

HXMT/HE 望远镜的设计和建造

刘聪展*

(中国科学院高能物理研究所 100049)

实证化是现代科学研究方法的重要内容,从天文学的发展历史看,人类对宇宙认识的每一次大飞跃,都是反映旧有的宇宙观的宇宙模型与新的观测结果产生矛盾,或者无法解释新的观测事实,从而被推翻或者修正的过程。天文望远镜是观测天体的重要手段,是推动天文科学发展的最重要的实证手段,可以毫不夸大地说,没有望远镜的诞生和发展,就没有现代天文学。从伽利略 1609 年发明第一台天文望远镜至今,光学望远镜和射电望远镜一直是天文观测最重要的工具,随着望远镜在各方面性能的改进和提高,人类在天文观测的广度和深度两方面都取得了巨大进步。对于比光学和射电波段更高能量的 X 射线天文领域,由于大气的阻挡,空间天体发出的 X 射线是无法到达地面的,因此 X 射线天文望远镜需要放置在大气层外进行观测,这依赖于探空火箭和卫星技术的进步,进展较为缓慢。直到 20 世纪 60 年代人造卫星上天后, X 射线天文学才开始蓬勃发展起来。1962 年美国科学家贾科尼(R. Giacconi)利用探空火箭首次发现了第一个太阳系外 X 射线天体,即天蝎座 X-1,不久又发现了另外两个 X 射线天体,其中一个后来被证实为著名的蟹状星云(Crab)。从此,在光学波段和射电波段之外又开启了一个认识宇宙的窗口。半个世纪以来,人类在该领域取得了巨大的成就,看到了一个布满 X 射线源的天空, X 射线天文学迅速推进着人类对宇宙的认识。

硬 X 射线调制望远镜(Hard X-ray Modulation Telescope, 简称 HXMT)是我国自主研发的第一颗 X 射线空间天文卫星,计划 2016 年 11 月发射升空。在此之前,我国天文学家利用国外的 X 射线望远镜的数据开展了深入而广泛的理论研究和数据分析工作,但是一直没有自主的第一手数据, HXMT 的研制和发射,将彻底改变这一现状,提高我国在 X 射线天文领域的

地位。HXMT 卫星上的高能望远镜(HE)采用复合晶体探测器技术,在 20 ~ 250keV 的硬 X 射线波段对空间 X 射线源进行定点和扫描成像观测,在本文中,将介绍 HE 望远镜载荷的工作原理和设计建造情况。

1. 无机闪烁晶体探测 X 射线的技术

在 X 射线天文观测中,通常把能量范围在 0.1keV 至 10keV 波段的 X 射线辐射称为软 X 射线,把 10keV 至几百 keV 能量范围的 X 射线辐射称为硬 X 射线。与可见光不同, X 射线是无法直接用肉眼看到的,因此需要通过 X 射线与探测器的相互作用的次级效应进行探测。

X 射线在物质中沉积能量的作用机制有三种:光电吸收、康普顿散射和电子对产生,其中电子对产生效应只在入射 X 射线光子能量大于 1.022MeV 的时候才会发生,超出了 HXMT 卫星的观测能区,本文中将不予考虑。对于 HE 望远镜关心的 20 ~ 250keV 的硬 X 射线,其与物质相互作用的主要方式是康普顿散射和光电吸收效应。这两种过程都是入射光子与物质作用时将部分(康普顿散射)或者全部(光电吸收)的能量转换成次级电子的能量,同时入射的光子完全消失或者被散射变成另一个能量较低的 X 射线光子,而产生的次级电子会通过电离和辐射过程将能量全部损失掉。对于一些特殊的晶体材料,电子在其中通过电离使部分原子跃迁到激发态,原子很快的退激(典型时间小于 0.1 μ s)并发射出荧光光子,这种特殊类型的晶体就是在 X 射线探测中经常用到的闪烁体探测器。闪烁晶体吸收能量受激后是按照指数衰减规律缓慢发出荧光光子的,其特征衰减时间称为该晶体的发光衰减时间常数。闪烁晶体发出的荧光光子通常不是单色的,而是在一定波长范围内的连续谱,荧光光子的波长通

