

瞬发裂变中子能谱测量中的大动态范围 粒子鉴别技术*

张鑫彤 吴鸿毅[†] 栾广源 黄翰雄 鲁潇帆 阮锡超

(中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

(2026年1月5日收到; 2026年2月16日收到修改稿)

瞬发裂变中子能谱 (PFNS) 测量需要在极宽的能区范围 (keV—20 MeV) 内同时兼顾低探测阈值与大动态范围. 在传统的单通道读出模式下, 为了探测 keV 量级的低能中子必须采用高增益设置, 但这不可避免地会导致高能信号发生电子学饱和 (削顶), 致使基于波形幅度和形状的传统中子/ γ 鉴别方法失效. 针对这一难题, 本文提出了一种基于液闪高增益通道饱和和波形分析的粒子鉴别新方法. 该方法利用中子与 γ 射线在饱和状态下延迟发光成分 (慢成分) 的显著差异, 通过构建“过阈时间-拖尾电荷”二维特征关联, 在信号幅度严重超量程的情况下恢复了粒子鉴别能力. 为了验证算法的有效性, 实验利用 ^{238}Pu - ^{13}C 源进行了双增益通道同步采集, 并以未饱和的低增益通道数据作为真值参考对新方法进行了逐事件关联分析. 实验结果表明, 该方法在保留高增益通道对低能中子 (约 100 keVee) 优异鉴别能力的同时, 成功实现了对饱和区高能粒子的有效分离. 该技术在不增加电子学通道资源的前提下, 显著拓展了单通道测量的有效动态范围, 为高精度 PFNS 测量提供了一种高效的技术途径.

关键词: 液体闪烁体, 中子伽马鉴别, 波形饱和分析, 过阈时间

DOI: 10.7498/aps.75.20260012

CSTR: 32037.14.aps.75.20260012

1 引言

瞬发裂变中子能谱 (PFNS) 是核反应堆物理设计、第四代核能系统研发以及核天体物理研究中的关键基础核数据^[1]. 高精度的 PFNS 数据对于降低反应堆临界安全裕度的不确定度至关重要, 近年来得到了广泛的关注^[2-5]. 典型的裂变中子能谱覆盖了从几 keV 到 20 MeV 以上的极宽能量范围, 且中子通量随能量呈指数级衰减. 这种跨越多个数量级的能量分布, 对探测系统的动态范围提出了极高的要求. 目前, 液体闪烁探测器 (如 BC501A, EJ301 等) 凭借优异的时间响应特性^[6] 和中子/ γ 脉冲形状甄别 (PSD) 能力^[7-9], 成为 PFNS

测量的首选探测器. 其中代表性的探测器阵列有位于洛斯阿拉莫斯的 Chi-Nu^[10] 和中国原子能科学研究院的液闪阵列^[11]. 然而, 如何在单一测量系统中同时实现对低能区中子 (约 100 keVee, 等效电子能量) 的高灵敏度探测和对高能区中子 (> 15 MeV) 在信号饱和条件下的有效鉴别, 一直是核电子学与探测技术领域面临的挑战.

液体闪烁探测器主要利用粒子在介质中产生的荧光衰减时间特性的差异进行粒子鉴别. 最经典的 PSD 技术是电荷比较法 (CCM)^[12,13], 其原理是通过计算脉冲尾部慢成分电荷与总电荷的比值来区分中子和 γ 射线. 然而, 在实际测量中存在一个难以调和的“增益-量程”博弈: 为了有效探测几十 keVee 的低能中子, 必须提高读出电子学的增益以

* 国家自然科学基金 (批准号: 12505161) 和稳定支持基础科研计划 (批准号: BJ010261223282) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wuhly@ciae.ac.cn

保证信噪比;但这必然导致高能粒子产生的信号幅度超出电子学系统的线性范围(如ADC量程上限),造成波形“削顶”(Saturation).这种信号饱和现象对CCM方法是致命的:一方面,波形截断导致积分得到的总电荷量不再代表真实的沉积能量;另一方面,波形顶部关键形状信息的丢失使得长、短门积分的比值趋于一致,导致高能端的粒子鉴别能力完全丧失.反之,若为了避免饱和而降低增益,低能信号则会淹没在基线噪声中,导致关键能谱信息丢失.

为了解决大动态范围带来的鉴别难题,近年来的研究主要集中在多通道读出方案上.例如,在VENDETA阵列^[14]中报道了一种双增益读出方法.该方法通过模拟分路器将PMT信号分为两路不同增益(增益比约为1:10),分别接入数字化采集通道.低能部分利用高增益通道数据,成功将PSD阈值降低至90 keVee;而高能部分则利用低增益通道数据,避免了信号饱和.尽管这种方法有效地解决了动态范围问题,但其代价是显而易见的:它将所需的电子学通道数量及数据吞吐量翻倍.对于构建大型中子探测器阵列而言,这将显著增加系统的复杂性、体积以及建设成本.

