基于CLYC晶体对质子、中子、γ波形的甄别研究

许 浒[1,2] 张祥林[2] 何寻社[2] 胡 光[1] 刘朋波[2] 杨中中[2] 朱伟峰[2]

1（西安交通大学 西安 710049）

2（陕西卫峰核电子有限公司 西安 710075）

摘要 本文研究了$Cs_2LiYCl_6:Ce^{3+}$（CLYC）晶体对21 MeV质子的响应特性及其与中子、γ射线的波形甄别能力。实验利用串列加速器产生质子，结合Am-Be中子源和^{137}Cs、^{60}Co γ源，采集了三种粒子在CLYC晶体中产生的波形。采用电荷比较法进行数字化波形分析，通过优化积分时间窗口，实现了质子与中子（品质因子Figure of Merit，FOM=1.86）、质子与γ（FOM=1.0）以及质子、中子与γ混合场（中子/γ FOM=2.0，质子/中子FOM=1.54，质子/γ FOM=1.45）的有效甄别。研究结果表明，CLYC晶体中质子事件的闪烁波形包含芯能级发光（Core-to-valence Luminescence，CVL）、Ce^{3+}发光、V_k中心发光和自捕获受激发射（Self-trapped Stimulated Emission，STE）4种成分，其中，CVL成分衰减时间约为3.8 ns。该研究证实CLYC晶体具备同时对质子、中子和γ射线进行探测与识别的能力，为其在空间辐射探测等复杂环境中的应用提供了重要依据。

关键词 CLYC晶体，波形甄别，电荷比较法，质子，中子

中图分类号 TL81

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250387

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250387

Discrimination of proton, neutron and γ pulse shape by CLYC scintillator

XU Hu[1,2] ZHANG Xianglin[2] HE Xunshe[2] HU Guang[1] LIU Pengbo[2]
YANG Zhongzhong[2] ZHU Weifeng[2]

1(*Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an 710049*, *China*)

2(*Shaanxi Weifeng Instrument Inc.*, *Xi'an 710075*, *China*)

Abstract **[Background]** $Cs_2LiYCl_6:Ce^{3+}$ (CLYC) is a promising inorganic scintillator with excellent neutron/gamma pulse shape discrimination capability. **[Purpose]** This study aims to investigate the response characteristics of $Cs_2LiYCl_6:Ce^{3+}$(CLYC) crystals to 21 MeV protons and their pulse shape discrimination (PSD) capability for protons, neutrons, and gamma rays. **[Methods]** Digital waveforms generated by proton irradiation from a tandem accelerator, alongside neutrons from an Am-Be source and gamma rays from ^{137}Cs and ^{60}Co sources, were acquired. Then, the charge comparison method with optimized integration time windows was employed to achieve effective discrimination between proton and neutron events with figure of merit (FOM) of 1.86, between proton and gamma events with FOM of 1.0, and in a mixed field of protons, neutrons, and gamma rays with FOM of 2.0 for neutron/gamma, 1.54 for proton/neutron, and 1.45 for proton/gamma. **[Results]** The experimental results indicate that the

陕西省重点研发项目(No.2024PT-ZCK-78)资助

第一作者：许浒，男，1977年出生，2022年于西安交通大学获博士学位，研究员，主要从事核技术和核辐射仪表研究，E-mail：xu_hu@xjtu.edu.cn

收稿日期：2025-10-20，修回日期：2025-12-08

Supported by Shaanxi Provincial Key Research and Development Program (No.2024PT-ZCK-78)

First author: XU Hu, male, born in 1977, graduated from Xi'an Jiaotong University with a doctoral degree in 2022, professor, focusing on nuclear technology and nuclear radiation instrumentation, E-mail: xu_hu@xjtu.edu.cn

Received date: 2025-10-20, revised date: 2025-12-08

scintillation pulse shape induced by protons in CLYC crystals comprises four decay components: core-to-valence luminescence (CVL, ~3.8 ns), Ce^{3+}-related emission, V_k center-related emission, and self-trapped stimulated emission (STE). **[Conclusions]** Results of this study confirm the capability of CLYC crystals for simultaneous detection and discrimination of protons, neutrons, and gamma rays, supporting their potential application in complex radiation environments such as space radiation detection.

