

硬 X 射线调制望远镜卫星及其科学目标

卢方军 徐玉朋 张帆 刘红薇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

硬 X 射线调制望远镜 (The Hard X-ray Modulation Telescope, 简称: HXMT) 是我国自主研制的第一颗 X 射线天文卫星, 承载有高能 X 射线望远镜 (20 ~ 250keV, 5000 cm²)、中能 X 射线望远镜 (5 ~ 30keV, 952 cm²)、低能 X 射线望远镜 (1 ~ 15keV, 384 cm²) 以及空间环境监测器。HXMT 具有扫描观测和定点观测两种工作模式, 扫描观测可以进行宽波段大天区 X 射线巡天成像, 定点观测可以研究黑洞、中子星等高能天体的多波段 X 射线快速光变, HXMT 还可以监视天空的高能爆发现象。通过 HXMT

的这些观测, 将大大加深对天体上的剧烈爆发过程、中子星强磁场和黑洞强引力场中的动力学和高能辐射过程的认识。HXMT 卫星工程项目于 2011 年 3 月正式立项, 计划在 2016 年底发射升空。

1. 引言

由于地球大气的吸收, 对天体的 X 射线观测只能在地球大气层之上进行 (图 1)。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, 开创了空间高能天文的新领域, 打开了人

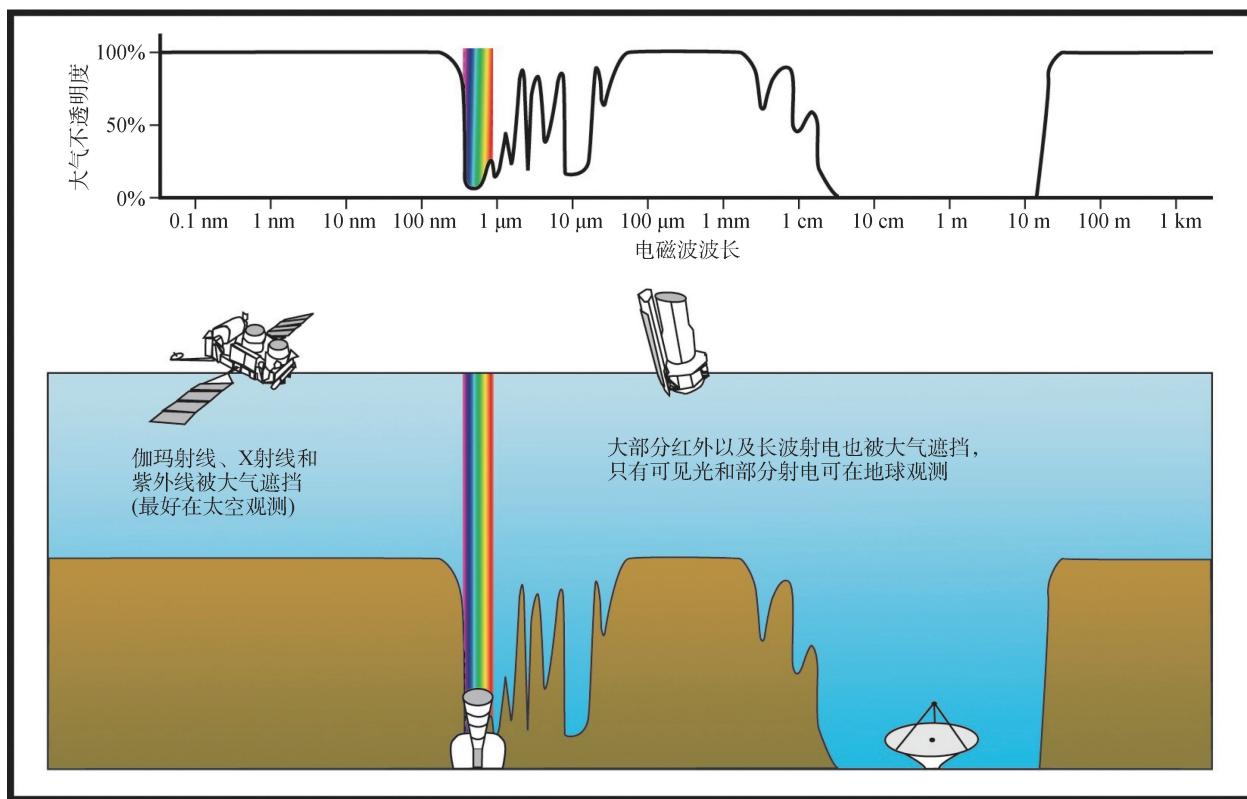


图 1 地球大气对电磁波的吸收效应, 除了光学和无线电的部分窗口外, 地球大气对电磁波是不透明的

类观测宇宙的新窗口，“自由号”的领导人里卡尔多·贾科尼 (R.Giacconi) 也因此获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖。中国的 X 射线天文观测起步于 20 世纪 70 年代，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 (图 2)。2001 年，在“神舟 2 号”上搭载了超软 X 射线、X 射线和 γ 射线探测器，成功地观测到近 30 个宇宙 γ 射线暴和近百例太阳耀斑的 X 射线、 γ 射线暴发事例，实现了我国星载空间天文观测零的突破。



