



海纳百川 有容乃大

2025年CSNS反角白光中子源(第九届)用户研讨会, 安徽六安, 2025.7

基于CLYC的宽量程中子探测研究

韩纪锋

四川大学

2025年7月24日



汇报内容

一、背景

二、中子伽马多模探测

三、基于白光源的宽能区中子探测

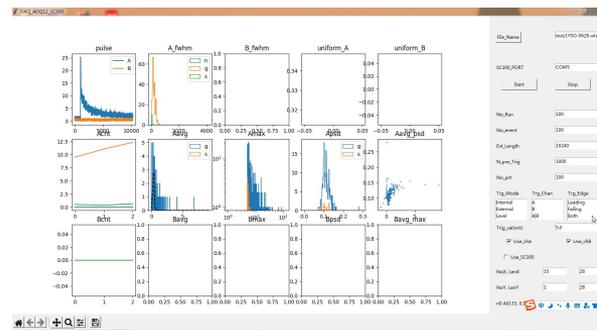
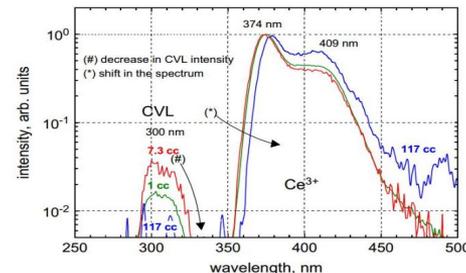
四、总结和展望





一、背景

- 中子伽马多模探测, CLYC/CLLB
 - 晶体材料, 国内可制备
 - 混合辐射场监测、辐射剂量与防护...
 - 高速波形采样
- 特点
 - 热中子高效探测, ^6Li 富集度95%
 - 良好能量分辨, $\sim 3\%-5\%$ @662 keV
 - 良好PSD能力
 - 实现快中子探测, C, H
- 高速数据采集
 - 基于python的DAQ、数据处理程序
 - 同机器学习相结合

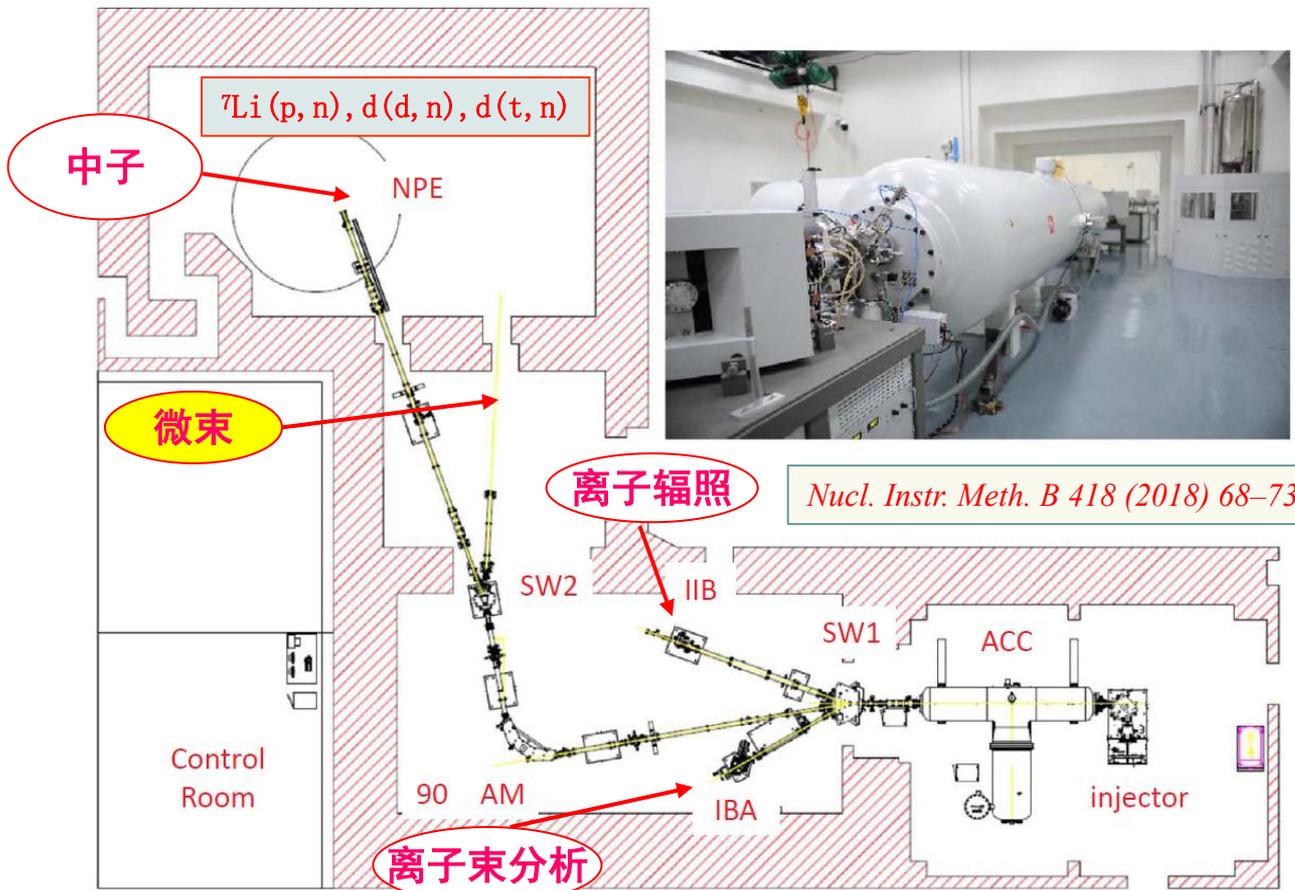


川大加速器研究平台



四川大学

SICHUAN UNIVERSITY



Nucl. Instr. Meth. B 418 (2018) 68–73

基于加速器产生单能中子，用于探测器性能研究

- 离子辐照
- 离子束分析
- 微束
- 原子分子碰撞
- 核物理

产生从H到U的几乎所有离子



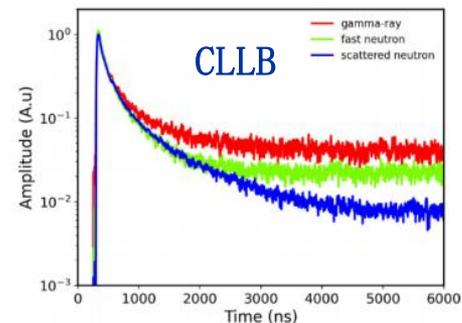
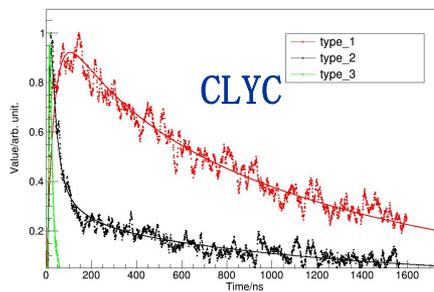
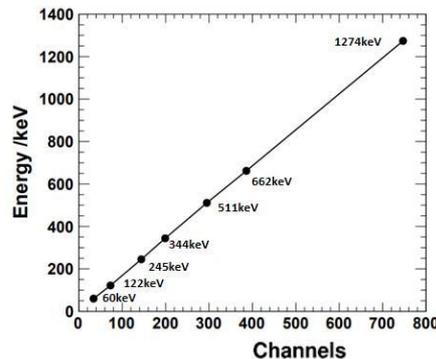
CLYC/CLLB晶体信号特征

● CLYC

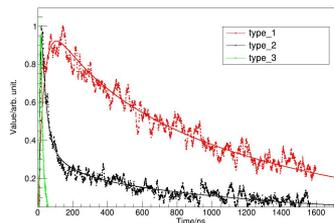
- 光产额较高, 20,000ph/MeV
- 能量分辨5%@662keV
- 信号较快
- 中子伽马差异显著
- 中子拖尾很大, 伽马快衰减