是否存在一种方法,既能保留高增益通道对微弱信号的优异鉴别能力,又能从其饱和的波形中恢复出高能粒子的物理信息,从而减少对双通道读出的依赖?基于液体闪烁体的发光机制,中子与 γ 射线的主要区别在于慢成分(延迟荧光)的占比不同.即便PMT的瞬时输出电流导致电子学饱和(平顶),其长寿命的慢成分往往并未饱和;同时,信号处于过阈值的持续时间与入射粒子的能量呈正相关^[15].

基于此,本文提出了一种基于脉冲宽度与拖尾电荷关联分析(time over threshold vs. tail charge)的粒子鉴别方法,旨在利用单一高增益通道实现全能区的测量.利用CAEN A315分路器^[16]和CAEN VX2730数字化仪^[17]构建了10:1的双增益测试系统,使用 ^{238}Pu - ^{13}C 中子源进行了实验验证.本文着重研究了在高增益通道发生严重饱和的情况下,如何通过ToT估算能量以及通过拖尾电荷鉴别粒子.实验结果表明,该方法不仅在低能端保持了与前人工作相当的低阈值特性,而且在波形严重饱和的区域依然能够保持清晰的中子/伽马分辨能力.该技术为在有限的电子学资源下实现宽能区、

高精度的PFNS测量提供了一种高效的数据采集新途径.

2 实验设置

本实验采用液体闪烁探测器作为中子与 γ 射线的探测单元.探测器主体为圆柱形EJ-301液体闪烁体^[18],灵敏体积尺寸为 $\Phi 12.7\text{ cm} \times 5\text{ cm}$.EJ-301具有优异的中子/ γ 甄别能力^[19],适合在宽能区测量中使用.闪烁体耦合至5英寸的PMT(型号ET9823B),用于将光信号转换为电脉冲信号.PMT的工作高压由ISEG高压电源模块^[20]提供,实验中通过调节负高压偏置,使PMT工作在具有良好线性响应和适宜增益的状态.

为了对探测系统进行能量刻度及鉴别性能测试,实验分别使用了 γ 放射源和中子源.能量刻度采用标准 γ 源 ^{137}Cs 和 ^{207}Bi ,利用它们的康普顿边缘确定电子等效光输出与能谱道址的对应关系.混合场测量采用 ^{238}Pu - ^{13}C 同位素中子源,该源可同时提供宽能谱的中子及伴随的 γ 射线,非常适合用于评估大动态范围下的粒子鉴别性能.

实验构建了一套基于波形数字化的双增益数据获取系统,其逻辑连接示意图如图1所示.PMT的阳极输出信号首先输入至CAEN A315模拟分路器,该分路器将原始信号无源均分为两路相同的输出信号.

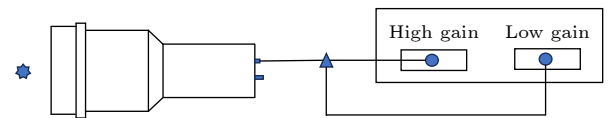


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

数据采集采用基于CAEN VX2730的通用数字化获取系统^[21].VX2730模块(500 MS/s采样率,14-bit垂直分辨率)安装于单槽机箱中.利用VX2730采集卡各通道独立的软件可选模拟增益功能(可设置0.2—4 V_{pp}量程,20档可选),分路后的信号被接入采集通道,并构建了增益比约为10:1的双通道测量模式:高增益通道(HG)作为主测量通道,设置较高的增益以优化对低能微弱信号(<100 keVee)的信噪比,旨在实现低阈值探测,在此增益下高能信号将发生幅度饱和;低增益通道(LG),设置较低增益,确保在测量的能量范围内信

号不发生饱和, 作为“真值”参考, 用于验证 HG 通道饱和和恢复算法的准确性及比对鉴别效果.

数据采集设置为自触发模式. 两路通道的触发阈值均设为略高于基线噪声水平, 并通过时间戳对齐实现事件关联. 对于每一个触发事件, 数字化仪记录长度为 800 ns 的原始波形数据. 该记录长度足以包含脉冲的主峰、快成分以及用于粒子鉴别的慢成分拖尾, 同时也涵盖了基线部分以便于离线扣除基线漂移. 所有采集到的波形数据均存储至硬盘, 以便后续进行离线分析与算法验证.

3 分析方法

为了在单一高增益测量通道中同时实现低能信号的高灵敏探测和高能饱和信号的有效鉴别, 本文采用了一种分段处理策略. 对于幅度未超出量程的信号, 采用标准的电荷比较法 (CCM); 对于幅度超量程的饱和信号, 提出了一种基于过阈时间 (ToT) 与拖尾电荷关联分析的新方法.

