0254-6124/2026/46(3)-0658-23 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHOU Jianghua, CHENG Junfei, CAI Rong, LIU Jifeng, YANG Yanchu, GAN Qingbo, YAN Daikang, HUANG Wanning, LI Yijian, LU Ying, CUI Yuxuan. Balloon-borne Astronomical Observations in Antarctica (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(3): 658–680. CSTR:32142.14.cjss.2025–0191. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025–0191

南极球载天文观测*

周江华[1] 程骏飞[1] 蔡 榕[1] 刘继峰[2]
杨燕初[1] 甘庆波[2] 闫代康[3] 黄宛宁[1]
李一健[1] 卢 莹[1] 崔宇轩[1]

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

2(中国科学院国家天文台 北京 100012)

3(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘 要 南极大气凭借极低水汽含量和多种波段高透射率成为天文观测的绝佳地点之一. 尤其是其独特的极昼条件和稳定的极地涡旋, 为科学气球实现长时间定高飞行与绕极漂流提供了有利条件, 使科学气球成为低成本、高效率的观测平台. 1984 年以来南极科学气球以美国麦克默多站为主要发放基地, 已完成数百项球载观测实验. 其中天文观测占主要部分, 涵盖粒子天体物理与非粒子天体物理两大领域, 涉及宇宙微波背景辐射测量, 星系太赫兹与宽波段光谱成像, 中微子与反物质观测等多项科学实验. 基于公开文献, 针对南极地区开展的高空球载天文观测实验进行系统综述, 并对中国南极气球基地建设进行展望: 开展环极长时间气球天文实验, 对提升中国的科学竞争力、增强南极地区的国际话语权具有重要意义.

关键词 科学气球, 长时间飞行, 南极科考, 非粒子天体物理, 粒子天体物理

中图分类号 P112

Balloon-borne Astronomical Observations in Antarctica

ZHOU Jianghua[1] CHENG Junfei[1] CAI Rong[1] LIU Jifeng[2]
YANG Yanchu[1] GAN Qingbo[2] YAN Daikang[3] HUANG Wanning[1]
LI Yijian[1] LU Ying[1] CUI Yuxuan[1]

1(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

2(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

3(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Antarctica is widely regarded as one of the most favorable natural laboratories for astronomy, owing to its exceptionally low atmospheric water vapor and correspondingly high transmittance

* 国家自然基金重大仪器项目资助 (52227811)

2025-11-12 收到原稿, 2026-03-02 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

across multiple wavebands. Beyond these radiative advantages, the Antarctic summer provides a unique operational regime for stratospheric scientific balloons: continuous daylight and a relatively stable polar vortex support long-duration, near-constant-float-altitude flights with circumpolar trajectories. These conditions enable balloon platforms to deliver space-like observing environments at substantially lower cost, with the added benefits of rapid iteration, recoverable payloads, and flexible mission design. Since 1984, the U.S. Antarctic balloon program—launched primarily from McMurdo Station—has carried out hundreds of balloon-borne experiments, with astronomical and astrophysical missions forming a major fraction of the overall portfolio. The resulting body of work spans two broad domains: particle astrophysics and electromagnetic (photon) astronomy. Representative themes include measurements of the Cosmic Microwave Background (CMB), terahertz observations and broadband spectral imaging of Galactic targets, and particle-oriented investigations such as neutrino-related observations and searches for antimatter components. Together, these missions have helped advance frontier science while simultaneously maturing key enabling technologies for near-space instrumentation, including long-duration platform operations, pointing and stabilization, low-noise detector readout, cryogenic subsystems, background suppression strategies, and robust telemetry, recovery, and reflight capability. Building on publicly available literature and mission records, this paper provides a systematic review of Antarctic balloon-borne astronomical experiments, organizing prior efforts by observing band, scientific objective, and payload and instrument class. By synthesizing the scientific drivers and the evolution of mission concepts, the review also highlights how Antarctic ballooning serves as a practical bridge between ground-based facilities and space missions-de-risking high-impact hardware and observation strategies in a repeatable, lower-cost environment. Finally, we discuss prospects for developing China's Antarctic balloon infrastructure. Establishing a dedicated polar balloon capability and conducting long-duration circumpolar balloon astronomy campaigns would strengthen China's competitiveness in near-space astrophysics, accelerate technology readiness through iterative fielding, and enhance China's scientific visibility and influence in Antarctic research.

Key words Scientific balloons, Long-duration flight, Antarctic expedition, Non-particle astrophysics, Particle astrophysics

0 引言

南极是世界上海拔最高的冰盖大陆, 恶劣的气候使其成为生命的禁区, 但其蕴藏着无数亟待探索的科学奥秘. 南极大气含水量低, 以干空气为主导, 在红外、亚毫米波甚至太赫兹波段的透射率高于其他地区, 是开展星系演化、宇宙微波背景辐射等天文观测的绝佳地点. 自 20 世纪 50 年代《南极条约》签订后, 南极科学成果数量逐渐成为影响各国南极事务话语权的重要因素. 目前, 世界各国在两极地区建立了 50 多个极地常年考察站[1], 中国也在南极建立了长城站、中山站、昆仑站、泰山站和秦岭站等 5 个科考站.

在南极地区进行地基天文观测实验, 高海拔、严寒、低气压的环境增加了探测任务的难度, 但仍是天文学高度重视的观测站址. 同时, 浮空器、卫星、飞机等空天探测也成为南极科考的重要手段.

高空科学气球 (以下称科学气球) 飞行在高度为 30～45 km 的平流层区域, 具有载重量大, 成本低、实验灵活、回收方便等特点[2]. 依靠南极夏季极昼和极地环流发展的长航时技术, 可以使科学气球飞行持续时间达到数量级提升, 极大提升了其科学效益, 成为国际上在南极开展天文观测实验的重要载体.

本文通过球载天文观测的起源与发展, 论述南极观测的特点与优势, 分析南极球载天文观测领域的国内外现状. 以分析南极球载天文观测领域的实验项目为主, 进一步阐述在南极地区开展球载天文观测实验的重要性与战略意义. 展望南极球载实验的前景, 以期对中国南极球载天文实验的发展提供有益参考与学术支撑.

1 科学气球天文实验的发展历程

早在 20 世纪就已开始使用气球作为载体进行天文观测, 1912 年奥地利物理学家赫斯携带沃尔夫型金箔验电器, 乘坐氢气球进行了 7 次飞行实验, 并根据海拔越高空气电离越严重的实验结果发现宇宙辐射的存在[3]. 20 世纪 50 年代, 美国平流层望远镜 (Stratoscope) 系列气球平台两次搭载望远镜升空, 成功观测了太阳与系外星云. 气球吊舱实物如图 1 所示.

1960 年以来, 美国、欧洲等多国航天机构将空间飞行器、探空火箭和科学气球并列作为开展多学科空间研究的重要运载工具. 由于科学气球飞行在大气层顶端, 剩余大气深度仅为海平面的 1%～0.1%, 甚至更低, 对天体的全波段电磁辐射几乎透明, 对宇宙线粒子的阻挡极低, 成为空间天文观测的重要平台. 美国、法国、俄罗斯、日本、瑞典、加拿大等国家的空间机构相继开展了大量球载天文观测实验, 并一直持续至今. 图 2 给出了具有代表性的两次实验载荷实物. 德国的日出号 (SUNRISE) 高空天文台搭载了太阳望远镜和成像矢量旋光仪, 对太阳活动进行观测[4]; 瑞典的偏振 γ 射线观测 (Polarised Gamma-ray Observer, PoGOLite) 实验在北极夏季展开, 检测和表征来自蟹状星云和天鹅座 X-1 的偏振 γ 辐射[5]. 在各国的科学气球活动中, 天文观测占有相当比例.

1986 年挑战者号航天飞机失事, 天基观测任务受到影响被迫中断, 大量的科学观测计划和预先研究急需借助科学气球平台, 这直接推动了各国气球技术的进一步发展[6]. 20 世纪 90 年代, 美国国家航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 看准南极的有利条件, 开展了长时气球计划 (Long Duration Balloon Project), 努力发展利用常规零压式气球的长时气球技术和超长时气球 (Ultra Long Duration Balloon) 技术 (采用超压气球技术, 试验基本成功, 技术尚未完全成熟)[7], 同时规划了南极气球天文计划, 包括非粒子天体物理和粒子天体物理两部分, 开展了数十项使用长时气球搭载天文观测设备进行的天文物理学实验.

由于科学气球具备成本低、灵活性高、驻空时间长、便于回收等优势, 常被用作卫星与空间站任务的原理验证与技术成熟度 (TRL) 提升平台, 从而将高风险环节前移到可试错、可复盘的近空间环境中. 宇宙先进薄型离子量能器 (Advanced Thin Ionization Calorimeter, ATIC) 气球实验在获得高能电子异常谱形等结果后研究指出, 气球观测受限于时间与残余大气系统误差, 因而促进转向发射空间卫星以改进测量, 并于 2011 年“悟空”(Dark Matter Particle Explorer, DAMPE) 正式立项; 宇宙线能量和质量探测 (Cosmic-Ray Energetics And Mass, CREAM) 实验将硬件可靠性、读出链路、触发策略、背景抑制等不确定性问题尽可能前移到可迭代的气球实

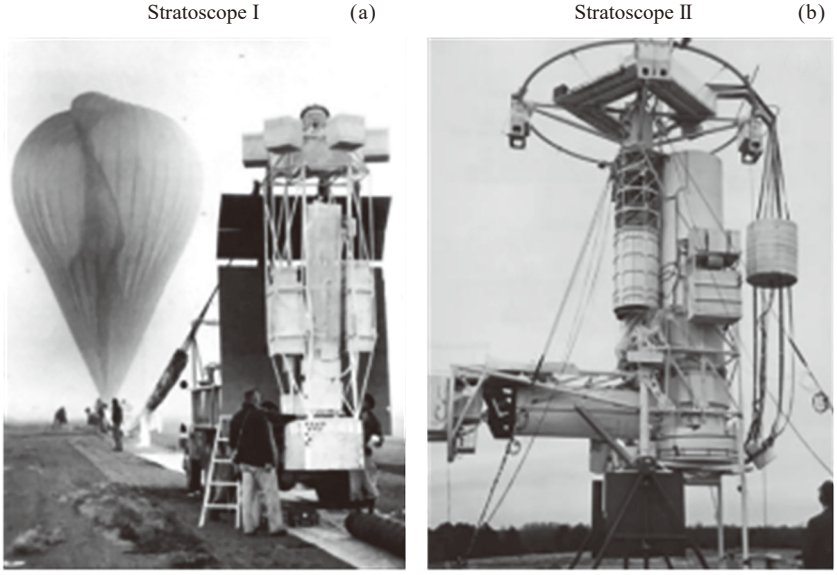

图 1 Stratoscope 系列球载望远镜实物

Fig. 1 Photographs of Stratoscope series balloon-borne telescopes

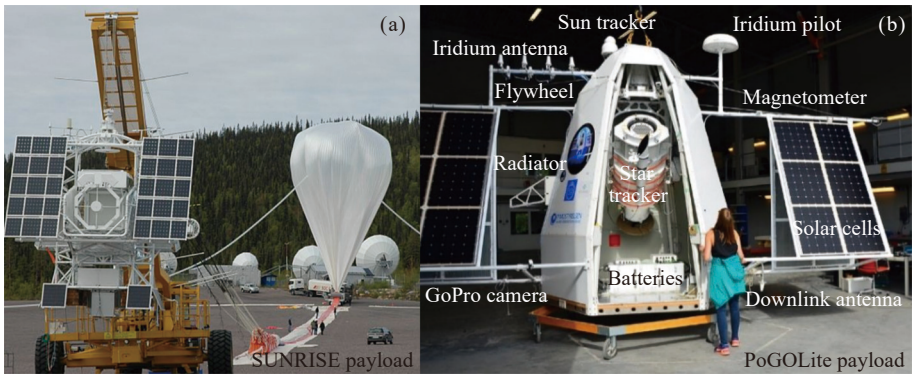

图 2 SUNRISE 载荷与 PoGOLite 载荷实物

Fig. 2 Physical images of SUNRISE payload and PoGOLite payload

验阶段处理, 从而降低 ISS-CREAM 空间站实验的在轨部署与运行风险; 毫米波段气球实验 (Balloon Observations of Millimetric Extragalactic RAdiation and Geophysics, BOOMERANG) 完成了高分辨率 CMB 结构成像与角功率谱测量, 为后续天基任务的总体设计与科学回报预期提供了可量化依据, 降低了天基任务在科学论证与系统误差控制上的不确定性.

近年来, 国外南极科学气球天文实验聚焦于利用南极独特条件, 开展长航时、高灵敏度的天文观测, 主要目标是探索星际介质特性、恒星形成过程及高能宇宙现象. 通过搭载太赫兹光谱仪、远红外望远镜及高能粒子探测器等先进设备, 气球平台能够避开大气层干扰, 对星际介质、恒星形成区、高能宇宙线及中赫兹信号等进行高精度探测. 银河系/河外超高分辨率光谱太赫兹天文台 (Galactic/Extragalactic ULDB Spectroscopic Terahertz Observatory, GUSTO) 通过太赫兹波段光谱观测研究银河系内星际介质的碳、氧、氮元素分布[8]; 亚毫米波段高光谱分辨率平流层天体物理望远镜 (Astrophysics Stratospheric Telescope for High Spectral Resolution Observations at Submillimeter-wavelengths, ASTHROS) 利用远红外光谱技术追踪恒星反馈过程与星系演化; 而南极脉冲瞬态天线 (Antarctic Impulsive Transient Antenna, ANITA) 则通过射频探测技术捕捉超高能中微子与冰层相互作用产生的信号[9]. 高能粒子探测, 例如超高能观测计划 (Payload for Ultrahigh Energy Observations, PUEO) 利用南极冰盖探测超高能中微子, 以研究黑洞活动、星系碰撞等极端宇宙事件. 这些进展凸显了科学气球在低成本、长时驻留、高频次实验方面的独特优势, 已成为驱动天体物理、太阳物理和空间科学前沿探索的重要平台.

