0254-6124/2021/41(1)-084–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WU Bobing, MA Yuqian, ZHANG Shuangnan, CHANG Jin. 40 years of space astronomy in China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 84-94. DOI:10.11728/cjss2021.01.084

中国空间天文 40 周年

吴伯冰[1] 马宇蒨[1] 张双南[1] 常 进[2]

1(中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

2(中国科学院紫金山天文台 暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

摘 要 过去 40 年中国空间天文学研究取得了巨大的发展. 尤其是近 10 年内发射了数颗天文卫星, 未来几年还将有一些天文卫星计划发射. 本文简要回顾了国际空间天文学的发展历程. 对中国空间天文学过去 40 年的发展进行了回顾和总结, 包括 1970 年代第一颗天文卫星计划、气球空间天文探测、基于载人航天工程的空间天文实验以及天文卫星等. 此外, 介绍了中国空间天文项目, 并对未来 10 年中国空间天文学研究进行了展望.

关键词 空间天文, 天文卫星

中图分类号 P 17

40 Years of Space Astronomy in China

WU Bobing[1] MA Yuqian[1] ZHANG Shuangnan[1] CHANG Jin[2]

1(*Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

2(*Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210023)

Abstract In the past 40 years, China's space astronomy has achieved tremendous development. Especially in the past 10 years, several astronomical satellites have been launched, and several astronomical satellites will be launched in the next few years. In this paper, firstly the history of international space astronomy is briefly reviewed, then the development of space astronomy in China over the past 40 years is reviewed and summarized, including the first astronomical satellite plan in the 1970s, balloon-borne space astronomical exploration, space astronomy experiments based on Chinese manned space program and astronomical satellites. China's space astronomy missions are also briefly introduced, and space astronomy in China in the next 10 years is prospected.

Key words Space astronomy, Astronomy satellite

0 引言

空间天文学是利用空间平台, 在空间进行天体 (包括太阳) 观测以及研究天体形态、结构、组成、运动、物理状态、起源和演化规律的学科. 在天文学发展史上, 空间天文学的兴起是继可见光和射电观测之后天文观测中的第三个里程碑, 是人类认识宇宙的重大飞跃. 自人类进入太空时代以来, 空间天文观测

2020-09-30 收到原稿

E-mail: wubb@ihep.ac.cn

即成为天文观测的重要组成部分. 由于克服了地球大气对地面天文观测的影响, 空间天文学研究开拓了全电磁波段天文、粒子天文和引力波天文观测的多信使新时代. 1946 年美国海军研究实验室利用 V-2 火箭在 80 km 高度空间进行了第一次空间探测, 揭开了空间天文学研究的序幕. 1957 年第一颗人造地球卫星发射成功, 此后人造卫星的应用使得空间天文学得到高速发展.

中国空间天文观测起步于 20 世纪 70 年代, 经过了长期努力而逐步发展起来. 从早期基于气球及载人航天搭载的空间天文探测, 到一系列中小天文卫星的发射, 再到中国引领的国际合作大型旗舰级空间天文台的研制, 中国空间天文逐渐步入国际舞台.

1 国际空间天文学发展历程

国际空间天文学的发展大致经历了三个阶段 [1].

1.1 探索试验阶段

从利用 V-2 火箭开展首次探测至 20 世纪 60 年代初, 空间天文学处于探索试验阶段, 主要致力于探明地球的辐射环境和外层空间静态结构. 其重点工作是发展空间科学工程技术.

1.2 早期发展阶段

在 20 世纪 60 年代, 一方面继续使用气球和火箭作为空间探测的运载工具, 另一方面采用卫星作为探测手段的研究工作越来越多, 但是空间天文观测还没有或者很少有专用的天文卫星, 其卫星观测通常是通过搭载于别的卫星而进行的.

1.3 全面发展阶段

自 20 世纪 70 年代起相继发射了各类天文观测卫星, 包括 X 射线、γ 射线、紫外、红外及光学观测等专用卫星.

在这个阶段, 空间天文观测从 X 射线波段扩展到几乎所有电磁波波段, 大大拓展了人类对宇宙和天体的认识. 随着人类认识自然规律、理解宇宙和探索太阳系外行星的研究需求以及相应空间探测能力的提高, 空间天文探测能够全面利用空间优良的天文观测条件以及构建长基线望远镜所需大尺度空间, 进入全电磁波波段时代, 并开始通过探测宇宙线粒子研究暗物质, 而未来的空间引力波探测将开辟人类观测宇宙的新窗口. 总言之, 空间天文学研究已进入多信使、全波段、全天时、全方位、高分辨率、高灵敏度和宽视场探测的新纪元.

2 中国空间天文学发展历程

2.1 早期的天文卫星计划

1976 年中国科学院制定了 “两星一站” 计划 [1], 其中包括以观测太阳为主的天文卫星, 其主要载荷为掠射式软 X 射线望远镜. 中国科学院紫金山天文台张和祺台长担任天文卫星科学探测的总体设计师并组建了空间天文实验室. 该项目完成了卫星系统设计、卫星结构/热控星研制并开展了载荷关键技术攻关. 20 世纪 80 年代中期, 由于各种原因该项计划被终止, 但其对于推动中国空间天文发展及科技队伍建设起到了开拓作用.

2.2 气球空间天文探测

中国科学院高能物理研究所李惕碚于 1972 年提出了开展高能天体物理研究的建议, 1977 年高能物理研究所宇宙线规划会议决定将部分研究力量转向高能天体物理, 并建议发展高空科学气球开展实测 [1]. 1978 年开始, 在顾逸东带领下, 高能物理研究所逐步建立了高空科学气球研制车间, 并联合中国科学院大气物理研究所在其下属香河站建成了平流层高空科学气球发放、跟踪、回收系统以及实验数据的遥测和遥控系统, 其余参与单位还有中国科学院空间科学与应用研究中心和广州电子技术研究所等. 1978 年至 2000 年前后共发放百余高空科学气球, 其载荷质量从数十千克发展到数百千克, 个别达到吨级. 中国科学院高能物理研究所、紫金山天文台及上海天文台分别设计、研制了不同的球载天文观测设备, 开展了 30~40 km 高度的空间天文观测.