在进行具体的物理参数计算前, 首先对数字化仪记录的原始波形进行预处理. 对于每一个记录的波形事件: 首先利用脉冲触发前的 80 个采样点计算平均值作为基线, 并将其从整个波形中扣除, 以消除直流偏置漂移的影响; 其次采用恒定定时甄别算法确定脉冲的起始时刻 t_0 , 消除了不同事件间的时间抖动, 确保了后续积分区间的准确性.

3.1 线性区: 标准电荷比较法

对于高增益通道中未发生饱和的信号 (即波形幅度始终低于数字化仪量程上限的信号), 采用经典的电荷比较法进行粒子鉴别. 液闪探测器的发光机制决定了重带电粒子 (如质子, 对应中子反冲) 产生的脉冲具有比电子 (对应 γ 射线) 更长寿命的慢成分.

如图 2(a) 所示, 定义总电荷积分 Q_{long} 和快成分电荷积分 Q_{short} 如下:

$$Q_{\text{long}} = \int_{t_0 - \Delta t_{\text{offset}}}^{t_0 - \Delta t_{\text{offset}} + \Delta t_{\text{long}}} V(t) dt,$$

$$Q_{\text{short}} = \int_{t_0 - \Delta t_{\text{offset}}}^{t_0 - \Delta t_{\text{offset}} + \Delta t_{\text{short}}} V(t) dt, \quad (1)$$

其中, $V(t)$ 为预处理后的电压信号, Δt_{offset} 为触发前的积分门宽, Δt_{long} 为总积分门宽, Δt_{short} 为快

成分积分门宽. 定义脉冲形状甄别因子为

$$\text{PSD}_{Q_{\text{short}}/Q_{\text{long}}} = \frac{Q_{\text{short}}}{Q_{\text{long}}}. \quad (2)$$

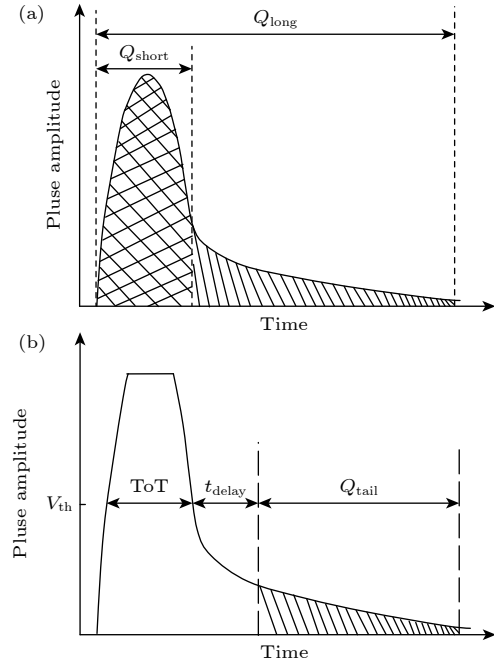


图 2 鉴别方法示意图 (a) 电荷比较法积分区间示意图; (b) 过阈时间和拖尾电荷区间示意图

Fig. 2. Schematic of discrimination methods: (a) Integration intervals for the charge comparison method; (b) schematic of time over threshold and tailing charge interval.

在 n/γ 二维鉴别图中, γ 事件因具有较大的 $\text{PSD}_{Q_{\text{short}}/Q_{\text{long}}}$ 值而位于上方带, 中子事件则位于下方带. 然而, 当入射粒子能量较高导致信号幅度超过量程时, 波形顶部被“削平”. 此时, Q_{long} 严重偏离真实能量, 且波形形状信息的丢失导致 $\text{PSD}_{Q_{\text{short}}/Q_{\text{long}}}$ 值收敛, 标准方法失效.

3.2 饱和区: 基于过阈时间与拖尾电荷的鉴别算法

针对高增益通道的饱和信号, 我们提出了一种不依赖波形重建的简化鉴别方法. 该方法的物理基础在于: 即使 PMT 的主峰电流导致电子学饱和, 液闪发光的慢成分 (延迟荧光) 由于幅度较低, 通常处于非饱和区; 且中子的慢成分占比显著高于 γ 射线. 同时, 在深度饱和情况下, 波形处于饱和状态的持续时间与沉积能量呈正相关.

定义两个关键特征参数 (如图 2(b) 所示), ToT 定义为信号幅度超过特定阈值 V_{th} 的持续时间. 数

据分析中将 V_{th} 设定为量程上限的 50% 是为了兼顾时间提取精度与抗干扰能力. 该阈值位于波形上升/下降沿线性度相对合理的区域, 既避免了顶部饱和区和非线性性的影响, 又远离了基线附近的过载恢复振荡.

$$ToT = t_{fall} - t_{rise}, \quad (3)$$

其中 t_{rise} 和 t_{fall} 分别为波形上升沿和下降沿穿越 V_{th} 的时刻, 分别采用两点插值得到亚采样间隔的时间精度. 对于饱和信号, ToT 可作为一种非线性的能量替代指标.

