

# $\beta$ 缓发中子探测阵列的性能优化及测试\*

楼建玲<sup>1)</sup> 李智焕 叶沿林 曹中鑫 江栋兴 华辉 郑涛 李湘庆

葛愉成 吴翠娥 李琛 庞丹阳 卢飞 范凤英 马立英

(北京大学物理学院技术物理系和重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

**摘要** 讲述了用于 $\beta$ 缓发中子发射测量的中子探测阵列的性能优化过程及测试结果. 对中子探测器包装用的几种反射材料、光导和光电倍增管之间用的几种耦合材料行了系统的对比和研究. 为了优化电子学和实时监测整个探测阵列的工作状态, 引入了LED光纤刻度监测系统.

**关键词** 中子探测阵列 反射材料 耦合材料 LED光纤刻度监测系统

## 1 引言

$\beta$ 缓发中子发射是轻丰中子不稳定核的一种主要衰变模式. 通过对 $\beta$ 缓发中子的探测可以得到母核的 $\beta$ 衰变模式, 子核的高激发态能级等很多核结构的信息. 为了研究轻丰中子区不稳定核的 $\beta$ 衰变性能及结构, 北京大学建立了一套 $\beta$ 缓发中子探测阵列<sup>[1]</sup> (包括中子墙和中子球两部分), 并于2004年顺利完成了第一次在束实验, 得到了比较好的物理结果. 首次发现了<sup>18</sup>N的两群 $\beta$ 缓发中子, 能量分别为 $0.58 \pm 0.02 \text{ MeV}$ ,  $0.79 \pm 0.04 \text{ MeV}$ ; 对应的分支比分别为 $5.04 \pm 1.12\%$ ,  $0.28 \pm 0.06\%$ <sup>[2]</sup>.

在束实验表明, 整个探测阵列的性能已经接近国际上同类探测器的水平. 为了进一步提高探测效率、降低探测阈值, 实验结束后又对整个探测阵列进行了一系列的性能优化. 中子探测器的材料为富含质子的塑料闪烁体BC408, 其探测中子的原理为: 中子打在氢核上, 通过n-p弹散产生反冲质子, 反冲质子引起闪烁体产生特征荧光, 荧光信息经过闪烁体传输后被PMT记录. 所以提高探测效率降低阈值的关键是增大光收集效率, 提高光输出幅度. 优化过程主要包括: (1) 探测器本身的优化, 对闪烁体和光导用的包装材料, 光导与光电倍增管(PMT)之间用的耦合材料进行了系统地对比研究, 从提高光输出幅度减少光传输损失方面来优化其性能; (2) 电子学的优化, 引入了LED

光纤刻度系统, 从放大光输出幅度降低电子学阈值方面来提高其性能.

## 2 探测器本身的性能优化

对于探测器本身来说, 影响光输出幅度的有两个重要因素: (1) 闪烁体和光导的包装材料; (2) 光导与PMT之间的耦合材料. 首先对探测器所应用的多种包装反射材料进行测试比较. 为了了解各种反射材料的基本性能, 减少反射材料的搜索范围, 实验先在直径为5cm, 长为5cm的圆柱形小闪烁体上进行, 用ADC记录的<sup>60</sup>Co源的康普顿坪的半高宽道址来表征闪烁体在不同包装材料下的光输出水平, 表1给出了实验结果. 其中: 毛面是指反射材料中较粗糙的一面靠近闪烁体, 光面是指较光滑的一面靠近闪烁体.

表 1 小闪烁体在不同包装材料下的实验结果

包装材料	毛面半高道址	光面半高道址
TYVEK1085D	6432	6153
TYVEK1072D	6187	6439
TYVEK1056D	6340	6231
TYVEK1042B	6248	6228
A4纸	4974	6974
铝膜	5647	5189
镀铝mylar膜	5774	None

由表1可以看出: 美国Dupont公司生产的4种TYVEK纸的包装效果远好于其他的包装材料, 且4

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)和国家自然科学基金项目(10475004, 10405001, 10221003)资助

1) E-mail: jllou@hep.pku.edu.cn

种纸的包装效果在5%的误差范围内是一致的; 镀铝mylar膜的效果要好于铝膜. 根据以上结果, 选定原始反射材料铝膜, TYVEK纸中的1056D, 镀铝mylar膜, 以及文献[3]中推荐的Millipore在中子墙单元短棒上( $40 \times 4.5 \times 2.5 \text{cm}^3$ )实验. 实验时将 $^{60}\text{Co}$ 源置于短棒中间, 用TDC记录短棒两端PMT输出信号的时间差(半宽代表时间分辨), 用QDC记录短棒两端PMT输出信号的幅度. 测试结果与小闪烁体的结果一致: 1056D纸的反射效果明显好于其他包装材料. 图1给出了中子墙中20根短棒在用Al膜包装和用1056D纸包装时的左端幅度对比图, 由图可知, 改为1056D的纸包装后, 幅度均有80%以上的提高.

