图4)^[16]取得了另一项重大突破,它探测到了宇宙反中微子存在的痕迹。中微子分为3个类型,分别是电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子。60多年前,理论物理学家谢尔顿·格拉肖(Sheldon Glashow)利用粒子物理学标准模型预测,在电子和电子反中微子(电子中微子的反物质粒子)的碰撞时,如果电子反中微子的能量恰当,就会通过共振过程形成一种当时尚未发现的粒子——W-玻色子,现在这个过程被称为格拉肖共振(Glashow resonance)。撞击电子的反中微子的能量峰值需要达到6.3 PeV左右,无法在人造粒子加速器中产生,但能在宇宙天然的粒子加速器

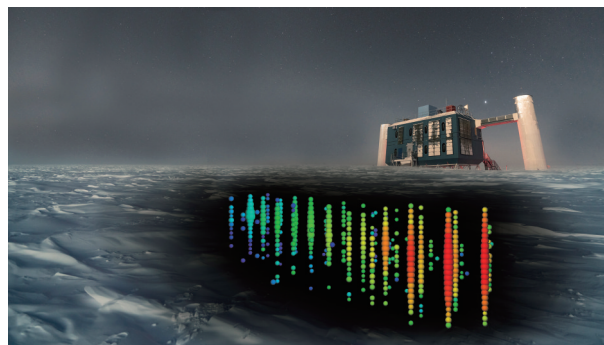


图4 冰立方中微子天文台的艺术渲染图,
该观测站位于冰下1.5~2.5 km的深处,
冰面上唯一可见的设备是冰立方实验室

中生成。2016年12月8日, IceCube 探测到一个能量为6.05 PeV的中微子, 这例事件的详细分析被发表在2021年3月10日《Nature》^[17]。这是第一次明确探测到格拉肖共振, 它不仅将进一步证实粒子物理学的标准模型, 还为探测天体物理源中的中微子形成开辟了一条新途径。

4 暗能量与暗物质研究新进展

4.1 发现暗能量存在的迹象

基于现有的宇宙学模型和宇宙学观测结果, 科学家假想出一种能量——暗能量, 它们驱动了宇宙的加速膨胀, 约占宇宙总质量的68%。这种神秘能量的本质仍然是天文学中悬而未决的难题之一。

宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)是宇宙大爆炸的余晖, 被用于计算宇宙的基本性质。目前最先进的CMB地图是由ESA在2009—2013年进行的普朗克任务提供的(图5)^[18]。

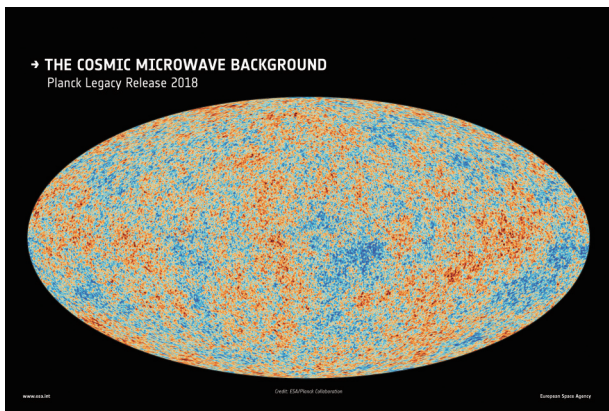


图5 普朗克任务绘制的宇宙微波背景辐射

基于普朗克任务的数据以及 Λ CDM模型, 科学家拟合得到的哈勃常数约为 $67.4 \text{ km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$ ^[19]。在近几十年中, 基于对超新星爆发的观测和其他探测技术, 科学家可以直接对近邻宇宙的膨胀速度进行精确测量。在2020年, 诺贝尔奖得主亚当·里斯(Adam Riess)领导的一个研究小组利用造父变星和Ia型超新星, 将哈勃常数限定在 $73.2 \text{ km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$ ^[20]。不同方法测量得到的哈勃常数之间存在一定的差异, 从近邻宇宙测量得到的速度比从早期宇宙推算的速度要快5%~10%^[21]。部分理论物理学家认为,

可以向标准模型中额外添加一项“早期暗能量”来解释哈勃常数争议, 这种新的暗能量可能存在于宇宙大爆炸后的前30万年, 它会让宇宙大爆炸时产生的等离子体以更快的速度冷却, 从而解释速度差异。

