

一种精确确定闪烁晶体光产额的方法*

伍健 许彤 李澄 汪晓莲
汪兆民 李宏杰 陈宏芳 许咨宗

(中国科技大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 针对钨酸铅晶体(PbWO_4)在 ^{137}Cs 源作用下所得的脉冲幅度谱,并结合蒙特卡罗模拟,提出了一种获得光产额较低的闪烁晶体光产额的新的拟合方法.此方法亦适用于其它晶体.

关键词 钨酸铅 闪烁晶体 光产额 拟合

1 引言

作为下个世纪初最主要的高能物理对撞机和探测器,大型强子对撞机(LHC)的CMS组将在其电磁量能器中使用具有快信号和短辐射长度的钨酸铅晶体.由于该晶体相对于BGO等其它晶体的光产额较低,从而使得用通常的低能放射源来测量其响应显得比较困难.而电磁量能器输出信号的准确与否将很大程度上影响到有关的物理结果,因此有必要准确地确定晶体的光产额.基于上述原因,本工作提出了一种切实可行的方法来精确测定 PbWO_4 晶体的光产额.此方法亦可应用于其它晶体的测量.

2 实验装置

图1是测量钨酸铅晶体光产额的实验装置.测量中使用光电倍增管XP2262B(或Hamamatsu R2059)来探测荧光,所测晶体通过硅油与光电倍增管的光阴极耦合.光电倍增管的电信号由电荷灵敏放大器Ortec113进行放大.这样最后所得的脉冲高度就正比于光电倍增管所收集的总的电荷量.本实验中,用一个黑箱子取代了光电倍增管的保护管套来压制康普顿本底.一共测量了三块尺寸为 $2 \times 2 \times 2\text{cm}^3$ 的钨酸铅晶体,并结合蒙特卡罗模拟进行数据分析.

图2是在 ^{137}Cs 源作用下的钨酸铅晶体脉冲高度分布谱.位于谱左端的尖锐的峰是单光电子峰.由于与BGO等晶体相比,钨酸铅的光产额较低,谱右端的全能峰就显得低、宽

1997-07-10收稿,1997-11-07收修改稿

* 国家自然科学基金资助

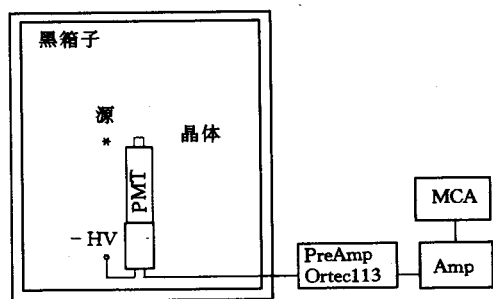
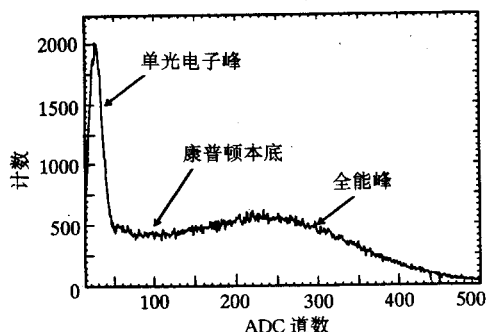


图1 实验装置

图2 在 ^{137}Cs 源作用下典型的 PbWO_4 脉冲高度分布

得多,同时也没能与中央的连续谱部分很好地分离.位于单光电子峰和全能峰之间的连续谱主要来源于康普顿散射、反散射以及逃逸效应.以一块 $2 \times 2 \times 2\text{cm}^3$ 的钨酸铅晶体为例,其光产额通常为20—50光电子/MeV,这样, ^{137}Cs 的 0.662MeV 的光子仅仅对应于12—30个光电子.而对于一个体积为 $2 \times 2 \times 23\text{cm}^3$ 的全尺寸的钨酸铅晶体,其光收集效率更低,因而光产额也就更低.由于全能峰与康普顿本底的交叉混合,表观的全能峰的峰位将向谱的左端移动.一个简单的高斯拟合给出的光产额值要比真实值小.为了解决上述问题,B. Borgia等人运用了费米-狄拉克分布来近似康普顿效应,并同时用泊松分布来描述全能峰^[1]:

$$\frac{L_C}{\frac{(E-E_c)}{T_c} + 1} + \text{Poisson}, \quad (1)$$

式中 E_c 对应于康普顿边缘的能量,而 T_c 则是费米温度.使用该分布的理由是在高端其形状与康普顿本底相似.考虑到这种参数化过程中物理性的限制不能得以体现,我们发展出一种包含更多物理的并能够获得康普顿本底形状的方法.

