

单光子时间测量中的本底研究*

汪兆民 许咨宗 吴冲

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 讨论了单光子时间测量中的本底来源和时间分布,通过加符合门的方法,有效地抑止了偶然符合本底,消除了辐射在光电倍增管光阴极窗上产生的切伦科夫本底.

关键词 单光子 荧光衰减时间 符合门

1 引言

在高能物理实验中,闪烁晶体是构成电磁量能器的一个关键单元.在高对撞率的实验条件下,电磁量能器的时间特性主要取决于闪烁晶体的荧光衰减时间,因此,精确测量荧光衰减时间对研制和开发新闪烁晶体有着重要的意义.

测量荧光衰减时间最主要的方法是单光子延迟符合法,它是 Bollinger 和 Thomas 在 1961 年首先提出来的^[1],后来在此基础上, Moszynski 和 Bengston^[2]又作了改进.该方法的基本原理是:用一个光电倍增管(PM1)和快闪烁体相耦合,探测级联辐射 $\gamma_1(\gamma_2)$ 在快闪烁体中产生的荧光,作为事例的起始(START)信号;另一个光电倍增管(PM2)相对于待测闪烁晶体所张的立体角足够小,使得对每一事例,PM2 最多只能探测到级联辐射 $\gamma_2(\gamma_1)$ 在待测闪烁晶体中产生的光脉冲中的一个光子,给出事例的停止(STOP)信号,从而实现 PM2 对荧光脉冲的单光子时间分辨取样,此时 START 信号和 STOP 信号之间的时间间隔分布,反映了待测闪烁晶体荧光衰减的时间特性.

在单光子时间测量中,由于各种本底的干扰,使实验测得的时间谱发生畸变,因此,研究本底谱的特征,对精确测定荧光衰减时间是非常重要的.本文通过一个典型的实验安排,讨论了可能的本底来源,分析了本底谱分布的时间特性,提出了在实验上抑制本底的有效方法.

2 实验安排

典型的用放射源作为激发源的单光子时间测量的实验安排如图 1 所示.级联辐射源

1997-07-18收稿

* 国家自然科学基金资助

(^{60}Co 或 ^{22}Na)放在塑料闪烁体和待测闪烁体之间,PM1 (56AVP)与塑料闪烁体直接耦合,通过调节 PM2 (XP 2020 Q)与待测闪烁体的距离和光阴极前光栅孔径的大小,使 PM2 工作在对单光子灵敏的状态,即对每次在待测闪烁体中产生的荧光事例,保证在 PM2 光阴

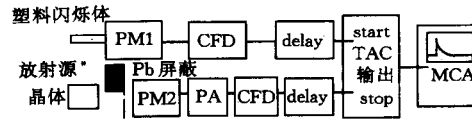


图1 单光子时间测量的实验安排

极上产生的光电子数远小于 1. 整个测量系统放置在一个不透光的暗箱内. 为了尽可能避免级联辐射击中 PM2 光阴极,放射源和 PM2 之间有一铅屏蔽体. PM1 输出的电脉冲经恒比定时 (CFD)和延迟器 (DELAY)后作为时幅变换器 (TAC)的 START 信号;PM2 输出经快放大 (PA),CFD 和 DELAY 后作为 TAC 的 STOP 信号,与 START 和 STOP 信号时间间隔成正比的 TAC 输出用多道 (MCA)记录. 当 START 信号和 STOP 信号分别与级联辐射 γ_1 (γ_2)和 γ_2 (γ_1)在塑料闪烁体和待测闪烁体中产生的荧光事例相关联时,MCA 记录的时间谱才真正反映待测闪烁体荧光衰减时间的分布.