这2项独立的研究均使用了智利的阿塔卡马宇宙学望远镜(Atacama Cosmology Telescope, ACT)在2013—2016年收集的数据, 它们的结果表明, 带有“早期暗能量”的宇宙学模型更能吻合ACT在CMB中观测到的偏振信息。虽然2个研究团队均表示, 目前的数据不能以高的置信度支持早期暗能量的存在, 但他们同时也表示, ACT和另一个观测站南极望远镜(South Pole Telescope, SPT)的进一步观测可能很快就会提供更严格的测试。他们的研究成果于2021年9月发表于预印本平台arXiv上^[22-23]。

2021年9月, 《Physical Review D》杂志上还报道了另一项关于暗能量的研究成果^[24]。约在1年前, 高灵敏的液氙暗物质探测器XENON1T在1~7 keV的能量范围内, 发现电子反冲数据比预期背景多出了不明来源的约 3.3σ 的过剩。在9月发表的这项研究中, 天文学家构筑了一个包含变色龙筛选的物理模型, 将发现的过剩信号解释为太阳强磁场区域产生的暗能量的信号。尽管XENON1T的设计目标是通过寻找暗物质撞击普通物质的迹象来探测暗物质, 它或许先一步实现了对暗能量的直接探测。

4.2 暗能量巡天团队发布暗物质地图

暗能量巡天(The Dark Energy Survey, DES)团队在2013年至2019年, 使用智利托洛洛山美洲天文台的布兰科望远镜进行了巡天观测, 此次巡天覆盖了南天球1/4的天空, 拍摄了近3亿个星系。DES团队的成果于2021年5月27日公布^[25], 其中包括了从DES Y3的弱引力透镜数据集中重建的暗物质地图(图6)^[26]。箭头指向的区域是使用DES Y3星系引力透镜数据集绘制的有史以来最大的暗物质地图。为了便于展示, 地图下方叠加了盖亚空间望远镜观测得到的光学天空图。实际观测结果和科学家的预想有所出入: 透镜效应比主流宇宙学模型所预期的要小, 因此暗物质的分布也比预期的更加平滑。

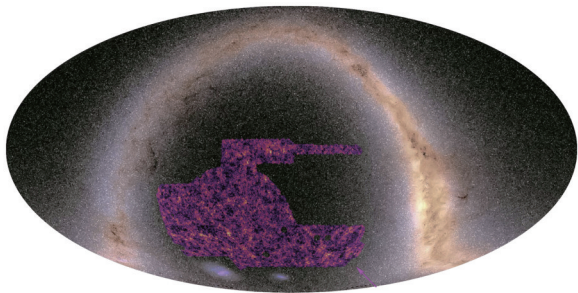


图6 DES重建的暗物质地图

5 “嫦娥五号”和月壤样本

2020年11月24日,“嫦娥五号”月球探测器圆满发射成功(图7)^[27],开启中国首次地外天体采样返回之旅,这也是中国探月工程“绕、落、回”三部曲的最终章。2020年12月1日,“嫦娥五号”在此前人类从未“踏足”过的月球中纬度地区(51.916°W, 43.058°N)着陆,此次的着陆点大致位于月球正面的吕姆克山脉附近,风暴洋的东北部。随后的几天内,它成功进行了月球样本的采样和封装,并于12月3日实现了地外天体起飞,“嫦娥五号”上升器进入预定轨道。最终于2020年12月17日,它顺利结束了这次月球之旅,安全着陆在中国内蒙古自治区四子王旗的预定区域,并带回了共计1731 g月球样本。这是半个世纪以来从月球带回的第一个样本,也是中国首次从月球上带回样本。2021年7月12日,这些样本开始被分发给国内科学家用于科学研究。



图7 “嫦娥五号”探测器在中国文昌航天发射场成功发射

2021年10月,《Science》《Nature》等期刊先后刊发了数篇文章,详细记述了包括中国科学家在内

的国际合作团队对月球样本的研究成果^[28-31]。对20世纪六、七十年代由美国“阿波罗号”和苏联无人探测器采集的月壤样本,以及少量月球陨石的分析表明,月球表面的岩浆活动至少持续到大约28亿~30亿年前。而“嫦娥五号”采集的这批月球样本证实,在19.7亿年前,月球表面的熔岩仍在流动,将月球岩浆活动停止的时间推迟了约10亿年。这些样本也成为迄今为止最年轻的月球火山岩,填补了月球地质方面的一个重要空白。

