

我国高空科学气球天文观测发展历程(上)

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)

天文学是探索宇宙天体起源、演化的基础学科。过去十年就有六次诺贝尔物理学奖授予了基于天文观测的科学发现。世界各国都高度重视天文学的发展,促使其逐渐发展成为科学领域中最有活力和最具有潜力的研究科学。

只有将天文观测仪器设备,安置在具有观测优势的特定位置上才能充分发挥其效用,获得最大的科学产出。地球被大气包裹,基于地面的天文观测活动,会受到大气中各类物质的影响,因为大气层对天体辐射的吸收和散射,会削弱天体辐射的强度并改变天体辐射的能谱。因为地球大气密度随高度指数减小,大气消光作用主要集中在下层,所以科学家将天文观测设备的目光投向了空间。

气球是一种古老的飞行器,从1783年第一个热气球诞生开始,距今已经有200多年的历史。20世纪50年代高分子材料技术快速发展。1950年,美国工程师奥多·温尼森发明了使用加强带将聚乙烯材料密封的工艺。轻薄廉价的聚乙烯薄膜用于气球制造,使得球膜重量从每平米300 g降低到约20 g,这是一个里程碑,极大降低了高空科学气球球膜重量,标志着现代高空气球由此诞生。现代高空气球能够达到距离地面35~45 km的大气顶端,此处大气密度为地面的1%~0.1%,非常接近外太空环境。从空间天文、空间物理、高能物理和宇宙线研究的意义上说,高空气球在一定程度上突破了地球大气的屏障,从而打开了绝大部分的观测窗口,很适合硬X射线、 γ 射线、红外及远红外光学天文和各种荷电粒子等天文观测。

正是因为高空科学气球在天文观测上发挥的巨大作用,1975年国际科学组织COSPAR将气球列

为空间探测研究工具之一。

我国高空科学气球天文观测与高空科学气球是同步发展起来的,起步于“文革”后洋溢着科学春天气息的年代。

在我国空间天文观测及其他领域科学观测的需求驱动下,启动了高空科学气球一期工程,推动了气球科学观测活动的开展。气球科学观测活动首先聚焦于宇宙线观测、硬X射线观测和红外观测,而后开展了一些国际合作。21世纪初由于航管和经费支持等原因,高空科学气球天文观测活动有所削弱。近些年在中国科学院战略先导专项——鸿鹄专项的支持下,球载天文观测进入了新的发展时期。

1. 高空科学气球第一期工程

1977年,国家开始着手制订科学技术发展规

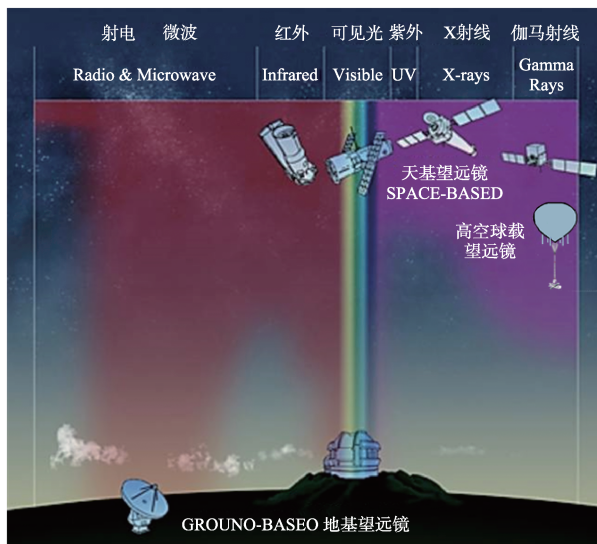


图1 大气层和电离层对电磁波的吸收和反射效应

划。在此形势下,高能所于1977年6月1日到4日召开了宇宙线规划讨论会,张文裕、何泽慧、力一等高能所领导参加了会议,会议提出“近8年尽快掌握高空气球技术,开展宇宙线天体物理观测,之后争取发射卫星”的发展思路。会后决定由顾逸东担纲气球工作。顾逸东牵头开展了进一步调研和规划,主笔编写了“关于发展我国高空科学气球的建议”,与李惕碚等代表高能所在1977年9~10月的全国自然科学学科规划会议上正式提出。