从 1977 年起中国开始发展科学气球技术, 并建立了包括气球发放、飞行测控跟踪、吊舱姿态控制、高空伞降和搜索回收、气象保障等完整系统. 1980 年 9 月中国完成了球载初级宇宙线电荷成分的观测, 也是中国第一次成功的空间高能天文观测[10]. 中国科学院高能物理研究所于 1991—1993 年间的高空天文台 (High Altitude Platform Instrument, HAPI) 系列球载探测器试验, 成功开展了高空科学气球上对脉冲中子星硬 X 射线以及 γ 射线背景的观测实验[1], 并在 1993 年对 cygX-1 的观测中验证了硬 X 射线直接解调成像方法. 中国科学院紫金山天文台发展了 X 射线与 γ 射线探测器, 通过多次国内气球飞行开展观测, 同时开展长波红外望远镜研究, 首次探测到塞弗特星系 (Seyfert Galaxy) 的长波红外辐射, 参与中日长时气球飞行实验, 成功获取了大量观测数据. 中国科学院国家天文台 1994—1999 年间, 使用 80 cm 球载太阳望远镜尝试进行太阳磁场的直接探测, 但未能取得成功. 21 世纪初, 由于航空管制和管理体制的影响, 中国科学气球的研究进展受到影响. 2018 年中国科学院空天信息创新研究院启动鸿鹄专项, 进行 10 余次气球放飞实验. 其中于 2022 年 10 月进行的日冕仪临近空间搭载实验中, 气球携带如图 3 所示的 50 mm 口径折射式日冕仪, 完成了对白光日冕的偏振观测[11]. 近期, 中国主要在青藏高原发放科学气球. 与国外相比, 中国球载天文观测的数量与质量仍存在差距, 但随着球载天文观测的需求日益旺盛, 充分利用南极无空域限制的优势, 开展南极球载天文观测任务, 已

成为南极科考与科学气球天文观测的重要未来目标之一.

2 南极科学气球实验优势

《南极条约》中规定南极不属于任何国家, 南极作为世界共有的天然实验场地. 南极地区具有独特的气球观测优势, 是建立科学气球研究基地的绝佳地点. 本节将从南极地区实验环境优势和极地气球发放基地优势两方面详细展开介绍.

2.1 南极地区实验环境优势

南极地区的标志性地域特征包括高寒高压、极昼极夜、极地涡旋、臭氧空洞、极光现象等. 其中极昼极夜和极地涡旋两大特点为科学气球提供了长时稳定飞行的保障.

2.1.1 极昼现象

极昼现象是由地球自转轴倾斜及绕太阳公转引起的. 极昼期间太阳连续 24 h 以上不落山, 全天保持白昼状态. 南极的夏季 (北半球冬季) 极昼现象持续时间较长, 南纬 70°左右极昼出现在冬至前后各 1 个月, 期间太阳持续照射. 在非极地地区放飞零压气球, 飞行中因昼夜温度交变, 夜晚太阳辐射减弱, 氦气温度降低, 气球重浮力平衡被打破, 气球呈现高度下降, 一般采用抛压舱物以维持飞行高度, 这使气球飞行持续时间仅能维持几个昼夜[12]. 而南极夏季的极昼现象保证了持续的太阳辐射, 在极昼情况下放飞科学气球可实现数十天的长时定高飞行, 并能持续利用太阳能为设备供电. 极昼时长与南极科考站所处的地理位置密切相关, 拥有长极昼时间的科考站更有利于气球飞行实验的开展. 如表 1 所示, 麦克默多站、中国昆仑站和新建的秦岭站具备较长的极昼时间, 有利于球载观测实验的开展.

2.1.2 极地涡旋

极地涡旋是极地特有气候条件中的一种, 极地涡旋产生位置主要在对流层和平流层大气, 是一种持续性大尺度气旋性环流[13]. 而南极相较于北极, 极地环

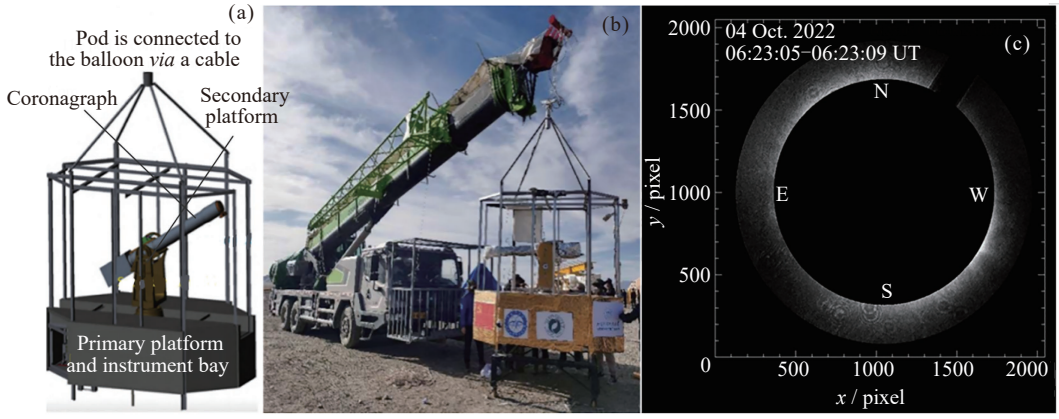

图 3 搭载日冕仪吊舱整体结构与日冕观测图像

Fig. 3 Equipped with the overall structure of the coronagraph pod and the coronal observation images

表 1 国内外南极地区主要站点位置与地面极昼时长对比 (30 km 高空有延长)

Table 1 Comparison of the locations of major stations in Antarctica both domestically and internationally, and the duration of polar day on the ground (Extended at 30 km altitude)

站点	昭和(日本)	麦克默多(美国)	秦岭(中国)	中山(中国)	泰山(中国)	昆仑(中国)
位置	69°00′S 39°25′E	77°51′S 166°40′E	74°55′S 163°42′E	69°22′S 76°22′E	73°51′S 76°58′E	80°25′S 77°06′E
极昼/d	46	115	102	51	89	130
起始日期	11/28	10/25	11/02	11/26	11/07	10/17
结束日期	01/12	02/16	02/11	01/15	02/03	02/23
中天高度角/(°)	42.6～44.4	25.0～35.6	29.3～38.5	41.9～44.1	33.0～39.6	19.7～33.0

流的稳定性更强, 持续时间更长, 且中心更接近极地中央.

从南极 5 hPa 高度 (36 km) 全年的极涡形态看, 通常 3—10 月表现为稳定西风极涡, 12—1 月为稳定的东风极涡. 2 月为东风极涡转为西风极涡的过渡期, 11 月为西风极涡转为东风极涡的过渡期. 西风极涡的特点是风速较大, 超过 20 $m\cdot s^{-1}$ 是常态, 极夜期间风速达到最大. 东风极涡为极昼期间的极涡, 风速普遍较小, 很少有超过 15 $m\cdot s^{-1}$ 的风速, 而且纬度越高, 风速越小. 极昼加上温和的风场条件对开展气球飞行非常有利.

图 4 为 2022, 2016, 2015 年 5 hPa 高度极昼期间典型的南极极涡. 从图 4 可以看出, 极涡环绕方向为绕南极轴逆时针转动, 呈现向西环绕 (经度减小的方向) 的形态, 故通称为东风极涡.

在东风极涡的作用下, 气球轨迹表现为向西移动. 图 5 分别为 NASA 于 2016 年 12 月和 2012 年 12 月在南极开展试验的飞行轨迹, 均呈现出与极涡一致的向西绕极飞行特征. 其中 ANITA 飞行时长 27 天 11 小时 15 分钟, 绕极飞行 2 圈多; SUPER-TIGER I 飞行时长达到 55 天 2 小时 32 分钟, 绕极飞行近 3 圈.

利用南极极涡的特点, 平流层浮空器可以随涡旋气流漂飞, 实现大尺度绕极飞行[14]. 另外南极平流层稳定的绕极极涡气流保证了气球的自由飘飞范围不会过大, 可在南极陆地上, 甚至靠近发放场的区域回收吊舱, 提高了载荷仪器回收的成功率和效率.

除极昼带来的连续供能与热环境稳定, 以及极涡对长航时绕极飞行的支撑外, 南极还具有突出的天区可见性优势: 由于银河系中心在南极区可保持稳定的正仰角可见, 而在北极区则会长期处于地平线以下, 难以实现同类目标天区的连续观测. 因此, 南极在部分关键天区 (尤其面向银河系中心) 的观测研究中具有不可替代性.

2.2 南极气球发放基地条件

国外在极地的气球实验起步较早, 目前南极球载实验的主要发放基地是美国的麦克默多站和日本的昭和站, 如图 6 所示.

麦克默多站坐落于南极洲麦克默多湾岸边罗斯岛南端火山岩上. 该站具备 1 个港口、3 个机场、1 个直升机场和 100 多座建筑. 其中, 在夏季开放的威廉

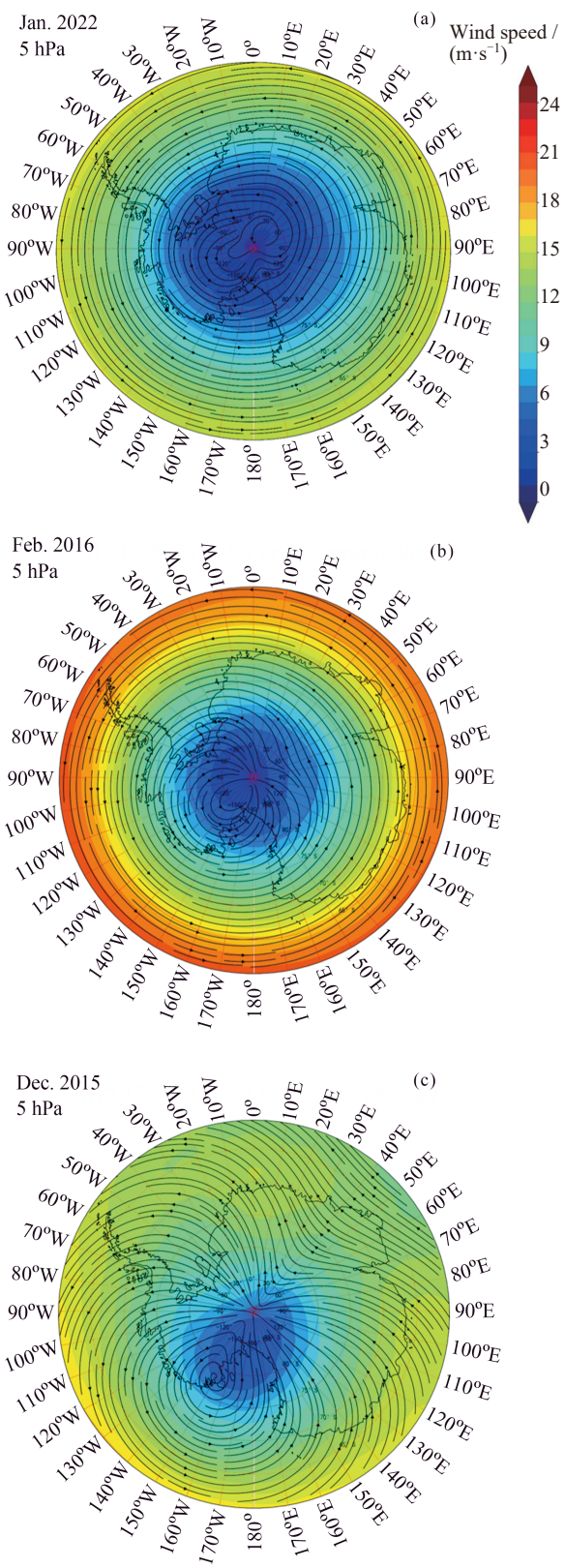

图 4 南极极昼期间的极涡

Fig. 4 Polar vortex map during the Antarctic polar day

姆斯机场基本承包了 NASA 的所有南极气球实验. 为充分利用极昼现象带来的优势, 气球常常自 12 月末起飞, 于次年 1 月或 2 月完成飞行任务. 自 20 世纪 80 年代以来, 约有 150 次气球实验从麦克默多站威廉姆斯机场发放, 主要涉及 4 个领域, 其中占比最高的是天体物理学 (52%), 其次是地球科学 (29%)、行星科学 (11%)、太阳物理学 (8%). 图 7 统计了麦克默多站于 2016—2024 年期间进行的气球发放情况, 其中于 2024 年初完成任务的 GUSTO 实验气球创造了长时飞行 57 天的历史最长纪录. 实验平均飞行时长约 21 天. NASA 的南极球载飞行试验大多采用百万立方级气球, 飞行高度在 35～45 km 之间.

日本的南极气球基地昭和站位于 Lützow-Holm 湾的 Ongul 岛上. 该基地拥有近 6000 m^2 的总建筑面积. 1968 年 10 月 28 日, 昭和站进行了首次气球飞行. 此后该站成为南极地区球载实验的主要发放基地之一, 针对大气环流、宇宙射线、高层大气成分等方向进行数据采集实验与研究. 1970—1972 年间, 昭和站开展了多次重宇宙射线球载实验, 相关实验活动活跃程度为当时最高.

除去昭和、麦克默多两大主要南极气球发放站, 英国的哈雷研究站、意大利的 Mario Zucchelli、法国的协和站等站点也在进行极地气球发放实验. 表 2 列出了目前南极主要的气球发放基站信息.

