

# 从球载实验到慧眼卫星

卢方军

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 1. 云南站起步

1954年,中国科学院近代物理研究所(后改为原子能研究所)在云南落雪山海拔3180米处建立我国第一个高山宇宙线实验站,安装了赵忠尧、王淦昌从美国带回的50 cm多板云室,建造了30 cm磁云室,进行奇异粒子、电磁级联以及高能正负电子对产生截面等方面的研究。1958年,在张文裕、肖健、力一领导下,在原落雪山实验站附近9 km处海拔3220 m的海子头山顶上开始建设新的高山宇宙线站(图1),实验设备由三个大型云室组成,上层为靶室,中层为磁云室,下层为多板室,设备总重近300吨,当时是世界上规模最大、水平最先进的同类装置之一,其物理目标是在加速器能量(几十GeV)之上进行高能物理研究。因为经历三年困难时期,大云室的建造花了7年时间,到1965年建成,后又因“文化大革命”,研究工作受到冲击。1972年,大云室探测到一个可能的重粒子事例(又称云南事



图1 位于云南东川海子头上的宇宙线观测站(图片来自于网络)

例),引起了物理界的强烈兴趣。大云室的建造和发现可能的重粒子事例获得了1978年全国科学大会重大成果奖<sup>①</sup>。

但是,人造加速器的能量不断提高,逐步成为高能物理研究的主要手段,利用宇宙线进行高能物理研究的重要性随之减弱。在云南站的科学实验艰难前行的时候,利用X射线和伽马射线观测进行高能天体物理研究,却在国际上蓬勃发展。1962年6月18日,美国麻省理工学院发射一枚火箭携带盖革计数器升到150千米的高空,偶然发现了天蝎座方向的X射线辐射。这是人类发现的第一个非太阳宇宙X射线源,标志着X射线天文学的诞生。1970年12月12日,美国天文卫星UHURU上天,探测到339个X射线天体。在整个20世纪70年代,国际上共发射了十多个高能天文卫星或高能探测器【<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>】,高能天文学迎来了一个大发现的时代!

在云南站建筑的外墙上,写着“头顶蓝天、脚踏云海;胸怀祖国、放眼世界”十六个大字,遥远望去非常醒目(图2)。这是当时在站的年轻科研人员陆柱国写上去的,恰是在新中国成长起来的年轻一代对国家科学发展倾心投入,并充满自信与憧憬的体现。20世纪70年代初,不满足于既有研究项目的他们开始考虑和规划宇宙线的新研究方向和发展途径。1972年,在中国科学院高能物理和高能加速器预制工作会议(香山会议)上,李惕碛作了“宇宙射线与天体物理”的报告,评述了对宇宙X射线、 $\gamma$ 射线、中微子和高能粒子进行天文观测的科学意义,建议在我国开展利用高能物理和核物理探测器



图2 隐约可见的云南站外墙上十六字标语“头顶蓝天、脚踏云海；胸怀祖国、放眼世界”(图片来自于网络)

进行对天体高能过程的空间观测<sup>②</sup>。

“文革”结束后,1977年,国家开始着手制订科学技术发展规划。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,参加人员主要来自高能所宇宙线研究室,还有其他研究室和所外有关单位的代表,以及有关领导,共40多人。会议在听取了“宇宙线若干问题简介”、“宇宙线天文学简介”和“宇宙线高能物理情况”三个报告之后,重点讨论了宇宙线科研长远规划设想并取得共识。按照规划,在宇宙线室成立天体物理大组,在近期发展高空科学气球进行宇宙线天体物理观测,同时力争在1985年之后发射专门的宇宙线天文卫星;成立宇宙线高能物理大组,以高山乳胶室、广延大气簇射阵列等为手段开展宇宙线高能物理研究;成立探测器大组,开展闪烁计数器、固体径迹探测

器、核乳胶、正比计数器以及相关的电子学技术研究;同时,培养一支理论队伍,结合实验开展理论研究和模拟计算<sup>③</sup>。

这次规划讨论会,对近几十年来我国宇宙线相关学科的发展,发挥了关键作用。这次讨论会也标志着,经过长时间的技术、理论和学科发展思想的积累,在新中国成立28年后,高能天体物理(当时称宇宙线天体物理)观测在中国正式起步。

## 2. 球载天文观测

按照高能所宇宙线科研发展规划,1977年,在时任高能所副所长何泽慧等的支持和李惕碛、顾逸东的具体组织领导下,宇宙线室天体物理组开始研制平流层高空气球和球载硬X射线望远镜。