图 2 中科院高能所研制的球载硬 X 射线望远镜 HAPI-4 发放现场

20 世纪 90 年代初，中国科学院高能物理研究所李惕碚和吴枚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，并在此基础上提出建造和发射硬 X 射线调制望远镜 (HXMT)。HXMT 的扫描观测可以实现大天区、高灵敏度快速成像，定点观测可以实现对点源的宽波段、高计数率的时变观测。同时，HXMT 也具备在 200keV ~ 3MeV 能区观测伽玛射线暴 (GRB) 的能力。

2. 科学目标

天文卫星都是科学目标主导的。HXMT 望远镜的主要目标是在 X 射线能段观测致密天体，包括黑洞、中子星和伽玛射线暴等。

黑洞是一种特殊天体，它具有极强的引力场，在某一半径范围内的所有物质，包括光线，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 3)。



图 3 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

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 千米左右，密度非常高。一立方厘米的中子星物质重约一亿吨。中子星表面的磁场非常强，可达到地球磁场的上千万亿倍。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。

伽玛射线暴是来自天空中某一方向的伽玛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。伽玛暴发现于 1967 年，数十年来，人们对其本质了解得还不很清楚，但基本可以确定是发生在宇宙学尺度上的恒星级天体中的爆发过程，目前已知

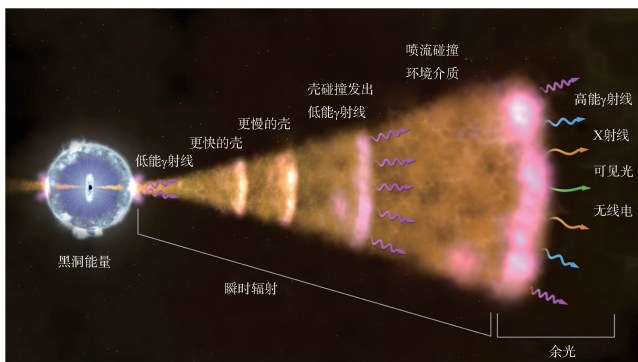
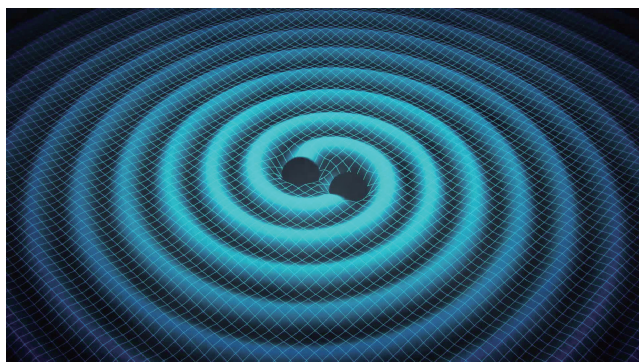


图4 (左)致密双星在绕转和并合过程中产生引力波示意图(右)伽玛射线暴示意图引力波事件可能伴随产生伽玛射线暴(即电磁对应体),因此观测伽玛射线暴是研究引力波事件的重要手段。

