

HXMT 探测器能量响应矩阵的计算*

何会林 李延国 吴伯冰 张承模 汪锦洲 张永杰 董永伟

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

摘要 介绍硬 X 射线调制望远镜(HXMT)探测器能量响应矩阵的计算方法,根据实验室测量数据计算了该条件下的能量响应矩阵;利用该能量响应矩阵由直接解调法解实验室所测放射源能谱,能很好地重现放射源能量.

关键词 X 射线 探测器 能量 矩阵

1 引言

硬 X 射线能区(约 10keV—几百 keV)是研究天体高能过程,解决天体物理中若干基本问题的基本波段.我国科学家根据自己独创的直接解调成像方法^[1,2],突破硬 X 射线成像的困难,利用简单成熟的硬件技术,设计了硬 X 射线调制望远镜(简称 HXMT).该望远镜将实现世界上首次硬 X 射线波段的巡天观测,描绘硬 X 射线天图;对特殊天区作高灵敏度连续观测,得到辐射天体的空间分布、能谱和时间的变化,并发现一大批硬 X 射线天体源,从而极大地丰富人类对硬 X 射线宇宙的认识.

HXMT 是用直接解调成像方法作指导,利用多个准直器的调制度,用简单的非位置灵敏的探测器,把硬 X 射线的位置测量转换成单位时间的强度测量,流强信息到位置信息的转换过程(观测数据处理)由地面计算机的软件完成.这样就把硬 X 射线成像观测中最繁难的位置测量工作转换到软件的数据处理上,从而大大简化了探测器的结构,减小了造价.HXMT 探测器采用了复合晶体探测器,它的基本结构是将一块能量分辨率好的薄 NaI(Tl)闪烁体作为主探测器,与另一块厚的量子效率足够高的闪烁体(CsI(Na))复合在一起,用单个光电倍增管收集荧光.依据两种晶体不同的发光衰减时间,通过脉冲形状甄别技术区分两类信号.厚晶体对主晶体后方几乎是 2π 立体角屏蔽,有效地降低了本底,并有效地

识别主晶体中产生的康普顿光子,抑制了能谱畸变.与其他主动式屏蔽结构相比,复合晶体闪烁计数器的结构紧凑、重量轻,特别适合于空间观测.图 1 是探测器及准直器的结构图.

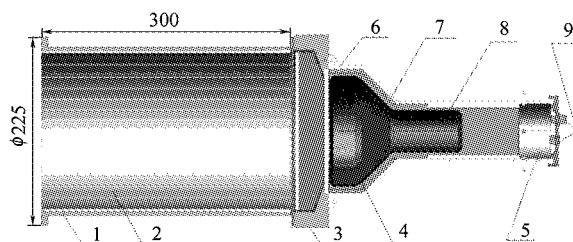


图 1 探测器及准直器单体示意图(三维剖视图)

1 准直器外壳,2 准直器,3 复合晶体盒及复合晶体,
4 光电倍增管防震材料,5 高压及前放电路,6 光电倍增管外壳,
7 X/γ 屏蔽层等,8 光电倍增管,9 接线座.

对天体源的能谱测量是 HXMT 的重要任务之一.要测量未知源的能谱,必须首先根据探测器的能量标定数据计算出能量响应矩阵,然后解出天体源的能谱.本文将根据实验室条件下的能量标定数据,给出能量响应矩阵的计算方法和计算结果,并由解谱的直接解调方法,重现出了标定源的能量.

2 能量响应矩阵的计算方法及计算结果

根据直接解调方法^[1],解谱可以看作一维成像

2004-09-27 收稿,2005-03-02 收修改稿

* 国家重点基础研究专项经费(TG2000077603)和国家自然科学基金(10473011)资助

问题,其联系方程为

$$\sum_i p(i, j) f(j) = d(i), \quad (1)$$

式中, $f(j)$ 为天体源发射的真实谱, $d(i)$ 为实测谱, $p(i, j)$ 为探测器的能量分辨函数, 称其为能量响应矩阵, 它的物理含义是真实能量为 j 的光子, 其测量值落入能道 i 中的概率.

为了得到能量响应矩阵, 理想的情况是对每种

能量的单能 γ 光子测谱, 但实际是办不到的. 通常的情况是在探测器的响应能区内选择一些典型的源进行测谱, 测量全能峰的能量分辨率, 得到能量分辨率和能量的对应关系, 以及电子学 ADC 值和能量的对应关系, 然后由蒙特卡罗模拟计算完成. 表 1 是我们得到的实验标定数据, 其中 A 代表全能峰的高斯拟合平均值, σ/A 代表全能峰的脉冲幅度分辨率, σ 是方差.

