



海纳百川 有容乃大



四川大学
SICHUAN UNIVERSITY

基于CLYC和CLLB的 中子伽马多模探测器性能研究

韩纪锋，宋瑞强，任飞旭，颜筱宇

hanjf@scu.edu.cn

四川大学

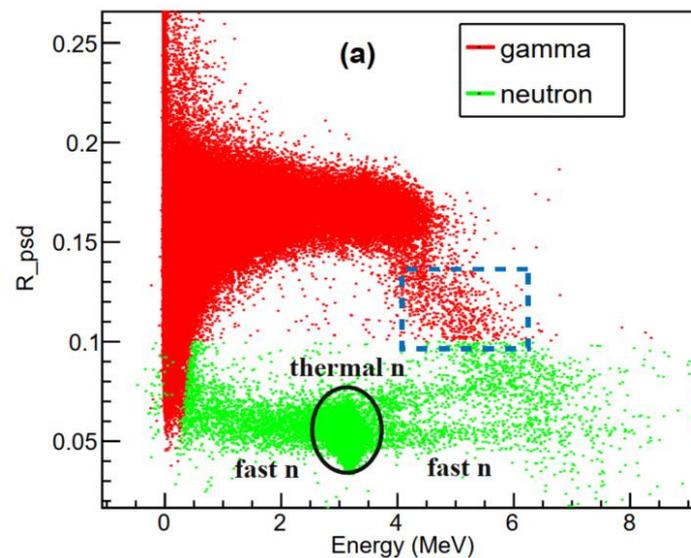
2022.8.10





主要内容

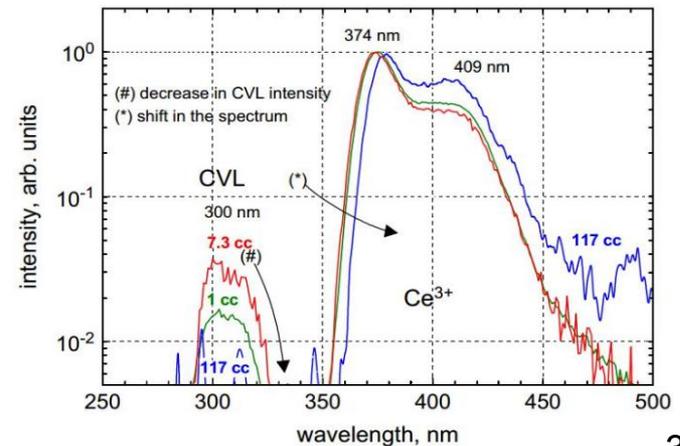
- 研究背景
- 中子、伽马甄别研究
- 堆积脉冲甄别
- 快中子能谱探测
- 小结





研究背景

- 中子伽马多模探测器
 - 混合辐射场监测、辐射剂量与防护...
 - CLYC、CLLB、塑闪
 - 晶体：CapeSym、中国计量大学、Eljen
 - 高速波形采样
- 特点
 - 热中子高效探测， ${}^6\text{Li}$ 富集度95%
 - 良好能量分辨， $\sim 4\% @ 662 \text{ keV}$
 - 良好PSD能力
 - 实现快中子探测，Cl、H



