

高能所空间探测技术发展历程

李新乔 马宇蓓 宋黎明

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、我国空间X射线天文的先行者——神舟二号X射线探测器

自20世纪六七十年代起,经历了十余年的高空科学气球研制和球载X射线天文观测实验,我国的X射线天文探测技术和科学研究得到了一定的积累和发展。到了八十年代,我国学者利用自主研发的球载X射线探测设备对蟹状星云、天鹅座X-1等天体开展了卓有成效的观测,取得了宝贵的一手数据。

1992年9月21日,中国政府批准实施中国载人航天工程,代号“921工程”。载人航天工程为我国开展空间X射线天文观测提供了契机。中国科学院高能物理研究所和紫金山天文台合作提出并自主研制“太阳和宇宙天体高能辐射监测仪”,包括超软X射线、X射线和 γ 射线等3种探测器,这是我国的第一个空间天文探测项目。

在该项目中,中国科学院高能物理研究所负责承担X射线探测器的研制任务,该探测器安装于神舟二号留轨舱,用于开展伽马射线暴和太阳X射线耀斑观测。项目立项后,高能所方面,马宇蓓担任主任设计师,王焕玉担任副主任设计师。此外,项目团队还有张承模、沈培若、徐玉朋、汪锦州和几名研究生,图1为项目组合影。

神舟二号X射线探测器包括两个探头(图2)和一个电子学机箱,采用了碘化钠晶体匹配光电倍增管技术,碳纤维作为入射窗。当时,我国空间科学



图1 神舟二号X射线探测器项目组主要成员,左起:马宇蓓,张俊逸,徐玉朋,沈培若,王焕玉,张承模



图2 神舟二号X射线探测器正样件

探测技术的基础较为薄弱,可用的软硬件资源不足,对元器件的空间环境效应了解较少,尤其是适用于航天的许多标准尚未建立,这为该项目的开展带来了巨大挑战。从原理设计到关键技术攻关,再到探测器的工程化研制,项目组以坚忍不拔的毅力

不断地解决过程中的各种问题。从项目启动到2001年1月10日发射入轨,这个项目经历了近九年时间。神舟二号X射线探测器研制过程中所经历的困难,是经过了三十年空间探测技术发展后的今天难以想象的!

在神舟二号返回舱与留轨舱分离并返回地面后,X射线探测器随着留轨舱继续在轨运行,开展天文探测。2001年正值太阳活动峰年,该探测器在轨运行165天,取得了丰硕成果:共探测到三十多个伽马暴和上百个太阳耀斑,其中包括三个X级耀斑和地面高能粒子增强事件。神舟二号X射线探测器也因此获得了多个奖项,例如,获2004年度国家科技进步二等奖。这些成果见证了该探测器的卓越性能,也打开了我国开展空间天文探测的大门。

神舟二号X射线探测器为我国后续空间探测任务积累了宝贵经验,也储备了技术人才。比如,王焕玉担任了“慧眼”卫星有效载荷总指挥兼地面应用系统总指挥、“嫦娥一号”“嫦娥二号”“嫦娥三号”X射线探测仪器主任设计师、“悟空”卫星硅微条探测器项目负责人、“张衡一号”卫星高能粒子探测器指挥等。徐玉朋担任了“慧眼”卫星有效载荷副总师、增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)载荷总师。李新乔担任了“张衡一号”卫星高能粒子探测器主任设计师、“怀柔一号”卫星副总师兼有效载荷总师、中国空间站高能宇宙辐射探测设施(HERD)载荷副总师、空间新技术试验卫星(SY-01)高能爆发探索者(HEBS)项目负责人、DRO轨道卫星伽马射线暂现源监测器(GTM)项目负责人等。

二、望穿星尘的东方智慧之眼——“慧眼”卫星

“慧眼”卫星名字是为了纪念我国著名的核物理学家何泽慧先生(图3),何先生也是我国高能天体物理发展的早期主要推动人之一。1973年,中科院高能物理研究所成立后,何泽慧担任副所长,积



图3 著名核物理学家何泽慧(1914—2011)

极推动宇宙线超高能物理和高能天体物理研究的开展。1980年,何泽慧当选为中科院数学物理学学部委员(院士)。

“慧眼”卫星的学名是“硬X射线调制望远镜”卫星(图4),该卫星是我国第一颗X射线天文卫星,于2017年6月15日发射入轨,在轨运行期间,取得了一大批具有国际影响力的重要成果。回顾“慧眼”卫星的立项和研制历程,却是充满曲折和艰辛的——她经历了几代人的开疆破土般的努力,凝聚了上百名科技工作者的心血,她是中国天文学史上—首瑰丽的诗篇。

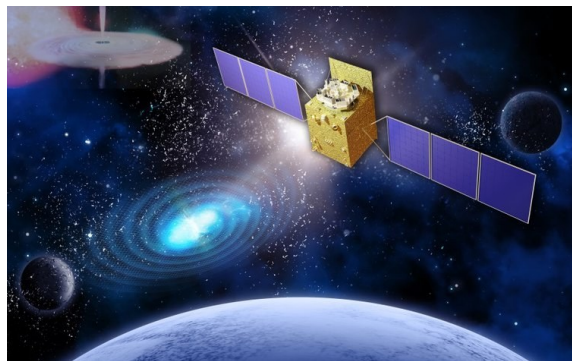


图4 慧眼卫星在轨运行艺术想象图

“慧眼”卫星项目的提出的理论基础是1988年李惕碛和吴枚提出的直接解调方法,也被称为“李-吴方法”(1993年7月在《天体物理学报》上正式发表)。“李-吴方法”有效解决了天文数据处理中普遍存在的观测数据信息利用不充分的问题。1993年秋,直接解调成像方法在我国球载飞行实验HAPI-4得到成功验证,这是国际上首次成功利用非成像的准直探测器实现了对高能天体的高精度成像。此

后,该方法多次在国外卫星数据处理中得到应用,取得了一系列成果。

1993年3月,高能所李惕碛、吴枚、陆柱国等人基于“李-吴方法”提出了“调制成像 γ 射线望远镜”(HXMT)的概念,利用直接解调成像方法和准直型望远镜的扫描观测实现20keV至1MeV光子能区的高灵敏度成像。同年,李惕碛和北京天文台李启斌向中国天文学会和中国科学院数学学部提交“硬X射线调制望远镜”提案,探测器包括:NaI(Tl)/CsI(Na)复合晶体探测器、多丝正比计数器和伽马暴监视器,并获得经费开展预先研究。之后对望远镜方案进行不断完善。

