

HXMT 主探测器磁屏蔽设计与实验结果^{*}

董永伟^{1,2;1)} 熊少林^{1,2} 李延国¹ 张永杰¹ 吴伯冰¹ 何会林¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 硬 X 射线调制望远镜 (HXMT) 致力于实现硬 X 射线的高灵敏度巡天观测, 描绘硬 X 射线天图, 并对特殊天体作高灵敏度连续观测, 得到其辐射的能谱和时间变化等. 为了减少空间磁场对观测的影响, 确保本底计数的稳定性和能谱测量的精度, 我们用坡莫合金制成的磁屏蔽罩对 HXMT 主探测器的光电倍增管 (PMT) 进行了磁屏蔽处理. 实测表明, 在地面地磁场环境下 PMT 的最大增益变化幅度为 6%; 它与自动增益控制系统配合能使在轨 PMT 增益变化幅度小于 1%, 探测器本底计数变化小于 0.1%.

关键词 硬 X 射线调制望远镜 磁屏蔽 光电倍增管

1 引言

空间硬 X 射线调制望远镜 HXMT 项目是基于直接解调方法^[1], 采用简单可靠的成熟技术、非位置灵敏探测器建造的高灵敏度硬 X 射线望远镜. HXMT 望远镜将致力于实现硬 X 射线波段 (20—250keV) 的高灵敏度、高分辨率的巡天和定点观测, 对感兴趣天体进行长时标能谱分析和时变分析, 研究致密天体、黑洞强引力场中的动力学和高能辐射过程, 研究早期宇宙的高能过程.

HXMT 的主探测器由 18 套铍窗 NaI/CsI 复合晶体探测器组成 (单体直径 190mm, 厚度 3.5/40mm), 其光输出通过同一个 PMT 收集, 利用不同晶体发光衰减时间的差异, 用脉冲形状甄别技术进行信号识别. 探测器的能量分辨率为 19% @ 60keV.

大面积 PMT 光阴极至第一打拿极之间空间较大, 虽然它们之间有聚焦极对电子进行导向, 但是外界磁场对电子的运动仍能产生影响. PMT 增益变化将引起脉冲幅度和本底计数的变化, 不但会降低望远镜的能谱测量精度, 还会影响望远镜的观测灵敏度. 通常减少由于磁场变化引起的 PMT 增益变化的最简单方法是对 PMT 进行磁屏蔽^[2]. 但是由于受机械系统限制, 磁屏蔽往往做不到尽善尽美, 因此常使用 PMT 自

动增益控制系统^[3]加以完善. 自动增益控制系统使 PMT 在数分钟时标的增益保持稳定, 被动式磁屏蔽则主要在短时标磁场变化时起到屏蔽效果.

2 HXMT 轨道空间磁场环境

HXMT 设计轨道高 550km, 倾角 45°. 卫星采用三轴稳定方式, 对地定向, 依赖卫星在轨道上的运动和轨道面的进动完成全天球的扫描. 为了覆盖大部分天区, 巡天扫描分三个阶段完成: 滚动角等于 0°, 30° 和 -30°. 由于在南大西洋异常区 (纬度范围 10°N—60°S、经度范围 20°E—100°W) 内的粒子流强比较高, 探测器在此区域一般不工作. 根据 IGRF2000 模型^[4], 我们得到在 HXMT 轨道上除异常区之外的磁感应强度为 22—49 μ T. 同时在 HXMT 巡天阶段, 其 PMT 光阴极面的法线与地心望远镜连线的夹角保持当时的滚动角不变, PMT 相对磁场的夹角变化如图 1 所示. 梯度计算得到巡天观测模式下 PMT 阴极面法线与磁场夹角的最大变化率为 4.7°/min.

在定点观测模式下, HXMT 总是指向固定的 X 射线源. 相对于巡天模式下的夹角变化, 定点模式下增加了 PMT 光阴极面的法线相对于地心望远镜连线的夹角变化, HXMT 的轨道周期约为 95min, 所以这个

2006-03-17 收稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 (G20000776) 和国家自然科学基金 (10327301, 10473011) 资助

1) E-mail: dongyw@mail.ihep.ac.cn

夹角的变化率最大为 3.8°/min. PMT 与磁场夹角的最大变化率为 8.5°/min.

