

# 硬 X 射线调制望远镜

## ——中国第一颗 X 射线天文卫星

卢方军<sup>†</sup> 张双南

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2017-03-01 收到

<sup>†</sup> email: lufj@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170601

### 1 项目历程

问：硬 X 射线调制望远镜(The Hard X-ray Modulation Telescope, 简称HXMT)是我国自主研发的第一颗 X 射线天文卫星。目前卫星的研制工作已经完成, 将于近期择机发射。张教授, 您能不能简单介绍一下为什么要发射这颗卫星?

张双南：天体发出的辐射往往覆盖了从无线电到高能伽马射线的整个电磁波谱段。为了更好地研究天体的物理性质, 或者借助于天体提供的极端物理环境研究一些基本的物理过程, 就需要尽可能从各个波段对天体进行观测。但是, 由于地球大气的吸收, 在天体发出的辐射中, 只有部分无线电波和可见光能够到达地面, 因此, 红外线、紫外线、X 射线、伽马射线的天文观测必须在大气层之上进行, 它们也是空间天文观测的主要波段。

天体的 X 射线辐射和高温、高能粒子、强磁场和强引力场等极端物理环境和性质有关, 是研究天体上各种剧烈活动的主要探针之一。X 射线天文学是空间天文起步最早, 也是最主要的学科之一。在高空气球和探空火箭观测的基础上, 美国于 1970 年发射第一个 X 射线天文卫星“自由号”, 实现 X 射线巡天, 发现了 300 多个 X 射线天体, 打开了人类观测宇宙的新窗口, “自由号”的负责人里卡尔多·贾科尼也因此获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖。发射 X 射线天文卫星, 是研究天体高能辐射性质和高能物理过程的主流方法。

问：HXMT 项目经历了二十多年的努力, 您能不能简单回顾一下卫星项目发展的过程?

张双南：20 世纪 70 年代末, 中国科学院高能

物理研究所(简称高能所)的李惕碚、顾逸东等人开始推动国内空间高能天文观测的发展。他们利用高空气球载 X 射线望远镜对天体的高能辐射进行观测研究, 同时利用国外高能天文卫星的观测数据开展天体高能辐射过程的研究工作。我本人在高能所读研究生的时候, 就参与过气球载望远镜的研制和气球飞行实验。20 世纪 90 年代初, 李惕碚和吴枚在 高能天体物理数据分析中发展了直接解调方法(DDM), 该方法克服了硬 X 射线成像的技术困难, 可以用简单成熟的准直型望远镜实现高分辨和高灵敏度的硬 X 射线扫描成像。在该方法和球载实验的基础之上, 1993 年, 高能所提出硬 X 射线调制望远镜(HXMT)项目, 其主要科学目标是, 完成国际上首个高灵敏度的硬 X 射线巡天, 发现大量新的硬 X 射线天体, 并对重要天体进行高精度定点观测; 主要的科学仪器是 18 个 NaI/CsI 复合晶体探测器, 总面积 5000 cm<sup>2</sup> 左右, 工作能段为 20—250 keV。可以看出, 我国科学家希望通过 HXMT 项目的实施, 在一个重要的学科前沿领域跻身国际先进水平, 获得重大的科学突破。

由于多方面的原因, 直到 2011 年, 国家才正式批准 HXMT 项目。在此期间, 国际上的高能天文观测有了显著的发展, 特别是在硬 X 射线巡天方面, 欧洲的 INTEGRAL 卫星和美国的 SWIFT 卫星先后于 2002 年和 2004 年上天, 它们在轨长期运行, 对 HXMT 原定的硬 X 射线巡天的科学目标带来了很大冲击。为了增强 HXMT 的科学竞争力, 在预研到立项的论证过程中, 项目组为 HXMT 增加了两种新的探测器, 即基于 Si-PIN 探测器的中能 X 射线望远镜和基于 X 射线 CCD 的低能 X 射线望远镜, 使 HXMT 的观测能区扩展到