Key words CLYC crystal, Pulse shape discrimination, Charge comparison method, Proton, Neutron

$Cs_2LiYCl_6:Ce^{3+}$（CLYC）晶体是一种性能优异的具有中子、γ双探测能力的钾冰晶石类无机闪烁晶体[1-3]，CLYC富含的^{6}Li核素具有巨大的热中子俘获截面，通过^{6}Li(n,α)^{3}H反应可高效探测热中子，其高密度的氯元素对快中子敏感，并能通过(n,p)和(n,α)等反应进行探测[4-6]，此外，其重晶格结构对γ射线也具备良好的阻止本领和能量分辨率[7-9]。在中子和γ射线激发下，晶体发光衰减时间快慢存在显著差异，使得CLYC晶体具有极佳的中子/γ波形甄别能力[10-12]。目前，CLYC晶体对中子和γ射线的响应已有较深入的研究[13-15]，并且利用CLYC晶体制作的γ谱仪和快中子谱仪也均有相关报道[16-18]。这种能同时测量多种粒子的晶体材料对辐射测量设备的小型化和便携化很有帮助，特别是在空间辐射探测领域优势明显，可极大减小探测设备的体积和重量[19-20]。空间辐射环境复杂，除了中子和γ射线，还有其他多种带电粒子，研究CLYC对其他带电粒子的响应对该晶体在空间环境下的应用十分必要。为了进一步研究CLYC晶体对质子的响应，本文在某串列加速器上获得了21 MeV能量质子入射CLYC晶体的数字化波形，研究了CLYC晶体在21 MeV质子激发下各发光成分的衰减时间，采用电荷比较法对质子、中子和γ原始波形进行了甄别。

1 波形采集

本文使用的CLYC晶体由北京玻璃研究院采用石英坩埚下降法生长而成，Ce^{3+}掺杂浓度为0.5 mol%，天然^{6}Li富含浓度约7%，晶体发光波长集中在360~440 nm，峰值波长374 nm和400 nm，662 keV下的γ能量分辨率为4.5%。使用了两种具有不同尺寸和封装方式的CLYC晶体：一种尺寸为直径25.4 mm、厚度15 mm的圆柱体，密封在以石英玻璃为光学输出窗口的铝盒中，用来采集中子和γ波形；一种尺寸为直径20 mm、厚度8 mm的圆柱体，没有作密封处理，用来采集质子波形（质子射程短，若密封，铝会阻挡质子入射到晶体中），但CLYC晶体在空气中易潮解，会在晶体表面形成盐溶液薄膜，因此在每次试验前会对晶体表面进行抛光处理。表1列出了所使用的两种CLYC晶体的相关参数。

表1 两种CLYC晶体的相关参数
Table 1 Relevant parameters of two types of CLYC crystals

晶体尺寸 Crystal size	密封处理 Sealing treatment	采集波形类别 Acquired waveform	射线源 Radiation source
Ø25.4 mm×15 mm	铝盒密封 Aluminum encapsulation	中子、γ射线 Neutrons, γ rays	Am-Be，^{137}Cs，^{60}Co
Ø20 mm×8 mm	无 None	质子 Protons	串列加速器 Tandem accelerator

使用ET 9813QB型光电倍增管与CLYC晶体耦合，将晶体发光转换为电信号。9813QB光电倍增管增益高（达10^7量级），在CLYC发光光谱范围内有较高的光电转换效率，其阳极信号直接接入泰克DPO7104示波器信道，用示波器记录下单次事件的数字化信号波形。示波器工作在FastFrame模式，单次事件的采样率设置为1 G·s^{-1}，记录长度为2 μs。实验中分别采集了质子、中子和γ三种粒子入射到CLYC晶体中产生的数字化波形：能量为21 MeV的单能质子由某串列加速器产生，直接照射CLYC晶体；γ射线由^{137}Cs和^{60}Co辐射源提供；中子是在Am-Be源的中子/γ混合场中通过波形甄别方法提取得到的。需要说明的是，采集中子数字化波形时，将光电倍增管和CLYC晶体放在了聚乙烯环形套筒中，并且在晶体前放置2.5 cm厚的铅砖和2.5 cm厚的聚乙烯砖。采集γ和质子波形时，无需屏蔽。图1是中子波形采集实验的设置示意图。图2是采集质子的实验设置示意图，左图为质子加速器，探测器正对出束口，放置在图中蓝色水箱部位。