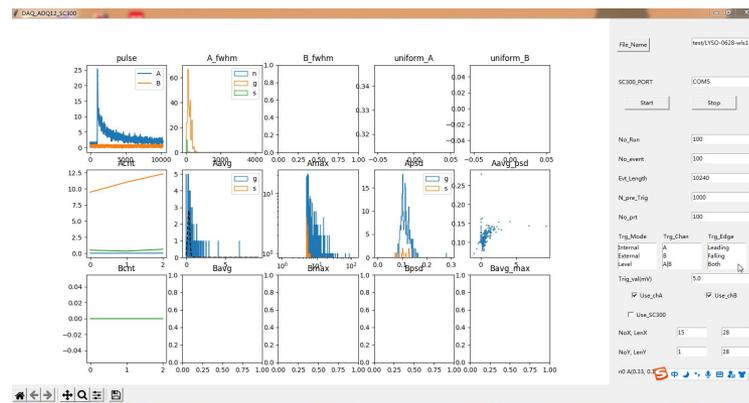
测试方法

- 基于高速采样卡

- TELEDYNE, ADQ12, 1Gbps
- 自制基于python的DAQ程序

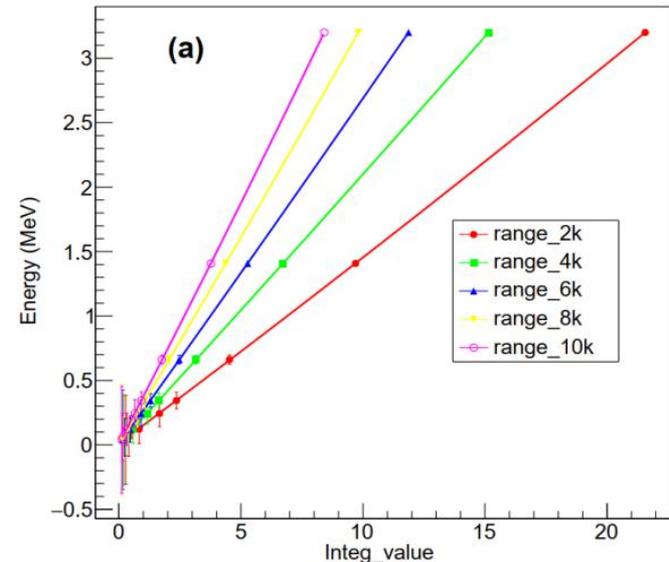
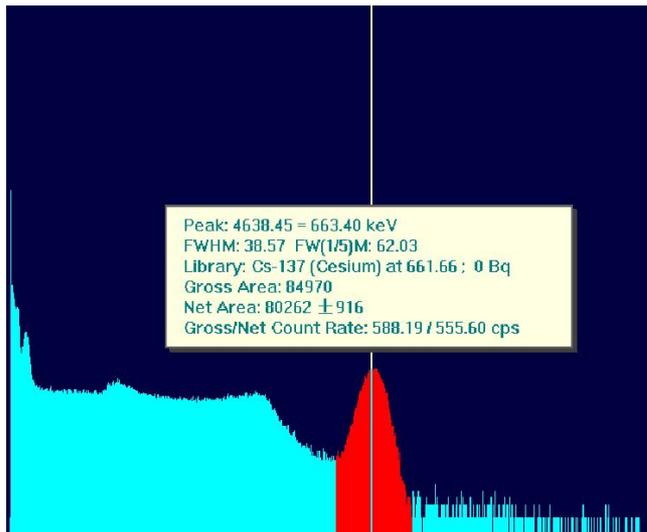
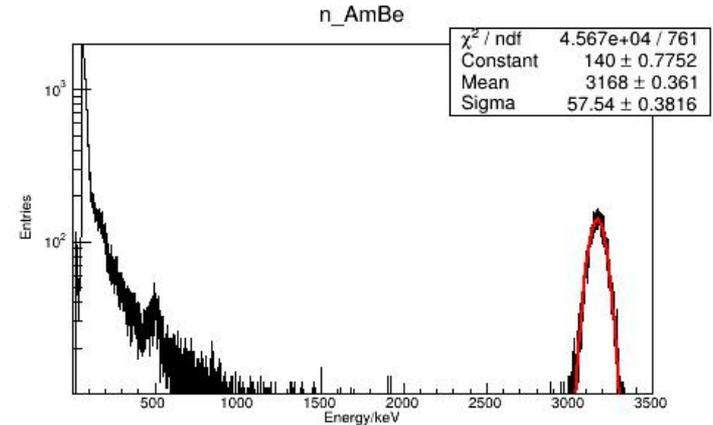
- DAQ主要功能

- 高速数据采集
- 实时ng甄别
- n、g计数率
- n、g能谱
- 符合



CLYC晶体的能量分辨

- 热中子能量分辨约1.8%
- 伽马能量分辨
 - 5.8%@662keV
 - 具有良好的线性0.06–3 MeV





CLYC晶体信号特征

● 3类典型信号

1. 超慢信号, us
2. 慢信号, 百ns
3. 快信号, 10ns (PMT噪声)

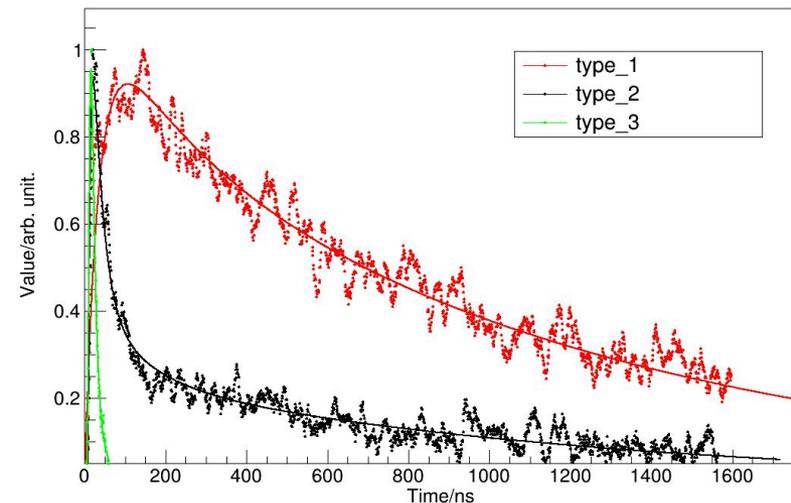
● 中子

- 以T1 (超慢信号) 为主

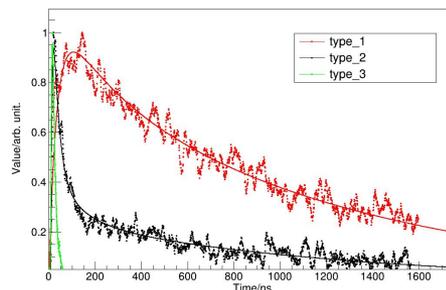
● 伽马

- 以T2 (快信号) 为主
- 约2%超慢信号干扰

Am-Be源结果



CLYC信号拟合



- 多指数拟合4种成分
 - 平均信号扣除噪声干扰

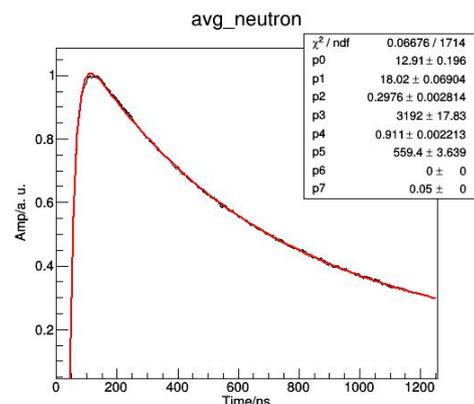
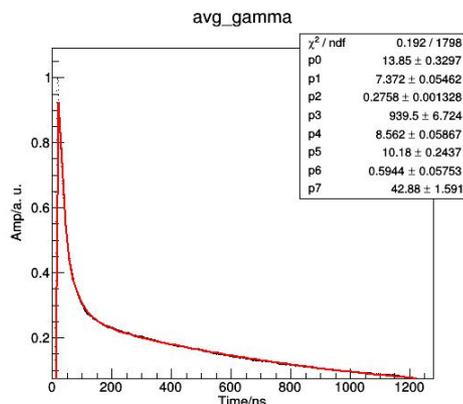
● 中子信号特征