2000年,科技部973项目“天体高能辐射的空间探测研究”立项,李惕碛担任首席科学家。中国科学院高能物理研究所联合清华大学,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,开展以5400 cm²的复合晶体探测阵列为主要配置的硬X射线调制望远镜的预先研究,突破了卫星的关键技术并建立了地面样机。在2005年,973项目顺利结题,HXMT被国防科工委遴选为“十一五”民用航天科学卫星项目,开始背景型号研究。背景型号研制过程中,先后在陈勇和曹学蕾的建议下分别增加了基于扫式电荷器件的低能X射线望远镜和使用Si-PIN探测器建造的中能X射线望远镜。

在2011年3月,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,卫星研制周期40个月。至此,距离项目提出已过去了整整18年。工程一上马,立即组织和落实了卫星研制团队。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。卢方军担任卫星系统副总设计师兼有效载荷总设计师,徐玉朋担任有效载荷副总设计师。宋黎明担任地面应用系统副总设计师。为了保障卫星有效载荷研制顺利开展,高能所成立了

HXMT卫星项目办,张帆任项目办主任兼总调度。有效载荷的三个主要望远镜分系统的主任设计师分别由刘聪展、曹学蕾和陈勇担任。部分工程两总合影如图5。



图5 HXMT卫星工程部分两总成员合影,左起:尤睿、潘腾、王焕玉、李惕碛、顾逸东、卢方军

HXMT卫星工程是高能所主导的第一个大型天文卫星工程。虽然前期经过载人航天工程、“探月”工程中科学载荷研制积累了一定经验,但从体量上还是技术难度上,HXMT的有效载荷较之于之前的航天项目都有大幅增加。在HXMT卫星工程立项的同时,卢方军代表高能所向国防科工局申请了条件保障项目,并获得批复。条保项目的建设,在测试条件、试验条件、标定条件、存储和装配条件等方面有力保障了HXMT卫星有效载荷研制的顺利开展(图6)。这里需要特别提一下的是:在HXMT卫星条件保障项目的支持下,高能所设计建设了一条位于玉泉路园区北京正负电子对撞机直线加速器西侧的百米长的X射线标定装置。该装



图6 在“慧眼”卫星发射前研制团队与卫星合影

置于2016年开始运行,是国际三大X射线地面标定装置之一。

有了研制队伍和研制条件,HXMT卫星有效载荷工作得以有序开展。此外,行之有效的质量管理和保障体系是大型航天卫星工程顺利实施的关键。高能所的许多空间项目管理体系都是在HXMT卫星项目研制期间建立起来的。在HXMT卫星有效载荷研制团队的努力下,完成了国际最大有效面积的闪烁晶体探测器阵列研制、易潮解闪烁晶体封装关键技术、长寿命低活度镶嵌源制备、完全自主研制Si-PIN探测器、国际上最大的X射线CCD阵列、自主研制成功了百纳米厚度的透软X射线遮光膜等多项技术突破。此外,高能所还建成支撑X射线天文卫星在轨运行和科学数据处理的地面应用系统,团队合影见图7。该系统不仅为慧眼卫星的在轨长期稳定运行提供了保障,还成为了后续空间型号任务科学应用和在轨运行工作开展的基础。



图7 中科院高能所地面应用系统团队合影,前排左起:张娟,李小波,关菊,宋黎明,贾淑梅,马想,黄跃;后排左起:王进,聂建胤,师昊礼,李兵,李承奎,郑世界,王平,庾攸隶,赵海升

通过承担HXMT卫星有效载荷研制任务,不断地遇到和解决各种技术问题,在一线工作中积累了丰富经验,锻炼出一支勇于担当、甘于奉献的高素质队伍。慧眼卫星参研人员大多已成为空间项目技术负责人或骨干。“慧眼”卫星的相关技术也被广泛地应用于GECAM、SVOM、EP和eXTP等X射线天文卫星工程中。

2017年6月15日,伴随着震耳欲聋的火箭发动机轰鸣声,长征四号乙运载火箭携带着“慧眼”卫

星从酒泉卫星发射中心飞入苍穹(图8为慧眼卫星发射现场照片)。这颗承载了几代高能天文人梦想的我国第一颗X射线空间天文卫星开启了她翱翔宇宙,探索未知之旅。“慧眼”卫星的升空极大地带动了我国X射线天文学的发展,提高了我国空间高能天文研究的国际地位和影响力。加州理工学院、意大利费拉拉大学和德国图宾根大学等的团组都高度评价“慧眼”数据的重要科学价值。“慧眼”正如其名一样,洞穿宇宙极端物理的奥秘,成为国际上一个重要的天体物理研究平台。



图8 2017年6月15日,慧眼卫星在酒泉卫星发射中心发射

“慧眼”卫星发射及其科学成果分别被评为2017、2020年度中国十大天文科技进展。“‘慧眼’直接测量到迄今宇宙最强磁场”被评为2020年度中科院12项亮点科学成果之一。“慧眼空间天文望远镜研究集体”荣获2021年度中国科学院杰出科技成就集体奖。

三、九天揽皓月,琼宫遇仙子——“嫦娥”卫星

“嫦娥”系列卫星是我国航天史上的重要成员,是我国走向深空的重要一步。在“嫦娥”一号、二号、三号卫星上,均搭载了由高能所研制的用于探测X射线的科学载荷,它们分别是:嫦娥一号、嫦娥二号X射线谱仪和嫦娥三号粒子激发X射线谱仪。说起这一系列X射线探测载荷,我们要从它们的提出者王焕玉说起。

前文已谈到,2001年1月10日神舟二号X射

线探测器随飞船入轨,在轨运行近半年时间,取得了丰硕成果,也开启了我国空间X射线天文探测的大门。项目取得成功后,曾担任该项目副主任设计师的王焕玉陷入思考。他当时已担任高能所党委副书记(主持工作)兼副所长,分管粒子天体物理中心。当时HXMT已经酝酿和推动了近10年,正在开展预研工作。神舟二号X射线探测器项目无疑为后续的空间X射线探测项目积累了经验,打下了基础,也培养了人才。而如果没有持续的空间项目开展,好不容易培养出的人才和积累的宝贵经验就有可能出现断层。这无论是对HXMT还是今后的其他空间探测项目,都是非常不利的。