表 1 探测器的能量标定数据

能量/keV	31(¹³³ Ba)	59.54(²⁴¹ Am)	81(¹³³ Ba)	122(⁵⁷ Co)
A (ADC 值)	22.58 ± 0.03	50.98 ± 0.03	69.11 ± 0.01	105.00 ± 0.04
σ/A	0.1606 ± 0.0002	0.0863 ± 0.0004	0.1066 ± 0.0001	0.0821 ± 0.0004

在探测器的能量响应范围内, 脉冲幅度正比于入射粒子能量, 故入射粒子能量与脉冲幅度的关系可以由线性拟合得到

$$E = 4.659 + 1.110 \times A, \quad (2)$$

式中 E 是入射粒子能量, 以 keV 为单位, A 是脉冲幅度, 为 ADC 值. 最大积分非线性为 5.1%. 拟合曲线见图 2.

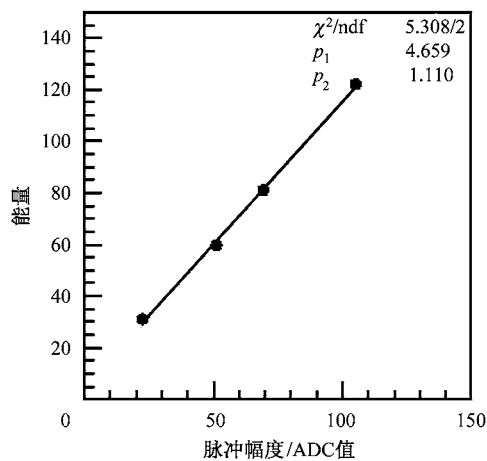


图 2 入射光子能量与脉冲幅度全能峰的线性拟合曲线

一般情况下, 能量分辨率与能量的平方根成反比, 拟合结果为

$$\frac{\sigma_E}{E} = 0.0011 + \frac{0.8440}{\sqrt{E}}, \quad (3)$$

拟合曲线见图 3.

能量响应矩阵的计算. 由实验获得了能量分辨率与能量的关系曲线后, 可由蒙特卡罗模拟计算得到能量响应矩阵. 根据 HXMT 探测器的结构 (见图 1) 建立模拟模型. NaI 厚度 3.5mm, 直径为 190mm; 两种形状的 CsI 厚度分别为 30mm 和 10mm, 其中圆台

型 CsI 与光导相接处的直径为 115mm.

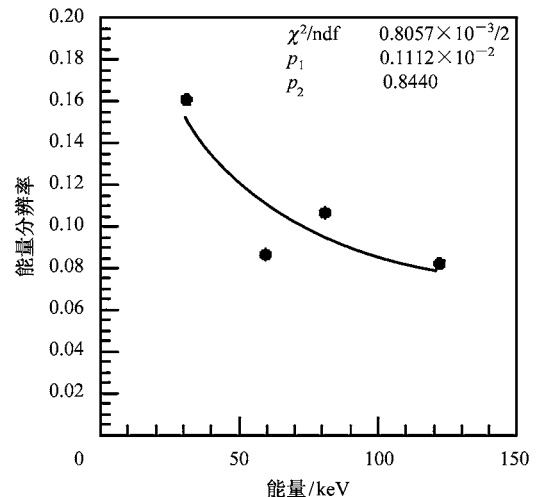


图 3 能量分辨率与能量的拟合曲线

模拟计算用 CERN 开发的 Geant3.21 模拟计算程序系统, 入射光子的能量分别为 20—999keV, 能量间隔 1keV. 探测器的探测阈能为 20keV, 所以射线在 NaI 晶体中的能量沉积小于 20keV 时的事例将丢掉. 根据波形甄别技术, 射线在 CsI 中的能量沉积大于在 NaI 中的能量沉积时, 可作为康普顿事例而被排除. 由于晶体表面会潮解从而失去了发光能力, 在模拟计算时如果不考虑此死层的影响, 模拟出的能谱的逃逸峰会比实验的逃逸峰小, 从而影响解谱精度. 通过试验发现, 当死层厚度约 50 μ m 时模拟能谱的逃逸峰与实验能谱(²⁴¹Am)逃逸峰相近, 为此加进了 50 μ m 的死层修正. 能量分道是根据电子学设计而设定的, 电子学 ADC 值为 255 道时对应的能量约为 300keV, 所以按线性分道时一道对应的能量为 1.1719keV. 模拟计算时, 分别计算入射光子在两种