1978年,我国第一次高空气球工作会议在高能所举行,同年,300立方米气球在河北香河进行发放试验(图3)。高能所同中科院大气物理所合作,在顾逸东领导下,经过几年的努力,在河北香河大气所观测站建成万立方米级高空科学气球技术系统,1985年获国家科技进步二等奖。

到20世纪90年代,已经研制并发放成功40万立方米的科学气球,最重载荷1.9吨。据统计,迄今我国共开展了200多次科学气球探测和技术实验,研究领域涵盖天文、空间物理、空间化学、大气物理、微重力、空间生物、遥感等。



(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(图片由顾逸东提供)

选择在硬X射线波段进行球载天文观测,则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,携带了高能天体及天体激变过程的重要信息。由于天体上高能物理过程的辐射谱为幂律谱,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。为此,高能所先后研制了复合晶体闪烁探测器 and 高压充氩多丝正比室构成的球载望远镜HAPI系列和STAR系列,开展了多次硬X射线天文观测。其中,在陆柱国、吴枚、顾逸东等的领导下进行的HAPI系列硬X射线望远镜的研制、发放和观测,是中国早期空间高能天文观测发展的一个缩影。

1980年,我国首台球载NaI(Tl)探测器(HAPI-0)及气球吊篮系统研制成功(图4)。



图4 HAPI-0吊篮在河北香河气球站联调通过后,装车准备运往发放现场(图片由张承模提供)

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<sup>2</sup>的CsI(Tl)/NaI(Tl)复合晶体探测器,观测能区20~200 keV,测量到了北京地区上空的X射线、伽马射线和宇宙线本底。

1984年5月,万立方米级高空科学气球系统建成,并搭载HAPI-1成功观测到蟹状星云脉冲星PSR B0531+21,得到了其自转周期和清晰的硬X射

线辐射脉冲轮廓,其中自转周期与射电数据的符合度好于0.1 μs<sup>④</sup>。HAPI-1观测蟹状星云脉冲星的成功,表明我国已具备探测高能天体快速时变现象的能力。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,观测黑洞候选体天鹅座X-1,获得了它的硬X射线能谱<sup>⑤</sup>。

1987年12月,硬X射线望远镜HAPI-3建成,它的主探测器是NaI(Tl)/CsI(Tl)复合晶体,探测面积314 cm<sup>2</sup>,探测能区30~400 keV,能量分辨率23%@60 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。此前,1987年2月,位于银河系邻近星系大麦哲伦云中的超新星1987A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。1988年初,在李惕碛、顾逸东带领下,高能所携带HAPI-3望远镜赴巴西对超新星1987A进行观测(图5),但由于当时气候反常及气球发放测控方面的问题,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<sup>⑥</sup>。

在研制复合晶体探测器 and 高压充氩多丝正比室的基础上,高能所陆柱国、王建中、李延国、沈培若等与德国图宾根大学天文研究所和苏联莫斯科工程物理学院的科学家合作,于1988年研制成功球载硬X射线望远镜HAPI-4。它包括上层的高压充氩多丝正比室探测器和下层的复合晶体闪烁探测器,探测面积1600 cm<sup>2</sup><sup>⑦</sup>。HAPI-4是迄今我国研制的最后一台球载X射线望远镜。

### 3. 直接解调成像方法

20世纪80年代初,李惕碛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



图5 HAPI-3在巴西参与SN1987A的国际联测(图片由张承模提供)

