

文章编号:

基于 QDC-Matrix 算法的 CsI (TI) 探测器粒子鉴别技术研究

黎健宏^{1,2}, 徐君宏^{1,2}, 方永得^{1,2}, 贾子豪^{1,2}, 梁雯^{1,2}, 谭喻鸿^{1,2}, 冯星硕^{1,2}, 李宥余^{1,2}, SALEH SANUSI^{1,2}, 王智轩³, 张前超³

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中法核工程与技术学院, 中山大学, 珠海 519082)

摘要: CsI(Tl) 探测器因其可靠的脉冲形状鉴别 (PSD) 能力, 在核物理实验中被广泛用于带电粒子识别 (PID)。为克服现有数字化 PID 方法数据量大、计算复杂及实时性不足的局限性, 本文提出一种基于电荷-数字转换矩阵 (QDC-Matrix) 的算法。本算法基于 CsI (TI) 信号的三指数衰减模型, 三个指数项分别对应信号快成分、慢成分与电子学响应成分。通过对信号波形进行多段分段积分, 利用各段积分与三指数函数的时间关联特性构建线性方程组, 求解快、慢成分幅度, 并依据快、慢成分幅度比与粒子属性的关联, 实现带电粒子的快速鉴别。该方法无需完整波形数据, 大幅降低传输与存储开销, 通过蒙特卡洛优化积分区间, 保证鉴别精度与全波形拟合相当。实验验证表明, 在典型熔合蒸发反应数据中, QDC-Matrix 算法性能优于电荷比较法, 与拟合相当。该算法为 CsI(Tl) 阵列在核物理实验中的高效 PID 提供了新方案。

关键词: CsI(Tl) 探测器; 带电粒子识别; QDC-Matrix 算法

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:**

1 引言

在核物理实验中, 重离子熔合蒸发反应是研究远离稳定线原子核结构的核心手段, 而质子、氘核、氚核、 α 粒子等轻带电粒子的有效鉴别, 是实现弱反应道筛选、压低中子蒸发道带来的本底、显著提高峰康比和 γ - γ 符合测量效果的关键技术。CsI (TI) 闪烁体探测器凭借优异的脉冲形状甄别 (PSD) 能力, 被广泛应用于该类实验的带电粒子识别: 其闪烁衰减特性呈现“快”和“慢”两种寿命成分, 且两种成分的相对强度随辐射粒子类型的不同而变化^[1-2]。室温下, 快、慢成分的典型衰减时间分别约为 0.7 μ s 和 3.3 μ s, 其中快成分更易被质子或 α 粒子激发, 而慢成分则对 γ 射线和 β 粒子响应更强^[3-4]。基于这一特性, CsI (TI) 已被用于构建 MICROBALL^[5]、DIAMANT^[6] 等多个具备粒子鉴别功能的 4π 探测器阵列, 成功实现了熔合蒸发实验中低截面核反应道的精准甄别, 成为在束 γ 谱学研究中降低本底、筛选目标反应道的核心单元。

近年来, 随着数字电子学的快速发展, CsI(Tl) 探测器的粒子识别已通过多种脉冲形状分析技术实现, 从过零时间法^[7]、电荷比较法^[8]等传统模拟方法, 逐步过渡到上升时间分析法^[9-10]、全波形拟合法^[3,11]等数字化方法。其中, 电荷比较法可在模拟门控积分器或基于“现场可编程门阵列 (FPGA)”的数字积分窗口下仅提取部分电荷积分信息, 实现相对简单的鉴别; 然而, 上升时间分析法和全波形拟合法等则通常依赖完整波形作为输入, 导致数据量大、计算复杂及分析耗时等挑战。这类局限性在高计数率、大规模阵列或需要高效实时粒子识别的实验场景中尤为突出, 限制了其进一步应用。

为解决现有技术在数据传输与存储开销、计算复杂度及实时性等方面的不足, 本文提出一种电荷-数字转换矩阵 (QDC-Matrix) 算法。该算法以 CsI (TI) 闪烁信号与前置放大器耦合后的三指数衰减模型为理论基础, 通过提取信号的多段积分特征构建线性方程组, 求解得到快、慢衰减成分幅度, 进而实现带电粒子快速鉴别。该方法无需依赖完整波形数据, 大幅降低了数据传输与存储开销, 针对高计数率实验场景采用 8 段积分方案, 经蒙特卡洛算法优化区间参数后, 鉴别精度与传统全波形拟合方法相当, 同时可根据低计数率实验场景的需求, 灵活简化为 6 段、4 段积分模型, 进一步提升了算法的灵活性与实用性, 为 CsI (TI) 探测器阵列在核物理实验中的高效粒子识别提供了新方案。

收稿日期: 2026-04-19; 修改日期: 2026-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12275321); 国家自然科学基金资助项目 (12121005); 国家自然科学基金资助项目 (12475129);

作者简介: 黎健宏 (1996-), 男, 广东江门人, 研究生, 博士, 从事粒子物理与原子核研究; E-mail: lijianhong@impcas.ac.cn

通信作者: E-mail: fangyd@impcas.ac.cn

2 CsI(Tl) 阵列

2.1 阵列整体结构设计

本论文基于的 CsI(Tl) 阵列由中国科学院近代物理研究所研制。本阵列是一种紧凑型、高分段探测系统,其设计目标是在靶位周围实现近乎 4π 立体角覆盖,用于带电粒子测量。该阵列采用 11 个同心环紧凑布局,共包含 128 个探测模块,覆盖 9.6° – 170° 极角范围,几何立体角覆盖率达 95%。针对前向粒子通量高、能量高的特点,前向 6 个环 (Ring 1–6) 采用密集分割设计,后向 5 个环 (Ring 7–11) 增大探测器尺寸,以平衡计数率与探测效率。探测器晶体采用混合几何构型:除中间第 7 环为矩形晶体外,其余环均为等腰梯形晶体,最小化探测器间间隙 ($\leq 1\text{ mm}$),从而减少探测盲区。针对重离子熔合蒸发反应中轻带电粒子的角分布与能量分布特性,阵列采用梯度化的晶体厚度设计:从前向 Ring 1 的 3.5 mm 逐步递减至后向 Ring 11 的 1.5 mm,可确保前向高能区 28 MeV 质子、110 MeV α 粒子的全能量沉积探测,可探测的粒子能量上限随晶体厚度向后方减薄同步逐环降低。设计覆盖了重离子熔合蒸发反应、转移反应中出射轻带电粒子的典型能量区间,使阵列能够完美适配在束实验中的反应道甄别、带电粒子 $-\gamma$ 符合测量等物理需求。图 1 展示了阵列组装过程中的部分环实物照片,清晰呈现了密集分割的探测器布局。