- 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

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



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

n-γ 甄别

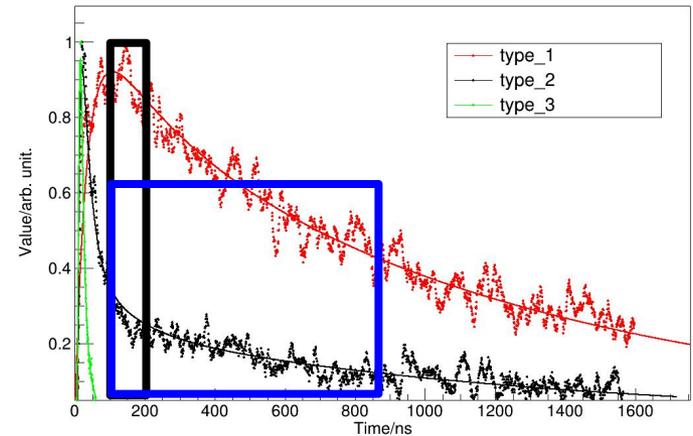
● CLYC晶体的PSD方法

- n下降沿无10-43ns成分
- 用下降沿快速下降部分占比
- 占比较小为n
- 占比较大为γ

● 结果

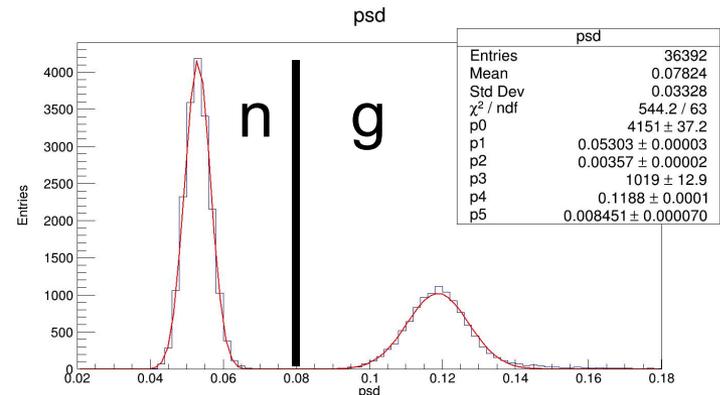
- 甄别优度FOM值2.3
- CLYC晶体具有极好的n-γ 甄别能力

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



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

psd分母区间变化影响较小



基于神经网络的n-γ 甄别

● 全连接网络FCNN

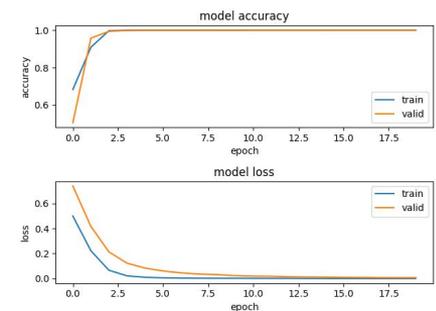
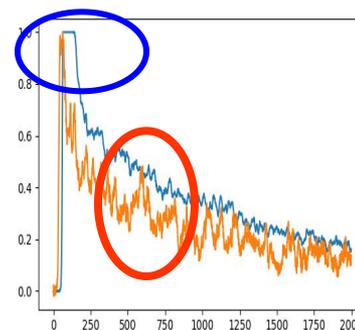
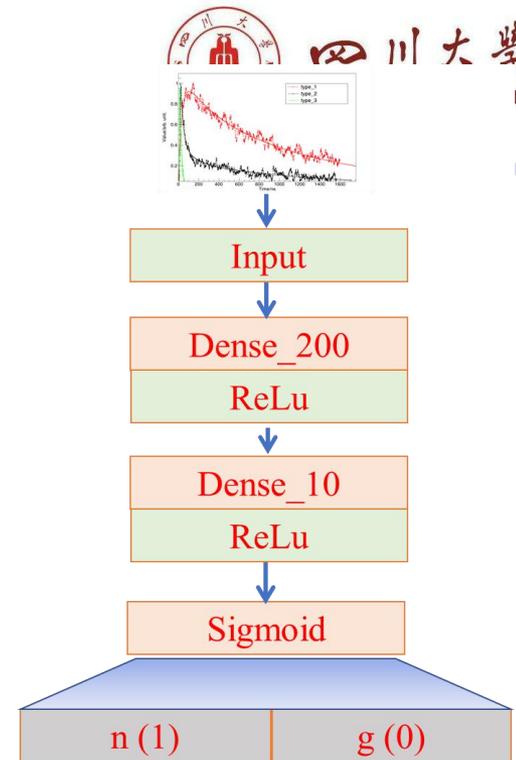
- 全谱数据输入（归一化）
- 2个中间全连接层，节点为200和10，ReLU激活
- Sigmoid输出： $n(1)$ ， $g(0)$
- 共404, 241个可训练参数

