

# HXMT 卫星的观测规划与数据处理

郑世界 宋黎明 屈进禄 贾淑梅 张娟 李小波 赵海升 黄跃 聂建胤 张红梅

(中国科学院高能物理研究所 100049)

HXMT 卫星在轨运行期间，需要开展一系列的空间观测，以便对天文现象进行研究。空间探测涉及到多个过程，需要考虑多种因素的约束，本文将详细给出从观测任务的提出，到任务安排、数据处理及科学分析的全过程。

## 一、引言

硬 X 射线调制望远镜 (HXMT) 是我国首颗 X 射线天文卫星，卫星发射升空后，预期在轨工作四年。在此期间，为实现预期的科学目标，将开展一系列的空间 X 射线探测，通过对这些观测数据的处理分析，开展宇宙 X 射线天文学的研究。

HXMT 卫星在轨期间的科学观测和数据处理主要通过地面科学中心来具体实施，其主要的过程如下图所示。

所示。

**观测提案的征集：** HXMT 的科学用户包括核心团队的成员、国内外知名学者以及广泛的天文研究人员。由这些科学用户针对 HXMT 的特点和优势，提出所要解决的科学问题，并给出具体的观测目标及观测需求，即观测提案。这些观测提案经过评审和遴选，最终制定出 HXMT 的具体观测任务，并将安排卫星实施具体的观测。

**观测的规划和执行：** 观测提案遴选完成后，下一步需要制定相应的观测计划，并通过测控系统转换为具体的观测指令，操作卫星进行具体的观测。在制定规划过程中，我们需要根据卫星在天上的实际运行情况和在轨观测的限制条件，合理安排观测计划，以最大化地利用卫星的有效观测时间。

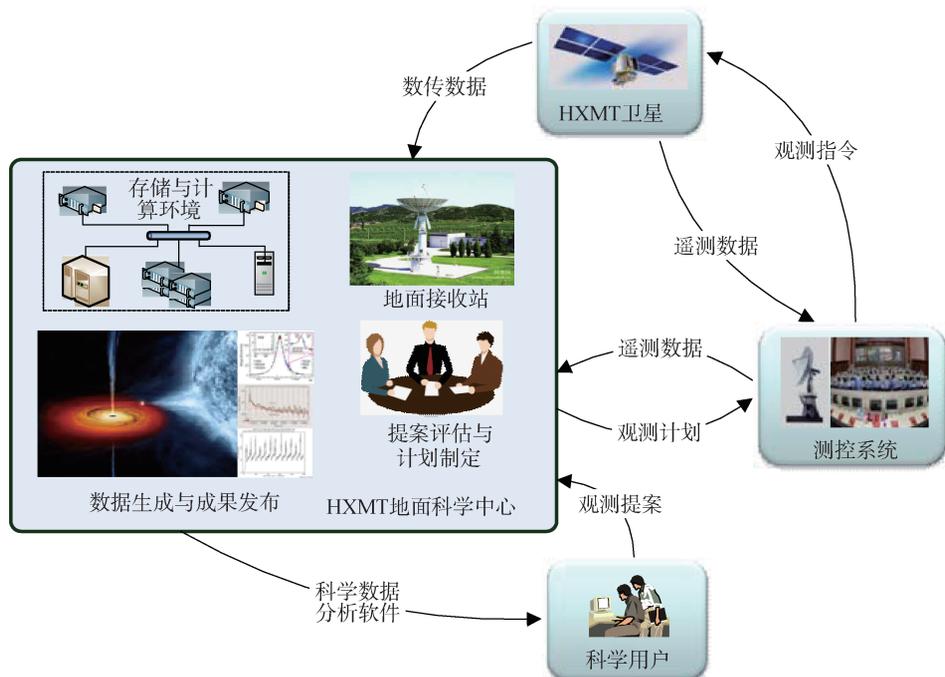


图 1 HXMT 卫星在轨期间科学观测和数据处理流程的示意图

数据的下传与数据产品生成：卫星完成观测后，通过地面观测站将观测数据下传至地面，然后工作人员使用数据处理软件对这些数据进行处理，生成可供科学用户使用的通用格式，即标准数据产品，以便进行下一步的科学分析工作。

数据分析与成果发布：对得到的标准数据产品进行完整准确的处理分析，以产生有意义的科学成果。HXMT 的观测数据会对外界公开发布，供科学用户使用；另外，HXMT 产生的重大科学成果，也会及时对外公布。

