

# 电荷比较法测量液体闪烁体 $n, \gamma$ 分辨性能

陈宇<sup>1</sup> 王子敬<sup>2</sup> 毛泽普<sup>1</sup> 邓炳坤<sup>2</sup> 李世昌<sup>2</sup> 李金<sup>1</sup>  
李海波<sup>1</sup> 张仲云<sup>2</sup> 胡涛<sup>1</sup> 夏小米<sup>1</sup> 曹贵禄<sup>3</sup> 赖元芬<sup>1</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (物理研究所 台北 11529)

3 (核仪器厂 北京 100020)

**摘要** 描述了一种采用 CAMAC-微机系统采集数据, 电荷比较法测量液体闪烁体的中子、 $\gamma$ 射线分辨性能的新方法. 同时测量了液体闪烁体 NE213 或 BC519 样品在  $^{241}\text{Am-Be}$  或  $^{252}\text{Cf}$  中子源照射下的脉冲总电荷及多路不同时间段的部分电荷. 对数据的离线分析给出闪烁体  $n, \gamma$  分辨与延迟时间及能量分布的关系, 并可利用  $n, \gamma$  鉴别方法测量中子或  $\gamma$  射线的能量分布及闪烁体快或慢脉冲形状.

**关键词** 电荷比较法 液体闪烁体  $n, \gamma$  分辨 脉冲形状

## 1 引言

粒子鉴别是物理实验中的一项基本技术. 由于中子信号通常伴随着大量  $\gamma$  射线背景, 因而在探测中子的实验中  $n, \gamma$  分辨成为实验的关键. 中子信号依其能量可分为快中子、中能中子和慢中子, 对于快中子的探测, 通常是探测其在探测介质中的反冲质子(氢原子), 而对慢中子则通常是在探测介质中加载  $^{10}\text{B}, ^6\text{Li}, ^3\text{He}$  等元素通过  $(n, \alpha)$  或  $(n, p)$  反应探测其反应产物  $\alpha, p$  等重粒子, 因而将对中子的探测转化为测量相应的带电粒子. 另一方面,  $\gamma$  射线通过在物质中的光电效应、康普顿效应产生散射电子而被记录. 能够区分电子与重带电粒子则能鉴别  $\gamma$  射线与中子.

某些无机闪烁体(如 CsI (TI))及有机闪烁体(如苾晶体)具有不同衰减时间的闪烁荧光成分, 由于不同带电粒子在闪烁体中的电离密度不同, 因而所激发荧光的快成分与慢成分的强度比也不同, 其输出光脉冲形状就有差异. 利用不同带电粒子激发产生的闪烁光脉冲形状不同来鉴别粒子的技术称为脉冲形状甄别(Pulse Shape Discrimination).

早在五、六十年代的核物理实验中, 脉冲形状甄别技术即已被广泛用于强  $\gamma$  射线背景中探测中子. 较早使用的是电荷比较法<sup>[1-3]</sup>, 但由于其线路相对复杂, 调整困难, 使用受到限制. 随后普遍使用的是利用快、慢成分引起的电压脉冲上升时间不同, 采用时间幅

度变换器测量给出粒子时间分布的过零时间法<sup>[4-9]</sup>。

随着计算机在物理实验中越来越广泛的应用, 多路数据的同时采集变得异常容易, 利用计算机对数据的离线分析更使得对数据采集线路的要求越来越简化。本文描述了电荷比较法鉴别中子、 $\gamma$ 射线的闪烁探测器和 CAMAC-微机数据采集系统。

## 2 测量原理

在许多闪烁体中, 带电粒子激发的光脉冲含有不同的衰减时间成分, 快、慢成分的强度比与激发粒子的质量和电荷有关, 也就是与带电粒子在闪烁体中所形成的电离密度 $\rho$ 有关。文献 [10] 中用延迟符合法研究光脉冲形状, 指出在有机闪烁体茈晶晶体中快中子(反冲质子)激发的光脉冲, 其慢成分与快成分的强度比是 $\gamma$ 射线(反冲电子)激发的光脉冲的慢成分与快成分的强度比的 4.5 倍。