2 波形甄别

电荷比较法是甄别CLYC晶体波形的常用方

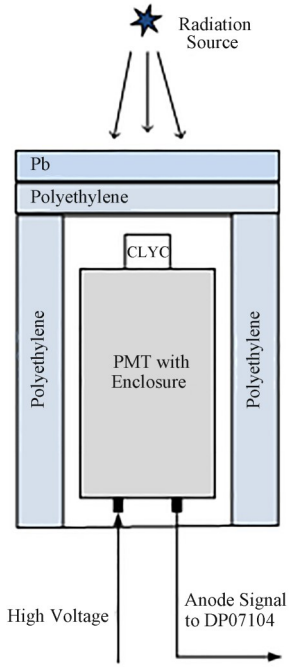

图1 中子数字化波形采集实验设置示意图
Fig.1 Configuration of the neutron digitized waveform acquisition experimental setup

法，本文利用电荷比较法对CLYC数字化信号进行离线甄别。该方法一般按照以下步骤进行：

1）确定波形时间零点，一般取上升沿处峰值的20%对应时刻为时间零点。

2）计算积分时间窗W_1、W_2的积分量和总积分量。积分时间窗W_1、W_2的起始点按如下方式定义：W_1的起始点为波形时间零点，W_2的起始点为W_1结束点的后一点。

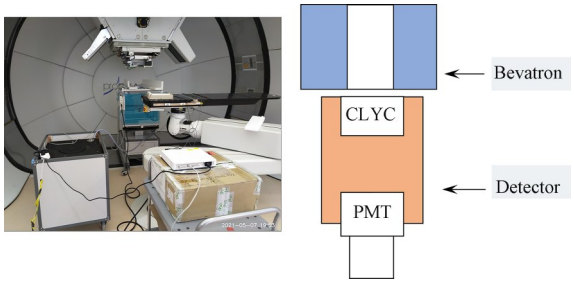

图2 质子采集装置布局示意图（彩图见网络版）
Fig.2 Schematic diagram of the proton collection device layout (color online)

3）计算甄别参数，以甄别参数为纵轴、总积分量为横轴绘出粒子事件甄别参数的二维分布，以甄别参数为横轴、粒子事件计数为纵轴绘出粒子事件甄别谱。甄别参数由W_1、W_2的积分量的比值构成，本文取（W_1积分量/W_2积分量）为甄别参数。

4）计算品质因子（Figure of Merit，FOM）。FOM是评价波形甄别性能的参量，FOM值越大，晶体的波形甄别能力越强。FOM由式（1）定义：

$$\mathrm{FOM}=\frac{D}{\mathrm{FWHM}_1+\mathrm{FWHM}_2} \tag{1}$$

式中：D为甄别谱上两个峰之间的距离；FWHM_1为第一个粒子事件峰的半高宽；FWHM_2为第二个粒子事件峰的半高宽。一般情况下，FOM的计算是根据对两个粒子事件峰的双高斯拟合结果来求得的。FOM值与甄别参数相关，由积分时间窗W_1和W_2来决定，而W_1和W_2的组合有很多种，需要遍历所有组合来获得最佳的FOM[12]。

2.1 质子和中子的波形甄别

在Am-Be源上采集的是中子/γ混合波形，本文采用电荷比较法，共甄别出1 696个中子事件。在某串列加速器上共获得6 294个质子事件波形，将中子事件波形和质子事件波形混合到一起，按照电荷比较法的甄别流程和优化方法进行甄别。当积分时间窗W_1取0~10 ns、积分时间窗W_2取11~1 801 ns时，可获得最优的FOM，为1.86。图3是质子和中子的甄别结果，图3（a）是甄别参数随总积分量的散点分布，即甄别参数的二维分布，图3（b）是粒子事件计数随甄别参数的分布，即事件甄别谱。由于质子和中子在CLYC中产生的闪烁光脉冲，其波形轮廓（形状）是不同的。由质子产生的光脉冲，其衰减速度快，慢成分比例低。中子产生的光脉冲，其衰减速度相对较慢，慢成分比例较高，通过电荷比较法对CLYC晶体的数字化信号进行甄别。可看到，CLYC晶体可将质子和中子有效地甄别开，甄别参数大于0.021可判断为质子，小于0.021可判断为中子。