● CLLB

- 光产额很高, 60,000ph/MeV
- 信号较慢, 拖尾很大
- 中子伽马差异小
- 伽马衰减更慢

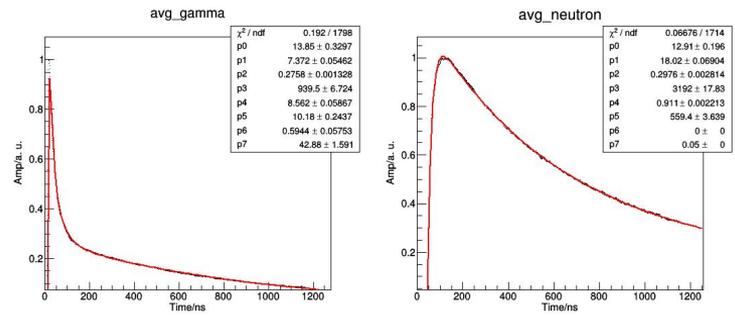


CLYC信号衰减时间



$$Y = -A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + A_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} + A_4 e^{-\frac{t}{\tau_4}}$$

- 多指数拟合4种成分
 - 平均信号扣除噪声干扰
- 中子信号特征
 - 信号很宽
 - 上升沿较慢、下降沿很慢
 - 下降沿缺少10、43ns成分，n-g甄别依据
- 问题
 - 拟合自由度大，结果不唯一
 - 用2000个脉冲的平均值进行拟合，降低噪声
 - 初值选择很重要



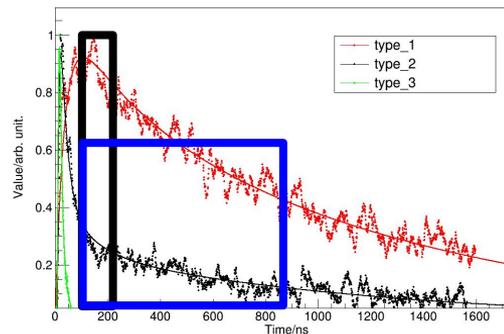
	Tau_1	Tau_2	Tau_3	Tau_4
Gamma	7.35	918	10.2	43
Neutron	17.8	3193	570	-

n-γ 甄別

- 中子信号特征
 - 信号很宽，上升沿较慢、下降沿很慢
 - 下降沿无10-40ns成分，n/g甄別依据
- 信号PSD方法
 - 快窗、慢窗比值，信号衰减速率
- 结果
 - CLYC甄別优度FOM值2.3，极好
 - CLLB的FOM值为1.3，较好

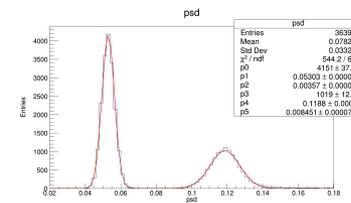
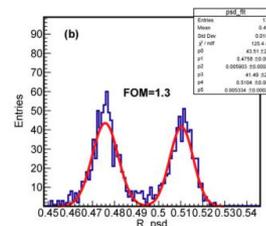
$$FOM = \frac{|\mu_n - \mu_g|}{(\sigma_n + \sigma_n) * 2.355}$$

Nucl. Inst. Meth. A 1028 (2022) 166328

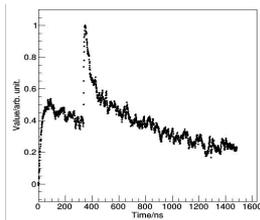


$$psd = \frac{\sum (0,24ns)}{\sum (0,500ns)}$$

psd分母区间变化影响较小

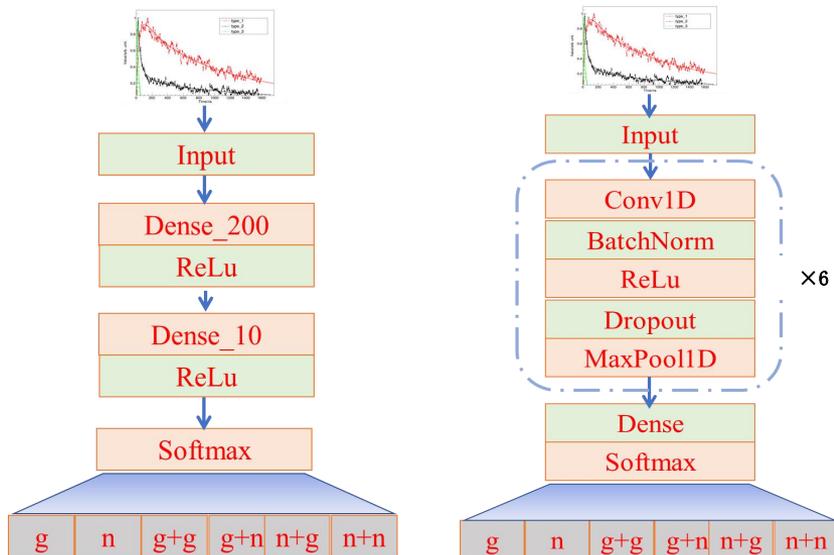


堆积脉冲甄别-模拟信号



- 计数率较高，存在信号堆积
 - 全谱数据输入（归一化）
 - 6种信号类型：n, g, n+g, n+n, g+g, g+n
- 构建神经网络
 - 全连接网络FCNN，约400k参数
 - 卷积网络CNN，约4k参数
- 数据
 - 相同数据源
 - 训练集64%
 - 验证集16%
 - 测试集20%

- 直接利用n/g脉冲叠加生成堆积脉冲
- 标签容易获得





堆积脉冲甄别-结果

● 总体识别准确率

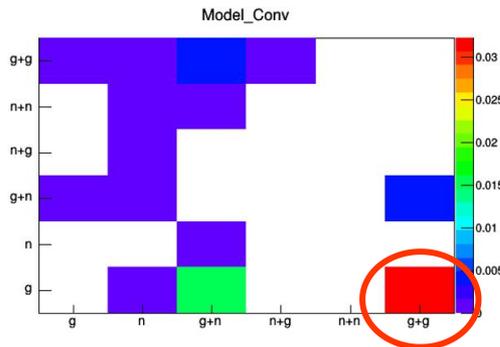
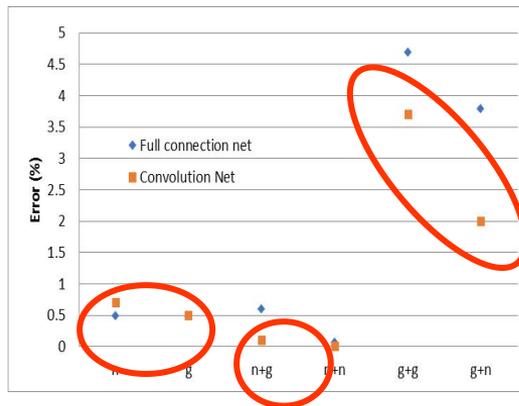
- FCNN网络：98.7%；CNN网络：99.2%
- 各类波形的误判率均小于5%
- CNN网络性能更好，参数更少，更适合

● 误判率

- n+n、n+g误判率几乎0%；
- n、g误判率小于1%；
- g+n误判率2%；
- g+g误判率3.6%；

● 误判原因

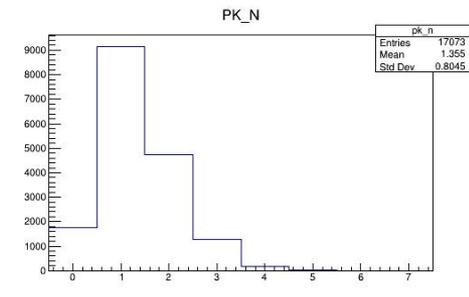
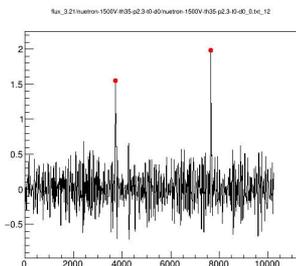
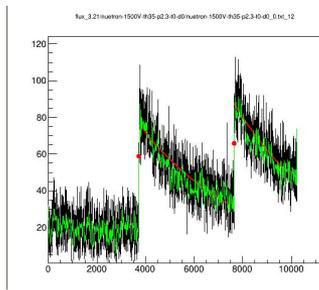
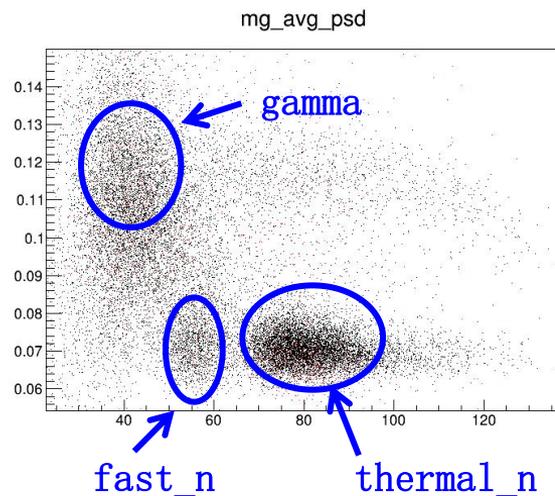
- g、n幅度较小时，易被噪声干扰