它是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天体(黑洞或中子星)并合而产生的。两个致密天体的并合除了可能发生伽玛射线暴,也会产生引力波(图4),因此,观测伽玛射线暴是探测和研究引力波电磁对应体的重要方式。

HXMT 卫星的主要科学目标包括以下四个方面:

(1) 宽波段大天区 X 射线巡天: 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所俘获,由于存在较大的角动量,物质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,它们的 X 射线亮度和吸积率高度相关。多数时候,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5)。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)的瞬变源,由于瞬变源为研究致密星物理、

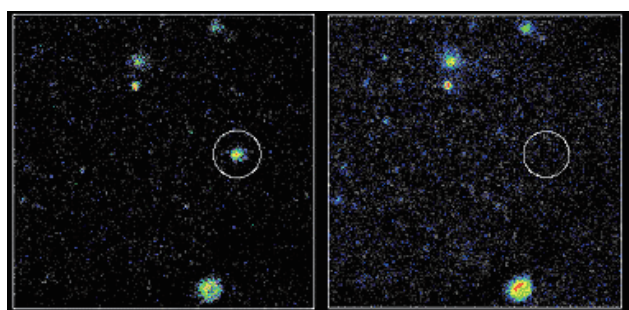


图5 天空中 X 射线瞬变源,它们有时可见,有时不可见

伴星性质和吸积过程,以及理解天体源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能力: 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。在高软态的时候, 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;在低硬态的时候,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机制目前并不清楚,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、时间分辨率高并可以观测强源,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，物质在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6）。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。吸积盘的最内半径不同，辐射的能谱也会不一样，由此可以测量最内半径和黑洞的自旋角动量。1997年，张双南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波段X射线能谱的观测，测量一批黑洞的自转角动量。

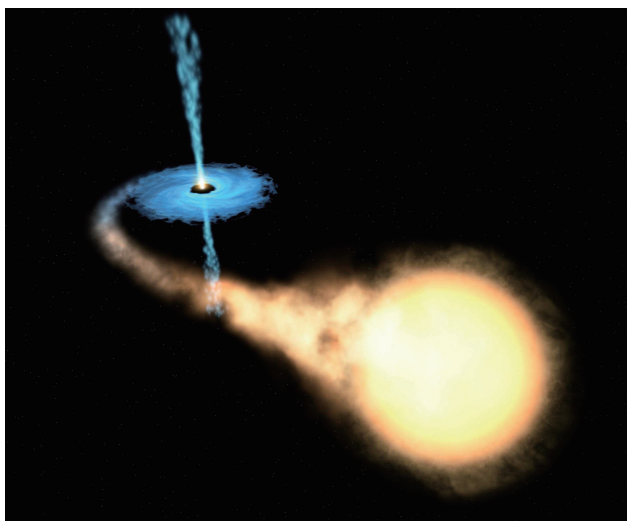


图6 X射线双星示意图，在伴星的物质掉向黑洞或中子星的过程中形成吸积盘，吸积盘上半径越小的地方温度越高。吸积盘的这种性质使得我们可以测量不同能量段X射线的变化，从而了解物质运动的规律以及黑洞和中子星对周围空间的影响

在X射线双星的辐射中，存在着能量为 6.4keV 的铁 $\text{K}\alpha$ 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 $\text{K}\alpha$ 发

射线也会因为多普勒效应而被展宽。对铁 $\text{K}\alpha$ 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射线电荷耦合器件（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 $\text{K}\alpha$ 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射线脉冲星和软伽玛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、周期导数较大。表面磁场强度可能超过量子电动力学的临界磁场强度（ 4.4×10^{13} Gauss），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、短爆发、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。对脉冲星的周期长期监测，有助于我们发现形式更多、表现更丰富的活跃星，从而解决脉冲星（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非常必要。