● 数据

- n ， g 各约1万个；训练集64%，验证集16%，测试集20%

● 结果

- 约20次训练后稳定，精度 $\sim 100\%$
- 测试精度 $\sim 100\%$ ；
- 准确识别2个 g 信号（PSD方法误判为 n ，峰值饱和，大噪声）





堆积情况下的信号甄别-网络模型

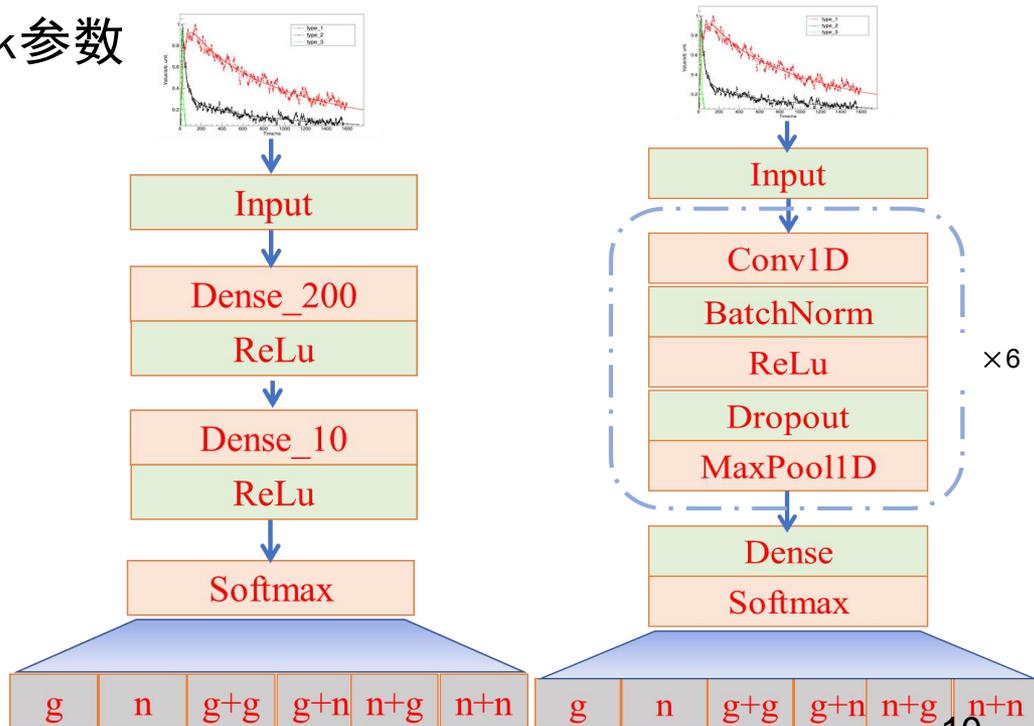
- 计数率较高，存在信号堆积
 - 全谱数据输入（归一化）
 - 6种信号类型：n, g, n+g, n+n, g+g, g+n