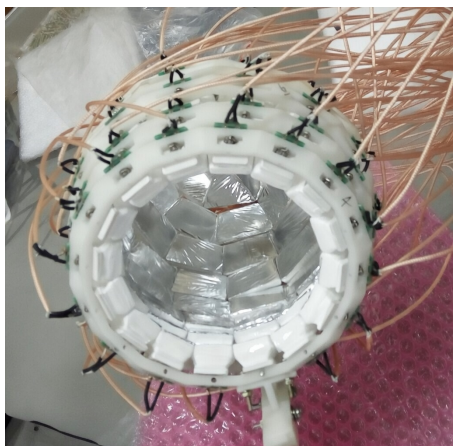


图 1 CsI(Tl) 阵列的部分组装实物照片。照片展示了后向几环的密集布局、等腰梯形晶体排列、最小间隙设计 ($\leq 1\text{ mm}$)。

2.2 探测模块优化设计

每个探测模块均为独立集成单元,由 CsI(Tl) 晶体、光学光导、雪崩光电二极管 (APD) 及封装结构组成。晶体表面经光学抛光处理后,侧面均匀涂覆二氧化钛反射涂层 (BC-620),以最大化闪烁光的内反射效率;晶体前侧 (入射面) 覆盖 $2\mu\text{m}$ 厚的镀铝聚酯薄膜,确保光密封

性;侧面再采用多层白色特氟龙胶带紧密包裹,进一步提升光收集效率。晶体通过光学环氧树脂 (BC-600, 折射率 $n \approx 1.56$) 与 PMMA 光导实现光学耦合,光导再与 $10 \times 10\text{ mm}^2$ 的 HAMAMATSU S8664-1010 型 APD 对接。该 APD 在 300 V 偏压下漏电流低于 50 nA,有效保障弱信号探测的灵敏度。

每个成品探测模块均封装于薄型聚甲醛 (POM) 树脂外壳内,既实现电气绝缘,又避免对 γ 射线的额外衰减与散射干扰。APD 输出信号通过长度 $\leq 10\text{ cm}$ 的低电容同轴电缆直接连接至前置放大器,最大限度减少信号传输过程中的噪声引入。

2.3 数据采集系统

数据采集系统采用“前置放大–信号传输–高速数字化–实时处理”的模块化架构。前置放大器为北京大学自主研制的电荷灵敏型放大器,每通道集成 4 个场效应管 (FET) 以抑制噪声,阻容反馈网络参数为 $R_f = 100\text{ M}\Omega$ 、 $C_f = 0.5\text{ pF}$ 。

信号经短距离低电容同轴线传输至馈通法兰,接入基于 XIA 公司 Pixie-16 模块的通用数字数据采集系统 (GDDAQ)^[12–13]。该系统采用 14 bit 分辨率、100 MHz 采样率,支持多模块同步触发及多机箱同步触发。通过 FPGA 实现基线校正、堆积脉冲剔除等实时预处理功能。针对 CsI(Tl) 闪烁体信号的慢衰减特性 (衰减时间常数约 $1\mu\text{s}$),系统支持 1–128 倍可选降频 (decimation) 采样。经实验优化,确定 16 倍降频采样为最优参数,此时单事件数据量压缩至 160 个 ADC 样本 (对应 $25.6\mu\text{s}$ 时间窗口)。采集窗预触发 (pre-trigger) 时间设置为 $9.6\mu\text{s}$,确保充分采集基线与完整信号。最终数据以列表模式 (list mode) 存储,可实现与 γ 射线探测器阵列的精准符合触发同步。

3 粒子鉴别方法与算法实现

为评估 CsI(Tl) 阵列的粒子鉴别能力,研究团队在中国原子能科学研究院 (CIAE) 和中国科学院近代物理研究所 (IMP) 分别开展了两次熔合蒸发反应实验,结合 CsI(Tl) 阵列与在束 γ 谱学技术进行测量。其中, γ 射线由高纯锗探测器 (HPGe) 探测,带电粒子由 CsI(Tl) 阵列记录用于反应道选择。在束运行期间,通过筛选同时符合 CsI(Tl) 信号的双重 γ – γ 符合事件进行后续分析。

CIAE 实验采用 42.5 MeV ^7Li 束轰击 ^{186}W 靶,累计获得 5.9×10^9 个 γ – γ 符合事件;IMP 实验采用 51 MeV ^9Be 束轰击自然 Ir 同位素靶 (^{nat}Ir),累计获得 2.3×10^9 个 γ – γ 符合事件。后续分析以 IMP 实验数据为基础,首先进行数据预处理,然后选取电荷比较法^[8]和全波形拟合法^[3,11]作为基准方法,与 QDC-Matrix 算法进行性能

对比分析及可靠性讨论。

3.1 数据预处理

原始采集数据需经过严格的筛选与标准化处理，以保障后续粒子鉴别算法的输入质量。由于 CsI(Tl) 探测器具有慢闪烁光输出特性，且在束实验中计数率较高，堆积脉冲可能导致信号失真或事件丢失。为有效消除这些影响，本工作采用一阶与二阶导数分析法识别堆积脉冲与噪声信号：正常信号的导数呈单调递减趋势，而堆积或噪声信号的导数表现为无规则波动。通过该方法可有效剔除畸变事件。

同时，通过数值评估剔除 ADC 样本中的超阈值与缺失值事件，确保数据集完整性。基线校正则利用触发前区域的 60 个 ADC 样本进行指数拟合重构基线，消除高计数率下前一波形拖尾导致的基线漂移，从而保障不同事件的基线一致性。

3.2 传统粒子鉴别方法实现

为全面评估 QDC-Matrix 算法的性能，本节首先选取基于 CsI(Tl) 快、慢衰减特性的两种经典粒子鉴别方法——电荷比较法和全波形拟合法——作为基准，系统阐述其基本原理及其主要性能局限性，为后续 QDC-Matrix 算法的优越性验证奠定对比基础。

