

我国高空科学气球天文观测发展历程(下)

李一健 黄宛宁 张冬辉 张航悦

(中国科学院空天信息创新研究院 100094)

(续前)

4. 红外观测

20世纪60年代末,国外在高空科学气球上的红外天文观测获得成功,给天文观测提供了一种新的运载工具,促进了红外天文观测的兴起。我国空间红外天文学起步较晚,到20世纪70年代末才与我国高空科学气球同步发展起来。

4.1 10 cm 红外球载太阳望远镜

1978年初,上海天文台开始了远红外天文观测工作,计划以太阳远红外辐射为观测对象、逐步发展球载红外观测技术。

1982年9月中国科学院上海天文台在河北省香河地区发放了一个由3万立方米气球携带的红外I型望远镜观测设备,进行了我国的首次高空远红外观测。该设备是一个专用于太阳观测的牛顿式

球载望远镜,口径为15厘米,测得了太阳在4.6 μm 和18 μm 波长的红外辐射,初步算得在观测波段(峰值波长18微米)的太阳亮度温度值为 $4685\pm136\text{ K}$ 。这是我国第一次进行的空间指向天文观测,为研究太阳的光球负氢离子的丰度、研究太阳的结构及对日地关系的研究提供了依据。该项成果获得了中国科学院科技进步二等奖。

太阳观测成功之后,上海天文台考虑将观测目标转移到恒星,进行大视场的银道面巡天观测。在1984年底开展了对红外I型球载望远镜的改装升级工作,改装成快速扫描系统,并采用硅光二极管作为探测器。

改进后的红外球载望远镜先是在地面观测木星进行模拟观测,后在1985年夏天到香河进行了球载观测,开始对木星和银河系中心进行扫描观测,并成功地接收到银河中心的近红外辐射,观测到了天蝎a等恒星和银道面的近红外辐射。该项成果获得了1987年中国科学院科技进步三等奖。

4.2 双筒红外球载快扫描望远镜

在1985年观测的基础上,上海天文台重新设计了一台红外球载快扫描望远镜,计划用来观测银道面和银心区的近红外及远红外辐射。这是一个口径均为10 cm的双筒望远镜,一筒镜用近红外的硅光电二极管作探测器,另一筒镜用作远红外观测。为了提高远红外光度计的灵敏度,还采用了液氮致冷的冷光学系统和锗测辐射热探测器。

1987年完成整个系统,并于8月3日首次在中日合作高空气球越洋航线上实现飞行,平飞高度32 km,飞行10小时。由于遥控指令接收机故障,无法进行天文观测,但获得某些有用的飞行工程数据。



图 16 红外球载太阳望远镜

1988年8月16日,红外球载快扫描望远镜由B30-C7气球搭载飞行,气球高度32 km,历经10小时飞行,观测了13颗晚型星及三颗大行星(木星、火星和土星),这是我国首次用球载望远镜成功进行的恒星红外观测。

4.3 30 cm 球载红外望远镜

为了适应我国红外天文观测的需要,1986年中国科学院紫金山天文台和天文仪器厂合作,并由西

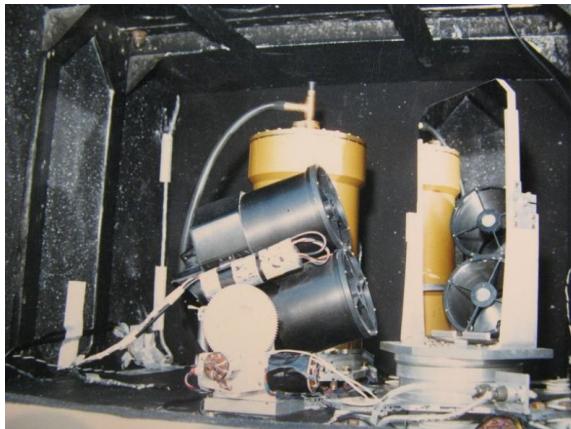


图17 双筒红外球载快扫描望远镜



图18 30 CM 球载红外望远镜

北工业大学、高能所、大气所等单位协作,开发研制了30 CM球载红外望远镜,适用于远红外点源观测。采用液氦制冷,以及偏置导星观测方式,1986~1988年间观测到塞弗特星系的红外辐射等。