高能物理研究所利用高空科学气球开展了原初宇宙线核成分探测, 探测到初级宇宙射线中 $\geqslant 4$ GeV 的氦、碳、氮、氧、硅、铁等重核元素以及在一定地磁刚度区域内的重离子丰度分布; 进行了从 HAPI-1 到 HAPI-4 球载 X 射线观测, 测量了高空宇宙 γ 射线本底和中子感生 γ 射线本底; 采用 NaI 晶体探测器在中国首次获得蟹状星云脉冲星 PSR0531+21 的硬 X 射线辐射及其脉冲周期, 该周期与射电脉冲周期十分吻合; 发展了 NaI/CsI 复合闪烁探测器和高压充 Xe 多丝正比室, 对 CygX-1, CygX-3, HerX-1 等高能天体进行了观测, 得到 CygX-1 (天鹅座 X-1) 在特定条件下的低态以及完整的硬 X 射线能谱结构.

中国科学院紫金山天文台开发了 BGO 晶体 γ 射线探测器和气体正比计数器进行天文观测, 并在中日合作气球越洋飞行中采用高压 Xe 正比计数器成功进行 20~100 keV 硬 X 射线流强和时变观测. 此外, 还开发了 30 cm 红外长波液氦致冷红外望远镜系统, 观测到塞弗特星系 SCO-α1 的红外辐射.

中国科学院上海天文台研制了球载太阳望远镜, 测量了太阳可见/近红外波段的亮度温度; 研制了 10 cm 红外望远镜 (0.9 μm, 85~130 μm), 在中日合作气球越洋飞行中对银河中心区域进行了扫描观测.

上述工作为中国载人航天首次空间天文任务宇宙 γ 射线暴和太阳高能辐射探测提供了技术基础.

1993 年根据李惕碚和吴枚提出的直接解调成像方法 [2], 采用高能物理研究所开发的 HAPI-4 复合晶体球载硬 X 射线望远镜系统 (见图 1, 灵敏面积 800 cm^2) 进行了气球飞行探测, 实现对 CygX-1 天鹅座 X-1 强背景下的高信噪比成像观测 [3], 验证了准直型非成像探测器直接解调对硬 X 射线源成像的新方法, 开辟了新的高能电磁辐射成像方法. 这项工作随后得到国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 支持, 促进了硬 X 射线天文卫星 HXMT 立项.

2.3 基于载人航天工程的空间天文实验

中国于 1992 年开始实施载人航天工程. 载人航天工程设立了载人航天应用系统, 开展空间科学研究及实验, 这为空间天文发展提供了条件.

2001 年 1 月中国科学院高能物理研究所与紫金山天文台在神舟二号上搭载的超软 X 射线、X 射线和 γ 射线探测器成功观测到近 30 个宇宙 γ 射线暴和近百例太阳耀斑的 X 射线和 γ 射线爆发. 这是中国空间天文观测取得的首个重要成果.

2016 年 9 月由中国科学院高能物理研究所牵头研制的 γ 暴偏振探测仪 POLAR 随天宫二号发射入轨. 其共探测到 55 个确认的 γ 暴, 发布 49 个 GCN circular, 得到国际上最大样本的高精度 γ 暴偏振测量结果.

增强型 γ 射线暴偏振探测仪 POLAR-2 是 POLAR 的后续实验项目, 其科学探测能力比 POLAR 及其他以往的 γ 暴偏振探测仪器有大幅提高.

POLAR-2 是一个国际合作项目. 2018 年 2 月 18 日联合国外层空间事务办公室 (UNOOSA)/中国载人航天工程办公室 (CMSA) 开始征集中国空间站 (CSS) 国际合作项目. 2019 年 6 月 12 日POLAR-2正式入选 CSS 国际合作项目, 预计将于 2024 年发射.



图 1 HAPI-4 复合晶体球载硬 X 射线望远镜系统

Fig. 1 Balloon-borne phoswich hard X-ray telescope system HAPI-4

未来的中国空间站计划中还安排了以光学天文巡天为主、具有显著国际竞争力的多功能光学设施 CSS-OS. CSS-OS 主要科学任务是进行多色成像与无缝光谱巡天和太赫兹天文观测. 预计于 2023 年后发射.

空间高能宇宙辐射探测设施 (High Energy cosmic-Radiation Detection facility, HERD) 项目正在积极推进中. 该项目由中国科学院高能物理研究所与紫金山天文台联合提出, 欧洲多个国家参与合作研制, 计划 2025 年搭载于未来中国空间站, 在轨运行 10 年左右.

除了中国的载人航天空间天文项目外, 自 1998 年起, 中国科学院高能物理研究所参加了丁肇中领导的航天飞机阿尔法磁谱仪 AMS01 实验和国际空间站阿尔法磁谱仪 AMS02 实验. 作为国内的牵头单位, 高能物理研究所负责 AMS02 电磁量能器研制, 并且成为参加 AMS02 科学数据分析的主要小组之一.

2.4 天文卫星

空间硬 X 射线调制望远镜 (HXMT) 项目被遴选为中国 “十一五” 空间科学卫星项目, 主要载荷为高能 X 射线望远镜. 2011 年在空间科学先导专项经费支持下 HXMT 正式立项, 载荷增加了软 X 射线望远镜、中能 X 射线望远镜. HXMT 于 2017 年发射.

中国科学院空间科学先导专项开启了中国空间天文卫星的新纪年. 除了 HXMT 项目以外, 在 “十二五” 期间, 中国科学院空间科学先导专项支持的天文卫星项目还包括暗物质粒子探测卫星 DAMPE (2015 年发射) 以及若干天文卫星项目的背景型号, 例如 eXTP.

“十三五” 期间, 中国科学院空间科学先导专项支持的天文卫星项目包括: 爱因斯坦探针 EP (预计 2022 年发射); 引力波暴高能电磁对应体全天监测器 GECAM (2020 年 12 月发射); 空间引力波项目太极计划 “三步走” 的第一步 (第二步已启动). 另外, 继续支持了 eXTP 重大背景型号研究.

