

# 用于 $\gamma$ 全吸收装置的大体积 $\text{BaF}_2$ 探测单元的 $\alpha/\gamma$ 鉴别方法\*

邹翀<sup>1)2)</sup> 张奇玮<sup>1)†</sup> 栾广源<sup>1)‡</sup> 吴鸿毅<sup>1)</sup> 罗昊天<sup>1)</sup> 陈玄博<sup>1)</sup>  
王晓宇<sup>1)</sup> 贺国珠<sup>1)</sup> 任杰<sup>1)</sup> 黄翰雄<sup>1)</sup> 阮锡超<sup>1)</sup> 鲍杰<sup>1)</sup> 朱兴华<sup>3)</sup>

1) (中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

2) (中国船舶工业贸易有限公司, 北京 100044)

3) (华能山东石岛湾核电有限公司, 荣成 264312)

(2025年1月5日收到; 2025年3月21日收到修改稿)

$\gamma$ 全吸收型探测装置由40个 $\text{BaF}_2$ 探测单元组成, 用于在线测量中子辐射俘获反应截面数据, 填补国内实验数据的空白. 实验本底的一个重要来源是 $\text{BaF}_2$ 晶体自身包含的 $\alpha$ 粒子. 为扣除 $\alpha$ 粒子本底, 数据获取系统采用全波形采集的方式, 在线实验存储的数据量为118 MB/s, 产生了较长的死时间. 利用 $\text{BaF}_2$ 探测单元测量3种放射源( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 及 $^{60}\text{Co}$ )的实验数据, 确定了信号波形的积分长度为2000 ns时, 能够达到最佳能量分辨率; 使用快总成分比、脉冲宽度和时间衰减常数3种方法进行 $\alpha$ 粒子和 $\gamma$ 射线的鉴别, 计算得到快总成分比(快成分5 ns, 总成分200 ns)方法的品质因子为1.19—1.41, 脉冲宽度(10%峰值)方法的品质因子为0.94—1.04, 时间衰减常数方法的品质因子为0.93—1.07. 通过品质因子的定量分析和能谱的比较, 确定快总成分比鉴别方法效果最好, 能够有效去除 $\alpha$ 粒子本底, 为下一步升级数据获取系统, 减少实验数据量, 降低截面数据不确定度奠定基础.

**关键词:** 能量分辨率, 快总成分比, 脉冲宽度, 时间衰减常数

**PACS:** 28.20.Np, 07.85.Nc, 01.52.+r

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250017

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250017

## 1 引言

中子辐射俘获反应即 $(n, \gamma)$ 反应在热中子能区到keV能区是主要的中子消失反应, 其截面数据广泛的应用于先进核能研究<sup>[1]</sup>、反应堆设计<sup>[2]</sup>以及核天体物理研究<sup>[3]</sup>中. 国际上早期采用缓发 $\gamma$ 法(活化法)测量 $(n, \gamma)$ 反应截面数据, 但只适用于单能中子的实验条件, 也难以区分通过不同反应

道得到相同产物核的数据. 20世纪60年代开始, 基于飞行时间技术(TOF)的瞬发 $\gamma$ 法(在线法)被用于大体积液闪<sup>[4]</sup>、Moxon-Rae<sup>[5]</sup>、NaI(Tl)<sup>[6]</sup>、BGO<sup>[7]</sup>等不同类型的探测器上测量 $(n, \gamma)$ 反应截面数据, 但由于这些探测器自身的限制, 测得截面数据的不确定度较大. 20世纪90年代之后国际上几个重要的实验室如: 美国ORNL的ORELA<sup>[8]</sup>、欧洲JRC的GELINA<sup>[9]</sup>、CERN的n\_TOF<sup>[10]</sup>、日本KURRI-LINAC<sup>[11]</sup>以及中国散裂中子源(CSNS)的反角白

\* 国家自然科学基金(批准号: 11975317, 12275363)、核数据重点实验室基金(批准号: JCKY2022201C158)、稳定支持基础科研计划(批准号: BJ010261223282)和中核集团集中研发项目(批准号: FD010241222552)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zqwvictor@126.com

‡ 通信作者. E-mail: lgyciae@hotmail.com

光中子源 (Back-n)<sup>[12]</sup> 又相继建立了  $C_6D_6$  探测器, 用于测量稳定核素的  $(n, \gamma)$  反应截面数据. 20 世纪 80 年代, 发现  $BaF_2$  晶体具有探测效率高、时间分辨好的特点, 开始制作成闪烁体探测器用于  $\gamma$  射线的测量, 国际上先后建造了 3 套  $\gamma$  全吸收型  $BaF_2$  探测装置, 分别是德国 FZK Karlsruhe 的  $4\pi BaF_2$ <sup>[13]</sup>、欧洲 (瑞士) CERN 的 TAC<sup>[14]</sup> 和美国 LANL 的 DANCE<sup>[15,16]</sup>, 用于测量裂变核素、放射性核素以及样品量低截面较小核素的中子俘获反应截面. 目前  $A < 120$  和  $A > 180$  范围内, 裂变核素  $(n, \gamma)$  反应的高精度截面数据测量已经成为国际上核数据研究的热点.

国内由于缺乏高质量的探测装置和测量方法, 再加上发达国家对关键核截面数据实行壁垒保护, 使得一些重要的裂变核素如:  $^{235}U$ ,  $^{239}Pu$ ,  $^{241}Am$  等缺少截面数据或者数据存在较大分歧, 无法满足工程建设和科学研究的需求. 为了填补这一空白, 中国原子能科学研究院核数据重点实验室建成了我国首套  $\gamma$  全吸收型探测装置 (gamma total absorption facility, GTAF), 基于中国散裂中子源的反角白光中子源 Back-n 已经开展了一些稳定核素的  $(n, \gamma)$  反应截面在线测量实验, 得到了较好的实验结果<sup>[17-19]</sup>.

GTAF 由 40 个  $BaF_2$  探测单元组成, 通过分析在线实验的数据, 发现  $BaF_2$  探测单元自身包含的  $\alpha$  粒子是本底的重要来源, 扣除  $\alpha$  粒子本底以提高效应本底比, 是降低截面数据不确定度的关键<sup>[20-22]</sup>. 目前 GTAF 的数据获取系统使用全波形采集的方式, 所有探测单元满足触发条件的信号波形都会被

记录, 这种方法的优点是在离线数据处理的过程中, 可以通过波形分析方法扣除  $\alpha$  粒子本底, 得到信号的能量信息和时间信息; 缺点是需要采集、传输、存储的数据量庞大. 在中国散裂中子源 140 kW 功率的束流条件下, GTAF 在线实验的平均数据量为 118 MB/s, 峰值数据量能达到 160 MB/s, 对于电子学的触发判选和数据采集都有极高的要求, 数据获取系统的死时间达到了 20% 以上, 直接影响了截面数据的不确定度, 后续随着散裂中子源束流功率的提升, 在线实验的数据量会继续增加, 因此计划对数据获取系统进行升级, 目标是降低获取系统需要记录的数据量.

