

BaF₂探测器测量 α 粒子的时间分辨 随温度变化实验研究

陈效先^{1,2}, 仲启平², 李东仓¹, 张奇玮², 周祖英², 阮锡超²,
黄翰雄², 聂阳波², 李永明², 齐波^{1,2}, 王璠^{1,2}

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

摘要:本工作对用于测量 α 粒子的BaF₂探测器的时间分辨随温度变化情况进行了实验研究。实验选用退激 γ 射线能量较高的²³⁷Np α 源,利用 α 粒子与退激 γ 射线的时间关联性得到时间谱,在不改变任何条件的情况下对BaF₂晶体加热,加热到设定温度后保持恒温,在BaF₂晶体达到热平衡后开始测量时间谱,由该时间谱上读出的半高宽与标准偏差的线性关系得出 α 粒子的时间分辨随温度变化的情况。测量结果显示,时间分辨随温度变化在目前实验条件下较为明显,这为未来快时间分辨 α 粒子探测器的选择和优化使用提供了依据。

关键词:BaF₂; α 粒子; 时间分辨; 温度特性

中图分类号: TL812.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2011)03-0365-04

Time Resolution Research of BaF₂ Detector Used for α Particle Detection at Different Temperatures

CHEN Xiao-xian^{1,2}, ZHONG Qi-ping², LI Dong-cang¹, ZHANG Qi-wei²,
ZHOU Zu-ying², RUAN Xi-chao², HUANG Han-xiong², NIE Yang-bo²,
LI Yong-ming², QI Bo^{1,2}, WANG Fan^{1,2}

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China)

Abstract: The time resolution of BaF₂ detector used for α particle detection was measured. The ²³⁷Np α source, which has high energy γ -ray emitting from α decay, was chosen for the coincidence measurement. The time spectra were measured by the time-coincidence between the α particle and the γ -ray. The BaF₂ scintillator was heated to the given temperatures and the corresponding time spectra were measured. The time resolution of the detector under different temperatures was given by the linear relationship between the FWHM and the standard deviation which were obtained from the measured time spectra. The result shows that the time-resolution is dependent on the crystal tem-

perature, and it provides us useful information for selection and optimization of fast time resolution α particle detector in the future.

Key words: BaF₂; α particle; time resolution; temperature characteristic

随着核技术应用的发展,对高时间分辨、短脉冲的 α 粒子探测器有了很大的需求。BaF₂ 晶体有两种发光成分:一种是慢成分,其光衰减时间为 630 ns,波长峰值为 325 nm;另一种为快成分,其光衰减时间为 0.6 ns,波长峰值为 225 nm,这是无机闪烁体中衰减时间最短的^[1]。另外,BaF₂晶体还有很多其他优点:光产额高,其快成分光产额为 2 000 MeV⁻¹,慢成分的光产额达 6 500 MeV⁻¹;密度大(4.89 g/cm³);原子序数 Z 高,对 γ 射线探测效率高;能量分辨率较好;折射率接近玻璃,发出的光易进入光电倍增管的光阴极;不怕潮解,使用及保存方便等。使用 BaF₂ 探测器探测 γ 射线已非常广泛,但探测 α 粒子的应用不多。为了满足应用中高时间分辨的需求,本工作对 BaF₂ 探测器探测 α 粒子的相关性质进行探索性研究。

本工作主要研究用于测量 α 粒子的 BaF₂ 探测器的时间分辨性质。据国际已有工作可知^[2-4],BaF₂晶体的两种发光成分中,慢成分随温度的升高而减少,这样的变化应对其时间分辨有影响。因此,研究 BaF₂晶体测量 α 粒子时间分辨的温度特性有着重要意义。

1 实验装置及基本原理

1.1 实验装置及布局

α 粒子探测器由 $\phi 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (1号) BaF₂晶体及石英光导再配以 XP2020Q 光电倍增管组成, γ 粒子探测器由 $\phi 35 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (2号)BaF₂晶体配以 XP2020Q 光电倍增管组成。测量使用退激 γ 射线能量较大的²³⁷Np α 源(α 射线能量为 4.64、4.76、4.77、4.79 MeV),其活度约 10³ Bq。加热装置采用一 500 mm \times 500 mm \times 35 mm 的四方型铝制水箱,水箱在 15~100 $^{\circ}\text{C}$ 范围内可调节并保持恒温,正中心有 $\phi 50 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 的圆孔用来放置 1号晶体及光导,实验布局示于图 1。采用石英玻璃光导的主要目的是保证用于测量 α 粒子探测器的光电倍增管处于正常的工作条件和减少对紫外光的吸收。