堆积脉冲实验

- 基于加速器单能中子源
 - 中子能量1.5MeV，产额约1E9
 - 实现了堆积脉冲psd甄别
 - 黑色：长堆积， $>500\text{ns}$
 - 红色：短堆积， $\leq 500\text{ns}$
- 特征
 - 基线无法回0，涨落提升约10倍

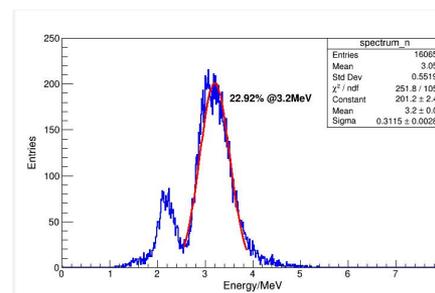
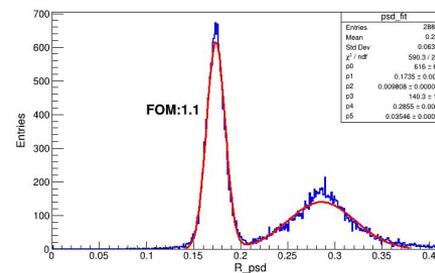
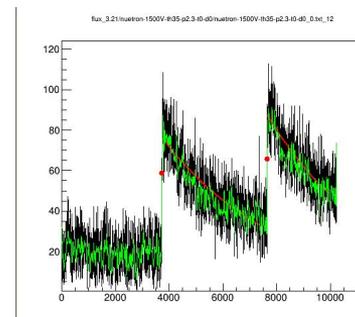
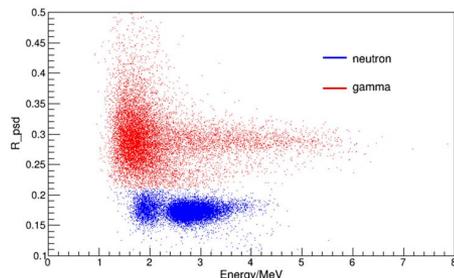


实现基于上升沿的寻峰算法、堆积脉冲ng甄别



堆积脉冲-能量和FOM值

- 提取单个脉冲的种类、能量
 - 仅能利用一部分脉冲波形
 - 热中子峰相对宽度为22%，差于未堆积的2%
 - FOM值1.1，差于未堆积的2.0
 - 基线rms约12mV，远大于未堆积1mV
- 拓展CLYC至高计数率场景
 - CLYC实测脉冲计数率3E6 cps
 - 实际粒子通量约1E8-1E9 cps



堆积脉冲甄别-ANN

● 监督学习

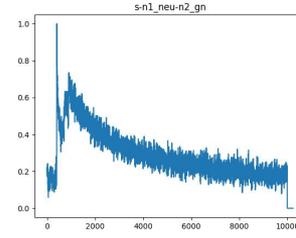
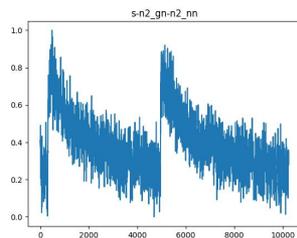
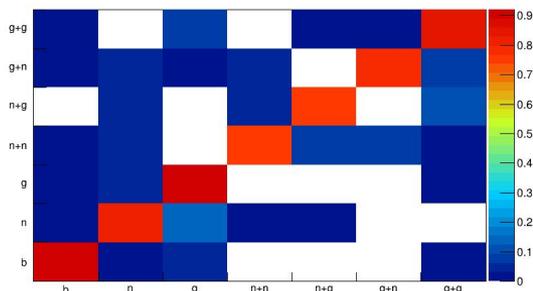
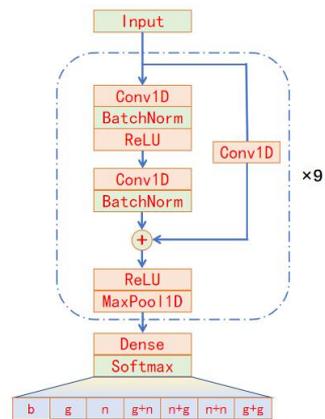
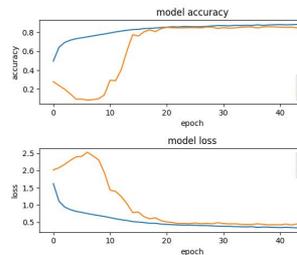
- 标签：基于滤波寻峰算法结果
- 训练FNN、CNN、ResNet网络
- 残差网络（ResNet）准确率更好

● 结果

- 94.5%准确度
- ResNet准确度更优

● 识别错误原因

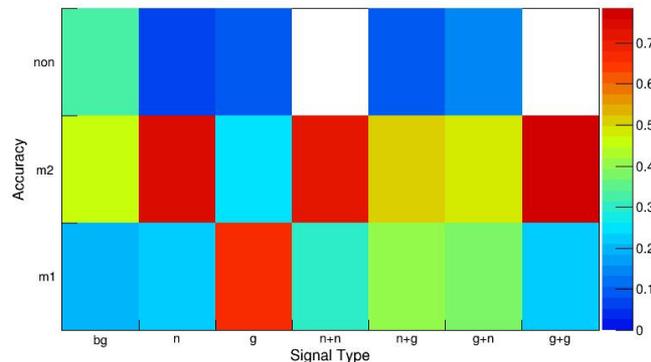
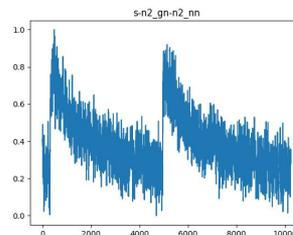
- 脉冲幅度小、本底噪声大
- 脉冲间距太短





识别错误事例的进一步分析

- 对于2种算法预测不一致的脉冲
 - 手工给出标签
 - 约96%事例可通过人眼识别获得标签
 - 约4%事例无法给出标签
- 错误事例的识别
 - ANN准确率60%
 - 电荷积分法准确率30%
 - 全部错误10%
 - 神经网络算法更准确

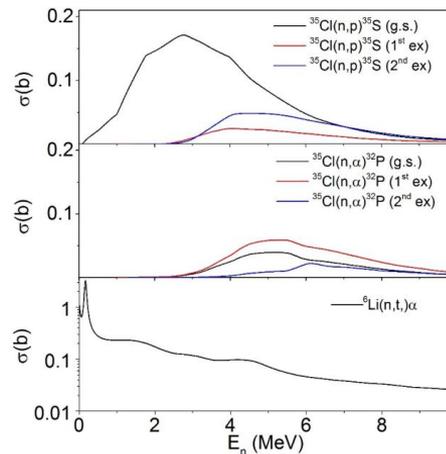
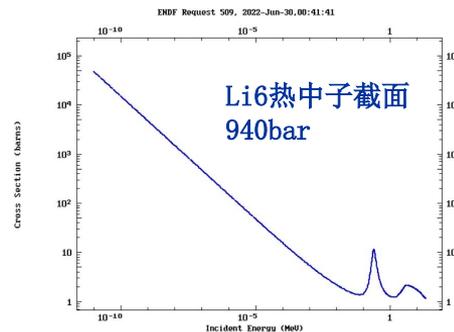
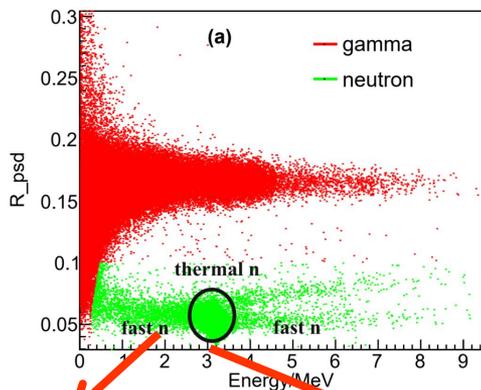