3.2.1 电荷比较法

电荷比较法基于 CsI(Tl) 信号的快、慢衰减特性，将脉冲波形划分为两个连续时间窗口：前窗口（短积分，Short Gate，简称 SG）以快成分为主，后窗口（长积分，Long Gate，简称 LG）以慢成分为主。通过计算两个窗口积分电荷的比值 ($Q_{\text{short}}/Q_{\text{long}}$ 或 $(Q_{\text{long}} - Q_{\text{short}})/Q_{\text{long}}$) 作为 PID，实现不同粒子（如 p 、 d 、 t 、 α 与 γ ）的鉴别。

该方法在早期多采用“模拟门控积分器 + QDC”实现，也可基于数字采集系统通过 FPGA 实时计算数字积分时间窗口得到 PID 指数。在本工作中，实验采集阶段并未实时采用该方法；后续利用 GDDAQ 记录的完整波形数据，离线实现了电荷比较法，用于与 QDC-Matrix 算法进行性能对比。

值得注意的是，积分窗口长度的选择对粒子鉴别效果有明显影响。SG 过短会丢失快成分信息，过长则会混入较多慢成分；LG 同样需在提取慢成分与避免噪声积累之间进行权衡。经对 SG 和 LG 两个参数进行遍历优化后，本工作采用 SG 约为 1.3 μs 、LG 约为 8.5 μs 。

图 2 (a) 为典型的 CsI(Tl) 信号采样波形及 SG、LG 窗口设置示意图。图 2(b) 展示了该方法在 ${}^9\text{Be} + {}^{\text{nat}}\text{Ir}$ 反应中的粒子鉴别结果，横轴为 Q_{long} ，纵轴为 Q_{short} 。值得注意的是，图 2(b) 中 α 带左侧的带状结构初步判断为

${}^6\text{He}$ 粒子。可见 p 与 α 粒子虽呈现明显带状分布，但在低能区不同带电粒子之间的区分界限变得模糊，直观反映了电荷比较法在低能段分辨能力的局限性。

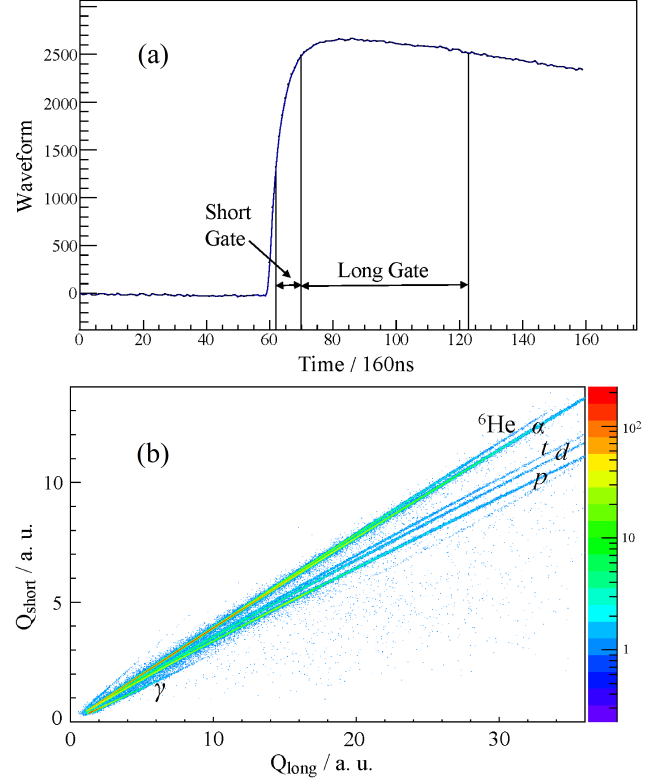


图 2 电荷比较法原理示意图。(a) 典型 CsI(Tl) 信号采样波形及 SG (1.3 μs) 和 LG (8.5 μs) 窗口设置；(b) 对应的粒子鉴别结果。

3.2.2 全波形拟合法

CsI(Tl) 输出信号可采用三指数衰减模型描述：

$$W(t) = A_F (1 - e^{-(t-t_0)/\tau_F}) e^{-(t-t_0)/\tau_{RC}} + A_S (1 - e^{-(t-t_0)/\tau_S}) e^{-(t-t_0)/\tau_{RC}}, \quad (1)$$

其中 A_F 、 A_S 分别为快、慢衰减成分幅度， $\tau_F \approx 0.7 \mu\text{s}$ ， $\tau_S \approx 3.3 \mu\text{s}$ ， τ_{RC} 为前置放大器 RC 时间常数， t_0 为信号起始时间。

采用 χ^2 最小二乘法拟合完整波形数据，本实验中采用 160 个 ADC 样本（对应 25.6 μs 时间窗口，经 16 倍降采样后每样本长度为 0.16 μs ），拟合参数包括 t_0 、 A_F 、 A_S 以及 τ_{RC} 。以快/慢成分幅度比 A_F/A_S （或 $A_F/(A_F + A_S)$ ）作为粒子鉴别特征。该方法鉴别精度较高，可有效区分 p 、 d 、 t 、 α 粒子与 γ 射线，优于简单电荷比较法。

图 3 (a) 给出了一个典型的 CsI(Tl) 信号原始波形及其 χ^2 拟合结果。如图所示， χ^2 拟合曲线（红色实线）与原始数据（黑色散点）吻合良好；全波形拟合法的粒子鉴别结果如图 3 (b) 所示，该图展示了在 ${}^9\text{Be} + {}^{\text{nat}}\text{Ir}$ 反

应实验数据中, 经拟合得到的慢成分幅度(横轴)与快成分幅度(纵轴)的二维分布。 p 、 d 、 t 、 α 等带电粒子形成了清晰分离的区域。相比于电荷比较法, 充分体现了该方法在精度上的优势, 但计算复杂度较高。