空间本底与标定：空间本底与标定是天文观测数据分析中及其重要的两项工作。由于空间环境十分复杂，在观测数据中产生大量的噪声，即空间本底，因此，在实际的数据处理时必须对空间本底成分进行准确的分析处理。另外，卫星探测得到的数据是天体源辐射经过探测器的仪器响应后产生的信号，为了得到宇宙中天体真实的性质，就必须确定仪器的响应，即仪器的标定。

## 二、观测提案的征集

观测提案指的是科学用户根据科学研究的需要提出的，利用卫星对某个（或多个）天体源进行观测的申请。观测提案需要给出科学研究的内容和意义、天体源、所需的观测模式及观测时长等内容。

针对空间 X 射线的探测，HXMT 设计了两种观测模式：定点观测模式和银道面扫描巡天模式。定点观测模式下，卫星将采取三轴稳定的方式对准空间某一指向进行长时间观测，这种情况下，我们可以获得宇宙中这些已知天体源的高精度能谱、时变信息，从而对其性质进行详细的研究。银道面扫描巡天模式下，卫星将对银河系进行持续的大天区扫描观测。银河系的银盘面和核心区域存在着大量的 X 射线天体源（如中子星和黑洞 X 射线双星等），这些 X 射线源大部分是变源，会不定期的发生剧烈爆发现象，对这些爆发现象的研究将有助于我们深入理解这些遥远天体的内部结构、辐射特性等。通过银道面扫描巡天，我们将能够及时探测到这些天体源的爆发现象，并与国内外的相关观测设备进行多波段联合观测（如射电、红外、

光学、紫外、X 射线、 $\gamma$  射线等）。同时，对银道面的扫描巡天，还将会新发现一批未知的 X 射线天体源。

为充分发挥空间探测设备的科学探测能力，将其科学产出最大化，1978 年美国爱因斯坦 X 射线望远镜（也称 HEAO-2）首次提出了客座观测提案的概念，集整个天文学界的智慧征集科学观测目标，以充分发挥望远镜的科学潜力。之后，国际上大多数天文卫星也都面向世界范围征集提案。HXMT 也将遵循此惯例，面向国内外的科学用户进行观测提案的征集。一方面，我们将组建核心科学团队，针对 HXMT 卫星的独特优势（如探测面积大，探测能段宽等），提出 HXMT 的重点观测目标，以便实现其核心科学目标，这部分将成为核心观测提案。另一方面，科学用户还可以根据自己的研究内容，提出相应的观测需求，来实现自己的科学研究目标，这部分将成为客座观测提案。这些观测提案一旦获得评审通过（即提案评估），HXMT 将会根据提案者的需求开展实际观测。

HXMT 每个运行年度前，科学委员将会制定卫星观测策略及时间分配计划，然后对外发布“机会公告”（即 AO 公告），对外告知提案征集的时间及内容，然后面向国内外进行提案征集。提案征集完成后，将对这些提案进行评估、遴选及分级，来最终确定 HXMT 的观测任务。

对提案的评估分为两部分内容，技术评估和科学评估。技术评估主要考虑这些观测目标是否具有技术可实现性，如观测时间安排是否合理、观测效率是否足够高、观测方案是否可行等。科学评估由科学委员会组织专家进行科学意义的评估，主要考虑：是否适合 HXMT 的观测，能否达到预期科学目标等。根据上述两项评估的结果对提案进行汇总、评级，以便接下来进行观测规划工作。

## 三、观测规划

观测提案遴选完成后，需要制定相应的观测规划，以便安排和实施观测。观测规划的主要目标是在满足卫星安全运行约束的前提下，寻找适合卫星观测的时间段，确定卫星的观测参数，如指向、姿态、工作参数等，以最大化观测效率。重点需要考虑两方面的内

容，一个是观测限制，即能否安排 HXMT 卫星开展观测任务；另一个是观测效率，即如何最大化地利用观测时间。

(1) 观测限制

卫星在地外空间运行时，它的姿态指向主要通过安装在卫星上的多个星敏感器来确定，星敏感器的工作条件要求其指向与太阳方向的夹角（如图 2 所示  $X$  方向和太阳方向的夹角  $\theta$ ，即太阳避免角）大于 45 度。