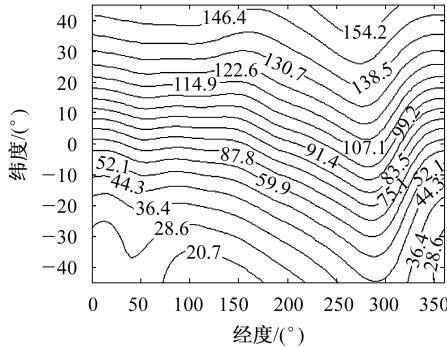


图 1 HXMT 位于 550km 轨道高空, 滚动角=0° 做巡天观测时 PMT 光阴极面法线与地磁场的夹角分布

3 磁屏蔽地面检测实验

3.1 实验设备和方法

北京地区处于东经 116.5°, 北纬 39.8°, 海拔高度 31m. 地面磁场方向为北偏西 6.184°, 偏下 58.194°, 强度为 54μT, 略大于卫星轨道磁场最大值, 且短时间内可视地磁场无变化. 这样地面磁场对 HXMT 探测器的影响完全可以模拟卫星在轨道上运动受到的影响. 通过地面实验我们就可以检验磁屏蔽效果从而估计 PMT 在轨道上不同工作模式下的增益变化幅度.

HXMT 主探测器单体如图 2 所示, PMT 使用滨松公司的 Head-On 型 R1512, 晶体盒与 PMT 固封成一体. 将一个单体安装在 HXMT 地面样机转台^[5]上, 通过转台方位角和仰角两个方向的二维运动, 实现 PMT 与外部磁场(地磁场)间不同的夹角, 如图 3. PMT 的朝向沿图 3 的球表面法线向外. 转台的方位角方向转动范围(-142°, 157°), 仰角方向转动范围(0°, 99°). 转台定位精度 0.5'. 用脉冲幅度分析系统记录 NaI 信号.

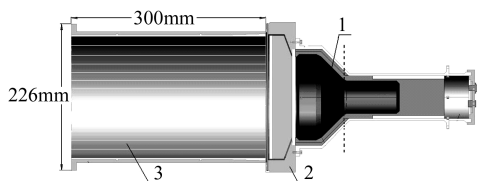


图 2 探测器单体结构图

- 1. PMT 及其外部的磁屏蔽罩; 2. 复合晶体盒; 3. 准直器.

和静电场屏蔽不同, 不存在能够完全屏蔽磁力线的物质. 减少外部磁场影响的一种有效办法是用具有高磁导率的金属材料将 PMT 包裹起来, 其中圆筒状

的坡莫合金最为常用. 对于一个理想圆筒状的磁屏蔽罩, 磁屏蔽因子 S 表示为

$$S = H_{out}/H_{in} = 3t\mu/4r, \tag{1}$$

H_{in} 和 H_{out} 表示在磁屏蔽罩内外的磁感应强度, t 表示罩的厚度, r 是罩的半径, μ 是磁导率, 约为 10^5 . S 越大, 磁屏蔽效果越好, 体现为 PMT 的增益变化幅度越小. 由于受 HXMT 晶体盒的限制, 我们选择了两种磁屏蔽结构并对其磁屏蔽效果进行了测试. 第一种是滨松 (Hamamatsu) 公司的 E989-05 屏蔽罩, 包裹除 PMT 两端面之外的所有面积; 第二种是自制坡莫合金罩^[6], 只对 PMT 前端光收集和第一打拿极部分设置屏蔽, 即图 2 中磁屏蔽罩的虚线以左的部分.

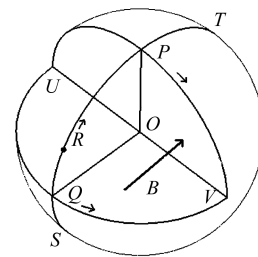


图 3 转台示意图

点 O 是转台的转动中心; 点 R 是转台坐标原点; B 指向为地磁场方向; 在圆面 OUP 上各点 PMT 阴极面法线与地磁场方向垂直; 点 Q 是 PMT 阴极面法线平行磁场点之一.

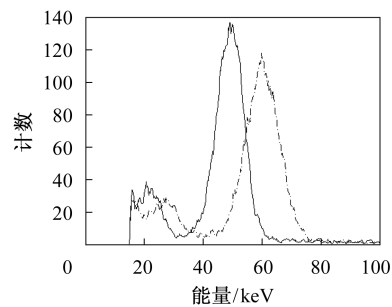


图 4 实测 ²⁴¹Am 能谱
两者计数率相差 1.5%.

为了减少探测器(NaI 晶体)非均匀性引入的误差, 在准直器的前端中心位置固定一个放射源(0.1μCi), 确保探测器旋转时光子入射位置不变. 准直器起到降低本底计数的作用, 探测器本底计数约 10个/s, 59.5keV 能量分辨率 17%. PMT 在空间的不同位置受磁场影响不同, 得到的 ²⁴¹Am 全能峰的峰位就会不同. 通过拟合峰值就可求得磁场导致 PMT 增益的变化幅度. 图 4 是不带磁屏蔽罩的 PMT 在转台的两个不同位置实测的 ²⁴¹Am 能谱.