2.2 质子和γ的波形甄别

将^{137}Cs和^{60}Co源上采集到的7 211个γ事件波形与某串列加速器上采集到的6 294个质子事件波形混合到一起，按照电荷比较法的甄别流程和优化方法进行波形甄别。当积分时间窗W_1取0~75 ns、积分时间窗W_2取76~2 000 ns时，可获得最高的FOM，为1.0。图3是质子和γ的甄别结果，图4（a）是甄别参数的二维分布，图4（b）是事件甄别谱。可看到，当甄别参数大于0.155可判断为γ事件，小于0.155可判断为质子事件。

2.3 质子、中子和γ的波形甄别

通常情况下，存在中子的环境一般都伴随着γ射线，研究CLYC晶体对质子事件波形和中子γ混合场事件波形的甄别能力十分必要。将Am-Be源采集到的4 660个中子/γ混合事件波形和某串列加速器上采集到的6 294个质子事件波形混合在一起进行波形甄别。从质子与中子、质子与γ的甄别结果

来看，质子的甄别参数介于中子和γ之间，比中子的甄别参数大、比γ的甄别参数小。在选择积分时间窗口时，以中子和γ能最大限度分开为标准，即保证Am-Be源的中子和γ间的FOM最大。此时，积分时间窗 W_1 取0~75 ns，积分时间窗 W_2 取76~1 750 ns。

图5是CLYC晶体对三种事件的甄别结果，图5(a)是甄别参数的两维分布，图5(b)是事件甄别谱。中子和γ之间的FOM为2.0，质子和中子之间的FOM为1.54，质子和γ之间的FOM为1.45。

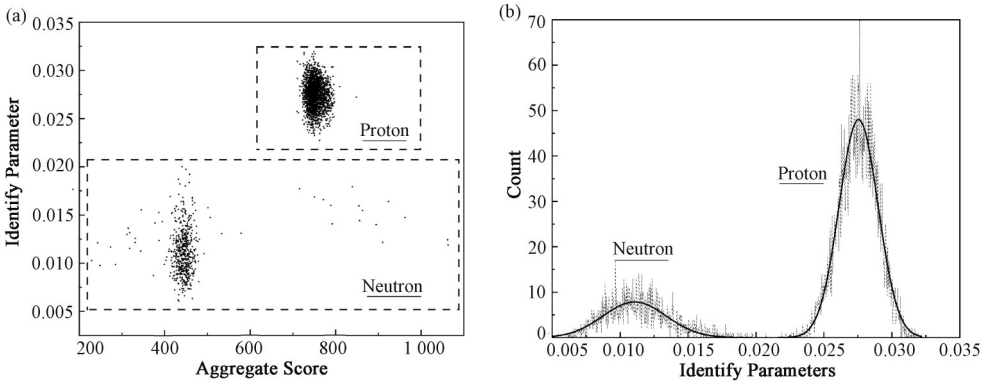

图3 CLYC晶体对质子和中子的甄别结果 (a) 甄别参数的二维分布，(b) 事件甄别谱
Fig.3 Discrimination results of CLYC crystals for proton and neutron
(a) 2D distribution of discrimination parameters, (b) Discrimination spectrum

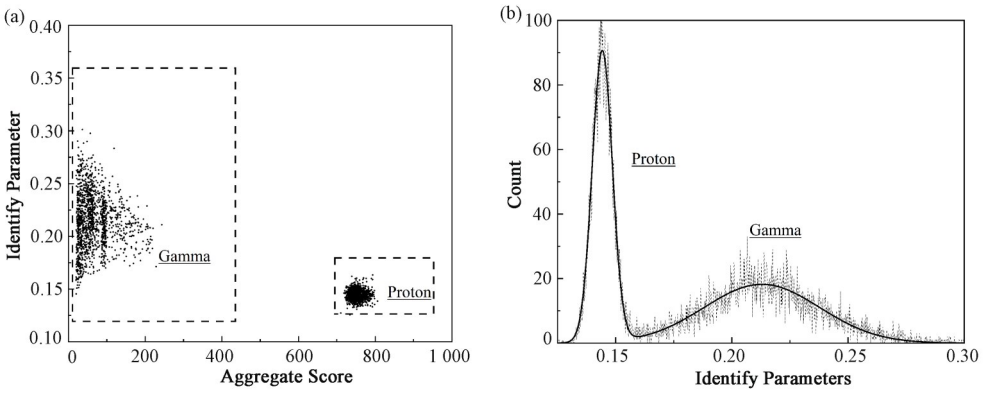

图4 CLYC晶体对质子和γ的甄别结果 (a) 甄别参数的二维分布，(b) 事件甄别谱
Fig.4 Discrimination results of CLYC crystals for proton and gamma
(a) 2D distribution of discrimination parameter, (b) Discrimination spectrum