1978年夏,第一次高空气球工作会议在中国科学院高能所召开,讨论气球工程的组织和发展,何泽慧先生等在会上大声疾呼抓紧推动科学气球发展。



图2 1977年与发展气球的倡议者贾恩凯、陆柱国、李惕碚、顾逸东(从左到右)

1978年9月中国科学院批准开展高空科学气球第一期工程,其主要任务是气球观测平台的设计、制造与控制,以及确保成功进行相关科学观测活动。

参加这个工程项目的有中国科学院高能物理所、大气物理所、空间中心、上海天文台和广州电子所5个单位。高空科学气球一期工程在边研制边试验过程中推进,类似于现在的快速迭代开发。经过联合攻关,到1983年底建成了万立方米级高空科学气球系统,完成气球材料、气球设计、制造,气象保障,气球的发放、回收,无线电遥控遥测、跟踪定位、姿态控制等方面的研制工作,整个系统的技术状况稳定可靠。

1984年6月,中国科学院召开“万立方米级高空气球系统”科研成果评定会。评定结果认为,这个系统作为一般规模的高空和空间科学观测的实用运载工具,在空间天文、宇宙线及高能物理、大气物理、国防科研等多个领域开展了多次科学观测,取得了一批有价值的科学资料,为平流层大气探测和遥感等科学研究提供了重要的观测平台。该成果获1985年国家科技进步奖二等奖。

一期工程地完成使我国成为国际上少数几个能独立研制和发放高空科学气球的国家之一。一期工程结束后,科学气球投入运行,服务于多学科研究。



(a)



(b)

图3 (a) 何泽慧先生在我国第一次高空气球工作会议上发言;(b) 钱三强先生在河北香河气球站参加300立方米气球发放试验



图4 一期工程建立的静态发放系统

2. 宇宙线观测

银河宇宙线核成分是太阳系外到达地球的唯一物质样本,它们是在天体内部发生核燃烧的过程中产生的。因而,通过研究宇宙线的核成分可以得到天体内部核合成过程及银河系物质构成的重要信息。

1980年9月,在我国5000 m³的高空气球上进行了初级宇宙线电荷成分的观测。探测装置由两层固体径迹探测器CR-39和一层原子核乳胶组成。这次观测中气球平飞高度为33.8公里,平飞时间为10小时。探测器测得高空宇宙线原子核($z>6$)的丰度分布,宇宙线铁原子核的电荷分辨已达到0.5e(e为电子电荷),接近了当时的国际水平,这是我国第一次成功的空间高能天文观测。

1982年5月14日和1985年5月31日进行了两次搭载固体径迹探测器CR-39的飞行实验。实验利用北京地区地磁场对宇宙线带电粒子的地磁切割,得到了能量高于3.6 A·GeV的铁核粒子流。在两次气球飞行中用塑料径迹探测器CR-39和各种靶物质的夹层结构组成核-核作用截面测量装置,实现了铁核与碳、铝、铁和铜靶的核作用截面的测量,得到了截面对靶核原子量的依赖关系。

3. 硬X射线观测

我国早期的球载天文观测选择在硬X射线波段进行,是出于科学和技术两方面的考虑。硬X射线的光子能量介于10~1000 keV,携带了高能天体

表1 两次气球飞行情况

发放地点:香河气球站;垂直地磁截止刚度9.8 GV		
发放时间	1982年5月14日	1985年5月31日
探测器类型	CR-39(纯)	CR-39(DOP)
探测器面积	544.5 cm ² (铝)	272.2 cm ² (碳靶) 544.5 cm ² (铜、铁靶)
照射时间	9.5 h	15.3 h
平均平飞高度	36.8 km	35.4 km
平均大气深度	4.6 g/cm ²	5.8 g/cm ²