1—250 keV。

HXMT卫星设计的工作模式包括扫描成像观测和定点观测。HXMT的几种望远镜都是准直型望远镜，即只有位于准直器视场内的天体发出的X射线才能入射到探测器上，而且与视线方向的夹角越大，有效探测面积越小。在扫描观测模式下，由于天空中存在着亮度不同的X射线源，望远镜在扫过不同区域时探测器的计数率也在变化，而通过分析计数率变化和望远镜姿态之间的关系，可以重建获得天空X射线源的位置和流强。扫描观测是HXMT监视已知源的流强变化以及发现新天体的主要手段。定点观测则是指向某一天体进行长时间的观测，可以研究天体的X射线光变和能谱性质。最近，我们还开发了一种新的观测模式，即通过调整高能X射线望远镜主探测器光电倍增管的高压，可以使其中的CsI晶体成为一个大面积的大视场监视器，探测天空的硬X射线和软伽马射线暴发现象。

2011年3月，HXMT卫星正式立项后，经过5年多的时间完成了全部研制和试验工作。目前卫星处于待命发射状态。

## 2 科学目标

问：HXMT卫星将观测哪些天体？



图1 物质掉入黑洞的示意图。在物质掉入黑洞的过程中形成吸积盘，引力能释放使得吸积盘越靠内的部分温度越高（图片来源于网络）

张双南：HXMT卫星主要观测由黑洞或中子星与正常恒星组成的X射线双星系统，同时，可以监测伽马射线暴。

黑洞是一种特殊天体，它具有极强的引力场，在某一个半径范围内的所有物质，包括光子，都无法逃出。黑洞周围的强引力场等极端条件，使其成为研究基本物理规律的宇宙实验室。

硬X射线是一种高能电磁波，具有很强的穿透能力，医院里就是用它进行人体透视检查。在物质被黑洞的引力俘获后，一般沿着螺旋线运动并掉入黑洞，在此过程中，被黑洞俘获的物质之间会发生相互作用，引力势能转换成辐射能。邻近黑洞的区域会发出强烈的硬X射线辐射，由于这种辐射受物质的遮挡影响小，是研究黑洞系统的一种强有力的工具。越靠近黑洞，物质的温度越高，辐射出的X射线光子的能量也越高，HXMT在不同能量处观测黑洞系统的光变行为，可以探索物质掉入黑洞的动力学过程(图1)。

中子星是某些恒星演化晚期发生超新星爆发的产物，其质量是太阳质量的1.4倍到3倍，半径却只有10 km左右，密度非常高， $1\text{ cm}^3$ 的中子星物质重约一亿吨。中子星表面的磁场非常强，典型的强度是地球磁场的上万亿倍。孤立的中子星和处于双星系统中的中子星都可能发出强烈的X射线。对中子星的X射线观测，可以测量表面的磁场强度，研究高密度下的物质状态方程和强磁场下物质的性质。

伽马射线暴是来自天空中某一方向的伽马射线强度在短时间内突然增强，随后又迅速减弱的现象，持续时间在0.1—1000 s，辐射主要集中在0.1—100 MeV的能段。伽马射线暴发现于1967年，是目前已知能量仅次于宇宙大爆炸的爆发现象，可能是巨大恒星在燃料耗尽时塌缩爆炸或者两颗邻近的致密星体(黑洞或中子星)合并而产生的。两个致密天体的合并除了可能发生伽马射线暴，也会产生较强的引力波(图2)，因此，观测伽马射线暴是探测和研究引力波电磁对应体的重要方式。

问：具体而言，HXMT将研究哪些科学问题呢？

张双南：HXMT 卫星具体的科学目标有以下4个：(1)进行大天区的X射线巡天，发现新的天体或已知天体的新活动；(2)对X射线双星系统进行高精度的定点观测，研究其快速光变；(3)观测孤立脉冲星、强磁场中子星以及中子星X射线双星中的X射线暴，研究致密物质的状态方程；(4)监测200 keV—3 MeV能区暴发现象，研究伽马射线暴，寻找引力波暴的电磁对应体。

问：能不能更详细地解释一下这几个科学目标及其背后的科学问题？

张双南：好的，我下面分别对这4个科学目标进行更具体的说明。

(1)宽波段大天区X射线巡天：HXMT将对银道面进行经常性的扫描观测，发现新的(暂现)X射线源，获得其宽波段(1—250 keV) X射线辐射性质，并在发现这些源处于暴发态的时候，指向其进行高精度的定点观测，组织其他空间和地面望远镜对这些天体源进行多波段联合观测。