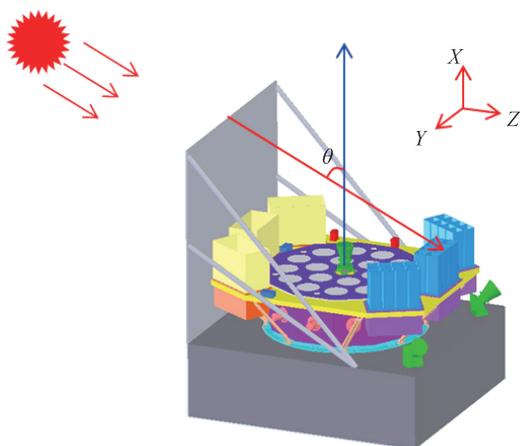


图 2 太阳避免角示意图

另一方面，HXMT 的中能和低能望远镜为硅基半导体探测器，这要求其工作在低温条件下，如果它们被太阳直接照射到而升温，会造成探测器探测性能下降甚至损坏。如图 2 所示，当太阳方向与探测器指向方向的夹角小于 70 度时，太阳光将越过左侧的遮阳板而直接照射到探测器上面，因此此类观测是不被允许的。为此，要求观测目标的太阳避免角大于 70 度。

由于地球围绕着太阳的公转周期为 1 年，对某一

观测源来说，其方向与太阳的夹角  $\theta$  也会在一定范围内变化，如图 3 所示。因此对某一个观测源来说，在一年内只能在某一段时间内可以有效观测，其他时间段内不能进行观测。因此，我们通常以 1 年为一个周期统筹和规划年度观测任务。

(2) 观测效率

在绝大多数情况下，HXMT 的观测效率不能达到 100%。这是因为在观测实施过程中会受到地球遮挡和南大西洋异常区 (South Atlantic Anomaly, 简称 SAA 区) 的影响。

地球遮挡：HXMT 是一颗低轨道卫星，轨道高度为 550 公里，因此卫星的半张角达到 67 度（如下图所示），如果考虑到大气层的影响以及卫星上准直器视场的影响，此角度要达到 83 度。在进行观测时，有一段时间会被地球遮挡，从而无法观测。

SAA 区的影响：在 SAA 区存在很强的质子、电子等高能粒子流，若在此区域依然正常进行观测，则会对探测器造成损伤。为此，当卫星经过 SAA 区时切换进入安全保护模式，在此期间不能开展正常的科学观测。

以一个著名的超新星遗迹 Cas A 为例，图 5 给出了它在 2014 年 1 月 1 日到 2014 年 12 月 31 日一年中的观测效率（蓝线实线）与太阳避免角（绿色虚线）。图中观测效率为 0 的时间段对应其不可观测期，即右侧纵坐标太阳避免角小于 70 度对应的区域；图中峰值处对应观测效率最高的观测时间段，每个峰值大约持续十几天。因此在做观测规划时，应尽量将其安排在观测效率峰值期间进行观测。

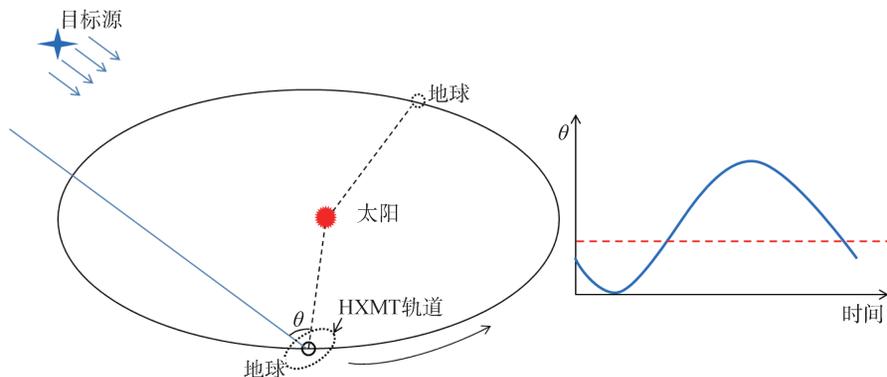
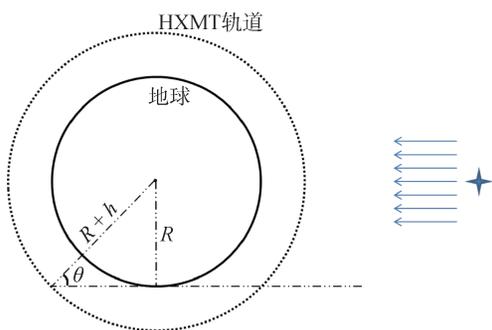