对于是什么原因使月球上的岩浆活动持续了如此之久,此前科学界存在两种主流的观点。一种理论认为,是岩浆含有大量铀(U)、钍(Th)、钾(K)等放射性生热元素,它们提供了热源,从而导致熔融,但对“嫦娥五号”样品中铅(Pb)、锶(Sr)、钕(Nd)同位素的分析,排除了这种可能。另一种说法认为,岩浆富含水分,降低了源区物质的熔点,因此导致熔融。但通过分析玄武岩中微小的岩浆包裹体,估算出的月幔源区水含量仅为1~5 μg/g,表明源区是非常“干”的,岩浆的异常活跃也不能被归因为源区富含水。这些新发现刷新了我们对月球的认知,同时也带来了更多的困惑,需要对月球的形成和演化历程进行更深层次的探索。

“嫦娥五号”引领了一波探月热潮,各国太空机构及私人公司的登月计划接踵而至。中国的探月工程发展势头良好,未来必将再传捷报。NASA即将进行阿尔忒弥斯(Artemis)“重返月球”计划的首次综合测试,计划最早于2024年实现载人登月,随后建设月球轨道空间站,并将其作为登陆火星的跳板。此外,俄罗斯将要开启“月球25号”(Luna-25)太空项目,印度的“月船3号”(Chandrayaan-3)和日本的无人探测器SLIM将尝试于2022年实现首次月面软着陆,以色列着手打造“创世纪2号”(Beresheet 2)月球探测器,韩国计划开展自己的登月项目,总部设在东京的ispace公司、位于德克萨斯州休斯顿的Intuitive Machines公司以及宾夕法尼亚州匹兹堡的Astrobotic Technology公司也在为登陆月球而奋斗,它们可以为全球各地的客户向月球运送有效载荷。

6 冷湖发现世界级光学观测台址

天文是一门以观测为基础的学科,任何理论的建立和检验都需要观测事实的支持和佐证,天文研究领域的发展和开拓也离不开相应观测设备的支持,光学/红外波段的观测对于研究星系的形成与演化、恒星的成长和死亡、暗物质、暗能量乃至生命起源等科学议题都是不可或缺的。但建设地基大型光学望远镜需要极端的观测条件,考虑诸如视宁度、晴夜数、天光背景亮度、可降水汽、风力、云量等多重科学指标,还需要远离人造光源,避开光污染的影响,同时还要考虑到后期的建设和运行成本。目前国际公认的优越台址有智利北部的帕拉那山(Cerro Paranal)、美国夏威夷的莫那卡亚山(Mauna Kea)、南极内陆冰盖上的冰穹地区及西班牙加那利群岛中的拉帕尔马岛(La Palma)等,它们全部都分布在西半球,非常不利于24小时监测网络的建立。且相比于欧洲正在建设的40 m口径的极大望远镜(Extreme Large Telescope),中国正在运行的通用型光学望远镜的最大口径也仅到2 m级(如兴隆观测站的2.16 m口径望远镜和丽江观测站的2.4 m口径望远镜,而兴隆的郭守敬望远镜口径虽然达到4 m级,但专攻光谱观测,并非通用型望远镜),中国光学波段的观测在国际上一直严重落后,急需大设备的支持。

近期,中国科学院国家天文台邓李才和团队宣布,在青海冷湖地区找到了世界级光学天文台址^[32]。青海省冷湖镇附近的赛什腾山山顶的定点监测数据表明,该地区视宁度中值为0.75",台址在夜间的气温起伏中值只有2.4℃,大约70%的夜晚都是晴夜,夜空亮度约为22 mag/arcsec²,可降水汽在55%的夜晚都低于2 mm,各项指标足以媲美国际一流的台址(图8)^[33]。目前冷湖也是东半球发现的最佳站点,可以为中国甚至是世界的光学观测困境带来极大的改善。