CLYC用于快中子探测

● 探测原理

- CLYC的 ${}^6\text{Li}$ ， ${}^{35}\text{Cl}$ 具有相对较大快中子截面
- Li6 热中子截面极大，很高热中子峰
- 该区域的快、热中子难以区分



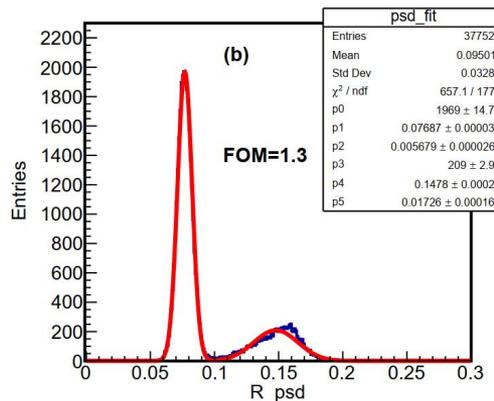
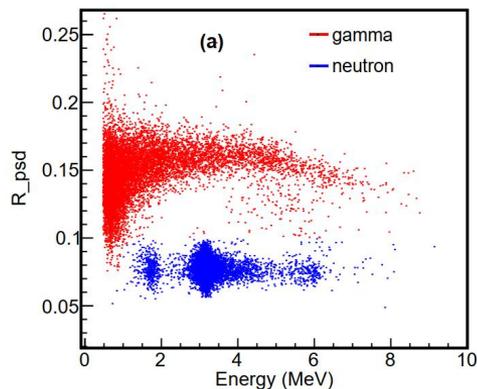
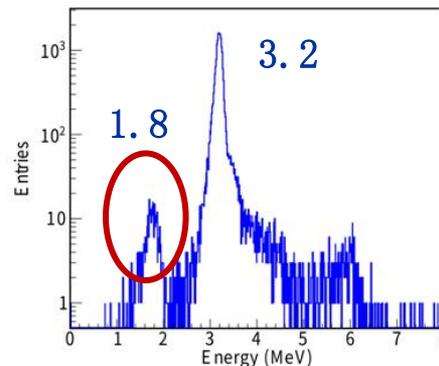
IEEE T Nucl Sci, 2023, 70, 2148



CLYC快中子探测 ($E_n=1.4$ MeV)

● 快中子峰

- 3.2MeV, 热中子
- 1.8MeV, $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$
- 6.1MeV, 热中子叠峰
- FOM值约1.3

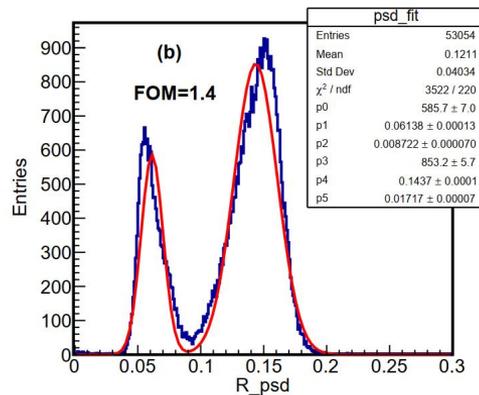
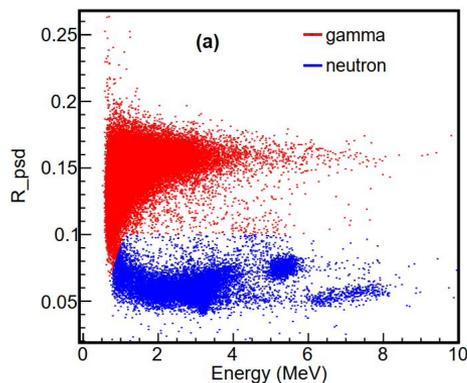
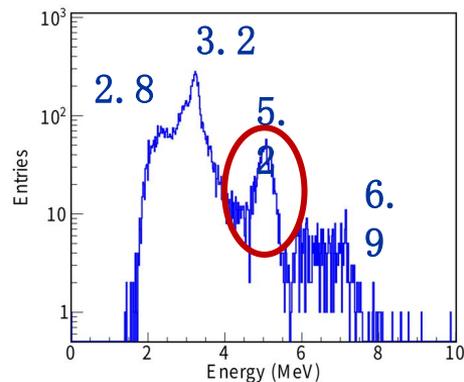




CLYC快中子探测 (En=5.2 MeV)

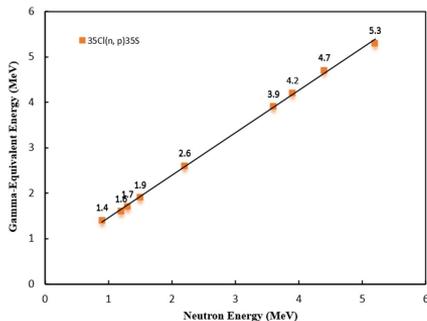
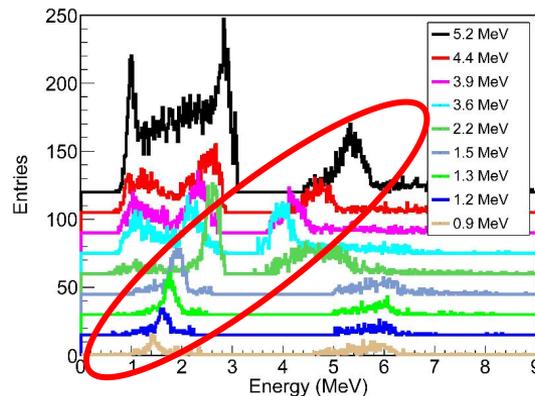
● 观测到多个峰

- 3.2MeV, 热中子
- 5.2MeV, $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$
- 6.9MeV, $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$
- 2.8MeV, $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{35}\text{P}^*$
- FOM值约1.4

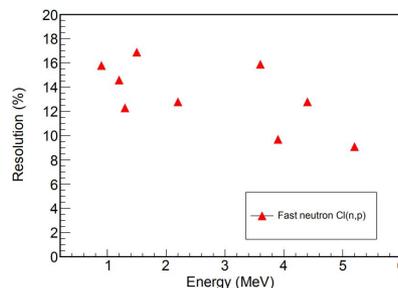


CLYC快中子能谱探测

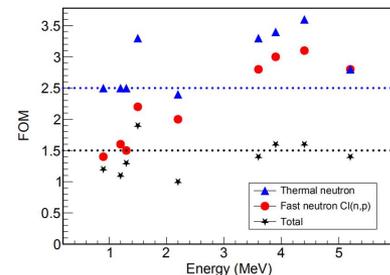
- $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$ 反应探测快中子
 - 线性良好，可用于快中子能谱探测
 - 能量分辨率约15%，淬灭因子约0.9
 - 快中子FOM值稍差于热中子
 - 在3MeV存在热中子干扰