## 2 $\gamma$ 全吸收装置 GTAF 与 $BaF_2$ 探测单元

$BaF_2$  晶体是一种无机闪烁体<sup>[23-26]</sup>, 具有两种发光成分: 其中快成分的光衰减时间为 0.6 ns, 波长峰值为 225 nm, 这决定了  $BaF_2$  晶体具有非常好的时间分辨; 慢成分的光衰减时间为 620 ns, 波长峰值为 325 nm;  $BaF_2$  晶体的中子灵敏度低, 折射率接近玻璃, 使闪烁光更容易进入光电倍增管; 其溶解度小, 不潮解, 便于加工和使用. 这些优点使其适合用于基于飞行时间方法的  $(n, \gamma)$  反应截面在线测量实验.

42 个五棱台和六棱台可以组成一个内半径 10 cm, 厚度 15 cm 的闭合球壳.  $BaF_2$  晶体 (端面直径 14 cm, 高度 15 cm) 与 5 in 光电倍增管耦合后, 封装成独立的  $BaF_2$  探测单元 (图 1(a)). 为了

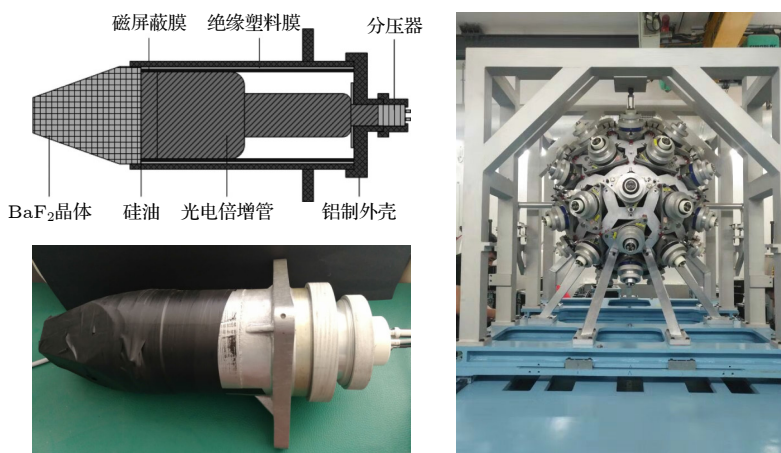


图 1 (a)  $BaF_2$  探测单元; (b) GTAF

Fig. 1. (a)  $BaF_2$  detector unit; (b) GTAF.

方便中子束流的进出, GTAF 束线进出的两个位置空缺. 其余 40 个位置由 BaF<sub>2</sub> 探测单元填充, 组成了 GTAF(图 1(b)). 在线实验时, 中子束流与 GTAF 中心的样品发生 (n, γ) 反应, 生成复合核. 处于激发态的复合核, 通过出射级联 γ 射线的方式退激. 由于 GTAF 几乎覆盖了 4π 立体角, 退激的各条级联 γ 射线会被 BaF<sub>2</sub> 探测单元探测到, 记录为 (n, γ) 反应事件. 同时, 记录源中子产生的时刻和级联 γ 射线到达探测器的时刻, 以计算发生 (n, γ) 反应的中子飞行时间, 确定中子能量 [27-30].

由于 Ba 与 Ra 是同族元素, 因此 BaF<sub>2</sub> 晶体的天然放射性本底主要是由 <sup>226</sup>Ra 衰变链上的 4 种 α 粒子组成. 分别为 <sup>226</sup>Ra 到 <sup>222</sup>Rn 衰变时发射的能量为 4.7 MeV 的 α 粒子、从 <sup>222</sup>Rn 到 <sup>218</sup>Po 衰变时发射的能量为 5.5 MeV 的 α 粒子、从 <sup>218</sup>Po 到 <sup>214</sup>Pb 衰变时产生能量为 6.0 MeV 的 α 粒子及从 <sup>214</sup>Po 到 <sup>210</sup>Pb 衰变时产生能量为 7.7 MeV 的 α 粒子.

### 3 不同采样长度的选择

本文选取了 GTAF 的一个 BaF<sub>2</sub> 探测单元, 采用 CAEN 公司的数字化仪 DT5751(10 bit, 1 GS/s) 获取探测器的信号波形, 测量 3 种放射源 (<sup>22</sup>Na, <sup>137</sup>Cs 及 <sup>60</sup>Co) 的 γ 射线. 如图 2 所示, BaF<sub>2</sub> 探测单元主要有 3 类信号: 1) 电子学噪声, 有快成分, 几乎没有慢成分, 来源于光电倍增管的暗电流和其他电子学电路; 2) γ 射线, 在线实验的有效信号, 有明显的快成分和慢成分; 3) BaF<sub>2</sub> 晶体自身的 α 粒子, 几乎没有快成分, 只有慢成分.

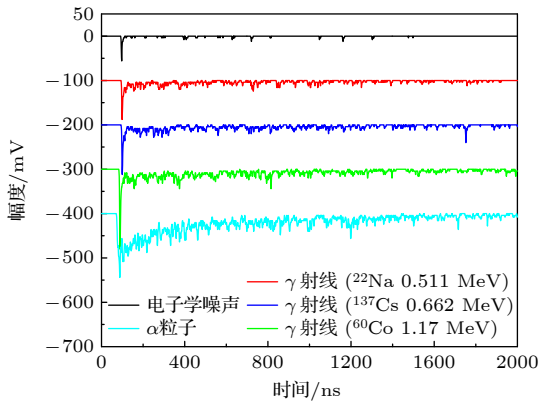


图 2 BaF<sub>2</sub> 探测单元的信号波形

Fig. 2. Signal waveform of the BaF<sub>2</sub> detection unit.

数据获取系统设置的参数为: 触发位置 100 ns, 阈值 20 mV, 基线 0—50 ns. 通过积分信号波形的

脉冲幅度, 得到能谱. 如图 3 所示, 可以明显看到 <sup>22</sup>Na (0.511 MeV), <sup>137</sup>Cs (0.662 MeV), <sup>60</sup>Co (1.17/1.33 MeV) 的全能峰以及 4 种能量的 α 粒子. 在扣除本底后, 拟合计算得到能量分辨率, 其中 <sup>60</sup>Co 的两个全能峰无法完全区分, 按照平均值 1.25 MeV 计算.