为了提取未饱和的物理信息, 需要对信号脱离饱和区后的拖尾部分进行积分. 由于数字化仪模拟前端电路从深度饱和状态恢复时会产生非线性的过载恢复振荡, 该振荡叠加在信号下降沿, 干扰了真实的物理波形. 为了尽可能消除这一电子学振荡的影响, 引入一个固定延迟时间 t_{delay} . 拖尾电荷 Q_{tail} 定义为

$$Q_{tail} = \int_{t_{fall} + t_{delay}}^{t_{end}} V(t) dt, \quad (4)$$

其中 t_{end} 为积分结束时刻. 在本工作中, 根据波形特征分析, 选取 $t_{delay} = 30$ ns 以确保积分区间主要包含延迟荧光成分.

利用上述参数构建 Q_{tail} -ToT 二维关联图. 在该坐标系下, 对于具有相同 ToT (即近似相同总能量) 的事件, 中子由于其丰富的慢成分, 其 Q_{tail} 应显著大于 γ 射线, 从而形成两条分离的特征带.

为了验证上述饱和处理方法的准确性, 利用双增益系统中的低增益通道 (LG) 作为基准. 验证流程如下: 筛选出在 HG 通道中发生饱和的事件; 读取该事件对应的 LG 通道波形 (该波形未饱和), 利用标准 CCM 方法判定其粒子类型 (中子或 γ); 将该判定结果映射到 HG 通道的 Q_{tail} -ToT 空间中, 检查中子和 γ 是否在新的参数空间中正确分离.

4 结果和讨论

基于上述实验装置与分析方法, 对双增益采集系统获取的数据进行了详细分析. 本节首先阐述能量刻度结果及高增益通道在低能区的鉴别优势, 随后重点讨论饱和波形恢复算法在拓展动态范围方面的有效性.

4.1 能量刻度与标准 PSD 性能

在进行粒子鉴别分析之前, 首先对探测系统建立了电子等效光输出 (keVee) 与数字化通道数 (ADC channel) 之间的线性响应关系. 利用 ^{137}Cs 和 ^{207}Bi 伽马放射源对高、低增益通道进行了能量刻度. 刻度曲线如图 3 所示. 基于此刻度结果, 确定了本实验中高增益通道的动态范围上限约为 800 keVee.

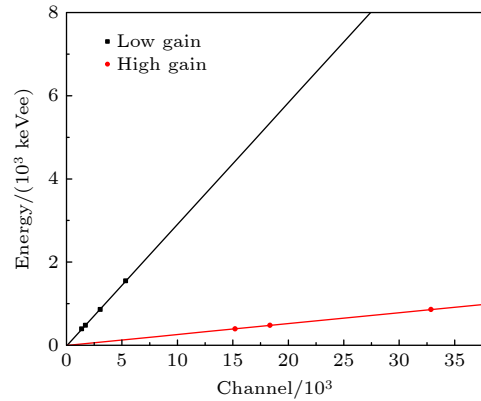


图 3 液闪探测器的能量刻度

Fig. 3. Linearity of the energy calibration of the liquid scintillation detector.

基于上述能量刻度, 利用标准 CCM 分析了 ^{238}Pu - ^{13}C 源在高增益未饱和以及低增益下的数据. 图 4 展示了两通道的中子/ γ 二维鉴别谱.

品质因数 FOM 通常用于定量评估粒子鉴别性能. FOM 定义为两类粒子分布峰位之差与半高宽之和的比值:

$$FOM = \frac{|\text{Centroid}_n - \text{Centroid}_\gamma|}{FWHM_n + FWHM_\gamma}. \quad (5)$$

通常认为 $FOM > 1.27$ 表示完全分离 (对应 3σ 分离), $FOM > 1.0$ 即可视为具有较好的鉴别能力.

从图 4 可以看出, 在低光输出区域, γ 射线 (上支) 与中子 (下支) 呈现出清晰的分离结构. 得益于较高的信号增益, 即使在光输出低至 100 keVee 的区域, 波形仍具有足够的信噪比, 使得 PSD 参数保持了良好的离散度. 经过定量分析, 在 100 keVee 处, 中子与 γ 的分布 FOM 接近 1.27 的完全分离标准. 这一结果证实了保留高增益通道对于获取完整的低能瞬发裂变中子能谱具有不可替代的作用. 相比之下, 若仅使用适应全量程 (8000 keVee) 的低增益通道 (对应测量的中子能量约 20 MeV), 该能量段的信号幅度将淹没在基线噪声中, 无法实现有效鉴别.