图 3 太阳避免角随地球运动的变化示意



$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{R}{R+h}\right)$ , 其中  $R$  为地球半径,  $h$  为卫星轨道高度。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{6371}{6371+550}\right) = 67^\circ$$

图4 地球遮挡示意图

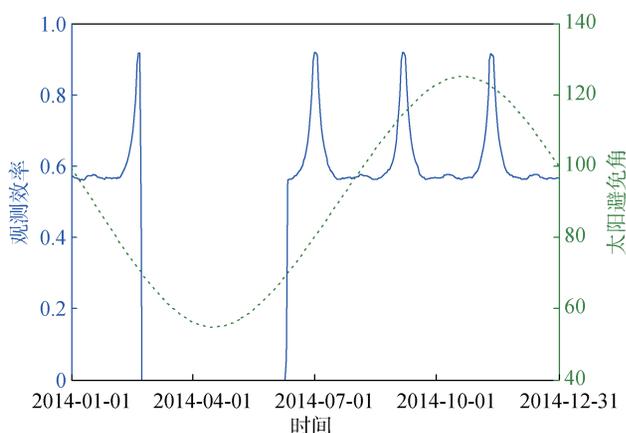


图5 CasA 在一年中的观测效率曲线

### (3) 观测规划

根据 HXMT 的科学规划, 每年约需开展大量的科学观测, 这些观测任务类型各异, 观测需求也不尽相同。例如, 对于某些双星系统, 它的辐射特性会随着伴星绕中间的主星转动而变化, 因此需要在特定的“时间窗口”下进行观测; 另外, 针对多个卫星或地面设备的联合观测时, 观测时间必须固定在一个确定的时间段内。

在各类卫星约束及观测效率的要求下, HXMT 年度观测任务规划是一个多目标、多约束的庞大又复杂的最优化问题。需要考虑在满足各种观测需求的情况下, 通过合理安排观测计划, 使得观测效率最高, 即卫星的有效观测时间最长。卫星一年运行的运行时间是 3 千多万秒, 观测效率仅仅提高 1% 即可节省出 30 万秒的观测时间, 可增加数个观测项目, 得到更多的科学产出。

为此, 我们建立了该问题的数学模型, 并在此基础上提出了一种贪婪算法加遗传算法的复合求解方法, 来得到一个最优化的观测序列, 即每一个年度观测任务都被安排在一个合适的时间段进行观测, 这就是长期观测计划。

在具体执行观测任务时, 需要在长期观测计划的基础上细化出更为具体的观测活动, 即制定短期观测计划。短期观测计划的观测周期通常为 1 周, 具体规划内容包括: (1) 确定每一个目标源的观测模式及观测的开始时间和结束时间; (2) 从一个目标源转向另一个目标源时, 确定卫星姿态调整的时间和方式;

(3) 综合考虑星上数据的存储状态和地面数据接收站(北京、三亚、喀什)的接收能力, 及时安排科学观测数据的下传与接收。短期观测计划是一系列卫星可具体执行的指令, 由测控系统上注卫星, 通过地面数据接收站的配合, 可获取完整的科学观测数据。

通过长、短期观测计划的相互承接与配合, 充分利用卫星的观测时间资源, 实现了观测效率的最优化和最大化, 为实现和扩展 HXMT 的科学产出和科学目标的提供了重要保障。

## 四、数据产品的生成

国际上天文观测数据大都面向全世界公开, 供所有科学用户使用。卫星观测数据的处理是一个非常复杂的过程, 需要进行多种的转换和修正工作。为减轻普通科学用户数据处理的负担, 空间天文观测试验逐步发展出了一套标准化的数据处理方法。由空间天文观测的负责单位提供标准的观测数据产品, 并提供数据分析软件, 帮助普通科学用户完成和观测仪器、观测运行有关的数据处理。一旦完成这些处理, 普通用户可以使用通用的空间天文数据分析工具完成数据分析, 得出物理结果。