7 发现来自黑洞-中子星并合系统的引力波

2015年首次探测到引力波以来,科学家相继



图8 赛什腾基地C区建设实景

探测到双黑洞并合、双中子星并合事件。而说起黑洞-中子星并合,这类事件在LIGO和Virgo的第一次和第二次观测运行期间(分别被记为O1和O2)并没有被发现,在第三次观测运行的第一部分(被记为O3a)则探测到了2例疑似事件GW190426^[34]和GW190814^[35]。但前者的误报率高达1.4次·a⁻¹,而后者的伴星质量是2.6 M_⊙,恰好位于黑洞和中子星的质量交界,很难判断它的物理本质。

2021年6月29日,一篇发表在《Astrophysical Journal Letters》上的文章^[36]提到10天内接连探测到的2起黑洞-中子星并合事件(图9)^[37],这也是人们首次高置信度地观测到黑洞-中子星并合事件。这2起事件都是在LIGO和Virgo的第三次观测运行中被发现的,分别被命名为GW200105和GW200115。GW200105被发现于2020年1月5日,距离地球约9.1亿光年,发生并合的两致密天体质量分别为8.9 M_⊙和1.9 M_⊙。遗憾的是Virgo探测到的信噪比较低,LIGO汉福德在此期间关闭维护,因此这一事件的误报率略高,约为0.36次·a⁻¹。另一起事件GW200115被探测于2020年1月15日,发生在9.8亿光年之外,两天体的质量分别是5.7 M_⊙和1.5 M_⊙,同时被LIGO和Virgo所有的3个探测器所观测到,网络信噪比为11.6,误报率小于1×10⁻⁵次·a⁻¹。在两次事件中均没有探测到电磁信号。除此之外,研究人员将黑洞-中子星的并合率密度推断为(45~130)Gpc⁻³·a⁻¹。

8 快速射电暴领域的成果

快速射电暴(fast radio burst, FRB)是一类短时(毫秒级)射电脉冲信号,尽管时标短,但因为绝大

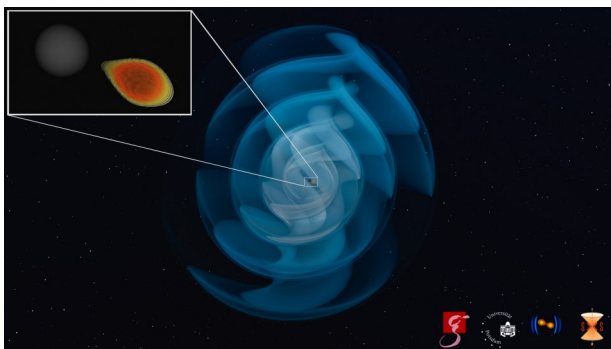


图9 黑洞-中子星并合系统的数值模拟

多数发生在银河系外,所以释放出来的能量巨大。与此同时,它的爆发频率非常高,每天都可以探测到数个爆发。

到目前为止,天文学家尚不确定FRB的物理起源,有些理论模型认为,一些年轻的、强磁场的($B \approx 10^{10} \sim 10^{11}$ GT)、孤立的中子星——磁陀星,极有可能是它的候选体。2020年4月27日,一颗银河系磁星SGR J1935+2154开始活跃(图10)^[38],Fermi、Swift、NICER^[39]、AGILE^[40]、Insight-HXMT^[41]、Konus-Wind^[42]、INTEGRAL等在轨的X射线和伽马射线卫星相继迅速响应观测。

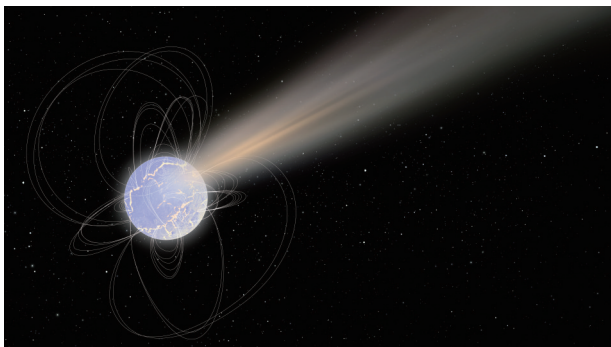


图10 SGR J1935+2154的艺术想象

随后,CHIME FRB在同样的方向捕捉到了一次类FRB的射电脉冲(FRB 200428,它也是被发现的首个河内FRB)。2021年2月,在《Nature Astronomy》杂志上背靠背发表的多篇研究中,科学家论证了SGR J1935+2154的高能辐射和FRB 200428几乎同时从同一方向发出,并具有相似的双峰结构。此外,中国科学院高能物理研究所李承奎等研究发现,Insight-HXMT拍摄的非热硬X射线谱峰和