相比北极, 南极没有跨国飞行限制, 是放飞高空科学气球的理想之地[15]. 除了可以在大气活动、生态环境、海洋地质等领域开展研究之外, 南极气球发放能够开辟北半球国家不可视的南部天区观测, 其长时间连续观测能力将使观测的科学效益倍增.

随着长时科学气球技术的成熟, 南极科学气球发放的频率将会逐步提高. 南极地区科学气球实验对于中国气球发展领域来说是全新的挑战. 在已有的地面

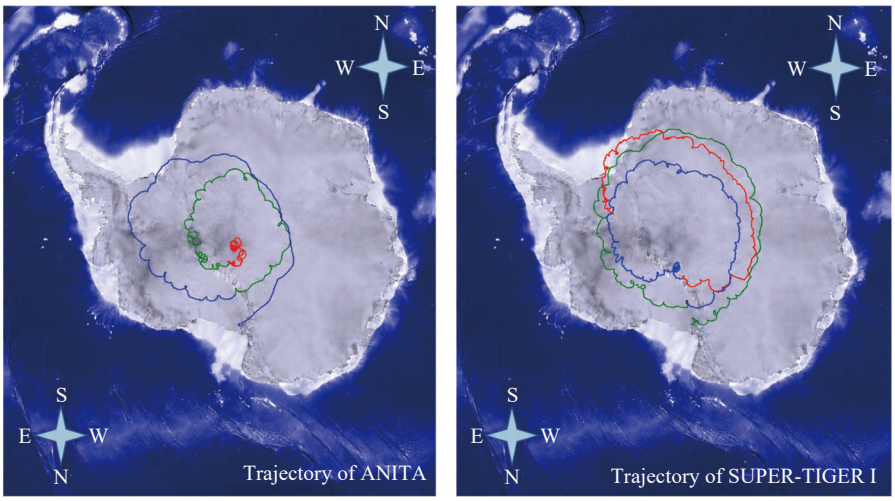

图 5 极昼期东风极涡下的气球飞行轨迹

Fig. 5 Balloon flight trajectory under the easterly polar vortex during the polar day period

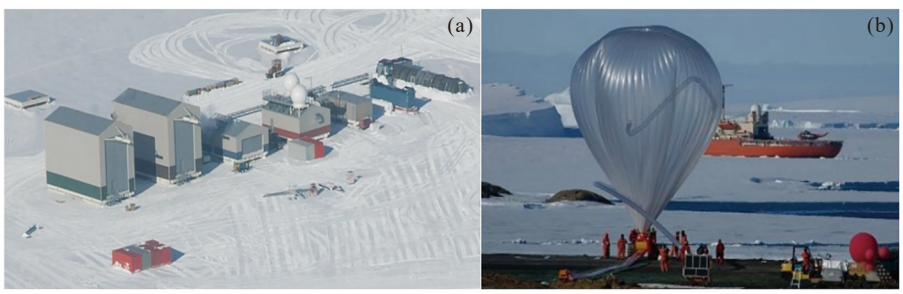

图 6 南极气球主要发放基站. (a) 麦克默多, (b) 昭和站

Fig. 6 Major Antarctic balloon launching base stations. (a) McMurdo station, (b) Showa station

科考站的基础上建立气球实验基地, 进行综合性科学气球实验, 能有效弥补中国南极探测手段的不足, 更快地赶超世界先进水平.

3 南极球载非粒子天体物理实验

非粒子天体物理领域的研究对象为宏观天体, 其主要研究恒星、行星、星系、星系团、活动星系核、宇宙大尺度结构等天体本身的形成、结构、演化、动力学以及它们之间通过引力、电磁辐射产生的相互作用. 非粒子天体物理的实验方法主要依赖于各波段(射电、红外、光学、紫外、X 射线、γ 射线) 的望远镜进行电磁辐射观测.

该领域在南极地区开展的球载观测实验更多聚焦于观测宇宙微波背景、X/γ 射线源和系内外行星三个部分. 表 3 列举了其中最具代表性的几个实验. 本节将从实验的研究目的和关键技术等方面进行分析.

3.1 大爆炸宇宙学

宇宙大爆炸理论认为, 宇宙微波背景辐射 (Cosmic Microwave Background, CMB) 是“大爆炸”遗留下来的电磁波辐射, 是探测早期宇宙物理过程的非常有价值的工具[16]. 在南极地区开展的球载 CMB 观测实验以研究方向为标准分为 CMB 温度各向异性测量与 CMB 偏振测量两类.

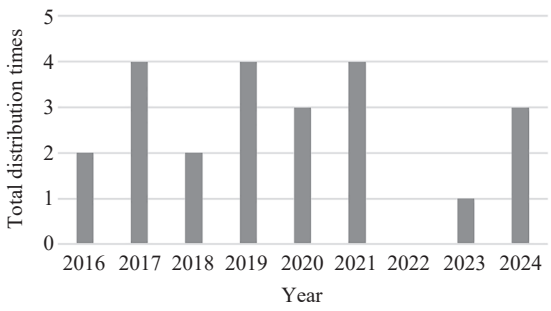

图 7 2016−2024 年麦克默多站气球发放情况

Fig. 7 Balloon distribution at McMurdo station from 2016 to 2024

CMB 的温度各向异性于 1992 年被卫星首次观测到, 根据大爆炸宇宙学, 这种特性源于宇宙膨胀冷却期局部密度差, 这种差异导致光子在传播过程中产生温度涨落. 为了测量 CMB 温度各向异性, 进而了解宇宙早期物质分布的信息, 毫米波段气球实验 (Balloon Observations of Millimetric Extragalactic RAdiation and Geophysics, BOOMERANG) 于 1998 年 12 月开展. 实验采用南极长周期气球 (7～14 天航时) 搭载了覆盖 40～450 GHz 频段的 (4 波段×8 像素) 辐射热计阵列[17]. 气球吊舱采用两台扭矩电机进行方位扫描动作, 并配合采用滚珠丝杠线性执行器和直流齿轮电机, 使望远镜能实现慢速方位扫描和固定俯仰角连续扫描[18]. BOOMERANG 吊舱结构如图 8 所示. 气球发放两次, 绘制出约 2000^{o2} 天区, 分辨率 10 arcmin (150 GHz 波段) 的 CMB 各向异性图, 同时完成了 CMB 角功率谱精确测量. 实验为宇宙平坦性和 ΛCDM 模型提供了关键证据, 并推动了毫米波探测技术的发展.

表 2 南极气球发放基站

Table 2 Antarctic balloon launching base stations

名称	地理位置	所属国家
McMurdo station	77°51′S, 166°40′E	美国
Halley Research station	75°35′S, 26°34′W	英国
Mario Zucchelli	74°41′S, 164°06′E	意大利
Antarctique Concordia	75°06′S, 123°20′E	意大利/法国
Showa station	69°00′15′′S, 39°34′55′′E	日本

表 3 非粒子天体物理实验

Table 3 Non-particle astrophysics experiment

主要方向	已在南极成功实验	尚在计划中
大爆炸宇宙学	BOOMERANG微波背景观测 EBEX微波辐射偏振观测 SPIDER大角尺度微波观测	BETTII远红外光谱采集 COFE-T宇宙前景微波探测
X和γ射线源	GRAD γ射线探测 HIREGS γ射线和硬X射线探测 X-Calibur高能X射线偏振测量	
系内外行星观测	STO平流层太赫兹天文台 BLAST望远镜红移/行星观测	EXCITE系外行星观测 Zodiac II系外星尘盘探测

CMB 在微开尔文温度级别上展现出偏振特性, 偏振分别为 E 模和 B 模. E 模式由密度扰动产生, 而 B 模式可能由原初引力波 (张量扰动) 产生. 根据暴胀理论, 原初引力波会在 CMB 中留下独特的 B 模式偏振印记. 南极球载 CMB 偏振测量实验的重点研究目标为 B 模式偏振, 通过对 B 模偏振的测量, 可以更好地研究原初引力波, 从而了解宇宙起源和极早期宇宙的演化过程. 其中具有代表性的实验是微波辐射 E/B 偏振观测 (E and B Experiment, EBEX), 实验使用的偏振仪拥有当时 CMB 探测领域最大的频率覆盖范围 (150～410 GHz). EBEX 实验吊舱结构及探测器对天空进行 24 h 的扫描图如图 9 所示 (每种颜色代表 4 h 扫描). 零压气球于 2012 年发放, 其吊舱搭载了 1432 个超导相变边缘传感器 (TES) 进行信号采集; 在观测姿态解算方面, 采用多传感器融合与状态模型后处理的策略进行控制, 并使用宽带消色差半波片调制 CMB 偏振信号, 抑制低频噪声[19]. 实验最终根据三频段数据成功分离出银河尘埃前景, 并完成原始 B 模功率谱分析. EBEX 首次实现宽带旋转半波片在亚毫米波段的飞行验证, 为下一代 CMB 实验 (例如 CMB-S4) 提供了偏振调制技术范本.

大角尺度微波观测 (Suborbital Polarimeter for Inflation, Dust and the Epoch of Reionization, SPIDER) 同样对 CMB 中 B 模式偏振进行观测, 但其更侧重于尘埃前景表征. SPIDER 观测仪器由 6 个单色折射望远镜组成, 每个望远镜与 TES 阵列耦合, 并使用多层冷滤光片 (红外屏蔽+金属网滤光器), 抑制非观测目标的干扰辐射、降低系统误差[20]. 图 10(a) 所示的 SPIDER-1 于 2015 年 1 月起飞, 在 95 GHz 和 150 GHz 两个频段测量了 CMB 的偏振波动, 由于冷

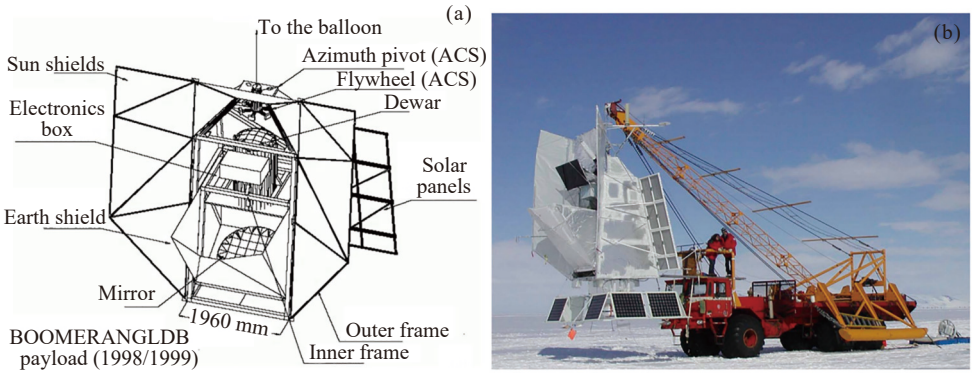

图 8 BOOMERANG 吊舱. (a) 吊舱结构, (b) 实物

Fig. 8 BOOMERANG pod. (a) Pod structure, (b) physical image

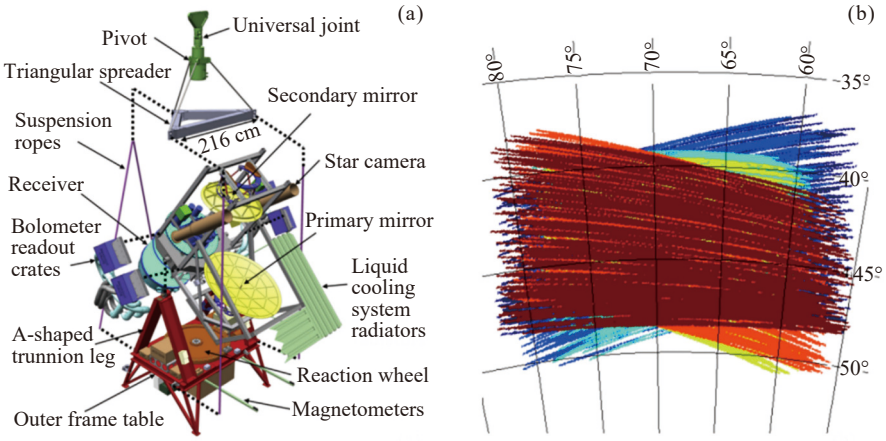

图 9 EBEX 实验吊舱结构 (a) 以及由单个 150 GHz 探测器对天空进行 24 h 扫描得到的扫描结果 (b)

Fig. 9 EBEX experimental pod structure (a), and scanning map obtained by scanning the sky for 24 h with a single 150 GHz detector (b)

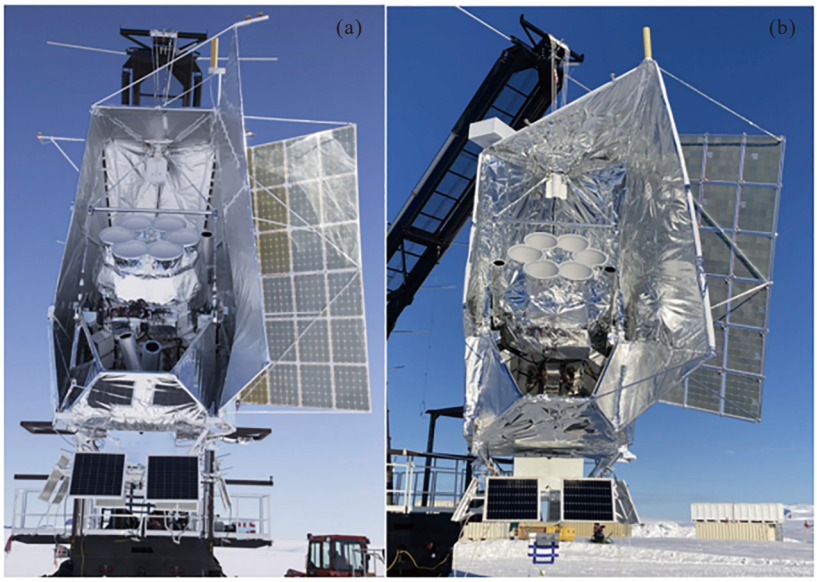

图 10 大角尺度微波观测. (a) SPIDER-1, (b) SPIDER-2

Fig. 10 Large angular scale microwave observations. (a) SPIDER-1, (b) SPIDER-2

却剂在飞行中途耗尽, SPIDER-1 完成了 14 天 (低于预期) 的采集任务. 基于前者暴露的问题, 优化了仪器的低温恒温系统和光学系统, 增加了 280 GHz 的观测频段. 图 10(b) 的 SPIDER-2 最终于 2022 年 12 月在麦克默多站发放, 完成了平均 35 km 高度的环南极大陆飞行, 提供了迄今最高分辨率的南极天区 280 GHz 尘埃偏振图[21].