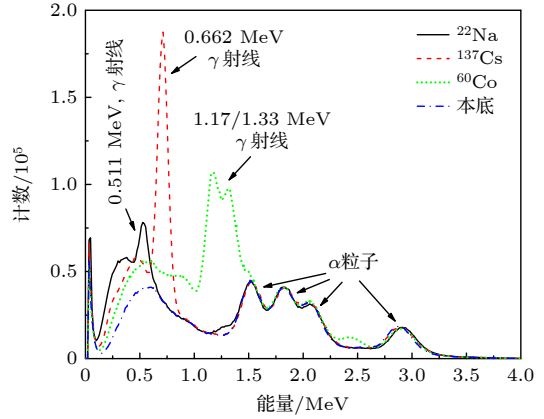


图 3 BaF<sub>2</sub> 探测单元的能谱

Fig. 3. Energy spectrum of the BaF<sub>2</sub> detection unit.

图 4 为不同积分长度下 (以触发位置为积分起点), BaF<sub>2</sub> 探测单元测量 3 种放射源得到的能量分辨率的比较. 积分长度从 200 ns 开始逐渐增大, 探测单元的能量分辨率逐渐变好, 积分长度在 1900—2000 ns 之间时, 能量分辨率达到最佳, 之后积分长度继续增大, 能量分辨率又随之逐渐变差. 由于 BaF<sub>2</sub> 晶体慢成分的光衰减时间为 620 ns, 波形脉冲在 1900—2000 ns 时基本回到基线, 此时刚好采集到 γ 射线信号的完整波形, 能量分辨率最好, 因此在线实验选择能谱的积分长度为 2000 ns.

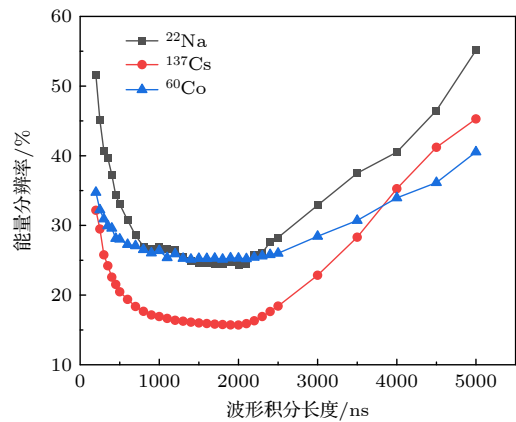


图 4 不同积分长度能量分辨率的比较

Fig. 4. Comparison of energy resolution of different integral length.

### 4 $\alpha/\gamma$ 鉴别方法

现阶段的生产工艺中, 很难使用化学的方法去除 BaF<sub>2</sub> 晶体原料中的 Ra 杂质, 因此需要采用粒子鉴别的方法, 尽可能地排除 BaF<sub>2</sub> 探测单元中的  $\alpha$  粒子对  $\gamma$  射线信号的干扰, 有效降低在线实验的本底.

如图 5 所示, 使用粒子鉴别方法可以得到  $\alpha$  粒子和  $\gamma$  射线的波形特征值分布图, 根据统计学原理, 这两种类型粒子的波形特征值都满足高斯分布. 国际上通常采用鉴别品质因子 FOM 作为评估探测器粒子鉴别能力的标准, FOM 越大, 表明鉴别能力越强, 鉴别效果越理想.

$$FOM = \frac{|\mu_\alpha - \mu_\gamma|}{FWHM_\alpha + FWHM_\gamma}, \quad (1)$$

式中,  $\mu_\alpha$  和  $\mu_\gamma$  是分别使用高斯拟合后得到的  $\alpha$  峰和  $\gamma$  峰的均值;  $FWHM_\alpha$  和  $FWHM_\gamma$  分别为  $\alpha$  峰和  $\gamma$  峰的半高全宽. 本文使用的 3 种粒子鉴别方法, 都通过 FOM 值的计算评估鉴别效果.

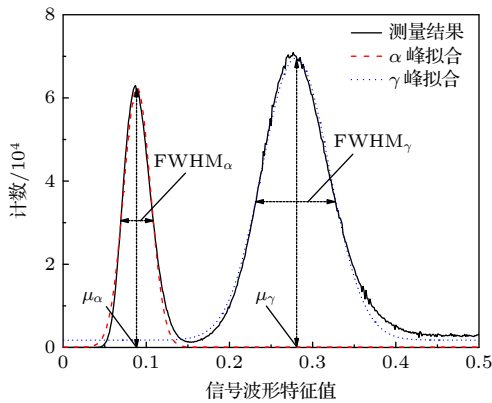


图 5 品质因子计算分布图  
Fig. 5. Distribution of FOM calculation.

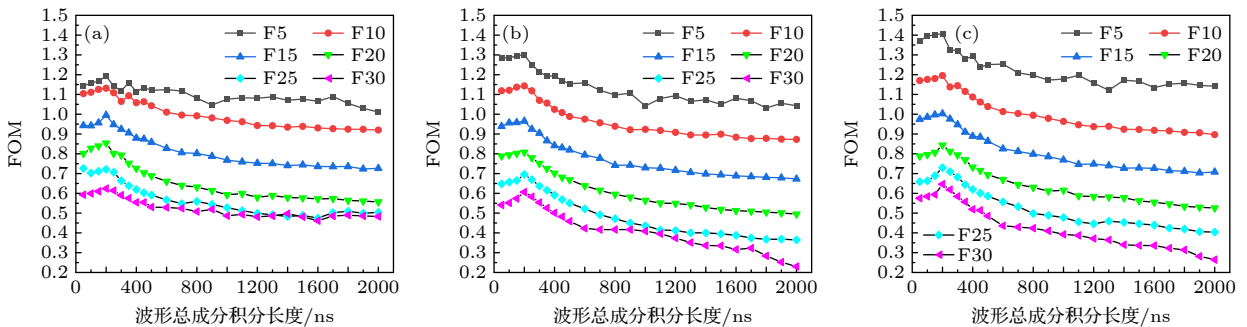


图 7 不同快总成分比的品质因子 (a) <sup>22</sup>Na; (b) <sup>137</sup>Cs; (c) <sup>60</sup>Co  
Fig. 7. FOM with different ratios of fast to total component: (a) <sup>22</sup>Na; (b) <sup>137</sup>Cs; (c) <sup>60</sup>Co.