3 本底来源及分布特征

用单光子延迟符合法测量荧光衰减时间时,主要的本底有:

- (1) 光电倍增管及其电子学读出电路的热噪声.
- (2) 与级联辐射 γ_1 (γ_2)不相关联的辐射击中塑料闪烁体或待测闪烁体.
- (3) 级联辐射 γ_1 (γ_2)及其在周围介质中发生散射的 γ 光子穿过铅屏蔽体打在 PM2 光阴极窗上产生切伦科夫光.
- (4) 级联辐射 γ_1 (γ_2)在待测闪烁体内产生能量较高的电子而诱发切伦科夫光.

分析表明,来自 (1)和 (2)的偶然符合本底谱的分布是和光电倍增管单路的平均计数率密切相关的. 设 PM1 和 PM2 单路的平均计数率分别为 n_1 和 n_2 ,由于级联辐射 γ_1 和 γ_2 的方向关联以及 PM2 的探测效率 $\varepsilon \ll 1$,因此与级联辐射相关联的 PM1 和 PM2 输出信号发生真符合的计数率 $n \ll n_1, n_2$. 根据 TAC 的工作原理,若 TAC 的量程为 T ,在 $t = 0$ 时刻 TAC START 端有一信号输入,则在 $0 < t \leq T$ 时间间隔内,START 端处于关闭状态,直到在此时间间隔内某一时刻有一 STOP 信号出现后才重新开放. PM1 和 PM2 输出信号中有一个是和级联辐射不相关联时,TAC 输出对应于一个偶然符合事例. 因此,PM1 和 PM2 输出信号发生偶然符合的条件是:在 PM1 输出一个 START 信号后 $t(\leq T)$ 时间内,PM2 有一个偶然的 STOP 信号输出. 由计数的统计分布可知,平均计数率为 n_2 的探测器在 $t(\leq T)$ 时间内产生 m 个计数的概率为:

$$w(m, n_2, t \leq T) = (n_2 t)^m e^{-n_2 t} / m! , \quad (1)$$

由此得在 $t(\leq T)$ 时间内 TAC 产生一个和一个以上偶然符合本底计数的概率为

$$W(n_2, t \leq T) = \sum_{m=1}^{\infty} w(m, n_2, t \leq T) = 1 - e^{-n_2 t} . \quad (2)$$

偶然符合本底概率密度分布函数为(2)式对时间的微分:

$$P(n_2, t \leq T) = \frac{dW(n_2, t \leq T)}{dt} = n_2 e^{-n_2 t}, \quad (3)$$

在 $[t, t + dt]$ 时间间隔内发生偶然符合的概率用 $dP(n_2, t \leq T)$ 表示, 即

$$dP(n_2, t \leq T) = n_2 e^{-n_2 t} dt. \quad (4)$$

可见, 该分布是呈指数衰减的, 与 START 信号间隔时间短的偶然符合计数发生的概率远高于间隔长的. n_2 和 T 越大, 衰减越快. 当 $n_2 T \ll 1$ 时, 在 TAC 全量程内, 偶然符合本底的分布可近似看成均匀分布. 在实际测量中, 对测量的衰减时间谱进行去本底拟合时, 了解偶然符合本底谱分布的这种时间特征是非常重要的. 由(4)式可知, 在 $[t, t + dt]$ 时间间隔内发生偶然符合的计数为

$$dN(n_1 n_2, t \leq T) = n_1 n_2 e^{-n_2 t} dt, \quad (5)$$

n_1 愈大, 偶然符合本底的贡献愈大. 图 2 为通过实验测得的本底谱, 该本底谱是在待测闪烁体和 PM2 之间加光屏蔽体后得到的, 其中 (a) 和 (b) 分别对应于 $T = 352\text{ns}$ 和 $T = 1.6\text{ms}$. PM2 的单路计数率 $n_2 \approx 2.35\text{kHz}$, 用(3)式拟合实验谱, 得 n_2 的拟合值为 2.38kHz , 和实际值符合较好.