同时, 为了便于不同卫星的数据分析与交流, 天文观测数据产品都采用相同的存储格式, 称为灵活图像传输系统。它是一种涵盖文本、字符与二进制的文件, 俗称 FITS 文件。它的原型始于 1976 年, 由于其格式统一, 便于在各类不同计算机及操作系统下使用, 在天文界得到普遍使用, 并在 1982 年由国际天文学会指定作为天文数据存储的标准格式。HXMT 观测数

据同样也将采用 FITS 格式。

卫星在观测计划执行完后，所获观测数据会被打包并保存在卫星上的数据存储空间里，当卫星在轨运行中经过地面上的接收站时，会通过数传天线将星上存储的数据下传至地面站。下传数据主要包括科学探测数据、工程类数据以及一些辅助数据等。星上存储空间非常有限，为了节约资源，这些数据在星上存储时都已经进行了高度压缩和打包处理。地面数据接收后首先需要进行相应的解包处理，并对这些下传数据进行拼接、去重复、校验等处理，得到实际的观测数据。接下来，还需要把这些数据做进一步处理，形成符合国际天文界通用的标准和格式的标准数据产品。标准数据产品对外发布后，科学用户就可以使用相关的用户分析软件和数据处理工具对其进行直接处理，以实现科学研究。

## 五、空间本底及标定过程

### (1) 空间本底

HXMT 是一个准直型的 X 射线望远镜，在 X 射线探测器前端装配了一套蜂窝状的结构，即准直器。准直器的作用是限定天区的探测范围，即只有在准直器方向一定范围（视场）内的辐射信号才能进入探测器，从而排除了来自于其他区域的天体源的信号影响。然而在宇宙空间中除了天体源的信号会被探测器探测外，弥漫在整个空间的星际介质以及各种粒子（质子、

电子、光子、其他粒子等，如图 6 所示）也会与探测器发生相互作用而产生探测信号，并被记录在对指定天体的观测数据中，这些信号统称为空间本底（也称为背景）。这些本底信号的强度可能会是观测源信号的 10 倍乃至 100 倍以上，使得真实的观测信号被“淹没”在本底中。对观测数据进行分析时，必须考虑这些本底信号的影响，以便获得准确的真实信号。

在实际的空间观测过程中，空间本底的来源包括宇宙线、太阳风、SAA 区粒子及地球反照粒子等。对于 SAA 区，由于地磁场在这个区域内形成一个凹陷区，磁场总强度低于同纬度正常区域磁场的强度一半左右，此处荷电粒子（质子、电子等带电粒子）的辐射通量很大，会对仪器响应产生很大影响，虽然 HXMT 在经过 SAA 区时会停止工作，但是由于高强度的辐照会在与探测器相互作用时产生次级粒子，并且会使仪器上某些材料发生活化反应变成放射性同位素，即使卫星离开 SAA 区后的一段时间，这些放射性同位素或次级的不稳定子核衰变仍会对本底信号产生贡献，这部分就是活化本底。因此，在某个时间点 HXMT 的本底就是弥散 X 射线本底和空间粒子在仪器上产生的实时本底，以及此时刻之前所有辐照所产生的活化本底的叠加。