FRB 200428谱峰之间8.62 s的时间间隔也对应射电信号的色散延迟。这些发现一同表明,确实有部分FRB起源于磁陀星。

尽管大部分源的FRB都是“一次性”的,部分源会重复发出能量不等的FRB,因此被称为重复FRB源。在过去的1年里,500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST,又名中国“天眼”)在FRB领域持续发力,积累了大量观测资料。10月《Science》刊登的一篇文章对来自30亿光年外一个矮星系中的FRB源FRB 121102进行了前所未有的深入研究^[43]:2019年8月29日至10月29日,中国科学院国家天文台李菡团队在共计59.5 h的观测时间内捕捉到了来自这个源的1652次FRB,远超过往文献记录数目的总和(347次)。观测结果表明,FRB 121102的爆发能量分布范围广,可以被划分为能量较高和能量较低2种,这也暗示了2种不同的爆发机制。深入观测分析单个源有助于确定重复FRB的事件率、能量分布和时域行为,从而为推断它的物理特性和中心引擎提供线索,在不久的将来,这或许会成为FRB领域的研究重点。

9 黑洞进展

2021年2月19日,《Science》《Acta Astrophysica Sinica》刊登了3篇文章,包括中国科学院国家天文台研究人员在内的国际合作团组联合发布了对天鹅座X1(Cygnus X-1)的最新精确测量结果,对黑洞的距离、质量、自旋及其演化做了最为精确的测量和限制^[44-46]。研究人员发现,此系统包含了1个 $21 M_{\odot}$ 的黑洞,并且其自转速接近光速。这是目前得到精确测量的黑洞X射线双星系统中质量最大、转动最快的黑洞。

2021年3月24日,曾拍摄首张黑洞照片的事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)国际合作组织又发布了M87中黑洞的偏振图像(图11)^[47-49]。在2017年的观测中,EHT记录了超大质量黑洞附近2种偏振模式的毫米辐射,天文学家可以据此重建黑洞周围的线偏振情况。这些偏振图

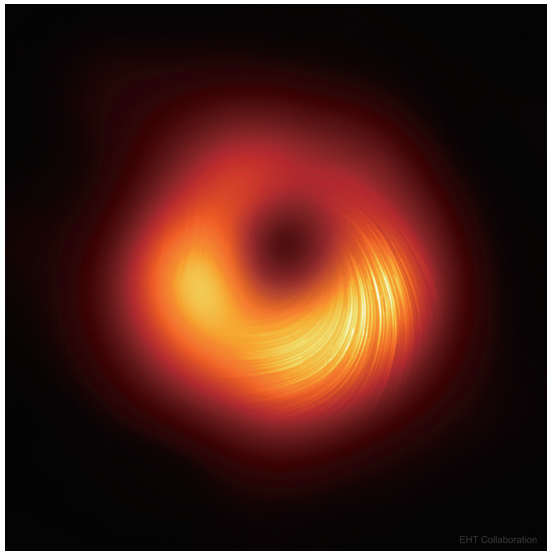


图11 M87中心黑洞的偏振图

像携带着与同步辐射有关的磁场结构的信息,对解释活动星系核喷流形成机制起到了关键性的作用。

对超大质量黑洞质量的测量,目前通常依赖于黑洞周围恒星或气体云的运动,或者是吸积盘回波的时间延迟,测量条件苛刻且适用范围较窄。2021年8月,《Science》杂志发布的一项研究表明^[50],活动星系核光学辐射闪烁趋于平稳的时标(被称为阻尼时标)和中心超大质量黑洞的质量呈现出明显的相关性。研究人员推测,观测到的光学变化是由吸积盘内区发射的紫外辐射在快速传播的过程中产生的。此项研究为超大质量黑洞提供了一种新的质量测量手段。