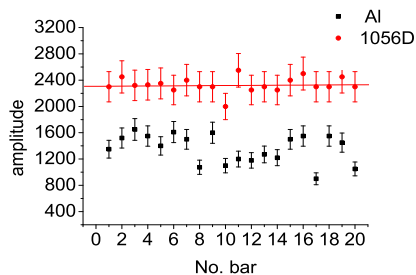


图1 中子墙的20根短棒在用Al膜包装和用1056D纸包装时的左端幅度对比图

另外还在中子球的组成单元弧形闪烁体上测试了不同包装材料的效果. 弧形闪烁体长157cm, 中间宽40cm, 两端宽20cm, 由于其尺寸较大,  $^{60}\text{Co}$ 源的康普顿坪不明显, 因此改用宇宙线来测试. 表2是用宇宙线测试得到的所有弧形闪烁体在用Al膜包装时和用1056D纸包装时的幅度、时间分辨的对比表. 由表2可以看出, 换成1056D的纸包装后, 幅度均会提高一倍左右, 且时间分辨不会变差.

表2 所有弧形闪烁体在用Al膜包装时和用1056D纸包装时的幅度、时间分辨的对比表

标号	Al膜			1056D纸		
	左端	右端	时间分辨/ns	左端	右端	时间分辨/ns
C1	380	340	0.76	780	750	0.78
C2	410	450	0.74	780	820	0.71
C3	420	410	0.76	750	650	0.73
C4	430	410	0.68	800	850	0.75
C5	280	250	0.67	650	670	0.80
C6	330	360	0.72	650	670	0.72
C7	370	390	0.73	680	680	0.73

光导与光电倍增管之间的耦合材料不仅对光输出幅度的大小有极大的影响, 而且对整个探测阵列的稳定性也有很大的影响, 所以我们还研究对比了一系列的耦合材料, 包括空气、硅油、硅脂、硅胶垫EJ560.

结果表明, 硅脂和硅油耦合时的光输出水平基本一致; 硅胶垫耦合时的光输出水平要比硅油和硅脂耦合时差10%; 空气耦合时(紧贴)的光输出水平最差, 仅为硅油和硅脂耦合时的50%. 但是根据实际操作的经验可知: 探测器的移动安装等会极大地降低硅油和硅脂的耦合效果, 而硅胶垫是有一定弹性和粘性的固体, 不存在上述问题. 综合考虑光输出幅度的大小和系统的稳定性两方面因素后, 选定硅胶垫EJ560作为耦合材料.

### 3 电子学的优化

电子学也是影响效率和阈值的重要因素. 为了优化电子学, 实时监控整个探测阵列的工作状态和性能的变化, 引入了LED光纤刻度监测系统<sup>[4, 5]</sup>, 其基本组成及应用电子学如图2所示. 精密脉冲发生器输出宽度为10ns的脉冲, 驱动LED发光. 光是波长为490nm的蓝光, 与闪烁体的发光波长相匹配. 蓝光经过光纤分路系统传输后到达各个PMT, 被各个PMT收集. LED的发光幅度会不可避免地随着时间发生变化, 从而使PMT的输出幅度随时间发生变化, 影响监测效果, 所以引入了一个参考PMT. 实验结果表明, 待监测PMT幅度与参考PMT幅度的比值是一个常数, 基本不受光强变化的影响.

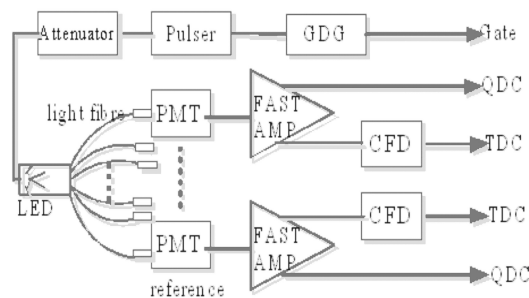


图2 光纤刻度系统的基本组成及电子学

蓝光的能量单一, 所以光纤刻度系统还可以用于光电倍增管的性能测试, 各种插件的功能测试等电子学的优化方面. 下面给出一个利用光纤刻度系统测试优化电子学的例子. 电子学都会有一定的阈值, 小于阈值的信号就会被丢失从而影响探测效率和探测阈值. 利用飞行时间方法测量中子的电子学中, 常微分甄别插件CFD的阈值是影响电子学阈值的主要因素, 最理想的CFD的阈值是即能排除噪声又能使最小的物理信号通过. 单光子峰是PMT能够测量得到的最小信号. 图3给出了一个PMT不加快放和加上加快时测量到的单光子峰, 其中单光子峰与噪声峰的交界点是阈值设定的最理想位置. 由图可知, 不加快放时, 理