能量响应线性



能量分辨率



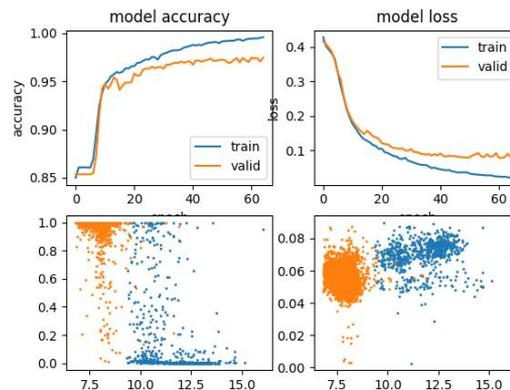
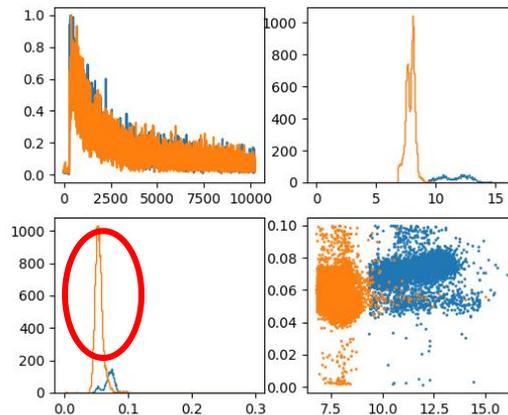
热中子、快中子、伽马psd甄别



核反应通道甄别

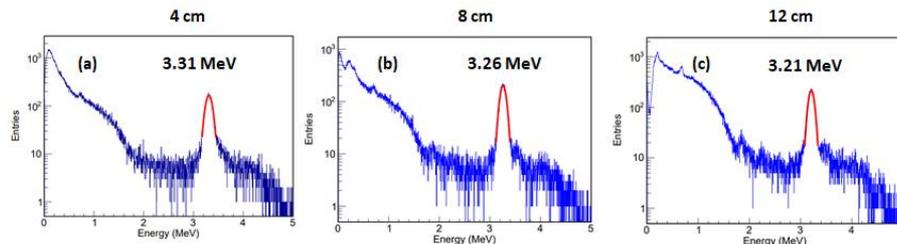
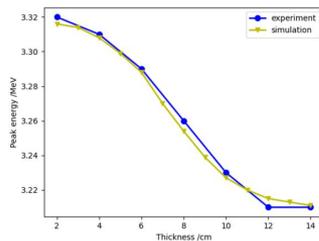
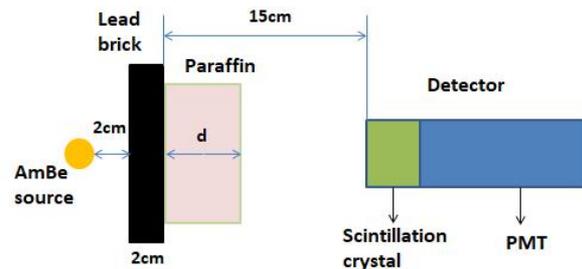
- 各核反应通道波形存在差异
 - Li-6, ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$
 - Cl-35, ${}^{35}\text{Cl}(n, p){}^{35}\text{S}$
- 传统电荷积分法无法区分
 - FOM值约0.3
- 神经网络算法
 - 利用能量差异给出标签
 - 准确率97%
- 结论
 - 通过ANN可有效识别核反应通道
 - 用CLYC同时探测热中子和快中子

Nucl. Inst. Meth. A 1055 (2023) 168533



对10–300keV快中子能量的测量

- 中子测量
 - Li-6测热中子，Cl-35测量高能中子
 - Li-6俘获峰的偏移来测量快中子
 - 基于CLYC/CLLB的良好能量分辨
- 模拟实验结果一致
 - 具有较好可行性，分辨率约10 keV



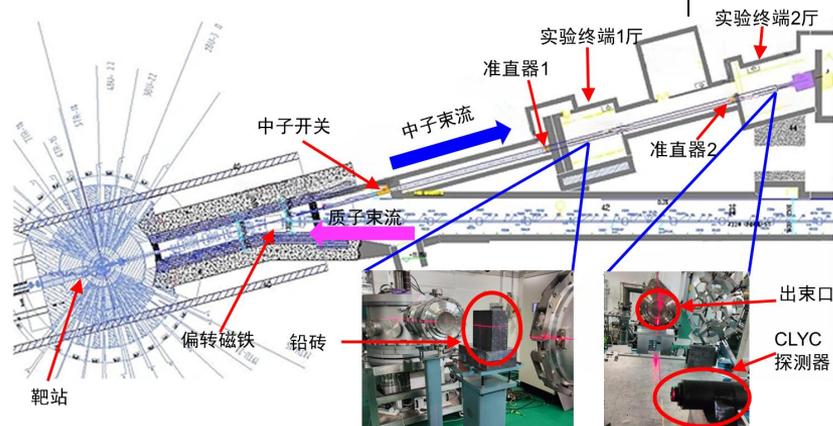
基于白光源的宽能谱中子测量研究

- 铅砖屏蔽 γ 爆

- 厚度20 cm
- 模拟获得铅砖对中子能谱的影响

- TOF法给出中子能量

- 宽能量中子 (1 eV-400 MeV)
- 建立实验的CLYC中子响应矩阵
- 利用GRAVEL方法和Tikhonov正则化方法实现白光中子能谱解谱



$$E_n = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{c \cdot TOF}\right)^2}} - 1 \right) m_n c^2$$



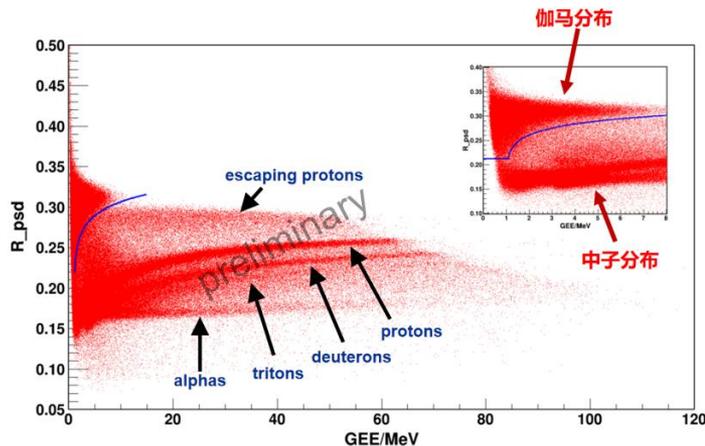
中子伽马信号分布

- 中子、伽马良好甄别

- 区别明显

- 中子信号

- 明显的4+1条带，不同核反应通道
- 对应(n,p), (n,d), (n,t), (n, α)等
- 不同反应道具有不同猝灭因子，有明显区别
- 核反应道通甄别





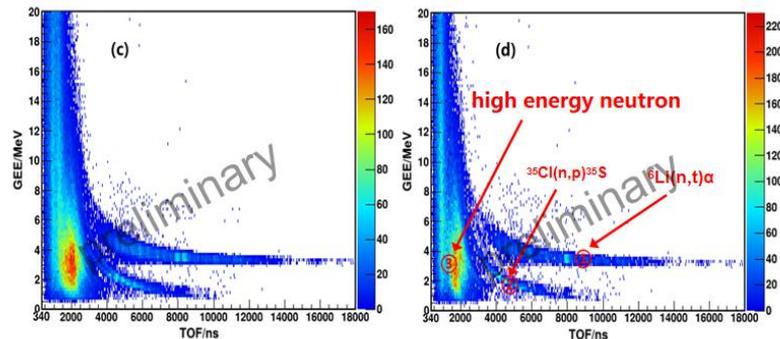
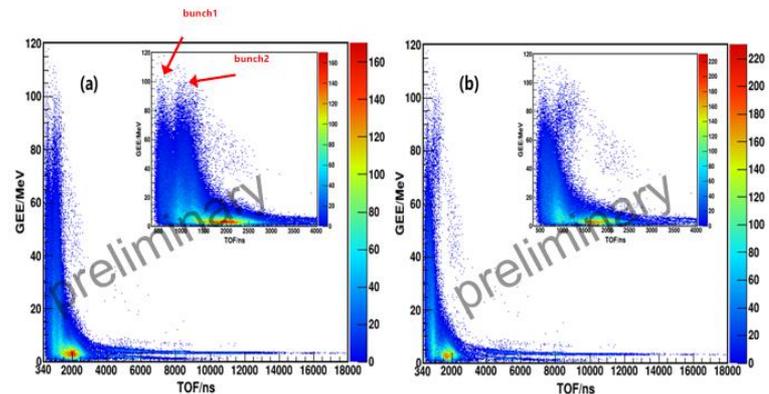
中子能谱重建