就在王焕玉一筹莫展之际,探月工程提上立项日程。听到这个消息后,王焕玉认为这给X射线天文探测提供了一个非常好的契机。2003年3月1日,中国探月工程启动。在王焕玉的努力下,X射线谱仪成为嫦娥一号卫星上的科学载荷,由X射线探测阵列、太阳监测器和电控箱组成(图9)。其主要科学目标是探测月表元素受太阳X射线或宇宙射线激发产生的X射线,通过数据处理获得月表主要元素的含量和分布,为月球的开发利用提供有关资源分布的数据,为深入研究月球的组成、月球地质演化和热历史提供相关资料。

王焕玉担任X射线谱仪项目负责人和主任设计师,项目组成员还有张承模、杨家卫、梁晓华、曹学蕾、汪锦州、高旻、崔兴柱、彭文溪和刘雅清,团队

合影见图10。嫦娥一号卫星X射线谱仪是我国首例深空X射线探测设备,在研制进程中遇到不少困难。X射线谱仪X射线探测器综合设计指标要求达到国际同类设备领先水平,研制难度很大,而且,其信号微弱,易受到外界环境干扰,特别是温度的影响。由于其探测器入射窗是暴露在卫星外,月球表面的昼夜周期极限温度变化非常大,温度环境对探测器性能有影响;另外探测器采用的硅半导体阵列,前端遮光膜厚度仅 $12\mu\text{m}$,探测信号弱和承受外力的能力差等不利因素都给设计、研制、温控,特别是工艺设计等方面带来不少困难。

航天工程中有句话叫“航天无小事”,任何一个小的细节都可能带来灾难性的后果。虽然在承担嫦娥一号项目之前,项目组部分成员参加过“921工程”项目,但X射线谱仪所用探测技术主要基于半导体探测器,与“921工程”项目中所用的碘化钠晶体探测技术不同,探测器信号、环境适应性、设计思路等完全不一样。因此,可借鉴的经验较为有限。此外,相关技术又面临国外的技术封锁,进一步加大了研制难度。项目组经过了短短四年时间,就从无到有,从有到强,实现了技术突破和领先,其中经历的艰难困苦不言而喻。

其后,嫦娥二号X射线谱仪沿用了嫦娥一号的技术。嫦娥三号则又一次取得了技术突破,项目组进一步研制了粒子激发X射线谱仪(图11),它由中国科学院高能物理研究所负责、紫金山天文台参与



图9 嫦娥一号卫星X射线谱仪正样单机

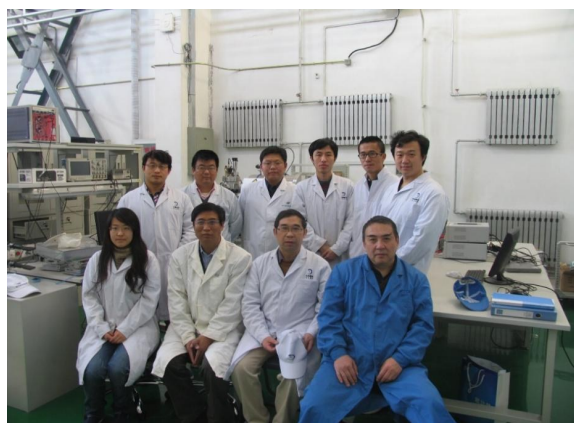


图10 嫦娥一号~三号卫星X射线探测设备研制团队,前排左起:刘雅清,王焕玉,张承模,杨家卫;后排左起:梁晓华,汪锦州,曹学蕾,彭文溪,崔兴柱,高旻



图11 嫦娥三号玉兔号月球车上的粒子激发X射线谱仪

合作研制。这台探测器是玉兔月球车机械臂上唯一一台科学载荷,面临着更为严苛的工作温度环境,月球表面温度可达 $-180^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 范围,需要通过热设计使探头能够工作在 $\pm 35^{\circ}\text{C}$ 之间的安全工作温度范围内。此外,探头前端还镶嵌了用于激发月球岩石元素的放射源,其带来的整个研制过程中的安全性问题需要格外关注。探测器工作时,需要利用机械臂将探头抵近岩石,距离过近时,一般的测距设备已无法满足要求。为此,项目组还专门研发了一套新的测距系统,这套测距系统在月球岩石成分探测的过程中发挥了重要作用。

利用嫦娥三号粒子激发X射线谱仪,高能所先后与中科院国家天文台、中科院地质与地球物理研究所、美国诺特丹大学、南京大学、山东大学等单位

合作,在着陆区发现了一种新型的月海玄武岩。

嫦娥系列卫星X射线探测器在技术上和科学上均取得了丰硕成绩,也荣获了多个奖项。2008年,王焕玉获“中国首次探月工程圆满成功突出贡献”银质奖章,2009年获国家科技进步特等奖,2010年获北京市科技进步二等奖,2011年,王焕玉获全国五一劳动奖章。

四、徜徉在浩瀚的粒子之海——“悟空”卫星

“悟空”卫星的全称是暗物质粒子探测卫星(图12),由中国科学院紫金山天文台常进提出,中国科学院空间科学战略性先导科技专项支持,是其中首批立项研制的4颗科学实验卫星之一。“悟空”卫星的科学目标是开展高能电子及高能伽马射线探测任务,探寻暗物质存在的证据,研究暗物质特性与空间分布规律。

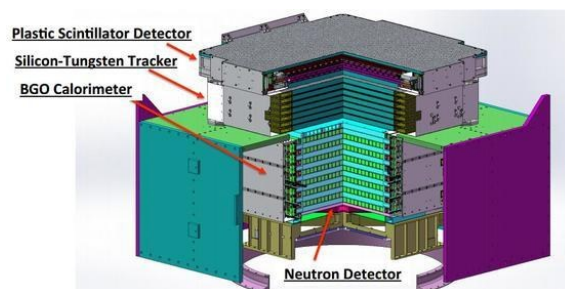


图12 悟空卫星有效载荷构成

暗物质粒子探测卫星2011年底立项,中国科学院紫金山天文台为卫星首席科学家单位,中国科学院国家空间科学中心为卫星的工程总体单位,中国科学院微小卫星创新研究院为卫星的总体研制单位。暗物质粒子探测卫星的科学载荷包括:塑料闪烁探测器、硅阵列探测器、电磁量能器和中子探测器等四种仪器。其中,高能所联合瑞士日内瓦大学负责硅阵列探测器的设计和研制。硅阵列探测器的主要功能是测量入射宇宙线粒子的方向和电荷。硅阵列探测器由6层硅微条探测器上下层叠排列而成。共73728路硅微条,每个条宽 $192\mu\text{m}$ 。其