γ 射线在 PM2 光阴极窗上产生的切伦科夫光本底的大小和实验的具体几何安排有关, 该本底的特征时间一般为 1ns 左右, 由于发光时间极短, 对闪烁体快成份的精确测量影响很大. 在图 2(a) 中, 连续的本底谱上有一个很窄的峰, 峰值计数比相应道数上偶然符合本底计数高几十倍, 它就是本底(3)造成的. 该本底也是和待测闪烁体中产生的荧光事例不关联的. 在确定的实验安排条件下, 本底的贡献由与荧光事例不关联的 PM1 计数率决定.

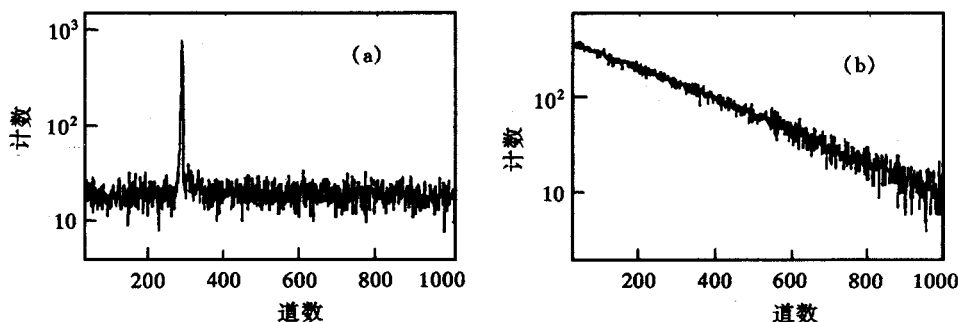


图2 不同TAC量程下的本底谱
(a) $T = 352\text{ns}$; (b) $T = 1.6\text{ms}$ (扣除了切伦科夫光本底).

和本底(1), (2)和(3)不同的是, 待测闪烁体中的切伦科夫光本底(4)总是和荧光事例相伴产生的, 因此, 不能鉴别所探测到的光子是来自切伦科夫光还是荧光. 作为对本底的一种估计, 可在不改变实验的几何安排下, 用铅玻璃代替待测闪烁体, 分别测量 PM2 前有

光屏蔽体和无光屏蔽体两种情况下的本底谱,两者之差即为铅玻璃中切伦科夫光的贡献,该实验结果可用来检验蒙特卡罗模拟.对 BGO, PbWO_4 模拟的结果显示,在时间谱的测量中,来自待测闪烁体的切伦科夫光的贡献为 10^{-3} 量级.

通过以上分析可知,本底 (1)、(2) 和 (3) 和 PM1 计数率 n_1 成正比. 当 n_1 很大而待测闪烁体同时具有较快(例如小于几十 ns)和很慢(例如大于几十 μs)衰减成份时,还可能产生超量程计数,即在小量程内测快成份时,有可能某次事例中的 START 信号和前次事例中对应于慢成份的超量程的 STOP 信号形成 TAC 输出. 当 START 的平均周期 $1/n_1$ 和 TAC 量程 T 可以相比时,这种情况更为频繁出现,此时,实验测得的时间谱前计数不仅有偶然符合的贡献;还包括了超量程的慢成份的贡献,由于后者以很慢的指数衰减的形式叠加在快成份的时间谱上^[3],因此在估计实验本底和数据拟合时应格外小心.

4 抑制本底的方法

有效抑制本底的关键是压低 PM1 与荧光事例不相关联的计数率,为此在原实验安排的基础上增加了光电倍增管 PM3 (GDB44) (见图 3), 它和待测闪烁体直接耦合, 输出经 PA, 甄别器 (Dis) 和电平变换器 (NIM-TTL) 后作为 TAC 的门 (GATE) 信号, 调节 GATE 的宽度和 START 信号的延迟时间, 使后者处于 GATE 的宽度内, 这样只有级联辐射 γ_1 (γ_2) 分别在塑料闪烁体和待测闪烁体中产生荧光时, START 信号才有效, 由于 TAC 的 START 端的有效计数率大为降低, 从而抑制了偶然符合本底 (1) 和 (2), 完全消除了级联辐射 γ_1 (γ_2) 和散射的 γ 光子击中 PM2 光阴极窗形成的切伦科夫本底 (3), 同时也使对应于慢成份的超量程事例(如果存在的话)大为降低.