5. 国际合作

5.1 中日合作开展越洋气球飞行计划

1985年,中国科学院批准中日合作开展越洋气球飞行计划,为期三年。中国科学院与日本宇宙科学研究所签署了“中日合作高空气球越洋飞行观测协议书”。日方参加合作的是宇宙科学研究所的气球组,中方参加的则是上海天文台、紫金山天文台和中国科学院空间中心。从日本鹿儿岛到中国东部地区的高空气球航线,是不经过第三国的北半球中纬度地区不可多得的越洋飞行航线。

由于中日两国科学家的合作和努力,在1986~1988三年内共进行过七次成功的飞行。1986年是合作的第一年,前两次主要以工程试飞为主,第二次已带有简单的实验,一个正比计数器和两块CR-39。1986年7月25日中日远洋合作B₅C₁科学气球飞行,7月30日B₅C₃科学气球飞行。两次飞行成功,意味着开辟了从鹿儿岛跨越东海到长江下游的飞行航线,对中日双方开展各种空间科学观测,具有重要意义。以后五次分别是:银河平面和银心的红外观测两次实验;射线源双星的时间变量观测一次;气溶胶以及同温层中的氧化氮测量一次;叠层乳胶舱,探测银河系中原始宇宙线电子,能量范围为30~1000 GeV一次。

由上海天文台、紫金山天文台以及空间中心主导的中日跨海长距离气球飞行在1986年至1988年的7次飞行中获得对天鹅座X-1高能X射线能谱、塞弗特星系SCO- α 1的红外辐射以及测量了太阳红外亮度温度。

七次飞行的气球工程参数列于表2。

5.2 中苏长时间气球飞行合作

1989~1991年,中国科学院高能所与苏联列别

表2 从日本到中国的气球越洋飞行

气球	发放时间	高度	仪器负载	气球体积	回收地点
B ₅ C ₁	1986年7月25日	25 km	59 kg	5000 m ³	浙江桐庐
B ₃₀ C ₃	1986年7月30日	35 km	83 kg	3×10 ⁴ m ³	安徽郎溪
B ₁₅ C ₂	1987年7月29日	27 km	170 kg	1.5×10 ⁴	江苏丹阳
B ₃₀ C ₅	1987年8月3日	32 km	217 kg	3×10 ⁴ m ³	浙江桐庐
B ₃₀ C ₇	1988年8月16日	32 km	220 kg	3×10 ⁴ m ³	浙江临安
B ₃₀ C ₉	1988年8月20日	34 km	236 kg	3×10 ⁴ m ³	江苏栗阳
B ₃₀ C ₈	1988年8月23日	36 km	273 kg	5×10 ⁴ m ³	安徽当涂

捷夫研究所开展中苏长时间气球飞行合作,利用盛夏稳定的平流层东风环流沿北纬41度线从中国内蒙古飞到苏联境内的里海东岸,飞行持续时间可达70~100小时,这是全球最理想的一条长距离飞行路线。

1990年8月5日,气球从香河发放升空,经过70小时的飞行,行程4200公里,在苏联塔什干附近降落。气球使用的球体是苏制18万立方米气球,载荷有0.5平方米的乳胶室CR-39塑料径迹探测器和植物种子样品,吊舱总重1000 kg。飞行中采用了CO-SPAS卫星定位系统,通过中苏民航AFTN电传网进行飞行协调。

1991年气球发放地点移至锦州,7月24日进行了第一次飞行,气球仍采用苏制18万立方米球,吊舱重1300 kg,总浮力2250 kg,飞行高度32.5 km,飞行时长72小时,主载荷是列宁格勒技术物理所的火花室谱仪。