电子学通道数高于此前高能所研制的其他空间科学设备。高能所的研制队伍延续了嫦娥系列卫星X射线探测器研制团队,由王焕玉担任项目指挥,主任设计师由彭文溪担任,副主任设计师由张飞、樊瑞睿担任,其他成员包括:龚轲、吴帝、董亦凡、乔锐、高旻、汪锦州、张家宇、代光琦,部分团队成员合影见图13。

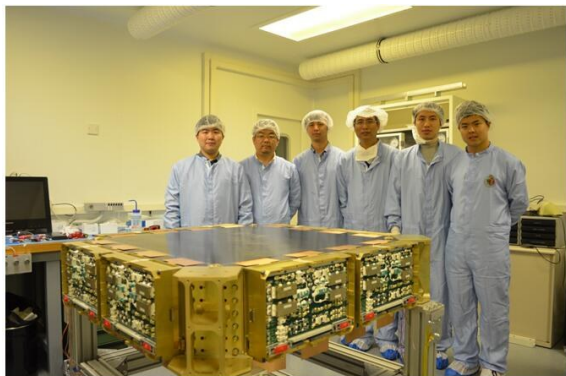


图13 部分悟空卫星硅阵列探测器载荷成员与探测器合影,左起:张飞,汪锦州,龚轲,王焕玉,彭文溪,吴帝

硅阵列探测器研制项目带来的挑战除了技术层面的,还涉及国际合作。在国际合作工作开展当中,国外合作者和同行被中国团队“严谨细实”的工作作风,勤劳认真的航天精神所深深折服。已故项目负责人王焕玉曾给笔者讲过一个他带领项目组前往欧洲做试验期间的轶事:在热实施图纸不全,实施工具现从外方借的情况下,王焕玉带领中方项目团队连续工作,仅用了一晚就完成了国外专家认为至少需要一周的热实施工作。笔者深受感染并以之为榜样,在笔者负责的航天项目当中,也延续了拼搏务实,严肃认真的宝贵精神。

2015年12月17日,悟空卫星搭乘长征二号丁运载火箭在酒泉卫星发射中心发射入轨。在轨运行以来,性能稳定,状态良好。其取得的重要的发现性成果当中,硅阵列探测器发挥了重要作用。

五、雷声震,天地合,皆有踪——“张衡”卫星

“地震预测是一个世界性难题”是笔者参与“张



图14 张衡一号卫星在轨运行艺术想象图

衡一号”卫星(图14)工程期间听得很频繁的一句话。“地震在地面都测不准,为何从天上测?”这个问题也是被问得最多的。笔者也是带着这些疑问参加到这个项目当中的。

我国是一个地震多发国家,卫星预报地震的研究和应用最早可追溯到上世纪九十年代末期。2003年,中国地震局地震预测研究所申旭辉联合中国地震局地球物理研究所许绍燮等人提议通过研制我国自己的电磁卫星,开展天基地震异常信号观测研究。2004年,中科院高能所张吉龙等人在研究西藏羊八井宇宙线观测站地面中子数据时发现,在西藏青海交界处一次地震前几天,其附近的地面中子信号出现显著增强,该现象与近年来国际上关于地震前空间粒子事件显著增多的统计分析结果有相似之处,引起了地震局专家的关注。这件事是高能所加入中国电磁卫星计划的开端。高能所王焕玉、卢红等人开始组织力量开展电磁卫星高能粒子探测器的关键技术研究。

2007年6月,王焕玉领导的“863计划”项目“基于地震电磁卫星高能粒子探测器原理性样机的研制”立项,开始了探测器的关键技术攻关和原理样机研制。2009年,中国地震局与意大利国家核物理研究院、中国国家航天局与意大利空间局分别签署了电磁监测试验卫星的合作意向与协议。初步明确了电磁监测试验卫星高能粒子探测器由中科院

高能所和意大利国家核物理研究院 INFN 研制。其中,高能所研制低能段粒子探测器和太阳 X 射线监测器,INFN 研制高能段粒子探测器。2011 年,由于经济等原因,INFN 退出高能粒子探测器研制。中国地震局和国防科工局启动高能段粒子探测器国产化研制,最终确定由高能所承担研制任务,研制方案也由 INFN 提出的磁谱仪方案改为高能所提出的量能器方案。高能所项目组先后还得到了中国科学院科研装备研制项目、高能所创新课题支持。

2013 年,电磁监测试验卫星批复立项。在立项之前,高能粒子探测器关键技术见底。中科院高能所承担高能段粒子探测器、低能段粒子探测器和太阳 X 射线监测器等三台科学仪器。项目团队正式组建,王焕玉担任指挥,卢红担任副指挥,李新乔担任主任设计师,安正华担任高能段粒子探测器主管设计师,徐岩冰担任低能段粒子探测器主管设计师,梁晓华担任太阳 X 射线监测器主管设计师,马宇蓓和孟祥承任项目顾问。项目组成员还包括石峰、王平、文向阳、张永杰、蒋文奇、王辉、赵小芸、于晓霞、张大力、汪锦州、高旻、沈力、张杰、赵琳、韩玲以及十余名研究生,载荷研制项目组成员合影如图 15。

高能粒子探测器(图 16)之前,我国的辐射带粒子探测技术还停留在八九十年代的水平,高能所也

是第一次承研综合技术指标要求达到国际领先水平的辐射带粒子探测器。高能粒子探测器用到了三种硅半导体探测器、两种晶体探测器及反符合探测器,针对电子学通道多的特点采用了 ASIC 技术进行信号读出和处理。此外,还结合空间粒子成分复杂、通量分布跨越五个量级以上、地震电磁扰动引起的空间粒子变化微弱等特点,实现了宽能区粒子鉴别,设计了组合视场,优化了信号快速处理速度。除了技术上充满挑战性,还面临经费紧张、研制周期短等问题。尤其是高能段粒子探测器,起步比卫星其他载荷晚了好几年。在项目立项伊始,项目组就面临了来自卫星工程各级主管机关、卫星总体的巨大压力。工程研制节点被频繁督促。在抓进度、保质量的同时,为了节约经费,小到每一个元器件的购买都需要精打细算。航天项目工程化经验的缺乏也为项目推进带来了不小的阻力,在工程化外协单位山东航天电子技术研究所(513 所)的紧密配合下,项目组按期完成了各阶段的研制工作。