除中国科学院空间科学先导专项外, 在有关部门的支持下, 中国高等院校也陆续进入空间天文探测领域. 由中山大学牵头的空间引力波项目——天琴计划已完成第一步试验星的发射和验证试验, 正在启动第二步双星试验. 清华大学牵头的极光计划和南京大学牵头的龙虾眼 X 射线探测卫星分别于 2018 年 10 月和 2020 年 7 月发射.

中法合作空间高能天文小卫星空间变源监视器卫星 (SVOM) 经过多年预先研究, 于 2010 年被批准正式立项. 由于卫星平台国际合作的复杂性, 项目于 2003 年启动, 载荷具体方案经过了几次调整. 目前, SVOM 项目已进入正样研制阶段, 预计于 2022 年择机发射.

3 中国空间天文实验

表 1 列出了中国的空间天文项目, 包括载人航天搭载项目、目前在轨运行项目、已正式立项的在研项目以及正在积极推进中的项目等.

目前中国空间天文学研究基本形成了以空间高能天文为主, 兼顾可见光、紫外和射电等波段的多波段空间天文探测以及空间反物质、宇宙线、暗物质和激光天文动力学等研究方向的格局, 包括国际空间天文学的主要研究方向, 例如黑洞等致密天体物理、超新星遗迹、γ 射线暴、星系、星系团、宇宙学以及暗物质探索等天体物理学前沿问题.

3.1 已结束运行的空间天文项目

3.1.1 太阳和宇宙天体高能辐射监测仪

太阳和宇宙天体高能辐射监测仪 [4] 包括超软 X 射线探测器 (SXD), X 射线探测器 (XD) 和 γ 射线探测器 (γD) 三个探测器子系统 (见图 2). 中国科学院高能物理研究所牵头负责 X 射线探测器研制任务, 紫金山天文台负责其中的超软 X 射线和 γ 射线探测器研制任务.

太阳和宇宙天体高能辐射监测仪覆盖了从 0.2 keV 至 2 keV, 10 keV, 10 MeV 的 X 射线和 γ 射线能区, 时间分辨达到 40 ms, 以观测 γ 射线暴的快速时变和宽波段能谱特性为主要目的, 同时监测太阳耀斑的高能 X 射线辐射. 项目于 1992 年 3 月提出, 1993 年 1 月立项, 2001 年 1 月 10 日成功利用神舟二号留轨舱实现空间飞行和观测, 直至 6 月 25 日飞船完成其使命.

太阳和宇宙天体高能辐射监测仪成功观测到近 30 个宇宙 γ 射线暴和近百例太阳耀斑 X 射线和 γ 射线爆发. 该项目研究获得了多个奖项, 例如神舟二号宽波段空间 γ 射线暴观测研究及仪器研制获 2004 年度国家科技进步二等奖 (马宇蒨、张南、王焕玉等). 这是中国空间天文观测跨出的重要一步, 为后续空间天文学发展打下了基础.

表 1 中国空间天文任务

Table 1 Space astronomy missions in China

序号	项目	发射日期	目前状态	说明
1	太阳和宇宙天体高能辐射监测仪	2001 年 1 月 10 日	结束运行	搭载神舟二号留轨舱. 宇宙 γ 射线暴, 太阳耀斑的高能 X 射线辐射
2	DAMPE	2015 年 12 月 17 日	在轨运行	宇宙射线起源传播及加速机制和高能 γ 射线天文
3	POLAR	2016 年 9 月 15 日	结束运行	搭载天宫二号. γ 射线暴偏振探测
4	HXMT	2017 年 6 月 15 日	在轨运行	研究黑洞、中子星 X 射线双星等天体硬 X 射线快速光变和能谱特性
5	极光计划	2018 年 10 月 29 日	在轨运行	空间天文 X 射线偏振探测实验
6	龙虾眼 X 射线探测卫	2020 年 7 月 20 日	在轨运行	在轨验证 X 射线能段上的超大视场聚焦成像技术, 对 X 射线能段上的暗物质信号进行深度探测
7	GECAM	2020 年 12 月 10 日	在研	发现 “引力波 + 电磁辐射” 天体, 研究高能暂现源
8	SVOM	2022 年	在研	探测 γ 射线暴的位置、时变、流量能谱 (红移) 特征、光学余辉并研究其物理机制
9	EP	2022 年	在研	X 射线时变天文
10	POLAR2	2024 年	在研	中欧合作. 搭载中国空间站, γ 射线暴偏振探测
11	CSS-OS	2023 年	在研	中国空间站伴飞设施. 多色成像与无缝光谱巡天, 太赫兹天文观测
12	HERD	2025 年	预先研究	以前所未有的灵敏度搜寻暗物质, 探究宇宙线起源, 开展最高灵敏度的高能 γ 射线巡天
13	eXTP	2027 年	背景型号在研	通过对一奇 (黑洞) 和二星 (普通中子星和磁星) 的观测, 理解三极端 (极端引力、磁场、密度/能量) 条件下的极端物理规律
14	太极计划	2033 年	分步立项在研	空间引力波实验, 分三步走: 太极一号于 2019 年 8 月 31 日发射, 验证了关键技术; 太极二号双星计划已正式启动, 预计 2025 年左右发射
15	天琴计划	2035 年	分步立项在研	空间引力波实验, 包含 0, 1, 2, 3 四个阶段. 天琴一号于 2019 年 12 月 20 日发射, 验证了关键技术. 天琴二号已启动, 计划 2025 年发射

3.1.2 γ 射线偏振探测仪

γ 射线偏振探测仪 (POLAR) 是国际上首台高灵敏度偏振探测器 (见图 3), 由中国科学院高能物理研究所牵头, 与瑞士日内瓦大学、保罗谢尔研究所以及波兰国家核研究中心联合研制.

POLAR 是由多个塑料闪烁体棒簇组成的科学仪器, 利用康普顿散射原理测量入射 γ 射线的偏振 [5].