● 双束团结构

- CSNS双束团解谱算法, 得到单束团等效能谱, 明显好转

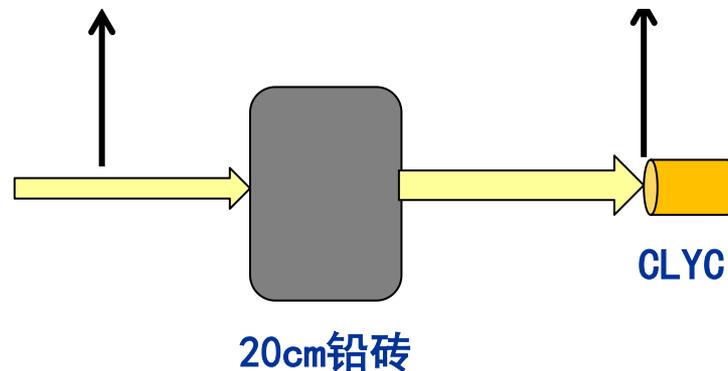
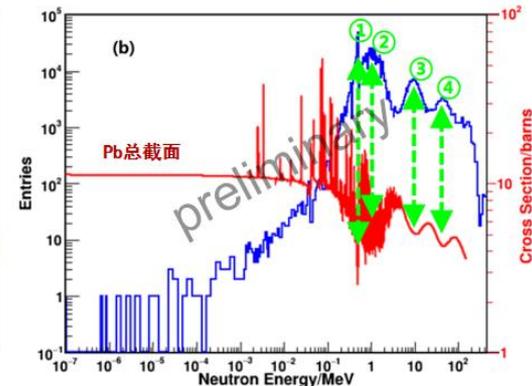
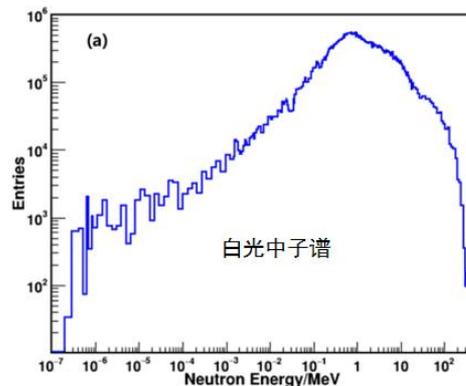
● 中子响应, 3个区域

- ① ${}^6\text{Li}(n,t)$, 条带
- ② ${}^{35}\text{Cl}(n,p){}^{35}\text{S}$, 条带
- ③ 高能中子区域, 复杂



20cm铅砖影响

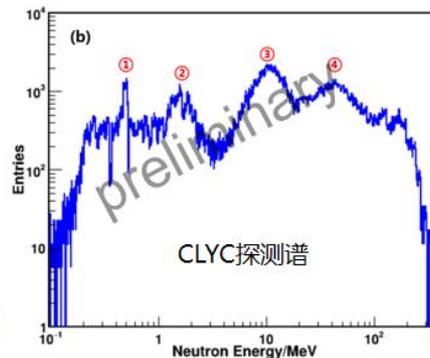
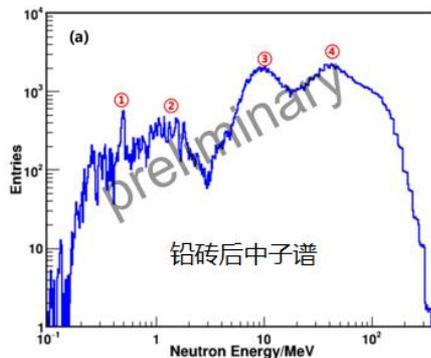
- 低能区严重衰减
 - 中子俘获吸收 (< 100keV)
- 高能区存在4个峰
 - 0.49MeV, 截面急剧降低
 - ~1MeV, 共振吸收区
 - 5-16 MeV, 截面波谷
 - 27-64 MeV, 截面波谷





铅砖后CLYC响应

- CLYC测量能谱、模拟能谱类似
 - ，高能区存在4个峰
 - 实验与模拟保持一致
 - 第2个峰值偏差较大，位于共振区，拟合不准确。
 - 其余偏差较小



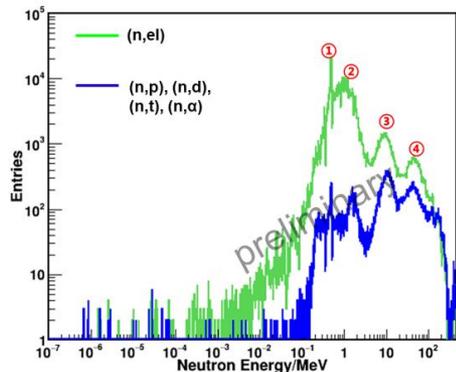
峰位	①	②	③	④
实验峰位/MeV	0.49	1.35	10.52	44.35
模拟峰位/MeV	0.49	1.64	11.19	43.56
相对偏差/%	<0.01	17.68	5.99	1.81



中子信号来源

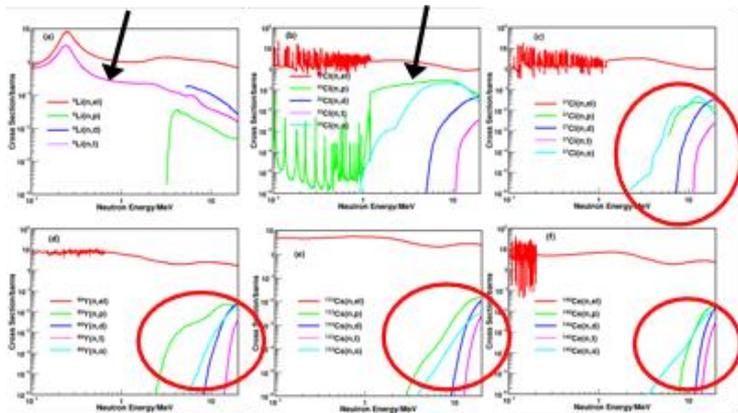
● 模拟各反应道的贡献

- 弹性散射截面最大，主导能谱形状
- 弹散远高于核反应，(n,p)(n,d)(n,t)(n,α)
- 在 < 3MeV能区，弹散高2个量级
- 在 > 3MeV能区，弹散高1个量级
- 核反应在 高能区 更显著



0.1–2 MeV, ${}^6\text{Li}(n,t)$

> 2 MeV, ${}^{35}\text{Cl}(n,p), (n,\alpha)$ 增大



> 2 MeV, Cl, Y,
Cs, Ce (n,p)
(n,d)(n,t)(n,α)
打开

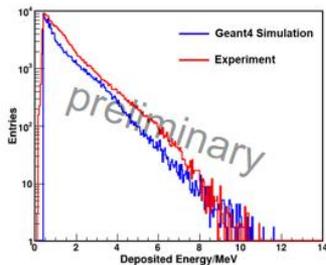
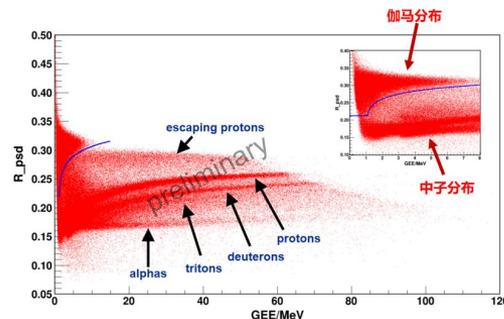
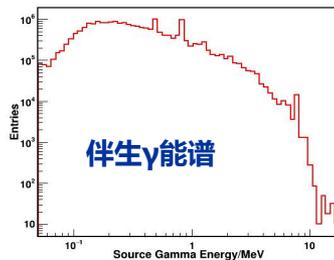
伽马信号来源

- CLYC探测到大量 γ 信号

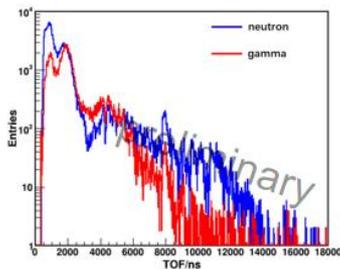
- 20cm铅砖可完全阻挡伴生 γ 射线

- 伽马信号来源?