2018 年 2 月 2 日,张衡一号卫星在酒泉卫星发射中心由长征二号丁运载火箭发射入轨。入轨后,开展了为期半年的在轨测试,高能粒子探测器各项性能指标均达到或优于设计指标要求。同年 5 月 12 日的汶川地震十周年纪念会上,高能粒子探测器的探测结果作为电磁卫星两个亮点结果之一展



图 15 张衡一号卫星高能粒子探测器研制项目组,前排左起:杨丹,伍红平,谷诗萌,杨婉,王飘飘,王平,赵小芸;中排左起:高旻,卢红,王辉,王焕玉,马宇蓓,赵琳,李新乔,石峰,张杰;后排左起:李昆,文向阳,安正华,徐岩冰,王平,张永杰,梁晓华,张大力,于晓霞

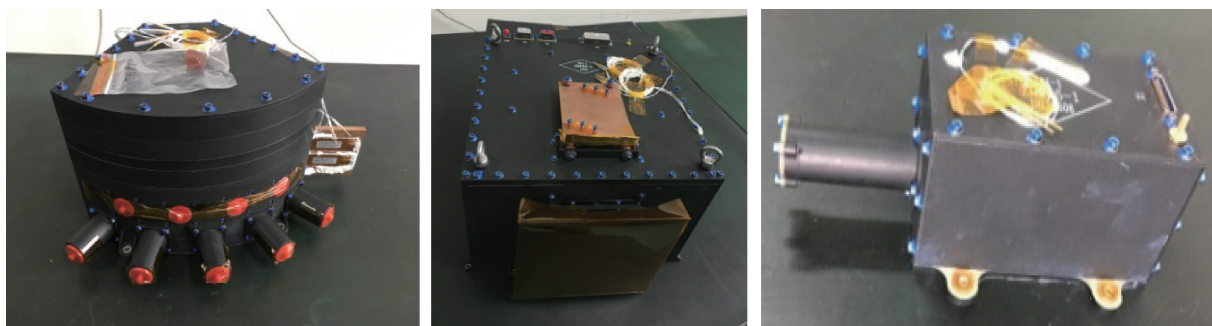


图16 张衡一号卫星高能粒子探测器正样探头,从左至右依次为:低能段探头、高能段探头、太阳X射线探头

示。在轨运行期间,高能粒子探测器数据分析结果在GRL、JRG等刊物上发表了一系列具有影响力的论文。其中,对于大磁暴期间空间高能粒子响应的研究结果被张衡一号卫星首席科学家单位选为张衡一号卫星四个代表性成果之一。

六、群星入我怀,极目心亦柔——“怀柔一号”卫星

2016年2月,美国科学基金会宣布激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)于2015年9月14日首次发现两颗黑洞并合产生的引力波信号,开启了引力波天文学时代。很快地,高能所张双南、卢方军和熊少林提出利用全天视场覆盖卫星探测与引力波相关联的伽马暴的想法,在2020年底LIGO完成升级开始新一轮运行之前发射。这样,可以将引力波对应的天体源的定位精度从上百平方度提高到1平方度量级,通过快速下传定位信息引导其他波段望远镜的后随观测,同时,可以根据伽马暴的能谱和光变曲线研究致密天体并合过程中的物理规律。

这个想法很快形成了初步方案:通过两颗低倾角相位 180° 的大视场伽马暴探测的微小卫星来实现,卫星项目被命名为: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, 图17)。2016年7月获得中科院前沿科学重点研究计划项目的支持,开展关键技术和背景型号研究,项

目负责人是熊少林。到了2017年初,经过了半年多的研究,基本明确了采用溴化镧晶体(LaBr₃)匹配硅光电倍增管(SiPM)的创新技术作为伽马暴探测的主探测器,初步考虑每颗卫星配置15-20个伽马射线探测器,另外配置4-5个荷电粒子探测器以排除空间荷电粒子事件的影响。进入载荷方案详细设计和原理样机研制后,人力不足的问题开始凸显。此时,电磁卫星高能粒子探测器已完成了正样交付、整星集成测试和大型试验。将GECAM项目的原有参研人员同电磁卫星高能粒子探测器研制团队重新整合,形成了GECAM卫星有效载荷项目组,由李新乔担任项目组长,组织开展方案优化设计、关键技术攻关工作。



图17 GECAM卫星在轨运行艺术想象图

经过多个版本的优化迭代,GECAM每颗卫星的探测器配置确定为25个伽马射线探测器(GRD,接近 2π 视场,15mm厚、3英寸直径的溴化镧晶体匹配64片硅光电倍增管SiPM,200 μ m厚铍窗)、8个荷

电粒子探测器(CPD,接近 2π 视场,10mm厚,40mm见方的塑料闪烁体匹配36片SiPM,50 μm 厚聚酰亚胺镀铝薄膜)和一台载荷处理器(电子学机箱)组成,载荷照片见图18。

SiPM作为近年逐渐兴起的光电转换和放大器件,具有体积小,功耗低,量子效率高,无需高压,结构简单便于探测器集成等优点。但由于它是一种半导体器件,对温度敏感,且随着在轨高能质子等粒子造成的位移损伤影响,漏电流会随运行时间而增大,其在轨应用需要经历复杂而严苛的设计验证。因此,在GECAM之前,SiPM并没有在空间探测项目的主要载荷上大规模使用过。

溴化镧晶体作为目前综合性能最为优越的量产闪烁晶体,由于其极易潮解,需要封装使用,围绕晶体封装工艺的优化和试验工作是其在航天产品应用的必由之路。此前,也未有溴化镧晶体在keV软X射线能区的航天应用经历,可参考的资料非常有限。项目组联合国内外最有实力的几家溴化镧晶体生产厂家开展关键技术攻关工作,经过不断地改进、验证、再改进、再验证,终于同北京玻璃研究院一起研制出性能指标和环境适应性均满足项目要求的溴化镧晶体封装探头。

为了实现后随观测的快速引导,GECAM卫星还首次利用北斗三号全球卫星导航系统,将GECAM卫星探测到的伽马射线暴观测警报“准实时”

