

单粒子灵敏度标定阈下修正技术及其应用

谭新建^{1,2}, 欧阳晓平^{1,2}, 宋朝晖², 阮锡超³, 赵晓川²,
王群书^{1,2}, 康克军¹

(1. 清华大学 工程物理系 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

3. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要:单粒子标定技术是电流型探测器灵敏度标定的重要手段, 本文通过对电流型探测器能量响应特性及探测器信号脉冲形成过程的研究, 提出了阈下修正方案, 解决了单粒子标定技术在低能领域的应用。通过该方法测得的钴源灵敏度与电流标定法测量结果在 1.1% 内一致, 钴铯灵敏度比值与理论结果在 7.0% 内一致。

关键词:单粒子; 能量响应; 灵敏度; 电流型探测器

中图分类号: TL81

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)03-0351-05

Principle and Application of Sub-threshold Correcting for Sensitivity Calibration by Single Particle

TAN Xin-jian^{1,2}, OUYANG Xiao-ping^{1,2}, SONG Zhao-hui², RUAN Xi-chao³,
ZHAO Xiao-chuan², WANG Qun-shu^{1,2}, KANG Ke-jun¹

(1. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education,
Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

3. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The technique of calibration by single particle is very important for the current detector on the energy response research. Based on the analysis of the energy response characteristic and pulsed signal producing process, a method was proposed for the sub-threshold correcting, which extended the calibrating technique to much lower energy range. According to the correcting technique, the measured sensitivities to ⁶⁰Co by single particle calibration and traditional current calibration match each other within 1.1% difference. The sensitivity ratio of ⁶⁰Co to ¹³⁷Cs matches the theoretical value within 7.0% difference.

Key words: single particle; energy response; sensitivity; current detector

电流型探测器 γ 能量响应的实验标定一直是脉冲 γ 射线束测量的难题^[1-2],其主要困难在于较难获得足够强度的单能 γ 射线源。实验室通常所使用的单能 γ 射线源强度较低,探测器输出信号表现为分立脉冲,无法通过直接测量探测器输出电流来获得探测器灵敏度。为解决弱源条件下的探测器灵敏度标定,西北核技术研究所提出了单粒子标定法^[3],其基本思想是通过测量探测器输出脉冲所包含的电荷来获得探测器的等效平均电流。然而,该方法出于扣除噪声干扰的目的设置了甄别阈,导致所测脉冲电荷谱不完整。因此,需开展阈下修正相关技术研究。

1 单粒子标定法

电流型探测器的灵敏度 $S_d(E_\gamma)(C \cdot cm^2)$ 可表示为单位 γ 面注量下探测器输出电荷,如式(1)所示:

$$S_d(E_\gamma) = q(E_\gamma) / \varphi(E_\gamma) \quad (1)$$

其中: $q(E_\gamma)$ 表示能量为 E_γ 的 γ 射线照射入射时,探测器单位时间内输出电荷量, $C \cdot s^{-1}$; $\varphi(E_\gamma)$ 为探测器位置处的 γ 注量率, $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

$\varphi(E_\gamma)$ 可通过 HPGe γ 谱仪或 Unidos 计量仪监测得到。 $q(E_\gamma)$ 测量原理如图 1 所示,实验时所使用的辐射转换靶为 80 μm 厚钨,闪烁体为 8 mm 厚 ST401,利用 ETL-9815B 型光电倍增管(PMT)进行探测。

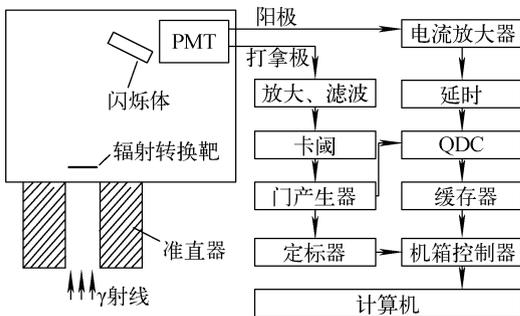


图 1 单粒子脉冲电荷谱测量原理框图

Fig. 1 Scheme of single particle calibration technique

当闪烁体发光进入 PMT 时,PMT 打拿极和阳极将同时输出脉冲信号。打拿极信号经放大、滤波,以及阈甄别后,产生门信号控制 QDC(电荷模数转换器)。在门信号有效期