在银河系内，存在一类致密星(黑洞、中子星、白矮星)和正常恒星组成的双星系统。由于致密星存在强引力场，部分正常恒星的物质会被致密星的引力所俘获，向致密星掉落；但另一方面，由于这些物质存在较大的角动量，因此会形成围绕致密星运动的吸积盘，并通过摩擦损失角动量，沿着螺旋线运动，最终掉入黑洞或落到中子星、白矮星的表面。在下落的过程中，物质温度会升高到几百万度到几千万度，将引力能转换成X射线辐射释放出去，X射线的亮度与吸积率(即单位时间内物质落到黑洞视界内或中子星、白矮星表面的多少)相关。多数时候，由于吸积率很低，这些天体的X射线辐射比较弱，甚至于探测不到；但有时候因为吸积率高，X射线流强会变得非常高，因此被称为暴发源或瞬变源(图3)。由于银河系扁平状的结构，这些源多位于银道面上。历史上每一次银盘面和银河系中心方向的巡天和监测都发现了已知源的新活动以及新(类型)

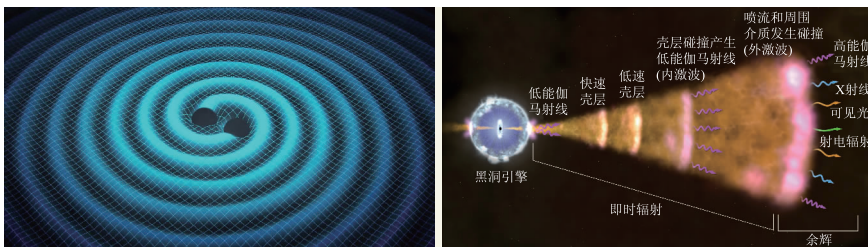


图2 引力波(左)和伽马射线暴示意图(右)。引力波事件可能产生伽马射线暴，因此，观测伽马射线暴也是探测和研究引力波电磁对应体的重要途径

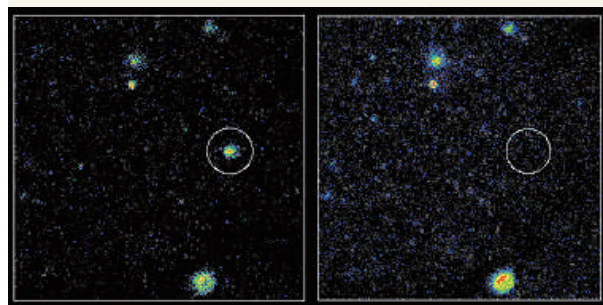


图3 天空中X射线瞬变源，它们有时可见，有时不可见(图片来源于网络)

的瞬变源。由于瞬变源为研究致密星物理、伴星性质和吸积过程，以及理解天体源的多样性提供了宝贵的机会，每一次发现新的瞬变天体都会形成国际多波段、多天文台和天地一体化观测的热潮。

(2)多波段快速光变观测：多频次地观测中子星和黑洞X射线双星，研究它们的多波段时变性质、宽波段能谱和铁发射线。

X射线双星系统的一个重要特征是存在不同的辐射态，即高软态、低硬态以及位于这两个态之间的转换态。在高软态时，X射线双星的软X射线辐射大大增加，但往往伴随着硬X射线流强的下降；在低硬态时，软X射线的流强下降，整个X射线能谱变硬。但是这些长期活动和演化的物理机制目前仍不清楚，因此需要对若干典型的黑洞和中子星进行长期的、宽波段的高频次监测，以理解不同类型的能谱态和时变态的演化和转换机制。尽管以前的每一个X射线天文卫星都对几个经典的X射线天体做了大量的观测，但是由于缺乏同时的宽波段、高统计量、高时间分辨率和良好能量测量的观测，一些基本问题仍然不清楚，HXMT能区宽、面积大、低能段能量分辨率