下传至地面。该功能涉及伽马暴的触发、爆发类型甄别、在轨定位计算、天体源表位置信息比对、太阳活动影响排除、异常区观测模式切换、科学数据并道、短报文数据生成、载荷-卫星-短报文单机综合链路实现、北斗系统链路打通、地面数据链路快速传输、短报文数据快速处理和发布等一系列流程(图19)。“快”字当头,不仅仅要全链条响应处理得快,短短两年的研制周期还要求卫星工程团队要快速高效地打通快速实现北斗卫星通讯链路应用的相关管理和技术环节。

在关键技术攻关如火如荼地开展的同时,GECAM卫星的立项也在往前推进,而立项过程也遇到了一些波折。在载荷关键技术取得了阶段性进展的背景下,2017年4月,中国科学院国家空间科学中心组织召开了第一次项目咨询评议会,评议会上专家组对致密天体并合引力波事件伴随的伽马暴发生的可能性表达了存疑,认为卫星上天后有较大风险测不到引力波伽马暴,建议做进一步分析论证。非常巧的是:2017年8月17日,LIGO-Virgo观测到首个双中子星并合引力波(GW170817A),费米等望远镜探测到首个引力波伽马暴(GB170817A)。很快,同年11月召开了第二次项目咨询评议会,专家组建议加快GECAM卫星工程立项和研制工作。2017年12月:GECAM卫星工程获批进行工程论证。2018年7月:入选“空间科学

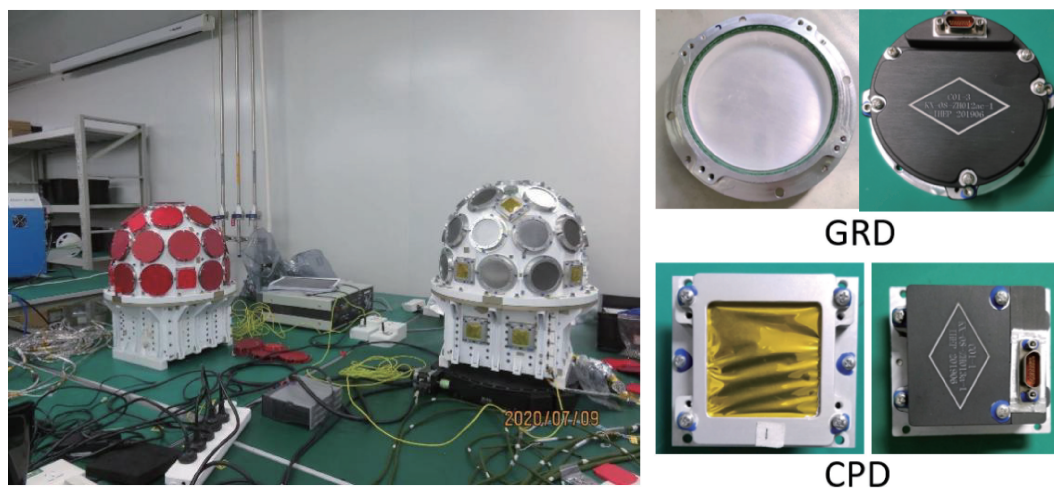


图18 GECAM载荷正样,左:正样测试现场,右:载荷探头



图19 GECAM卫星通过北斗卫星通讯链路快速下传天文警报信息示意图

(二期)”先导专项。

2018年12月,GECAM卫星工程正式批复立项,见《中国科学院关于引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星工程立项的批复》(科发函字【2018】547号)。王赤担任总指挥,熊少林任首席科学家,吴季任工程总师,孟新任副总指挥,荆涛任工程总师助理。余金培任卫星系统总指挥,常亮、陈刚任卫星系统副总指挥,张科科任卫星系统总师,李新乔任卫星系统副总师兼有效载荷总师,黄佳、陈友梅任卫星系统副总师。陈刚、宋黎明分别任科学应用系统总指挥和总师,孙功星、郑世界分别任科学应用系统副总指挥和副总师。张帆、文向阳分别任卫星载荷分系统副总指挥、副总师。载荷团队合影见图20。

自批复立项到2020年底发射的目标只剩下短短两年时间,这远远短于常规新研科学卫星的4-5年研制周期。为了实现两年内完成从方案到初样再到正样的全阶段研制工作,项目组打破常规,采用短线先行、多线并行、跨阶段提前投产等方式与时间赛跑,制定工作矩阵进行动态调整。经过一年多多的努力,各项工作步入正轨。2020年春节迎来了有效载荷正样研制的关键时期,却赶上新型冠状病毒

毒感染暴发。载荷的外协方有十几家,疫情的发展对外协单位的影响是持续性的。看着外协单位报过来的日期一天天往后延,载荷参研人员心急如焚。在3月份疫情形势逐渐好转之后,载荷团队通过积极协调,重新调整了投产方案,用多线并行方式抢时间。由于疫情期间人员交流困难,载荷项目组同志采取了以最大化效率充分利用每一次审批的策略。比如,在中国计量科学研究所的标定工作,负责伽马射线探测器标定工作的几名同志住进了院内招待所,一住就是几个月。再如,载荷的工程化、焊装、集成测试和试验工作是在烟台的513所,载荷团队的骨干力量在513所出差也是以月为单位的。科学应用系统团队也同样面临着软件开发、测试人员分散各地,外协单位、外部系统无法直接对接和测试等困难,科学应用团队采用了远程协助、核心任务分层次逐级处理等措施来应对。

在GECAM团队的共同努力和不懈坚持下,有效载荷得以按期交付,科学应用系统也如期建成并具备任务执行能力,保证了GECAM卫星按期发射入轨。回过头来看,疫情对工程研制的影响超乎想象。载荷及科学应用团队齐心协力,不畏艰险,充分发扬了艰苦奋斗、顽强拼搏、团结协作的航天精



图20 GECAM卫星发射前载荷试验队与卫星合影,前排左起:汪锦州,刘晓静,张帆,熊少林,刘雅清,蔡策,赵小芸,易祁彬,陈灿;中排左起:徐岩冰,肖硕,卢方军,文向阳,赵一,周星,梁晓华,李朝阳,李新乔;后排左起:张大力,高旻,龚轲,安正华,陈刚,王辉,杨生,侯懂杰