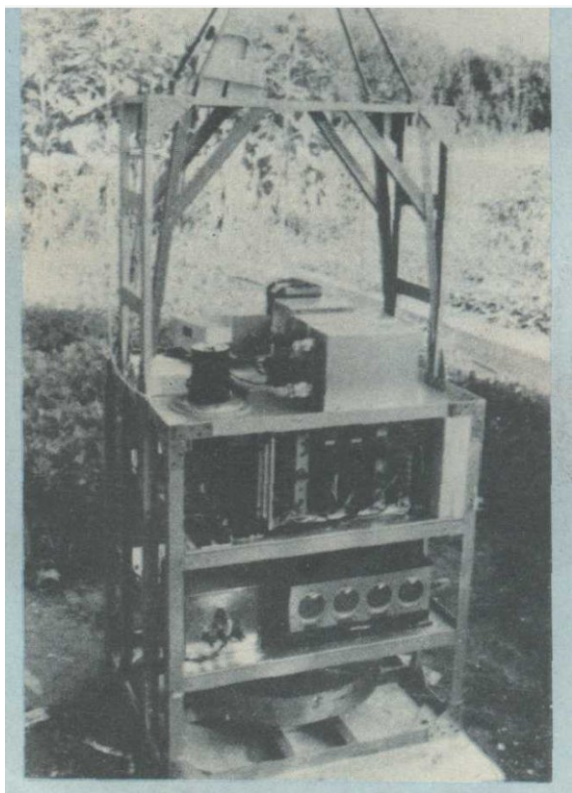
及天体激变过程的重要信息。与伽马射线相比,硬X射线辐射的流强高得多,因此在较短的观测时间里就可以获得高统计性的数据;软X射线的穿透能力差,因为上面剩余大气的吸收,无法在气球高度进行探测,所以硬X射线是球载高能天文望远镜最合适的研究能区。

3.1 背景射线探测

在X和 γ 射线天文学研究中,背景问题是一个严重的问题:天体源的射线流强较弱,而背景射线却颇强。因此射线背景强度是进行天文实验设计的一个不可少的依据。为了今后利用北京香河气球站开展天文观测提供基本数据,需要利用高空气球进行了北京地区上空硬X- γ 射线背景的测量。

1982年9月由3万立方米气球运载高空硬X- γ 射线背景探测系统——小型NaI-CsI复合晶体探测器系统,飞行观测近5小时,测得的北京32~33 km高度 γ 背景积分能量谱。实验观测结果为下一步硬X射线和 γ 射线天文观测的实验设计,提供了宝贵的第一手数据。

此后,高能所先后研制了两款球载望远镜:以复合晶体探测器为基础的HAPI系列探测器(HAPI-1、HAPI-2、HAPI-3)和以高压充氙多丝正比室为基础的STAR系列(STAR-1、STAR-2),并开展了多次硬X射线天文观测。HAPI-4是球载混合型硬X射线天文望远镜,其结合充氙多丝正比室和复合晶体闪烁计数器(Phoswich)的优点,是迄今为止我国研制的最后一台球载X射线望远镜,也为促成慧眼(HXMT)卫星立项立下了汗马功劳。

图5 球载硬X- γ 射线背景探测系统

3.2 HAPI系列

1980年,我国首台球载NaI(Tl)探测器(HAPI-0)系统研制成功。1983年,HAPI-0在河北香河县成功起飞,并对X射线进行观测,取得了不错的空间观测数据。

1983年,第一台球载硬X射线望远镜HAPI-1投入运行,HAPI-1拥有 145 cm^2 的CsI(Tl)/NaI(Tl)复



图6 HAPI-0吊舱调通过后,装车准备运往发放现场

合晶体探测器,观测能区 $20\sim 200\text{ keV}$,测量到了北京地区上空的X射线、 γ 射线和宇宙线本底。1984年5月23日,HAPI-1探测器由5万立方米的高空科学气球搭载,在33公里高空对蟹状星云及其脉冲星PSR-0531+21跟踪观测2小时,成功地得到了蟹状星云脉冲星33毫秒周期信号硬X射线辐射周期和清晰的脉冲相位分布,这是我国第一次对宇宙活动天体高能发射的成功观测,表明我国已具备探测高能天体快速时变现象的能力。该项观测成果获中国科学院科技进步奖二等奖。

1985年9月,在HAPI-1技术基础上研制的HAPI-2望远镜利用10万立方米气球升空,飞行6小时,飞行高度 37.6 km ,对天鹅座X-1和天鹅座X-3进行了成功的观测,获得了黑洞候选体天鹅座X-1高能X射线时间结构和能量谱,发现于 160 keV 附近计数明显涨高。这个实测结果为致密天体表面辐射机制的研究提供了很有价值的