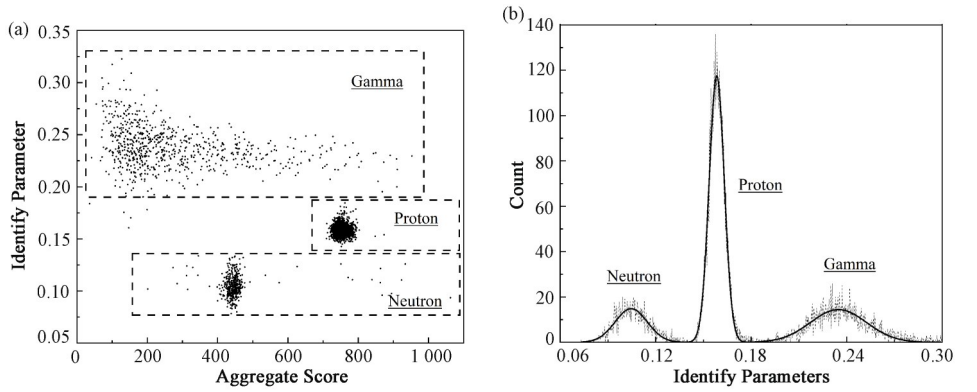

图5 CLYC晶体对质子、中子和γ的甄别结果 (a) 甄别参数的二维分布，(b) 事件甄别谱
Fig.5 Discrimination results of CLYC crystals for proton, neutron and gamma
(a) 2D distribution of discrimination parameter, (b) Discrimination spectrum

表2列出了不同粒子事件之间的甄别结果及最优参数选择。从质子和γ之间的甄别结果来看，质子和与^{137}Cs、^{60}Co源上采集的γ的甄别品质因子比与Am-Be源上的γ的甄别品质因子高，这是因为在采集Am-Be事件波形时，在CLYC晶体前增加了2.5 cm厚的铅和2.5 cm厚的聚乙烯，降低了探测器记录到的低能段γ射线。

表2　不同粒子事件之间的甄别结果
Table 2　Discrimination results between different particle events

粒子种类 Particle species	射线源 Radiation source	最优参数 Optimal parameters	FOM
质子、中子 Protons, neutrons	加速器、Am-Be源 Accelerator, Am-Be source	W_1: 0~10 ns；W_2: 11~1 801 ns	1.86
质子、γ Protons, gamma rays	加速器、^{137}Cs ^{60}Co Accelerator, ^{137}Cs ^{60}Co	W_1: 0~75 ns；W_2: 76~2 000 ns	1.0
质子、中子、γ Protons, neutrons, gamma rays	加速器、Am-Be源 Accelerator, Am-Be source	W_1: 0~75 ns；W_2: 76~1 750 ns	2.0（中子/γ）2.0 (neutron/gamma) 1.54（质子/中子）1.54 (proton/neutron) 1.45（质子/γ）1.45 (proton/gamma)

2.4　误差分析

在多粒子的混合场中，虽然中子/γ的FOM值保持了2.0的优秀水平，但质子作为“中间体”与两者（FOM=1.54和1.45）存在显著分布重叠。这将在二维PSD散点图上形成一个介于中子和γ之间的“质子桥”，极大地增加了将质子错误归类到中子或γ区域的可能性，反之亦然，中子或γ事件也可能被误判为质子。

从甄别谱图可以看出，甄别谱形为高斯分布，其半高宽与粒子事件计数的标准差之间具有固定的关系：FWHM=2.35σ。谱图越宽，标准差σ越大，对于给定的置信度和甄别参数阈值，错判的误差越大。从谱图3可以看出，如果仅甄别中子和质子，则甄别参数阈值均在3σ之外，因此，误差小于0.3%。如果同时甄别三种粒子，从图5可以看出，对于γ谱图，甄别参数阈值约为2.35σ，误差约为2%，对于质子和中子谱图，误差小于2%。