- 构建了2个网络

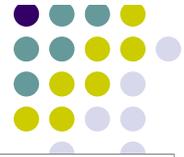
- 全连接网络FCNN，约400k参数
- 卷积网络CNN，约4k参数

- 数据

- 相同数据源
- 训练集64%
- 验证集16%
- 测试集20%

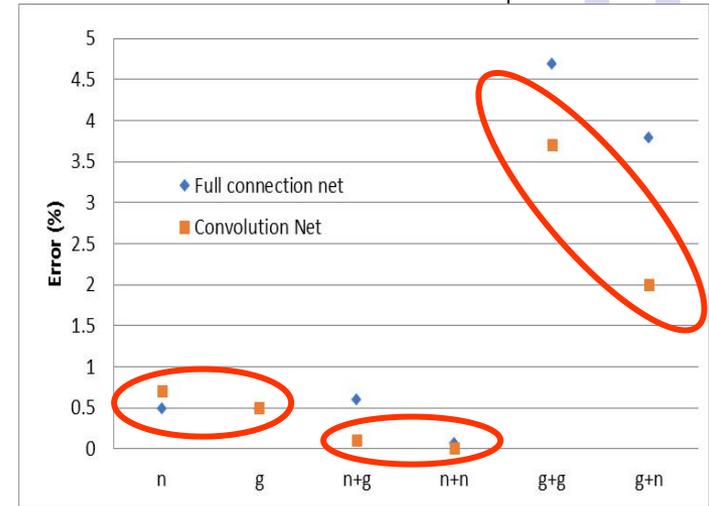


堆积情况下的信号甄别-结果



● 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

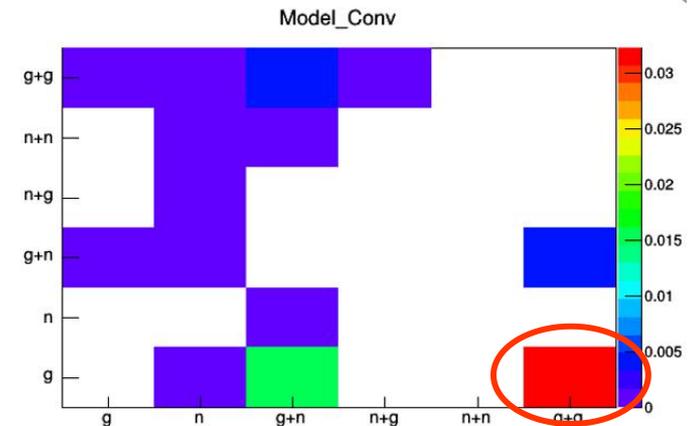


● 误判率

- 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%；

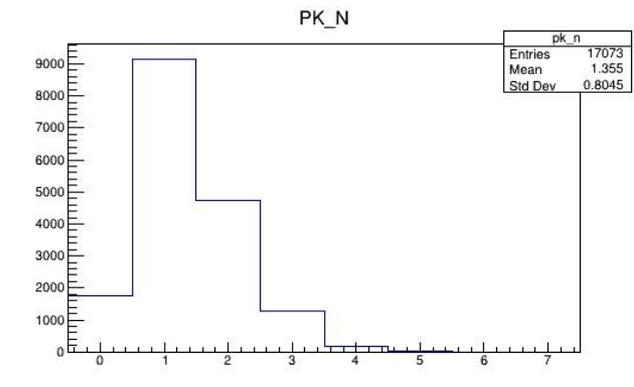
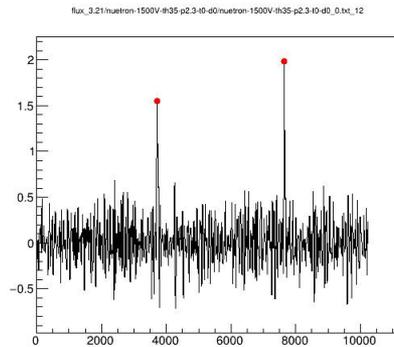
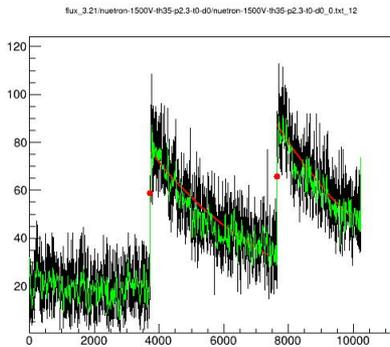
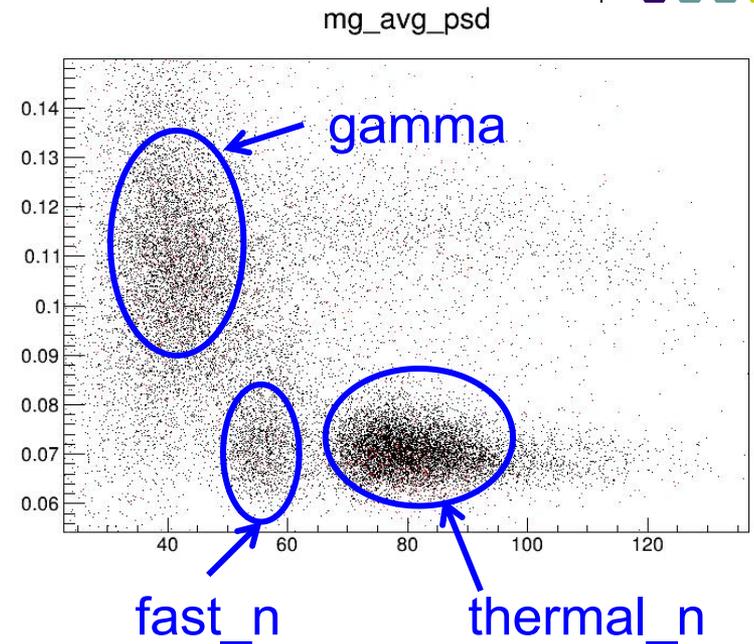
● 误判原因

- g、n幅度较小时，易被噪声干扰



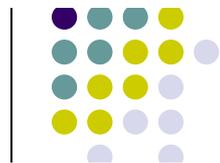
堆积脉冲实验数据

- 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， $\leq 500\text{ns}$



实现基于上升沿的寻峰算法、堆积脉冲ng甄别

基于ANN的堆积脉冲psd甄别



● 监督学习

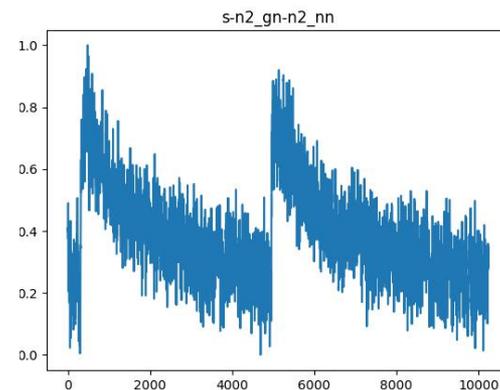
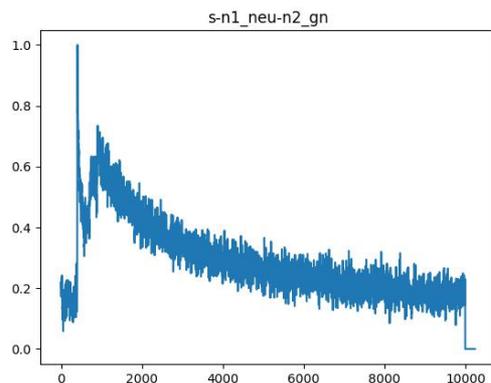
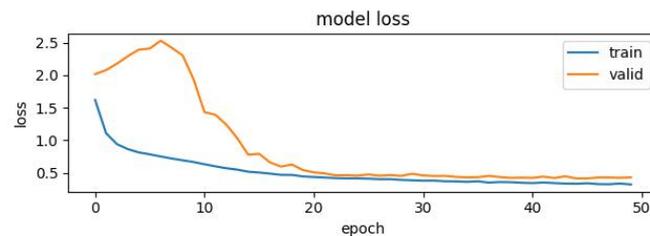
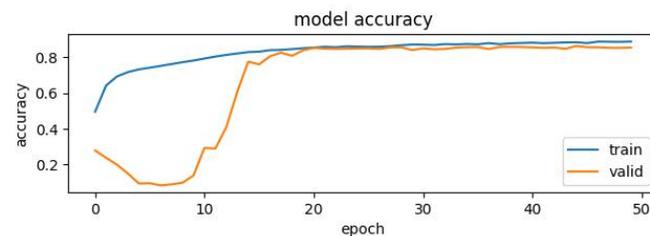
- 标签：滤波寻峰算法生成
- 训练CNN、Resnet网络
- 残差网络（Resnet）准确率更好