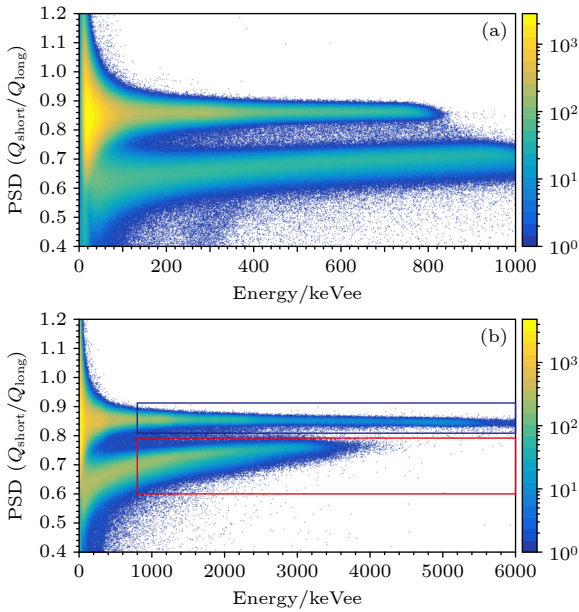


图 4 高、低增益通道的鉴别效果对比 (a)高增益通道未饱和事件的鉴别图; (b)低增益通道的鉴别图

Fig. 4. Comparison of discrimination between high and low gain channels: (a) Identification diagram of unsaturated events in the high gain channel; (b) identification diagram of low gain channel.

图 5 展示了高、低增益通道的 FOM 随能量的变化. 对于低能区 (< 800 keVee), 高增益通道采用标准 CCM 方法, FOM 值维持在较高水平 (1.0—2.2), 保证了低阈值探测. 作为对比的低增益通道, 虽然在全能区未饱和, 但在低能端的 FOM 显著低于高增益通道, 特别是在 100 keVee 处, 其 FOM 值小于 1.0.

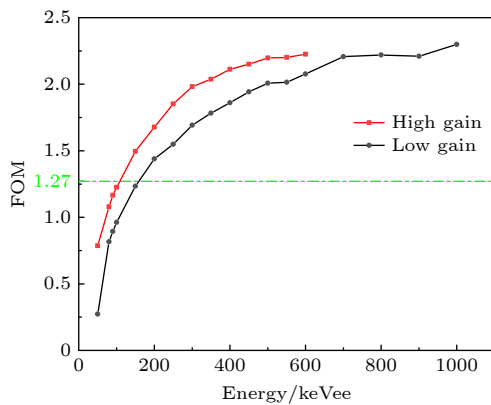


图 5 高、低增益通道的 FOM 随能量的变化

Fig. 5. Figure of merit as a function of light output for both LG and HG outputs.

4.2 饱和信号的鉴别效果

随着沉积能量的增加, 高增益通道的信号幅度

逐渐达到数字化仪的量程上限 (约 800 keVee 以上开始出现饱和). 图 6 展示了高增益通道在全能区的常规 PSD 分布. 可以明显观察到, 当信号超过数据采集卡的饱和点后, 原本分离的中子和 γ 分布带开始迅速弯曲并最终汇聚成一团.

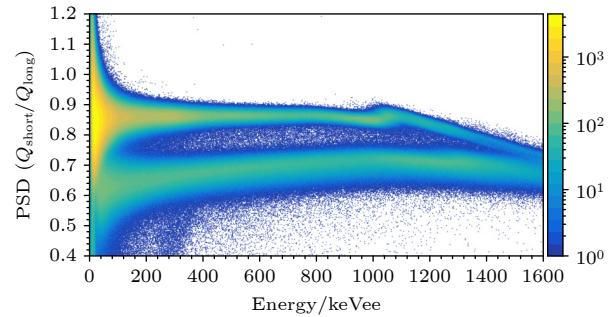


图 6 高增益通道在全能区的鉴别图

Fig. 6. Identification diagram of high gain channel in the full energy range.

这是因为波形饱和导致长门积分电荷量 (Q_{long}) 被截断, 不再随能量线性增加, 同时波形形状信息的丢失使得基于形状差异的 PSD 因子趋于单一值. 这种现象直接导致传统方法在高能区完全失效, 这正是单通道高增益测量的主要瓶颈.

针对上述饱和和数据, 应用本文提出的“过阈时间-拖尾电荷”算法进行处理. 我们通过定量分析对延迟时间 t_{delay} 进行了优化. 图 7 展示了不同 t_{delay} 下鉴别品质因数 FOM 的变化. 结果表明, 当 $t_{delay} < 30$ ns 时, 积分受电子学振铃干扰严重; 当 $t_{delay} > 50$ ns 时, 有效光子数统计不足导致分辨率下降. 实验选取 $t_{delay} = 30$ ns, 此时不同 TOT 对应的 FOM 处于最大值附近, 能够最大程度地保留中子慢成分信息并抑制电子学噪声.