POLAR 于 2016 年 9 月 15 日随天宫二号发射. 在其正常运行期间 (2016 年 9 月 15 日至 2017 年 3 月 31 日) 共探测到 55 个确认的 γ 暴, 发布 49 个 GCN circular. 得到国际上最大样本的高精度 γ 暴偏振测量结果 [6], 发现 γ 暴在单个脉冲内偏振角的演化现象, 对 γ 暴辐射机制以及黑洞形成等基本天体物理过程的研究产生了重要影响.

3.2 正在运行的天文卫星

3.2.1 暗物质粒子探测卫星

暗物质粒子探测卫星 (Dark Matter Particle Explorer, DAMPE)[7] 于 2015 年 12 月发射, 如图 4(a) 所示. DAMPE 由中国科学院紫金山天文台牵头, 高能物理研究所和中国科技大学为主要承担单位, 其科学目标是探索可能的宇宙暗物质粒子湮灭或衰变产

生的特征信号, 研究宇宙射线起源的传播和加速机制以及高能 γ 射线天文. DAMPE 探测器以 BGO 量能器为中心, 包括塑闪列阵探测器、硅列阵探测器和中子探测的复合探测器, 如图 4(b) 所示. 其电子和光子探测能量范围为 2 GeV~10 TeV, 能量分辨率为 1% (1 TeV 处), 对电子的探测几何因子超过 0.3 m^2·sr; 质子和重离子探测能量范围为 50 GeV~500 TeV, 能量分辨率优于 40% (1 TeV 处), 几何因子为 0.2 m^2·sr; 电荷分辨率为 0.33 (Z = 26 处), 100 GeV 的角分辨率优于 0.1°, 这些指标已达到或超过目前国际上同类空间探测器的水平.

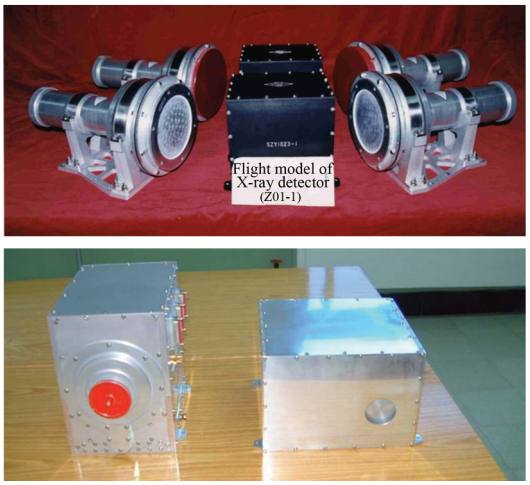


图 2 神舟 2 号上搭载了超软 X 射线、X 射线和 γ 射线探测器

Fig. 2 Photos of SXD, XD and γD onboard SZ-2

DAMPE 首次测量到电子宇宙射线能谱约在 1 TeV 处存在拐折 [8], 该拐折反映了高能电子辐射源的典型加速能力, 其精确的下降行为对于判定部分 (能量低于 1 TeV) 电子宇宙射线是否来自于暗物质具有关键作用.

DAMPE 于 2019 年发布了 40 GeV~100 TeV 能段的宇宙线质子精确能谱测量结果 [9]. 这是国际上首次利用空间实验实现对高达 100 TeV 的宇宙线质

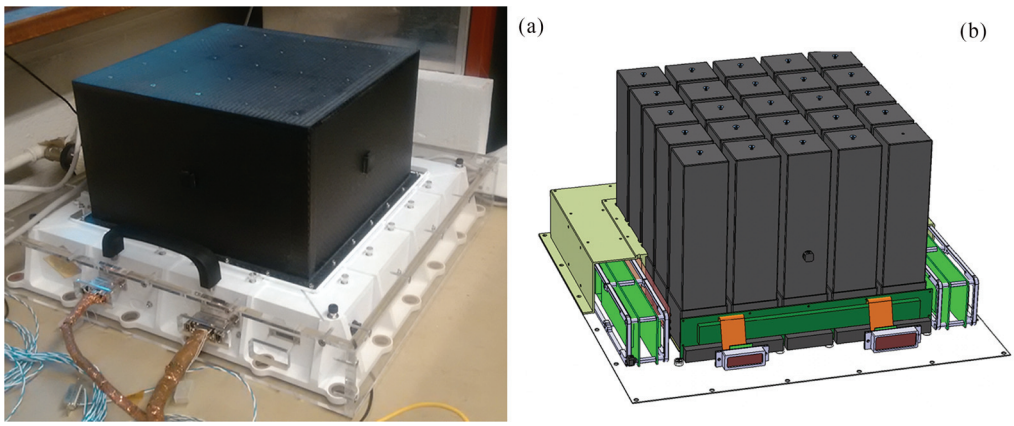


图 3 γ 射线偏振探测器 (POLAR). (a) 正样件, (b) 模型外观

Fig. 3 γ ray polarimeter (POLAR). (a) Photo of POLAR flight model. (b) Model view of POLAR

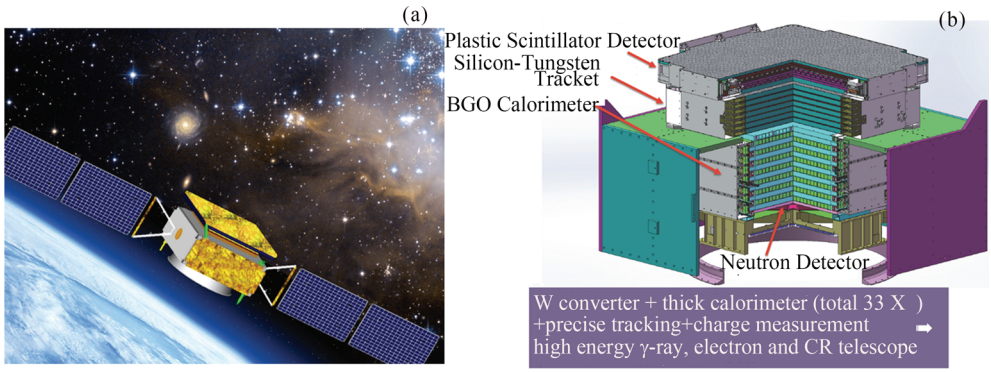


图 4 中国暗物质粒子探测卫星 (a) 及其载荷 (b)

Fig. 4 Chinese Dark Matter Particle Explorer (DAMPE) satellite (a) and its payload (b)

子能谱的精确测量, 该能量上限比阿尔法磁谱仪 (AMS-02) 实验高出约 50 倍, 比 CALET 实验最新结果高出约 10 倍.