### 4.1 快总成分比鉴别法

如图 6 所示, BaF<sub>2</sub> 探测单元探测到的  $\gamma$  射线信号波形有明显的快成分, 之后信号幅度迅速下降, 与慢成分重叠在一起;  $\alpha$  粒子的信号波形则没有快成分, 只有慢成分, 信号幅度下降缓慢. 快总成分比鉴别法从信号触发位置开始, 分别设定不同积分长度得到每个信号的快成分与总成分, 计算两者的比值作为波形特征值得到 FOM.

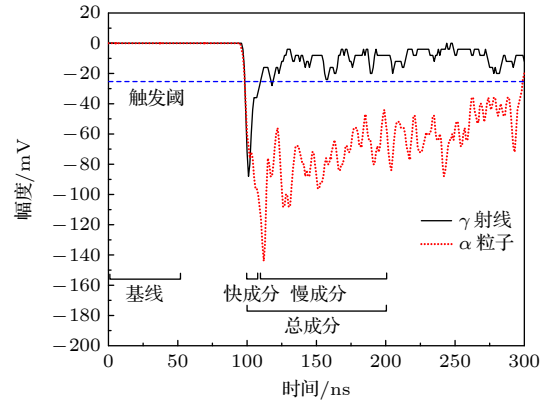


图 6 波形的快成分与总成分  
Fig. 6. Fast and total components of waveform.

本文使用 BaF<sub>2</sub> 探测单元分别测量了 3 种放射源, 计算得到波形信号快总成分比值的 FOM. 图 7 的横坐标是总成分的积分长度 (50—2000 ns), F5—F30 分别表示快成分的积分长度为 5—30 ns. 可以明显看到快成分积分越长, FOM 越小; 总成分的积分长度在 200 ns 时, FOM 最大, 因此选择快成分 5 ns 与总成分 200 ns 的比值用于  $\alpha\gamma$  鉴别.

在确定了快总成分的参数后, 处理得到图 8 展示的二维谱. 红框圈出的部分是  $\alpha$  粒子 (能量 1—4 MeV, 快总成分比 0.021—0.128), 能够明显与

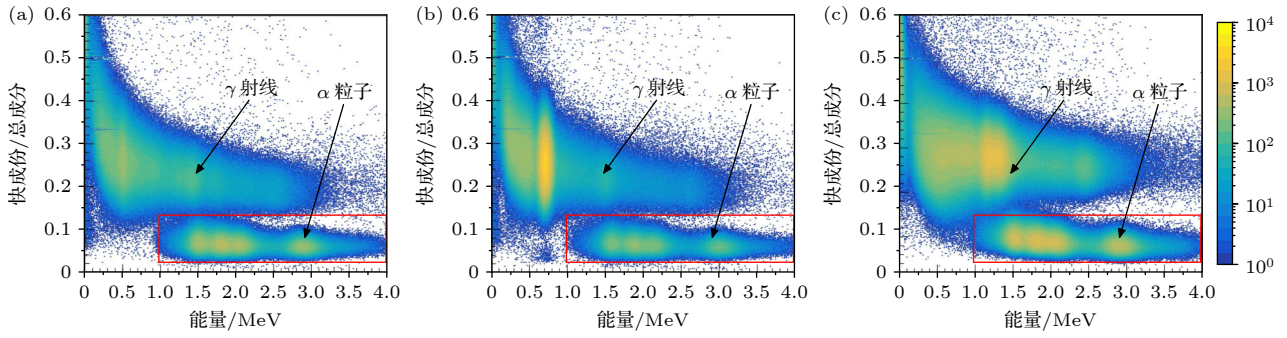

 图 8 能量与快总成分比的二维谱 (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$ 

 Fig. 8. Energy versus ratio of fast to total component spectrum: (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$ .

$\gamma$  射线区分出来, 在线实验数据处理时, 会把此范围内的波形信号去除掉.

## 4.2 脉冲宽度鉴别法

通过分析  $\gamma$  射线和  $\alpha$  粒子在  $\text{BaF}_2$  探测单元中的信号波形发现, 两者的波形脉冲宽度有明显的不同, 可利用这一差异进行粒子鉴别. 图 9 是  $\text{BaF}_2$  探测单元测得的一个波形信号, 首先通过波形分析得到脉冲的峰值, 再使用插值计算得到脉冲上升过程中到达 10% 峰值位置的时间  $T_{\text{start}10\%}$ , 同样使用插值计算得到脉冲下降过程中到达 10% 峰值的时间  $T_{\text{end}10\%}$ .

$$w_1 = T_{\text{end}10\%} - T_{\text{start}10\%}, \quad (2)$$

式中,  $w_1$ — $w_5$  分别代表信号波形 10%—50% 峰值的脉冲宽度.

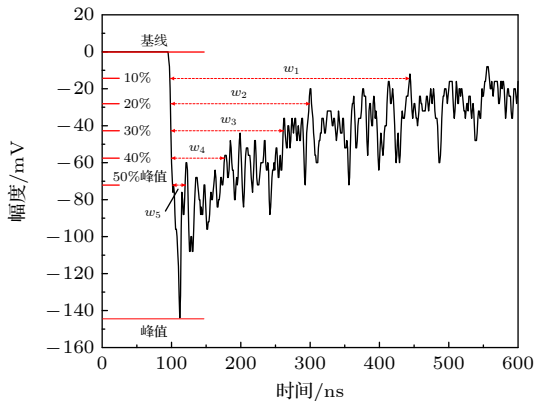


图 9 波形的脉冲宽度

Fig. 9. Pulse width of waveform.

使用不同的波形脉冲宽度作为特征值, 得到 3 种放射源的 FOM 值, 如图 10 所示, 其中 10% 峰值的脉冲宽度粒子鉴别能力最好. 由于  $\alpha$  粒子没有慢成分, 与  $\gamma$  射线相比较, 峰值比例越低, 对应

位置的脉冲宽度变长得越明显, 也就越容易把两者区分出来. 图 11 是 10% 峰值脉冲宽度的二维谱, 红框圈出的部分是  $\alpha$  粒子 (能量 1—4 MeV, 10% 峰值脉冲宽度 120—880 ns), 需在数据处理中去除掉.