3 蒙特卡罗方法及对光产额的确定

由于还没有一个解析表达式来描述康普顿本底,采用了蒙特卡罗方法来获取与实验数据相符的分布来表述该本底.利用欧洲核子中心的GEANT软件包,建立了一个模拟光子在晶体中能量沉积的程序.模拟的几何设置被仔细地安排以反映真实的实验环境尤其是样品形状.

图3是通过 2.5×10^7 事例的模拟获得的 ^{137}Cs γ 射线在 $2 \times 2 \times 2\text{cm}^3$ 钨酸铅晶体中能量沉积的分布.所显示的分布已经进行了归一化并被称为 $f_0(E)$.如果来自晶体的荧光在光阴极上产生的平均光电子数为 N_{pe}/MeV ,并假设光电子的数目服从泊松分布,那么在光阴极上产生 k 个光电子的分布为

$$f_1(k) = \int_0^\infty P(k; N_{pe} E) f_0(E) dE, \quad (2)$$

其中 $P(k; N_{pe}, E)$ 是具有平均值为 $N_{pe} E$ 的泊松函数. 进而, 还要考虑光阴极后面的打拿极以及电子学. 如果第一打拿极的增益足够大的话, 那么就可以用一个平均值为 P_0 、宽度 $2\sigma_0$ 的高斯分布来描述单光电子峰. 当第一打拿极正好接收到 k 个光电子的话, 脉冲幅度谱就具有高斯型分布 $G(x; kP_0, \sqrt{k}\sigma_0)$, 其峰位在 kP_0 , 均方差为 $\sqrt{k}\sigma_0$. 于是, 对应着 ADC 道 x 的输出几率就来自所有这些光电峰的贡献的总和. 而最终在 multidetector 分析器上出现的脉冲分布是

$$f_2(x) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} f_1(k) G(x; kP_0, \sqrt{k}\sigma_0) = \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} \int_0^{E_{\max}} f_0(E) P(k; N_{pe} E) G(x; kP_0, \sqrt{k}\sigma_0), \quad (4)$$

这里, 选择 $k_{\max} = 100$. 这样, 如果已知 $f_0(E)$ 并且测得了 $f_2(x)$, 参数 N_{pe} 、 P_0 和 σ_0 都可以通过拟合过程来确定. 另外, 光电管的光阴极的热电子发射还会带来噪声, 如果假设这样的热电子的平均数目为 N_e , 那么, 其对应的本底是

$$f_e(x) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} P(k; N_e) G(x; kP_0, \sqrt{k}\sigma_0). \quad (5)$$

而实验谱将是上述两重分布的和

$$F(x) = C_1 f_2(x) + C_2 f_e(x), \quad (6)$$

式中 C_1 和 C_2 分别是信号和噪声的强度. 这样, 就得到了脉冲高度谱的全型. 而通过拟合从单光电子峰到全能峰的整个谱, 就可以得到 N_{pe} 、 P_0 、 σ_0 以及 N_e 这些参数的值.

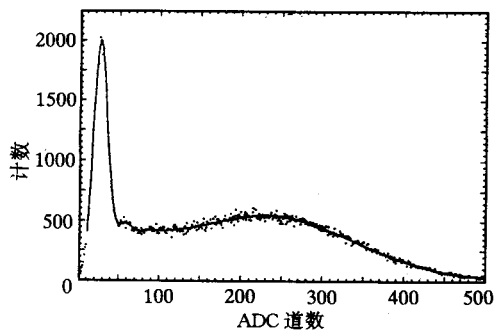


图4 对蒙特卡罗数据拟合一例 ($N_{pe} = 15/\text{MeV}$)