闪烁体发射的荧光被光电倍增管收集, 当光电倍增管工作在线性范围时, 从它的阳极或某个倍增极引出的电流脉冲形状反映了闪烁体发射的光脉冲形状, 即电流脉冲可表示为:

$$I(t) = I_f(\rho) e^{-t/\tau_f} + I_s(\rho) e^{-t/\tau_s}, \quad (1)$$

其中 $\tau_f, \tau_s$ 及 $I_f(\rho), I_s(\rho)$ 分别是快、慢成分的衰减时间及电流脉冲最大值, 用一个时间常数很大的积分回路对电流脉冲积分可得总电荷:

$$Q = \int_0^{\infty} I(t) dt = I_f(\rho)\tau_f + I_s(\rho)\tau_s = Q_f(\rho) + Q_s(\rho), \quad (2)$$

亦即电荷脉冲也是由快、慢两部分组成, 它们都是带电粒子在闪烁体中形成电离密度 $\rho$ 的函数。不同带电粒子形成的 $Q_f(\rho)/Q_s(\rho)$ ,  $Q/Q_f(\rho)$ 或 $Q/Q_s(\rho)$ 都不一样, 因此可以通过比较不同带电粒子所形成的这些比值中的任何一种来鉴别粒子, 这种方法即是电荷比较法。最早实现这种方法的是 F.D. Brooks<sup>[11]</sup>, 他通过光电倍增管最后一个级倍增极引出正脉冲, 经大时间常数的积分电路得到总电荷, 再从阳极引出负脉冲, 经小得多的时间常数的积分电路得到电荷脉冲的快成分, 两路信号通过衰减器在加法电路中相加, 通过调节使 $\gamma$ 射线产生的脉冲在加法电路中相消输出为零, 从而达到在测量中子时去除 $\gamma$ 射线本底的目的。这类电路的主要问题是当动态范围宽时调节线路达到平衡很难。

本文描述一种完全不同于上述 NIM 标准电路而是采用 CAMAC-微机系统采集数据, 测量液体闪烁体中子、 $\gamma$ 射线分辨性能的新方法, 其特点是线路简单, 多路同时积分, 数据信息量大, 离线分析数据给出结果。

## 3 测量方法

测量系统如图 1 所示, 液体闪烁体样品与光电倍增管 XP2020 光阴极耦合同置于一暗盒中, 中子源垂直入射于闪烁体样品上, 光电倍增管收集到的电流脉冲信号被一线性扇出单元 428F 分为 13 路, 其中一路经恒比定时甄别器后产生一定时信号, 该信号触发门产生器产生一宽度可调的门信号去给 ADC2249W 开门; 另外 12 路电流脉冲信号经不同时间