3.2.2 硬 X 射线调制望远镜

硬 X 射线调制望远镜卫星 (HXMT)[10] 于 2017 年 6 月 15 日成功发射 (见图 5), 升空后命名为 "慧眼", 是中国首颗空间 X 射线天文卫星, 由中国科学院空间先导专项和国家航天局项目基金联合支持.

慧眼卫星搭载了高能、中能及低能 X 射线望远镜三种科学载荷和空间环境监测器, 其观测能区为 1~250 keV. 与国外 X 射线卫星相比, 慧眼卫星具有覆盖能段宽、在高能 X 射线能段的有效面积最大、时间分辨率高、探测死时间很小、观测强源没有光子堆积效应等显著优点, 具有独特的研究天体多能段 X 射线快速光变的能力, 可以探索比以往更靠近黑洞视界或中子星表面的区域, 开启了研究黑洞、中子星 X 射线双星等天体硬 X 射线快速光变和能谱特性的新窗口.

截至 2020 年 9 月, 慧眼卫星共观测研究了 20 个新爆发 X 射线双星以及多个已知 X 射线双星的新爆发, 开创了宽能段时变和能谱研究的新窗口, 得到了黑洞双星系统最高能量 QPO、吸积爆发喷流演化证据、中子星双星系统最高能量高频 QPO、中子星表面单个热核暴的冕冷却效应、大质量 X 射线双星系统超艾丁顿吸积的辐射压与气体压转换、中子星表面直接测量的最强磁场 [11] 和 FRB 对应体的磁星耀发事件, 以及双中子星合并引力波事件电磁对应体的高能流量上限 [12] 等重要结果和科学发现.

3.2.3 极光计划——立方星 X 射线偏振探测器

2018 年 10 月 29 日, 代号为铜川一号 TY4-02 的极光计划立方星首发验证试验卫星在酒泉卫星发射中心成功发射入轨.

极光计划的空间天文 X 射线偏振探测器由清华大学牵头研制, 其采用了新一代的核探测技术, 将重新启动天文 X 射线偏振观测停滞了约 40 年的研究工作. 后续将开展进一步的测试和观测任务.

极光计划 X 射线偏振探测器经过一年的卫星观测, 探测到来自蟹状星云及脉冲星的软 X 射线偏振信号, 并首次发现脉冲星自转突变和恢复过程中 X 射线偏振信号的变化 [13], 说明在此过程中脉冲星磁场发生了变化. 这一探测结果也标志着由于技术原因而停滞了 40 多年的天文软 X 射线偏振探测窗口重新开启. 该研究实现了历史上第二次天体软 X 射线偏振测量.



图 5 硬 X 射线调制望远镜

Fig. 5 Hard X-ray modulation telescope

3.2.4 龙虾眼 X 射线探测卫星

龙虾眼 X 射线探测卫星 [14] 由南京大学天文与空间科学学院牵头, 联合了香港大学太空研究实验室、中国航天科技集团有限公司下属的中国空间技术研究院北京空间机电研究所 (五院 508 所) 以及上海航天技术研究院上海宇航系统工程研究所 (八院 805 所) 等相关研究机构, 历时五年研制成功.

龙虾眼 X 射线探测卫星将在轨验证 X 射线能段上的超大视场聚焦成像技术, 对 X 射线能段上的暗物质信号进行深度探测.

龙虾眼 X 射线探测卫星于 2020 年 7 月 20 日随资源三号 03 星被中国长征四号乙型运载火箭推送并成功发射入轨, 目前运行正常.

3.3 在研空间天文任务

3.3.1 引力波暴高能电磁对应体全天监测器

引力波暴高能电磁对应体全天监测器 (Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM) 卫星 [15] 的主要科学目标为: 发现"引力波 + 电磁辐射"天体, 研究高能暂现源.

GECAM 采用 2 颗相同的卫星, 二者反地心指向, 轨道相同、相位相反, 从而实现对全天的无缝监测 (见图 6).

每颗 GECAM 卫星包括 20 个 γ 射线探测器 (GRD) 和 5 个荷电粒子探测器 (CPD) 两种有效载荷. GRD 用于 γ 暴的触发探测 (能谱和时变) 和定位; CPD 监测空间带电粒子流量, 帮助 GRD 排除空间荷电粒子引起的误触发.

地面引力波探测器 (aLIGO/aVirgo) 将于 2020 年左右达到最佳灵敏度, 为了利用引力波研究可实现

重大发现的窗口, GECAM 卫星选择于 2020 年 12 月发射运行.

3.3.2 空间暂现源监视器

空间暂现源监视器 (SVOM)* 是中法两国政府间合作的天文卫星项目 (见图 7), 通过探测 γ 射线暴的位置、时变、流量能谱 (红移) 特征、光学余辉等研究其物理机制, 并探测 γ 暂现源、活动星系核 (AGN) 和新星等性质. SVOM 安排了 4 个能量衔接具有特色的科学载荷, 从高到低分别为 γ 射线监视器 GRM (能量范围为 15~5000 keV, 视场/分辨率为 160°/3°), X 射线成像仪 ECLAIRs (250~4 keV, 10°/10′), 软 X 射线望远镜 MXT (7~0.3keV, 1°/20″), 光学望远镜 VT (可见近红外, 21′/1″). 当 γ 暴由ÉCLAIR 和/或 GRM 触发后, 顺次由能量较低的载荷逐次精确定位并控制卫星指向目标, 通过 VHF 空地实时通信, 通报给地面大型跟随望远镜, 实现联合精细观测. 该项目还配置了地面光学宽视场相机 GWAC.