2.5　波形分析

CLYC晶体受到辐射时产生的荧光强度与辐射能量成正比，经过后续电路处理后的脉冲信号幅度也与能量成很好的线性关系，但是经过幅度归一化处理后的波形形态主要与荧光衰减常数（τ）有关，衰减常数主要与辐射种类有关。粒子入射到CLYC晶体中的发光波形与不同发光成分的衰减时间及所占比重有关，而晶体的闪烁发光机制决定了不同的发光成分。图6是质子、中子、γ三类事件入射到CLYC晶体中的平均波形，已按照峰值幅度做了归一化处理。从波形的上升沿来看，质子波形的上升沿与γ波形类似，在几个纳秒内达到峰值；从下降沿来看，质子也具有超快的发光成分，但后沿的拖尾要比γ的长。

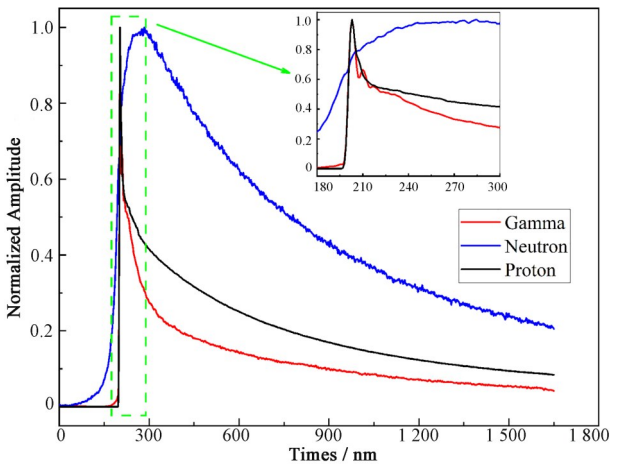

图6　质子、中子、γ的归一化波形（彩图见网络版）
Fig.6　Normalized waveform of proton, neutron and gamma (color online)

根据文献[12，15−17]，粒子入射到Ce^{3+}掺杂的CLYC晶体，一般有4种闪烁发光机制：Ce^{3+}直接捕获电子-空穴对（简称Ce^{3+}）、V_k中心形成及电子扩散（简称V_k）、自捕获受激发射（Self-trapped Stimulated Emission，STE）和芯能级发光（Core-to-valence Luminescence，CVL）。CLYC晶体受到电离辐射后，电子从价带激发到导带，形成电子-空穴对。若Ce^{3+}离子直接将电子-空穴对捕获，会导致4*f*-5*d*能级的激发-发光，该过程具有约几十纳秒的发光衰减时间。若价带中的空穴被两个相邻的Cl^-捕获形成V_k中心，热激发会引起V_k中心的迁移，最终被Ce^{3+}离子捕获形成Ce^{4+}或Ce^{3+}-V_k络合物，若V_k中心再捕获自由电子，空穴与电子的复合会激发Ce^{3+}发光，该过程的发光时间与Ce^{3+}的激发状态及V_k中心的迁移速率有关。若V_k中心迁移过程中，从导带中自捕获一个电子，电子与空穴复合而发出荧光，该过程称为STE，发光衰减时间在μs量级。若内层电子被高能

光子直接激发至导带，形成的空穴具有极短的寿命，价带的电子迅速与空穴符合发光，该过程称为CVL，具有超快的发光衰减时间。

γ入射CLYC晶体，同时存在4种发光机制，而中子入射CLYC晶体，只存在V_k和STE两种闪烁机制。从图5可以看到，质子的波形与γ波形类似，也具有CVL超快发光成分，可利用波形拟合法对质子波形下降沿进行四指数拟合：

$$I_{\text{proton}} = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} + A_3 e^{-t/\tau_3} + A_4 e^{-t/\tau_4} \quad (2)$$

式中：I_{proton}是质子的峰值后沿波形；τ_1、τ_2、τ_3、τ_4分别对应CVL、Ce^{3+}、V_k、STE 4种闪烁机制引起的发光衰减时间；A_1、A_2、A_3、A_4是相对应各成分的最大值。各成分所占比重可表示为：

$$R_i = \frac{\int A_i e^{-t/\tau_i}}{\int I_{\text{proton}}},\ i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

表3列出了质子波形的拟合结果，为了便于对比，表3也列出了γ和中子事件引起的各成分的发光衰减时间和各成分所占比重。质子入射CLYC晶体，同时具有4种闪烁发光机制，与γ射线所不同的是，质子引起的Ce^{3+}发光比重变少，其他三种（CVL、V_k、STE）发光比重增大；CVL和V_k的发光衰减时间变大，STE的衰减时间变小。