晶体中的能量沉积,根据探测器的阈能和康普顿事例排除的判选条件来选择事例. 设选定的事例在 NaI 晶体中的能量沉积为 E , 根据关系式(3)计算该能量下的能量分辨 σ_E , 以 E 为均值, 以 σ_E 为方差进行高斯抽样, 即得到可能的实验能量值 E_{exp} , 然后按能量分道要求(1.1719keV/道)分道, 统计落入各能道的计数值. 每种能量的光子都运行 10^5 个事例. 探测器对不同能量的光子其探测效率不同, 为了将探测效率也考虑进去, 各能道的计数值应除以 10^5 . 这样就得到了包括探测效率修正在内的能量响应矩阵. 图 4 是计算的能量响应矩阵的二维分布图(由于高能入射光子能谱分配到各能道的计数与低能入射光子分配到各能道的计数比较相差太多, 为了便于图像显示, 对每一种入射能量的光子所产生的能谱自己进行了归一化, 并对能道按 30keV 的间隔进行了并道. 这只是为了作图需要, 实际并不是这样).

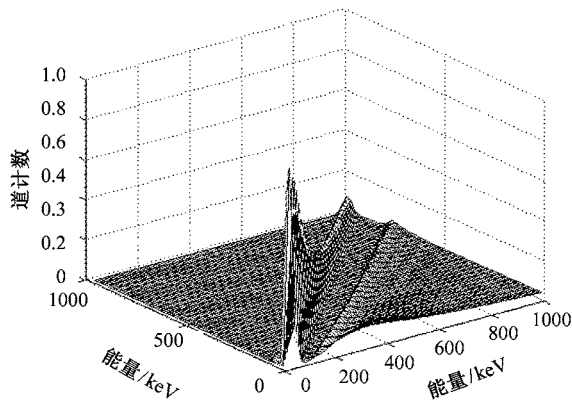


图 4 HXMT 探测器能量响应矩阵

我们的探测器的能量响应范围为 20—300keV, 能量响应矩阵之所以计算到 1MeV, 是因为高能光子所产生的康普顿散射低能部分对解谱有影响. 探测器的最大能量响应为 300keV, 能量矩阵的能道可只取到 300keV. 这样, 能量响应矩阵就是一个 (980, 256) 的二维矩阵.

3 直接解调法解实验谱

为了检验能量响应矩阵的正确性, 可以对已知能量的放射源测到的能谱解谱, 重现放射源的能量. 首先根据(2)式对观测到的脉冲幅度谱转化成能量谱, 并根据能量响应矩阵中的并道要求(1.1719keV/道)进行并道, 并道后的观测数据为 $d(i) (j=1, \dots, N)$. 然后根据联系方程(1)用高斯-赛德尔(Gauss-Seidel)迭代法解线性方程组. 迭代计算的初值可以取任意值, 在此取为 1, 即 $f_i^{(0)} = 1, f(i)$ 的第 k 次迭

代近似值的计算公式为

$$f_i^{(k)} = \frac{\omega}{P_{ii}} \left(d_i - \sum_{j=1}^{i-1} P_{ij} f_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N P_{ij} f_j^{(k-1)} \right) + (1 - \omega) f_i^{(k-1)}, \quad (4)$$

其中, $i=1, \dots, N$.

迭代时取松弛因子 $\omega=1$, 物理约束只取了最简单的形式, 即 $f_{\text{low}}(i)=0$. 迭代的终止条件为

$$\max \frac{|f_i^{(k)} - f_i^{(k-1)}|}{1 + |f_i^{(k)}|} < \epsilon, \quad (5)$$

其中 ϵ 为给定的精度要求. 后面的计算中取 $\epsilon=10^{-5}$.

图 5 是用放射源 ^{241}Am 测得的能谱, 实验中用铜皮虑掉了低能成分, 并扣除了本底.