数据。1987年2月23日,人类历史上最著名的超新星



图7 HAPI-1地面测试

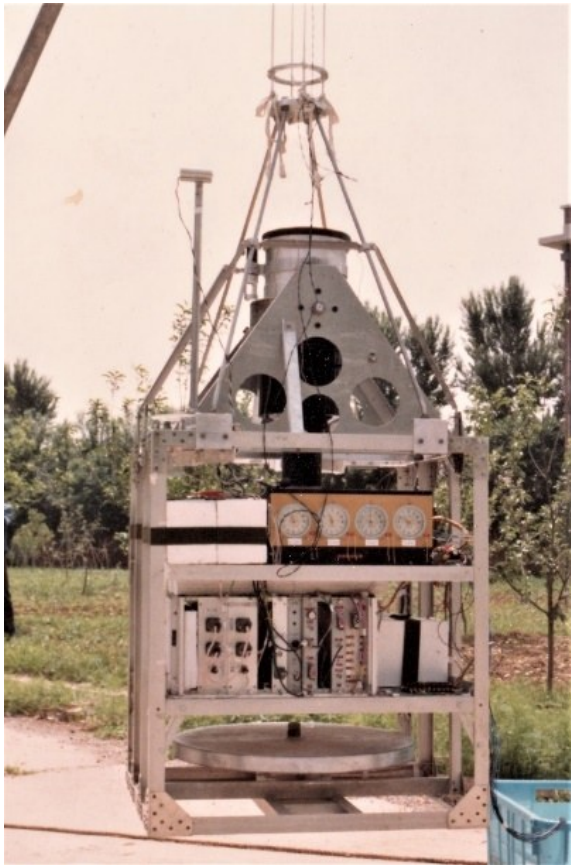


图8 HAPI-2地面测试



图9 HAPI-3在巴西参与SN1987A的国际联测

之一SN1987A在这一天爆发。这是人类进入现代科技时代之后离地球最近的超新星爆发。根据恒星演化理论,在超新星爆发的过程中可能产生中子星,尽快对其进行X射线观测对于超新星爆发物理和极早期中子星的研究都具有重大意义。

1987年12月到1988年2月,在李惕碛、顾逸东

带领下,高能所携带 HAPI-3 望远镜赴巴西圣保罗州坎波斯基地对超新星 SN1987A 开展飞行观测实验。硬 X 射线望远镜 HAPI-3 主探测器是 NaI(Tl)/CsI(Tl)复合晶体,探测面积 314 cm^2 ,探测能区 $30\sim 400\text{ keV}$,能量分辨率 $23\%\text{@}60\text{ keV}$,时间分辨率 0.1 ms ,可测量天体的能谱和时变性质,并具有良好的本底抑制能力和较高的探测灵敏度。

用 HAPI-3 球载 X 射线望远镜在 INPE 的圣保罗州坎波斯基地开展了飞行实验的准备工作。但由于当时气候反常,未能实现预定目标。这是我国首次用自行设计研制的空间高能探测系统参加国际空间天文联合观测,虽然未能成功,但望远镜性能稳定、指标良好,受到各国同行的好评。

3.3 STAR 系列

在硬 X 射线能区,由于空间环境本底大,而天体发射的硬 X 射线到达地球附近的流强大多很弱,加上硬 X 射线穿透力强,且不能像可见光或软 X 射线那样进行聚焦和成像。因此,先进的硬 X 射线空间望远镜必须有良好的能量分辨率、高探测效率、大灵敏面积、低本底噪声、重量轻并易于实现位置灵敏。高压充气多丝正比室同时兼有上述优点,是很有发展前途的一种空间硬 X 射线探测器。为了在高空气球上进行硬 X 射线天文观测,高能所研制了以高压充气多丝正比室为基础的 STAR 系列。

1985 年,球载硬 X 射线谱仪 STAR-1 研制完成,采用逃逸门技术的高气压氙多丝正比室,可探测 $15\sim 200\text{ keV}$ 能区的硬 X 射线能谱,灵敏面积达 500