间,QDC 将 PMT 阳极输出电流进行积分,从而得到 PMT 阳极输出脉冲所包含的电荷大小。其中,延时器用于匹配阳极输出脉冲和门信号,而设置甄别阈是为了滤除 PMT 暗噪声以及电子学噪声的干扰。由于 QDC 只记录门信号以内的电荷量,因此测量结果信噪比较高。

以有机闪烁体(ST401)探测器(图 1)为例,图 2 为探测器对 6.13 MeV 准单能 γ 射线^[4]的能量沉积谱和脉冲电荷谱。从图中可看到,脉冲电荷谱和能量沉积谱在峰值位置以上符合较好,在低道址处,脉冲电荷谱展宽明显。另外,由于甄别阈的存在,脉冲电荷谱在低道址处是不完整的。

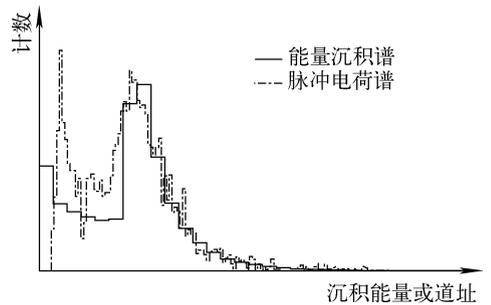


图 2 探测器对 6.13 MeV 准单能 γ 射线的能量沉积谱和脉冲电荷谱

Fig. 2 Energy deposition and charge spectra by 6.13 MeV γ -ray

图 3a 和 b 分别为探测器在 Co 源(1.17、1.33 MeV 两种能量 γ 射线,分支比近似为 1:1)和 Cs 源(0.662 MeV)照射时的能量沉积谱和脉冲电荷谱(归一至单位 γ 入射)。可看到,随着 γ 射线能量的降低,探测器输出脉冲电荷随之减小,脉冲电荷谱已无法反映能量沉积谱的形状,且脉冲电荷谱处于阈值以下部分所占比例更大,必须开展阈下修正技术研究。

2 有机闪烁探测器能量响应特性

γ 进入探测器沉积能量到最终输出电荷脉冲将经历以下过程:1) 闪烁体电离激发,以及退激发光;2) 闪烁光的传导、收集;3) 进入 PMT 光阴极的闪烁光由光电效应转化为光电子;4) 光电子倍增放大,从而输出电脉冲。

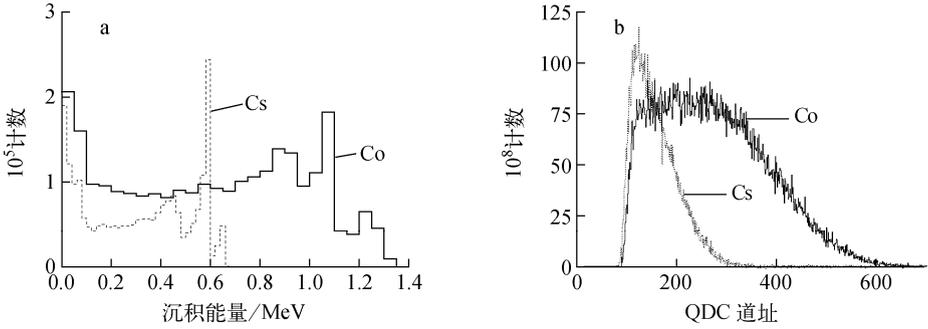


图3 Co、Cs在探测器内的能量沉积谱(a)和脉冲电荷谱(b)

Fig. 3 Detector response to Co and Cs of energy deposition spectra (a) and charge spectra (b)

2.1 闪烁发光修正

带电粒子在有机闪烁体中引起发光时,存在淬灭效应。单位路程上的光产额(dL/dx)同阻止本领(dE/dx)满足非线性的 Birks 公式^[5-6]:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{\rho dx} + C(\frac{dE}{\rho dx})^2} \quad (2)$$