● 结果

- 86%准确度
- ANN准确度更优
- 重新修改标签

● 识别错误原因

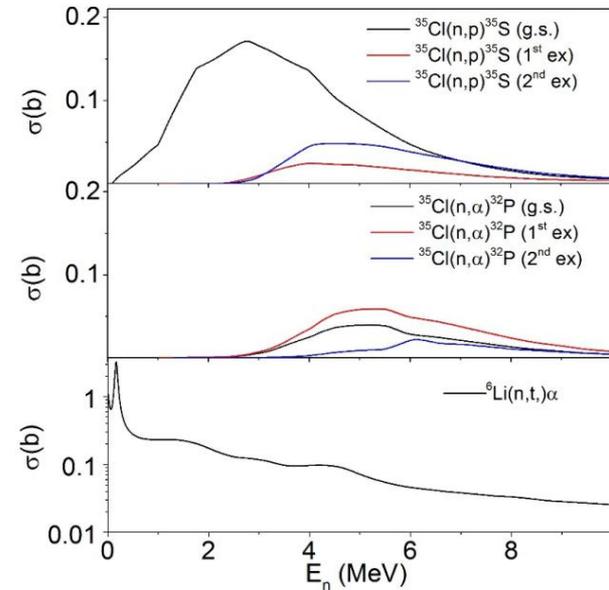
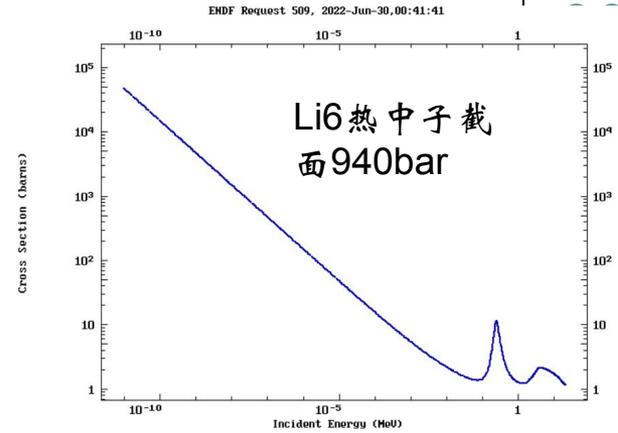
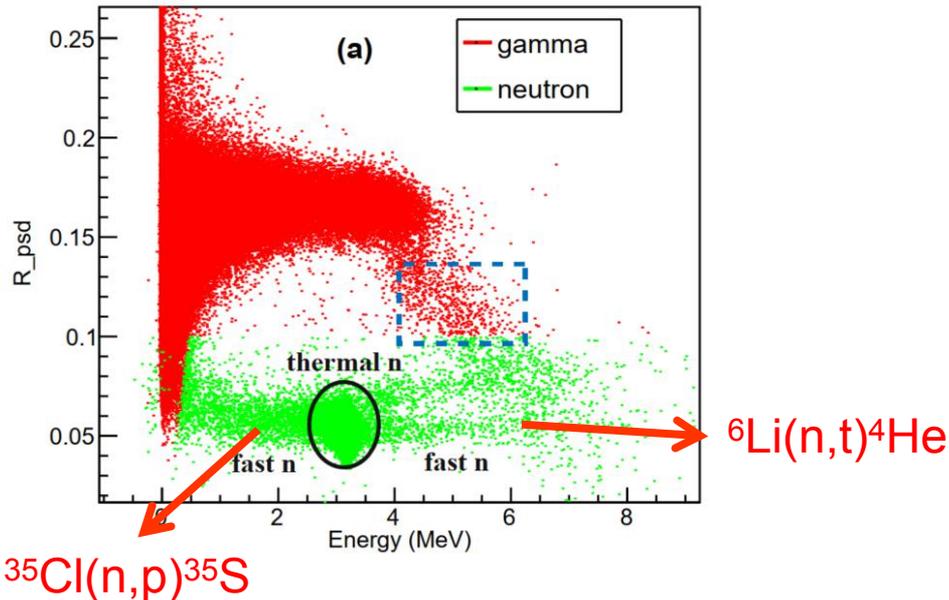
- 小脉冲、距离太近