(4) 监测 $200\text{keV} \sim 3\text{MeV}$ 能区暴发现象，研究伽玛射线暴，寻找引力波暴的电磁对应体。

HXMT卫星高能X射线望远镜主探测器的碘化铯（CsI）晶体厚达 4cm ，高于 200keV 的硬X射线和软伽玛射线光子可能穿透卫星的结构材料，照射到

CsI 晶体上并使之产生荧光，主探测器上的光电倍增管接收荧光，就完成对该光子的探测。在正常工作模式下，主探测器只能测量 600keV 以下光子的能量。为了覆盖更高能区，高能主探测器特意增加了伽玛射线暴工作模式，通过降低光电倍增管的高压，使得对软伽玛射线光子的能量测量可以向上延伸到 3MeV。为了不对正常的观测产生影响，只有在被观测源被地球遮挡的时候，才启动伽玛射线暴工作模式。

模拟分析表明，HXMT 一年可以看到近 200 个伽玛射线暴。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玛射线暴，HXMT 也可以用于寻找引力波暴的电磁对应体。

3. 卫星和有效载荷

HXMT 卫星采用分舱式结构，由服务舱和有效载荷构成。服务舱采用成熟的资源二号卫星平台，主要完成供配电、姿态测量与控制、卫星数据处理、数据下传以及遥控遥测指令的接收和数据发送等。有效载荷即卫星的科学探测仪器，主要用于对天体的 X 射线探测以及空间环境的监测。

3.1 卫星简介

图 7 为 HXMT 卫星在轨运行示意图。有效载荷位于卫星上部，服务舱位于卫星下部。卫星总重量 2700 kg，将运行在高度 550 km、倾角 43° 的近地圆轨道。卫星计划于 2016 年 11 月在酒泉卫星发射基地，采用长征四号乙运载火箭发射，在轨设计寿命四年。

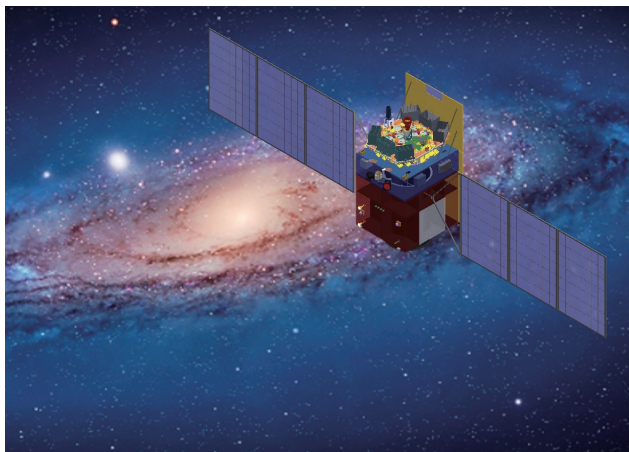


图 7 HXMT 在轨示意图

HXMT 的主要科学任务是对某个天区的扫描成像观测或对某个天体的定点观测。为此，HXMT 采用三轴稳定惯性空间姿态控制模式，指向精度优于 0.1°，姿态测量精度达到 0.01°。在做扫描成像观测时，HXMT 望远镜的光轴将沿着事先规划好的路径慢速运动，覆盖被观测天区；而在定点观测时，望远镜的光轴将指向目标天体保持不动，以获得关于目标天体的在较长时间连续观测数据。

HXMT 卫星绕地球一周的时间约为 96 分钟，一天要绕地球十几圈，在这十几圈中，有约一半轨道要经过南大西洋异常区（South Atlantic Anomaly，简称 SAA）。SAA 区的带电粒子流强非常高，基本无法获得有效的科学数据，而且部分仪器在 SAA 区运行还会造成性能的下降。在 HXMT 卫星上，高能 X 射线望远镜的主探测器高压将在进入 SAA 区时下降至很低的数值，以保护主探测器的光电倍增管，中能和低能 X 射线望远镜在 SAA 区不关闭电源，但是将停止科学数据的采集。

HXMT 探测器探测到天体的 X 射线辐射信号之后，通过电控箱转换成科学数据并经卫星平台下传，地面卫星数据接收站接收到数据之后将送至数据中心进行处理并保存，科学家利用经过前期处理的观测数据即可开展科学研究。图 8 显示了 HXMT 卫星从观测到科学研究的全过程。

3.2 有效载荷

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 9）。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准确的诊断。

3.2.1 高能 X 射线望远镜（HE）

HE 整体结构为圆柱形，包括 18 个 NaI/CsI 复合晶体探测器单体（图 10）。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。但是，除了从