10 空间天文新进展

10.1 韦布空间望远镜终上天

在克服经费危机、意外事故、全球疫情、技术更新等各种困难之后,詹姆斯·韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST, 图12)^[51]终于在北京时间2021年12月25日晚8点20分,从赤道附近的法属圭亚那搭乘阿丽亚娜5号火箭升空。整个发射过程非常顺利。发射30多分钟后,JWST的太阳能板成功打开,至此JWST开启了为期1个月的旅程,直到抵达它的目的地——日一地第二拉格朗日点。这一点位于日地连线的延长线上、地球外

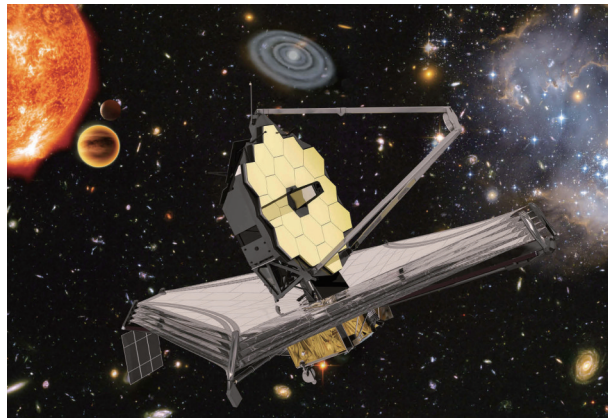


图12 JWST的艺术想象图

侧约150万km处,工作在这一点上,JWST将更加稳定,而且可以尽可能地避免日地辐射的干扰。一直以来,JWST都被认为是哈勃望远镜在红外波段的继任者,它的主镜口径约6.5 m,是哈勃望远镜口径的近3倍,主要工作在红外波段。它将前所未有地搜寻早期宇宙的红外信号,探测更红更暗的星系,探索宇宙大爆炸理论的观测证据。

10.2 “羲和”逐日

2021年10月14日在太原卫星发射中心,中国用长征二号丁运载火箭成功地将太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星(又名“羲和号”)发射升空。这是中国首颗太阳空间探测专用卫星,标志着中国迈入太阳探测新阶段。这颗卫星将运行于高度为517 km的太阳同步轨道,开展全日面H α 波段的高分辨率光谱成像。H α 线是氢的一条发射线,波长为6562.8 Å,处于可见光的红光范围,是太阳爆发时产生的最强色球谱线,对于推演太阳大气特征、研究太阳光球层和色球层的动力学过程、探究太阳爆发的动力学特征和触发机制等课题都有着十分重要的意义。与此同时,卫星所采用的超高指向精度、超高稳定度(较一般卫星水平提升1~2个数量级)的“双超”平台设计,能够确保卫星载荷观测时能够更加稳定、准确地指向目标,获得更高质量的观测图像。它的成功发射以及成功运行标志着中国正式进入探日新时代。

10.3 天宫空间站

2021年,中国的天宫空间站正建设得如火如荼,天和核心舱和天舟二号货运飞船分别于4月、5

月成功发射。6月,天和核心舱迎来首批宇航员进入。10月,神舟十三号载人飞船将翟志刚、王亚平、叶光富第二批宇航员送入天和核心舱,至此,中国天宫空间站开启有人长期驻留的时代。天宫空间站计划于2022年竣工,在未来的十几年里,它将成为重要的太空实验室。目前中国载人航天局(China Manned Space Agency, CMSA)已经初步批准了1000多项来自世界各地的实验,其中部分已经发射升空。天宫空间站将为科学家进行太空观测提供助力,提供高洁净、微引力和强宇宙辐射的实验环境,帮助探索宇宙起源、暗物质、生命科学等一系列重大课题。

11 结论

得益于科技水平的提升、大科学装置的建设 and 密切的国际合作交流,天文学家已拥有捕捉和解读中微子、光子、引力波等多信使探索宇宙的能力,能够全方位地认知宇宙中的天文事件,拼凑出更完整的宇宙图像。2021年,天文学家在宇宙线、深空探测、引力波、快速射电暴、黑洞等各个方面都取得了重大突破,预期在未来的几年内,天文学领域也会继续蓬勃发展,必将更加精彩纷呈。

参考文献(References)