如图 7 所示，我们模拟了 HXMT 卫星在轨运行 100 天后的空间本底情况，从图上可以明显看出，

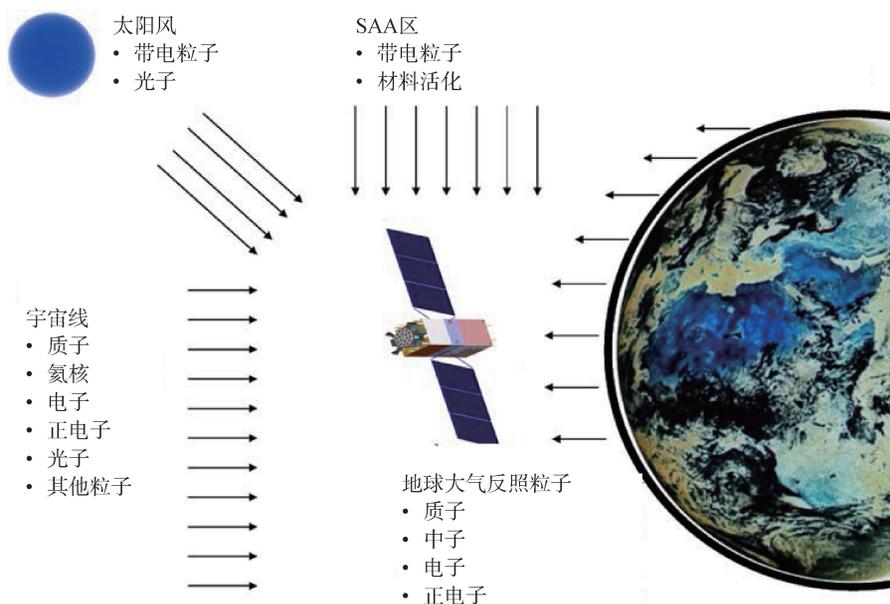


图 6 空间本底示意图

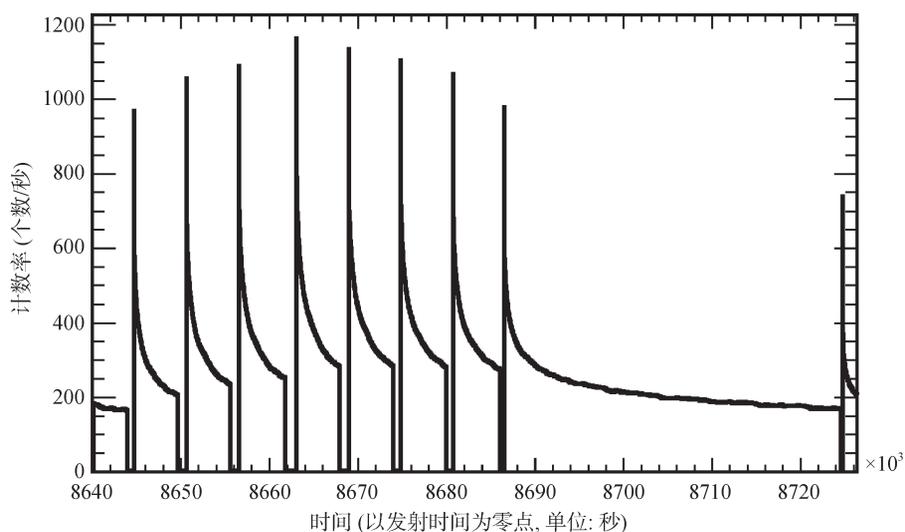


图7 HXMT 卫星在轨 100 天后的空间本底模拟结果

HXMT 的空间本底会随时间变化。特别地，图上的尖峰表示卫星经过 SAA 区后本底都会剧烈升高，其后逐渐降低，说明活化本底的影响是很显著的。由于卫星轨道的进动，每运行一圈所经过 SAA 区的时间长度不同，所以不同时间本底的变化程度也大有不同。

对于这些空间本底，在望远镜设计时就考虑了通过主动屏蔽和被动屏蔽两种方法来抑制本底。主动屏蔽主要是通过探测器及其反符合策略排除掉一部分粒子本底事例，被动屏蔽主要通过屏蔽材料本身阻挡空间粒子作用到探测器上，如 HXMT 的准直器选择对光子和质子吸收系数比较大的钽和铝等材料。利用这些方法可以大大降低空间本底计数，但仍会有一些量的本底事例混在真实信号里面。

为了准确估计这些本底的影响，HXMT 采用了独特的视场设计，即高、中、低能望远镜上都存在多个不同大小、不同方向的视场，如大视场、小视场及全遮挡视场（即将视场完全遮挡），并建立了与之相对应的本底估计方法：组合视场法和偏轴观测法。

**组合视场法：**利用不同的视场下的不同测量结果来计算实际空间本底。在实际观测时，全遮挡视场下的探测器由于视场被遮挡，无法探测来自视场里的信号，只能探测到穿透探测器外面的结构到达的本底计数；大小视场下探测器计数的差别，反映了通过不同视场进入探测器的本底的大小。因此可以通过不同视场的组合及相关性得到本底估计。

**偏轴观测：**利用一部分探测器只探测本底，另一

部分探测器探测目标源和本底，最终得到本底和目标源估计的方法。利用 HXMT 的视场设计，可以通过卫星的转动，使得目标源只出现在一部分的视场中。这样，另一部分视场中由于没有目标源，其探测数据只包含本底的信息，同样地，利用不同视场的相关性可以得到其他视场内的本底估计，可以分别得到本底和目标源的信息。