在大爆炸宇宙学领域, 除了上述已取得成果的球载实验, 还有很多正在计划之中的探测项目. 例如远红外光谱采集实验 (Balloon Experimental Twin Telescope for Infrared Interferometry, BETTII) 计划使用球载红外线干涉双望远镜观测远红外宇宙[22]; 宇宙前景微波探测实验 (Cosmic Foreground Explorer, COFE-T) 的目标是测量弥漫微波偏振前景的低频和大尺度特性; 在 2023−2024 年度麦克默多站运营计划中被列为未来潜在任务的球载高海拔透镜天文台 (High Altitude Lensing Observatory, HALO) 计划, 将使用超压气球作为载体, 高精度地测量数千平方度的夜空, 并尝试捕获宇宙暗能量[23]. 未来 10 年, 这些计划将会进一步推动大爆炸宇宙学领域更多的新发现.

3.2 X 射线与 γ 射线源

X 射线与 γ 射线均是高频、短波的高能电磁辐射, X 射线更常与热过程、原子过程以及中等能量电子的非热过程相关联; γ 射线则主要由核过程、强子过程以及高能电子/质子的非热过程产生. 测量宇宙中的 X 射线与 γ 射线有助于对其辐射源 (宇宙极端物理过程与天体活动) 进行研究.

在 γ 射线辐射源的研究方面, 先进 γ 射线探测器 (Gamma-Ray Advanced Detector, GRAD) 开展了超新星 γ 射线能谱观测 (1988 年 1 月发放), 目标辐射源是位于大麦哲伦云的超新星 SN1987 A (自 1604 年以来最亮的近距超新星). 实验仪器最初计划在 1987 年随航天飞机升空, 但因为挑战者号灾难事件被搁置, 最终 NASA 选用气球进行实验. 实验使用零压气球搭载了 135 cm^3 的锗晶体探测器, 通过锗酸铋 (BGO) 主动屏蔽层提高能量分辨率, 并加入了 6 套独立的太阳能供电系统、ARGOS 卫星追踪系统[24]. 作为历史上第一次南极大型科学载荷实验, GRAD 共获取了 10 h 的有效 γ 射线数据, 首次观测到背景辐射显著的各向异性, 并证明了南极大型气球飞行的可行性 (3 天续航). GRAD 实验气球飞行路径与剖面如图 11 所示.

在 X 射线观测领域, 南极科学气球实验重点研究 X 射线谱中能量较高、波长较短的硬 X 射线. 其中具代表性的是高分辨率 γ 射线与硬 X 射线谱仪 (High Resolution Gamma-ray and hard X-ray Spectrometer, HIREGS) 实验, 该实验针对太阳耀斑产生的高能辐射 (0.02 ～ 17 MeV) 和银河系目标 (2.223 MeV 中子俘获线、511 keV 正电子湮灭线) 等

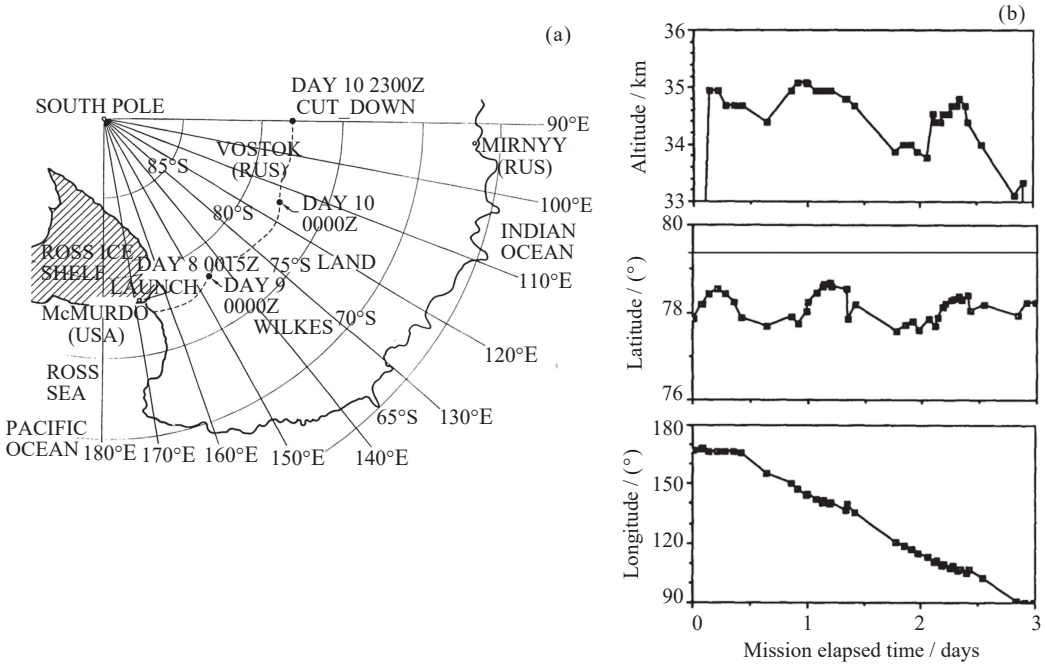

图 11 GRAD 实验气球. (a) 飞行路径, (b) 飞行剖面

Fig. 11 GRAD experimental balloon. (a) Flight path diagram, (b) flight profile diagram

进行研究. 通过观测进一步了解太阳耀斑与太阳活动、太阳周期和地球场/粒子环境的更大图景之间的关系. 实验在 1992－1995 年完成 4 次南极动态发放任务. 首次实验中, 吊舱包含 4 个锗探测器, 并进行分能段排布 (低能段优化低能光子光电吸收, 高能段处理高能事件)[25]; 第三次发放时, NASA 舍弃了太阳观测部分, 专注于研究银河系目标 (银心点源、银盘弥散辐射和脉冲星), 同时吊舱的锗探测器数量增加至 12 个, 显著提升了线谱的探测灵敏度. 实验证实了银河中心硬 X 射线弥散辐射的存在, 为黑洞/中子星附近的粒子加速机制提供了新数据[26].

在南极硬 X 射线观测领域, X-Calibur 系列实验代表另外一种研究方向, 其研究的能量范围 (15～50 keV) 小于 HIREGS, 主要以硬 X 射线偏振状态测量为手段, 对黑洞和强磁场脉冲星等高能辐射源进行研究, 探测天体几何结构、磁场性质及辐射机制, 解决理论模型争议 (如冕区形状、辐射束模型). HIREGS 实验吊舱如图 12 所示, HIREGSI 探测器阵列如图 13 所示, X-Calibur 吊舱载荷内部结构如图 14 所示. 吊舱仪器利用聚焦镜将硬 X 射线打到 Be 散射体上, 通过围绕散射体的像素化 CZT 阵列测量康普顿散射方位角调制, 从而反演偏振度/偏振角[27]. 同时, 该实验首次使用了 WASP (Wallops Arc-Second Pointer)

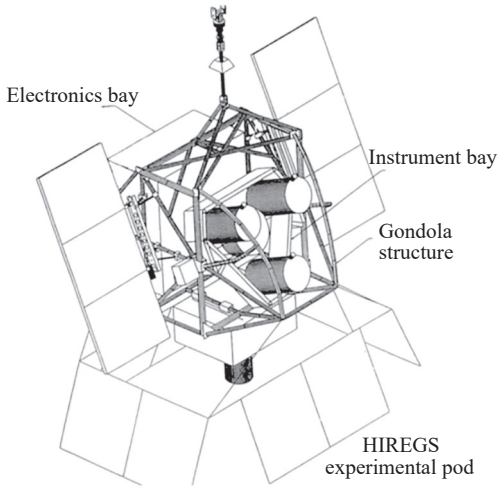

图 12 HIREGS 实验吊舱

Fig. 12 Schematic diagram of HIREGS experimental pod

指向系统 (见图 15), 在首飞中成功实现角秒级指向控制 (1.0～3.6 arcsec). X-Calibur 气球于 2018 年 12 月末发放, 但由于存在泄漏问题, 气球仅飞行了两天. 任务结束后, NASA 总结了偏振探测器本底高、灵敏度低等问题, 在初代仪器的基础上进行改进, XL-Calibur 由此诞生. XL-Calibur 吊舱示意图和 X 射线偏振仪剖面如图 16 所示. 新一代仪器在探测

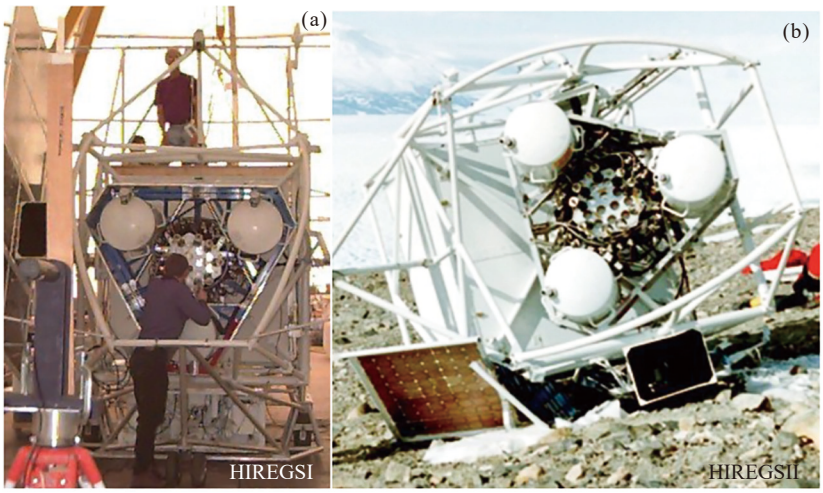

图 13 HIREGSI 与 HIREGSII 探测器阵列

Fig. 13 HIREGSI and HIREGSII detector array

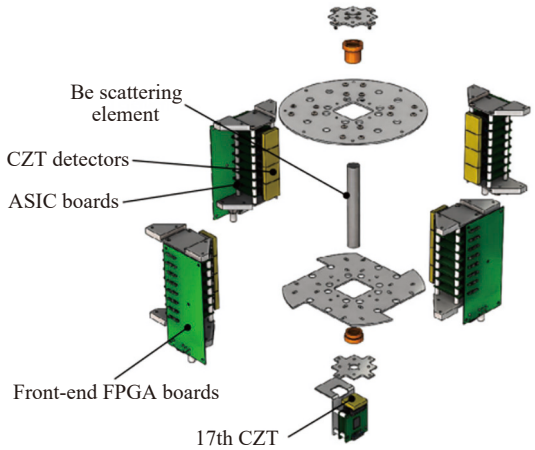

图 14 X-Calibur 吊舱载荷内部结构

Fig. 14 Internal structure of X-Calibur pod payload

器厚度、镜面焦距、指向范围等方面均有改进与提升, 首次在硬 X 射线能段实现高精度偏振测量, 为致密天体物理提供全新观测窗口, 推动强引力场、量子电动力学及极端物质状态研究[28].

3.3 系内/外天文观测

南极球载系内/外行星的观测主要针对原行星盘, 行星形成区于星际尘埃进行成像观测. 该领域的主要观测方式可分为两种, 以 STO (Stratospheric Terahertz Observatory) 平流层太赫兹天文台为代表的太赫兹波段观测方法; 以 BLAST (Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope) 为代表的球载大口径亚毫米波望远镜, 则是亚毫米宽波段成像观测的典型方案. 南极地区极低的环境温度与干燥的大气条件, 有效抑制了大气水汽含量和热噪声水平, 这一环境优势对亚毫米波观测尤为有利.

太赫兹天文观测常指对 0.1～10 THz 频段的原子/离子细结构谱线与分子转动谱线进行光谱观测, 并在天空平面进行谱线测绘. 这些特定谱线大多来自星际介质, 携带星际介质物理状态、生命周期等关键信息. 这些信息对于研究星云形成与瓦解、恒星形成率等问题具有重要意义. 基于该观测方法, STO-1 平流层太赫兹天文台于 2012 年 1 月在南极首飞. 吊舱配备了 2 个 4 pixel 阵列的热电子混频器, 分别用于 1.46 THz 和 1.9 THz 的元素谱线采集. 实验中, 天体辐射信号与本地单频信号在热电子混频器中混合, 将混合信号中的差频信号进行放大处理和光谱数字化, 最终得到银河系 (1.46 THz/1.9 THz) 谱线图[29]. 混合信号差频放大器及性能曲线如图 17 所示, 朝向猎户座的^{13}COJ=3-2 线观测结果如图 18 所示. 由于仪器低温制冷系统的压力调节器在气球上升时发生故障, 用于低温制冷的液氮大量损失, 因此 STO-1 的任务观测时间并不理想.