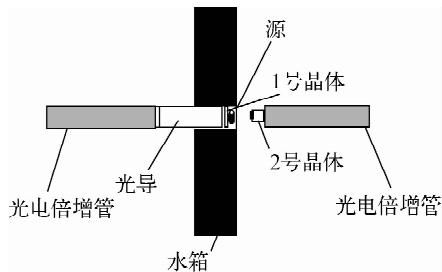


图 1 实验装置布局图

Fig. 1 Scheme of experimental setup

1.2 时间分辨测量

设所测得的时间谱为高斯分布,时间分辨定义为其标准偏差。从时间谱上读出的半高宽(FWHM)与标准偏差 σ_{total} 则有如下关系:

$$\sigma_{\text{total}} = \text{FWHM}/2.355$$

实验中,1号晶体对 α 信号的时间分辨为 σ_1 ,2号晶体对 γ 信号的时间分辨为 σ_2 ,则有:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

在测量过程中,2号晶体不加热, σ_2 是近似不变的,因此,系统总的时间分辨随温度的变化可近似看成 σ_1 随温度的变化。时间分辨测量的电子学框图如图 2 所示。

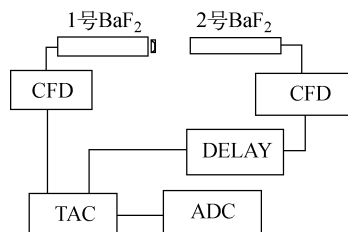


图 2 时间符合测量原理图

Fig. 2 Circuit diagram of time-coincidence

2 实验方法及结果分析

2.1 α 粒子探测器使用的光导透射率的标定方法及结果分析

选用石英材料做光导主要有两个原因:首先,由于 BaF₂ 晶体要加热到较高温度,石英光导能起到很好的隔热效果;其次,石英材料对紫外光区的透过率较高。

由于1号晶体太薄,γ探测效率太低,因此选用2号晶体进行标定,分别简单标定了石英光导对α产生荧光和γ产生荧光的透光率。对于γ射线,是用¹³⁷Cs(0.661 MeV的γ射线)、⁶⁰Co(1.17 MeV和1.33 MeV的γ射线)两个γ源刻度后,将加光导后的¹³⁷Cs峰位比上加光导前的¹³⁷Cs峰位得到光导透射率,约为29%。

对于α射线则是用²³⁹Pu(5.1、5.14、5.15 MeV的α射线)和7.7 MeV的α本底^[4]来刻度,将加光导前、后的²³⁹Pu峰位进行比较,得到光导透射率约为25%。

图3示出加光导前、后2号晶体同时测量¹³⁷Cs、⁶⁰Co、²³⁹Pu的能谱。图3a、b是在相同量程内测得的。

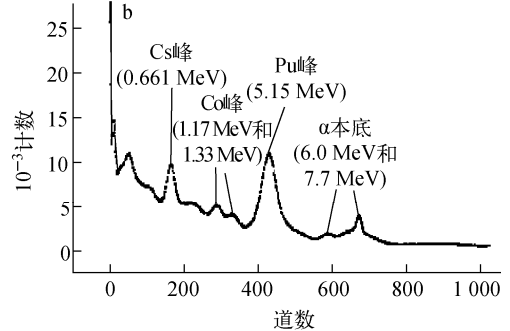
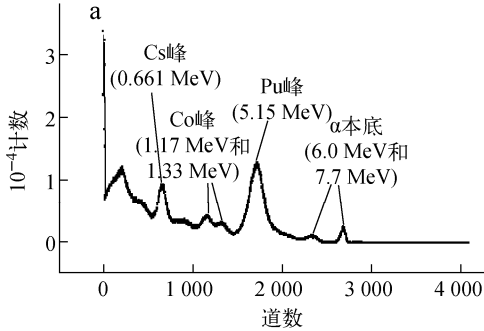


图3 加光导前(a)、后(b)2号晶体同时测量¹³⁷Cs、⁶⁰Co、²³⁹Pu的能谱

Fig. 3 Energy spectra of ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co and ²³⁹Pu by second BaF₂ without (a) and with (b) a light pipe

2.2 热平衡测量条件选择

为了保证符合时间谱是在达到热平衡后测得的,精确测量了不同温度下的热平衡时间。图4示出在15~75℃下²³⁹Pu α能谱峰位的连续变化曲线,期间每隔10℃恒温8000 s^[5],每隔200 s测量1次并记录峰位。可看出,不同温度下恒温2 h后峰位均基本保持稳定,说明此时晶体已达到热平衡。

TAC量程设为50 ns, stop信号延迟25 ns,多道量程选为1024道。图5示出BaF₂晶体在不同温度下测得的时间谱。从时间谱上可看出,除55℃的时间谱峰位向左稍有漂移之外,其它温度下峰位均保持一致。