后续中苏开展进一步合作,1991年高能所为苏

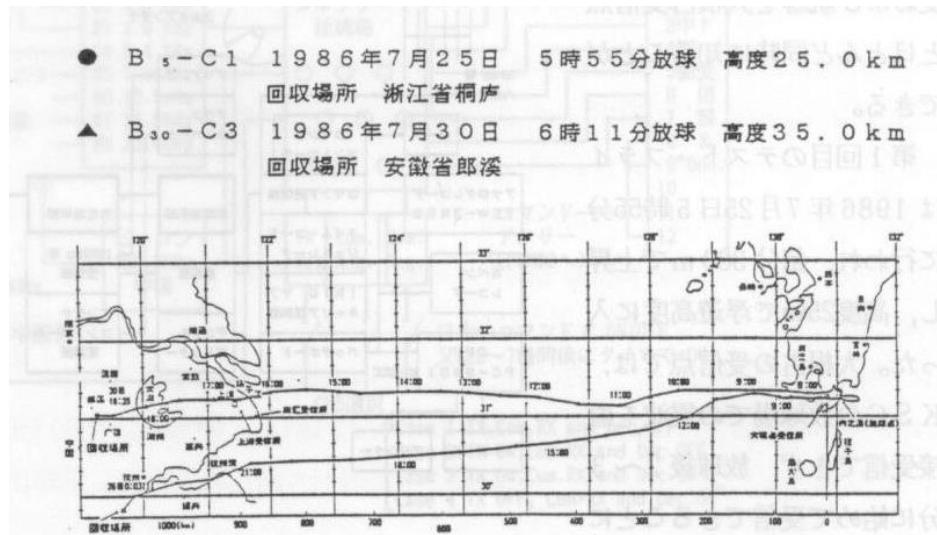


图19 1986年2次越洋气球飞行轨迹

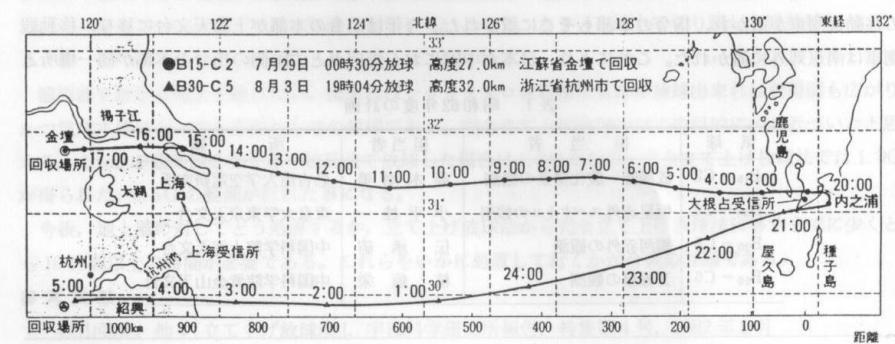


图20 1987年2次越洋气球飞行轨迹

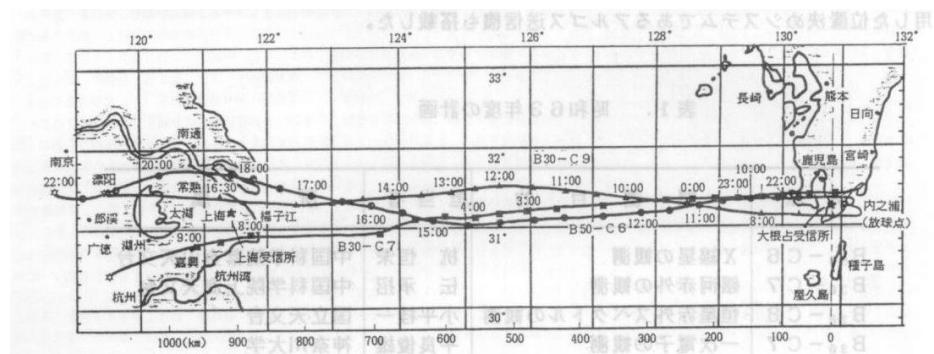


图 21 1988 年 3 次越洋气球飞行轨迹



图 22 列宁格勒技术物理所的火花室谱仪

联列别捷夫物理所研制了 2 个 60 万立方米高空气球, 将用于其火星计划的高空测试, 作为对等条件, 苏方则为我方提供了重型卡玛兹越野卡车和 2 组工作压力为 300 大气压的大型氢气储气排, 同时配套了一台车载式高压氢气压缩机。1992 年, 高能所气球组派人参加首个 60 万立方米气球试验。