的延迟后分别接到 ADC2249W 的 12 路输入。

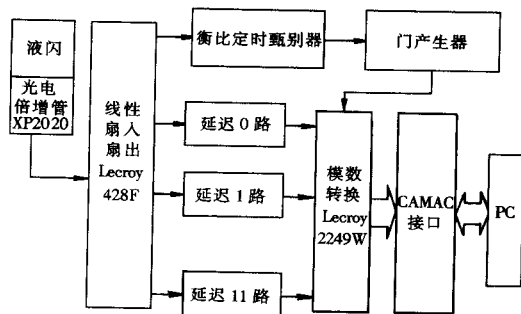


图1 测量系统框图

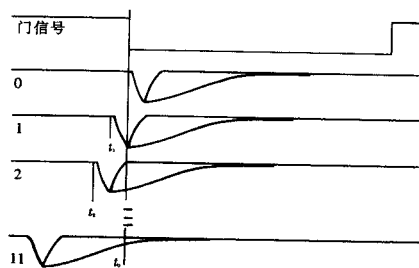


图2 多路数据的时间关系示意图

12 路输入信号由于相对于门信号具有不同到达时间(如图 2 所示),而只有在门信号内的脉冲部分才会被积分给出电荷量,因而同一电流脉冲信号则可同时得到不同时间段的积分电荷:调节 0 路输入延迟使其脉冲恰好在门信号内,调节门信号足够宽(如  $>5\tau_s$ ),则 0 路积分给出脉冲信号的总电荷  $Q_0$ ,1 路输入相对 0 路提前  $t_1$  时间,或者说,门信号对 1 路相对延迟了  $t_1$  时间,则 1 路积分给出脉冲信号在  $t_1$  时刻后的部分电荷  $Q_1$ ;依此类推。由于线性扇出 428F 的 13 路输出幅度会有差异以及不同延迟也会有不同的幅度衰减,因而利用精密脉冲产生器产生的脉冲信号对输入 ADC 的 12 路信号进行了校正,分别归一到 0 路输入。当  $t_i$  与快衰减时间  $\tau_f$  相当时,可以认为此时  $Q_i \cong Q_s$ ,因而  $Q_0 / Q_i \cong Q / Q_s$ ,亦即本方法是通过比值  $Q / Q_s$  或  $Q_s / Q$  来鉴别中子、 $\gamma$  射线。

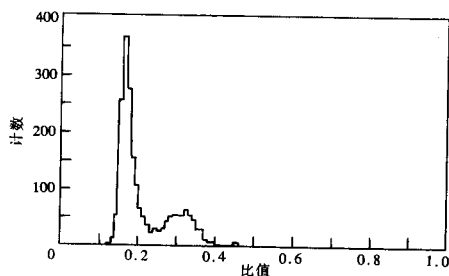


图3 比值  $R=Q_s/Q_0$  分布

如前所述,在有机闪烁体中,中子激发更多的慢成分,因而相应测得的比值  $R = Q_i / Q_0$  要比  $\gamma$  射线激发测得的值大。通常在具有  $n, \gamma$  分辨性能的有机闪烁体测量得到的  $R$  值分布上会观察到相应于快、慢成分的两个峰,  $R$  值较大的峰被认为是由中子激发而来,  $R$  值较小的峰则来自  $\gamma$  射线(如图 3 所示)。定义优质因子

$$M = \frac{R_n - R_\gamma}{\Delta R_n + \Delta R_\gamma}, \quad (3)$$

其中  $R_n, \Delta R_n$  和  $R_\gamma, \Delta R_\gamma$  分别是中子和  $\gamma$  射线峰的位置和半高宽,  $M$  值越大,则表明该有机闪烁体  $n, \gamma$  分辨越好。

## 4 测量结果

利用本方法对已知具有脉冲形状甄别性能的液体闪烁体样品进行了测量。样品选用 NE 公司二甲苯为溶剂的 NE213 和 Bicorn 公司矿物油为溶剂的 BC519, 均去氧封装于  $\phi 40 \times 60\text{mm}$  的玻璃容器中,一端采用硅油与光电倍增管光阴极耦合,中子源分别采用了  $^{241}\text{Am-Be}$  ( $\sim 10^6 \text{ n/s}$ ) 和  $^{252}\text{Cf}$  ( $\sim 10^3 \text{ n/s}$ ) 源。采用  $^{137}\text{Cs}$  662keV  $\gamma$  射线对系统进行了能量刻

度, 该能量的 $\gamma$ 射线在液体闪烁体中主要产生康普顿散射, 康普顿边缘对应最大散射电子能量 479keV. ADC0 路得到的总电荷  $Q_0$  分布即对应于入射粒子的能量分布.

由于液体闪烁体的快、慢衰减时间通常只有几个到几十纳秒, 因而选择门宽 600ns 较为合适, 门宽太窄不能得到总的积分电荷, 太宽则使得 ADC 台阶增大, 有效测量范围减小. 在 600ns 的门宽下, ADC2249W 各路台阶值一般均在 30—40 之间. 各路相对延迟  $t_i$  选择为 0, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 和 100ns, 以期获得最佳的相对延迟时间值, 各路电荷  $Q$  由测得的 ADC 值减去相应的台阶值得到, 为得到一定的统计量, 每次测量取数不少于 5000.