## (2) 光子探测过程与标定

HXMT 的三个主载荷均为 X 射线探测器，上天后的主要任务就是探测天体源放出的不同能量 X 射线光子。这些原始的光子在进入探测器后，与探测器发生相互作用，最终会转换为电信号被记录下来。具体的探测及信号读出过程会因探测器不同而各异（具体可参见 HXMT 不同载荷的探测原理），为了得到入射光子的真实信息，必须对不同的探测器进行标定。标定就是针对不同探测器给出不同能量、不同方向来的光子在探测器上留下的信号特征，从而反推入射光子的性质。

实际的标定过程包括地面标定和在轨标定两部分。HXMT 专门建立了配套的地面标定装置来完成地面标定工作。利用放射源的特征线和 X 射线光机产生的单能 X 射线光子对高、中、低能三个望远镜进行标定，分别得到不同探测器能量与能道关系、能量分辨率、探测效率等，进而生成不同能量光子的有效探测面积和能量响应矩阵文件。标定实验过程中，由于只能在部分能量点上进行，为了获得整个能段的标定数据，还需要与蒙特卡罗模拟方法相结合，建立探测器

的响应模型，确定模型参数，从而获得探测器在整个探测能量范围的有效面积和能量响应矩阵。

卫星发射后，由于空间辐射环境及发射过程中的其他影响，可能会导致探测器性能发生变化；同时，随着时间的变化，探测器性能也会发生改变，因此我们还需要定期进行在轨标定。利用卫星自己携带的放射源、已知的标准天体源（如蟹状星云脉冲星）、已知天体发射的特征 X 射线等，可以对探测器进行进一步的标定，更新标定结果。

## 六、观测数据处理与分析

通过在轨观测得到的数据一般不能直接用来进行数据分析，这是因为探测器的工作状态并不完全一致，也就导致其具有不同响应，所以不能简单的将观测数据加在一起，另外随时间变化的空间本底、卫星及地球运动带来的多普勒效应等各种因素等混杂在一起，必须经过一整套的数据处理流程，才能得到具有真实物理意义的结果。

对于空间 X 射线探测数据的处理，目前国际上已经形成了统一的处理框架，即 Heasarc 档案库，给出了相应的数据存储标准、软件分析标准以及通用数据分析软件。它由美国航天局戈达德飞控中心于 1990 年建立，用于处理、存档高能天体物理的空间观测数据，涵盖紫外、X 射线和伽玛波段的天文数据。世界上正在运行的高能天文卫星，例如钱德拉 X 射线天文台（Chandra，美国）、核光谱望远镜阵列（NuSTAR，美国）、国际伽玛射线天体物理实验室（INTEGRAL，欧洲）等，几乎都采用了 Heasarc 档案库及其通用处理软件框架。在这个框架下，可以为科学分析提供了标准化的处理流程。同时，由于不同卫星的设计和运行不同，各个卫星必须加入自己独有的处理软件来进行前期的数据处理。

为了便于和国际上其他卫星的交流与结果比较，HXMT 的数据分析软件也是基于 Heasarc 软件的框架开发出专用于前期数据处理的软件 HXMTDAS，完成数据的筛选、数据刻度、时间修正等处理流程。

### （1）事例筛选

事例筛选的任务是利用好时间段（即能正常观测的时间段）、坏探测器信息以及不同的事例等级等信息对原始的光子事例进行筛选，选择出符合要求的光子事例。

卫星运行中会受到空间环境的影响，这些影响主要包括：卫星经过 SAA 区及出 SAA 区后的一段时间内粒子本底特别高；当卫星的视场受到地球的遮挡时，观测数据中没有目标源的光子数据；卫星在太阳光照射区时，如果视场离地球边界较近，太阳弥散光子会大量进入载荷的视场，从而淹没源信号。这些时间段的数据不能用于做物理分析，必须将这些数据剔除。另外，某些探测器可能因为受到空间辐射而损坏，它们产生的数据也不能用于做物理研究，因此也需要将这部分事例筛选掉。

### （2）数据刻度

在实际观测数据中，记录的是入射信号在电子学系统中得到的脉冲幅度信息，即能道，数据分析中对能道进行刻度，以得到准确的的光子能量。但是，能量和能道之间的关系，还受到温度、电压等影响，并且与时间关联在一起，所以我们需要将与温度、时间关联的能道转换为与任何因素无关的“标准能道”（PI），PI 反映了真实光子的信息，并与温度、时间无关。后续将产生与 PI 对应的能量关系文件等。