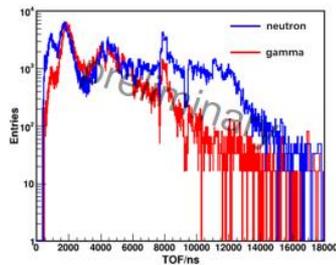
- 实验、模拟的能量沉积谱具有相同趋势
 - n、 γ 的TOF谱具有相似的趋势，预示 γ 是n产生的
 - 中子在CLYC中发生(n, γ)反应产生的（俘获、非弹）



CLYC中的 γ 沉积谱



模拟的 γ 飞行时间谱

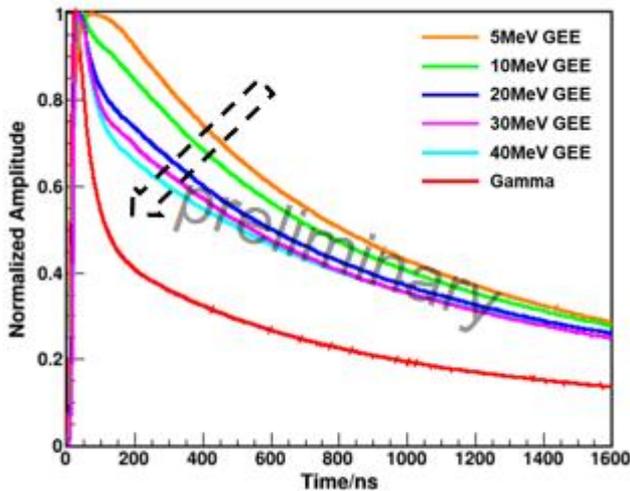


实验的 γ 飞行时间谱



伽马的影响

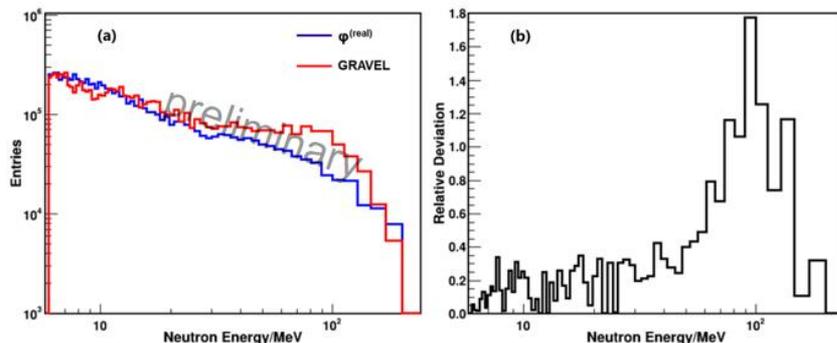
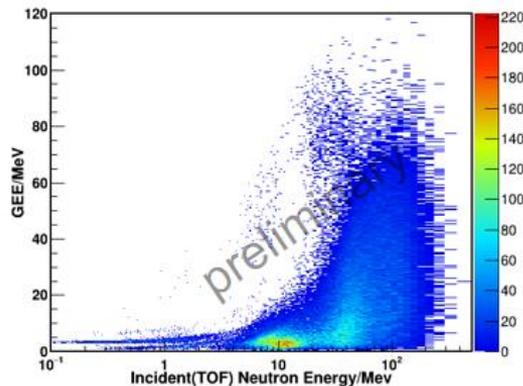
- 中子在CLYC产生 γ 信号后被俘获
 - n、 γ 叠加，影响脉冲波形
- 脉冲波形变化
 - 随着GEE增大，中子信号接近 γ 信号，快成分占比增大
 - 高能中子，波形趋近于 γ ，甄别难度增大





中子能谱解析

- 中子能量沉积谱GEE进行解谱
 - 实验给出响应矩阵R
 - Gravel算法进行能谱解析
 - 实现6-200 MeV白光中子能谱解析
- 高能区解析效果变差
 - 事例数太少
 - 泄漏中子增加
 - 伽马干扰





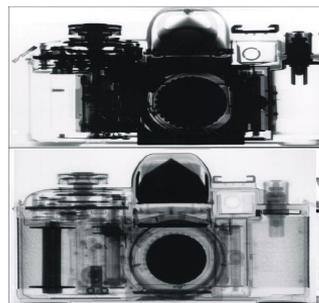
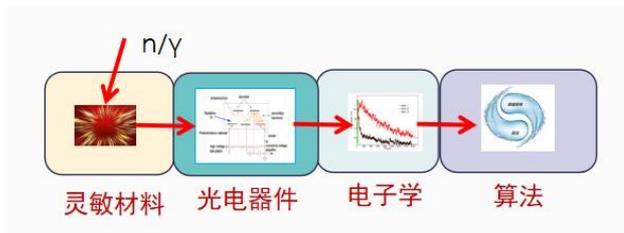
二、中子成像研究

● 中子成像

- 对轻元素、核材料等非常敏感
- 提供额外成像信息，同Xray互补
- 辐射源成像、核材料成像

● 灵敏探测器

- 锂微晶玻璃，实现He3替代



Xray成像和中子成像



中子对轻元素敏感

● 中子探测器2D阵列，包括

- 灵敏材料： $n/\gamma \rightarrow$ 可见光
- 光电器件：光 \rightarrow 电子，放大 $1E4-1E7$
- 电子学：放大、成形、数字化
- 算法：成像核心



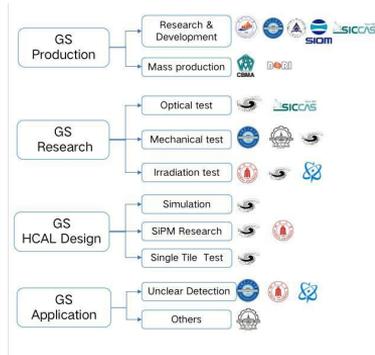
闪烁玻璃探测器

● 闪烁玻璃合作组

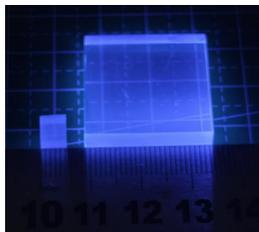
- 高能所牵头，基于CEPC需求（2-3吨探测器）
- 高密度(6 g/cm³)、较高光产额（2000ph/MeV）
- 研制的闪烁玻璃已达国际领先水平

● 基于锂玻璃的中子探测器

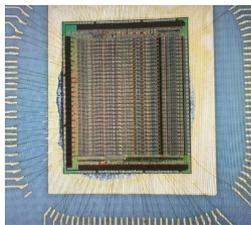
- 研制高性能锂玻璃，提高光产额
- 研制国产ASIC，64通道（耦合SiPM、PMT、Si-PIN）
- 研制电子学，ASIC+ADC+FPGA
- 机器学习算法，助力图像重建



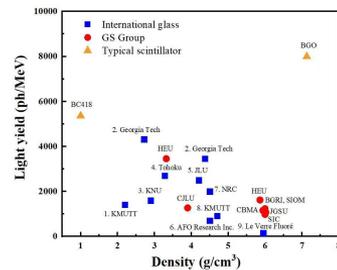
- Institute of High Energy Physics, CAS
中国科学院高能物理研究所
- Jingqiangshan University
井冈山大学
- Beijing Glass Research Institute
北京玻璃研究院
- China Building Materials Academy
中国建筑材料研究院
- China Jiliang University
中国计量大学
- Harbin Engineering University
哈尔滨工程大学
- Harbin Institute of Technology
哈尔滨工业大学
- Sichuan University
四川大学
- Shanghai Institute of Ceramics, CAS
中国科学院上海硅酸盐研究所
- Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
中国科学院上海光学精密机械研究所
- CNNC Beijing Unclear Instrument Factory
中核(北京)核仪器有限责任公司