* 代表 HE 望远镜项目组全体人员

常与可见光中的绿光、蓝光和紫光的波长相当，肉眼可见，图1给出了几种常用的闪烁晶体的荧光发射光谱。

早在1910年，卢瑟福进行 α 粒子散射实验时，就是通过显微镜用眼睛直接观察 α 粒子在银激活硫化锌荧光屏上激发的微弱闪光进行计数的。直到1947年，Coltman和Marshall首次将光电倍增管(Photomultiplier Tube, 即PMT)用于测量闪烁体探测器受激产生的微弱荧光，这标志着现代闪烁体探测器测量辐射技术的发端。PMT收集荧光光子并转换成电脉冲信号，并且可以证明，该脉冲信号的幅度正比于辐射在闪烁体中沉积的能量，其组成示意图如图2所示。HE望远镜就是利用这一原理，采用NaI(Tl)和CsI(Na)闪烁晶体作为探测器，用PMT作为光电转换器件进行硬X射线测量的。图3是HE望远镜所选用的日本滨松光子学株式会社生产的R877型光电倍增管的照片。

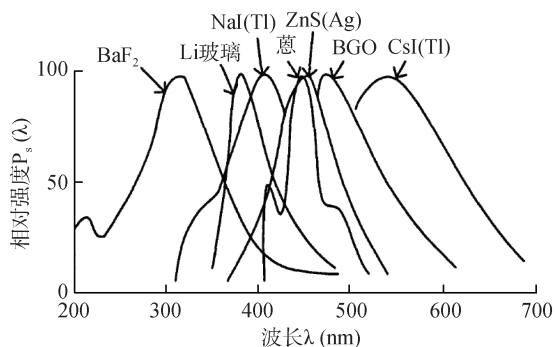


图1 常用无机晶体荧光发射光谱



图2 闪烁体探测器的组成示意图



图3 HE望远镜所用的R877型光电倍增管

2. 调制解调成像技术

用闪烁体和PMT构成的探测器系统解决了测量X射线能量的问题，而对于空间X射线源观测，确定X射线光子的入射方向，即对X射线源所在天区进行成像也同样重要。人们比较熟悉光学望远镜的原理，依靠设计好的镜面制成反射式或者折射式望远镜，收集来自于观测目标的光聚焦在感光底片上形成图像或者用肉眼直接观察。然而对于X射线光子，由于其能量较高，像高速飞行的子弹会直接射入或穿透墙面一样，X射线光子会射入或穿透传统的镜面而无法聚焦。可以想象一下日常生活中站在湖边打水漂的经验，一方面，风平浪静的水面容易打出漂亮的水漂，水面起伏大则很难成功；另一方面，选择扁平的瓦片尽量俯身下去，以与湖面较小的夹角发射出去就比较容易打出漂亮的水漂，出射速度越高，则需要更加俯身压低重心，以更小的角度扔出瓦片，否则瓦片将会直接沉入水中。类似的，设计可以让X射线聚焦的镜面关键之处在于，镜子表面粗糙度要足够低，起伏小，同时X射线光子要以与镜面夹角尽量小的角度入射。1952年德国科学家沃尔特(H. Wolter)发明设计了掠射式镜面，可以实现一定能量范围的X射线聚焦的能力，现在广泛应用于天文观测中。1978年发射的爱因斯坦卫星是首个搭载了大型掠射式望远镜的X射线天文卫星。1999年，由贾科尼提议建造的钱德拉X射线天文卫星(Chandra X-ray Observatory)所用的掠射式X射线聚焦系统将这一技术推向了一个新的高度，可以对10keV以下的软X射线实现聚焦成像。钱德拉卫星的聚焦镜面极其光滑，其表面粗糙度达到了几个原子直径的量级。如果按照这个表面粗糙度将其放大到和地球一样大小，则地球上的最高山的高度只有不足2米高。可以看出，这样的镜面制造难度是非常大的。2012年，美国发射的NuSTAR卫星实现了硬X射线聚焦成像，将能量范围推高到了79keV。