### （3）死时间修正

当一个 X 射线光子事例入射到探测器时，其触发在电子学的处理过程中将无法对其他的光子事例进行记录，这段时间称为“死时间”。由于死时间的存在，我们记录的一段时间内的光子计数会小于真实值，因此我们需要将由于死时间而带来的这种效应去除，得到真实的光子计数，即是死时间修正。

### （4）太阳系质心修正

空间探测器探测并记录下 X 射线光子的到达时间，这些信息反映了天体源的辐射特性。但由于卫星和地球在太阳系内的运动，光子到达时间还受到探测器所在位置、光子在太阳系内传播时的广义相对论效应（如时钟延缓、光线偏折等）以及不同时间系统（如地球时、太阳系质心力学时、太阳系质心坐标时等）之间转换的影响。因此，需要将探测到的 X 射线光子到达时间进行修正，消除上述效应，并将之转换到太阳系质心位置处的到达时间，即太阳系质心修正，如图 8 所示。由于太阳质心坐标系可以看做一个理想的惯性参考系，经过该修正后可得到天体源固有的时变特性。

### （5）能谱与光变曲线的产生

对观测数据做上述步骤并利用第 5 节所介绍的空

间本底和标定过程处理之后，就产生了包括计数谱（光子计数随探测器能道变化）、光变曲线（光子计数随时间的变化）、探测器响应文件以及对应的本底文件，之

后就可以利用 Heasarc 中的分析工具如 xspec 进行计算，得到源的能谱信息（例如黑体辐射参数、发射线信息、各个辐射成分的强度等等）和光变信息（例如脉冲星周

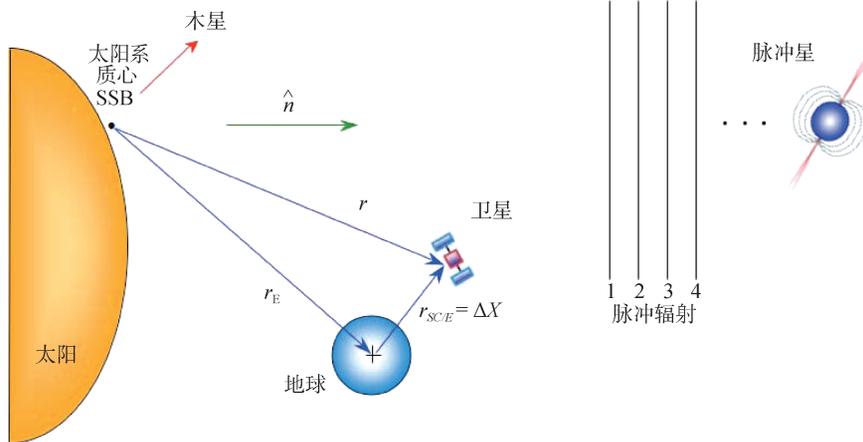


图 8 质心修正示意图

期、双星轨道周期、辐射的准周期震荡、不同光子能量光子到达观测者的时间顺序等）。通过这些信息可以进一步研究辐射源的辐射机制、天体结构及演化等。

有代表性的问题，形成 FAQ（常见问题），帮助用户节省时间。

## 七、用户支持

HXMT 为科学公众在其使用相关软件、提交提案等工作的过程中发现的问题、疑问、建议提供解决措施和支持。用户可以选择在线帮助、提问、建议三种方式与科学家沟通和互动。当科学公众的提问积累到一定程度，科学家会将这些问题分类汇总，从中挑选

## 八、小结

目前，HXMT 卫星进入发射状态，即将开始在轨运行；科学观测规划与数据分析工作已处于就绪状态；HXMT 已经开始征集科学观测提案，其后 HXMT 地面科学中心将制定出详细的观测计划进行在轨观测，期望 HXMT 获得丰硕科学成果，为天体物理的发展作出贡献。



## 科苑快讯

### 长寿电池

你是否为电池寿命太短而烦恼？加州大学欧文分校（University of Irvine in California）的 May Le Thai 和同事带来一个好消息。二氧化锰纳米线制成的纳米线电容涂一层聚甲基丙烯酸甲酯凝胶电解质，弯曲后就能可逆地储存能量，充放电 20 万次无衰减。也就是说，你可能永远不再需要更换电池。



（高凌云编译自 2016 年 5 月 20 日《欧洲核子中心快报》）