中苏长时间气球飞行合作两次飞行成功实现了北半球距离最长的气球飞行航线, 成功开展了宇宙反质子探测、初级宇宙线和高能核-核作用等研究。

5.3 ATIC 与悟空号

中国科学院紫金山天文台 21 世纪初参加美国南极气球宇宙线探测项目 ATIC, 为后来的暗物质卫星 DAMPE 立项打下了坚实的基础。

先进薄型粒子量能器 ATIC 于 1997 年由美国提出, 计划在南极开展高空宇宙射线的观测。中国科学院紫金山天文台常进等建议同时观测高能电子

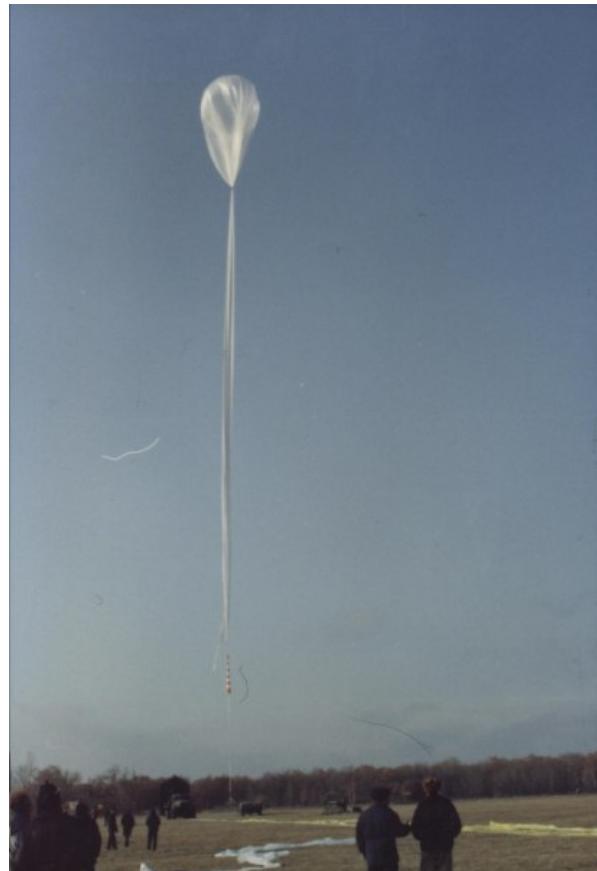


图 23 60 万立方米气球飞行试验

能谱, 并于 1998 年加入项目组。

自 2000~2007 年, ATIC 共进行了 4 次飞行, 其中 3 次获得成功, 共进行了 56 天的观测。常进借助 ATIC 气球试验观测结果发现了一种观测高能电子和伽马射线的建设方法, 2008 年以常进作为第一作者的论文《宇宙电子在 300~800 GeV 能量区间发现“超”》发表在 *Nature*。有了 ATIC 高空科学气球的

试验验证,2011年底,暗物质粒子探测卫星项目被正式列入中国科学院空间科学先导专项。2015年12月17日,“悟空”号发射成功。

6. 高空气球后续发展

一期工程结束后,科学气球一方面投入运行,服务于多学科研究,同时继续发展大型气球提升能力。

中国科学院高能所在发展大型气球提升能力上取得众多进展:

(1) 1985年启动并建设了气球生产车间(长150

米,宽8米);

(2) 1986年建成并启用了147米长的超大型气球生产线及加强带生产线,以及开展了气球形状的理论研究,通过计算找到了优于传统的“自然型”气球的另一种球型,取名为“混合型”气球;

(3) 1989年研制了动态发放系统,主要包括滚筒装置和动态发放车,能够更好配合已有的10万、20万和30万立方米气球的发放;

(4) 1995年8月份经严格论证后,实施中国科学院高空科学气球气球系统改造工程,针对大型气球吊舱动态发放车、测控跟踪系统以及其他配套设施



图24 ATIC、悟空号与常进院士

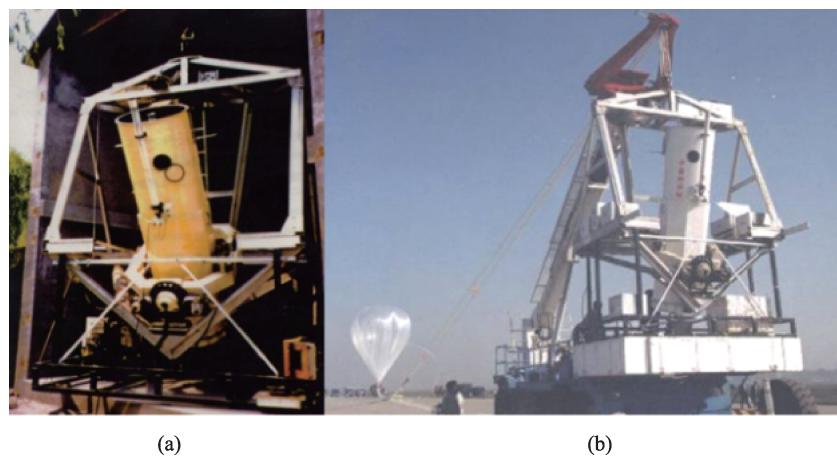


图25 国家天文台临近空间天文台地面测试(a)和发放升空前(b)