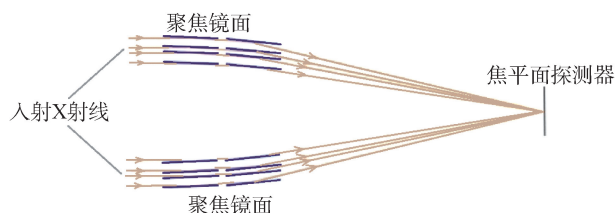


图4 掠射式聚焦望远镜的光路示意图

与沃尔特发明掠射式望远镜几乎同时,为解决空间 X 射线源的定位问题,在美国麻省理工学院 MIT 工作的日本年轻学者小田 (Oda) 于 1965 年提出准直调制方法,只用简单的计数器型的探测器加上准直器就在一次火箭飞行试验中测出了第一个宇宙 X 射线源天蝎座 X-1 的位置。1970 年,自由号 (Uhuru) 天文卫星采用这一技术实现了 $2 \sim 20\text{keV}$ 波段的 X 射线巡天,共发现了 300 多个空间 X 射线源,但是其空间分辨率只能达到 0.5° (与其准直器的视场 0.52° 相当),这与后来的钱德拉卫星 $0.5''$ 的空间分辨率相去甚远。这种准直调制的方法通常具备较大的视场,适合于进行巡天观测,但空间分辨率较差;而掠射望远镜虽然可以得到更高的空间分辨率,但是通常视场较小,更适于定点观测。

图 5 给出了旋转式调制和扫描式调制两种方式的原理示意图。左上图为旋转式调制,通常由两层栅组成,其中一个绕中心轴旋转,这样对于一个固定的 X 射线源,其透过两层栅达到探测器的光子计数率就会受到明显的调制,随着旋转角的变化而变化,如图 5 的左下图所示的曲线。图 5 右上图为扫描式调制,准直器在观测目标附近的区域沿着相互垂直的两个方向扫描式前进,同样,通过准直器达到探测器的 X 射线光子数量会受到调制出现如图 5 右下图所示的典型调制曲线。传统上,采用准直器调制方法进行 X 射线定位和成像分辨率能达到的精度是和准直器的视场相当的,通常在度的量级。

1992 年,中国科学院高能物理研究所的李惕碚院士和吴枚研究员建立了直接解调方法 (Direct Demod-

ulation Method, 简称 DDM), 可以突破传统准直器调制方式的限制,理论上证明了用简单的准直器调制扫描的方式也可以实现高分辨和高灵敏度的硬 X 射线巡天。1993 年,中科院高能所高能天体物理实验室在球载高空飞行试验 (HAPI-4 试验) 中用直接解调方法实现了对恒星级黑洞天鹅座 X-1 (即 CygX-1) 的硬 X 射线成像, HAPI-4 试验采用的就是扫描式调制技术,所用的准直器视场为 $3^\circ \times 3^\circ$, 对 CygX-1 附近 $10^\circ \times 10^\circ$ 的区域进行了 1 个多小时的扫描观测,最终得到了 0.4° 的角分辨率,约为准直器视场的约 $1/10$, 对 CygX-1 的定位精度小于 0.1° (受限于气球平台的指向稳定度)。在 HAPI-4 试验的基础上提出了用成熟廉价的闪烁晶体探测器技术建造高灵敏度和高空间分辨能力的硬 X 射线调制望远镜 HXMT, 实现硬 X 射线巡天的建议。