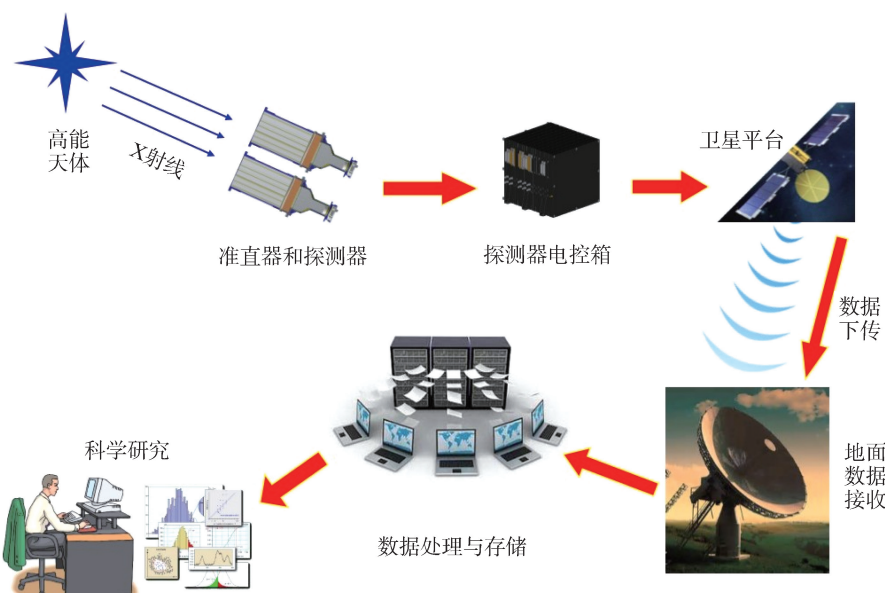


图 8 HXMT 卫星观测即科学研究流程示意图

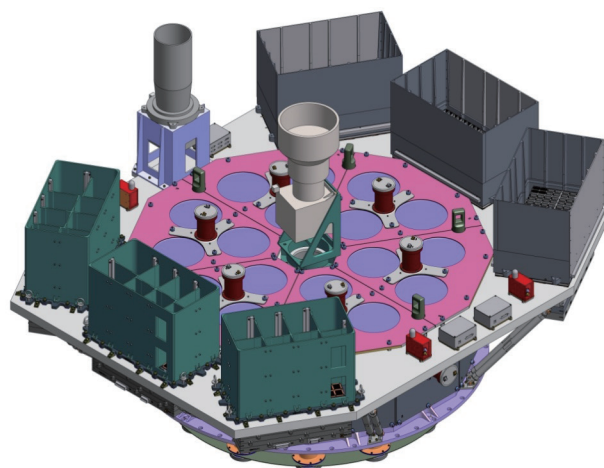


图 9 HXMT 卫星主有效载荷结构示意图。左下角墨绿色的三个机箱为低能 X 射线望远镜 LE，中间为高能 X 射线望远镜 HE，右上角灰色的三个机箱为中能 X 射线望远镜 ME。安置在上安装板上的还有两个星敏感器等。图中的颜色只是为了区分不同的部件，而并不代表真实的表面颜色

被观测天体发出的 X 射线会在探测器上造成信号外，来自于其他方向的 X/γ 射线以及荷电粒子入射到 NaI 晶体上也可能产生信号，构成探测本底。在 HE 的设计中，采取了几个方面的措施，以压低本底计数，提高观测灵敏度。第一是采用被动屏蔽技术，在晶体探测器的上方用高原子序数的钽 (Ta) 做成准直器，在晶体的周围放置钽 (或铅) 屏蔽环，以阻止视场以外的高能光子或荷电粒子入射到晶体上。第二是采用复