进行了改造,在1997年上半年基本完成改造项目;

(5) 1997年高能所气球组在姜鲁华领导下开始研制40万立方米高空气球,并于1998年飞行获得成功,载荷重量超过1.5吨,高度达40公里。40万立方米高空气球研制成功,使得我国成为继美国和法国之后,世界上第三个能够自己设计、研制和发放体积达到40万立方米的大型气球的国家。

随着大型气球能力提升,艾国祥院士在中国科学院的资助下,1994年决心启动大型球载太阳望远镜工程(BST),后国家自然科学基金委员会(NSFC)也进行了资助。该工程的科学目标是接近衍射极限的0.2角秒分辨率的观测,对太阳物理如磁元的精细结构、太阳活动区与耀斑的能量活动机制及太阳大气结构等方面开展研究。

2005年以后,气球组工作转到专业发展条件更适宜的中国科学院光电研究院(现中国科学院空天信息院),不断发展取得新的成绩。2010年后建设了新的大型气球生产线,在内蒙古四子王旗建立了综合气球实验基地。

7. 鸿鹄专项

2018年,中国科学院空天信息创新研究院实施

的鸿鹄专项正式启动。“鸿鹄专项”聚焦临近空间实验平台能力提升,旨在加强临近空间环境和生态系统的认知,目标建成我国首个临近空间科学实验系统,引领临近空间科学的研究,提升临近空间开发利用水平,是我国首个聚焦临近空间领域的大型科学计划。

在鸿鹄先导专项的支持下,以中国科学院云南天文台林隽团队的日冕观测课题“日冕仪临近空间搭载实验”需求为牵引,中国科学院空天院浮空器研究中心与中国科学院西光所等兄弟单位联合研制了基于高空科学气球的临近空间天文台。课题的主要任务是研发50 mm口径的折射式日冕仪,工作波长为5500 Å,滤光片透过带宽度为50~100 Å,具备对白光日冕进行偏振观测的能力。2022年10月4日该临近空间天文台发放成功,飞行高度30 km。

在鸿鹄专项的牵引下,中国科学院空天信息创新研究院已经成功研制出适用于临近空间天文台姿态控制的中型吊舱方位控制系统。该系统适用于700 kg以下(转动惯量100~160 kg·m²)吊舱,能够给搭载的载荷提供长时间(2h)稳定精度≤0.5°,短时间(15 min)稳定精度≤0.2°的方位控制。