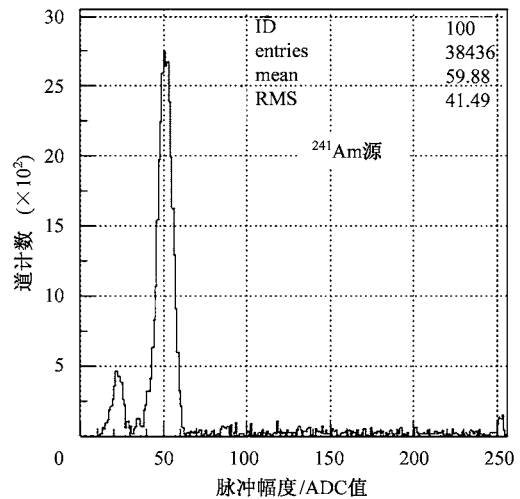


图 5 用 ^{241}Am 放射源测得的能谱

按照上面方法, 先根据(2)式对脉冲幅度谱转化成能量谱, 再根据 1.1719keV/道进行并道, 然后解方程组解得的谱见图 6. 解得入射能量进行了归

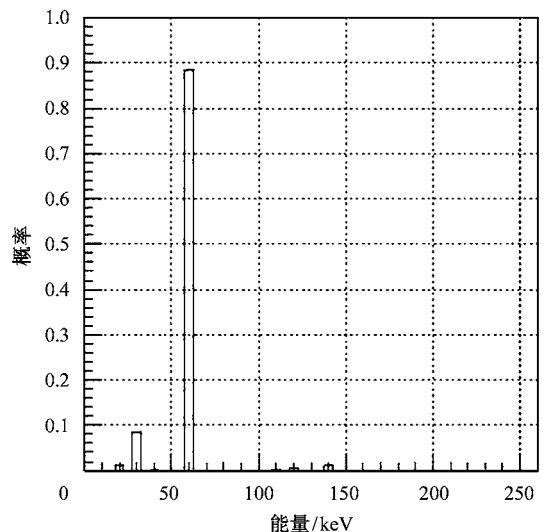


图 6 重建出的 ^{241}Am 源的能量

一化,可以很清楚地区分各能量成分的比例.

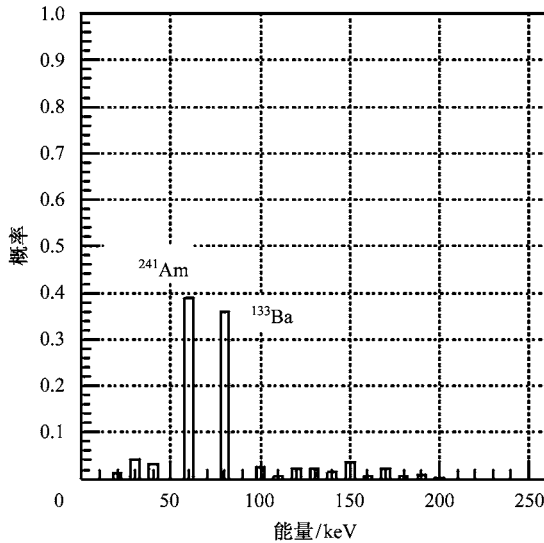


图 7 ^{241}Am 和 ^{133}Ba 的混合谱的解谱结果

由图 6 可以看出,落入 60keV 能道的概率达到

了 88.6%,这正是 ^{241}Am 源的 γ 光子的能量,其他的能量成分(伪影)是由本底噪声及屏蔽材料特征 X 射线造成的.图 7 是对 ^{241}Am 源与 ^{133}Ba 源的混合谱的解谱结果,也很好重建出了入射光子的能量.说明利用计算的能量响应矩阵和直接解调法可以很好地重建出放射源的原始能量.

4 结论

对天体源的能谱测量是 HXMT 的重要目标之一,由直接解调法解谱的关键是能量标定实验及根据标定数据计算出能量响应矩阵.通过上面的工作,证明我们计算能量响应矩阵的方法是正确的.随着工作的进展,将设计更精细的实验,使能量响应矩阵更接近实际.

感谢吴枚教授的有力指导和有益讨论.

参考文献 (References)

- 1 LI Ti-Pei, WU Mei. ACTA ASTROPHYSICS SINICA, 1993, **13**(2): 215—224 (in Chinese)
- 2 LI Ti-Pei, WU Mei. Astrophysics and Space Science, 1993, **206**:91—102

Calculation of the HXMT Detector Energy Response Matrix*

HE Hui-Lin LI Yan-Guo WU Bo-Bing ZHANG Cheng-Mo

WANG Jin-Zhou ZHANG Yong-Jie DONG Yong-Wei

(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract We presented in this paper the calculation method of the energy response matrix for the detectors of the Hard X-ray Modulation Telescope, with both laboratory measurements and simulations. Using this matrix and the direct demodulation technique we have successfully restored the spectra of the radioactive sources from data collected in the laboratory. This shows that the energy response matrix is reliable.

Key words X-ray, detector, energy, matrix

Received 27 September 2004, Revised 2 March 2005

* Supported by the Special Funds for Major State Basic Research Projects (TG2000077603) and National Natural Science Foundation of China(10473011)