

# 闪烁晶体 $\gamma$ 能谱拟合方法的比较\*

许彤 邵明 李澄 陈宏芳 许咨宗

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

**摘要** 为了确定低光产额的闪烁晶体的光输出,人们发展了很多方法来拟合闪烁晶体的  $\gamma$  谱. 本文对这些方法同时用模拟谱和实验谱进行了比较,不但考察了它们的拟合结果对真实值的偏差和对光产额相对变化的反映能力,还研究了这些方法在本底和拟合区间变化时的稳定性.

**关键词** 闪烁体  $\gamma$  能谱 光产额 拟合

## 1 引言

在今天的高能物理领域,需要被探测的粒子能量越来越高,相应地要求电磁量能器的闪烁晶体越重越好. 钨酸铅晶体(PWO)是个不错的选择,它将被用于大型强子对撞机 LHC 的 CMS 探测器上<sup>[1]</sup>. 虽然它的光产额较低,当它用在高能粒子对撞机的电磁量能器上时,由于要探测的粒子能量很高它仍然能产生足够的荧光. 但是在晶体的研制过程中,实验室一般采用<sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs 和<sup>22</sup>Na 等放射源作为激发源<sup>[6]</sup>. 这些放射源的  $\gamma$  射线能量沉积在 PWO 晶体内产生荧光,只能在光电倍增管的光阴极上产生 10 个左右的光电子. 这时的  $\gamma$  谱形由于康普顿本底和全能峰融合在一起而变得模糊(图 1)<sup>[2]</sup>. 要在这种情况下通过对  $\gamma$  谱的拟合得到晶体的光产额,人们采用了不同的方法:简单高斯法(SG),指数加高斯法(EG),费米-迪拉克加泊松分布法(FP)<sup>[3]</sup>,完全卷积法(FULC)<sup>[2]</sup>,简化卷积法(SIMC)<sup>[4]</sup>. 本文这里试图通过几种方法的比较找出最合适的方法来.

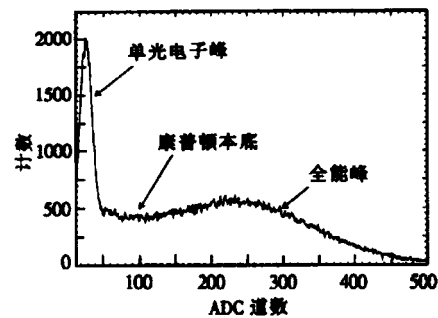


图 1 典型的从钨酸铅闪烁晶体得到的  $\gamma$  能谱

2000-03-06 收稿, 2000-05-31 收修改稿

\* 中国科学院国际合作局资助

## 参加比较的方法

拟合方法的不同之处在于采用不同形式的函数来重现实验得到的  $\gamma$  能谱. 表 1 比较了这些拟合方法的原理.

表 1 光产额测量中使用的几种不同拟合方法的原理比较

方法	全能峰	康普顿本底	热噪声 (来源于光阴极 的热电子发射)	拟合 速度
SG	高斯函数	没有考虑	没有考虑	非常快
EG	高斯函数	指数函数( $e^{-x}$ )	没有考虑	非常快
	连续化的泊松 分布, 平均值 为 $E_\gamma N_{pe}$ : $\frac{e^{-E_\gamma N_{pe}} \cdot (E_\gamma N_{pe})^x}{\Gamma(x+1)}$	费米迪拉克函数 $\frac{L}{1 + \exp((E - E_c)/T)}$	没有考虑	快
	平均值为 $E_\gamma N_{pe}$ 的泊松分布与 系统响应 $\text{Gauss}(x; kP_0, \sqrt{k}\sigma_0)$ 的卷积, 这个高斯 分布代表第 $k$ 个 光电子峰	康普顿本底 的能量沉积谱 $f_c$ 与系统响应 $\text{Gauss}(x; kP_0, \sqrt{k}\sigma_0)$ 的卷积, $f_c$ 则通过 MC 模拟得到 与 FULC 相似 只是 $f_c$ 被简化为: $f_c(E) = \begin{cases} 1/E_c, & E \leq E_c \\ 0, & E > E_c \end{cases}$	平均值为 $N_c$ 的泊松分布与 系统响应的卷积, $N_c$ 代表光阴极 上热电子发射的 平均数	慢
SIMC	与 FULC 相同		与 FULC 相同	快