图 6 GECAM 卫星

Fig. 6 GECAM satellite

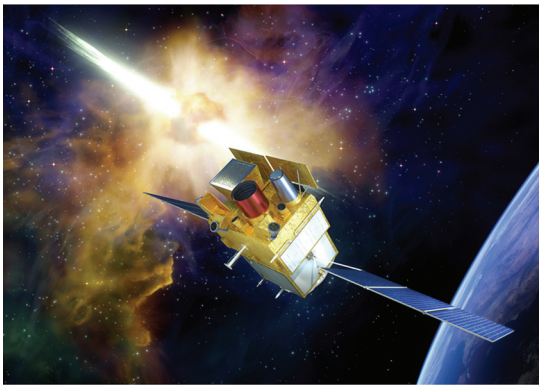


图 7 SVOM 卫星

Fig. 7 Space Variable Object Monitor (SVOM)

SVOM 于 2010 年正式立项, 2017 年转入 Phase C 阶段, 2019 年转入 Phase D 阶段, 计划于 2022 年发射, 是继 SWIFT 后最为重要的 γ 暴探测卫星.

3.3.3 爱因斯坦探针

爱因斯坦探针 (Einstein Probe, EP) 是聚焦于时变天文学研究的 X 射线天文卫星 (见图 8)[16], 其主要科学目标包括: 发现 X 射线暂现天体, 监测已知天体的活动性, 探究这些现象的性质及相关物理机制; 发现和探索沉寂黑洞的耀发, 测绘黑洞的分布, 进一步理解其起源、演化及物质吸积过程; 搜寻来自引力波源的 X 射线信号, 增进对极端致密天体及其合并过程的认知.

EP 卫星有效载荷包括一台宽视场软 X 射线成像望远镜 WXT (能量范围 0.5~4 keV, 视场 60°×60°, 源定位精度 1″, 1.25 keV 处的能量分辨率为 170 eV) 和一台后随 X 射线成像望远镜 FXT (源定位精度 38′, 在 1.25 keV 处能量分辨率为 170 eV).

WXT 采用了新型龙虾眼微孔光学 (MPO) 聚焦镜和背照 CMOS 焦平面器件; FXT 为 Wolter-I 型掠入射 X 射线望远, 在 WXT 对源定位并控制卫星转向后进行后随观测.

爱因斯坦探针卫星计划于 2022 年前后发射.

3.3.4 空间站多功能光学设施

中国空间站计划中安排了以光学天文巡天为主, 具有显著国际竞争力的多功能光学设施 [17]. 该设施采用 2 m 口径主镜的离轴三反光学系统, 巡天观测的视场约为 1°×1°, 角分辨率优于 0.15″ (80% 能量集

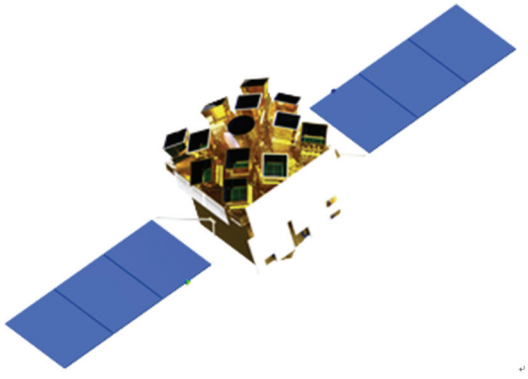


图 8 爱因斯坦探针卫星

Fig. 8 Einstein Probe satellite

*http://www.svo.fr/

中度半径). 光学设施与光学舱平台组成的光学舱是与空间站同轨飞行的独立飞行器 (见图 9), 可定期或根据需要与空间站对接进行维护与升级, 其设计运行寿命大于 10 年, 主要科学任务包括多色成像与无缝光谱巡天和太赫兹天文观测.

空间站多功能光学设施 (CSS-OS) 已于 2013 年正式立项, 是中国当前规模最大和最具挑战性的空间天文项目, 预计 2023 年后发射.

3.3.5 增强型 γ 射线暴偏振探测仪 (POLAR-2)

POLAR-2 是 POLAR 的后续实验项目, 其科学探测能力比 POLAR 及其他以往 γ 暴偏振探测仪器将有大幅提升. POLAR-2 主要科学目标为, 对 γ 暴瞬时辐射中 γ 射线的偏振状态进行高精度测量, 从而对 γ 暴瞬时辐射的物理机制、辐射区结构以及磁场构型等进行研究.

2018 年 2 月 18 日, 联合国外层空间事务办公室 (UNOOSA)/中国载人航天工程办公室 (CMSA) 开始征集中国空间站 (CSS) 国际合作项目. 2019 年 6 月 12 日, 由瑞士日内瓦大学 (UNIGE)、中国科学院高能物理研究所 (IHEP)、德国马普地外物理研究所 (MPE) 以及波兰国家核研究中心 (NCBJ) 等组成的国际合作组递交的 POLAR-2 项目正式入选 CSS 国际合作项目.

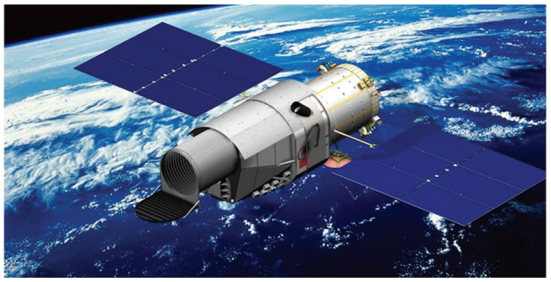


图 9 多色成像与无缝光谱巡天的光学舱

Fig. 9 Opitcal module of multi-color imaging and seamless spectral survey

POLAR-2 计划采用 100 套偏振探测单体, 其单体数量是 POLAR 的 4 倍 (见图 10). POLAR-2 将优化设计, 拟采用 SiPM 代替传统的多阳极光电倍增管, 大大提高能量低端的探测效率. 此外, 为了实现对所探测到的 γ 暴进行能谱测量和定位研究, 还计划搭载 12 个小型能谱仪探头.

目前, POLAR-2 计划搭载货运飞船将于 2024 年发射.