合晶体技术，HE 主探测器包括 NaI 和 CsI 两层晶体，其中上层的 NaI 晶体为主晶体，用于探测目标天体的 X 射线，下层 CsI 则可以记录从背面入射的 X 射线。虽然 NaI 和 CsI 的信号均由后面的同一个 PMT 读出，但两种信号的时间特性不同，以 20°C 时为例，NaI 的发光衰减时间为 230 ns，CsI 的典型发光衰减时间为 630 ns，因此从信号的持续时间上可以甄别这个信号的起源。如果一个事例在 CsI 晶体上造成信号，则可以作为本底事例，在进行数据分析时加以排除。第三是采用荷电粒子反符合屏蔽技术。在 18 个 HE 主探测器阵列的顶部和侧面覆盖塑料闪烁体构成的荷电粒子屏蔽探测器，当荷电粒子穿过塑料闪烁体时，由于电离能损在塑料闪烁体中沉积能量，产生闪烁信号，而高能 X 射线与塑料闪烁体的作用截面（包括光电作用截面和康普顿散射截面）非常小，荷电粒子屏蔽探测器对穿过的 X 射线基本无反应，因此，当主探测器和反符合屏蔽探测器同时记录到一个事例时，这个事例极可能是荷电粒子引起的，可以作为本底事例被排除掉。

如前面所述，由于 CsI 晶体的探测数据也传回地面，因此可以将之作为一个硬 X 射线软伽玛射线能段的全天监视器使用，探测伽玛射线暴。

3.2.2 中能 X 射线望远镜 (ME)

中能 X 射线望远镜 ME 包括三个探测器机箱。如

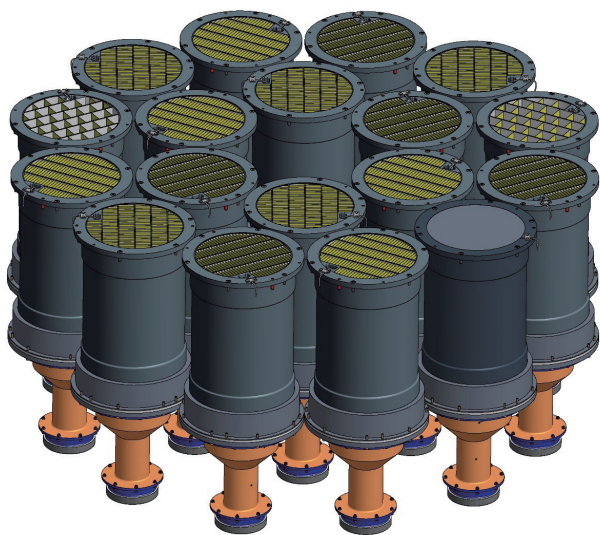


图 10 HXMT 高能 X 射线望远镜 HE 的主探测器阵列，上部为准直器，NaI/CsI 复合晶体在中间，下端为读出 X 射线光子与晶体作用产生荧光的光电倍增管

图 11 所示，每个机箱包含三个可独立工作的模块，由遮光罩、准直器、探测器和前端电子学等部分组成。ME 探测器采用 1728 路 Si-PIN 探测器构成总面积 952cm^2 的阵列，用专用集成电路（ASIC）同时读出多路信号。Si-PIN 探测器的工作原理是：能量为 E 的 X 射线与 Si-PIN 探测器发生作用，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，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。电子空穴对的数目正比于入射 X 射线光子的能量，因此根据读出信号的大小可以推算光子的能量。ME 所用 Si-PIN 探测器为国内自行研制，厚 1mm ，探测能区 $5 \sim 30 \text{keV}$ ，与 LE 及 HE 的观测能区之间有很好的交叉覆盖。

与 HE 相似，来自于其他方向的 X/ γ 射线和空间带电粒子也会在 ME 探测器上造成本底事例，因此 ME 也采取了几项本底屏蔽措施，包括在探测器的前方安装准直器、在探测器机箱内壁贴加薄钽片等，此外，部分本底事例是带电粒子和卫星结构相互作用产生的次级效应，会同时在几路探测器上造成信号，而入射的源 X 射线光子只会在一个探测器上造成信号，因此 ME 还利用了不同探测器单元之间的交叉反符合，进一步降低 ME 的本底水平，提高探测灵敏度。