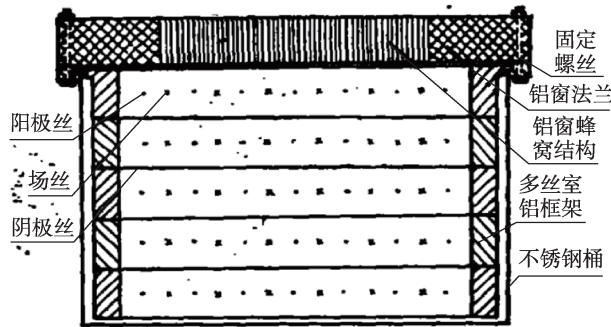


图10 高压充气多丝正比室结构示意图

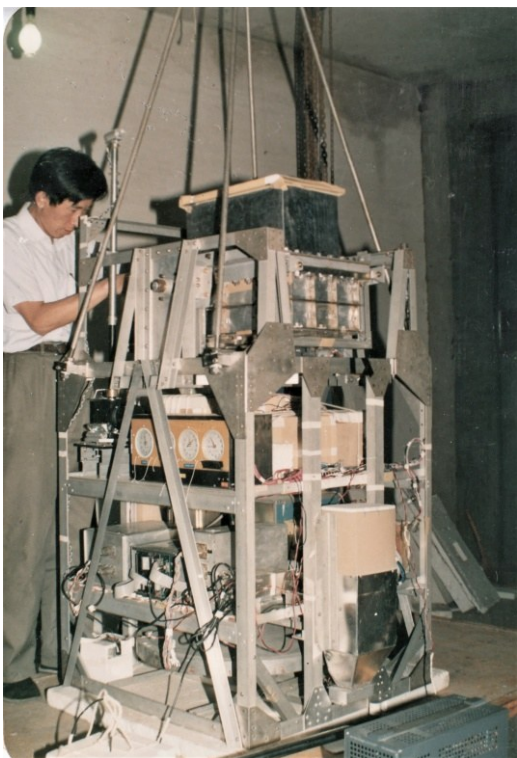


图11 STAR-1吊舱

平方厘米。

STAR-1 于 1987 年 8 月 31 日由 12 万立方米的高空气球载至 37 公里高空,进行了成功的观测,获得了大量有用的数据。从 1988 年到 1990 年,STAR-1 进行了一系列观测,观测了大气中子感生本底,天鹅座 X-1、天鹅座 X-3 的 X 射线谱,以及太阳耀斑,并测量了太阳 X 射线光谱。



图12 STAR-2吊舱

1989 年研制 STAR-2,其灵敏面积为 2775 平方厘米,能量分辨可达到 10%(60 keV),但因为后期项目调整,最终没有实现高空飞行。

3.4 HAPI-4 与慧眼号

HAPI-4 是世界上第一台同时使用气体探测器和闪烁晶体探测器的混合型硬 X 射线望远镜,结合充氙多丝正比室和复合晶体闪烁计数器(Phoswich)