STO-2 于 2016 年发放, 第二代仪器解决了排气阀的冻结问题, 延长了任务观测时间, 并对光学处理器光路进行简化校准, 提高信号处理效率与可靠性, 降低调试难度. 最终实验总飞行时长 21 天, 获得了远多于第一代设备的谱线数据[30]. 在前两次实验取得成功后, GUSTO 气球于 2023 年 12 月 31 日升空. 新设备增加了 4.7 THz 频段, 热电子混频器阵列数量增加, 制冷设备容量提升, 进一步增加了设备工作时长[8]. 这

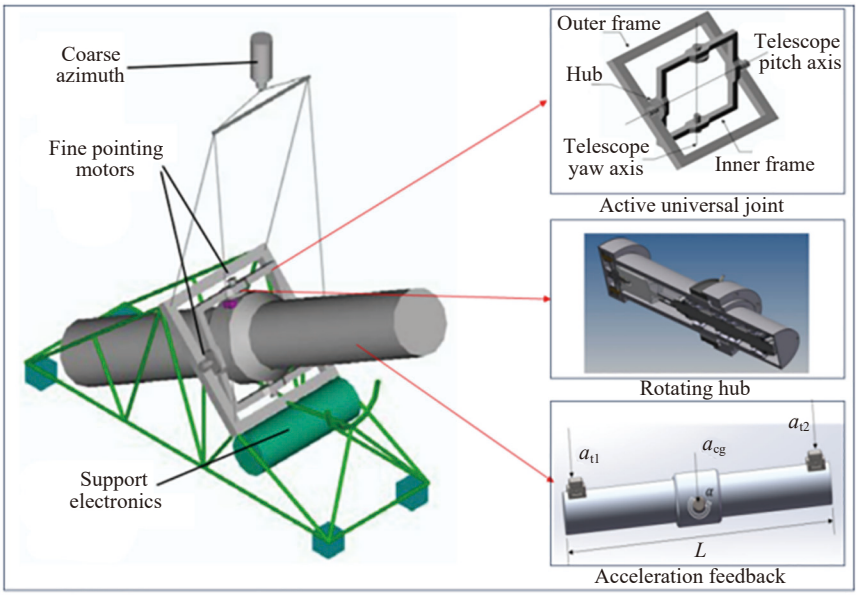

图 15 WASP 角秒级通用指向系统

Fig. 15 WASP arcsecond-level universal pointing system

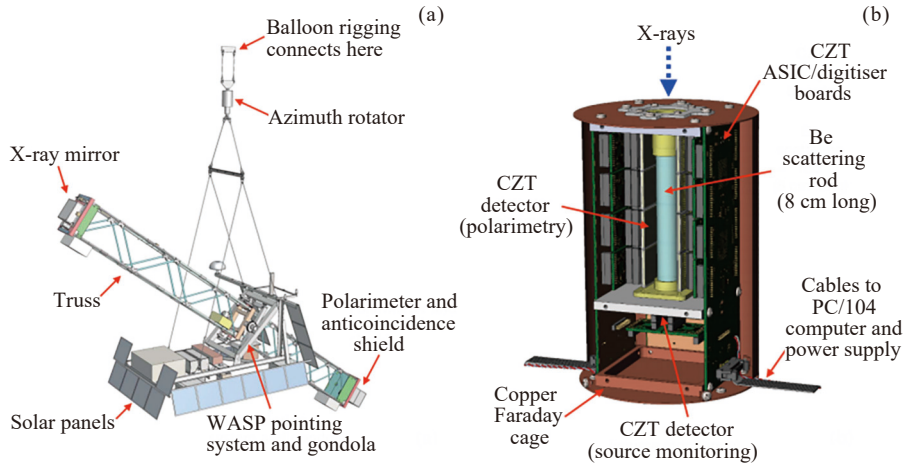

图 16 XL-Calibur 吊舱 (a) 与 X 射线偏振仪剖面 (b)

Fig. 16 Schematic diagram of the XL-Calibur module (a), and cross-sectional view of the X-ray polarimeter (b)

是一次里程碑式的超长时科学气球观测实验, 气球搭载了约 1460 kg 的科学载荷升空, 绘制了 124^{o2} 的银河系区域图和 25^{o2} 大麦哲伦星云区域图, 创造了 NASA 重型、长时间气球任务在高空停留 57 天 7 小时 38 分钟的新纪录. STO 系列与 GUSTO 气球载荷如图 19 所示.

亚毫米波成像的测量波段范围为 250～500 μm. 该波段的观测可分为两种, 一种是针对来源于低温星际尘埃 (10～30 K) 的热辐射进行测量, 通过辐射强度分析尘埃温度密度等性质; 另一种是对辐射的偏振进行检测, 通过测量偏振方向和强度, 可以推断星际磁场的结构和强度. 该领域具有代表性的实验是 BLAST 系列实验, BLAST 的第 1 次实验针对银河系恒星形成区、高红移星暴星系与弥漫星际介质进行观测, 吊舱使用 1.8 m 的铝镜作为望远镜的主镜, 同时使用星相机与光纤陀螺搭配作为指向传感器, 探测器使用 Spiderweb 辐射热计阵列, 进行 250, 350, 500 μm 三个波段的信号测量. 气球于 2006 年 12 月发放, 在 11 天的飞行时间中探测到了高红移星系, 获得首批大面积、高分辨率亚毫米波图像[31]. 在第 1 代仪器实验

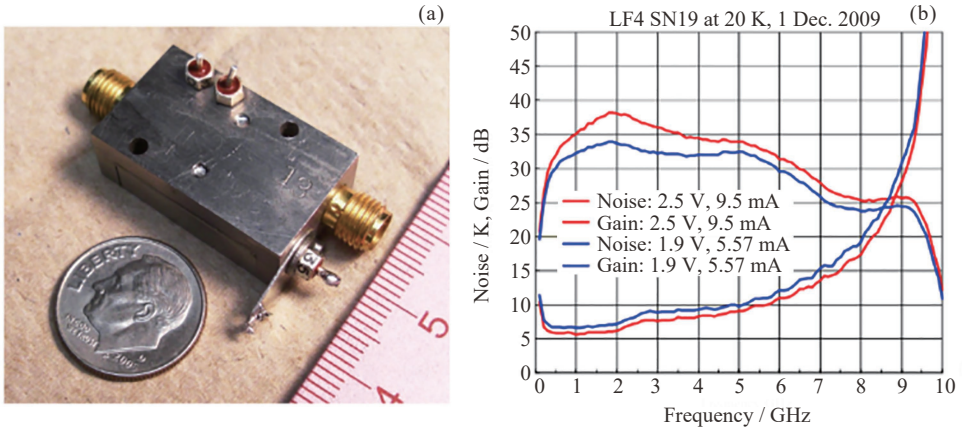

图 17　混合信号差频放大器 (a) 及其性能曲线 (b)

Fig. 17　Mixed-signal heterodyne amplifier (a) and its performance curves (b)

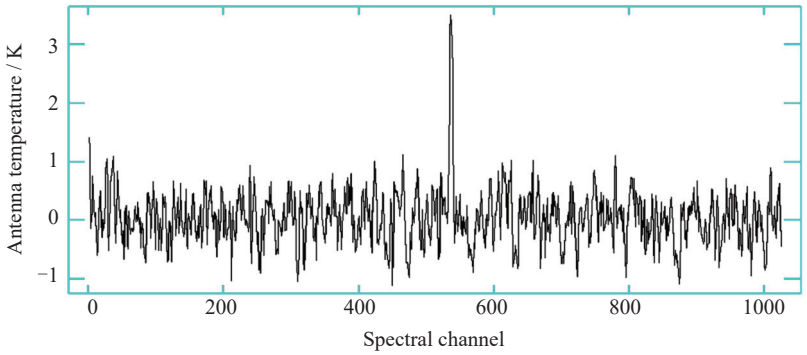

图 18　从浮标高度观测的朝向猎户座的^{13}COJ=3-2 线

Fig. 18　^{13}COJ=3-2 line toward Orion observed from the float height

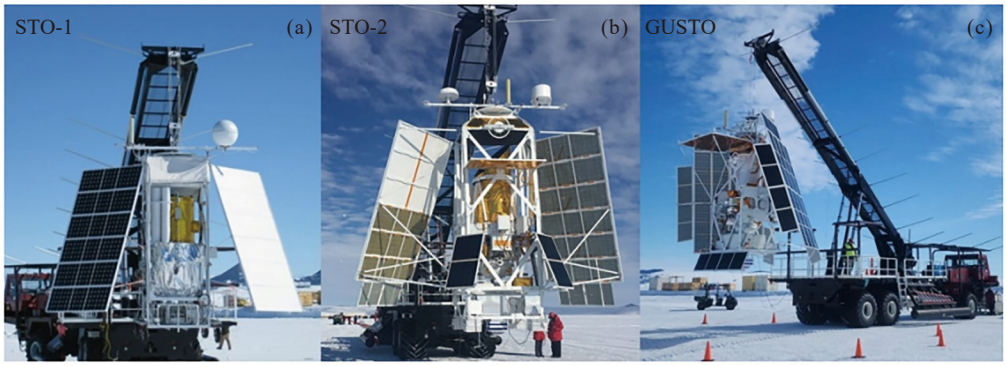

图 19　STO 系列与 GUSTO 气球载荷

Fig. 19　STO series and GUSTO balloon payload

成功的基础上, BLAST-Pol 第 2 代设备将偏振检测单元加入探测器, 并使用消色差半波片进行偏振调制, 实验重心变为对辐射的偏振情况进行探测. 2010—2012 年间发放两次气球, 完成共 25 天的飞行, 获得首批度规级别的银河系磁场图, 为磁场与恒星形成关系提供数据.

BLAST-TNG (第 2 代 BLAST-Pol) 的目标仍然是亚毫米波辐射的偏振观测. BLAST-Pol 有效载荷部分如图 20 所示 (起飞前/着陆后). 相比上一代, 新设备将主镜材料改为更轻的碳纤维 (见图 21), 并优

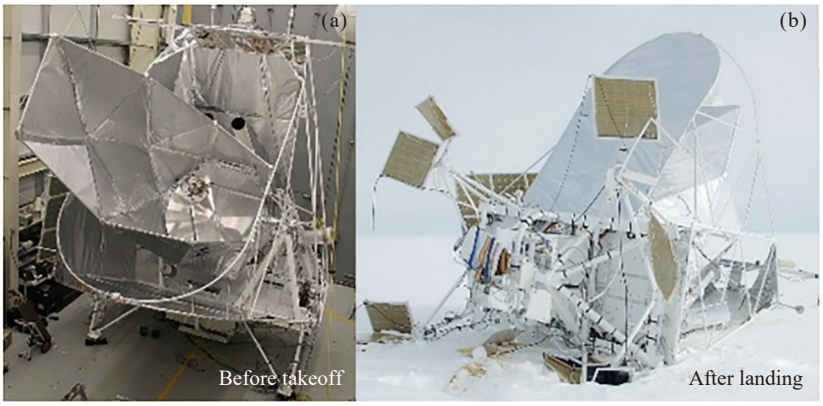

图 20 BLAST-Pol 有效载荷部分 (起飞前/着陆后)

Fig. 20 BLAST Pol payload section (before takeoff/after landing)

化了偏振探测网络和调制设备, 探测器数量从 280 个跃升至 3000 个, 进一步提高了分辨率和探测精度[32]. 探测器于 2020 年初发放升空, 但由于气球姿控指向系统突发故障, 实验在气球正常飞行 9 h 后宣告失败. 虽然实验没有成功, 但工程中所使用的大型轻质镜面和长航时低温系统等关键技术对后续气球观测设备的研究发展产生了推动作用.

在南极行星观测领域还有很多计划进行的飞行观测实验, 如外行星气候红外望远镜 (the Exoplanet Climate Infrared Telescope, EXCITE) 对行星围绕其主星的整个轨道进行连续的光谱观测[33]; 使用球载碳化硅望远镜和成像星冕仪观测附近恒星周围的星尘盘[34] 等. 这些实验将推进热彗星型系外行星、行星演化、尘盘形成等方面的理论发展.

综上, 南极球载非粒子天体物理实验在大爆炸宇宙学、X/γ 射线源探测以及系内/外行星观测三大方向均取得了重要成果. 这些实验不仅验证了关键宇宙学模型 (例如 ΛCDM 模型和暴胀理论), 深化了对高能天体物理过程 (例如黑洞、中子星活动) 的理解, 还推动了系外行星形成环境与星际介质的研究. 同时, 一系列前沿技术, 例如高灵敏度探测器阵列、精密指向系统、偏振调制技术等, 也在这些实验中得到发展和验证. 这些实验为探测宇宙演化、极端天体物理过程和行星系统形成提供了重要依据.

4 南极球载粒子天体物理实验

粒子天体物理学聚焦于宇宙中的微观粒子及其相互作用. 其研究构成宇宙物质的基本粒子 (例如质子、中子、电子、中微子、光子) 以及可能存在的超出标准模型的新粒子在极端天体物理环境 (例如恒星内部、超新星爆发、中子星、黑洞吸积盘、早期宇宙) 中的产生、传播和相互作用. 该领域地面实验依赖于大型粒子探测器、中微子望远镜、γ 射线望远镜、宇宙线探测器等专用设备, 进行粒子或高能光子的直接或间接探测.

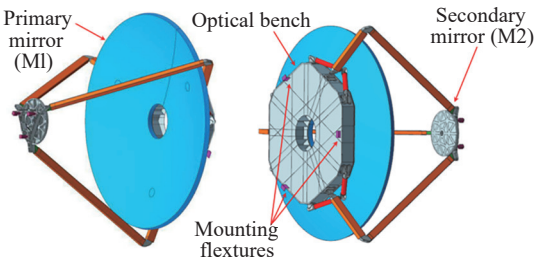

图 21 BLAST-TNG 碳纤维主镜/铝制副镜

Fig. 21 BLAST-TNG carbon fiber primary mirror/aluminum secondary mirror

南极高空球载粒子天体实验主要包含三个主要方向: 宇宙线起源和加速、中微子天文、暗物质和反物质. 表 4 为三个方向中具有代表性的实验项目.