3.2 PMT增益变化测量

众所周知, PMT 光阴极面法线垂直和平行于磁场, 其增益变化最大, 考虑到得到其精确坐标的困难, 选择转台 $(-6.18^\circ, 58.19^\circ)$ 坐标点 P 为 PMT 垂直磁场参考点, $(157^\circ, 31.81^\circ)$ 坐标点 Q 为 PMT 平行磁场参考点. PMT 在样机转台上的运动可分解为 PMT 在二维球面沿方位角方向的运动、二维球面沿仰角方向的运动和绕自身对称轴的转动. 使用 PMT 带滨松磁屏蔽罩分别进行了如下测试.

沿 UPV 线 (经过 PMT 垂直磁场参考点 P) 和 UQV 线 (经过 PMT 平行磁场参考点 Q) 在各自的大圆内以步长 9° 为一点进行测量. 由于平台原因, 部分区域不能测量. 两个半圆扫描曲线合并得到峰值变化曲线如图 5. 以下各条曲线每点的测量及拟合误差约 ± 0.7 道 (全能峰位在 250 道附近).

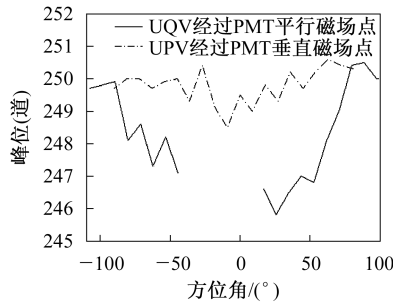


图 5 方位角测量曲线

此处方位角坐标为两大圆局部方位角坐标, 坐标原点分别为 P 和 Q , 方位角正向如图 3 小箭头所示.

在垂直地磁场的球面大圆内 PMT 光阴极面法线与磁场方向始终垂直, 实验所得全能峰峰值也基本不变. 而在经过 PMT 平行磁场点的球面大圆内两者的相对角度发生了变化, 峰值曲线在平行磁场点附近存在一个极小点.

再沿 RQS (经过 PMT 平行磁场点 Q) 和 RPT (经过 PMT 垂直磁场点 P), 各自在 $(0^\circ, 100^\circ)$ 仰角范围内以步长 10° 为一点进行测量. 得到峰值变化曲线如图 6, RQS 线上各测量点的仰角取负值.

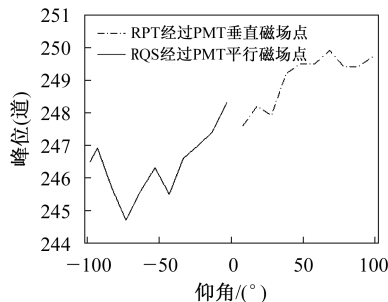


图 6 仰角测量曲线

根据以上方位角方向和仰角方向的两组测量实验, 基本认定在 PMT 垂直磁场点 P 处 PMT 增益最大; 在 PMT 平行磁场点 Q 处 PMT 增益最小. 一般 PMT 的磁屏蔽罩对外部磁场的屏蔽效果会很好, 如果磁场来自垂直方向, 则磁力线基本从屏蔽罩壁内穿过, 在桶内空心部分基本无磁力线穿过. 如果磁场来自平行方向, 则磁屏蔽罩屏蔽作用相对较小. PMT 光阴极产生的电子在收集和逐级加速过程中横向的运动会受到磁场的影响而使电子收集效果变差, 所以会得到在平行磁场点 PMT 的增益反而会较小的实验结果.

这样可以由这两个点得到 PMT 在地面磁场环境下最大的增益变化幅度. 将第三维的空间运动考虑进去, 分别在 PMT 垂直磁场点 P 和 PMT 平行磁场点 Q 将 PMT 自转 360° , 得到如图 7 所示的增益变化曲线.

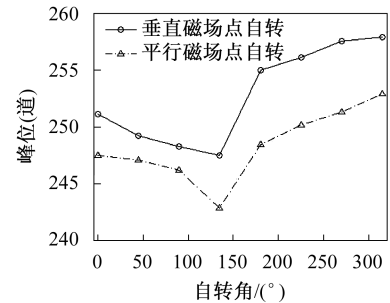


图 7 PMT 自转 360° 测量曲线

定义增益变化幅度 $= 2 \times (\text{最大增益} - \text{最小增益}) / (\text{最大增益} + \text{最小增益})$, 由以上扫描实验得到 PMT 在地面磁场环境下的增益最大变化幅度约 6%. 同样的, 在无源情况下测量探测器的本底, 其计数变化小于 0.5%.