图 4 和图 5 分别为实验测得的 BGO 和 PbWO_4 的荧光衰减时间谱, (a) 和 (b) 分别为不加符合门和加符合门的实验结果. START, STOP 和 GATE 信号脉冲的宽度分别为 8ns, 80ns 和 20ns. 比较 (a) 和 (b) 可知, 加符合门后偶然符合本底在总计数中占的比例明显下降了, 切伦科夫光本底也压低了很多. 应当指出的是, (a) 和 (b) 峰前偶然符合本底谱的形状有较大差别, 这在图 5 中更为明显, 即加符合门后, 峰前本底谱呈台阶状, 这是由于与级联辐射 γ_1 (γ_2) 相关联的 GATE 信号和不相关联的 START 信号发生偶然符合造成的, 即击中待测闪烁体的级联辐射 γ_1 (γ_2) 使 PM3 产生一个 GATE 信号, PM2 产生一个 STOP 信号, 而 γ_2 (γ_1) 没有击中塑料闪烁体, 从而在 GATE 宽度内出现一个非关联的 START 信号. 我们知道, 级联辐射 γ_1 (γ_2) 击中待测闪烁体后, PM2 的 STOP 信号出现的概率随时间的分布可用归一化后的时间谱来表示. 根据 PM1 的平均计数率, 用蒙特卡罗模拟的方法在 PM3 的 GATE 脉冲宽度内产生的偶然符合谱如图 6(a) 所示. 改变 START 信号和 GATE 信号的相对延迟时间, 使 START 信号移出 GATE, 实验测得的偶然符合谱如图 6(b) 所示. 图 6(a) 和 (b) 十分相似, 说明上述对峰前本底谱来源的分析是正确的. 显然, 台阶状本底

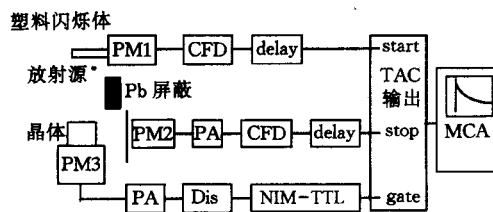


图3 加符合门的单光子时间测量的实验安排

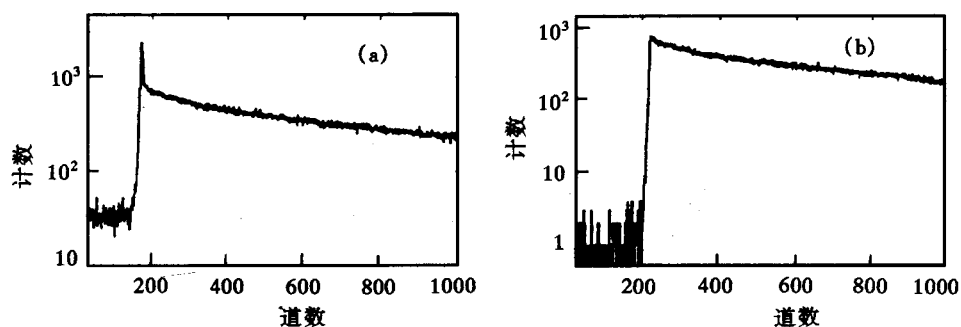
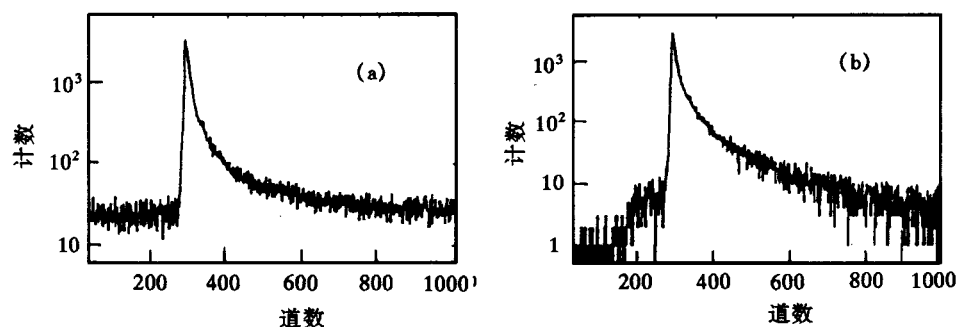