神,不辱使命,高质量地完成了各项研制任务。

2020年12月10日,GECAM双星在西昌卫星发射中心由长征十一号遥九运载火箭成功发射入轨(图21为发射现场照片)。发射前,在西昌卫星发射中心举办了揭牌命名仪式,GECAM卫星被正式命名为“怀柔一号”卫星。GECAM卫星入轨之后,卫星平台能源故障使载荷在轨运行蒙上一层阴影。载荷和科学应用团队继续发扬“不抛弃、不放



图21 2020年12月10日,GECAM卫星在西昌卫星发射中心发射

弃”的坚韧不拔的航天精神,跟各大系统一起协同开展问题定位,及时应对新运行模式下的观测优化等工作。通过优化观测目标和载荷开关机时间段,合理利用有限的能源将载荷观测效能发挥到最佳,保障GECAM取得了一系列科学观测成果,发现数百个伽马暴、磁星爆发等重要天体爆发,取得了重要科研成果。

“有心人,天不负”,2022年5月30日GECAM 02星的能源系统恢复满电输出,使载荷有望实现除了南大西洋异常区之外的全时观测,这是对整个“怀柔一号”研制团队不懈努力的回报!目前,GECAM 02星的观测性能达到了设计水平,成为我国迄今监测能力最强的伽马射线全天监测器,预期将取得更多重要成果。

多项创新技术在GECAM卫星上的成功实现和在轨验证大幅提高了我国的伽马暴探测能力,为了进一步巩固和扩大我国在伽马暴探测领域的领先优势,GECAM研制团队后续又先后承担了空间

新技术试验卫星高能爆发探索者(HEBS, 2022年7月发射)、远距离逆行轨道卫星伽马射线暂现源监测器(GTM, 计划2023年下半年发射)的研制任务。

七、打造一双看偏振的眼睛——空间站上的“小蜜蜂”

伽马暴偏振探测仪(英文简称POLAR)是一台专门用于测量伽马射线暴(简称伽马暴)瞬时辐射线偏振的空间探测器。POLAR的主要科学目标是对伽马暴瞬时辐射的线偏振进行高精度测量,从而对伽马暴瞬时辐射机制理论模型进行约束或强有力的限制,同时,对喷流区几何结构以及磁场构型等进行研究。POLAR项目是中欧合作研制项目,于2005年首次被提出,中方首席科学家是张双南。同年开始了POLAR的原理设计。

POLAR结构上由偏振探测器(简称OBOX)和电控箱(简称IBOX)组成,见图22。其中,OBOX共包含25套偏振探测器单体,组成 5×5 阵列。每套偏振探测器单体由64根塑料闪烁体棒(尺寸为 $5.9\times 5.9\times 176\text{ mm}^3$)阵列、多阳极光电倍增管以及ASIC前端电子学组成。POLAR整个探测器阵列的探测面积约为 557 cm^2 ,视场约为 $2\pi\text{ sr}$,偏振探测能量范围约为 $50\sim 500\text{ keV}$ 。2007年中欧科学家正式建立POLAR联合研制的合作关系,明确了该项目由中

欧科学家共同研制完成,合作团队主要有中国科学院高能物理研究所、瑞士日内瓦大学、瑞士保罗谢尔研究所以及波兰国家核研究中心等。2012年,POLAR项目正式立项,主任设计师是张永杰,项目组成员还包括吴伯冰、孙建超、董永伟、刘江涛、王瑞杰、李陆、陆波等。

2016年9月15日,POLAR搭载于我国的空间实验室“天宫二号”成功发射升空。POLAR在6个多月的有效观测运行期间,取得一批重要成果:(1)共探测到55个确认的伽马暴;(2)首批高精度伽马暴偏振探测结果给出了5个伽马暴的偏振度、偏振方向等信息,并得到了联合上下限分析结果,发现伽马暴爆发期间的平均偏振度较低,约为10%。此外,还发现了伽马暴在单个脉冲内偏振角的演化等新的现象。随后,利用POLAR和Fermi-GBM观测数据采用新方法开展了偏振-能谱联合分析,验证了POLAR在轨探测到的其中一个伽马暴的偏振随时间演化的结果。(3)进一步的数据分析统计性地给出了14个伽马暴的偏振探测结果,为国际上最大的高精度伽马暴偏振测量样本,并验证了伽马暴在瞬时辐射阶段偏振度不高的重要结论。(4)国内首次完成了脉冲星导航技术验证试验,定轨精度和理论预期一致。

根据POLAR在轨观测结果,针对“伽马暴偏振

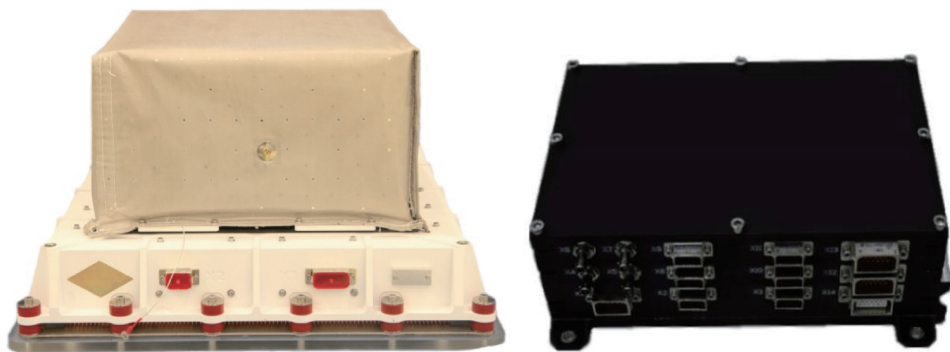


图22 POLAR探测器组成。左图:偏振探测器OBOX实物;右图:电控箱IBOX实物

演化是否普遍存在于伽马暴当中?主导这种现象的机制又是什么?”等新的问题,中科院高能所联合中欧科学家共同提出了增强型的伽马暴偏振探测仪器POLAR-2项目,其科学探测能力将有大幅度提升,计划安装在中国空间站上继续开展伽马暴偏振测量实验。目前,POLAR-2计划2025年前后发射,安装于中国空间站实验舱外开展空间探测。

八、雄关漫道,星途向远——进行中的天文项目

继前述已完成研制发射入轨的卫星项目,高能所粒子天体物理中心还承担了中法天文卫星项目SVOM卫星有效载荷伽马射线监视器(GRM)、爱因斯坦探针卫星后随X射线望远镜(FXT)、远距离逆行轨道卫星伽马射线暂现源监测器(GTM)、空间新技术试验卫星高能爆发探索者(HEBS)、全变源追踪猎人星座(CATCH)立方星等卫星有效载荷的设计和研制工作。这些卫星项目的开展,进一步提高了研制队伍的技术水平和研制实力,对空间科学观测和研究的延续性也有很好的拓展。