4.1 宇宙线起源和加速

宇宙线是指来自外空间、以接近光速运动的高能带电粒子流. 主要成分为氢原子核, 还有氦原子核和少量碳、氧、铁等更重的元素原子核. 在加速模型方面, 目前被广泛接受的是扩散激波加速模型 (射线因超新星活动获得高能量). 本文列举的球载宇宙线研究方案均为直接探测, 在科学气球上安装探测器, 获取宇宙线的能谱和成分谱, 从中解析宇宙线的起源

地, 传播过程与加速机制的信息.

宇宙先进薄型离子量能器 (Advanced Thin Ionization Calorimeter, ATIC) 系列气球实验是直接探测方式的代表. 实验主要目标是精确测量宇宙线中不同元素 (从氢 H 到铁 Fe) 的电荷成分和能谱, 以验证扩散激波加速模型, 测量能量范围从 10 GeV 到近 100 TeV, 覆盖了宇宙线能谱中关键的“膝区”前的大部分区域. 有效载荷携带硅矩阵探测器 (分辨元素)、塑料闪烁体径迹探测器 (测量粒子类型和运动轨迹) 和锗酸铋晶体量能器 (检测能量) 三种关键设备[35]. 不同于常见的框架式载荷结构, ATIC 的载荷仪器安装在凯夫拉压力壳内, 更具模块化与整体性. 2000—2008 年间 ATIC 系列共完成 4 次气球飞行实验. ATIC-1 获取了 26.1×10^6 个宇宙线事例和 43.5 GB 数据, 成功识别射线中占主要部分的氢核氦核[36]; ATIC-2 获取了 67 GB 数据 (16.9×10^6 个宇宙事例), 采集得到的沉积能谱符合预期分布. 第 3 次飞行中, 由于囊体漏气, 载荷迅速坠落地面, 撞击地面导致仪器遭受破坏. 这次失败推动了 Ripstitch 减震系统与伞载分离遥测控制技术的发展, 优化后的吊舱在 ATIC-4 中得到成功运行. ATIC 系列实验获得了大量关键的射线观测数据, 成功分解射线元素成分, 其在高能电子观测方面的发现直接推动了后续中国暗物质粒子探测卫星悟空 (DAMPE) 的科学立项、研制与实施, 为其发展积累了宝贵的技术经验.

表 4　粒子天体物理实验

Table 4　Particle astrophysics experiment

主要方向	已在南极成功实验
宇宙线起源和加速	ATIC宇宙先进薄型离子探测 CREAM宇宙线能量和质量探测 Super-TIGER银河全离子成分记录
中微子天文	ANITA南极暂现脉冲观测
暗物质和反物质	BESS Polar气球超导磁谱仪实验 ATIC宇宙先进薄型离子探测

相比于 ATIC (见图 22) 对宇宙线整体能谱进行测量, 宇宙线能量和质量探测 (Cosmic-Ray Energetics And Mass, CREAM) 系列的三次实验分别对高原子序数 (Z) 核素 (C-Fe)、氢氦核进行研究. CREAM-I 气球于 2004 年起飞, 载荷携带穿越辐射探测器、切伦科夫探测器和时间电荷探测器, 针对高能粒子的轨迹、速度、电荷等关键参数进行采集. 气球飞行 42 天, 得到了 1 TeV 能量以内的 C 与 O 等核素的能谱[37].

CREAM-II 实验采用双层硅电荷探测器代替原有设备进行电荷识别, 探测器在 28 天的飞行中绘制了 C, O, Ne, Mg, Si, Fe 能谱, 电荷分辨率进一步提升, 能谱延伸至 100 TeV[38]. CREAM-III 实验则转为测量 p 与 He 能谱形态和 p/He 比值, 核心设备为钨/闪烁光纤量能器, 切伦科夫相机和双层硅电荷探测器, 观测结果确认了 TeV 能区质子与氦核能谱的硬化现象[39,40], 为后续国际空间站 (International Space Station, ISS) 上的 CREAM 观测实验奠定了坚实基础. 图 23 给出了 CREAM-I/II 的吊舱实物, 图 24 给出了 CREAM-III 的观测结果.

超重宇宙射线 (原子序数位于 30～60 之间的稀有元素能谱) 在宇宙射线中占比极低, 测量难度相较

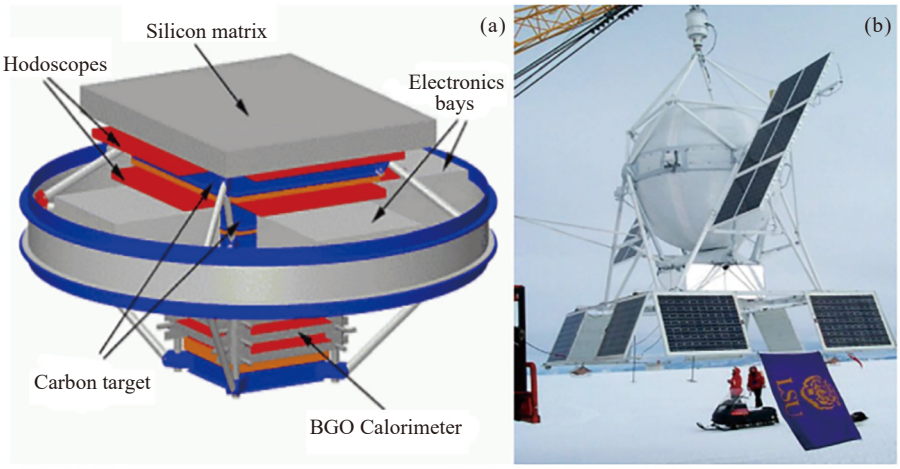

图 22　ATIC 凯夫拉壳结构

Fig. 22　ATIC Kevlar shell structure

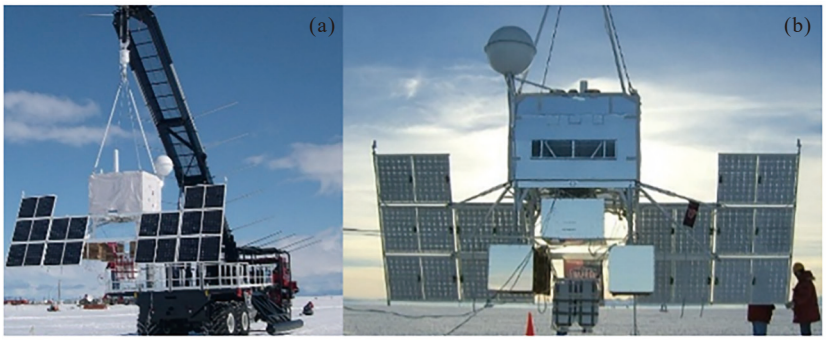

图 23 CREAM-I/II 吊舱实物

Fig. 23 Physical picture of CREAM-I/II pod

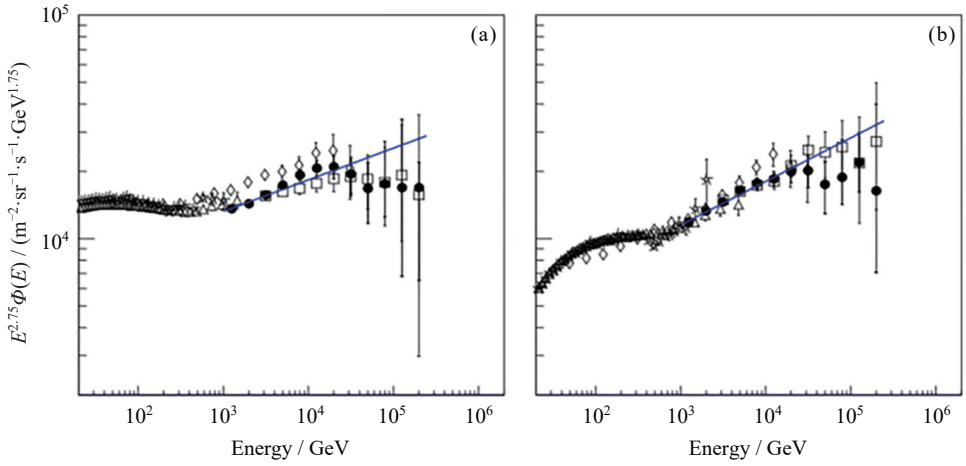

图 24 来自 CREAM-III 的质子 (a) 和氦 (b) 光谱 (实心圆) 与幂律拟合 (线)

Fig. 24 Proton (a) and helium (b) spectra from CREAM-III (solid circles) and power law fitting (lines)

于 H, He, O 等元素更大. 该类元素能谱往往能携带比低原子序数能谱更多的源头信息, 对宇宙射线起源加速模型的研究尤为重要. 超铁银河元素记录 (Trans-Iron Galactic Element Recorder, TIGER) 是超重宇宙射线记录项目的第 1 次实验. TIGER 重点测量原子序数在 26(Fe)～40(Zr) 之间的元素丰度. 气球搭载了闪烁体探测器和切伦科夫探测器, 分别用于确定粒子电荷和粒子动能[41]. 气球于 2001 年 12 月发放, 其创下当时科学气球成功飞行时间最长的记录 32 天. 吊舱中的探测器检测到了近 100 个 Z 为 31 和 32 的粒子, 并获得了 $Z>32$ 的粒子的一些有限统计数据.

Super-TIGER 任务在 TIGER 实验基础上开展, 相较于早期的 TIGER 设备, 新探测器 (见图 25) 的尺寸更大, 结构材料更轻. 探测器加入极端锥形电压分压器和电荷敏感前置放大器, 保证了更大动态范围下的射线采集; 加入双平面光纤光导, 提升了探测器的轨迹测量精度. 另外, 吊舱设备在迭代中还体现了高模块化设计, 为了提高探测器性能, 并增加冗余以增强可靠性, Super-TIGER 被分为两个完全独立的模块, 极大提高了回收效率. 在首次实验中, 气球共飞行 55 天, 创下了新的科学气球飞行记录. Super-TIGER 飞行路径如图 26 所示, 其结构及吊舱实物如图 27 所示. 实验共收集了超 5×10^7 个 $Z\geqslant10$ 的宇宙射线事件, 其中包括近 1300 个 $Z>29$ 的事件和近 60 个 $Z>49$ 的事件, 电荷分辨率达到 $\sigma_Z=0.16$ cu (铁峰), 明显优于 TIGER[42]. Super-TIGER 提供了更高精度的射线丰度数据, 能谱分析结果支持了 OB 星协起源模型 (宇宙射线源自大质量恒星的星风、超新星爆发和星际物质混合).

4.2 中微子天文

在粒子物理领域, 超高能中微子是相互作用过程的直接产物, 具有电中性、直线传播、几乎无衰减等

特点. 对中微子携带的信息进行研究, 有助于研究宇宙线加速器内部的粒子相互作用过程, 进而探索超高能宇宙射线的起源. 南极暂现脉冲天线实验 (Antarctic Impulsive Transient Antenna, ANITA), 即是该领域的关键实验之一. 实验利用南极冰盖作为其探测介质, 根据 Askaryan 效应, 当超高能中微子穿过冰层时, 其有极小的概率与冰原子核发生相互作用, 最终产生一种短脉冲电磁辐射, ANITA 通过采集这种电磁辐射的方式对中微子信息进行研究. ANITA 气球吊舱搭载了超宽频带范围的双极化 (水平/垂直) 四角喇叭天线, 其天线阵列是世界上最高能量的超高能宇宙射线 (UHECR) 无线电探测装置. 同时 ANITA 针对信号采集使用多级触发体系, 对热噪声和人造无线电干扰进行抑制. 2006—2016 年, 搭载 ANITA 的气球在南极进行了 4 次飞行实验. ANITA-I 在 35 天的飞行中发现了 16 个 UHECR 事件; ANITA-II 在 31 天的飞行中通过观测与理论预期的辐射偏振特性之间的相关性, 证实了观测到的事件确为宇宙中微子射线诱导的射电辐射[43].