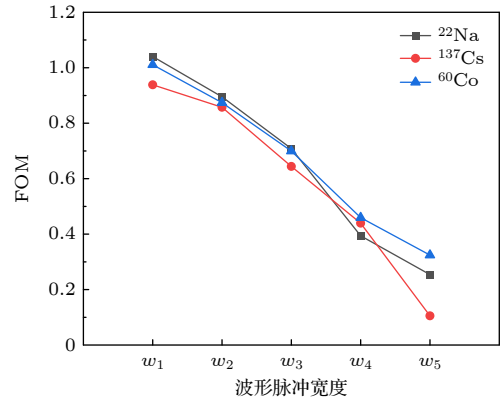


图 10 不同波形脉冲宽度的品质因子

Fig. 10. FOM with different pulse width of waveforms.

## 4.3 时间衰减常数鉴别法

$\text{BaF}_2$  探测单元闪烁光的特点是信号波形到达峰值位置后, 按照负  $e$  指数规律衰减, 波形幅度可以使用 (3) 式进行拟合:

$$V(t) = V_0 + Ae^{-(t-t_0)/\tau}, \quad (3)$$

式中,  $V(t)$  是指  $t$  时刻的波形幅度,  $V_0$  是指信号基线的幅度,  $A$  是指波形峰值的幅度,  $t_0$  是指到达峰值的时刻,  $\tau$  是指信号波形的时间衰减常数.

$\gamma$  射线的信号波形包含快成分与慢成分, 波形在快速上升到峰值位置后, 又会快速下降到慢成分的位置, 之后就缓慢下降到基线位置, 因此  $\gamma$  射线信号波形的时间衰减常数  $\tau$  主要是由快成分决定的.  $\alpha$  粒子的信号波形几乎没有快成分只有慢成分, 它的时间衰减常数  $\tau$  主要是由慢成分决定的.  $\text{BaF}_2$

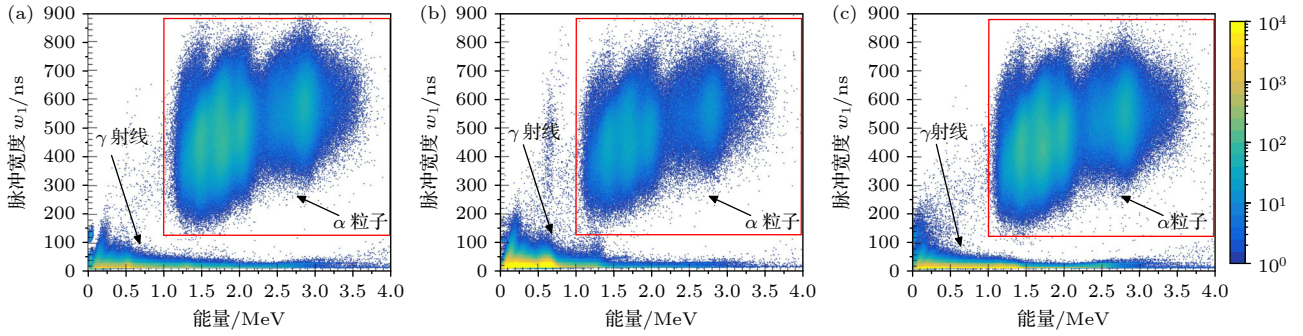


图 11 能量与脉冲宽度的二维谱 (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$

Fig. 11. Energy versus pulse width spectrum: (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$ .

探测单元的快成分光衰减时间为 0.6 ns, 慢成分光衰减时间为 620 ns, 两者差异明显, 利用这一差异就可以实现  $\alpha$  粒子和  $\gamma$  射线的鉴别. 如图 12 所示, 通过波形分析得到脉冲的峰值, 选择峰值位置之后 2000 ns 的波形, 利用 (3) 式拟合得到时间衰减常数.

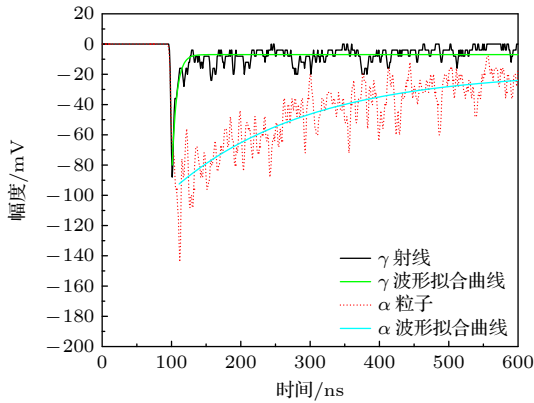


图 12 波形的时间衰减常数拟合

Fig. 12. Fitting of the time decay constant of waveform.

图 13 展示了时间衰减常数的二维谱,  $\alpha$  粒子是红框圈出的部分 (能量 1—4 MeV, 时间衰减常数是 55—45  $\text{s}^{-1}$ ), 可以看到在 1—1.3 MeV 范围内,  $\gamma$  射线与  $\alpha$  粒子会有部分重叠, 不能明显区分出来.

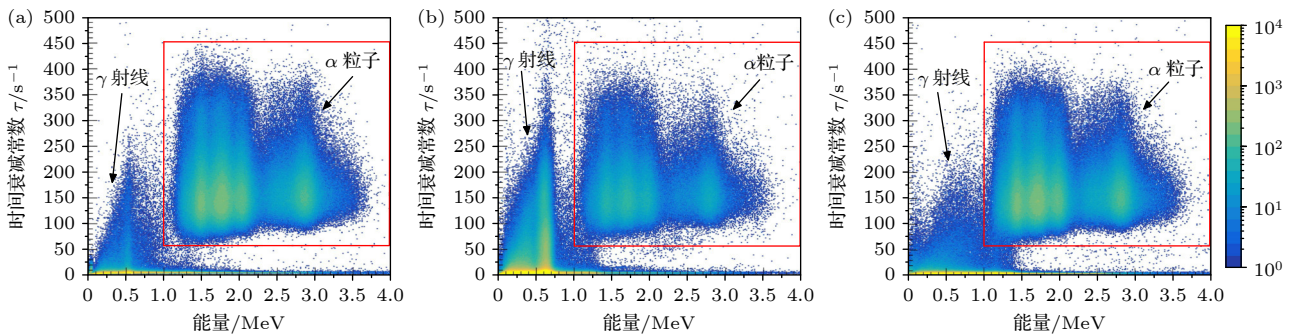


图 13 能量与时间衰减常数的二维谱 (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$

Fig. 13. Energy versus time decay constant spectrum: (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$ .