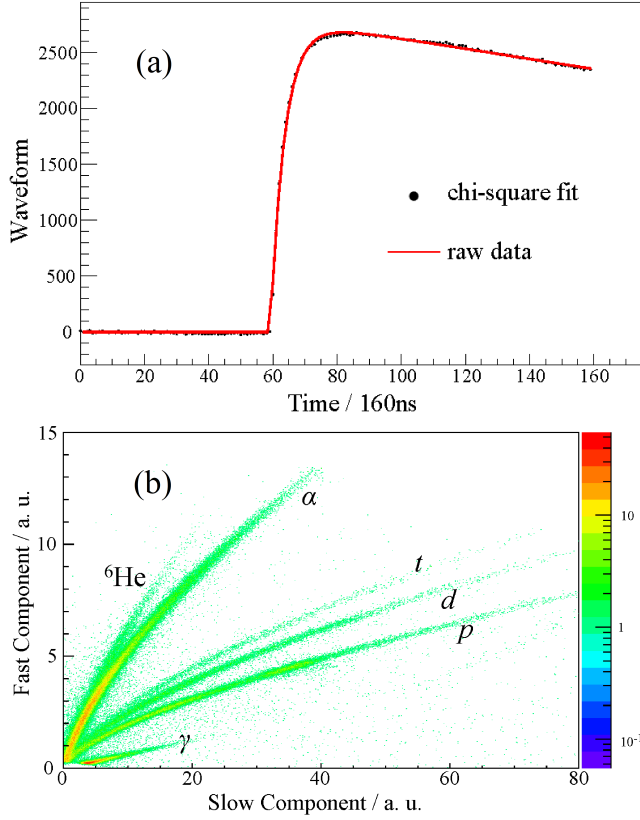


图 3 全波形拟合法的拟合效果与粒子鉴别结果。(a) 典型 CsI(Tl) 信号原始波形(黑色散点)及其 χ^2 拟合曲线(红色实线); (b) 粒子鉴别效果图, 横轴为慢成分幅度, 纵轴为快成分幅度。

然而, 该方法的主要性能局限在于: 需处理全量波形数据, 数据存储与计算开销较大; 对基线漂移和堆积脉冲敏感; 难以满足高计数率下的实时需求。在 4π 阵列大规模应用中, 计算资源消耗显著, 成为瓶颈。

以上两种基准方法虽在 CsI(Tl) 粒子鉴别中广泛应用, 但均存在数据依赖性强、实时性差的共性问题, 为本文 QDC-Matrix 算法的提出提供了明确的改进方向。

3.3 QDC-Matrix 算法

QDC-Matrix 算法是本文的核心创新点。该算法基于 CsI(Tl) 信号的三指数衰减模型, 通过提取有限段积分特征构建矩阵方程组, 实现快、慢成分幅度的求解和粒子鉴别。以下从单指数衰减模型入手, 逐步扩展至三指数情形, 详细推导算法数学原理, 并进一步介绍区间优化与模型简化。

3.3.1 单指数衰减模型基础

单指数衰减模型是 QDC-Matrix 算法的理论基础。假设信号遵循单指数衰减形式:

$$W(t) = Ae^{-t/\tau}, \quad (2)$$

其中 A 为信号幅度, τ 为衰减时间常数。

在积分区间 $[t_1, t_2]$ 内的积分值 S 为:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} Ae^{-t/\tau} dt = A\tau (e^{-t_1/\tau} - e^{-t_2/\tau}). \quad (3)$$

图 4 展示了单指数衰减模型的典型波形及其积分区间划分示意图。图中信号幅度从 A_1 (积分起始点) 指数衰减至 A_2 (第二个积分点), 并标注了两个典型积分区间 S_1 ($[t_1, t_2]$) 和 S_2 ($[t_2, t_3]$), 以及相应的积分长度 $L_1 = t_2 - t_1$ 、 $L_2 = t_3 - t_2$ 和时间节点 t_1 、 t_2 、 t_3 。这些区间划分体现了单指数模型下通过固定长度积分段提取信号参数的核心思想。

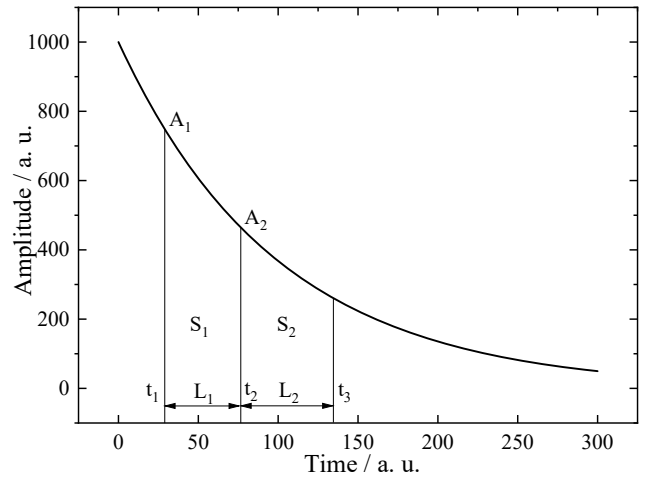


图 4 单指数衰减模型示意图。图中展示了两个积分区间: S_1 和 S_2 , 以及对应的积分长度 L_1 、 L_2 与时间节点 t_1 、 t_2 、 t_3 。幅度标记 A_1 和 A_2 分别表示两个积分区间起始点处的信号强度。

引入 $b(t) = e^{-t/\tau}$, 则上述积分可简化为:

$$S = A\tau(b^{t_1} - b^{t_2}). \quad (4)$$

由公式 (4) 和积分长度 L_1 、 L_2 的定义, 可得到积分面积 S_1 的 S_2 的表达式为:

$$S_1 = A_1\tau(1 - b^{L_1}), \quad (5)$$

$$S_2 = A_1\tau b^{L_1}(1 - b^{L_2}), \quad (6)$$

其中 $A_1 = Ae^{-t_1/\tau}$ 为积分起始点处的实际幅度。

可见, 在单指数模型下, 积分值 S_1 和 S_2 的绝对值仅与 A_1 、 τ 、 L_1 、 L_2 有关。然而, 在实际 CsI(Tl) 探测器系统中, 前置放大器 RC 电路的耦合以及闪烁体固有的快、慢

成分使信号波形偏离单指数形式，实际呈现三指数衰减特征。基于上述长度依赖的积分思想，下文将扩展至三指数模型，并引入 8 段积分特征构建完整的 QDC-Matrix 方程组。

3.3.2 三指数衰减模型扩展

CsI(TI) 探测器信号遵循三指数衰减模型，式 (1) 变换为：

$$W(t) = Ae^{-(t-t_0)/\tau_1} + Be^{-(t-t_0)/\tau_2} + Ce^{-(t-t_0)/\tau_3}, \quad (7)$$

其中：

$$A = A_F + A_S, \quad B = -A_F, \quad C = -A_S, \\ \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_{RC}}, \quad \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_F}, \quad \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_S}.$$