高、时间分辨率高且可以观测强源，在X射线双星多波段快速光变研究方面具有独特的优势。

如前面所介绍的一样，物质往内掉入黑洞或落到中子星表面的过程中，动能需要通过辐射释放。如果吸积盘是光学厚的，辐射为黑体辐射，根据动能损失率和辐射功率相等，可以推导出吸积盘的温度与半径的 $3/4$ 次方成反比，越往内盘的温度越高，因此X射线辐射的峰值能量也越高。在不同能量段对双星系统进行观测，通过它们的时变特性，就可以研究吸积物质的动力学过程(图4)。另一方面，在黑洞X射线双星系统中，黑洞的自转角动量和方向(与吸积盘转动方向之间的关系)会影响吸积盘的最内半径，而吸积盘的最内半径不同，辐射的能谱也会不一样，由此可以通过测量黑洞双星系统的能谱来推知吸积盘的最内半径和黑洞的自转角动量。1997年，我和崔伟、陈莞等人通过拟合几个黑洞双星系统的连续谱形状，首次给出了黑洞自转参数的测量结果。现在，这一方法已经成为测量黑洞自转参数的两个标准方法之一。HXMT也将利用对黑洞双星宽

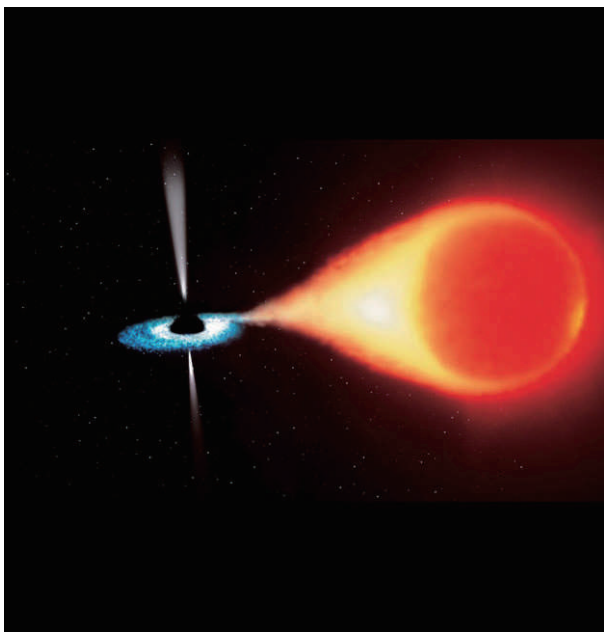


图4 X射线双星示意图。在伴星的物质掉向黑洞或中子星的过程中形成吸积盘，吸积盘上半径越小的地方温度越高。吸积盘的这种性质使得我们可以测量不同能量段X射线的变化，从而了解物质运动的规律以及黑洞和中子星对周围空间的影响(图片来源于网络)

波段X射线能谱的观测，测量一批黑洞的自转角动量。

在X射线双星的辐射谱中，存在能量为6.4 keV的铁K $\alpha$ 发射线，是X射线光子照射到中性(或低电离度)吸积盘物质上产生的荧光。由于吸积盘高速转动，造成不同区域物质的视向速度不同，铁K $\alpha$ 发射线也会因为多普勒效应而被展宽。对铁K $\alpha$ 发射线轮廓的研究是研究吸积物质的运动、测量黑洞自转角动量等的主要途径之一。HXMT卫星的低能X射线望远镜具有高的能量分辨率，而且两次读出之间的间隔很短，在观测强源时，不会出现其他使用X射线CCD的卫星存在的光子堆积效应(即不会出现在两次读出之间同一像素上接收到两个或更多光子的情况)，可以同时利用铁K $\alpha$ 发射线轮廓和连续谱形状测量黑洞的自转角动量。

(3)观测磁星、中子星X射线双星中的X射线暴，研究强磁场下物质的状态方程。

反常X射线脉冲星和软伽马射线重复暴是中子星中的两类“超磁星”候选体，也是HXMT的主要观测目标。它们的自转周期较长、周期变率较大。表面磁场强度可能超过量子电动力学的临界磁场强度( $4.4 \times 10^{13}$  G)，因此被称为超磁星，是研究真空量子涨落以及真空双折射等基本物理效应的场所。超磁星的X射线辐射光度远超其自转能损，而且超磁星在X射线能段表现出较强的活动性(巨耀发、爆发和周期跳变)。中子星的爆发、周期跳变等能量释放现象，反映了中子星系统或自身的活动性。对脉冲星的辐射和脉冲周期进行长期监测，有助于我们发现形式更多、表现更丰富的活动现象，从而探究脉冲星(尤其是超磁星)的能量来源之谜。