## 5 实验结果分析与讨论

选取 3 种粒子鉴别方法中 FOM 最优的设置, 表 1 展示了对比结果. 同种方法应用在不同放射源上, 得到的 FOM 值变化不大, 证明了每种方法都适用于在线实验测量, 用于区分不同能量的  $\gamma$  射线与  $\alpha$  粒子. 脉冲宽度鉴别法和时间衰减常数鉴别法的 FOM 值低于快总成分比鉴别法, 原因主要是由于大体积的  $\text{BaF}_2$  探测单元的信号波形有比较明显的涨落 (如图 9 和图 12 所示出现很多毛刺), 在进行脉冲宽度计算和衰减常数拟合时, 会严重影响特征值计算结果的统计分布, 使得  $\alpha$  峰和  $\gamma$  峰的 FWHM 值变大, 从而降低 FOM 值.

表 1 不同粒子鉴别方法的品质因子比较

Table 1. Comparison of FOM of different particle identification methods.

放射源	快总成分比(快成分 5 ns/总成分200 ns)	脉冲宽度 (10%峰值)/ns	时间衰减 常数/ $\text{s}^{-1}$
$^{22}\text{Na}$	1.19	1.04	1.07
$^{137}\text{Cs}$	1.30	0.94	0.93
$^{60}\text{Co}$	1.41	1.01	0.96

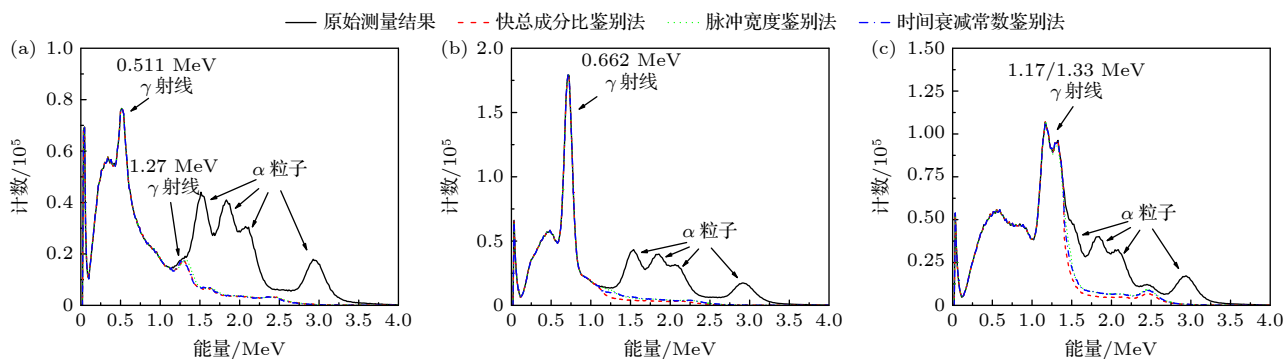

 图 14 不同粒子鉴别方法处理后得能谱比较 (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$ 

 Fig. 14. Comparison of energy spectra obtained by different particle identification methods: (a)  $^{22}\text{Na}$ ; (b)  $^{137}\text{Cs}$ ; (c)  $^{60}\text{Co}$ .

使用 3 种粒子鉴别方法后, 从放射源的能谱中可以看到  $\alpha$  粒子明显减少, 同时也显现出了被  $\alpha$  粒子计数淹没的  $^{22}\text{Na}$  (1.27 MeV) 的全能峰 (图 14(a)), 以及  $^{60}\text{Co}$  的两条级联  $\gamma$  射线被同一  $\text{BaF}_2$  探测单元探测到产生的 2.5 MeV 的  $\gamma$  峰 (图 14(c)). 从结果来看, 快总成分比 (快成分 5 ns, 总成分 200 ns) 的  $\alpha$  粒子和  $\gamma$  射线的鉴别效果最好, 脉冲宽度 (10% 峰值) 与时间衰减常数的鉴别效果差别不大, 这也与 FOM 值的计算结果一致.

## 6 结 论

基于大体积的  $\text{BaF}_2$  探测单元对  $\gamma$  射线的测量结果, 研究信号波形的采样长度对能量分辨率的影响, 确定 2000 ns 的采样长度得到的能量分辨率最好. 针对  $\text{BaF}_2$  探测单元的信号波形特点, 采用快总成分比、脉冲宽度和时间衰减常数 3 种方法, 进行  $\alpha$  粒子和  $\gamma$  射线的鉴别能力研究, 并使用品质因子 FOM 作为评估值. 通过放射源能谱和 FOM 值的比较, 快总成分比的  $\alpha/\gamma$  鉴别能力优于其他两种方法.

目前, 由 40 个  $\text{BaF}_2$  探测单元组成的 GTAF 开展 (n,  $\gamma$ ) 反应截面在线测量实验, 数据获取系统采用信号全波形采集的方式, 每次实验记录、传输、存储的数据量非常庞大, 不利于数据的存储和处理, 同时也延长了数据获取系统的死时间, 影响截面数据的不确定度. 本文验证了 2000 ns 的采样长度和快总成分比鉴别方法的优点, 下一步计划升级在线实验的数据获取系统, 只记录每个信号波形的过阈时间 (用于飞行时间方法)、过阈后 5 ns 幅度积分值 (快成分)、200 ns 幅度积分值 (总成分)、

2000 ns 幅度积分值 (能量)、探测单元编号等一系列参数, 不用记录全波形信息, 使用这些信息就可以完成  $\alpha$  粒子本底去除和 (n,  $\gamma$ ) 反应的在线实验数据处理. 通过估算, 升级后的获取系统存储的数据量从 118 MB/s 降低到 24 MB/s, 可以明显减少数据获取系统的死时间, 从而提高截面数据的精度.