3. HXMT 卫星高能 X 射线望远镜 (HE)

HXMT 卫星是我国自主研制的一颗大型 X 射线天文卫星,致力于对 $1 \sim 250\text{keV}$ 的 X 射线天体进行宽波段观测,计划于 2016 年底前发射,设计运行于 550km 的近地圆轨道,轨道倾角为 43° ,预期在轨工作寿命为 4 年。为实现宽波段能谱和时变观测需求, HXMT 配置了三种主要载荷,分别是高能 X 射线望远镜 HE, 使用 $\text{NaI(Tl)}/\text{CsI(Na)}$ 复合晶体探测器阵列,负责 $20 \sim 250\text{keV}$ 能区;中能 X 射线望远镜 ME, 使用 Si-PIN 探测器阵列,负责 $5 \sim 30\text{keV}$ 能区;低能 X

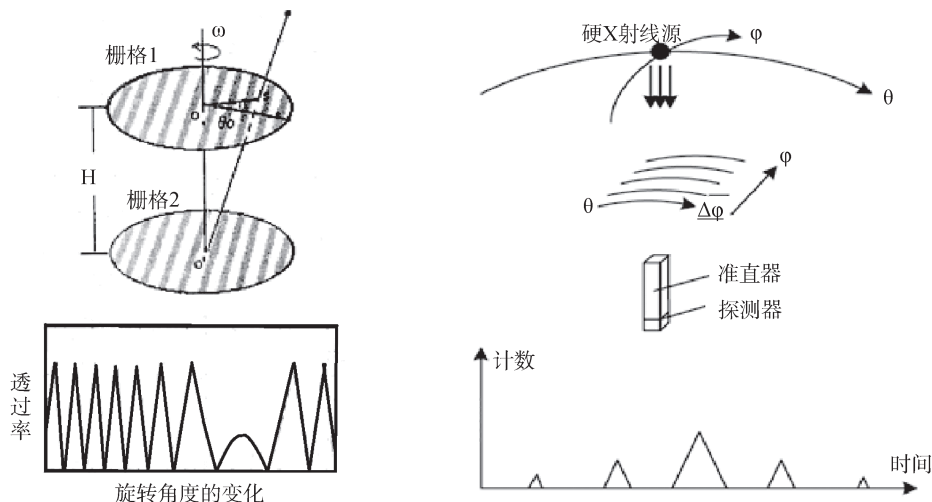


图 5 准直器调制原理示意图, 左图: 旋转式调制; 右图: 扫描式调制

射线望远镜 LE，使用 SCD 探测器阵列，负责 1 ~ 15 keV 能区。三个载荷通过一个支撑结构形成一个整体，其空间指向相同，可对同一个目标同时进行观测。三个载荷的观测能区上下衔接，有一定的交叉覆盖，一方面是为了不同仪器之间的交叉定标，另一方面又可以更精确地测量天体高能辐射宽波段能谱的形状，更详细的介绍见本专题《硬 X 射线调制望远镜卫星及其

科学目标》。本文中只介绍 HE 望远镜的设计和建造。

如前所述，HE 望远镜的整体设计是在 HAPI-4 试验的基础上完成的，采用前文中介绍的闪烁晶体探测器和扫描式准直器调制技术，基于直接解调成像算法反演数据实现高灵敏度和高分辨率的空间 X 射线观测。HE 由主探测器 HED、高能准直器 HEC、在轨标定探测器 HGC、反符合屏蔽探测器 HVT、粒子监测