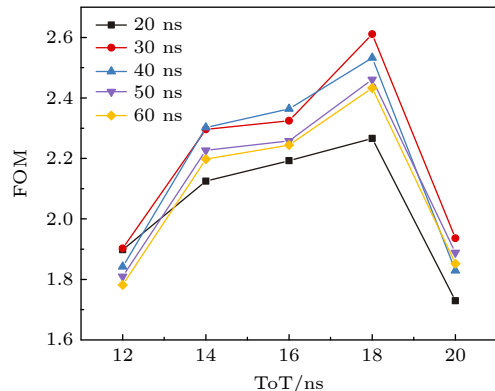


图 7 不同 t_{delay} 下鉴别品质因数 FOM 随 TOT 的变化

Fig. 7. Variation of the FOM with ToT for different t_{delay} .

为了确认分类的正确性, 我们利用并未饱和的低增益通道数据作为真值参考. 如图 4(b) 所示, 分别选出了低增益通道中的中子和 γ 事件, 通过逐事件关联, 图 8 展示了基于新参数空间的二维关联图. 图中低增益通道中判定为中子的事件用红色标记, γ 事件用蓝色标记. 这一交叉验证有力地证明了该算法能够从严重饱和的波形中正确恢复粒子鉴别信息.

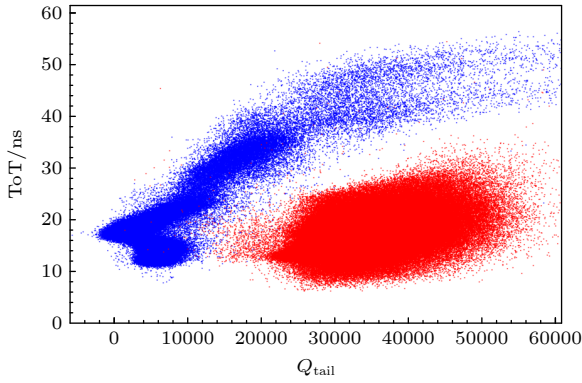


图 8 “过阈时间-拖尾电荷”鉴别效果
Fig. 8. Discrimination performance of the “time over threshold vs. tail charge” method.

与图 6 中混乱的饱和区分布形成鲜明对比, 新的参数空间中涌现出两条截然不同的分布带. 在相同的过阈时间 (ToT, 近似对应相同的总能量) 下, 中子脉冲由于其丰富的慢成分, 在脱离饱和区后的拖尾部分贡献了更多的电荷量 (Q_{tail}). 此外, 从图 8 可以明显观察到, 对于 γ 分支, 它并不是一个平滑的分支, 而是存在一些振荡, 这是前面提到的数字化模拟前端电路从深度饱和状态恢复时产生非线性的过载恢复振荡导致的, 同理中子分支存在同样的振荡, 只是它区域比较宽现象没有太明显.

对于不同的 ToT, 仍然可以在 Q_{tail} 轴上投影, 得到一维的粒子分布谱. 计算两个分布的交点或波谷最低点, 以此作为甄别阈值线. 本次测量中, 受 $^{238}\text{Pu}-^{13}\text{C}$ 源产生的中子能量限制, 并没有 20 MeV 的中子, 但是从图 8 所示趋势来看, 随着能量的增加, 中子和 γ 的区分效果越来越好, 我们有理由相信, 对于更高能量的中子仍然能保持很好的鉴别效果. 后续我们将使用 ^{252}Cf 源进行进一步的验证.

4.3 方法的普适性

本文提出的方法基于液闪探测器的通用发光机制 (慢成分差异) 及电子学饱和的一般特性, 因

此在原理上适用于 BC501A, NE213 等同类探测器.

硬件参数对算法性能有一定影响: 1) 在数字化仪方面, 采样率决定了 ToT 的测量精度. 本工作采用 500 MSPS 采样率结合线性插值, 已满足鉴别需求. 降低采样率可能导致 ToT 抖动增大, 进而略微降低 FOM; 提高采样率则有助于进一步改善性能. 2) 在 PMT 方面, 不同 PMT 的输出回路和分压器设计决定了饱和后的恢复时间及振铃特性. 这要求在使用不同 PMT 时, 需根据本文 4.2 节所述的流程重新扫描并优化延迟时间 t_{delay} . 此外, 需注意避免 PMT 进入极端的空间电荷效应区域, 以保持 ToT 与沉积能量的单调关系. 在使用该方法时, 应确保 PMT 工作在线性畸变尚未完全破坏时间特性的电压范围内.

5 结论

实验结果表明, 结合“高增益硬件”与“饱和分析算法”的策略, 成功覆盖了从 100 keVee 到深度饱和区 (对应中子能量约 20 MeV) 的极大动态范围.

如表 1 所列, 相比于主流的双通道读出方案, 本文方法在保持同等低能灵敏度和有效覆盖高能区的同时, 将电子学通道数和数据量减少了 50%. 这对于动辄包含上百个探测单元的大型中子阵列而言, 在降低建设成本和简化系统维护方面具有显著优势.