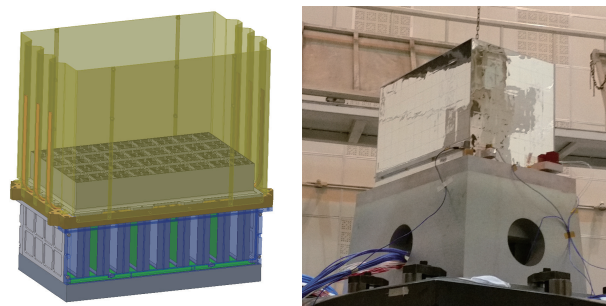


图 11 中能探测器机箱示意图（左）和正在进行力学试验的一台探测器机箱正样（右）

3.2.3 低能 X 射线望远镜（LE）

LE 也由三个探测器机箱组成，每个机箱的结构如图 12 所示，包括遮光罩、准直器、探测器和前端电子学等几个部分。LE 的主要科学目标之一是研究天体在软 X 射线能段的快速光变，要求既具有低的低能探测阈值和高的能量分辨率，又具有高的时间分辨率。LE 因此选用扫式电荷器件（SCD）作为探测器，它是一种特殊类型的 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 1ms ，远小于普通 CCD 秒量级的读出时间。LE 探测的是低能 X 射线光子，它们在探测器上造成的信号很弱，为了降低 LE 的低能探测阈值，提高能量分辨率，SCD 工作在 $-80 \sim -50^\circ\text{C}$ 的低温状态下以降低探测器暗电流造成的系统噪声。LE 安装了热管，可以将 SCD 产生的微小热量传递至遮光罩，再辐射到宇宙空间，以保证探测器的低温工作环境。在 $-80 \sim -50^\circ\text{C}$ 的工作温度下，LE 在 6keV 附近的能量分辨率大约为 150eV ，与钱德拉 X 射线天文台（Chandra）和牛顿 X 射线天文台（XMM-Newton）等国外先进的 X 射线天文卫星相当。为了降低本底水平，提高灵敏度，LE 也采用与 ME 相同的本底抑制措施。模拟计算表明，带电粒子在 LE 上造成的 $1 \sim 6\text{keV}$ 之间的本底几乎可以全部屏蔽或反符合掉，大大提高了 LE 观测宇宙 X 射线辐射的能力。

3.2.4 空间环境监测器 SEM

为了监测 HXMT 卫星在轨的空间带电粒子环境，用于辅助评估 HXMT 主探测仪器的在轨本底并在当仪器出现异常时协助判断造成异常的原因，

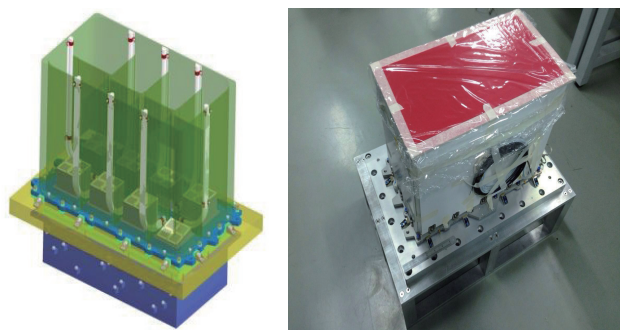


图 12 低能探测器机箱示意图（左）及一台探测器机箱正样产品

HXMT 卫星上也搭载了一台空间环境监测器（Space Environment Monitor，简称 SEM）。SEM 能够监测 $180^{\circ} \times 15^{\circ}$ 范围内的 16 个方向的带电粒子通量，同时分 7 个通道给出总的电子能谱（ $0.4 \sim 1.5\text{MeV}$ ）和质子能谱（ $3 \sim 150\text{MeV}$ ）。

4. 卫星工程进展简介

HXMT 卫星项目最初于 1993 年提出，于 2000 年获得科技部基础研究发展规划（973 计划）的支持，2011 年 3 月，HXMT 卫星正式立项，开始工程研制。2011 年 12 月，转入初样阶段。在初样阶段，完成了电性件（图 13）、结构热控件、和鉴定件的研制。2013 年 12 月转入正样阶段。在正样阶段，完成了所有正样飞行产品的研制、环境试验和标定工作。2015 年 12 月，完成有效载荷正样交付和集成（图 14），2016 年 6 月完成整星大型试验（图 15）。计划 2016 年 11 月在酒泉卫星发射基地发射。