图4 BGO荧光衰减时间谱(0.352ns/道)

(a) 不加符合门; (b) 加符合门.

图5 PbWO_4 荧光衰减时间谱(0.352ns/道)

(a) 不加符合门; (b) 加符合门.

谱的高度和延伸的时间范围与待测闪烁体的快慢成份比有关,快成份较多时,本底贡献较大,主要集中在时间谱峰附近;慢成份较多时,本底贡献较小,但分布在一个较宽的时间范围内.比较图 4(b)和图 5(b)也说明了这一点.在进行去本底拟合时,应注意这种本底的时间分布特征.

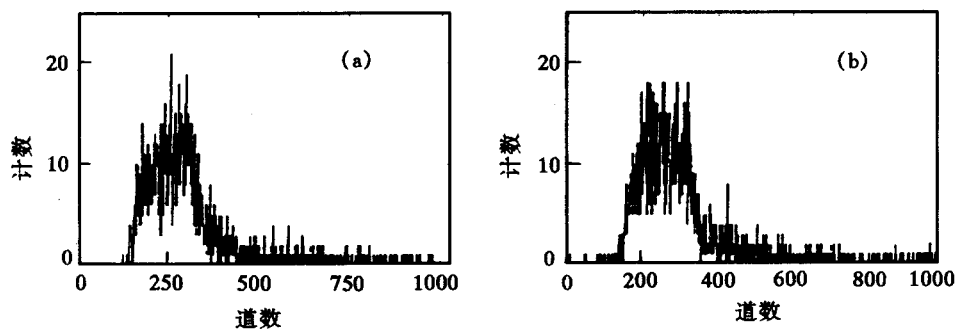


图6 加符合门后的偶然符合时间谱

(a) 蒙特卡罗模拟的结果; (b) 实验测量结果.

5 结论

本文讨论了单光子时间测量中的本底来源及其分布的时间特征,通过对本底谱的分析得到如下结论:

(1) 偶然符合本底的时间分布是呈指数衰减的,当 STOP 信号的计数率和 TAC 量程的乘积远小于 1 时,可近似为均匀分布.

(2) 偶然符合本底和辐射击中 PM2 光阴极窗产生的切伦科夫光本底与 START 信号的计数率有关,通过加符合门的方法可压低与荧光事例不相关联的 START 信号的计数率,提高信噪比.

(3) 有符合门时的偶然符合本底谱分布与无门时有很大不同,并和待测闪烁体快慢成份比有关.

参 考 文 献

- [1] Bollinger L M, Thomas G E. Rev. Sci. Instr., 1961, 32:1044
- [2] Moszynski M, Bengston B. Nucl. Instr. and Meth, 1977, 42:417
- [3] Nikl M et al. CERN/PPE Report CMS TN/95-\$\$\$

Study on the Background in Single Photon Time Measurement*

Wang Zhaomin Xu Zizong Wu Chong

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

Abstract In this paper, the source and time distribution of background in the single photon time measurement are studied. By using the method of coincident gate the random coincident background and the Cherenkov light produced on the window of the photocathode of photomultiplier are suppressed effectively.

Key words single photon, fluorescence decay time, coincident gate

Received 18 July 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China