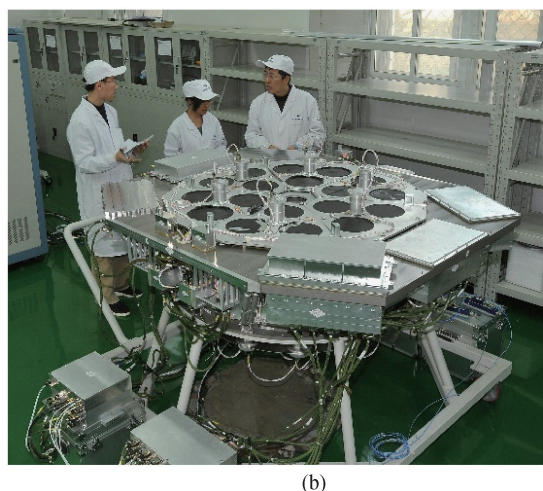
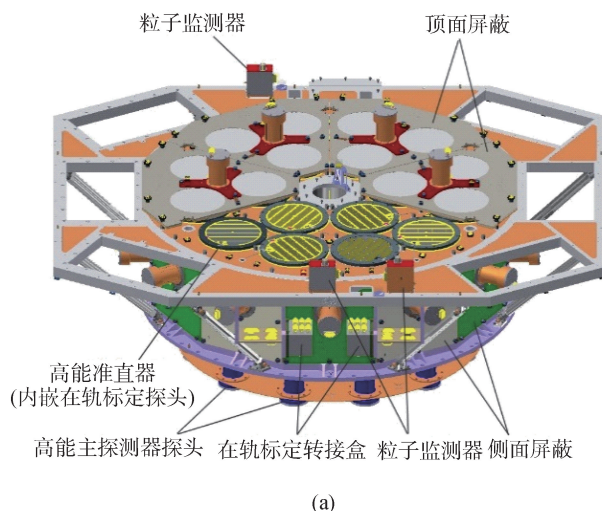


图 6 HE 望远镜，(a) HE 望远镜组成示意图；(b) 各单机集成后联调的照片

器 HPM、高能电控箱 HEB 和高能配电箱 HEA 组成，具有探测器面积大、本底抑制能力强、兼具大视场和高空间分辨的能力，既可以对特定 X 射线源进行定点观测，又可以进行扫描成像观测。HE 望远镜的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 HE 望远镜主要指标

参数	性能指标
观测能区	20 ~ 250keV
探测器几何面积	~ 5000cm ²
主探测器	NaI(Tl)/CsI(Na) ~ 3.5mm/40mm
时间分辨(死时间)	8μs
视场(FWHM)	5.2°×5.2°
能量分辨率	~ (14% ~ 16%)@60keV
最大计数率	>30000 cnts/sec

HED 是 HE 望远镜的主探测器，由 18 个主探测器单体组成的探测器平面，总面积实际达到了 5100cm²，负责完成 20 ~ 250keV 的硬 X 射线探测任务。每个主探测器单体的探测器晶体是由 3.5mm 厚的 NaI(Tl) 晶体和 40mm 厚的 CsI(Na) 晶体耦合在一起组成的复合晶体，NaI(Tl) 晶体在前，CsI(Na) 晶体在后，

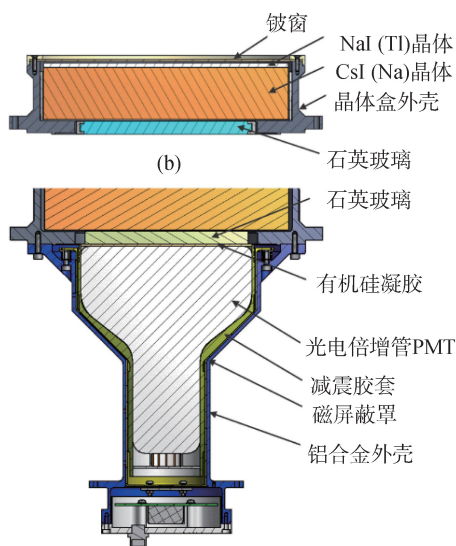
通过一个 10mm 厚的石英玻璃耦合到一个 5 英寸的光电倍增管上，如图 7 所示。