长期监测超磁星的自转周期，发现在自转减慢的过程中，偶尔出现周期跳变(glitch)现象，即自转频率会突变到比预计的频率高，跳变时，往往伴随X射线能量释放。2013年，在反常X射线脉冲星中，观测到了反常跳变现象，即自转频率突变到比预计频率更低的值，而且，也伴随有X射线的爆发。超磁星中的周期跳变现象与其内部结

构、周围的星风环境有关。长期监测超磁星自转周期，进而发现更多、更复杂的周期跳变现象，也是理解周期跳变产生机制的主要途径。

(4)监测 200 keV—3 MeV 能区暴发现象，研究伽马射线暴，寻找引力波暴的电磁对应体。

HXMT 卫星设计的观测能量段是 1—250 keV，而且准直器限定的视场也比较小，原则上不能监测在天空随机出现的伽马射线暴等爆发现象。但是，HXMT 卫星高能 X 射线望远镜主探测器上用于屏蔽从背面入射伽马射线的碘化铯(CsI)晶体厚度达 4 cm，高于 200 keV 的硬 X 射线和软伽马射线光子可能穿透准直器等结构材料，照射到 CsI 晶体上并使之产生荧光，从而被光电倍增管接收到。在一般的天体物理观测中，因为 CsI 产生的信号绝大部分来源于环境本底，被认为是没有价值的噪声，所以不会被下载到地面；但是在设计 HXMT 卫星的时候，我们的一个指导原则是，将所有数据都尽可能记录并下载到地面，这恰好为在 200 keV 以上的硬 X 射线/软伽马射线能段探测伽马射线暴提供了可能。

在正常工作模式下，受量程的限制，主探测器只能测量 600 keV 以下光子的能量。为了覆盖更高能区，在我的建议之下，高能主探测器特意增加了伽马射线暴工作模式，通过降低光电倍增管的高压，使得对软伽马射线光子的能量测量可以向上延伸到 3 MeV。为了不对正常的观测产生影响，只有在被观测天体受地球遮挡的时候，才启动伽马射线暴工作模式。

分析表明，HXMT 在几百 keV 到 3 MeV 能区的探测面积将是其他伽马射线暴监视器的 10 倍以上，一年可以看到近 200 个伽马射线暴。由于两个黑洞或两个中子星并和产生引力波的时候也可能产生伽马射线暴，HXMT 可以用于寻找引力波暴的电磁对应体。

### 3 卫星及有效载荷

问：卢教授，请您介绍一下 HXMT 卫星和有效载荷的基本情况。

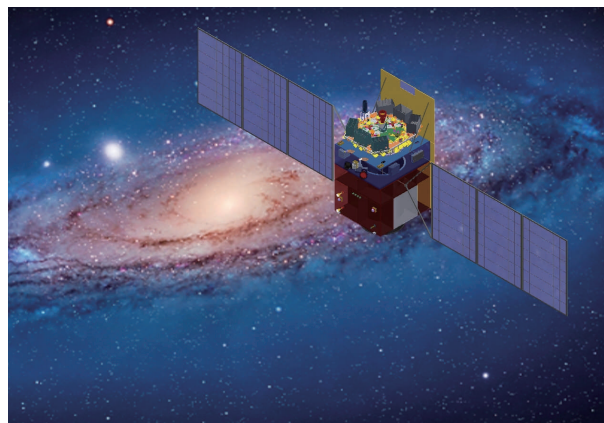


图5 HXMT 在轨示意图

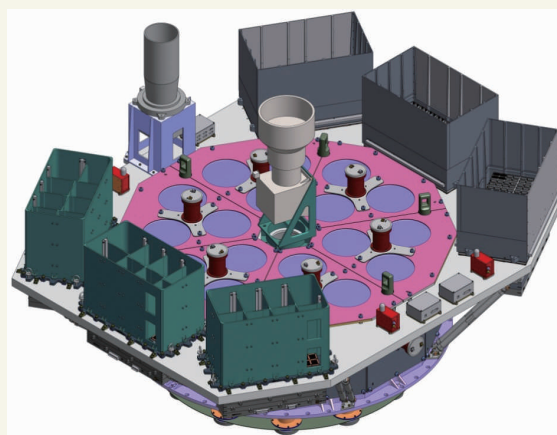


图6 HXMT 卫星主有效载荷结构示意图。左下角墨绿色的 3 个机箱为低能 X 射线望远镜 LE，中间为高能 X 射线望远镜 HE，右上角灰色的 3 个机箱为中能 X 射线望远镜 ME。安置在上安装板上的还有两个星敏器等(图中的颜色只是为了区分不同的部件，并不代表真实的表面颜色)