基于单指数积分规律的扩展 (式 (5) 和式 (6))，在三指数衰减模型框架下，每一积分区间 S_k 均可写成三成分在对应区间内积分贡献的线性叠加形式，从而为后续构造线性矩阵方程组提供了数学基础。

假设信号起始于 t_0 ，并考虑基线受前一脉冲尾部影响，基线与当前信号波形均可采用三指数衰减模型描述。为实现数据降维与高效计算，本算法采用 8 段积分方案，如图 5 (a) 所示。其中 $S_{1\sim3}$ 对应基线部分，用于校正残余衰减； S_4 涵盖信号起始过渡区 (包含未知 t_0 的阴影部分)； $S_{5\sim8}$ 则为主体衰减阶段。引入变量 J 表征 S_4 中阴影积分贡献，并加入 offset 参数校正偏置水平，最终构建线性方程组：

$$S = M_8 \cdot A, \quad (8)$$

其中

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_8]^T, \\ A = [A_1, A_2, A_3, J, A_4, A_5, A_6, \text{offset}]^T. \quad (9)$$

$A_{1\sim3}$ 和 $A_{4\sim6}$ 分别为 $t = 0$ 和 $t = t_g$ (信号进入稳定衰减阶段) 时刻的三指数成分幅度。矩阵 M_8 的元素基于 $b_i = e^{-1/\tau_i}$ 和区间长度 L_k 定义： $B_i^{(k)} = 1 - b_i^{L_k}$ ， $B_i^{(m,k)} = b_i^{\sum_{j=m}^{k-1} L_j} (1 - b_i^{L_k})$ ，具体矩阵形式如下：

$$M_8 = \begin{bmatrix} \tau_1 B_1^{(1)} & \tau_2 B_2^{(1)} & \tau_3 B_3^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_1 \\ \tau_1 B_1^{(1,2)} & \tau_2 B_2^{(1,2)} & \tau_3 B_3^{(1,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_2 \\ \tau_1 B_1^{(1,3)} & \tau_2 B_2^{(1,3)} & \tau_3 B_3^{(1,3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_3 \\ \tau_1 B_1^{(1,4)} & \tau_2 B_2^{(1,4)} & \tau_3 B_3^{(1,4)} & 1 & 0 & 0 & 0 & L_4 \\ \tau_1 B_1^{(1,5)} & \tau_2 B_2^{(1,5)} & \tau_3 B_3^{(1,5)} & 0 & \tau_1 B_1^{(5)} & \tau_2 B_2^{(5)} & \tau_3 B_3^{(5)} & L_5 \\ \tau_1 B_1^{(1,6)} & \tau_2 B_2^{(1,6)} & \tau_3 B_3^{(1,6)} & 0 & \tau_1 B_1^{(5,6)} & \tau_2 B_2^{(5,6)} & \tau_3 B_3^{(5,6)} & L_6 \\ \tau_1 B_1^{(1,7)} & \tau_2 B_2^{(1,7)} & \tau_3 B_3^{(1,7)} & 0 & \tau_1 B_1^{(5,7)} & \tau_2 B_2^{(5,7)} & \tau_3 B_3^{(5,7)} & L_7 \\ \tau_1 B_1^{(1,8)} & \tau_2 B_2^{(1,8)} & \tau_3 B_3^{(1,8)} & 0 & \tau_1 B_1^{(5,8)} & \tau_2 B_2^{(5,8)} & \tau_3 B_3^{(5,8)} & L_8 \end{bmatrix} \quad (10)$$

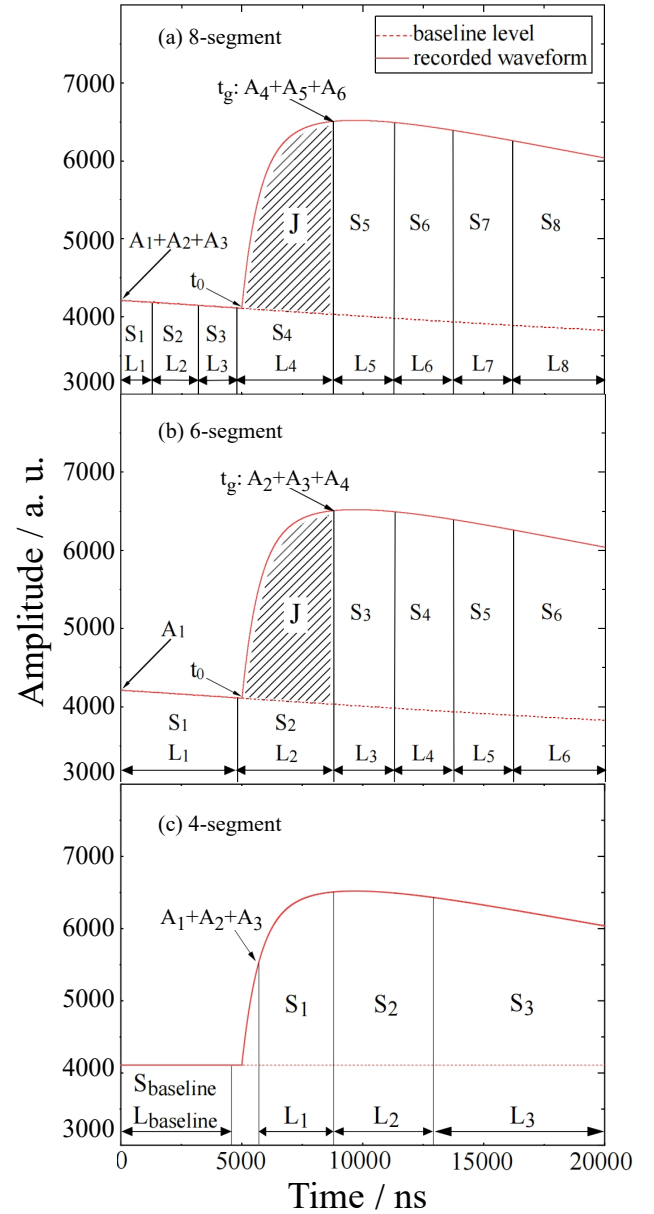


图5 三指数衰减模型的分段积分示意图。(a) 8 段积分；(b) 6 段积分；(c) 4 段积分。

通过矩阵求逆 $A = M_8^{-1} \cdot S$ ，可直接获得 $A_{4\sim6}$ 。随后，利用已知的幅度关系：

$$\left(\frac{A_F + A_S}{A_4} \right)^{\tau_1} = \left(\frac{A_F}{-A_5} \right)^{\tau_2} = \left(\frac{A_S}{-A_6} \right)^{\tau_3}, \quad (11)$$