图 4 为 BC519 样品在相对延迟  $t_5 = 40$ ns 下获得的部分电荷  $Q_5$  与总电荷  $Q_0$  的二维散点图 (NE213 样品具有相似的性能). 由图可见, 当入射粒子能量足够大时, 对应中子和 $\gamma$ 射线的点能够清楚地分离开来. 比值  $R = Q_5 / Q_0$  的分布如图 3 所示. 对应中子和 $\gamma$ 射线的两个峰分开得很清晰, 且都近似为高斯分布. 采用两个高斯分布拟合该实验值可计算得到  $M$  值. 选取适当的截断值  $R_c$  以及利用测量所得中子和 $\gamma$ 射线的总强度, 可以估计中子鉴别计数的拒绝概率或混入 $\gamma$ 计数的概率 (假定中子或 $\gamma$ 射线激发慢、快脉冲的强度比已知).

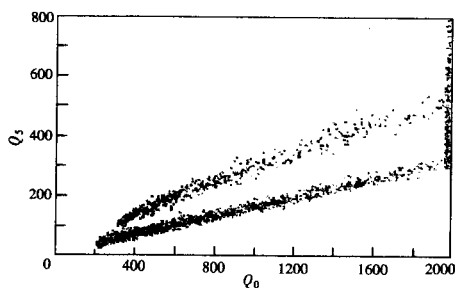


图4 部分电荷 $Q_5$ 与总电荷 $Q_0$ 的散点图  
(样品BC519, 下同)

测量并计算得到在不同相对延迟时间下的  $M$  值作成图 5. 由图可见存在一最佳相对延迟时间  $t \approx 40$ ns, 此时  $M$  值最大. 这是可以理解的: 由优质因子  $M$  的定义式 (3) 可知,  $R_n$  越大且  $R_\gamma$  越小,  $M$  值越大. 当相对延迟  $t$  较小时,  $R_\gamma$  较大; 而当相对延迟  $t$  较大时  $R_n$  又趋于减小. 故一定存在一最佳相对延迟时间值, 对不同的液体闪烁体, 可能该值也不相同 (取决于闪烁体固有的快、慢脉冲衰减时间). 测量并寻找此最佳相对延迟时间值, 无疑是十分重要的. 利用我们介绍的方法可以很方便容易地找出该值.

由图 4 得知: 入射粒子的能量越高,  $n, \gamma$  分辨越好. 对实验测量的  $Q$  值, 离线分析时选取不同的能量截断值, 计算得到相应的  $M$  值, 从而得到图 6. 图 6 定量地显示了  $M$  值与入射粒子能量依赖的关系. 图中最高一个能量点  $M$  值由于统计性太小因而误差较大. 对于一确定的测量系统, 指出其适用的能量范围 (亦即动态范围) 是必要的.