南极冰面粗糙度会散射射频能量, 影响反射信号的强度和波形, 导致测量不准确, 因此在 ANITA-III 和 ANITA-IV 实验进行的同时, ANITA-HiCal 伴飞校准实验与主项目共同推进. HiCal 气球向主实验气球发射模拟脉冲信号, ANITA 主实验气球对模拟

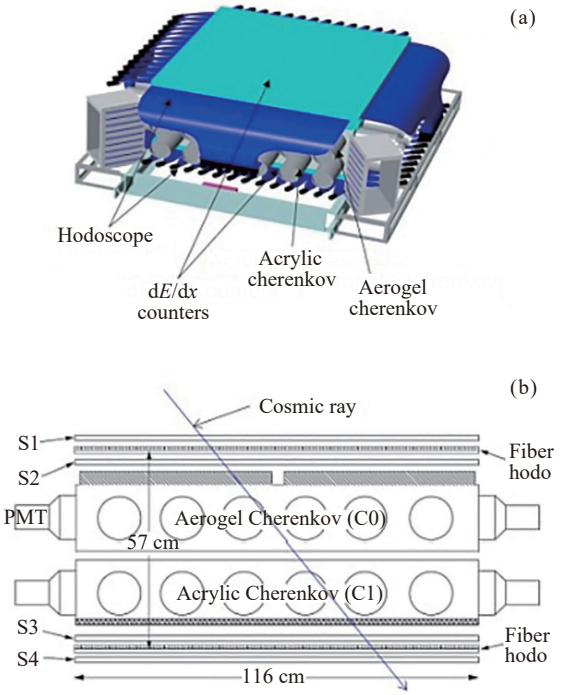

图 25 TIGER 实验探测器单元结构

Fig. 25 TIGER experimental detector unit structure diagram

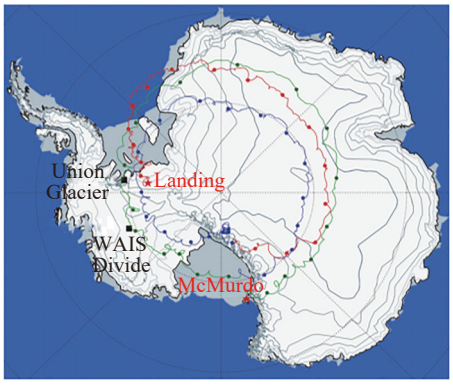

图 26 Super-TIGER 飞行路径

Fig. 26 Super-TIGER flight path

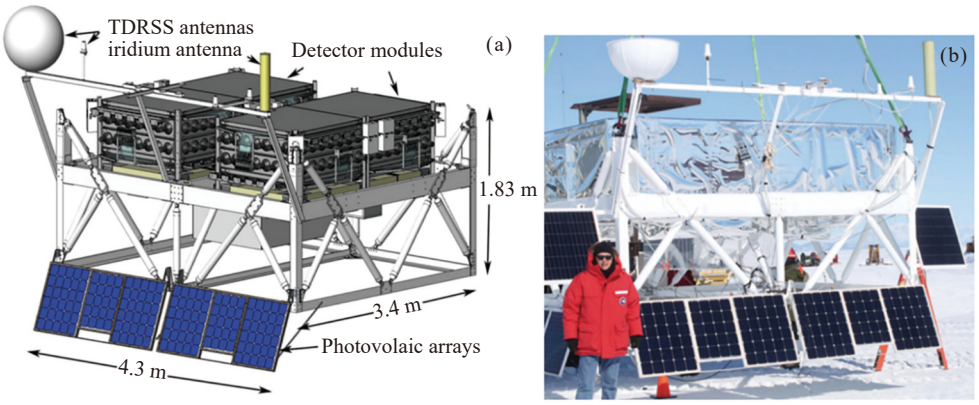

图 27 Super-TIGER 结构中的二个单独模块 (a) 及吊舱实物 (b)

Fig. 27 Two separate modules in Super-TIGER structure diagram (a) and actual pod diagram (b)

信号和真实信号进行对比分析, 进而得出冰面在特定几何位置的有效反射系数, 便于修正测量误差. 在伴飞校准气球的帮助下, ANITA 实验探测器对于 UHECR 事件能量观测的精度显著提高. ANITA-IV 的 27 天飞行期间, HiCal-2 与 ANITA-IV 协同观测, 捕获了超过 10000 个校准脉冲, 建立了首个大样本、宽角度范围的南极冰面射频反射特性数据库[44]. ANITA 实验 4 次绕极轨迹如图 28 所示.

4.3 暗物质和反物质

暗物质被认为是一种不发光、不吸收、也不反射电磁波的物质, 只能通过其他相互作用类型微弱地感知其存在. 反物质则是正常物质的镜像, 质量相同, 但电荷等属性相反. 对暗物质和反物质进行探测研究, 有助于探究宇宙起源, 理解宇宙结构与形成的重大问题. 在南极地区开展的球载暗物质实验主要针对宇宙线中反质子、奇异粒子的测量; 反物质部分则主要搜索宇宙线中反原子核 (例如反氦核).

目前认为, 暗物质构成了宇宙总质能含量的约 27%, 而所有可见物质只占不到 5%. 虽然不可直接对暗物质进行观测, 但暗物质粒子相互湮灭时可能产生的额外反质子信号可被探测器采集. 气球超导磁谱仪计划 (Balloon Experiment with a Superconducting Spectrometer, BESS) 采用此方法开展实验. 实验设备携带超导螺线管磁体, 通过均匀磁场使带电粒子偏转, 根据不同轨迹的曲率分析不同粒子刚度; 并使用切伦科夫计数器区分高 β 粒子 (例如电子、μ 子) 与反质子. BESS 初期在北半球进行飞行实验[45], 设备经迭代后在南极开展 BESS-Polar 实验. 两次实验飞行时间分别为 8.5 d, 24.5 d, BESS-Polar I 记录了 9×10^8 个宇宙射线事件 (共 2.14 TByte 数据), BESS-Polar II (见图 29) 记录了 4.7×10^9 个事件 (共 13.6 TByte 数据), 精确测量了 0.17～3.5 GeV 能区的反质子能谱[46]. 实验建立了反质子搜索的国际标准, 推动了后续空间暗物质实验的发展.

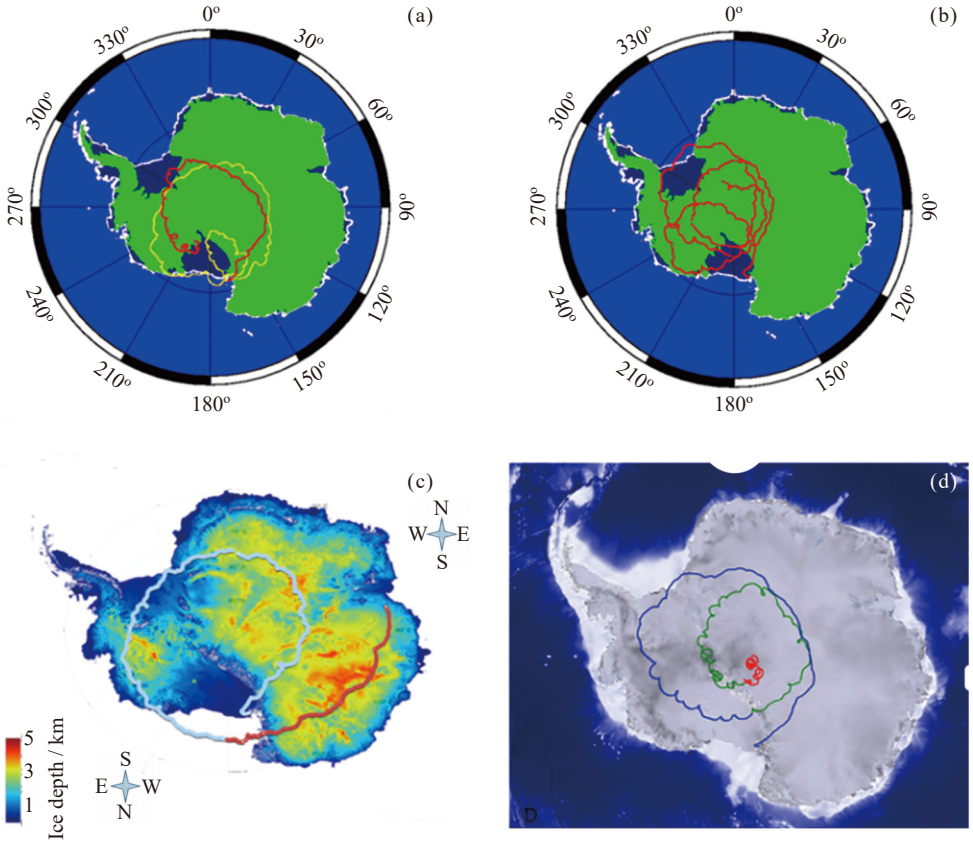

图 28 ANITA 实验四次绕极轨迹

Fig. 28 Four times circumpolar trajectory of ANITA experiment

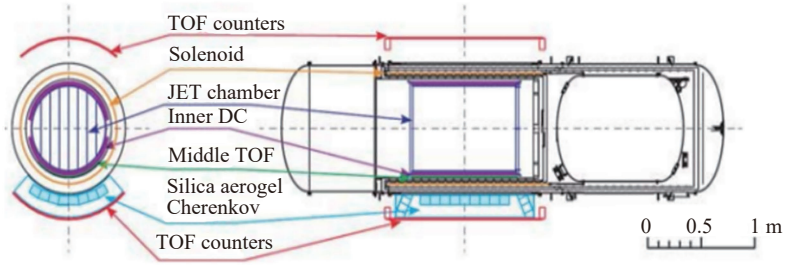

图 29 BESS-Polar II 仪器的断面和侧视图

Fig. 29 Sectional and side views of BESS-Polar II instrument

根据粒子物理理论, 宇宙大爆炸应该产生等量的物质和反物质, 但现实宇宙存在正反物质不对称问题. 采集反物质, 探索反物质域或许会改变科学界对宇宙起源模型的构建. 另外上文提到的暗物质实验也需通过测量反物质能谱间接展开, 这就使得反物质实验变得尤为重要. BESS-Polar 实验在探测反质子的同时还对反氦等反核素进行高精度收集, 获得了 0.15～80 GeV 能区的氦核精确能谱, 给出反氦/氦比上限为 6.9×10^{-8} (95% C.L.), 比早期实验提升 3 个数量级[46]. 通用反粒子光谱仪实验 (General Anti Particle Spectrometer, GAPS) 与 BESS 的采集目标相似, 通过探测由暗物质粒子湮灭或衰变产生的低能反氘核, 间接对暗物质和原初黑洞进行研究. GAPS 采用了一种独特于 BESS 和 AMS 等磁谱仪的实验原理——奇异原子技术: 通过反质子和反氘核形成的奇异原子发射能量特定的 X 射线这一判准进行粒子识别[47], 该技术具有高背景抑制能力和良好的粒子鉴别能力. 2012 年 GAPS 在日本大树町成功进行了初步气球飞行, 验证了探测器概念和系统集成, 目前 GAPS 在南极的首飞还在计划中.

综上, 南极球载粒子天体物理实验在宇宙线起源与加速机制、中微子天文以及暗物质与反物质探测三大前沿方向取得了系统性突破. 通过 ATIC, CREAM, Super-TIGER 等系列实验, 精确测量了从轻核到超重核的宇宙线能谱与成分, 验证了扩散激波加速等理论模型, 并为宇宙线源自大质量恒星活动提供了关键证据. ANITA 实验开创性地利用南极冰盖作为探测介质, 通过探测 Askaryan 效应辐射, 成功捕获超高能中微子候选事例, 为探索宇宙极端加速器开辟了新途径. 在暗物质与反物质领域, BESS-Polar 实验以前所未有的精度测量了反质子能谱并设定了反氦核丰度的严格上限, 为间接搜寻暗物质湮灭信号和探究宇宙正反物质不对称性奠定了坚实基础. 这些实验不仅深化了人类对基本粒子在宇宙极端环境中行为的理解, 也极大地推动了高灵敏度探测器、超导磁体、长航时气球平台等尖端技术的发展.

5 中国南极球载天文观测展望

中国尚未在南极地区开展气球观测, 但已具备良好的发展基础与政策支持. 中国天文和高能物理界对南极球载天文观测存在迫切的科学需求. 2013 年国务院发布的《国家重大科技基础设施建设中长期规划 (2012－2030 年)》中, 已明确将南极气球站列为规划的国家重大科技基础设施之一. 顾逸东院士在 2019 年香山科学会议上进一步提出, 发展中国气球天文观测, 重要项目在南极开展长时间飞行, 是努力向空间天文强国迈进的重要布局和必由之路. 2025 年 8 月中国科学院国家天文台组织的首届“仰山交叉创新交叉论坛”将南极球载天文观测作为论坛保留论题. 2025 年 9 月, 高能所组织的 Preparing Next-Generation Astrophysics in the MeV Window 学术论坛上, 中国科学院高能物理研究所正电子湮灭成像高分辨率光谱望远镜团队 (Positron Annihilation Imaging high_Resolution Spectrometer, PAIRS), 提出了在南极开展连续 12 天以上观测飞行的计划, 目标是通过对宇宙 γ 射线的高能量分辨、高角度分辨和高灵敏度观测研究银河系中心以及附近星系的正电子的起源. PAIRS 实验气球与载荷如图 30 所示. 实验聚焦于银河系中心 511 keV 的 γ 射线辐射异常问题, 为突破现有探测技术局限, 创新性采用劳厄透镜对 511 keV 的 γ 射线首次进行直接聚焦成像, 并搭配极高能量分辨率的超导转变边沿探测器 (Transition-

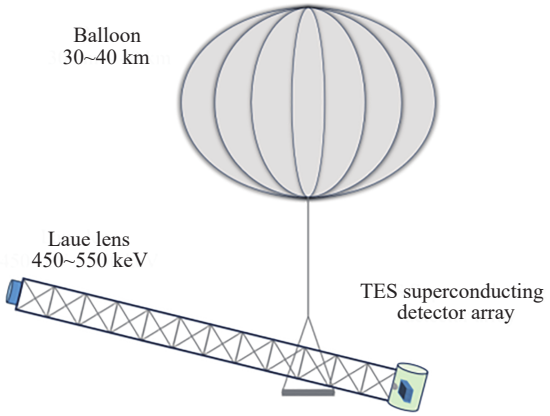

图 30 PAIRS 实验气球与载荷

Fig. 30 PAIRS experimental balloon and load schematic diagram

Edge Sensor) 进行谱线的高能量分辨率测量. 劳厄透镜成像与能谱分辨如图 31 所示. 实验计划实现优于 5'的空间分辨率和优于 0.5 keV 的能量分辨率, 载荷将通过南极超长航时气球平台搭载, 有望为揭示银河系正电子起源提供关键证据, 成为中国南极球载天文观测的重要实践.

在技术准备方面, 在南极开展球载科学实验, 需要发展 60～10^6 m^3 大型零压气球和超压气球系统, 提高实验飞行时长, 增加载荷仪器的数量和重量. 其次, 要突破极寒环境下发放与回收技术, 适应严酷的实验环境, 还需发展高精度姿态控制和指向平台, 并使其系列化、定型化, 完善长时间飞行所需球载循环能源、数据采集、测控数传 (含卫星中继)、导航定位、飞行管控、伞降回收、安全管理等设备, 充分发挥高空天文台的优势, 保证各类观测实验的顺利进行. 可喜的是, 中国已经研制出 10^6 m^3 的科学气球, 且具备小批量生产条件, 在国内科学气球飞行实验中, 在超压气球、气球吊舱姿态指向控制、测控数传、导航定位、高空回收伞技术等方面积累了丰富经验.