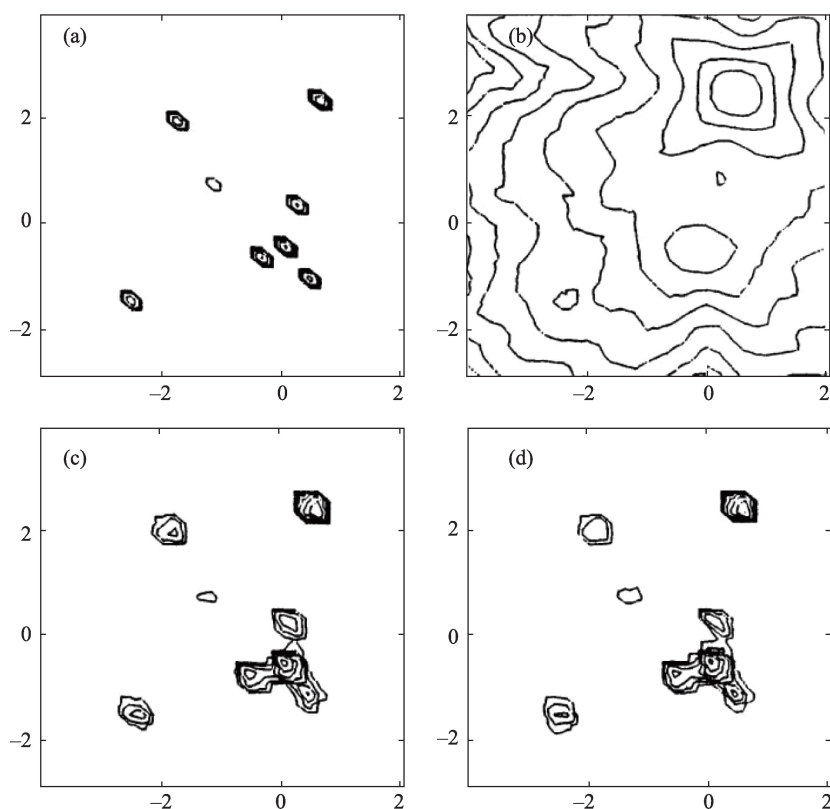


图6 利用准直型望远镜扫描观测和直接解调成像方法进行高精度成像:(a)原始图像;(b)对准直型望远镜扫描观测数据的交叉相关分析结果;(c)直接解调成像的结果;(d)在本底变化的情况下直接解调成像的结果(摘自Li & Wu, 1994)

所得结果的空间分辨率低。1988年,李惕碛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,并利用此方法分析COS-B数据得到了天鹅座X-3在150~5000 MeV的图像,发现该天体的伽马射线流强和2~12 keV的

X射线流强之间存在反相关<sup>⑥</sup>。1990年,李惕碛、吴枚进一步发表了利用迭代成像的方法处理COS-B数据得到的40~50 MeV能区银河伽马射线源的结果<sup>⑥</sup>。

经过几年的研究,1993年7月,李惕碛、吴枚在



图7 1993年9月,球载X射线望远镜HAPI-4发放现场(图片由张承模提供)

《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<sup>⑥</sup>。编辑部于1992年12月15日收到该文的修改稿,标志着直接解调方法在1992年正式建立。1994年,为了在国际上进一步介绍直接解调方法,李惕碛、吴枚在欧洲《天体物理与空间科学》(*Astrophysics and Space Sciences*)杂志上发表《Reconstruction of Objects by Direct Demodulation》,文中对使用准直型望远镜进行高精度扫描成像做了详细的研究(图6)<sup>⑥</sup>。

1993年,直接解调成像方法在球载飞行实验中得以验证。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(图7,图8)<sup>⑦</sup>。

随后,高能所的卢方军、张澍、陈勇、宋黎明和清华大学的冯骅、沈宗俊、周建锋、霍卓玺等将直接解调方法成功地应用于准直调制、旋转调制、编码孔径调制、康普顿望远镜、掠射望远镜等不同类型空间望远镜的数据处理,用国外卫星数据取得一系列成果,包括发现新天体和新现象,发表数十篇科学论文;首都师范大学张朋教授的团组实现了直接解调快速算法。经过十多年的努力,直接解调方法

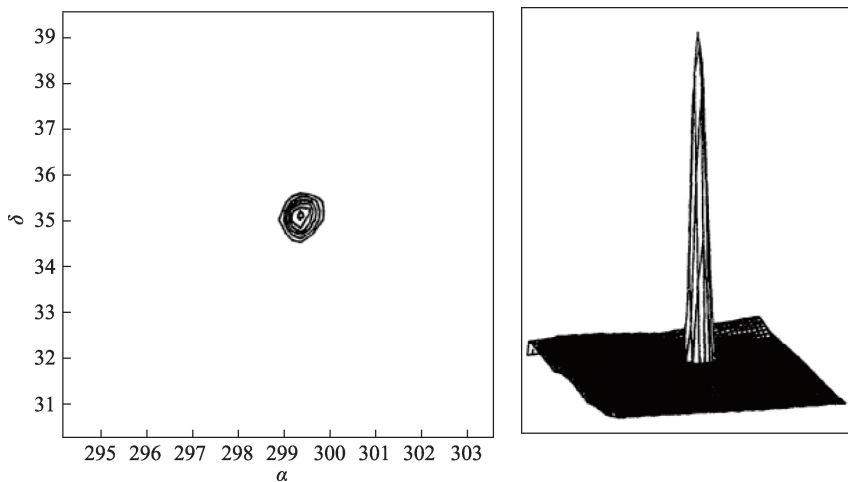


图8 HAPI-4扫描观测天鹅座天区获得天鹅座X-1的硬X射线像(摘自Lu et al. 1995)