- [1] 莎拉·斯图尔特·约翰逊. 到火星去[M]. 中国航天液体推进剂研究中心, 译. 天津: 天津人民出版社, 2021.
- [2] 天问一号探测器着陆火星首批科学影像图揭幕[EB/OL]. (2021-06-11)[2021-11-20]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c6812123/content.html>.
- [3] Cottaar S, Koelemeijer P. The interior of Mars revealed[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 388-389.
- [4] Stähler S C, Khan A, Banerdt W B, et al. Seismic detection of the martian core[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 443-448.
- [5] Khan A, Ceylan S, Driel M V, et al. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 434-438.
- [6] 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.
- [7] Amenomori M, Bao Y W, Bi X J, et al. Potential PeVatron supernova remnant G106.3+2.7 seen in the highest-energy gamma rays[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 460-464.
- [8] Abeyssekara A U, Albert A, Alfaro R, et al. HAWC observations of the acceleration of very-high-energy cosmic rays in the Cygnus Cocoon[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 465-471.
- [9] 观测基地全景航拍[EB/OL]. (2021-06-25)[2021-11-25]. http://www.ihep.cas.cn/lhaaso/kpxc/202106/t20210625_6117360.html.
- [10] Cao Z, Aharonian F A, An Q, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources[J]. *Nature*, 2021, 594(7861): 33-36.
- [11] An Q, Asfandiyarov R, Azzarello P, et al. Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite[J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): eaax3793.
- [12] Collaboration D, Alemanno F, An Q, et al. Measurement of the cosmic ray helium energy spectrum from 70 GeV to 80 TeV with the DAMPE space mission[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(20): 201102.
- [13] SN 1987A in 2017[EB/OL]. (2017-02-24) [2021-12-24]. <https://www.esa.int/esea/q=1987A>.
- [14] Winter W, Lunardini C. A concordance scenario for the observed neutrino from a tidal disruption event[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 472-477.
- [15] Stein R, Velzen S V, Kowalski M, et al. A tidal disruption event coincident with a high-energy neutrino[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 510-518.
- [16] IceCube neutrino observatory[EB/OL]. (2018-07-13) [2021-12-13]. <https://www.esa.int/esea/q=IceCube>.
- [17] Aartsen M G, Abbasi R, Ackermann M, et al. Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube[J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 220-224.
- [18] Planck's view of the cosmic microwave background[EB/OL]. (2013-03-21) [2021-12-11]. <https://www.esa.int/Newsroom/Photos/Highlights/Planck>.
- [19] Planck C, Aghanim N, Akrami Y, et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2020, 641: A6.
- [20] Riess A G, Casertano S, Yuan W L, et al. Cosmic distances calibrated to 1% precision with Gaia EDR3 parallaxes and Hubble Space Telescope Photometry of 75 Milky Way Cepheids confirm tension with Λ CDM[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 908(1): L6.