3.3 不同屏蔽方案比较

在 PMT 垂直磁场点, 分别用 PMT 带滨松磁屏蔽罩、PMT 带自制磁屏蔽罩、PMT 无磁屏蔽罩进行自转实验, 以 PMT 自转 360° 的增益变化幅度作为标准比较 3 种方案的优劣. 实验结果表明, 无磁屏蔽方案变化幅度为 43%, PMT 带自制磁屏蔽罩方案变化幅度为 10%, PMT 带滨松磁屏蔽罩方案的变化幅度为 4%. 如图 8. 可见, 就目前的机械结构而言, 滨松磁屏蔽罩方案最佳.

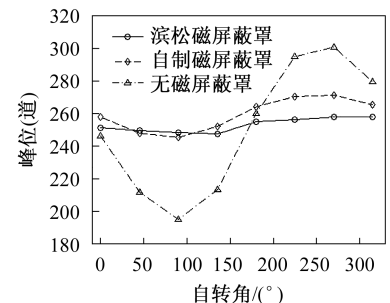


图 8 3 种磁屏蔽方案自转实验增益变化曲线比较

4 结论

用滨松磁屏蔽罩得到 PMT 在地面磁场环境下的增益变化幅度约为 6%。已知在巡天模式和定点模式下 PMT 与磁场夹角的最大变化率分别为 $4.7^\circ/\text{min}$ 和 $8.5^\circ/\text{min}$, 如果巡天模式下在轨自动增益控制每 3min 调整一次, 使用滨松磁屏蔽罩的 PMT 与 $54\mu\text{T}$ 地面磁场的夹角变化极大值为 14.1° 。根据以上实验结果, PMT 的增益变化不会大于 1%。在定点观测模式下, 如果在轨自动增益系统调整时标为 2min, PMT 与地磁场的夹角最大变化 17° , PMT 的增益变化也将小于

1%。相对于较低的复合晶体能量分辨率, 这不会对能谱分析产生很大的影响。根据同样的线性关系, 在两种模式下的 HXMT 的本底 B 计数变化将小于 0.1%。因为灵敏度 $S \propto B^{0.5}$, HXMT 的巡天灵敏度指标也不会受到影响。所以用滨松磁屏蔽罩方案与自动增益控制系统配合能实现 HXMT 主探测器的在轨增益稳定功能。

HXMT 计划使用 ETL 公司生产的 9275B 型 PMT, 其光阴极和第一打拿极之间的高压相对 R1512 较高, 而且后继各打拿极间距较小, 这种结构配置可进一步减少磁场对 PMT 增益的影响。

感谢李惕碛院士对本文研究工作的悉心指导。

参考文献(References)

- 1 LI T P, WU M. AP&SS, 1993, **206**: 91—102
- 2 Rothschild R E, Pelling M R, Gruber D E et al. SPIE EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy and Atomic Physics, 1989, **1159**: 139—155
- 3 Pelling M R, Rothschild R E, MacDonald D R et al. SPIE EUV, X-ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy and Atomic Physics, 1991, **1549**: 134—146
- 4 Olsen et al. Earth, Planets and Space, 2000, **52**: 1175—1182
- 5 DONG Yong-Wei, WU Bo-Bing, LI Yan-Guo et al. HEP & NP, 2006, **30**(5): 392—397(in Chinese)
(董永伟, 吴伯冰, 李延国等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(5): 392—397)
- 6 ZHANG Y J. Hard X-ray Modulation Telescope and Data Analysis. 2005. 43—47(in Chinese)
(张永杰. 硬 X 射线调制望远镜 HXMT 及数据分析. 2005. 43—47)

HXMT Magnetic Shield Design and Test Results^{*}

DONG Yong-Wei^{1,2;1)} XIONG Shao-Lin^{1,2} LI Yan-Guo¹ ZHANG Yong-Jie¹
WU Bo-Bing¹ HE Hui-Lin¹

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract We present the results of experiments on the passive magnetic shield for HXMT main detectors. The magnetic shielding case made of permalloy reduces the maximum gain variations of detectors to 6% on the ground. Together with the automatic gain control system, the magnetic shield system will limit the gain variations of in-flight detectors to 1%, and limit the background variations to 0.1%.

Key words HXMT, magnetic shield, PMT

Received 17 March 2006

^{*} Supported by Major State Basic Research Development Program (G20000776) and NSFC (10327301, 10473011)

1) E-mail: dongyw@mail.ihep.ac.cn