表中列举的方法都试图重现  $\gamma$  能谱来得到光产额, 它们的表现将直接影响到晶体质量的测量结果, 如荧光产量和时间结构. CMS 实验对钨酸铅晶体的关键性要求是它的抗辐照损伤性能. 该性能是由辐照前后光产额变化的百分比来衡量的. 为了研究不同拟合方法是否能如实反映光产额的大小及变化, 我们做了以下工作.

### 3 针对模拟谱的拟合比较

用 GEANT3 软件包<sup>[5]</sup>做 Monte Carlo 模拟, 晶体是四棱台形的 PWO 晶体, 采用的放射源是  $^{60}\text{Co}$ , 在模拟时考虑了放射源的衬底, 光电倍增管套等的散射影响. 图 2 为 MC 模拟得到的能量沉积谱, 用  $f_0$  表示.

在前文的分析中<sup>[2]</sup>, ADC 测到的脉冲幅度谱实际上是  $f_0$  与晶体发光响应(泊松分布)以及光电倍增管和电子学响应的卷积, 可用如下形式表示:

$$F(x) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} \left[ C_1 \frac{N_e^k e^{-N_e}}{k!} + C_2 \sum_i f_i \frac{(N_{pe} E_i)^k e^{-N_{pe} E_i}}{k!} \right] \times \frac{1}{\sqrt{2k\pi\sigma_0}} \exp\left(-\frac{(x - kP_0)^2}{2k\sigma_0^2}\right), \quad (1)$$

其中  $N_{pe}$  是预设的晶体光产额, 即单位沉积能量在光阴极上产生的光电子数 (Pe/MeV),  $C_2$  是康普顿本底和全能峰的总强度;  $N_e$  是光阴极发射的热电子的平均数, 它反映了光电倍增管的热噪声,  $C_1$  是热噪声的强度;  $P_0$  和  $\sigma_0$  分别是单光电子峰的峰位和宽度.

通过 MC 模拟和卷积, 预设不同的光产额便得到了一系列形如图 1 的模拟谱. 所有的谱都用了 4 种方法拟合, 图 3, 图 4 显示了拟合得到的光产额值和模拟预设值的比较. 结果表明费米迪拉克加泊松法与简化卷积法偏差比其他方法要小得多, 小于  $\pm 5\%$ . 请注意图 3, 如果拟合方法要如实反映光产额变化的百分比, 该方法对应的点应该位于过原点的

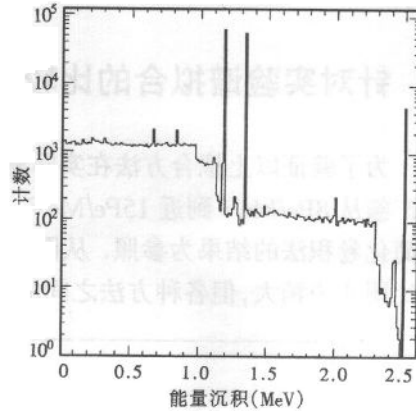


图 2 GEANT3 模拟得到的  $^{60}\text{Co}$  的  $\gamma$  能量沉积能谱

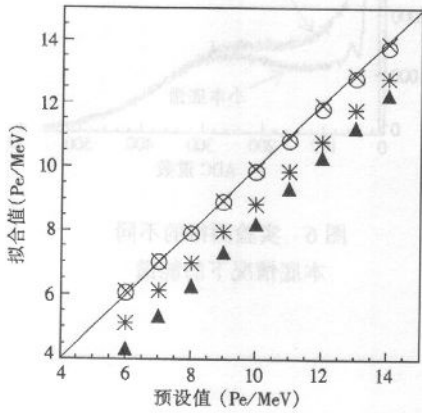


图 3 不同方法拟合值与模拟预设值的关系  
 ▲SG, \*EG, ○FP, ×SIMC.