采用弦截法或二分法^[14]数值求解 A_F 和 A_S ，从而实现粒子类型鉴别。

3.3.3 区间优化与简化

QDC-Matrix 算法对噪声较为敏感，需预先通过导数分析或阈值判断筛除堆积事件，以保障输入数据的质量和算法的稳定性。同时，该算法对积分区间参数高度依赖，区间划分的调整会显著影响粒子鉴别的精度。我们

发现, 若采用简单的等间隔划分, p 与 α 粒子几乎无法实现有效分离, 整体 PID 性能较差。这充分说明了积分区间优化的必要性。

为系统地寻找最优区间划分, 本工作采用蒙特卡洛随机方法进行优化。首先, 对选定的波形进行全波形拟合, 获得参考的快、慢成分幅度 A_F 和 A_S 作为基准值。该过程仅依赖波形自身的衰减特征, 无需预先知道粒子种类。在此基础上, 本工作通过蒙特卡洛方法随机遍历积分区间组合, 以统计方式寻找全局最优划分。为在合理计算耗时内获得足够多的矩阵可逆且数值稳定的有效区间, 随机生成 10^8 组区间划分方案 $[L_1, L_2, \dots, L_8]$ 。该样本量旨在平衡有效解的数量与计算效率。遍历过程中施加以下约束: 前三段 ($L_1 \sim L_3$) 总和长度固定为信号起始阶段的典型长度, 后五段 ($L_4 \sim L_8$) 总和相应地等于总波形长度减去前三段长度; 同时, 每段积分长度不小于一定下限, 以避免区间过短导致矩阵不可逆, 从而无法完成数值求解。

在生成的 10^8 组区间组合中, 部分组合因矩阵奇异、解得系数过小或符号条件不满足, 无法通过矩阵算法得到有效的快、慢成分幅度 A_F 和 A_S 。对剩余能够成功解出 A_F 和 A_S 的区间组合, 分别展示每个 L_i ($i = 1 \sim 8$) 的分布。图 6 展示了这些成功解对应的区间长度分布, 其中 (a)~(h) 依次为 $L_1 \sim L_8$ 的直方图。

其中最为重要的是包含阴影部分的 L_4 区间长度。该段同时涵盖基线残余衰减、信号上升沿以及快、慢成分起始贡献, 是带电粒子鉴别精度的关键区间。而其余区间在一定范围内变化时, 对最终 PID 效果几乎没有显著影响。对每个 L_i 的分布进行高斯拟合 (或直接求取峰值位置), 取拟合峰值 μ_i (或直方图最大值位置) 作为该段的最优长度 L_i^{opt} 。

最终得到一组最优区间组合 $[L_1^{\text{opt}}, L_2^{\text{opt}}, \dots, L_8^{\text{opt}}]$ 。该最优区间组合固定应用于后续所有数据处理。采用优化区间后的 QDC-Matrix 算法, 可获得与全波形拟合相当的粒子鉴别性能。图 7 (a) 展示了优化后 QDC-Matrix 算法 (8 段积分) 的 PID 结果。图中 p 、 d 、 t 、 α 等粒子带清晰分离, 与前述全波形拟合结果高度吻合, 验证了蒙特卡洛优化区间的有效性和 QDC-Matrix 算法的实用性。

在特定实验条件下, 可进一步简化模型, 以适应不同计数率和计算资源限制。例如, 当基线残余衰减影响较小时, 可将基线近似为单指数衰减, 从而减少至 6 段积分方案: S_1 对应基线区, S_2 为起始过渡区 (含阴影积分 J), $S_{3\sim 6}$ 为主体衰减段。相应矩阵 M_6 可类似 8 段方案推导, 矩阵元素基于相同 b_i 和 $B_i^{(k)}$ 定义, 但行数减少。其中 $S = [S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6]^T$, $A = [A_1, J, A_2, A_3, A_4, \text{offset}]^T$, A_1

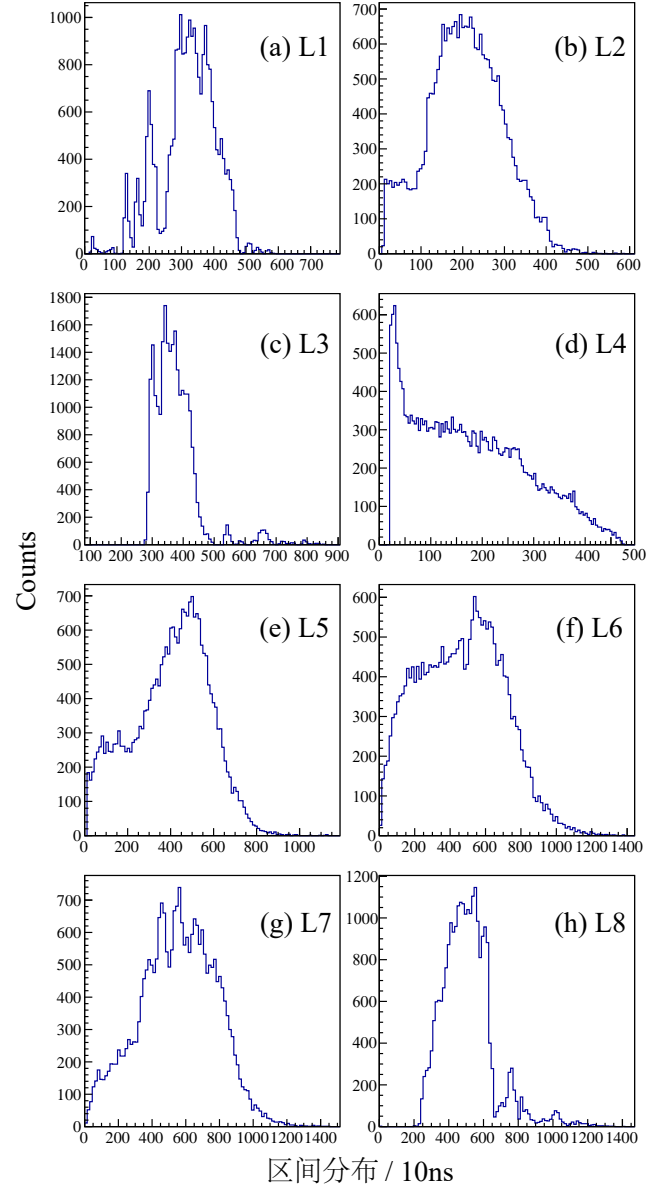


图 6 蒙特卡洛 10^8 组随机搜索的有效区间长度分布 (a)~(h) 对应 $L_1 \sim L_8$ 。

和 $A_{2\sim 4}$ 分别为 $t = 0$ 时刻和 $t = t_g$ (信号进入稳定衰减阶段) 时刻的三指数成分幅度。矩阵 M_6 的具体形式如下:

$$M_6 = \begin{bmatrix} \tau_1 B_1^{(1)} & \tau_2 B_2^{(1)} & \tau_3 B_3^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_1 \\ \tau_1 B_1^{(1,2)} & \tau_2 B_2^{(1,2)} & \tau_3 B_3^{(1,2)} & 1 & 0 & 0 & 0 & L_2 \\ \tau_1 B_1^{(1,3)} & \tau_2 B_2^{(1,3)} & \tau_3 B_3^{(1,3)} & 0 & \tau_1 B_1^{(3,4)} & \tau_2 B_2^{(3,4)} & \tau_3 B_3^{(3,4)} & L_3 \\ \tau_1 B_1^{(1,4)} & \tau_2 B_2^{(1,4)} & \tau_3 B_3^{(1,4)} & 0 & \tau_1 B_1^{(3,5)} & \tau_2 B_2^{(3,5)} & \tau_3 B_3^{(3,5)} & L_4 \\ \tau_1 B_1^{(1,5)} & \tau_2 B_2^{(1,5)} & \tau_3 B_3^{(1,5)} & 0 & \tau_1 B_1^{(3,6)} & \tau_2 B_2^{(3,6)} & \tau_3 B_3^{(3,6)} & L_5 \\ \tau_1 B_1^{(1,6)} & \tau_2 B_2^{(1,6)} & \tau_3 B_3^{(1,6)} & 0 & \tau_1 B_1^{(3,6)} & \tau_2 B_2^{(3,6)} & \tau_3 B_3^{(3,6)} & L_6 \end{bmatrix} \quad (12)$$

6 段积分划分如图 5 (b) 所示。该方案将特征维数从

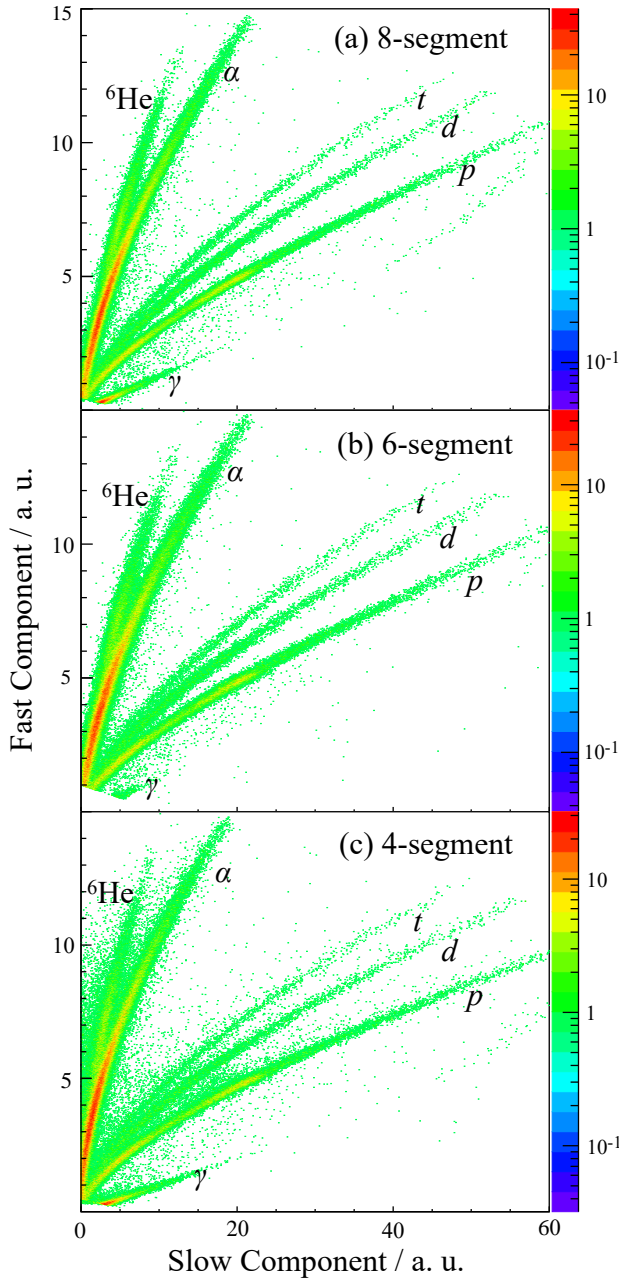


图7 QDC-Matrix 算法在不同积分段数下的粒子鉴别结果对比。(a) 8段积分方案;(b) 6段积分方案;(c) 4段积分方案。

8降至6, 矩阵求逆计算量降低约25%。在本次实验数据中, 由于基线高度平稳, 6段积分方案的带电粒子鉴别能力与8段方案相当, 如图7(b)所示, p 、 d 、 t 、 α 等粒子带清晰分离, 与全波形拟合结果高度一致。该简化方案在显著降低计算复杂度的同时保持了高鉴别性能, 特别适用于中低计数率环境或对实时性有一定要求的在线处理系统。

在计数率更低或基线恢复良好的条件下, 可进一步极简至4段积分方案。此时, 可直接采用基线平均水平

($\text{ave} = S_{\text{baseline}}/L_{\text{baseline}}$) 表征并扣除基线, 从而将波形压缩为3个主体积分段 (S_1 、 S_2 、 S_3), 并构建简化的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} S_1 - \text{ave} \cdot L_1 \\ S_2 - \text{ave} \cdot L_2 \\ S_3 - \text{ave} \cdot L_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 B_1^{(1)} & \tau_2 B_2^{(1)} & \tau_3 B_3^{(1)} \\ \tau_1 B_1^{(1,2)} & \tau_2 B_2^{(1,2)} & \tau_3 B_3^{(1,2)} \\ \tau_1 B_1^{(1,3)} & \tau_2 B_2^{(1,3)} & \tau_3 B_3^{(1,3)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