4 未来 10 年中国空间天文展望

目前, 在中国科学院空间科学先导专项、载人航天及其他项目经费的支持下, 中国多项具有国际竞争力的空间天文项目正在开展研制工作, 未来几年计划陆续投入运行, 这将极大改变中国天文学研究长期依赖国外空间天文数据的状况, 使中国在天体物理重要领域的研究能够较快达到国际先进水平.

中国科学院空间科学先导专项二期工程结合中国现有的研究基础和优势, 凝练了 4 条重大科学前沿: 极端宇宙, 时空涟漪, 日地全景, 宜居行星. 其中, 除日地全景之外, 其余都是当前空间天文学的热点领域. 在极端宇宙研究方面, 将推动 eXTP 和暗物质探测项目; 在时空涟漪方面, 将实施 “引力波探路者” 即

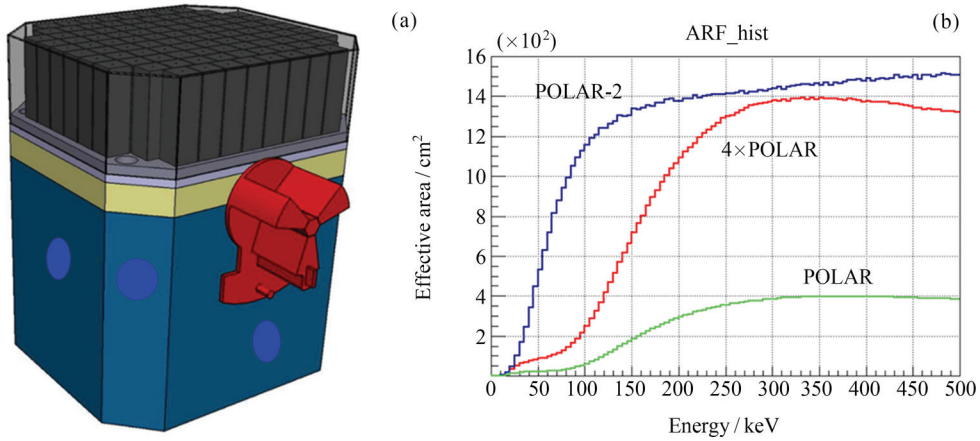


图 10 POLAR-2 整体结构 (a) 及有效面积 (b)

Fig. 10 POLAR-2 model (a) and effective area of POLAR-2 (b)

太极二号; 在宜居行星方面, 将推动 “发现地球 2.0” 和 “探寻大气信息和宜居环境” 项目.

天琴二号已正式启动. 载人航天方面, 将继续推进 HERD 项目的正式立项. 中国科学院空间科学先导专项还支持了一些空间天文项目的概念研究. 此外, 一些由其他经费支持的空间项目预先研究和关键技术攻关也在积极推进中.

4.1 大型旗舰级空间天文台

除了继续研制和发射中小型空间科学卫星之外, 中国正在积极推进发射和运行具有重大科学意义并且能够长期主导一个研究领域的大型旗舰级空间天文台, 类似美国 NASA 和欧洲空间局的哈勃空间望远镜、Chandra X 射线天文台、XMM-Newton X 射线天文台、Hershcel 红外天文台等. 目前, 已具有良好基础并且可行性明确的项目有 eXTP 和 HERD.

4.1.1 增强型 X 射线时变与偏振探测卫星

增强型 X 射线时变与偏振探测卫星 [18] (enhanced X-ray Timing and Polarization satellite, eXTP) 的核心科学目标是通过对一奇 (黑洞) 和二星 (普通中子星和磁星) 的观测, 理解三极端 (极端引力、磁场、密度/能量) 条件下的极端物理规律. eXTP 计划于 2027 年发射升空.

eXTP 任务包括能谱测量 X 射线聚焦望远镜阵列 (SFA)、偏振测量 X 射线聚焦望远镜阵列 (PFA)、大面积 X 射线准直望远镜 (LAD) 和广角监视器 (WFM) 四种有效载荷, 卫星总装后的质量约 4.5 t. 其中, LAD 在卫星发射时被折叠压缩, 入轨后再展开.

4.1.2 空间高能宇宙辐射探测设施

空间高能宇宙辐射探测设施 * (High Energy cosmic-Radiation Detection facility, HERD) 项目由中国科学院高能物理研究所和紫金山天文台联合提出, 计划于 2025 年左右搭载于未来中国空间站, 拟在轨运行 10 年左右.

HERD 主要科学目标如下: 以前所未有的灵敏度搜寻暗物质; 探究宇宙线起源; 开展最高灵敏度的高能 γ 射线巡天, 开展脉冲星导航体制的技术探索和前沿研究, 并进行高灵敏度 γ 射线偏振观测.

HERD 主要包括三维成像量能器 CALO、包裹量能器五面的硅径迹探测器 STK 以及塑闪探测器 PSD. HERD 量能器采用三维晶体颗粒阵列代替传统的长条交叉型量能器方案, 既提升了提取信息的精度, 又使得量能器五面都具有灵敏探测能力. 由于采用了三维成像、五面灵敏量能器的创新设计, 其有效接受度等主要技术指标相比已有或即将上天的同类实验将有数量级的提升, 特别适于空间应用.

4.2 中国空间引力波计划: 太极计划与天琴计划

太极计划 [19] 将发射由位于等边三角形顶端三颗卫星组成的引力波探测星组, 利用激光干涉方法进行中低频波段 (1×10^{-4}~$1.0\,\mathrm{Hz}$) 引力波探测. 其主要科学目标是观测双黑洞并合和极大质量比天体并合时产生的引力波辐射, 以及其他宇宙引力波辐射过程. 卫星采用无拖曳技术, 星组中卫星间距为 $300\times10^5\,\mathrm{km}$, 激光功率约 $2\,\mathrm{W}$, 望远镜口径约 $0.5\,\mathrm{m}$, 加速度噪声、测距精度等技术指标总体上优于欧洲空间局 LISA 计划的要求, 频率范围覆盖了 LISA 的低频和日本 DECIGO 计划的中频.