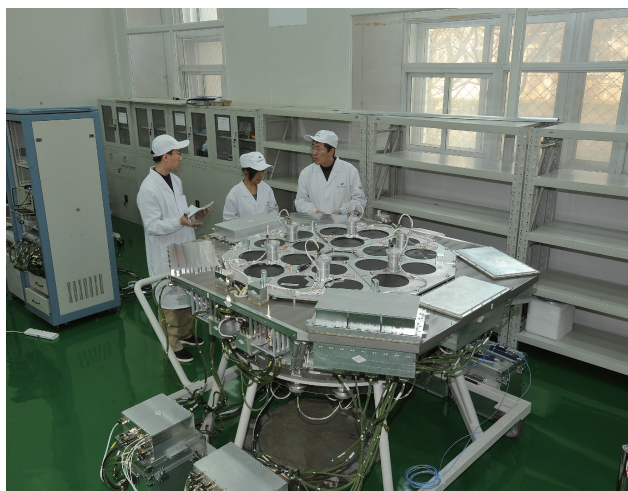


图 13 HXMT 卫星有效载荷电性件联调现场

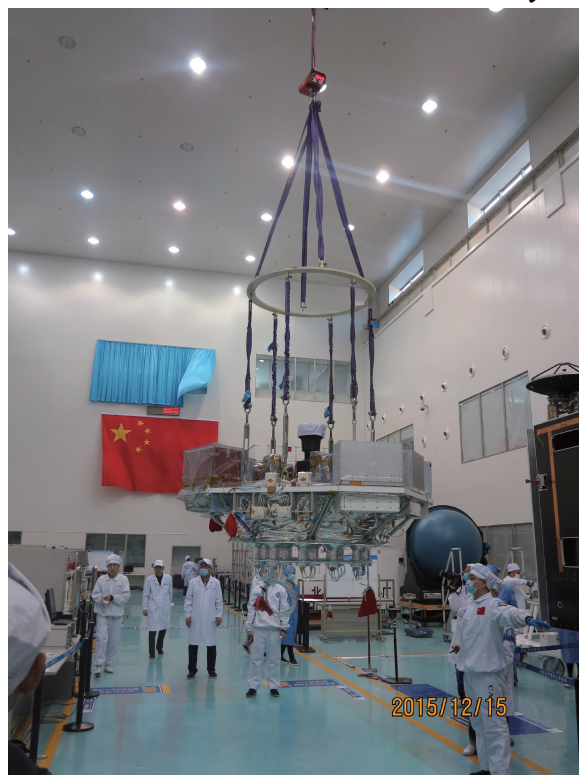


图 14 HXMT 有效载荷正样件往卫星平台吊装现场

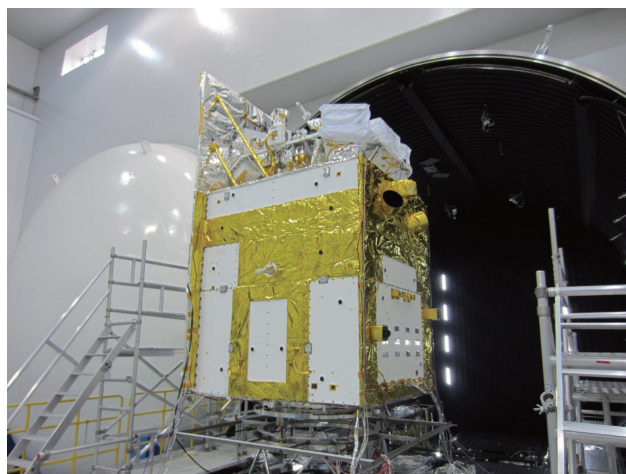


图 15 HXMT 卫星热真空试验进罐前照片

HXMT 卫星由国家国防科技工业局和中国科学院联合支持，中科院高能所、航天科技集团五院、中科院国家空间科学中心、清华大学等单位负责研制。HXMT 的科学数据将向国内外天文学家开放，预期将在大天区高灵敏度快速巡天，黑洞、中子星等天体的硬 X 射线快速光变研究以及剧烈高能爆发现象的监测等领域取得大量原创性科学成果，并带动多波段天文观测的发展。