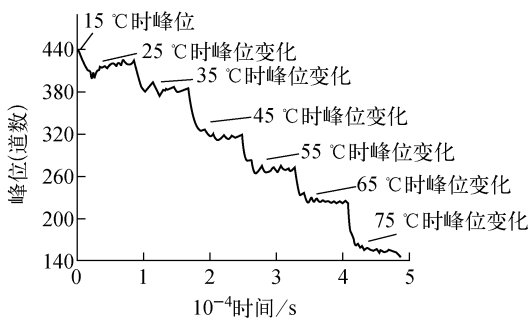


图4 BaF₂的热平衡测量

Fig. 4 Measurement of heat balance by first BaF₂

2.3 时间分辨随温度变化的测定

由于已确定BaF₂晶体的热平衡时间为2 h,因此,时间分辨测量均在恒温2 h后进行。

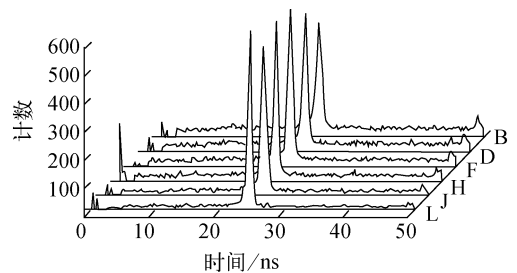


图5 BaF₂晶体在不同温度下测得的时间谱

Fig. 5 Time spectra at different temperatures B、D、F、H、J、L分别为25、35、45、55、65、75℃时间谱

对每个温度下的时间分辨重复测量3次,每次测量时间相同,得到3组标准偏差结果 N_1 、 N_2 、 N_3 ,则在时间 t 内的平均标准偏差为:

$$\bar{N} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 N_i$$

根据误差传递公式,平均标准偏差的方差为:

$$\sigma_{\bar{N}}^2 = \frac{1}{3^2} \sum_{i=1}^3 \sigma_{N_i}^2 = \frac{1}{3^2} \sum_{i=1}^3 N_i = \frac{1}{3} \bar{N}$$

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{\bar{N}/3}$$

标准偏差可表示为:

$$\bar{N} \pm \sigma_{\bar{N}} = \bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}/3}$$

图6示出25、35、45、55、65、75℃下符合时间谱的总标准偏差 σ_{total} 。可看出,系统总的分辨随温度的升高而变小,从25℃加热到75℃, σ_{total} 从(442.74±12.15)ps降低到(281.08±9.68)ps,因此,BaF₂对α粒子的时间分辨 σ_1 也近似地随温度的升高而变小。

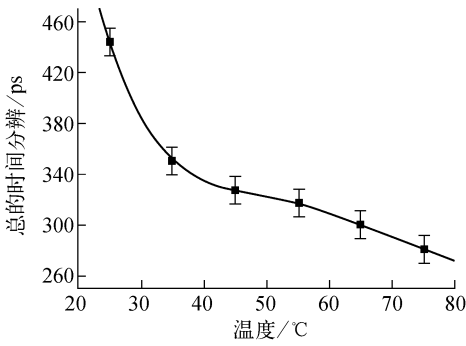


图6 总的时间分辨随环境温度的变化趋势

Fig. 6 Total time resolution at different temperatures

3 结论

从上面的实验结果可看出,BaF₂探测器测量α粒子的时间分辨是受环境温度影响的,随着温度升高而变好,已达到ps级时间分辨。在25℃时加光导与不加光导的系统总时间分辨分别为260ps和442.7ps,其原因是光导使BaF₂对α粒子的时间分辨性能变差。因此,

BaF₂闪烁体探测器的这种随温度升高时间分辨变好的特性为未来快时间分辨α粒子探测器的选择和优化提供了依据。

参考文献:

- [1] 邓景康,徐四大,宁传刚,等. 新型闪烁晶体的性能与应用研究[J]. 原子核物理评论,1999,16(1):61-65.
DENG Jingkang, XU Sida, NING Chuangang, et al. Study on new scintillator properties and their applications[J]. Nuclear Physics Review, 1999, 16(1): 61-65(in Chinese).
- [2] BIASINI M, CASSIDY D B, DENG S H M, et al. Suppression of the slow component of scintillation light in BaF₂[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 553: 550-558.
- [3] NANAL V, BACK B B, HOFMAN D J, et al. Temperature dependence of BaF₂ scintillation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997, 389: 430-436.
- [4] AMORINI F, de FILIPPO E, GUAZZONI P, et al. Digital pulse shape acquisition from BaF₂: Preliminary results [J]. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2006, N14: 440-443.
- [5] 朱维彬,徐四大,朱胜江,等. BaF₂晶体γ能谱的温度特性研究[J]. 核电子学与探测技术,2000,20(5):348-350.
ZHU Weibin, XU Sida, ZHU Shengjiang, et al. Temperature characteristic of BaF₂ scintillation γ energy spectrum[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, 20(5): 348-350 (in Chinese).