## 参考文献

- [1] Ding D Z 2001 *China Basic Sci.* **1** 13 (in Chinese) [丁大钊 2001 *中国基础科学* **1** 13]
- [2] Chandler D, Hartanto D, Bae J W, Burg K M, Robert Y, Sizemore C 2025 *Ann. Nucl. Energy* **211** 110920
- [3] Arnould M, Katsuma M 2008 *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology* Nice, France, April 22–27, 2007 p7
- [4] Kompe D 1969 *Nucl. Phys.* **133** 513
- [5] Wisshak K, Kappeler F, Reffo G 1984 *Nucl. Sci. Eng.* **88** 594
- [6] Terada K, Katabuchi T, Mizumoto M, Arai T, Saito T, Igashira M, Hirose K, Nakamura S, Kimura A, Harada H, Hori J, Kino K, Kiyonagi Y 2015 *Prog. Nucl. Energy* **82** 118
- [7] Kobayashi K, Lee S, Yamamoto S 2004 *Nucl. Sci. Eng.* **146** 209
- [8] Guber K H, Derrien H, Leal L C, Arbanas G, Wiarda D, Koehler P E, Harvey A 2010 *Phys. Rev. C* **82** 057601
- [9] Lee J, Hori J I, Nakajima K, Sano T, Lee S 2017 *J. Nucl. Sci. Tech.* **54** 1046
- [10] Kim H I, Paradela C, Sirakov I, Becker B, Capote R, Gunging F, Kim G N, Kopecky S, Lampoudis C, Lee Y O, Massarczyk R, Moens A, Moxon M, Pronyaev G, Schillebeeckx P, Wynants R 2016 *Eur. Phys. J. A* **52** 170
- [11] Mingrone F, Massimi C, Altstadt S, et al. 2014 *Nuclear Data Sheets* 119 18
- [12] Ren J, Ruan X C, Bao J, et al. 2019 *Radiat. Detect. Tech. Methods* **3** 52
- [13] Wisshak K, Voss F, Kaeppler F, Krlicka M, Gallino R 2006 *Phys. Rev. C* **73** 015802
- [14] Endo S, Kimura A, Nakamura S, Iwamoto O, Iwamoto N, Rovira G, Terada K, Meigo S, Toh Y, Segawa M, Maeda M, Tsuneyama M 2022 *J. Nucl. Sci. Technol.* **59** 318
- [15] Mosby S, Bredeweg T A, Couture A, Jandel M, Kawano T,

- Ullmann J, Henderson R A, Wu C Y 2018 *Nucl. Data Sheets* **148** 312
- [16] Laminack A, Blackmon J C, Couture A, Greene J P, Krticka M, Macon K T, Mosby S, Prokop C, Ullmann J L, Valenta S 2022 *Phys. Rev. C* **106** 025802
- [17] Zhong Q P, Zhou Z Y, Tang H Q, Chen X L, He G Z, Zhang Q W, Guo W X, Yuan J L, Ma X Y, Wang Q, Ruan X C, Li Z H 2008 *Chin. Phys. C* **32** 102
- [18] Ren J, Ruan X C, Tang H Q, Ge Z G, Huang H X, Jing H T, Tang J Y, Huang W L 2014 *Nucl. Tech.* **37** 110521 (in Chinese) [任杰, 阮锡超, 唐洪庆, 葛智刚, 黄翰雄, 敬罕涛, 唐靖宇, 黄蔚玲 2014 *核技术* **37** 110521]
- [19] Zhang Q W, He G Z, Huang X, Ruan X C, Li Z H, Zhu X H 2014 *At. Energy Sci. Tech.* **48** 612 (in Chinese) [张奇玮, 贺国珠, 黄兴, 阮锡超, 李志宏, 朱兴华 2014 *原子能科学技术* **48** 612]
- [20] Zhang Q W, He G Z, Huang X, Cheng P J, Ruan X C, Zhu X H 2016 *At. Energy Sci. Tech.* **50** 536 (in Chinese) [张奇玮, 贺国珠, 黄兴, 程晶晶, 阮锡超, 朱兴华 2016 *原子能科学技术* **50** 536]
- [21] Zhang Q W, Luan G Y, Ren J, et al. 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 222801 (in Chinese) [张奇玮, 栾广源, 任杰, 等 2021 *物理学报* **70** 222801]
- [22] Luan G Y, Ren J, Zhang Q W, Ruan X C, He G Z, Cheng P J, Guo M W 2022 *J. Isotopes* **35** 273 (in Chinese) [栾广源, 任杰, 张奇玮, 阮锡超, 贺国珠, 程晶晶, 郭明伟 2022 *同位素* **35** 273]
- [23] Ma X Y, Zhong Q P, Zhou Z Y, Guo W X, Yuan J L, Wang Q, Zhang Q W, Su M, Ruan X C, Bao J, Huang H X, Jiang J, Nie Y B, Li X, Liu G, Lan C L 2009 *At. Energy Sci. Tech.* **43** 180 (in Chinese) [马霄云, 仲启平, 周祖英, 郭维新, 袁继龙, 王强, 张奇玮, 苏明, 阮锡超, 鲍杰, 黄翰雄, 蒋静, 聂阳波, 李霞, 刘刚, 兰长林 2009 *原子能科学技术* **43** 180]
- [24] Zhang Q W, Luan G Y, He G Z, Cheng P J, Ruan X C, Zhu X H 2020 *Nucl. Phys. Rev.* **37** 771 (in Chinese) [张奇玮, 栾广源, 贺国珠, 程晶晶, 阮锡超, 朱兴华 2020 *原子核物理评论* **37** 771]
- [25] Zhang Q W, Luan G Y, Guo M W, He G Z, Ruan X C, Zou C, Zhu X H 2021 *Mod. Appl. Phys.* **12** 040401 (in Chinese) [张奇玮, 栾广源, 郭明伟, 贺国珠, 阮锡超, 邹翀, 朱兴华 2021 *现代应用物理* **12** 040401]
- [26] Peng M, He G Z, Luo H, Zhang Q W, Shi B, Zhou Z Y, Lan C L 2016 *At. Energy Sci. Tech.* **50** 1866 (in Chinese) [彭猛, 贺国珠, 骆宏, 张奇玮, 石斌, 周祖英, 兰长林 2016 *原子能科学技术* **50** 1866]
- [27] Shi B, Peng M, Zhang Q W, He G Z, Zhou Z Y, Tang H Q 2018 *At. Energy Sci. Tech.* **52** 1537 (in Chinese) [石斌, 彭猛, 张奇玮, 贺国珠, 周祖英, 唐洪庆 2018 *原子能科学技术* **52** 1537]
- [28] Zhang Q W, He G Z, Luan G Y, Cheng P J, Ruan X C, Zhu X H 2021 *Power Laser Part. Beams* **33** 0440 (in Chinese) [张奇玮, 贺国珠, 栾广源, 程晶晶, 阮锡超, 朱兴华 2021 *强激光与粒子束* **33** 0440]
- [29] Wang X Y, He G Z, Zhang Q W, Luo H T, Xu K Z, Li Q, Xie L K, Luan G Y, Ruan X C, Zou C, Chen X B, Wu H Y, Fan R R, Jiang W, Cao P, Yu T 2024 *At. Energy Sci. Tech.* **58** 2262 (in Chinese) [王晓宇, 贺国珠, 张奇玮, 罗昊天, 徐阔之, 李倩, 解立坤, 栾广源, 阮锡超, 邹翀, 陈玄博, 吴鸿毅, 樊瑞睿, 蒋伟, 曹平, 余滔 2024 *原子能科学技术* **58** 2262]
- [30] Luo H T, Zhang Q W, Luan G Y, et al. 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 072801 (in Chinese) [罗昊天, 张奇玮, 栾广源, 等 2024 *物理学报* **73** 072801]