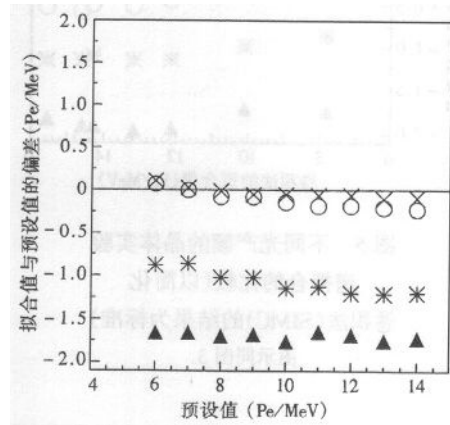


图 4 拟合绝对偏差随光产额的变化  
 图示同图 3.

表 2 不同拟合方法对辐射损伤的反映

方法	预设	SG	EG	FP	SIMC
辐照前	13	11.26	11.80	12.80	12.93
辐照后	12	10.33	10.81	11.82	11.94
相对变化	7.7%	8.3%	8.4%	7.6%	7.6%
辐照前	9	7.33	7.98	8.92	8.95
辐照后	8	6.31	6.98	7.92	7.99
相对变化	11.1%	13.9%	12.5%	11.2%	10.7%

的一条直线上. 能近似满足这一点的只有费米-迪拉克加泊松法与简化卷积法. 从图 4 可以看出简单高斯法和指数加高斯法与预设值的偏差绝对值基本不随光产额变化, 因此在衡量晶体的辐照损伤时, 这两种方法得到的光产额变化的百分比要比实际值大, 如表 2 所示.

#### 4 针对实验谱拟合的比较

为了验证以上拟合方法在实际测量中的表现, 测量了 7 块不同光产额的 PWO 晶体, 光产额从 8Pe/MeV 到近 15Pe/MeV. 因为无法知道光产额的真值, 图 5 的比较结果中都以简化卷积法的结果为参照. 从图 5 可见费米-迪拉克加泊松法与简化卷积法差别表现得比图 4 中稍大, 但各种方法之间的关系与模拟谱拟合的结果基本一致.

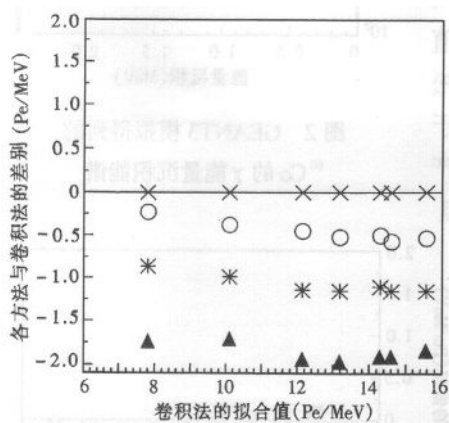


图 5 不同光产额的晶体实验谱拟合的比较(以简化卷积法(SIMC)的结果为标准) 图示同图 3.