太极计划将采取单星、双星、三星 “三步走” 的发展战略和路线图. 2019 年 8 月 31 日上午 7 时 41 分, 太极一号微重力技术实验卫星在酒泉卫星发射中心成功发射. 卫星在轨测试按计划有序开展. 截至目前, 卫星状态正常, 各项测试结果正常, 第一阶段在轨测试任务顺利完成, 取得一系列成果. 目前, 太极二号任务已正式启动.

除太极计划之外, 中山大学正在积极推进天琴计划 [20]. 其将运行于地球 $10^5\,\mathrm{km}$ 轨道处, 三个卫星间距约在 $10^5\,\mathrm{km}$ 之上. 天琴计划实验将由三颗全同卫星 (SC1, SC2, SC3) 组成一个等边三角形阵列, 卫星自身进行高精度无拖曳控制, 以抑制太阳风、太阳光压等外部干扰, 卫星之间利用激光精确测量由引力波造成的距离变化. 天琴计划的重要探测对象是一个周期仅 $5.4\,\mathrm{min}$ 的超紧凑双白矮星系统 RXJ0806.3+1527 产生的引力波.

2019 年 12 月 20 日天琴一号试验卫星在太原卫星发射中心发射. 天琴一号卫星的核心任务是验证空间惯性基准技术, 这也是空间引力波探测技术体系中的核心技术之一, 具体包括高精度惯性传感、微牛级连续可调微推进和无拖曳控制三大关键技术, 以及高精度激光干涉测量、高稳定度温度控制和高精度质心控制等技术. 实验结果显示天琴一号卫星在轨验证的所有技术指标不仅超出了任务预期目标, 也超过国内同类技术的最高水平, 部分指标比现有指标提高二个量级以上.

*http://herd.ihep.ac.cn/

5 结语

中国空间天文学起步于1970年代的球载空间天文观测研究, 截至目前已有HXMT, DAMPE及龙虾眼X射线卫星等多颗天文卫星在轨运行, GECAM, EP, SVOM等多颗天文卫星在未来几年将陆续发射. 此外由中国主导的国际合作大型旗舰级空间项目eXTP和HERD正在积极推进中. 中国空间天文学正面临高速发展的大好形势, 应把握好这一发展机遇, 实现中国空间天文学研究的跨越式发展.

参考文献

[1] ZHANG Heqi, XU Yongxuan. Space Astronomy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998 (张和祺, 徐永煊. 空间天文学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998)

[2] LI Tibei, WU Mei. Direct method of imaging and spectrum unfolding in high energy astronomy [J]. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 1993, **3**: 17-26 (李惕碚, 吴枚. 高能天文中成像和解谱的直接方法 [J]. 天体物理学报, 1993, **3**: 17-26)

[3] LU Zhuguo, WANG Jianzhong, LI Yanguo, *et al.* Hard X-ray imaging with a slat collimated telescope [J]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A*, 1995, **362**(2/3): 551-555

[4] XU Yupeng. Data System for X-ray Detector Onboard Shenzhou-2 [D]. Beijing: Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2001 (徐玉朋. 神舟2号飞船X射线探测器的数据系统 [D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2001)

[5] PRODUIT N, BAO Tianwei, BATSCH T, *et al.* Design and construction of the POLAR detector [J]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A*, 2018, **877**: 259-268

[6] ZAHNG Shuangnan, MERLIN Kole, BAO Tianwei, *et al.* Detailed polarization measurements of the prompt emission of 5 gamma-ray bursts [J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**: 258-264

[7] CHANG Jin, AMBROSI G, AN Qi, *et al.* The dark matter particle explorer mission [J]. *Astropart. Phys.*, 2017, **95**: 6-24

[8] AMBROSI G, AN Qi, ASFANDIYAROV R, *et al.* Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons [J]. *Nature*, 2017, **552**: 63-66

[9] AN Qi, ASFANDIYAROV R, AZZARELLO P, *et al.* Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite [J]. *Sci. Adv.*, 2019, **5**(9): 3793

[10] ZAHNG Shuangnan, LI Tibei, LU Fangjun, *et al.* Overview to the Hard X-ray Modulation Telescope (Insight-HXMT) satellite [J]. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2020, **63**: 249502

[11] GE Mingyu, JI Long, ZHANG Shuangnan, *et al.* Insight-HXMT firm detection of the highest-energy fundamental cyclotron resonance scattering feature in the spectrum of GRO J1008-57 [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2020, **899**: 19

[12] LI Tibei, XIONG Shaolin, ZHANG Shuangnan, *et al.* Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817 [J]. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2018, **61**: 031011

[13] FENG Hua, RONALDO Bellazzini. The X-ray polarimetry window reopens [J]. *Nat. Astron.*, 2020, **4**: 547

[14] SU Yun, WU Xiamin, DONG Long, *et al.* Design of lobster-eye focusing system for dark matter detection [J]. *Springer Proc. Phys.*, 2020, 232. DOI.org/10.1007/978-3-030-27300-2_4

[15] HAN Xingbo, ZHANG Keke, HUANG Jia, *et al.* GECAM satellite system design and technological characteristic [J]. *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.*, 2020, **50**(12): 129507

[16] YUAN Weimin, ZHANG Chen, CHEN Yong, *et al.* Einstein probe: exploring the ever-changing X-ray universe [J]. *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.*, 2018, **48**(3): 039502

[17] GONG Yan, LIU Xiangkun, CAO Ye, *et al.* Cosmology from the Chinese Space Station Optical Survey (CSSOS) [J]. *Astrophys. J.*, 2019, **883**(2): 203

[18] ZHANG Shuangnan, ANDREA Santangelo, MARCO Feroci, *et al.* The enhanced X-ray timing and polarimetry mission——eXTP [J]. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2019, **62**: 29502

[19] HU Wenrui, WU Yueliang. The taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2017, **4**(5): 685-686

20] LUO Jun, CHEN Lisheng, DUAN Huizong. Tianqin: a space-borne gravitational wave detector [J]. *Class. Quant. Grav.*, 2016, **33**(3): 035010