表 1 PFNS 测量中的不同读出方案的对比
Table 1. Comparison of different readout schemes for wide-range PFNS measurement.

方案	动态范围	低能灵敏度	高能鉴别	硬件复杂度	数据吞吐量
单通道低增益	中	差	好	低	低
双通道读出	极大	好	最好	高	高
本文方法	大	好	好	低	低

该方法的有效性主要受限于两个因素: 一是 ToT 的单调性, 在极高能量下, 如果光电倍增管本身出现非线性响应 (空间电荷效应), ToT 与能量的关系可能变得复杂, 但在本实验测试的能量范围内 ($^{238}\text{Pu}-^{13}\text{C}$ 源能谱范围), 该关系保持良好的单调性; 二是拖尾信噪比, 算法依赖于未饱和的拖尾部分, 若饱和程度过深导致拖尾剩余部分过短, 统计涨落将影响鉴别效果. 本实验中 ToT 长达 40 ns 以上时仍能有效鉴别, 说明该方法具有相当大的鲁棒性.

综上所述,该方法在不增加电子学通道的前提下,显著提升了液闪探测系统的有效动态范围,为高精度、宽能区的瞬发裂变中子能谱测量提供了一种极具性价比的解决方案。

参考文献

- [1] Capote R, Chen Y J, Hamsch F J, Kornilov N, Lestone J, Litaize O, Morillon B, Neudecker D, Oberstedt S, Ohsawa T, Otuka N, Pronyaev V, Saxena A, Serot O, Shcherbakov O, Shu N C, Smith D, Talou P, Trkov A, Tudora A, Vogt R, Vorobyev A 2016 *Nucl. Data Sheets* **131** 1
- [2] Enqvist A, Wieger B M, Huang L, Flaska M, Pozzi S A, Haight R C, Lee H Y, Kwan E, Wu C Y 2012 *Phys. Rev. C* **86** 064605
- [3] Desai V V, Nayak B K, Saxena A, Suryanarayana S V, Capote R 2015 *Phys. Rev. C* **92** 014609
- [4] Kelly K J, Gomez J A, Devlin M, O'Donnell J M, Neudecker D, Lovell A E, Haight R C, Wu C Y, Henderson R, Kawano T, Bennett E A, Mosby S M, Ullmann J L, Fotiadis N, Henderson J, Taddeucci T N, Lee H Y, Talou P, White M C 2022 *Phys. Rev. C* **105** 044615
- [5] He T, Zheng P, Xiao J 2019 *Nucl. Sci. Tech.* **30** 112
- [6] Li Y M, Ruan X C, Zhou B, Ma Z Y 2011 *Chin. Phys. C* **35** 475
- [7] Stevanato L, Cester D, Nebbia G, Viesti G 2012 *Nucl. Instrum. Methods Phys. A* **690** 96
- [8] Huang H X, Ruan X C, Chen G C, Zhou Z Y, Li X, Bao J, Nie Y B, Zhong Q P 2009 *Chin. Phys. C* **33** 677
- [9] Yan J, Li C, Liu R, Jiang L, Lu X X, Wang M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 032901 (in Chinese) [言杰, 李澄, 刘荣, 蒋励, 鹿心鑫, 王玫 2011 *物理学报* **60** 032901]
- [10] Perdue B A, Haight R C, Lee H Y, Taddeucci T N, O'Donnell J M, White M C, Fotiadis N, Devlin M, Ullmann J L, Laptev A, Bredeweg T, Jandel M, Nelson R O, Wender S A, Wu C Y, Kwan E, Chyzh A, Henderson R, Gostic J 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 879
- [11] Kang M X, Zhang J Z, Wu H Y, Huang H X, Li Y Z, Yang H R, Ruan X C 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 86
- [12] Kaschuck Y, Esposito B 2005 *Nucl. Instrum. Methods Phys. A* **551** 420
- [13] Cester D, Lunardon M, Nebbia G, Stevanato L, Viesti G, Petrucci S, Tintori C 2014 *Nucl. Instrum. Methods Phys. A* **748** 33
- [14] Syrett O, Lenain C, Mauss B, Taieb J, Morfouace P, Chatillon A, Etasse D 2026 *Nucl. Instrum. Methods Phys. A* **1081** 170824
- [15] Zocca F, Pullia A, Bazzacco D, Pascovici G 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 2384
- [16] <https://www.caen.it/products/a315/> [2026-1-5]
- [17] <https://www.caen.it/products/vx2730/> [2026-1-5]
- [18] Zhao D, Feng S, Hu C, Zhang Z, Wang H, Zhu K, Liu Z, Chen C, Zheng B, Huang H 2022 *Rad. Meas.* **151** 106703
- [19] Zhou H, Xiao W, Liu H, Sun T, Li C, Liu L 2023 *Nucl. Instrum. Methods Phys. A* **1048** 167879
- [20] <https://iseg-hv.com/en/products/detail/SHR> [2026-1-5]
- [21] Wu H, Li Z, Venaruzzo M, Colombini L, Luo D, Hua H, Nishimura S, Abba A, Venturini Y, Tintori C, Bianchini M 2026 *Nucl. Instrum. Methods Phys. A* **1085** 171315