卢方军：HXMT 卫星如图 5 所示。它采用分舱式设计，有效载荷(科学探测仪器)位于卫星上部，服务舱以“资源二号”卫星平台为基础，位于卫星下部。卫星总重量 2500 kg，将运行在高度 550 km、倾角 43° 的近地圆轨道上。卫星将在酒泉卫星发射基地、采用长征四号乙运载火箭发射，在轨设计寿命 4 年。

HXMT 的主有效载荷包括高能 X 射线望远镜 HE、中能 X 射线望远镜 ME 和低能 X 射线望远镜 LE(图 6)。由于不同能量的 X 射线辐射起源于天体上不同的物理过程或者具有不同物理条件的区域，HE、ME、LE 在不同的波段同时观测一个天体，可以对天体的活动给出更全面和更准确的

诊断。

HE 位于中央，整体结构为圆柱形，包括 18 个 NaI/CsI 复合晶体探测器单体。HE 的工作原理是：当准直器视场内的 X 射线光子入射到 NaI 晶体时，晶体发出闪烁光，被后面的光电倍增管 (PMT) 收集，完成对一个 X 射线光子事例的探测。闪烁光的强度代表了入射光子的能量。CsI 晶体在 NaI 的背面，主要用于屏蔽来自后方的各种带电粒子和光子，降低本底计数率。CsI 晶体同时也可用于监测伽马射线暴的硬 X 射线和软伽马射线辐射。

中能 X 射线望远镜 ME 包括 3 个探测器机箱，共有 1728 路 Si-PIN 探测器，构成总面积 952 cm<sup>2</sup> 的探测阵列。Si-PIN 探测器的工作原理是：能量为  $E$  的 X 射线与 Si-PIN 探测器发生光电效应，其能量全部消耗在探测器的有效体积内，并转化成电子空穴对，其数量与入射光子的能量成正比，电子在偏压电场的作用下被收集，通过电子线路读出，形成一个事例。ME 所用 Si-PIN 探测器由高能所自行研制，厚 1 mm，探测能区 5—30 keV，与 LE 及 HE 的观测能区之间有很好的交叉覆盖。

LE 也由 3 个探测器机箱组成，包括 24 个扫式电荷器件 (SCD) 探测器单元。X 射线光子与 SCD 相互作用的过程和与 Si-PIN 相互作用基本相同。SCD 是一种特殊类型的 X 射线 CCD，采用连续读出的方式，牺牲入射光子在 CCD 上的位置信息，但获得了高的时间分辨率，整片 SCD 的读出时间只有 1 ms，远小于普通 CCD 秒量级的读出时间。LE 采用 SCD，不仅可以研究 X 射线源的快速光变，也使其在观测强 X 射线源时，基本不会出现两个 X 射线光子在一次读出时间内入射到一个像素上的情况，从而可以避免光子堆积效应，保证高的能量分辨率以及可靠的能谱信息。

## 4 研制过程

问：卢教授，HXMT 卫星的发射时间较预期的规划有较长的延后，这是不是说明卫星的研制过程遇到了很多困难？

卢方军：HXMT 卫星的发射时间较预期延迟较多，主要是有效载荷在研制中遇到了较多技术困难。由于这些载荷都是新研制的，元器件和部件的技术难度以及对使用环境的要求非常高，部分关键进口产品出现质量问题，导致载荷进度较初期计划延期约两年时间。我下面列举几个例子。