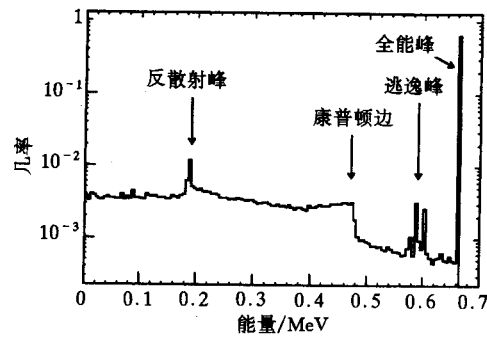


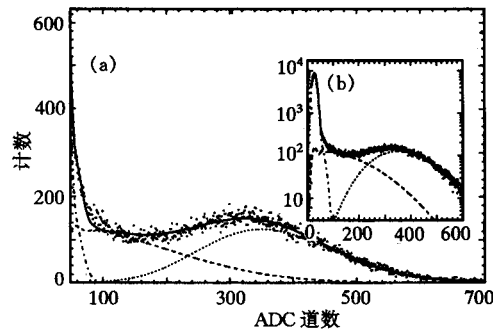
图3 在尺寸为 $2 \times 2 \times 2 \text{cm}^3$ 的 PbWO_4 晶体中能量沉积分布的蒙特卡罗结果

拟合中使用了 CERNLIB 中的 MINUIT^[2] 软件包. 利用蒙特卡罗模拟谱, 比较了我们的拟合方法与简单的高斯拟合法 (SGF), 结果参见图 4 和表 1. 对于低光产额情况, 我们的方法显然要比简单高斯拟合好.

图 5 显示了对 ^{137}Cs 源在 119 号晶体中产生的脉冲幅度谱的拟合结果, 晶体由上海硅酸盐所提供. 从中可以看出全能峰确实有相当程度的右移. 作为比较, 图 6 给出了简单高斯拟合的结果.

表1 用不同方法处理蒙特卡罗数据所得结果

$N_{pe}/MeV(MC)$	SGF(N_{pe}/MeV)	本方法(N_{pe}/MeV)
5	—	5.06 ± 0.01
10	7.49 ± 0.30	10.31 ± 0.04
15	12.59 ± 0.06	14.77 ± 0.05
20	18.21 ± 0.07	20.07 ± 0.05
30	28.59 ± 0.09	30.27 ± 0.07
40	38.98 ± 0.08	39.92 ± 0.09

图5 对 ^{137}Cs 实验谱的拟合

(a) 谱高端的情况; (b) 全谱分布.

—— 拟合结果; - - - - 康普顿本底;
- · - · - 热噪声; · · · · · 全能峰.

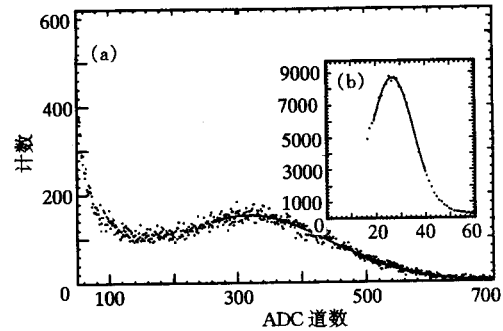


图6 对实验数据的简单高斯拟合

(a) 全能峰; (b) 单光电子峰.

表 2 给出了尺寸为 $2 \times 2 \times 2\text{cm}^3$ 的三块晶体类似的结果.

表2 用不同方法处理上海硅酸盐所晶体所得的结果

晶体 #	SGF(N_{pe}/MeV)	本方法(N_{pe}/MeV)
119	17.87 ± 0.15	19.91 ± 0.08
124s	17.30 ± 0.13	21.25 ± 0.05
124j	30.73 ± 0.11	33.52 ± 0.15

4 结论

通过仔细研究脉冲幅度谱的构成,运用蒙特卡罗方法来获取真实的康普顿本底的谱形,并发展出了一种拟合从单光电子峰到全能峰的全谱的新方法,该方法能够给出钨酸铅晶体光产额的更加准确的值.本方法同样适用于其它类型的晶体.

参 考 文 献

- [1] Borgia B et al. CMS TN/ 96-07 Nota Interna n. 1074
[2] MINUIT CERN Program Library Long Writeup D506

Precise Determination of the Light Yield of Scintillation Crystals*

Wu Jian Xu Tong Li Cheng Wang Xiaolian Wang Zhaomin
Li Hongjie Chen Hongfang Xu Zizong

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract A new fitting method together with the Monte Carlo simulation is developed to process the full pulse-height spectrum of a ^{137}Cs source in PbWO_4 crystals to get the precise light yield of the crystal in photoelectrons per MeV. This method is also useful for other kinds of crystal measurements.

Key words PbWO_4 , scintillation crystal, light yield, fitting

Received 10 July 1997, Revised 7 November 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China