其中:S为荧光转换效率;kB和C为拟合参数,对于ST401,分别取典型 $1.29 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}$ 和 $9.50 \times 10^{-6} \text{ g}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{MeV}^{-2}$ ^[7]。

为考察淬灭效应的宏观影响,将式(2)改写为式(3):

$$dL = \frac{1}{1 + kB \frac{dE}{\rho dx} + C(\frac{dE}{\rho dx})^2} S \cdot dE(E_e) \equiv S \cdot f(E_e) dE(E_e) \quad (3)$$

其中: E_e 为带电粒子能量。

$$f(E_e) = \frac{1}{1 + kB \frac{dE}{\rho dx} + C(\frac{dE}{\rho dx})^2} \quad (4)$$

$f(E_e)$ 可通过查阅带电粒子电离密度数据求得。

假设粒子入射时沉积总能量为 E_{dep} ,将式(3)两侧按带电粒子能量积分,可得:

$$\begin{aligned} L &= S \int f(E_e) dE(E_e) = \\ S \cdot E_{dep} &\int f(E_e) \cdot \frac{dE(E_e)}{E_{dep}} = \\ S \cdot E_{dep} &\int f(E_e) \cdot g(E_e) \equiv \\ S \cdot E_{dep} &\cdot \kappa_L \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $g(E_e) \equiv dE(E_e)/E_{dep}$ 为各能量带电粒子的能量沉积份额。定义 $\kappa_L \equiv \int f(E_e) g(E_e)$ 为

发光修正系数。

对于Co源和Cs源,通过Geant4^[8]模拟计算,获得不同能量电子在探测器内沉积能量份额函数 $g(E_e)$,如图4所示,从而通过式(5)求解可得 κ_L ,分别为0.901和0.880。

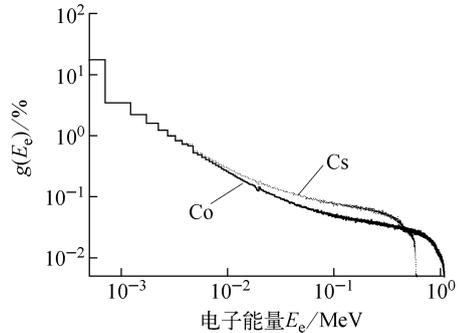


图4 不同能量电子沉积能量份额
Fig. 4 Energy deposition percentage by electron with different energy

另外,也可利用Geant4计算发光能量谱,对于Co、Cs源,如图5所示,相对于能量沉积谱,整体往低能方向偏移,且谱形也有变化。

2.2 闪烁光耦合效率修正

不同能量 γ 射线入射所产生的次级粒子在闪烁体内沉积能量并发光的位置分布不同,以及光收集过程的不同,将引起光收集效率的差异。

为表述方便,将闪烁体分为 n 层,如图6所示,假设第 i 层发光为 L_i ,该层发射光子进入光收集面的耦合效率为 η_i ,则此时的总光耦合效率为:

$$\eta_c = L_c/L = (\sum_i L_i \eta_i) / L \quad (6)$$

其中: $L = \sum_i L_i$ 。定义光耦合效率修正系数为:

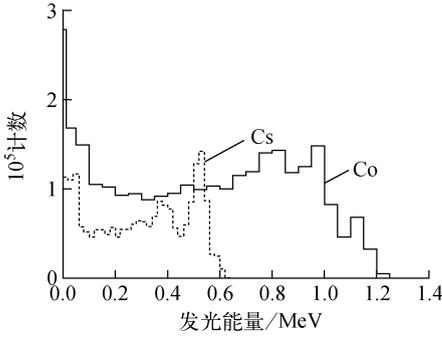


图5 Co、Cs 发光能谱

Fig. 5 Scintillation energy spectra by Co and Cs

$$\kappa_c = \eta_c / \bar{\eta} = (\sum_i L_i \eta_i) / (L \bar{\eta}) = \sum_i \frac{L_i}{L} \cdot \frac{\eta_i}{\bar{\eta}} \quad (7)$$