4段积分划分如图5(c)所示, 该方案将特征维数降至3(扣除基线后矩阵为 3×3), 矩阵求逆计算量显著降低, 鉴别效果如图7(c)所示, 仍能保持一致的 p/α 粒子鉴别能力。在本次实验数据中, 由于基线高度平稳, 三种方案的PID性能相当: p 、 d 、 t 、 α 等粒子带均实现清晰分离, 与全波形拟合结果高度一致。简化方案(6段和4段)在显著降低计算复杂度的同时, 未明显牺牲鉴别能力, 体现了算法对基线稳定的鲁棒性。

通过上述分级简化策略, QDC-Matrix 算法可在不同实验条件(计数率、基线稳定性、计算资源)下灵活权衡鉴别精度与计算效率, 为CsI(Tl)阵列在核物理实验中的实时或准实时粒子- γ 符合测量提供了实用性支持。

4 结论及展望

本文提出了一种基于QDC-Matrix算法的CsI(Tl)探测器带电粒子鉴别技术。该算法以三指数衰减模型为基础, 通过提取有限的积分特征构建线性方程组, 实现快、慢成分幅度的快速求解, 从而完成粒子类型鉴别。

与传统电荷比较法和全波形拟合法相比, QDC-Matrix算法的最大优势在于大幅降低了数据传输与存储需求, 同时保持了较高的粒子鉴别精度。蒙特卡洛区间优化进一步提升了算法对积分参数的鲁棒性, 确保了在实际实验条件下的可靠性和一致性。简化版本(6段、4段)为不同计数率和计算资源场景提供了灵活适配能力。

该算法已在 ${}^9\text{Be} + {}^{\text{nat}}\text{Ir}$ 等熔合蒸发反应实验数据中得到验证, 其鉴别性能与全波形拟合高度吻合, 为CsI(Tl)阵列在高计数率核结构与反应研究中的实时或准实时粒子- γ 符合测量提供了高效、可行的解决方案。未来可进一步探索自适应区间优化、结合机器学习的混合鉴别策略, 以及在更高能量范围和复杂反应通道下的应用扩展。

参考文献

- [1] SKULSKI W, MOMAYEZI M. Nucl Instr and Meth A, 2001, 458(3): 759. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00938-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00938-4).
- [2] FROSIN C, BARLINI S, POGGI G, et al. Nucl Instr and Meth A, 2020, 951: 163018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163018>.

- [3] VOSS P, HENDERSON R, ANDREOIU C, et al. Nucl Instr and Meth A, 2014, 746: 87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.02.006>.
- [4] TERANISHI T, UENO Y, OSADA M, et al. Nucl Instr and Meth A, 2021, 989: 164967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164967>.
- [5] SARANTITES D, HUA P F, DEVLIN M, et al. Nucl Instr and Meth A, 1996, 381(2): 418. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00785-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00785-1).
- [6] SCHEURER J, AICHE M, ALEONARD M, et al. Nucl Instr and Meth A, 1997, 385(3): 501. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)01038-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01038-8).
- [7] SCHEURER J, AICHE M, ALEONARD M, et al. Nuclear Science and Techniques, 2008, 19(6): 354. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-8042\(09\)60018-X](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(09)60018-X).
- [8] AIELLO S, ANZALONE A, CARDELLA G, et al. Nucl Instr and Meth A, 1996, 369(1): 50. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00763-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00763-6).
- [9] SKULSKI W, MOMAYEZI M. Nucl Instr and Meth A, 2001, 458(3): 759. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00938-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00938-4).
- [10] LIU T, SONG H, YU Y, et al. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34(9): 131. DOI: [10.1007/s41365-023-01272-6](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01272-6).
- [11] AMORINI F, BOIANO C, CARDELLA G, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 1772. DOI: [10.1109/TNS.2012.2201499](https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2201499).
- [12] WU H, LI Z, TAN H, et al. Nucl Instr and Meth A, 2020, 975: 164200. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220305969>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164200>.
- [13] LUO D W, WU H Y, LI Z H, et al. Nuclear Science and Techniques, 2021, 32(8): 79. <https://doi.org/10.1007/s41365-021-00917-8>.
- [14] CHONG E K P, ŽAK S H. Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0632>.

Study on Charged-Particle Identification Technique for CsI(Tl) Detectors Based on QDC-Matrix Algorithm

Li Jianhong^{1,2}, Xu Junhong^{1,2}, Fang Yongde^{1,2}, Jia Zihao^{1,2}, Liang Wen^{1,2}, Tan Yuhong^{1,2}, Feng Xingshuo^{1,2},
Li Youyu^{1,2}, SALEH SANUSI^{1,2}, Wang Zhixuan³, Zhang Qianchao³

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: CsI(Tl) detectors are widely employed for charged-particle identification (PID) in nuclear physics experiments owing to their reliable pulse-shape discrimination (PSD) capability. To overcome the limitations of existing digital PID methods—large data volume, high computational complexity, and insufficient real-time performance—this paper proposes a QDC-Matrix-based algorithm. The algorithm is based on the tri-exponential decay model of the CsI(Tl) signal, in which the three exponential terms correspond to the fast scintillation component, the slow scintillation component, and the electronic response component, respectively. By dividing the digitized waveform into multiple integration segments and exploiting the temporal correlation between each segment integral and the tri-exponential function, a system of linear equations is constructed. Solving this system yields the amplitudes of the fast and slow components. Charged-particle identification is then achieved rapidly using the fast-to-slow amplitude ratio, which exhibits a strong dependence on particle species. Unlike conventional approaches that require full waveform data, this method significantly reduces data transmission and storage overhead. Monte Carlo optimization of the integration intervals further ensures discrimination performance comparable to full-waveform fitting across the full energy range. Experimental validation on typical fusion-evaporation reaction data demonstrates that the QDC-Matrix algorithm outperforms the charge-comparison method and achieves results highly consistent with full-waveform fitting, substantially improving particle- γ coincidence statistics. The proposed algorithm provides a new, efficient, and practical solution for high-performance PID in CsI(Tl) detector arrays used in nuclear physics experiments.

Key words: CsI(Tl) detector; charged-particle identification; QDC-Matrix algorithm

Received date: 19 Apr. 2026; **Revised date:** 19 Apr. 2026

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (12275321); National Natural Science Foundation of China (12121005); National Natural Science Foundation of China (12475129);

Corresponding author: Fang Yongde, E-mail: fangyd@impcas.ac.cn