CLYC用于快中子探测

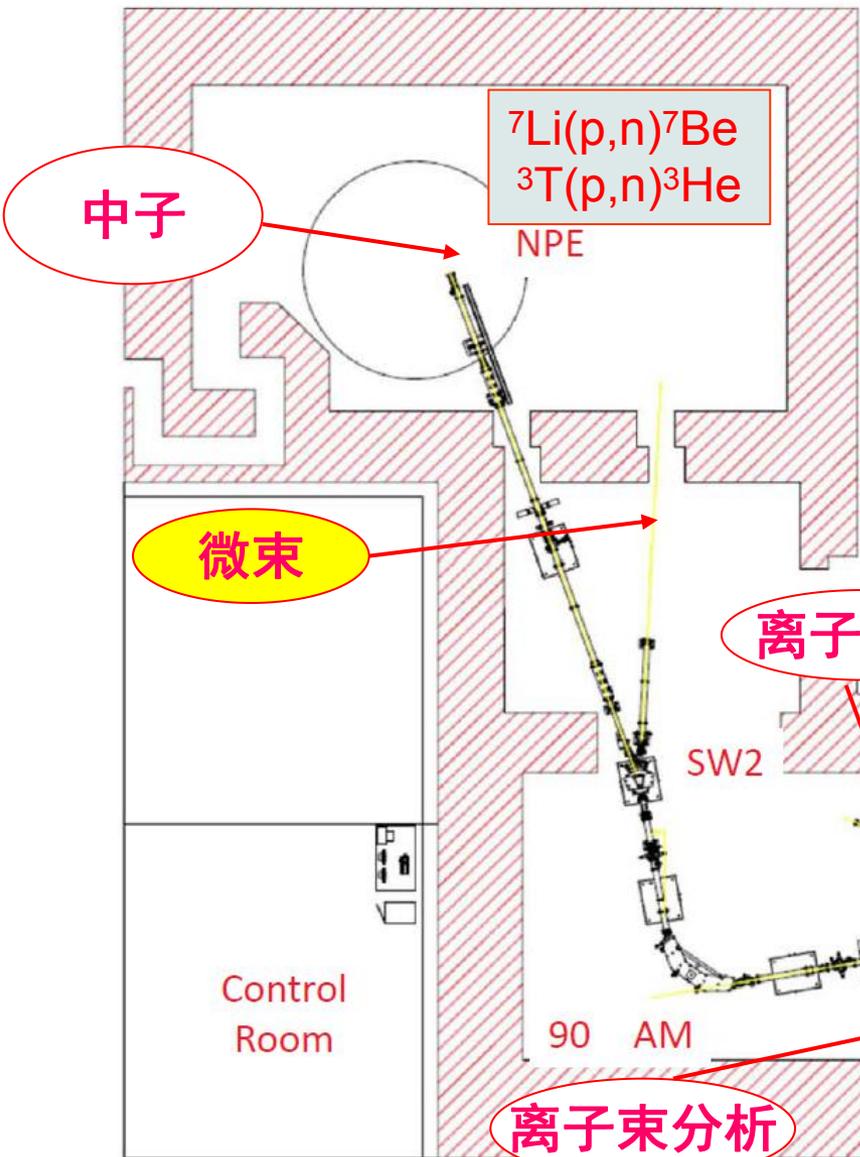
● 探测原理

- CLYC的Li6, Cl具有相对较大快中子反应截面
- Li6的热中子截面极大, 存在很高的热中子峰 (3.2MeVee), 该区域的快、热中子难以区分



快中子探测研究平台

基于加速器产生单能中子，
用于探测器性能研究



Nucl. Instr. Meth. B 418 (2018) 68–73

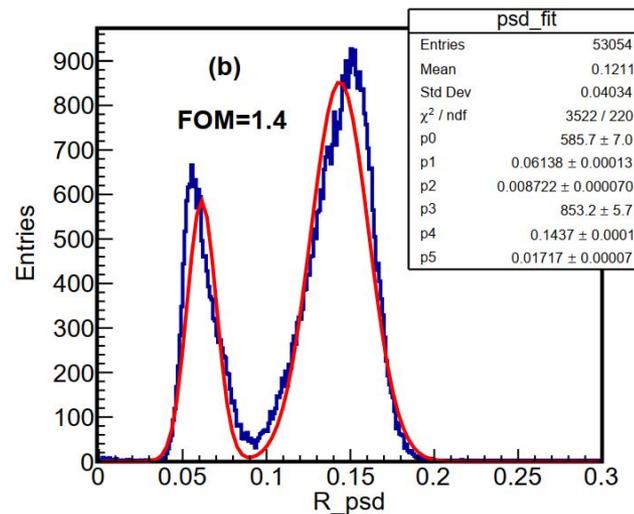
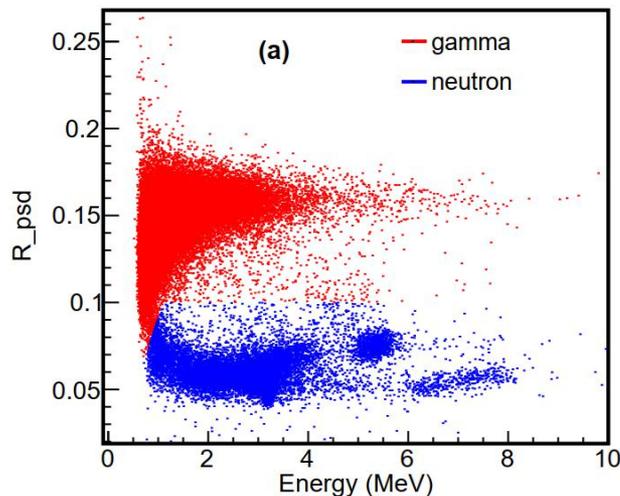
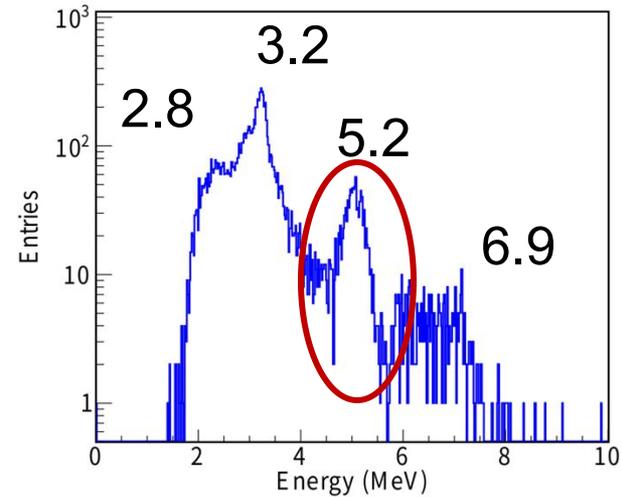
产生从H到U的
几乎所有离子