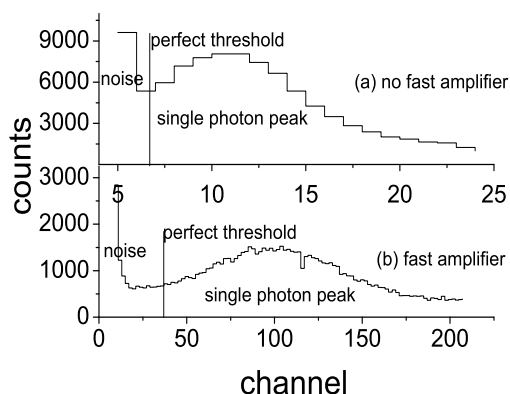


图 3 其中一个 PMT 测量到的单光子峰(a)不加快放(b)加快放

想阈值较低,但是受普通 CFD 最低阈值(30mV)的限制,阈值不可能设置这么低;加上快放后,理想阈值会显著提高,不会再受普通 CFD 最低阈值的限制.实验还表明,加上快放后,单光子峰的能量分辨不会变差,且能够降低 PMT 看到单光子峰的高压.所以准备在

以后的在束实验中加入快放.已经利用 LED 光纤刻度系统测定了每个 PMT 的单光子峰的峰位,这为下次在束实验时 CFD 阈值的设定提供了重要的参考数据.

## 4 小结

为了进一步提高探测效率降低探测阈值,对整个大面积中子探测阵列进行了一系列的性能优化.一方面是探测器本身的优化,找到了一种既不影响时间分辨又能提高幅度的反射材料-TYVEK1056D 纸;从光输出水平和长期稳定性两方面综合考虑后选定硅胶垫 EJ560 作为耦合材料.二是电子学的优化,引入了 LED 光纤刻度监测系统,介绍了其基本的组成,利用其论证了实验中加快放的可行性和必要性,还利用其测定了每个 PMT 的单光子峰位,为 CFD 阈值的设定提供了重要的参考数据.本工作为系统开展丰中子区  $\beta$  缓发中子发射实验奠定了坚实基础.

## 参考文献(References)

- 1 HU Q Y, YE Y L, LI Z H et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005, **52**(1): 473—477
- 2 LI Z H, YE Y L, HUA H et al. Phys. Rev., 2005, **C72**: 064327
- 3 WU Chong, HENG Yue-Kun, ZHAO Yu-Da et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A555**: 142—147
- 4 Adamson P, Barrett L, Belias A et al. Nucl Instrum. Methods, 2004, **A(521)**: 361—366
- 5 Tardocchi M, Conroy S, Ericsson G et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A(485)**: 624—639

# Property Optimization and Test for $\beta$ -Delayed Neutron Detection Array\*

LOU Jian-Ling<sup>1)</sup> LI Zhi-Huan YE Yan-Lin CAO Zhong-Xin JIANG Dong-Xing HUA Hui  
ZHENG Tao LI Xiang-Qing GE Yu-Cheng WU Cui-E LI Chen PANG Dan-Yang  
LU Fei FAN Feng-Ying MA Li-Ying

(Department of Technical Physics and MOE Key Laboratory of Heavy Ions Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The properties optimization process and testing results for  $\beta$ -delayed neutron detection array were stated in this paper. The amplitude and time resolution of the prototype modules wrapped with several different reflective materials have been tested with  $^{60}\text{Co}$  source and cosmic rays. The properties of several coupling materials between scintillator and light guide have been studied and compared. The LED light fibre calibration monitoring system was introduced to monitor the long-term working status of neutron detection array and optimize electronics. All of those are the groundwork of the in-beam  $\beta$ -delayed neutron emission experiments.

**Key words**  $\beta$ -delayed neutron detection array, reflective material, coupling material, LED light fibre calibration monitoring system

\* Supported by Major State Basic Research Development Program(G2000077400) and National Natural Science Foundation of China (10475004, 10405001, 10221003)

1) E-mail: jllou@hep.pku.edu.cn