该修正系数代表相对于发光位置均匀分布时的光耦合效率比值,其中, $\bar{\eta} = \sum_i \eta_i / n$ 为各层光耦合效率的平均值。则光收集面所收集的光为:

$$L_c = L \kappa_c \bar{\eta} \quad (8)$$

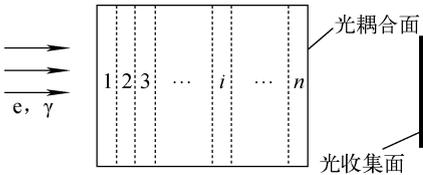
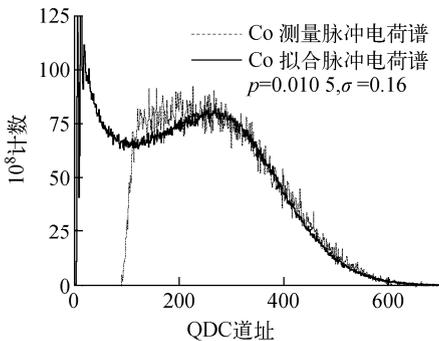


图6 闪烁光收集模型

Fig. 6 Scheme of scintillation light collection

κ_c 的计算可利用 Geant4 等软件进行光学模拟求解。考虑到光学参数较难准确获得,本文将借助实验测得的脉冲电荷谱求解。

假设 γ 入射时,单位面注量下的平均沉积



能量为 E_{dep} , PMT 光阴极量子效率为 ϵ , PMT 放大倍数为 M , 根据式(1), 探测器理论灵敏度可表示为:

$$S_{d-theory}(E_\gamma) = E_{dep}(E_\gamma) \kappa_L(E_\gamma) \kappa_C(E_\gamma) S \bar{\eta} \epsilon M e \quad (9)$$

其中: e 为电子电荷。

3 单粒子标定阈下修正技术及其运用

闪烁体发射光子进入 PMT 光阴极, 以及转换为光电子的过程服从二次项分布, 因此 PMT 上产生的光电子数服从二项分布 $B(LS, \kappa_c \bar{\eta} \epsilon)$ (简称为 $B(LS, p)$, $p \equiv \kappa_c \bar{\eta} \epsilon$), 另外, PMT 放大倍数 m 也存在一定的展宽, 假设其服从正态分布 $m \sim N(M, \sigma M)$, 其中, M 为 PMT 放大倍数期望值, 可通过实验实际测量得到。

为获得 γ 入射时的脉冲电荷谱, 根据发光能量谱(图5)抽样光子发射数目 LS 及二项分布 $B(LS, p)$ 抽样 PMT 上实际产生的光电子数 n , 另外由参数 M, σ 按正态分布抽样 PMT 放大倍数 m , 即可通过式(10)求得该发光事件形成的输出该脉冲在脉冲电荷谱上的道址:

$$\text{Channel} = n m e / q_{QDC} \quad (10)$$

其中: q_{QDC} 为 QDC 每道所代表的电荷量。调节参数 p 及 σ 对实验实际测得脉冲电荷谱进行拟合, 结果如图7所示, 两者符合较好。因此, 可根据拟合曲线将所测脉冲电荷谱外推求得完整谱。

将脉冲电荷谱各道所代表的电荷累加后即可得到单位时间内探测器输出电荷量 q , 根据式(1)即可求得探测器的灵敏度。测量结果及根据式(9)计算所得的理论灵敏度列于表1,