Wide dynamic range pulse shape discrimination techniques for prompt fission neutron spectrum measurement*

ZHANG Xintong WU Hongyi[†] LUAN Guangyuan
HUANG Hanxiong LU Xiaofan RUAN Xichao

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

(Received 5 January 2026; revised manuscript received 16 February 2026)

Abstract

High-precision measurement of the prompt fission neutron spectrum (PFNS) requires a detector system capable of simultaneously covering a wide energy range (from keV to 20 MeV) and achieving a low detection threshold. In traditional single-channel readout modes, the high-gain settings necessary for detecting keV-level neutrons inevitably cause electronic saturation (clipping) of high-energy signals, rendering conventional pulse shape discrimination (PSD) methods -based on charge integration or zero-crossing-ineffective. To resolve the conflict between a low detection threshold and a large dynamic range without increasing electronic channel complexity, this paper proposes a novel particle identification method based on the analysis of saturated waveforms in liquid scintillators.

The proposed method exploits the distinct differences in the slow decay components (delayed fluorescence) of neutrons and gamma rays, which remain distinguishable even when the fast components are saturated. A two-dimensional feature correlation of “time over threshold (ToT)” versus “tail charge (Q_{tail})” is constructed to recover particle identification capabilities in the saturation region. Specifically, to eliminate interference from non-linear electronic ringing oscillations during recovery from saturation, a fixed delay time ($t_{\text{delay}} = 30 \text{ ns}$) is introduced to the integration start time of the tail charge.

To validate the algorithm, an experiment is conducted using a ^{238}Pu - ^{13}C neutron source with a simultaneous dual-gain data acquisition system. The non-saturated waveforms from the low-gain channel serve as the “ground truth” reference for event-by-event correlation analysis with the saturated waveforms from the high-gain channel. Experimental results demonstrate that the new method successfully achieves effective neutron-gamma separation in the deep saturation region while maintaining excellent identification performance for low-energy neutrons, with a threshold as low as $\sim 100 \text{ keVee}$. Compared with the mainstream dual-gain readout scheme, this technique significantly extends the effective dynamic range of single-channel measurements and reduces the required number of electronic channels and data throughput by 50%, offering an efficient and cost-effective solution for constructing large-scale neutron detector arrays for PFNS measurements.

Keywords: liquid scintillator, neutron-gamma discrimination, waveform saturation analysis, time over threshold

DOI: [10.7498/aps.75.20260012](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260012)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260012](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260012)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12505161) and the Continuous-Support Basic Scientific Research Project, China (Grant No. BJ010261223282).

[†] Corresponding author. E-mail: wuhy@ciae.ac.cn

瞬发裂变中子能谱测量中的大动态范围粒子鉴别技术

张鑫彤 吴鸿毅 栾广源 黄翰雄 鲁潇帆 阮锡超

Wide dynamic range pulse shape discrimination techniques for prompt fission neutron spectrum measurement

ZHANG Xintong WU Hongyi LUAN Guangyuan HUANG Hanxiong LU Xiaofan RUAN Xichao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090105 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260012

CSTR: 32037.14.aps.75.20260012

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260012>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中子诱发伽马产生截面测量中的谱分析技术

Spectral analysis techniques in measuring neutron-induced gamma production cross-section

物理学报. 2024, 73(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231980>

不同厚度ST401中子能谱响应测量与分析

Measurement and analysis of neutron spectrum responses of ST401 scintillators with different thickness

物理学报. 2024, 73(23): 232401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241198>

上海激光电子伽马源伽马活化数据的获取及应用

Acquisition and application of Shanghai Laser Electron Gamma Source gamma activation data

物理学报. 2026, 75(2): 232401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251208>

1—100 eV能区¹⁶⁹Tm中子全截面测量与共振参数分析

Measurement of neutron total cross sections and resonance parameters analysis of ¹⁶⁹Tm in the region from 1 eV to 100 eV

物理学报. 2026, 75(2): 232401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251263>

宽能中子与碳相互作用的高精度全截面测量与分析

High-precision total cross-section measurement and analysis of wide-energy neutron-carbon interactions

物理学报. 2026, 75(3): 232401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251350>

用于 γ 全吸收装置的大体积BaF₂探测单元的 α/γ 鉴别方法

α/γ discrimination method for bulky BaF₂ detector used in γ total absorption facility

物理学报. 2025, 74(10): 102801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250017>