表3 CLYC晶体的质子、中子、γ波形拟合结果

Table 3 Waveform fitting results for protons, neutrons, and gamma rays in the CLYC crystal

粒子种类	CVL		Ce^{3+}		V_k		STE	
Particle species	R_1	τ_1 / ns	R_2	τ_2 / ns	R_3	τ_3 / ns	R_4	τ_4 / ns
质子 Protons	0.005 6	3.8	0.019 6	51	0.501 3	470	0.473 5	3 100
γ射线 Gamma rays	0.003 9	2	0.098 5	50	0.432 8	420	0.464 8	3 400
中子 Neutrons	—	—	—	—	0.303 8	390	0.696 2	1 500

3 结语

CLYC晶体可以同时探测中子、质子和γ射线。本文结果表明，CLYC晶体不仅对中子和γ有优异的波形甄别能力，对质子、中子、γ混合场也具有甄别能力，甄别参数小于0.135可判断为中子事件，甄别参数介于0.135~0.180之间可判断为质子事件，甄别参数大于0.180可判断为γ事件。质子入射CLYC晶体，会同时引起4种闪烁机制，其中CVL快发光成分衰减时间约为3.8 ns。

作者贡献声明 许浒负责章节架构及撰写与修改；张祥林和何寻社负责总体指导、技术支持、审核与修改；胡光和刘朋波负责技术支持、审核与修改；杨中中负责调研与修改；朱伟峰负责技术支持与修改。

参考文献

1 黄广伟, 周春芝, 许智宁, 等. CLYC探测器n/γ聚类甄别方法研究[J]. 原子能科学技术, 2018, **52**(8): 1481－1486. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0708.
HUANG Guangwei, ZHOU Chunzhi, XU Zhining, *et al*. Study on n/γ discrimination method based on clustering analysis for CLYC detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, **52**(8): 1481－1486. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0708.

2 李欣月, 杨剑, 曾国强, 等. 基于串联读出电路的探测器位置识别方法研究[J]. 核技术, 2025, **48**(6): 060008. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2025. hjs. 48.240345. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240345.
LI Xinyue, YANG Jian, ZENG Guoqiang, *et al*. Identification method of detector position based on serial readout circuit[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(6): 060008. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240345. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240345.

3 董浪, 王明, 孙甜甜, 等. 基于Geant4的微型透射式X射线管中背散射电子对出射光束影响[J]. 核技术, 2024, **47**(4): 040401. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs. 47. 040401.
DONG Lang, WANG Ming, SUN Tiantian, *et al*. Influence of backscattered electrons on exit beam of miniature transmission X-ray tube using Geant4[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(4): 040401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040401.

4 赵美丽, 孙涛峰, 高璠, 等. 大尺寸Cs_2LiYCl_6:Ce晶体的制备与性能研究[J]. 人工晶体学报, 2025, **54**(4): 553－559. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2024.0210.
ZHAO Meili, SUN Taofeng, GAO Fan, *et al*. Preparation and properties of large size Cs_2LiYCl_6: Ce crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2025, **54**(4): 553－559. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2024.0210.

5 钟超, 刘旭睿, 林晨曦, 等. 基于脉冲成形的中子-伽马甄别技术研究[J]. 核电子学与探测技术, 2025, **45**(8): 1163－1172. DOI: 10.20173/j.cnki.ned.20250721.005.

ZHONG Chao, LIU Xurui, LIN Chenxi, *et al*. Development of neutron-gamma discriminator based on pulse shaping[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2025, **45**(8): 1163 – 1172. DOI: 10.20173/j.cnki.ned.20250721.005.

6 张翔宇, 韩纪锋, 曲国峰, 等. 测量闪烁体荧光衰减特性的TCSPC系统及优化研究[J]. 半导体光电, 2025, **46**(4): 638 – 644. DOI: 10.16818/j.issn1001-5868.20250222003.
ZHANG Xiangyu, HAN Jifeng, QU Guofeng, *et al*. Time-correlated single photon counting-based system for measuring fluorescence decay characteristics of scintillators and optimization research[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, **46**(4): 638 – 644. DOI: 10.16818/j.issn1001-5868.20250222003.