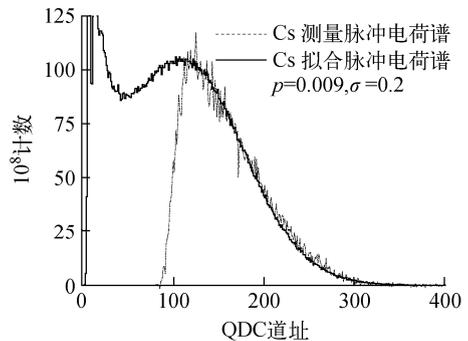


图7 Co、Cs 拟合脉冲电荷谱

Fig. 7 Fitting curves of charge spectra by Co and Cs

Co、Cs 灵敏度比值的理论实验差异在 7.0% 内一致。另外,表 1 同时列出了电流法测得的

Co 源灵敏度,与单粒子法测量结果在 1.1% 内一致。

表 1 单粒子测量结果
Table 1 Result of single particle calibration

单粒子法灵敏度/(C·cm ²)			S _{d-theory} /SMε ² /(MeV·cm ²)			钴铯比差异/%
Co ¹³⁷	Cs	钴铯比	Co	Cs	钴铯比	
6.09×10 ⁻¹⁶	2.18×10 ⁻¹⁶	2.80	1.19×10 ⁻⁶	4.54×10 ⁻⁷	2.61	7.0

注:1) 采用电流法测得的灵敏度为 6.03×10⁻¹⁶ C·cm²

2) 由于 SMe 为常数且与 γ 能量无关,因此将式(9)除以该量以简化计算过程

4 讨论

通过对电流型闪烁探测器的能量响应特性以及信号形成过程的分析,提出了单粒子灵敏度标定时的阈下修正技术,通过对实验结果的修正,获得完整脉冲电荷谱,所得灵敏度与传统电流法以及理论结果均符合较好,从而解决了单粒子标定技术在低能 γ 灵敏度测量时所受的限制。

然而,需注意的是,当 γ 射线能量越低,或射线在闪烁体中沉积能量越少时,PMT 输出脉冲电荷越小,测量所得脉冲电荷谱阈上部分所占比例将越小,这将造成拟合结果以及阈下修正精度的下降。因此,为提高测量精度,需采用低噪声的光电器件和电子学器件,尽可能降低阈值水平。

本工作实验部分得到了西北核技术研究所二室 γ 组、九室,以及马燕等的大力支持,在此一并表示感谢。

参考文献:

[1] 王群书,康克军,宋朝晖,等. ST401 闪烁探测器 γ 能量响应的实验研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(9): 856-860.
WANG Qunshu, KANG Kejun, SONG Zhao-hui, et al. Experimental study on energy sensitivity of ST401 scintillation detector to gamma ray[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(9): 856-860(in Chinese).

[2] 李如荣,彭太平,张建华,等. γ 射线探测器能量响应标定技术[J]. 原子能科学技术, 2006, 41(1): 88-91.
LI Rurong, PENG Taiping, ZHANG Jianhua, et al. Technique of calibrating energy response of γ-

ray detector [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 41(1): 88-91(in Chinese).

[3] 宋朝晖,阮锡超,代秋声,等. 电流型探测器单粒子灵敏度标定的原理及应用[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 453-456.
SONG Zhaohui, RUAN Xichao, DAI Qiusheng, et al. Principle and application of sensitivity calibration by single particle for current detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 453-456(in Chinese).

[4] 王红艳,丁声耀,徐鹤,等. ¹⁹F(p, αγ)¹⁶O 反应产生的 6~7 MeV γ 射线产额及其特性研究[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(3): 193-199.
WANG Hongyan, DING Shengyao, XU Kun, et al. Study on yield and characteristic for 6-7 MeV γ-ray produced in the ¹⁹F(p, αγ)¹⁶O reaction[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(3): 193-199(in Chinese).

[5] BIRKS J B. The theory and practice of scintillation counting [M]. London: Pergamon Press, 1964: 187-192.

[6] CRAUN R L, SMITH D L. Analysis of response data for several organic scintillators[J]. Nucl Instrum Methods A, 1970, 80: 239-244.

[7] 牛胜利,张前美,付竹明,等. 闪烁纤维中子探测器灵敏度研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(3): 282-285.
NIU Shengli, ZHANG Qianmei, FU Zhuming, et al. Study on sensitivity for a scintillating-fiber-array neutron detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(3): 282-285(in Chinese).

[8] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4—A simulation toolkit [J]. Nucl Instrum Methods A, 2003, 506: 250-303.