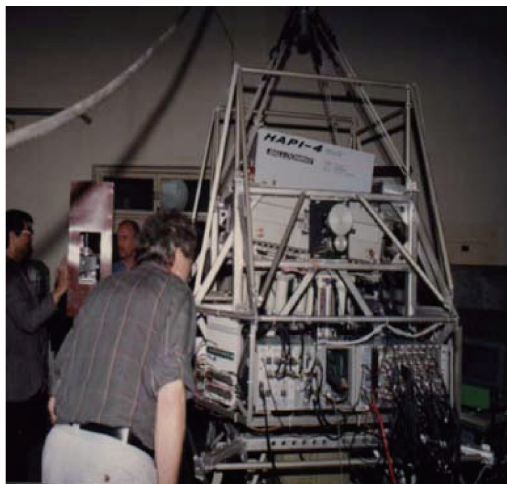


图13 球载X射线望远镜 HAPI-4

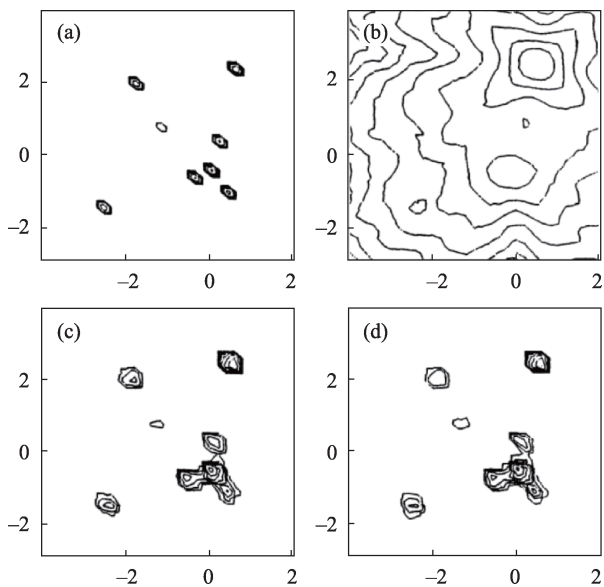


图 14 利用准直型望远镜扫描观测和直接解调成像方法进行高精度成像:(a)原始图像;(b)对准直型望远镜扫描观测数据的交叉相关分析结果;(c)直接解调成像的结果;(d)在本底变化的情况下直接解调成像的结果

的优点,将观测能区扩展至 400 keV。其探测器由高压充氙多丝正比室和 8 套的复合晶体(NaI(Tl)/CSI(Na))闪烁计数器上、下叠合而成,灵敏面积为 1600 平方厘米。HAPI-4 是当时国内最大的一架高能天文观测仪器,可用于研究宇宙高能天体的能谱、辐射的时间结构和硬 X 射线像,也可用于对太阳高能现象的观测研究。

20 世纪 80 年代初,李惕碚在分析欧洲伽马射线天文卫星 COS-B 的数据时,发现传统的伽马射线

成像方法——交叉相关分析方法存在缺陷,特别是所得结果的空间分辨率低。1988 年,李惕碚和吴枚认识到传统反演方法没有充分利用观测数据中的信息,而且当时流行的最大熵方法也有类似缺陷,因此对传统的最大熵方法进行了改进。经过几年的研究,1993 年 7 月,李惕碚、吴枚在《天体物理学报》上正式发表《高能天文中成像和解谱的直接方法》,文章对直接解调成像的原理、算法和模拟计算结果进行了全面的介绍。

1993 年,直接解调成像方法在球载飞行实验中得到验证。9 月 25 日,HAPI-4 搭载于 18 万立方米气球升至 36~38 km 的高空,对天鹅座天区进行扫描观测,获得了天鹅座 X-1 的硬 X 射线能谱,并利用直接解调成像方法在国际上首次成功地用非成像的准直型望远镜实现了高精度成像的空间观测。HAPI-4 使用了由李惕碚提出的直接解调成像方法,对天鹅座 X-1 的扫描观测结果表明,HAPI-4 的成像质量优于大型编码孔径成像望远镜。

当然仅一次实验还不能够令人信服,中国科学院高能所在 1993 年,1998 年,1999 年,2001 年一共进行了 4 次球载硬 X 射线调制望远镜 HAPI-4 的飞行试验,确认了这条技术路线的可行性。HAPI-4 成果验证了直接解调成像方法的有效性,成功促进 HXMT 进入空间科学先导计划,代号“慧眼”卫星。

(未完待续)

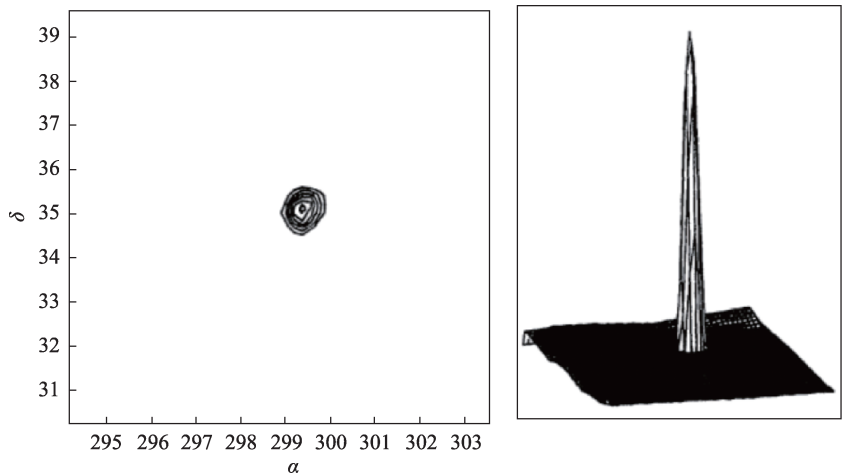


图 15 HAPI-4 扫描观测天鹅座天区获得天鹅座 X-1 的硬 X 射线像