7 刘倩. CLYC探测器n/γ实时甄别技术研究[D]. 北京: 军事科学院, 2025. DOI: 10.27193/d. cnki. gjsky. 2025.000146.
LIU Qian. Research on n/γ real-time discrimination technology of CLYC detector[D]. Beijing: Military Academy of Sciences, 2025. DOI: 10.27193/d.cnki.gjsky.2025.000146.

8 李奎念, 张显鹏, 张美, 等. 用Fisher线性判别方法甄别Cs_2LiYCl_6:Ce^{3+}晶体的n/γ波形[J]. 原子能科学技术, 2017, **51**(11): 2069 – 2074. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.11.2069.
LI Kuinian, ZHANG Xianpeng, ZHANG Mei, *et al*. n/γ pulse shape discrimination in Cs_2LiYCl_6:Ce^{3+} crystal using fisher linear discriminant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, **51**(11): 2069 – 2074. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.11.2069.

9 周悦, 于华伟, 王猛, 等. 基于CLYC探测器的可控源中子孔隙度测井数值模拟研究[J]. 核技术, 2021, **44**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501.
ZHOU Yue, YU Huawei, WANG Meng, *et al*. Numerical simulation of controllable source neutron porosity logging based on CLYC detector[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(4): 040501. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2021. hjs. 44.040501.

10 Li K N, Zhang X P, Gui Q, *et al*. Characterization of the new scintillator Cs_2LiYCl_6: Ce^{3+} [J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **29**(1): 11. DOI: 10.1007/s41365-017-0342-4.

11 曾国强, 欧阳晓平, 喻明福, 等. 手持式单板500 MHz采样率数字化多道设计[J]. 核技术, 2017, **40**(3): 030401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030401.
ZENG Guoqiang, OUYANG Xiaoping, YU Mingfu, *et al*. Design of handheld 500-MHz digital multi-channel analyzer on single board[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(3): 030401. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2017. hjs. 40.030401.

12 金东升. 基于CLYC探测器的高速核信号采集系统设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2020. DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000808.
JIN Dongsheng. Design of high speed nuclear signal acquisition system based on CLYC detector[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000808.

13 黄广伟, 周春芝, 肖无云, 等. CLYC探测器n/γ甄别方法比较[J]. 核电子学与探测技术, 2018, **38**(3): 335 – 340. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2018.03.006.
HUANG Guangwei, ZHOU Chunzhi, XIAO Wuyun, *et al*. Comparison of n/γ discrimination methods with CLYC detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2018, **38**(3): 335 – 340. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2018.03.006.

14 温伟伟, 程金星, 吴友朋, 等. CLYC中子-γ复合测量仪设计[J]. 核电子学与探测技术, 2021, **41**(1): 132 – 136. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.01.025.
WEN Weiwei, CHENG Jinxing, WU Youpeng, *et al*. Design of n- γ composite measurement with CLYC detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2021, **41**(1): 132 – 136. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2021.01.025.

15 姚付良. 基于CLYC的中子-γ复合探测电子学系统设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
YAO Fuliang. The design of neutron γ's combined detecting electronics system on the basis of CLYC[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.

16 黄坤翔. 基于CLYC探测器的n/γ甄别系统研究与实现[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024. DOI: 10.27415/d.cnki.gxngc.2024.000931.
HUANG Kunxiang. Research and implementation of n/γ discrimination system based on CLYC detector[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024. DOI: 10.27415/d. cnki. gxngc. 2024.000931.

17 Qin J G, Lai C F, Lu X X, *et al*. Characterization of a ^{6}Li enriched Cs_2LiYCl_6:Ce scintillator and its application as a γ -ray detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **886**: 55 – 60. DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.053.

18 Mcdonald B S, Myjak M J, Zalavadia M A, *et al*. A wearable sensor based on CLYC scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2016, **821**: 73–80.

19 D'Olympia N, Chowdhury P, Lister C J, *et al*. Pulse-shape analysis of CLYC for thermal neutrons, fast neutrons, and gamma-rays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, **714**: 121–127. DOI: 10.1016/j.nima.2013.02.043.

20 Smith M B, Achtzehn T, Andrews H R, *et al*. Fast neutron spectroscopy using Cs_2LiYCl_6:Ce (CLYC) scintillator[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, **60**(2): 855–859. DOI: 10.1109/tns.2012.2219068.