在任务规划与站点建设方面, 需要制定中国南极气球活动发展路线图, 南极气球设施建设与运行方案; 研究提出站址选择、建站方案、回收方案、装备配置、支持保障等全套方案, 分期实施. 中国已经建设运行长城、中山、昆仑、泰山和秦岭站 5 个科考站, 积累了丰富的南极科考经验, 具备运输、后勤等条件. 中国已在中山站建有机场, 机场位于南极洲东南部拉尔斯曼丘陵, 距离南极中山站 28 km. 跑道长度为 1500 m, 宽 50 m, 属于冰雪跑道, 也可称为雪橇式冰雪跑道. 该机场于 2022 年 11 月 13 日建成通航. 在正式气球站建成前, 中山冰雪机场可作为临时发放场开展气球发放实验.

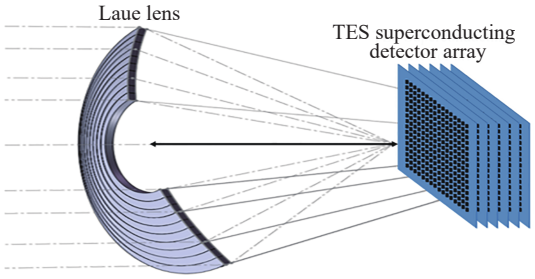

图 31 劳厄透镜成像与能谱分辨

Fig. 31 Schematic diagram of Laue lens imaging and spectral resolution

6 结语

用科学气球携带仪器进入高层大气进行天文观测是一种低成本、高效率的科学实验手段, 南极科学气球长时间天文观测更是开拓了新的具有重大科学价值的实验机会.

由于球载科学仪器不必经历卫星任务遇到的强烈振动、大的加速度过载和严苛的辐射环境, 仪器和所有辅助设备的成本比卫星实验低得多; 气球实验可以采用先进的 (不一定是最成熟的) 探测器件和技术手段占据先机; 载荷可以及时回收修复再使用, 可重复开展实验, 有利于科学思想和仪器技术及时升级与迭代完善; 数吨的气球载荷能力可容纳大型复杂的实验系统, 有利于提高仪器性能和观测能力, 特别是南极气球几十天的飞行能力与中低纬度 2～3 天的飞行相比, 在科学能力上有本质差别, 后者基本具备与卫星类似的科学发现能力. 本文第 3 节和第 4 节的实例是其科学意义的重要例证.

总之, 南极科学气球天文实验将显著增加实验机会, 容纳更多创新项目, 推动天文探测技术的不断发展, 为夯实中国天文研究基础发挥重要作用, 成为天文科学前沿研究取得重大成果和新概念探测方法推进的重要阵地. 针对建设科技强国的紧迫任务和国内外发展趋势, 中国南极气球计划应该加紧推动, 实现从南极科考参与者向引领者的跨越.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] CAI Rong, SUN Jianying. Polar scientific exploration by airships[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2020, **32**(2): 18-25 (蔡榕, 孙建颖. 浮空飞行器极地科学探测 [J]. 现代物理知识, 2020, **32**(2): 18-25)

[2] LI Yijian, HUANG Wanning, ZHOU Jianghua, *et al*. Development status and prospects of near space observatories[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1068-108 (李一健, 黄宛宁, 周江华, 等. 临近空间天文台发展现状与展望 [J]. 空间科学学报, 2024, **44**(6): 1068-108)

[3] GU Yidong. 100 years of balloon scientific observations[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2020, **32**(2): 3-12 (顾逸东. 气球科学观测 100 年 [J]. 现代物理知识, 2020, **32**(2): 3-12)

[4] SOLANKI S K, RIETHMÜLLER T L, BARTHOL P, *et al*. The second flight of the SUNRISE balloon-borne solar observatory: overview of instrument updates, the flight, the data, and first results[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, **229**(1): 2

[5] LOCKOWANDT C, ABRAHAMSSON M. The stratospheric balloon mission PoGO+ from Esrange to Victoria Island, Canada[C]//Proceedings of the AIAA Balloon Systems Conference. Denver: AIAA, 2017

[6] TIAN Lili, FANG Xiande. Research and progress of NASA's balloon[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(1): 81-87 (田莉莉, 方贤德. NASA 高空气球的研究及其进展 [J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(1): 81-87)

[7] JONES W V. Scientific ballooning: past, present and future[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2013, **1516**(1): 229-233

[8] WALKER C, KULESA C, YOUNG A, *et al*. Gal/Xgal U/LDB spectroscopic/stratospheric THz observatory: GUSTO[C]//Proceedings of SPIE 12190, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy XI. Montréal: SPIE, 2022: 121900E

[9] HOOVER S, for the ANITA collaboration. Status of the ANITA experiment[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, **81**(1): 012009

[10] LI Tibei, GU Yidong. China's High-altitude Scientific Balloons and High-energy Astronomical Observations[J]. *Chinese Journal of Nature*, 1984, **7**(3): 163-169 (李惕碚, 顾逸东. 我国的高空科学气球与高能天文观测 [J]. 自然杂志, 1984, **7**(3): 163-169)

[11] LIN Jie, SONG Tengfei, SUN Mingzhe, *et al*. A 50-mm balloon-borne white-light coronagraph: I. Basic structure and experiments on the ground[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2023, **53**(5): 259611 (林隽, 宋腾飞, 孙明哲, 等. 50 mm 白光球载日冕仪: Ⅰ. 基本结构与地面观测实验 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, **53**(5): 259611)

[12] SU Run, LI Xiaojian. Numerical simulation study on flight performance of stratospheric zero-pressure balloon[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2018, **41**(3): 325-332 (苏润, 李小建. 平流层零压气球飞行控制仿真研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2018, **41**(3): 325-332)

[13] SUI Cuijuan, SUN Lantao, MENG Shang, *et al*. Case analysis of the polar vortex during Arctic research expedition in 2003[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, **32**(4): 51-61 (隋翠娟, 孙兰涛, 孟上, 等. 2003 年北极科考期间一次极涡个例天气学分析 [J]. 海洋学报, 2010, **32**(4): 51-61)

[14] LONG Yuan, DENG Xiaolong, YANG Xixiang, *et al*. Trajectory simulation of stratosphere aerostats in polar vortex wind field[J]. *Computer Simulation*, 2021, **38**(8): 37-42 (龙远, 邓小龙, 杨希祥, 等. 极涡风场中平流层浮空器轨迹仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2021, **38**(8): 37-42)

[15] CAI Rong, SUN Jianying. Advances in Chinese polar scientific exploration using high-altitude balloons[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(32): 3510-3519 (蔡榕, 孙建颖. 我国高空气球极地科学探测的初步构想 [J]. 科学通报, 2020, **65**(32): 3510-3519)

[16] KOGUT A, FIXSEN D, FIXSEN S, *et al*. ARCADE: absolute radiometer for cosmology, astrophysics, and diffuse emission[J]. *New Astronomy Reviews*, 2006, **50**(11/12): 925-931

[17] LANGE A, DE BERNARDIS P, DE PETRIS M, *et al*. The BOOMERANG experiment[J]. *Space Science Reviews*, 1995, **74**(1): 145-150

[18] CRILL B P, ADE P A R, ARTUSA D R, *et al*. BOOMERANG: a balloon-borne millimeter-wave telescope and total power receiver for mapping anisotropy in the cosmic microwave background[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2003, **148**(2): 527

[19] REICHBORN-KJENNERUD B, ABOOBAKER A M, ADE P, *et al*. EBEX: a balloon-borne CMB polarization experiment[C]//Proceedings of SPIE 7741, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V. San Diego: SPIE, 2010: 77411C

[20] FILIPPINI J P, ADE P A R, AMIRI M, *et al*. SPIDER: a balloon-borne CMB polarimeter for large angular scales[C]//Proceedings of SPIE 7741, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V. San Diego: SPIE, 2010: 77411N

[21] SHAW E C, ADE P A R, AKERS S, *et al*. In-flight performance of S_{PIDER}'s 280-GHz receivers[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2024, **10**(4): 044012

[22] RIZZO M J, RINEHART S A, DHABAL A, *et al*. The Balloon Experimental Twin Telescope for Infrared Interferometry (BETTII): towards the first flight[C]//Proceedings of SPIE 9908, Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. Edinburgh: SPIE, 2016: 99080S

[23] RHODES J, DOBKE B, BOOTH J, *et al*. Space-quality data from balloon-borne telescopes: the High Altitude Lensing Observatory (HALO)[J]. *Astroparticle Physics*, 2012, **38**: 31-40

[24] RESTER A C. The GRAD Supernova Observer: first flight of a very large balloon over Antarctica[J]. *Advances in Space Research*, 1993, **13**(2): 87-99

[25] BOGGS S E, LIN R P, FEFFER P T, *et al*. A High Resolution Gamma-ray and hard X-ray Spectrometer (HIREGS)

for long duration balloon flights[J]. *Advances in Space Research*, 1998, **21**(7): 1015-1018

[26] FEFFER P T, LIN R P, SMITH D M, *et al*. Preliminary results from the HIgh REsolution Gamma-ray and hard X-ray Spectrometer (HIREGS) long duration balloon flight in Antarctica[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1993, **97**: 31-33

[27] ABARR Q, BEHESHTIPOUR B, BEILICKE M, *et al*. Performance of the X-Calibur hard X-ray polarimetry mission during its 2018/19 long-duration balloon flight[J]. *Astroparticle Physics*, 2022, **143**: 102749

[28] ABARR Q, AWAKI H, BARING M G, *et al*. XL-Calibur–a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission[J]. *Astroparticle Physics*, 2021, **126**: 102529

[29] WALKER C, KULESA C, BERNASCONI P, *et al*. The Stratospheric THz Observatory (STO)[C]//Proceedings of SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III. San Diego: SPIE, 2010: 77330N

[30] MILLS G, YOUNG A, DOMINGUEZ R, *et al*. Cryogenics on the Stratospheric Terahertz Observatory (STO)[C]//Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference. Tucson: CEC, 2015: 012131

[31] PASCALE E, ADE P A R, BOCK J J, *et al*. The balloon-borne large aperture submillimeter telescope: BLAST[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **681**(1): 400-414

[32] GALITZKI N, ADE P A R, ANGILÈ F E, *et al*. The next generation BLAST experiment[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2014, **3**(2): 1440001

[33] TUCKER G S, NAGLER P, BUTLER N, *et al*. The Exoplanet Climate Infrared TElescope (EXCITE)[C]//Proceedings of SPIE 10702, Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII. Austin: SPIE, 2018: 107025G

[34] BRYDEN G, TRAUB W, ROBERTS JR L C, *et al*. Zodiac II: debris disk science from a balloon[C]//Proceedings of SPIE 8151, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets V. San Diego: SPIE, 2011: 81511E

[35] GUZIK T G. The Advanced Thin Ionization Calorimeter (ATIC) for studies of high energy cosmic rays[C]//Proceedings of the 26th International Cosmic Ray Conference. Salt Lake City: ICRC, 1999: 09

[36] WEFEL J P. The ATIC experiment: first balloon flight[C]//Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg, Germany: ICRC, 2001: 2111

[37] WAKELY S P, AHN H S, ALLISON P, *et al*. First measurements of cosmic-ray nuclei at high energy with CREAM[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **42**(3): 403-408

[38] MAESTRO P, AHN H S, ALLISON P, *et al*. Measurements of cosmic-ray energy spectra with the 2nd CREAM flight[J]. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 2009, **196**: 239-242

[39] YOON Y S, ANDERSON T, BARRAU A, *et al*. Proton and helium spectra from the CREAM-III flight[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **839**(1): 5

[40] ANDERSON T B. Exploring the cosmic ray spectrum with the CREAM experiment[D]. University Park: The Pennsylvania State University, 2013

[41] RAUCH B F. Measurement of the relative abundances of the ultra-heavy galactic cosmic rays ($30 \leqslant Z \leqslant 40$) with the Trans-Iron Galactic Element Recorder (TIGER) instrument[D]. Seattle: Washington University, 2008

[42] BINNS W R, BOSE R G, BRAUN D L, *et al*. The Super-TIGER instrument: measurement of elemental abundances of ultra-heavy galactic cosmic rays[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **788**(1): 18

[43] GORHAM P W, ALLISON P, BANERJEE O, *et al*. Constraints on the diffuse high-energy neutrino flux from the third flight of ANITA[J]. *Physical Review D*, 2018, **98**(2): 022001

[44] PROHIRA S, NOVIKOV A, BESSON D Z, *et al*. HiCal 2: an instrument designed for calibration of the ANITA experiment and for Antarctic surface reflectivity measurements[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, **918**: 60-66

[45] YAMAMOTO A, MITCHELL J W. Search for primary antiparticles and cosmological antimatter with BESS[J]. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 2013, **243-244**: 92-97

[46] ABE K, FUKE H, HAINO S, *et al*. Measurements of cosmic-ray proton and helium spectra from the BESS-Polar long-duration balloon flights over Antarctica[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **822**(2): 65

[47] ONG R A, ARAMAKI T, BIRD R, *et al*. The GAPS experiment to search for dark matter using low-energy antimatter[C]//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. Busan: ICRC, 2017

作者简介

周江华（通信作者） 男，1973年2月出生于江西省鹰潭市，现为中国科学院空天信息创新研究院研究员，中国科学院大学兼职教授，博士生导师. 主要研究方向为临近空间飞行器飞行动力学与控制技术，飞行任务规划和数字化仿真技术、自动驾驶仪与飞控系统工程研制.
E-mail: Zhoujh@aircas.ac.cn

程骏飞 男，2002年3月出生于河北省沧州市，现为中国科学院空天信息创新研究院研究生，主要研究方向为临近空间风速测量技术、浮空器动力学控制.