逐渐被国内外学者接受。

#### 4. 硬 X 射线调制望远镜卫星的提出和预研

美国国家科学研究委员会在 1991 年的学科发展研究报告中指出,高能天体物理观测在 10~250 keV 能区存在一个严重的缺口,没有实现高灵敏巡天观测,而巡天应当是新的硬 X 射线项目的关键部分。从 20 世纪 90 年代起,实现空间硬 X 射线巡天成为美国空间高能天体物理的头号任务;但是,由于在解决硬 X 射线成像技术困难方面一直未能突破,而传统的编码孔径技术所需位置灵敏探测器技术复杂、系统庞大、造价昂贵,美国没有在 20 世纪内实现这一目标。

高能所开展球载空间高能天文观测所积累的技术基础和对成像方法的创新,使得中国有可能在这样一个关键的学科方向抓住机遇,实现跨越式发展。1993 年 3 月,李惕碫、吴枚、陆柱国等人提出“调制成像 $\gamma$ 射线望远镜”的概念<sup>⑧</sup>,建议用准直型望远镜和扫描观测,通过对观测数据进行直接解调成像获得 20~1000 keV 的高灵敏度的图像。1993 年夏天,中国天文学会和中国科学院数学学部向全国征集大型天文项目提案,李惕碫和北京天文台李启斌提出的“硬 X 射线调制望远镜”(Hard X-ray Modulation Telescope, 简称 HXMT)为收到的 15 份提案之一。当年 11 月, HXMT 被遴选进入后一轮评审,

并获得经费开展预先研究。按照当时的方案, HXMT 的有效载荷包括 5400 cm<sup>2</sup> 的 NaI(Tl)/CsI(Na) 复合晶体探测器、1120 cm<sup>2</sup> 的多丝正比计数器以及伽马射线暴监视器<sup>⑨</sup>。

1995 年 5 月,高能所陆柱国、航天总公司 501 设计部吴开林执笔,501 设计部刘兵和高能所王建中、林宝军、吴伯冰等参与,李惕碫审定,完成《空间高能 X 射线望远镜方案可行性论证报告》<sup>⑩</sup>。经过近一年的论证, HXMT 的载荷方案被简化,只保留 5400 cm<sup>2</sup> 的复合晶体探测器阵列,从而降低望远镜的重量和造价,进一步提高了项目的可行性。

2000 年,以硬 X 射线调制望远镜预研为主要内容的科技部 973 项目“天体高能辐射的空间观测与研究”立项,李惕碫担任首席科学家;2002 年中期评估之后,增加张双南任首席科学家助理。在 973 项目、中科院知识创新工程和清华大学 985 项目的支持下,中科院高能物理研究所和清华大学合作突破了 HXMT 卫星的关键技术并建成 HXMT 望远镜地面样机(图 9)。地面样机对放射源扫描成像的结果证明了用 HXMT 实现高分辨成像的可行性。在项目执行过程中,吴枚、庄人遴、尚仁成、王焕玉、姜鲁华、吴伯冰等先后担任过硬件系统的负责人;宋黎明任数据分析软件与数据库建设课题的负责人。

2001 年 1 月 10 日,高能所马宇蓓、王焕玉、张承模等研制的 X 射线探测器随“神舟二号”飞船升空,实现了我国在轨空间天文观测零的突破,观测到几



图 9 参与 HXMT 预研的部分科研人员在望远镜地面样机(左)搬迁之前合影

十例伽马射线暴和上百个太阳耀斑爆发等天文现象。“神舟二号”X射线探测器采用的探测技术和HXMT拟采用的复合晶体探测器相似,既验证了HXMT探测技术空间应用的可行性,也为HXMT有效载荷的研制培养了人才<sup>⑤</sup>。