我们遇到的第一个主要的技术困难是，高能主探测器 NaI/CsI 晶体的密封问题。该主探测器晶体盒原计划从美国采购，但是在签订合同、给美国公司付款并且美国公司完成产品的生产之后，受到美国政府禁运。我们因此改从乌克兰进口 NaI/CsI 晶体盒，但是经过对两批产品的测试，发现乌克兰方未能解决晶体盒的密封问题，经过几个月的储存之后，NaI 晶体因潮解性能会显著下降，无法满足指标要求。最后，只能采取从乌克兰进口裸晶体、自行封装的技术途径。高能所与国内厂家进行了近两年的联合攻关，在经过近 30 次的试封装之后，研制成功了密封性满足要求的产品，通过了环境试验和长期储存试验的检验，而且产品的能量分辨率、发光均匀性等技术指标达到了国际最好水平。

第二个主要的技术困难与高压模块有关。HXMT 卫星上使用了大量的高压模块，这些高压模块从一家意大利公司采购，但是在按照其产品说明书进行筛选试验之后，发现普遍存在焊点开裂的问题，按照航天工程规范，无法继续使用。通过解剖该高压模块，我们发现工艺上存在不足，通过试验找到了解决问题的办法，并与意大利公司共同制定了返修工艺。返修后的产品经过后续试验，未再出现问题，但是该问题的出现和解决，使整个工程进度延后了约 10 个月。

第三个例子与静电有关。HXMT 中能望远镜使用的多路读出 ASIC 芯片从国外采购裸芯，国内封装。但是封装后的产品出现大面积受损，或者产品特性变化的情况，经过问题排查，最后发现是封装工艺线的防静电水平达不到芯片的要求，以及管壳的绝缘性不够。相关技术问题的排查和解决涉及到的环节非常多，从中也暴露出我国的基础工业仍存在较多薄弱环节。

当然，技术困难的解决必然伴随我们对相关技术理解的加深和解决技术问题能力的提升。通过HXMT卫星项目，高能所空间科学工程方面的管理水平和人员队伍的技术水平都有了长足的进步。我本人从科学研究岗位转到技术管理岗位，除了HXMT卫星项目的成功，这些变化也是最令我欣喜的。

## 5 HXMT 的科学运行与管理

问：张教授，HXMT 是一颗空间科学卫星，任务是否成功最后还是要看其能否取得重大的科学成果，您能不能谈一下都做了哪些科学研究的准备工作？

张双南：HXMT 卫星的科学研究准备工作和卫星的工程研制是同步推进的。

在中国科学院空间科学先导专项的支持下，我们完成了HXMT地面应用系统的建设。地面应用系统的工作包括观测提案征集、评估，观测计划制定，载荷运行状态监测，卫星数据的接收和处理，科学数据分析软件的编制，科学研究工作的支持等方面的内容。这些工作现在都已经完成，并在2016年底完成了预验收，整个系统处于待命状态。

与科学研究相关的另一个重要工作是望远镜性能的标定，这是保证科学观测结果可靠的关

键。高能所建设了X射线望远镜的标定系统，对望远镜在不同运行条件下的各种响应函数进行了细致的标定，这些工作也得到了国际同行的高度认可。在HXMT卫星上天后，我们还将开展与国外同类望远镜的在轨交叉标定工作，进一步确保结果的可靠性。

问：国内外的科学家如何才能获得HXMT卫星的科学数据，并利用这些数据开展研究工作呢？

张双南：我们建造HXMT卫星的目的，就是为中国的天文学家提供一手的观测数据，提高我国高能天文的整体水平。为了充分发挥HXMT的科学能力，2016年6月，我们向全国公开征集HXMT的首轮核心观测提案，提案者将可以在第一时间拿到相关的观测数据。提案征集得到了我国天文界的热烈反应，共征集到大小提案90份，提出的总观测时间需求差不多7年。经过科学和技术评估，最终优选了一定数量的核心提案，将择日发布。今后，根据HXMT的运行和观测开展情况，还将适时进行后续的提案征集。

HXMT观测提案的提出者和为HXMT项目作出贡献的专家是HXMT观测数据的优先用户，享有一定时间的数据优先使用权。之后，所有数据将向国内外科学家开放，欢迎大家使用HXMT卫星的观测数据开展研究工作。

读者和编者

## 《物理》有奖征集 封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：[physics@iphy.ac.cn](mailto:physics@iphy.ac.cn)；联系电话：010-82649470；82649029

《物理》编辑部