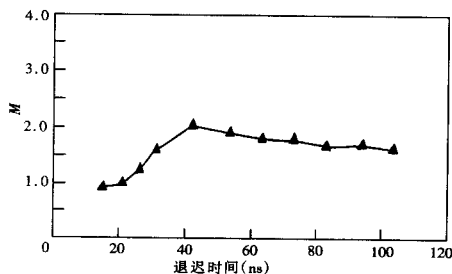


图5  $M$ 值与相对延迟时间的关系

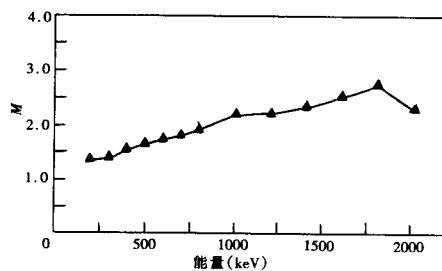


图6  $M$ 值与入射粒子能量分布的关系

利用合适的中子、 $\gamma$ 射线鉴别截断值  $R_c$  可以得到较为纯净的中子和  $\gamma$  射线样本。从而可分析其相关信息, 如中子和  $\gamma$  射线的能量分布。测量能量分布对于了解中子或  $\gamma$  射线的来源将是有益的, 尽管液体闪烁体的能量分辨较差。闪烁体的快或慢脉冲形状也可由  $\gamma$  射线或中子激发的电荷脉冲形状推知。部分电荷  $Q(t_i) = \int_{t_i}^{\infty} I(t) dt$  随相对延迟时间  $t_i$  的分布, 即包含了光脉冲形状的信息。当然这种信息因为  $t_i$  设置的有限不可能太充分。如果用 flash ADC 代替本测量系统中的 2249W ADC, 则由于 FADC 较高的取样频率, 因而可细致地描绘出单次测量的光脉冲形状来。

## 5 结论

采用描述的测量系统测量了液体闪烁体 NE213 和 BC519 样品在中子源照射下的脉冲总电荷和多路不同大小的部分电荷。对测得的数据利用电荷比较法进行了分析, 分析结果表明: 存在一最佳相对延迟时间使得在该时间下液体闪烁体 n,  $\gamma$  分辨性能最佳; 入射中子或  $\gamma$  射线能量越高, 分辨越好。测量数据同时还可给出中子或  $\gamma$  射线能量分布及快、慢脉冲形状等信息。利用本测量系统可以对研制的液体闪烁体进行测量分析, 一次测量可给出多方面的信息, 并对其 n,  $\gamma$  分辨性能给出定量的判据。可以预期, 测量系统若采用 FADC, 将可给出更为充分的信息。

## 参 考 文 献

- 1 Brooks F D. Nucl. Instr. and Method, 1959, 4:151
- 2 Roush M L, Wilson M A, Hornyak W F. Nucl. Instr. and Method, 1964, 31:112
- 3 Adams J M, White G. Nucl. Instr. and Method, 1978, 156:459.
- 4 Alexander T K, Goulding F S. Nucl. Instr. and Method, 1961, 13:244
- 5 Taylor I J. Nucl. Instr. and Method, 1970, 88:267
- 6 Winyard R A, Lutkin J E, Mcbeth G W. Nucl. Instr. and Method, 1994, 95:141
- 7 Qnge R S et al. Nucl. Instr. and Method, 1975, 126:391
- 8 Glasgow D W et al. Nucl. Instr. and Method, 1974, 114:535
- 9 Aksay A et al. Nucl. Instr. and Meth. in phys. Res., 1994, A337:486
- 10 Bollinger L M, Thomas G E. Rev. Sci. Instr., 1961, 32:1044

## Charge Comparison Method Used to Discriminate Photons and Neutrons in Liquid Scintillators

Chen Yu<sup>1</sup>   Wang Zijing<sup>2</sup>   Mao Zepu<sup>1</sup>   Deng Bingkun<sup>2</sup>   Li Shichang<sup>2</sup>  
Li Jin<sup>1</sup>   Li Haibo<sup>1</sup>   Zhang Zhongyun<sup>2</sup>   Hu Tao<sup>1</sup>   Xia Xiaomi<sup>1</sup>  
Cao Guilu<sup>3</sup>   Lai Yuanfen<sup>1</sup>

1(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039*)

2(*Institute of Physics, Taipei 11529*)

3(*Nuclear Instrument Factory, Beijing 100020*)

**Abstract** A new method used to discriminate neutrons and photons in liquid scintillators with charge comparison and using a CAMAC-microcomputer data acquisition system is described. The total charge and multi-channel partial charges for different time segments of pulses from liquid scintillator samples of NE213 or BC519 radiated by  $^{241}\text{Am-Be}$  or  $^{252}\text{Cf}$  neutron sources are measured. The dependences of n,  $\gamma$  separation in scintillators on delay time and energy distribution are given from off-line data analysis. The energy distribution of neutrons or  $\gamma$ -ray and pulse shapes for fast and slow components of scintillators can be measured using such a n,  $\gamma$  discrimination method.

**Key words** charge comparison, liquid scintillator, n,  $\gamma$  separation, pulse shape