- [21] Di Valentino E, Mena O, Pan S, et al. In the realm of the Hubble tension: A review of solutions[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2021, 38(15): 153001.
- [22] Hill J C, Calabrese E, Aiola S, et al. The Atacama cosmology telescope: Constraints on pre-recombination early dark energy[J]. *arXiv e-prints*, 2021, arXiv: 2109.04451.
- [23] Poulin V, Smith T L, Bartlett A. Dark energy at early times and ACT: A larger Hubble constant without late-time priors[J]. *arXiv e-prints*, 2021, arXiv: 2109.06229.
- [24] Vagnozzi S, Visinelli L, Brax P, et al. Direct detection of dark energy: The XENON1T excess and future prospects [J]. *Physical Review D*, 2021, 104(6): 063023.
- [25] Jeffrey N, Gatti M, Chang C, et al. Dark energy survey year 3 results: Curved-sky weak lensing mass map reconstruction[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 505(3): 4626.
- [26] DES year 3 cosmology results: Papers[EB/OL]. (2021-05-27)[2021-11-22]. <https://www.darkenergysurvey.org/des-year-3-cosmology-results-papers/>.
- [27] 嫦娥五号发射集锦[EB/OL]. (2020-11-24)[2021-12-12]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758842/c68105-74/content.html>.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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: 887-890.
- [32] Deng L C, Yang F, Chen X D, et al. Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site[J]. *Nature*, 2021, 596(7876): 353-356.
- [33] 国家天文台在青海冷湖地区发现国际一流光学天文台址[EB/OL]. (2021-08-19)[2021-11-12]. http://www.nao.cas.cn/xwzx/ttnews/202108/t20210819_6159320.html.
- [34] Li Y J, Han M Z, Tang S P, et al. GW190426_152155: A merger of neutron star-black hole or low mass binary black holes[J]. *arXiv e-prints*, 2020, arXiv: 2012.04978.
- [35] Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GW190814: Gravitational waves from the coalescence of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 896(2): L44.
- [36] Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. Observation of gravitational waves from two neutron star-black hole coalescences[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 915(1): L5.
- [37] GW200105 and GW200115[EB/OL]. (2021-06-29)[2021-11-22]. <https://www.ligo.org/detections/NSBH2020.php>.
- [38] Artist's impression of radio bursting magnetar[EB/OL]. (2020-07-28)[2021-11-28]. <https://www.esa.int/esaoh/q=fast+radio+burst>.
- [39] Younes G, Baring M G, Kouveliotou C, et al. Broadband X-ray burst spectroscopy of the fast-radio-burst-emitting Galactic magnetar[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 408-413.
- [40] Tavani M, Casentini C, Ursi A, et al. An X-ray burst from a magnetar enlightening the mechanism of fast radio bursts[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 401-407.
- [41] 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: 378-384.
- [42] Ridnaia A, Svinikin D, Frederiks D, et al. A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 372-377.
- [43] Li D, Wang P, Zhu W W, et al. A bimodal burst energy distribution of a repeating fast radio burst source[J]. *Nature*, 2021, 598(7880): 267-271.
- [44] Neijssel C J, Vinciguerra S, Vigna-Gómez A, et al. Wind mass-loss rates of stripped stars inferred from cygnus X-1[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 908(2): 118.
- [45] Zhao X S, Gou L J, Dong Y T, et al. Re-estimating the spin parameter of the black hole in Cygnus X-1[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 908(2): 117.
- [46] Miller-Jones J C A, Bahramian A, Orosz J A, et al. Cygnus X-1 contains a 21-solar mass black hole—Implications for massive star winds[J]. *Science*, 2021, 371(6533): 1046-1049.
- [47] Collaboration E H T, Akiyama K, Algaba J C, et al. First M87 event horizon telescope results. VII. polarization of the ring[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 910(1): L12.
- [48] Collaboration E H T, Akiyama K, Algaba J C, et al. First M87 event horizon telescope results. VIII. Magnet-

- ic field structure near the event horizon[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 910(1): L13.
- [49] Astronomy picture of the day[EB/OL]. (2021-03-31) [2021-11-12]. <https://apod.nasa.gov/apod/ap210331.html>.
- [50] Burke C J, Shen Y, Blaes O, et al. A characteristic optical variability time scale in astrophysical accretion disks [J]. *Science*, 2021, 373(6556): 789-792.
- [51] Artist's impression of the James Webb Space Telescope [EB/OL]. (2018-03-27) [2021-11-27]. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/03/Artist_s_impression_of_the_James_Webb_Space_Telescope.

Top astronomy events in 2021

ZHAO Xueshan^{1,2}, DENG Shuxia¹, GOU Lijun^{1,2*}

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper reviews the important progress made in the field of astronomy in 2021, including a series of significant achievements and events, as listed below: probes from various countries arrived on Mars and carried out scientific research; the Insight revealed the interior structure of Mars for the first time; LHAASO observed photons of 1.4 PeV; DAMPE obtained precise energy spectrum covering the energy range 70 GeV to 80 TeV of helium nucleus; IceCube captured neutrino from a tidal disruption event and a particle shower at the Glashow resonance. Astronomers also found the evidence of dark energy existence in the early time of the Universe, released the latest research results of the chang'e-5 samples, found an astronomical optical observing site in Lenghu, which was the best in China, detected the gravitational wave definitely from the neutron-black hole coalescence for the first time, discovered the observational evidence showing some fast radio bursts originated from a magnetar, studied a fast radio burst comprehensively with the help of FAST telescope, proposed a novel method to obtain the mass of a black hole, published the polarized image of black hole M87*. In addition, James Webb Space Telescope was launched, and Chinese Xihe solar satellite was successfully launched as well.

Keywords Mars; cosmic ray; Chang'e-5; fast radio burst; neutrino ●



(责任编辑 傅雪)