图26 搭载日冕仪临近空间整体结构和实物图

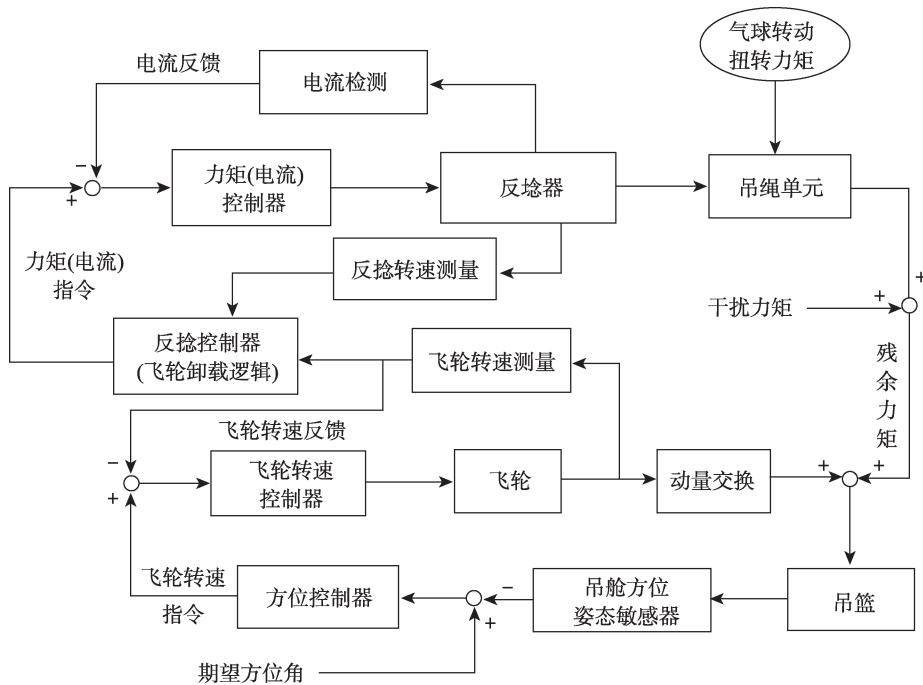


图 27 中型吊舱姿态控制整体方案

中国科学院鸿鹄专项“临近空间对太阳风暴响应特征观测研究”科学任务也使用了带有空天院研制吊舱方位姿态系统的临近空间天文台。该任务的研究对象是：临近空间对太阳风暴的响应。

2022年9月,该临近空间天文台成功获取了一个A级太阳耀斑事件期间的太阳紫外光谱辐射

数据,揭示了在临近空间高度上的太阳紫外辐射光谱(190~400 nm)变化特征,并给出了临近空间对太阳耀斑紫外(190~400 nm)辐射增强响应的模拟结果。

在鸿鹄专项的支持下,开展了临近空间大气紫外背景与波动观测验证实验。成功获取了25~30 km高度,不同太阳天顶角、不同方位、不同俯仰的大气紫外光谱特征、太阳高能电磁辐射特征。

我国在重载型高空气球方面,也取得重大进展。

2023年,中国科学院空天信息创新研究院设计并研制了一款100万m³重载高空科学气球系统,包括具备相应发放能力的重载型发放车,可以将3.6 t的载荷送入37 km的高空,这使得我国成为全世界第二个具备百万量级高空气球研制能力的国家,也意味着以此为基础的临近空间天文台可以搭载更多更重的观测仪器设备,一次观测可获取更多的研究成果。