2005年,在973项目结题之际,HXMT被国防科工委遴选为“十一五”民用航天空间科学卫星项目;10月,通过国防科工委评审,HXMT卫星进入背景型号研究阶段。2006年1月,在海南召开了HXMT国际学术讨论会,会上陈勇介绍了为HXMT卫星增加基于扫式电荷器件的低能X射线望远镜方案,英国科学家建议增加使用Si-PIN探测器的中能X射线望远镜。后来,与英国的合作未能实现,曹学蕾提出基于自研的Si-PIN探测器来建造中能X射线望远镜。这样,在进行闪烁晶体探测器工程化的同时,高能所开始进行低能X射线望远镜和中能X射线望远镜的预研工作。

几经周折,2011年3月,国家国防科技工业局和财政部联合下达关于HXMT卫星工程立项的批复,要求用40个月左右完成HXMT卫星的研制。在提出18年,经过多轮论证和长时间预研之后,HXMT卫星正式进入工程研制。

18年间,欧洲的INTEGRAL卫星、美国的SWIFT卫星和NuSTAR卫星等硬X射线天文卫星上天或立项,HXMT原计划实现国际第一次高灵敏度硬X射线成像巡天的科学目标已经被欧美卫星抢先实现。但是,HXMT也从原来只有高能X射线望远镜演化为拥有高、中、低能X射线望远镜,宽波段、大面积、高时间分辨率和能量分辨率,既能进行大天区扫描观测又可以对重要天体进行高精度定点观测的空间X射线天文台。

## 5. 一路坎坷的工程研制

2011年中,HXMT卫星工程各大系统人员队伍到位,其中,马兴瑞担任卫星工程总指挥,李惕碛担任卫星工程首席科学家,马世俊和顾逸东分别担任卫

星工程总设计师和副总设计师,张双南担任首席科学家助理,潘腾担任卫星系统总指挥兼总设计师,王焕玉担任地面应用系统总指挥,孟新担任地面应用系统总设计师。为了加强有效载荷的研制力量,在 高能所已有的人员队伍基础之上,从清华大学引进了刘聪展担任高能X射线望远镜分系统主任设计师。

HXMT卫星采用成熟的“资源二号”卫星平台,有效载荷成为决定卫星研制进程的主要因素。由于有较长时间的预研基础,在进入工程之初,有效载荷的研制相对顺利。2011年12月1日,卫星有效载荷分系统通过航天五院组织的转初样评审;12月24日,卫星系统完成转初样评审。

经过一年的努力,2012年底,卫星有效载荷完成初样电性件(见图10)研制、验收并交付卫星总体,参加整星电性星测试;同时,结构热控件和准鉴定件参加整星热平衡试验。2013年3月,完成鉴定件详细设计和投产;12月,基本完成鉴定件研制,开始环境模拟试验。同时,考虑到卫星系统的整体进度及其他相关分系统工作的需要,12月16日,在环境模拟试验尚未做完的情况下,完成转正样评审。

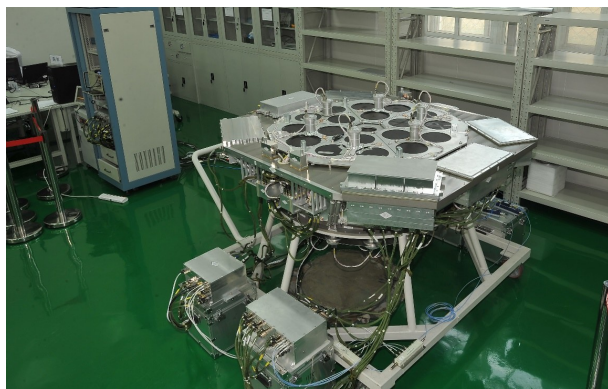


图10 HXMT卫星有效载荷电性件

但是,在鉴定件试验的过程中,一系列技术和质量问题开始出现。在整个初样阶段,共发生技术归零的质量问题25个,其中18个发生在2014年。这些问题的出现,既反映了研制队伍对相关技术的认识不够深入和准确,也说明国内的工艺和材料水平与国际先进水平相比仍有较大差距。在有效载荷副总设计师徐玉朋的具体组织和技术领导下,用一年

多的时间解决了这些质量问题;2015年3月,完成有效载荷正样技术状态再确认,全面启动正样件生产。

2015年10月起,陆续完成有效载荷单机研制、试验和标定,分批交付;2016年5月初,完成所有单机研制、软件落焊等工作,全部产品交付卫星总体,参加整星试验(图11)。2016年8月9日,完成有效载荷正样出厂评审。从2011年3月工程立项到正样交付,有效载荷共用了近5年半的时间,比最初计划延后2年。