自研锂玻璃，光产额更高



自研ASIC



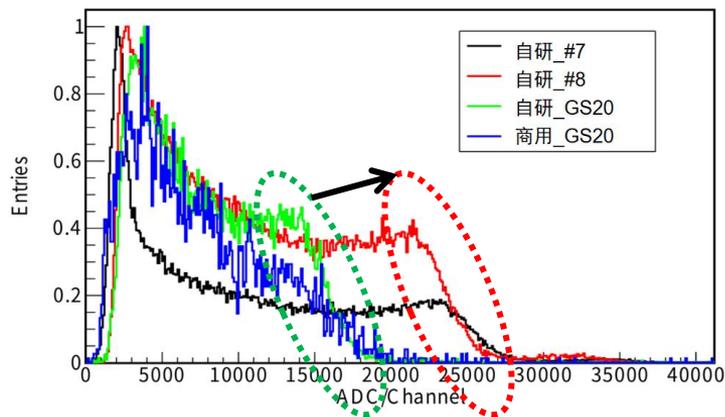
The Innovation 6(5): 100878, 2025

自研锂玻璃性能对比

- 伽马-中子结果对比
 - 自研锂玻璃光产额提升约1.5倍
 - 中子峰更干净
 - ng甄别效果更好

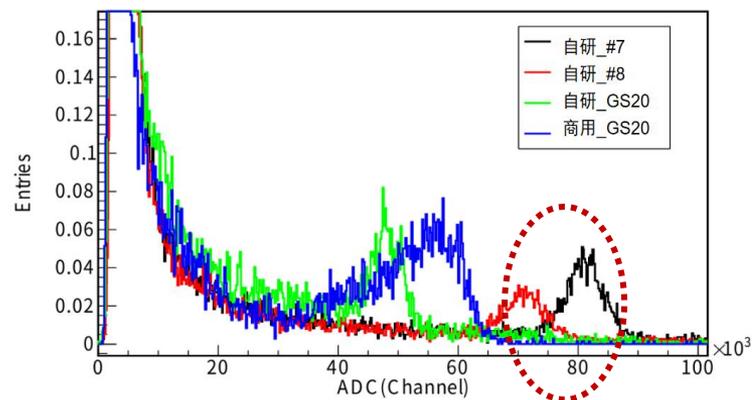
中子测量

- 进一步提升锂含量
- 天然丰度锂有明显中子响应



Cs137能谱

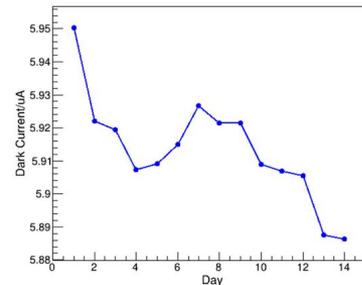
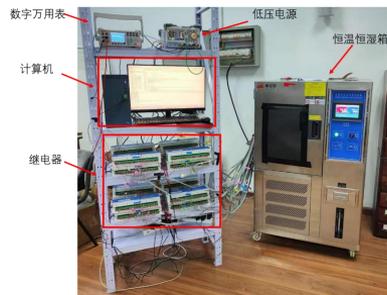
Chin Phys B 34 (2025) 050703



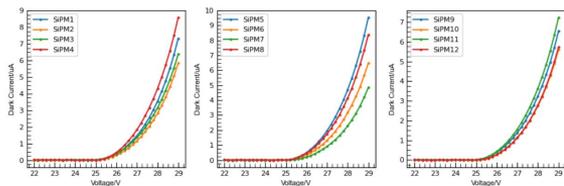
中子能谱

SiPM批量老练系统

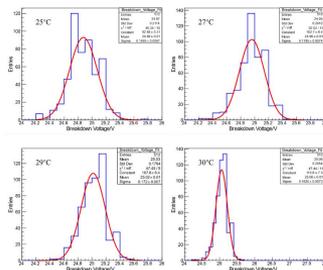
- 建立SiPM老练测试系统
 - 实现对500余个SiPM的同时老练和测试
 - 使其性能快速稳定
 - 通过大量继电器进行切换，降低成本
- 结果
 - 老练后，暗电流有所降低
 - 击穿电压趋于一致



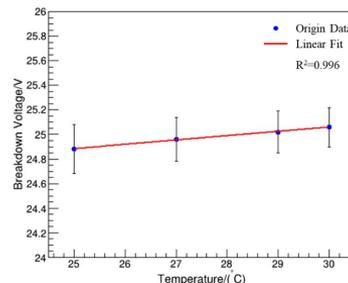
暗电流变化趋势



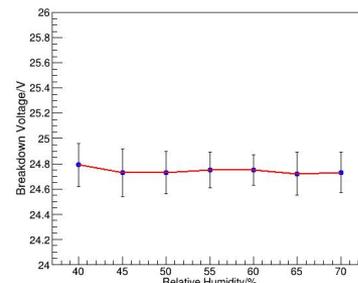
SiPM的IV曲线



击穿电压分布



击穿电压随温度升高



击穿电压同湿度几乎无关

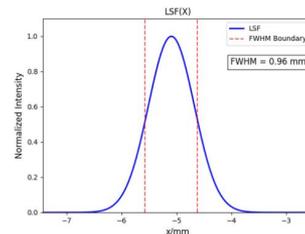
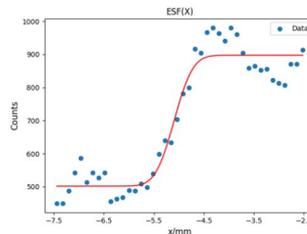
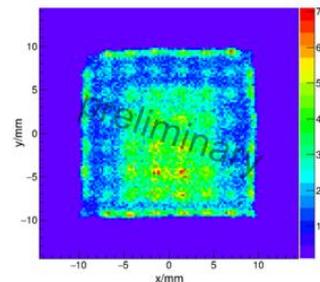
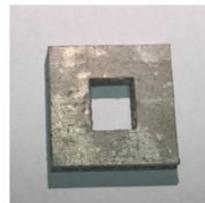
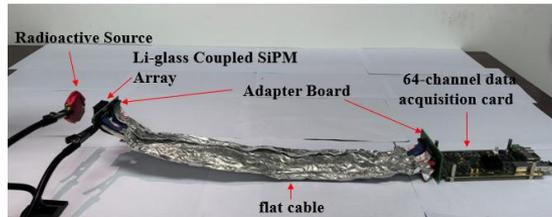
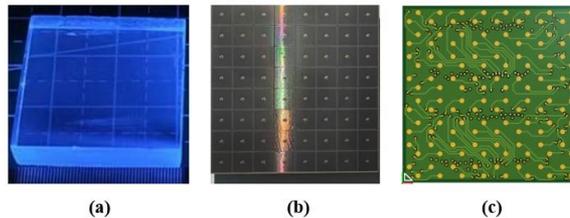
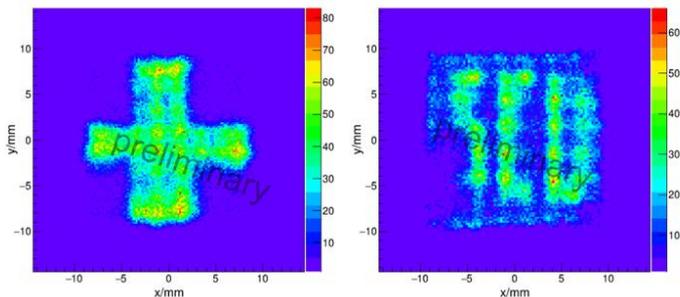
原型系统成像

伽马成像

- W, 十字模型、SCU模型成像
- ANN算法有较好效果

中子成像

- Cd, 方孔模型
- 空间分辨约0.96 mm



致谢

- 感谢科技部、基金委、四川省、四川大学等的资助
- 感谢合作者
 - 川大合作者
 - 闪烁玻璃合作组（高能所牵头，5所大学（哈工程、哈工大、计量大学、井冈山大学、川大），6家研究院和企业（北玻院、建材院、上光所、硅酸盐所、北京核仪器厂、高能所）
- 欢迎到四川大学访问指导
- 谢谢！