8. 结语

高空科学气球是目前性价比最高的成熟临近

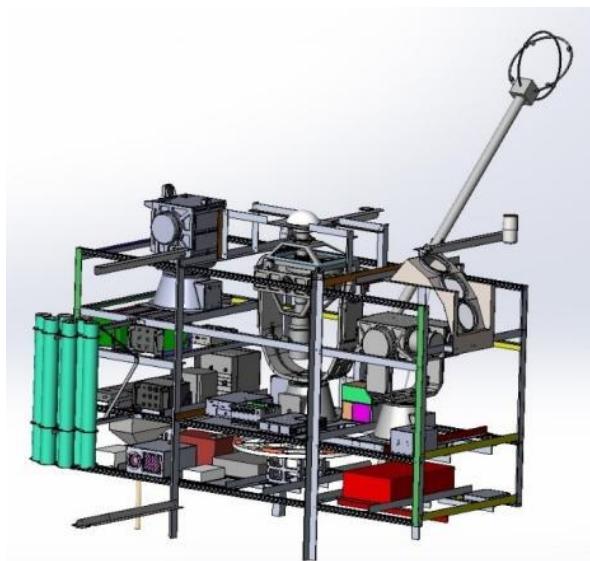


图 28 鸿鹄专项临近空间天文台

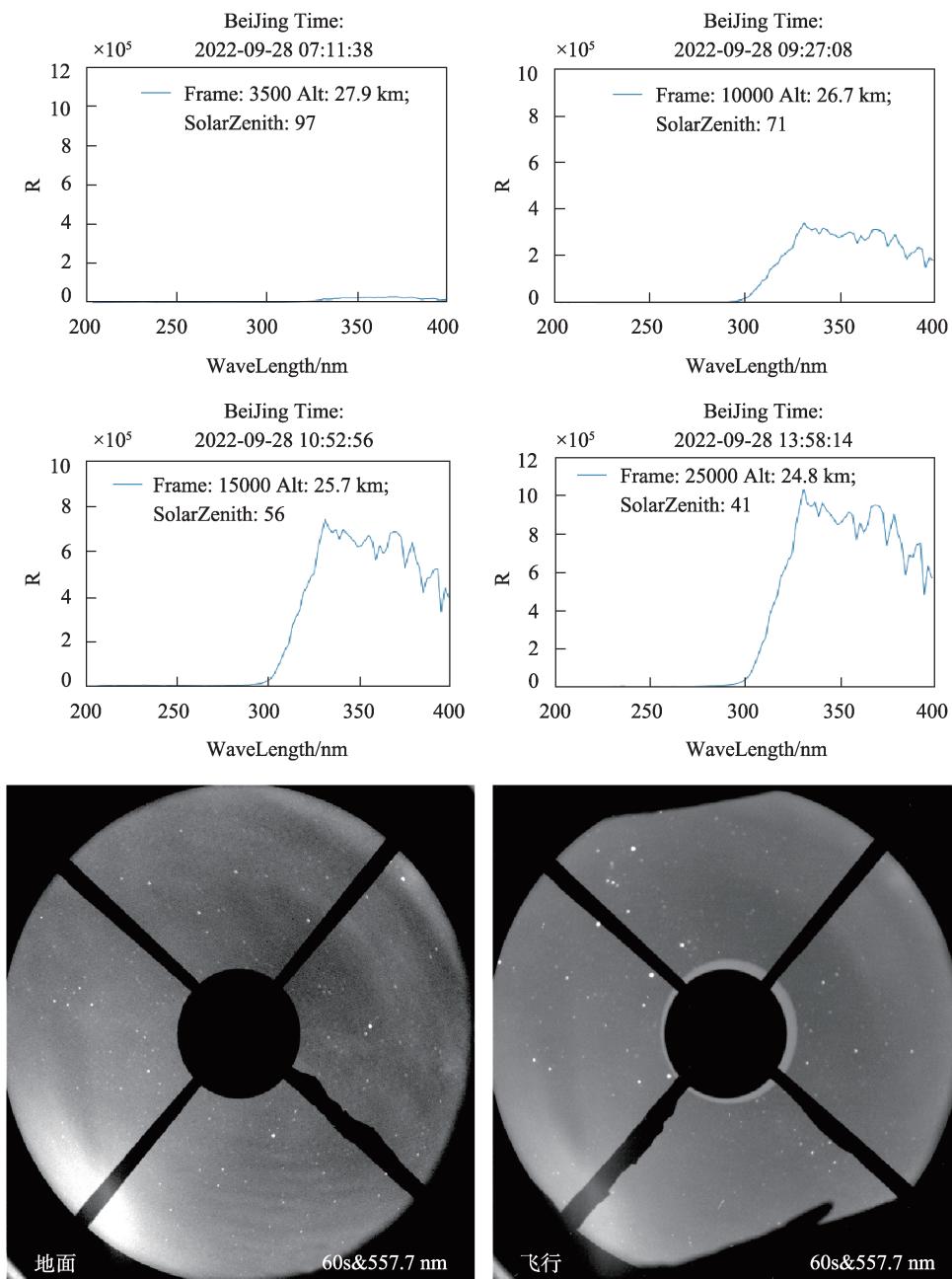


图29 紫外光谱仪获得20~31 km紫外大气散射背景数据以及30 km高度多波段气辉成像实验

空间飞行平台,在我国早期天文观测发展中发挥了重要作用,取得了众多重大科研成果,有力地推动我国科技创新发展。

在新时代下,随着长航时技术和高精度稳定指向技术的突破,高空科学气球平台可以再次有力支持我国天文观测事业的发展。高空科学气球平台可以作为空间科学天文观测先进仪器和创新思想的前期验证平台,促进新一代尖端科学探测技术的

发展,成为航天器/天基天文台的重要技术储备源头,能够有效提高天基天文台观测任务的成功率和加快天基天文台研发生命周期;同时也可作为空间科学人才培养平台,可以成为空间科学家和工程师的摇篮,可以培育更多领军人才,壮大研究队伍。