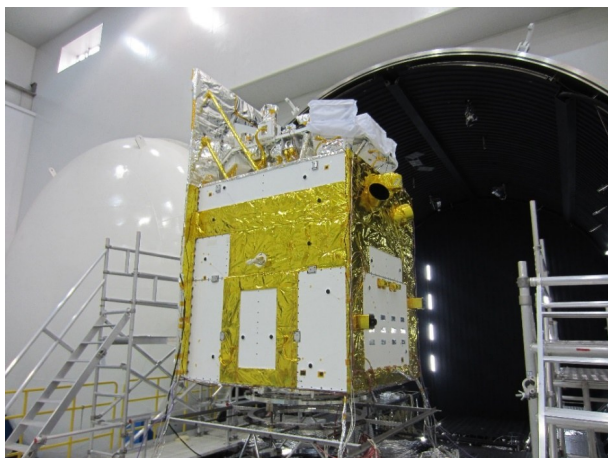


图11 HXMT卫星正样星即将开始热真空试验,有效载荷位于卫星的顶部

2016年9月1日,HXMT卫星系统通过航天五院组织的出厂评审,计划在当年11月底前使用长征四号乙运载火箭发射。但是,就在9月1日凌晨,一枚长征四号丙型运载火箭发射失利,这是和长征四号乙同系列的火箭。出于安全性方面的考虑,HXMT卫星的发射再次延后,以对火箭相关技术和单机设备的可靠性进行再验证。在经过多方论证和试验验证之后,2017年4月底,卫星运抵酒泉卫星发射基地。

2017年6月15日上午11点整,HXMT卫星搭载长征四号乙运载火箭顺利升空(图12),上天后,被正式命名为“慧眼”卫星。中国的X射线望远镜终于冲出大气,望向那狂暴高能的星空。

这一天,距离1977年宇宙线规划讨论会提出要建造专门的宇宙线天文卫星整整40年;距离HXMT卫星项目提出,也已经24年。



图12 2017年6月15日上午11点,HXMT卫星在酒泉卫星发射中心成功发射

## 参考文献

- ① 马宇蓓、况浩怀,我国宇宙线物理研究六十年,物理,2013,42,23
- ② 李惕碛,宇宙射线与天体物理,科学通报,1973,18,97
- ③ 宇宙线规划讨论会,1977,(高能所电子档案编号:A006-00185)
- ④ 戴长江、吴枚、马宇蓓、陆柱国等,空间硬X射线望远镜HAPI-1及其低蟹状星云脉冲星的观测,天体物理学报,1987,7,140
- ⑤ 马宇蓓、李光华、张承模、钱跃民等,天鹅座X-1硬X射线的能量谱,天体物理学报,1989,9,289
- ⑥ 胡文瑞等著,中国空间科学进展(文集),国防工业出版社,1995,P41-49
- ⑦ Zhuguo Lu(陆柱国)、Jianzhong Wang(王建中)、Yanguo Li(李延国)、Peiruo Shen(沈培若) et al., Hard X-ray Imaging with a slat collimated telescope, Nuclear Instruments & Methods in Physical Research A, 1995, 362, 551
- ⑧ Li, T.P.(李惕碛) & Wu, M.(吴枚), Gamma-Ray Emission in MeV--GeV Region from Cygnus X-3, ApJ, 1989, 346, 391
- ⑨ 李惕碛、吴枚,40-50MeV能区的银河 $\gamma$ 射线源,天文学报,1990,31卷,第4期,390
- ⑩ 李惕碛、吴枚,高能天文中成像和解谱的直接方法,天体物理学报,1993,13,215
- ⑪ Li, Tipei & Wu, Mei, Reconstruction of objects by direct demodulation, Ap&SS, 1994, 215, 213
- ⑫ 李惕碛、吴枚、陆柱国、王建中等,调制成像 $\gamma$ 射线望远镜,天文学报,1994,35,105
- ⑬ 李惕碛、李启斌,空间高能X射线调制望远镜(HXMT),“中国天文学九十年代大型科学项目”建议书,1994.5
- ⑭ 陆柱国、吴开林等,空间高能X射线调制望远镜方案可行性论证报告,1995.5
- ⑮ 王焕玉、马宇蓓、张承模、徐玉朋等,神舟2号飞船空间X射线探测器,第九届全国宇宙线和高能天体物理学术会议文集,2002,P65-74