其中薄的 NaI(Tl) 晶体是有效探测晶体，其发光衰减时间常数为 230ns；厚的 CsI(Na) 晶体用于抑制本底，其发光衰减时间常数为 630ns。X 射线光子入射到主探测器上，有的 X 射线光子会将全部能量沉积到 NaI(Tl) 晶体中，如图 8 中的事例 2，称之为 NaI 事例或“好事例”；有的 X 射线光子会把全部能量沉积到 CsI(Na) 晶体中，如图 8 中的事例 3，称之为 CsI 事例；有的 X 射线光子会在两种晶体中都沉积部分能量，如图 8 中的事例 1，称之为康普顿事例或混合事例。其中只有 NaI 事例是需要保留的科学事例，CsI 事例和混合事例都是需要被去除掉的屏蔽事例。因为两种晶体的发光衰减时间常数不同，反映到上述的三种事例经过 PMT 后形成的电脉冲信号的宽度不同，根据最终的电脉冲信号宽度可以将 NaI 事例（好事例）挑选出来，这就是所谓的脉冲形状甄别技术（Pulse Shape Discrimination，简称 PSD）。

在每个主探测器的前方都会放置一个准直器，准



(a)



(c)

图 7 HE 望远镜主探测器, (a) 18 个装星的主探测器单体; (b) 主探测器晶体盒部分剖面图; (c) 探测器单体组成示意图

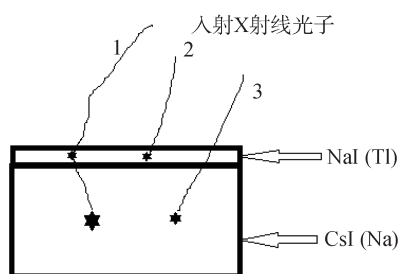


图 8 X 射线入射到 HED 复合晶体示意图

直器整体结构都是由一个铝桶外框和钽片构成的, 根据作用和视场不同分为三种不同的类型: 小视场准直器, 其视场为 $1.1^\circ \times 5.2^\circ$, 共有 15 个; 大视场准直器, 其视场为 $5.2^\circ \times 5.2^\circ$, 共有两个; 全遮挡准直器, 是在小视场准直器的顶面上加贴了一块 2mm 厚的钽板, 只有 1 个。三种准直器的设计, 使得 HE 望远镜整体具备大视场和高空间分辨率的能力, 同时全遮挡准直器可以准确的测量仪器本底, 这样有助于提高 HE 望远镜的观测灵敏度。三种准直器的照片如图 9 所示。

图 6 中配置的反符合探测器对空间的高能带电粒子 (比如电子、质子等) 进行主动屏蔽, 起到抑制本底的作用; 在轨标定探测器是用于保持主探测器的工作稳定, 能够正确的获取入射 X 射线的能量信息; 粒子监测器监视空间粒子流强, 当空间粒子流强过大时提供预警信号, 保护其他探测器的安全。

综上所述, HE 望远镜的核心是包含在 18 个主探测器单体中的 3.5mm 厚的 NaI(Tl) 晶体, 其他各探测



图 9 装星用的三种准直器及部分研制人员

左: 大视场准直器; 中: 小视场准直器; 右: 全遮挡准直器

器及结构是都用于辅助压低本底或者保持主探测器安全的, 最终能够正确测量入射的 X 射线光子, 由此反演空间 X 射线源的准确信息, 包括其辐射能谱、流强定位、甚至是结构分布等。

4. 总结与展望

HXMT 卫星将于 2016 年 11 月发射, 这将是我国第一台空间 X 射线天文卫星, 其中的 HE 望远镜经过多年的技术攻关, 在扫描成像算法及仪器研制方面都实现了国产化, 是一台真正建立在原创的算法思想, 具备自主知识产权的空间天文望远镜。HE 望远镜的复合晶体探测器在 $20 \sim 250$ keV 能区是目前已有的空间天文卫星中探测面积最大的, 具备对空间 X 射线源进行快速光变、能谱及扫描成像观测的能力, 预期也将在伽玛暴监测等方面取得一大批原始观测数据, 进而产生一批原创的科学成果。