回顾我国气球科学天文观测历程,期望我国气球科学观测事业行稳致远,助力我国向科技强国的目标迈进。

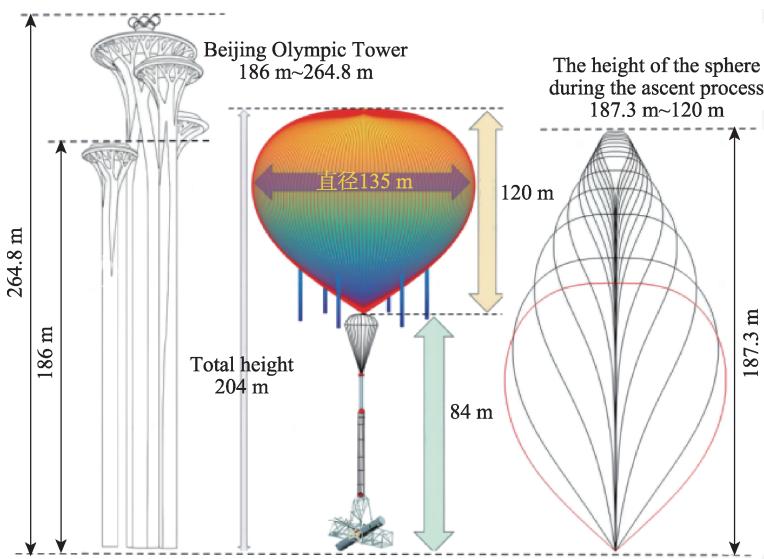


图30 中国科学院空天院研制的基于100万m³重载气球的临近空间天文台概念图



图31 重载型高空气球发放车

祝贺
我国的高空气球事业
不断发展。
何泽慧
1994.4.7日

图32 何泽慧为气球会议文集题词

参考文献

- [1] 顾逸东. 气球科学观测 100 年[J]. 现代物理知识, 2020, 32(2): 3-12.
- [2] 岳忠厚. 高空科学气球的应用[J]. 中国科学基金, 1989(1): 50-51.
- [3] 况浩怀, 吴枚. 近年来我国的宇宙线物理研究[J]. 科技导报, 1992 (5): 29-31, 2.
- [4] 戴长江, 吴枚, 马宇倩等. 北京地区上空的 γ 射线背景[J]. 天文学报, 1983(4): 395-400.
- [5] 邹惠成. 用高空气球进行太阳远红外观测[J]. 天文学报, 1984 (1): 1-9.
- [6] 中国科学院高能物理所高能天体物理组. 我国首次对蟹状星云及其脉冲星硬X射线观测成功[J]. 天文学进展, 1985(2): 185-186.
- [7] 白国良. 高空科学气球越洋飞行[J]. 瞭望周刊, 1986(34): 35-36.
- [8] 任国孝, 周寅藻, 黄荣庆. 宇宙线高能铁核($E \geq 3.6 \text{AGeV}$)作用截面对靶核原子量的依赖[J]. 高能物理与核物理, 1988(2): 145-149.
- [9] 吴钟奇, 李海澎, 沈玲娣. 红外I型球载望远镜的改进[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1986: 221-229.
- [10] 戴长江, 吴枚, 马宇倩等. 空间硬X射线望远镜HAPI-1 及其对蟹状星云脉冲星的观测[J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 1987(2): 140-146.
- [11] 沈长铨, 沈培若, 叶宗男等. 多丝正比室的逃逸门技术[J]. 高能物理与核物理, 1989,(5):385-392.
- [12] 马宇倩, 况浩怀. 我国的宇宙线物理研究六十年[J]. 物理, 2013, 42(1):23-32.
- [13] 卢方军. 从球载实验到慧眼卫星[J]. 现代物理知识, 2021,33(2):4-11.
- [14] 傅承启, 蒋栋荣. 快扫描红外球载望远镜的首次飞行[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1989: 146-151.
- [15] 邹惠成. 从日本鹿儿岛到中国的高空气球越洋飞行[J]. 空间科学学报, 1991(2): 156-157.
- [16] 傅承启, 蒋栋荣. 晚型星和大行星的近红外球载测光[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1994: 171-178.
- [17] 况浩怀, 吴枚. 近年来我国的宇宙线物理研究[J]. 科技导报, 1992(5): 29-31, 2.
- [18] 姚大志, 严俊, 王红池. 30CM球载红外望远镜研制及飞行[C]//空间探测的今天和未来——中国空间科学学会空间探测专业委员会第七次学术会议论文集(下册). 中国空间科学学会空间探测专业委员会, 1994: 6.
- [19] 顾逸东. 从高空气球到载人航天[J]. 现代物理知识, 2023, 35 (S01):192-199.
- [20] 李一健, 黄宛宁, 周江华, 张晓军, 张航悦. 临近空间天文台发展现状与展望[J]. 空间科学学报.