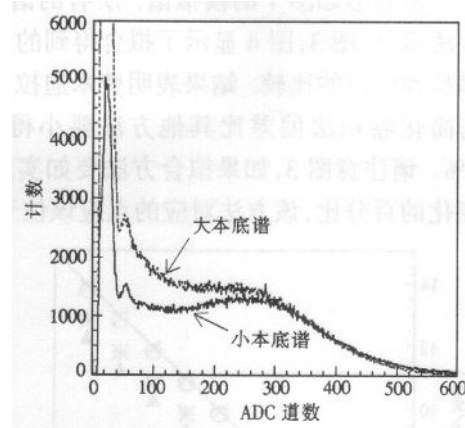


图 6 实验测得的不同本底情况下的能谱

表 3 不同本底和拟合区间对拟合结果的影响

方法	小本底	中本底	大本底
SG	$8.08 \pm 0.02$	$7.69 \pm 0.07$	$7.32 \pm 0.10$
EG	$8.95 \pm 0.04$	$8.99 \pm 0.05$	$8.93 \pm 0.03$
FP	$9.79 \pm 0.02$	$10.03 \pm 0.03$	$10.30 \pm 0.06$
SIMC	$10.3 \pm 0.02$	$10.26 \pm 0.02$	$10.39 \pm 0.05$

在实际测量中本底大小以及拟合区间的变化等因素也会影响拟合的结果. 一种好的拟合方法应该在不同条件下保持结果的稳定. 为了衡量不同方法在这两个因素变化下的稳定性, 我们通过改变放射源与待测晶体之间的物质厚度得到了 3 个不同本底情况下的谱, 如图 6. 并以  $\pm 5\%$  的范围调整拟合区间的大小和位置, 总共 8 种拟合区间, 由这 8 种区间得到的拟合结果计算平均值和均方差. 结果如表 3 所示, 可见指数加高斯法对本底

变化最不敏感,简单高斯法和费米-迪拉克加泊松法在本底变化时表现不稳定. 当本底不大时费米-迪拉克加泊松法和简化卷积法在拟合区间变化时比较稳定.

## 5 结论

本文对拟合闪烁晶体的  $\gamma$  谱不同方法进行了比较. 从拟合结果与真值的符合程度来看,费米-迪拉克加泊松法与简化卷积法采用了比较接近实际情况的函数来近似康普顿本底,从而给出比较精确的结果. 从拟合方法的稳定性方面考虑,简单高斯法和费米-迪拉克加泊松法受本底变化影响较大,指数加高斯法对本底变化最不敏感,但是它的拟合值与光产额的绝对偏差较大,尤其是无法正确反应辐照损伤造成的光产额的相对变化,因此并不可取. 综合比较,我们认为简化卷积法在低光产额闪烁晶体测量特别是辐照损伤的研究中是比较可行的.

## 参考文献(References)

- 1 The Technical Design Report of the Electromagnetic Calorimeter Project, CMS TDR4, CERN/LHCC 97-33, 1997
- 2 WU Jian et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, **22**(6):481-485(in Chinese)  
(伍建等. 高能物理与核物理,1998,**22**(6):481-485)
- 3 Baccaro S et al. Nucl Instr. and Meth., 1997, **A325**:69
- 4 XU Tong et al. A Fast Convolution Fitting Method for  $\gamma$  Spectrum from Scintillator, Journal of Univ. Of Sci. and Tech. of China, 2000, (in Chinese) accepted  
(许彤等. 中国科学技术大学学报,2000,待发表)
- 5 GEANT3, CERNLIB Program Library Long Writeup, W5013, 1994
- 6 LI Zu-Hao et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, **23**:1148(in Chinese)  
(李祖豪等. 高能物理与核物理,1999,**23**:1148)

## Comparison of the Methods Used in the Scintillator $\gamma$ Spectrum Fitting\*

XU Tong SHAO Ming LI Cheng CHEN Hong-Fang XU Zi-Zong

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

**Abstract** Several fitting methods that are applied on the  $\gamma$  spectrum to determine the light output of low light yield scintillators were compared with Monte Carlo simulation and real data. Deviations of the light yield to fitting values from different methods are evaluated. The stability of the fitting methods in the cases of varying background and varying fitting range is also studied.

**Key words** scintillator,  $\gamma$  spectrum, light yield, fitting method

Received 6 March 2000, Revised 31 May 2000

\* Supported by Bureau of International Cooperation, The Chinese Academy of Science