## $\alpha/\gamma$ discrimination method for bulky BaF<sub>2</sub> detector used in $\gamma$ total absorption facility\*

ZOU Chong<sup>1)2)</sup> ZHANG Qiwei<sup>1)†</sup> LUAN Guangyuan<sup>1)‡</sup> WU Hongyi<sup>1)</sup>  
 LUO Haotian<sup>1)</sup> CHEN Xuanbo<sup>1)</sup> WANG Xiaoyu<sup>1)</sup> HE Guozhu<sup>1)</sup>  
 REN Jie<sup>1)</sup> HUANG Hanxiong<sup>1)</sup> RUAN Xichao<sup>1)</sup>  
 BAO Jie<sup>1)</sup> ZHU Xinghua<sup>3)</sup>

1) (Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2) (China Shipbuilding Trading Co., Ltd., Beijing 100044, China)

3) (Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd., Rongcheng 264312, China)

(Received 5 January 2025; revised manuscript received 21 March 2025)

### Abstract

The gamma-ray total absorption facility (GTAF) composed of 40 BaF<sub>2</sub> detection units is designed to measure the cross section data of neutron radiation capture reaction online, in order to comply with the experimental nuclear data sheet. Since 2019, several daunting experiment results have been analyzed and published, and we have found that one of the most important sources of experimental background is the initial  $\alpha$  particles emitted by the BaF<sub>2</sub> crystal, which is the core component of GTAF detection unit .

Considering the current industrial manufacturing process capabilities, the impurities of Ra and its compounds cannot be completely removed from the BaF<sub>2</sub>. Developing data analysis algorithms to eliminate the influence of alpha particles in experimental data has become a key aspect. In this work, in order to meet the needs of data acquisition, online measurement and analysis of neutron radiation cross section, the GTAF data acquisition system adopts a full waveform acquisition method, which results in a large number of data recorded, transmitted, and stored during experiment, which also affects the uncertainty of the cross-section data. The number of data stored in the online experiment is about 118 MB/s, resulting in a long dead time.

Based on the signal waveform characteristics of the BaF<sub>2</sub> detection unit, in order to solve the aforementioned problems, three methods, namely the ratio of fast component to total component, pulse width, and time decay constant, are used to identify and distinguish  $\alpha$  particles and  $\gamma$  rays. The quality factor FOM is utilized as an evaluation value and several experiments are conducted using three radioactive sources (<sup>22</sup>Na, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co) for verification.

Due to the slow components of BaF<sub>2</sub> light decay time being about 620 ns, the waveform pulse should essentially return to baseline at approximately 1900 ns to 2000 ns, allowing for the complete waveform of the  $\gamma$  rays signal to be captured at that moment, which may provide the best energy resolution. Therefore, in the online experiment, the integration length for the energy spectrum is chosen to be 2000 ns in this work.

The quality factor is 1.19–1.41 from the fast total component ratio (fast component 5 ns, total component 200 ns) method, 0.94–1.04 from the pulse width (10% peak) method, and 0.93–1.07 from the time attenuation constant method. Through the quantitative analysis of quality factor and the comparison of energy spectrum, it is determined that the fast total component ratio method has the best effect and can effectively remove the background of  $\alpha$  particles.

The next step is to upgrade the online experimental data acquisition system to reduce the quantity of experimental data and the uncertainty of cross section data. The experimental data that need to be recorded should be the crossing threshold time (for the time-of-flight method) and the amplitude integration values of 5 ns after the threshold (for the fast component), 200 ns after the threshold (for the total component), and 2000 ns (for the energy) for each signal waveform, as well as the number of related detection units. The above information should be sufficient to complete online processing of experimental data, including the processing of the  $\alpha$  particle background and (n, $\gamma$ ) reaction data. It is estimated that the data acquisition rate of the upgraded system will decrease from 118 MB/s to 24 MB/s, which can significantly reduce the dead time of the data acquisition system, thereby improving the accuracy of cross section data.

**Keywords:** energy resolution, ratio of fast to total component, pulse width, time decay constant

**PACS:** 28.20.Np, 07.85.Nc, 01.52.+r

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250017](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250017)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250017](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250017)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11975317, 12275363), the Key Laboratory of Nuclear Data Foundation (Grant No. JCKY2022201C158), the Continuous-Support Basic Scientific Research Project (Grant No. BJ010261223282), and the Research and Development Project of National Nuclear Corporation, China (Grant No. FD010241222552).

† Corresponding author. E-mail: [zqwvictor@126.com](mailto:zqwvictor@126.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [lgyciae@hotmail.com](mailto:lgyciae@hotmail.com)



用于 $\gamma$ 全吸收装置的大体积 $\text{BaF}_2$ 探测单元的 $\alpha/\gamma$ 鉴别方法

邹翀 张奇玮 栾广源 吴鸿毅 罗昊天 陈玄博 王晓宇 贺国珠 任杰 黄翰雄 阮锡超 鲍杰 朱兴华

$\alpha/\gamma$  discrimination method for bulky  $\text{BaF}_2$  detector used in  $\gamma$  total absorption facility

ZOU Chong ZHANG Qiwei LUAN Guangyuan WU Hongyi LUO Haotian CHEN Xuanbo WANG Xiaoyu HE Guozhu REN Jie HUANG Hanxiong RUAN Xichao BAO Jie ZHU Xinghua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 102801 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250017

CSTR: 32037.14.aps.74.20250017

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250017>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于微结构气体探测器对单能和连续谱快中子的模拟解谱

Unfolding simulation of single-energy and continuous fast neutrons spectrum based on micro-pattern gas detector

物理学报. 2021, 70(11): 112901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201954>

$\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ 闪烁晶体缺陷对其发光性能的影响

Influence of defects on luminescence properties of  $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  scintillation crystals

物理学报. 2021, 70(6): 066101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201697>

超导动态电感单光子探测器的噪声处理

Noise processing of superconducting kinetic inductance single photon detector

物理学报. 2021, 70(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210185>

超分辨率超快超声脊髓微血管成像方法

Ultrafast ultrasound localization microscopy method for spinal cord microvasculature imaging

物理学报. 2022, 71(17): 174302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220629>

基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

生成对抗网络加速超分辨率超声定位显微成像方法研究

Accelerating super-resolution ultrasound localization microscopy using generative adversarial net

物理学报. 2022, 71(22): 224301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220954>