此外,在大量前期工作的基础上,以高能所为主提出的两个旗舰型空间探测项目也正在开展立项前的关键技术攻关和原理样机研制等工作。这两个项目分别是:增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)和中国空间站高能宇宙辐射探测设施(HERD)。

增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)是硬X射线调制望远镜(HXMT)——“慧眼”卫星之后我国的下一代旗舰级X射线天文卫星,其核心科学目标可概括为:“一奇(黑洞)、二星(中子星和夸克星)、三极端(极端引力、磁场和密度)”,即研究黑洞、中子星中的新物理过程和规律,包括极端引力条件下的广义相对论、极端密度条件下的量子色动力学和极端磁场条件下的量子电动力学等基本

规律。

高能所在2007年提出建造X射线时变与偏振探测卫星(简称XTP)的建议。在中国科学院的支持下,由高能所牵头国内多家单位,先后完成了XTP预先研究课题(2009年结题)和背景型号研究课题(2016年5月结题),以及eXTP背景型号研究(2019年4月结题)等研究工作。完成了相关关键技术攻关,并形成了以短焦距X射线聚焦望远镜阵列为核心的有效载荷及卫星总体方案。

2019年,在中国科学院“空间科学(二期)”战略性先导科技专项“空间科学背景型号项目”(第一批)的支持下,开始了增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)重大背景型号研究,开展卫星平台和有效载荷一体化设计研究。eXTP有效载荷包括: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)、广角监视器(WFM)共4个有效载荷分系统。其中,中方(高能所)牵头两个有效载荷SFA和PFA的设计和研制,欧洲负责另外两个载荷LAD和WFM的设计和研制。

高能宇宙辐射探测设施(HERD)项目是计划安装在中国空间站上的空间天文和粒子天体物理实验。HERD计划2027年前后发射并在中国空间站正式运行十年以上,其核心科学能力将长时间保持大幅度国际领先。HERD科学目标包括:宇宙线电子能谱精细测量及高灵敏度暗物质信号搜寻;宇宙线起源和宇宙线物理;高灵敏度的高能伽马射线全天巡天和监视;通过多颗脉冲星同时观测探索脉冲星导航的新机制。

从2007年,中科院高能所提出了暗物质空间探测项目概念,积极开展了不同量能器方案的模拟和性能摸底研究。2008年,形成了开展空间高能宇宙辐射探测的构想。2010年,项目团队凝练形成三维成像量能器的创新方案。2011年,形成增强相机

读出系统的创新方案,中科院西光所团队开始增强相机的预先研究工作。2012年,正式提出中国空间站HERD项目,并参加了空间站项目遴选。2012年起,HERD项目科学目标和创新载荷方案成功吸引了国际研究团队,HERD国际合作组建。HERD项目预先研究得到了中科院国际大科学计划“培育”项目和基金委重大仪器专项的支持,并列入了科技部重点研发专项指南。

2018—2019年,由中科院空间应用工程与技术中心牵头,向科技部申请“探索极端宇宙”国际大科学计划和培育专项。2018年5月,HERD项目建议书顺利通过由意大利空间局和中国科学院空间应用总体部组织的联合评审。评审组一致认为HERD项目致力于解决前沿科学问题,其科学目标独一无二,载荷基线方案满足科学目标需求,国际合作方案切实可靠,建议尽快安排立项。

HERD包含五种有效载荷:三维成像量能器(CALO)、包裹量能器五面的光纤径迹仪(FIT)、塑闪反符合探测器(PSD)、硅电荷探测器(SCD)和穿越辐射探测器(TRD)。其中,中科院空间应用工程与技术中心担任工程总体单位,中科院高能所为首席科学家单位和有效载荷总体单位,并牵头CALO的研制和科学应用系统的搭建,中科院西安光机所、建材总院、北方夜视等单位参与CALO研制。FIT、PSD、SCD由欧方牵头,中方参与研制。TRD由广西大学牵头研制。

目前,eXTP和HERD都积累了十年以上的时间,无论从技术储备还是人才队伍的经验积累,相较于十数年前项目刚提出时都有了大幅提升。此外,作为两个由中国领导的大型国际合作项目,经过前期与欧洲多个国家的合作单位的合作工作的开展,也为项目未来立项后的可行性提供了进一步

保障。此外,继这两个旗舰型项目之后的未来空间探测项目也被陆续提出并开展前期研究。相信有了越来越多的技术积淀,我国空间天文探测未来可期!

致谢:本文在写作过程中得到卢方军、徐玉朋、张承模、孙建超、刘晓静、彭文溪、董永伟、郑世界等多位老师、同志的帮助,在此表示诚挚感谢!

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] 卢方军,从球载实验到慧眼卫星,现代物理知识,2021年第2期.
- [3] 马宇蓓,我永远的老师——纪念何泽慧先生百年诞辰,《现代物理知识》2014年第001期.
- [4] 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.
- [5] 李惕碛、吴枚、陆柱国等,调制成像 γ 射线望远镜,天文学报,1994年01期.
- [6] 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.
- [7] Li, X.Q., Xu, Y.B., An, Z.H. *et al.* The high-energy particle package onboard CSES. *Radiat Detect Technol Methods* 3, 22 (2019).
- [8] 马瑞敏,王焕玉,嫦娥工程X射线谱仪的数据压缩研究,宇航学报,2011,32,1.
- [9] 张家宇,王焕玉,张承模等,直接解调方法在嫦娥一号卫星X射线谱仪地面验证实验数据分析中的应用,光谱学与光谱分析,2008年第28卷第10期.
- [10] 班超,郑永春,张锋等,月球风暴洋地区元素丰度研究:“嫦娥二号”X射线谱仪探测数据分析,地学前缘,2014,21,6.
- [11] 张家宇,王焕玉,张承模等,嫦娥一号卫星X射线谱仪磁屏蔽设计与模拟计算,核技术,2008,31,6.
- [12] 李新乔,文向阳,安正华等,GECAM卫星有效载荷介绍,中国科学:物理学 力学 天文学,2020,50: 129508.
- [13] 李新乔,GECAM卫星有效载荷里的硬核技术,现代物理知识,2020,32(5): 17-22.