CLYC快中子探测 (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

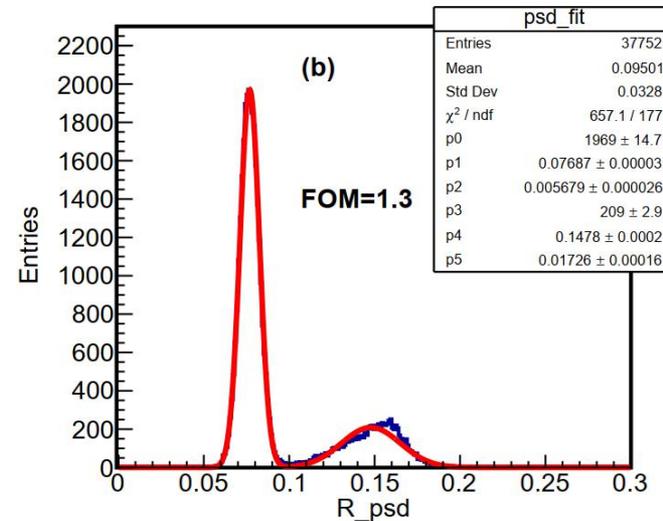
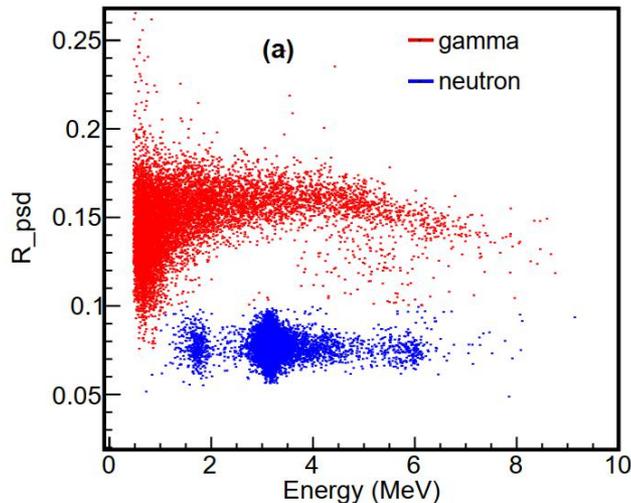
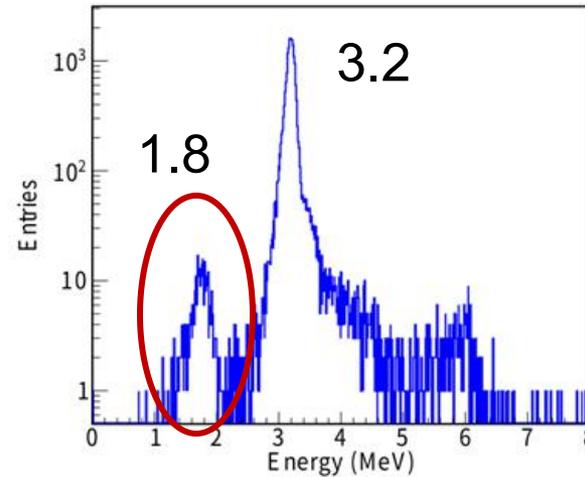




CLYC快中子探测 (1.4 MeV)

● 快中子峰

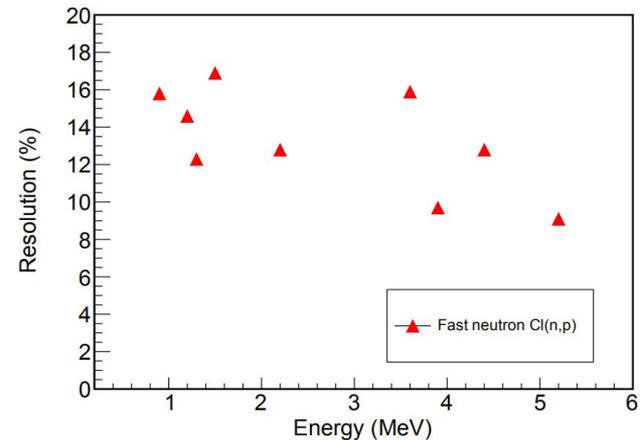
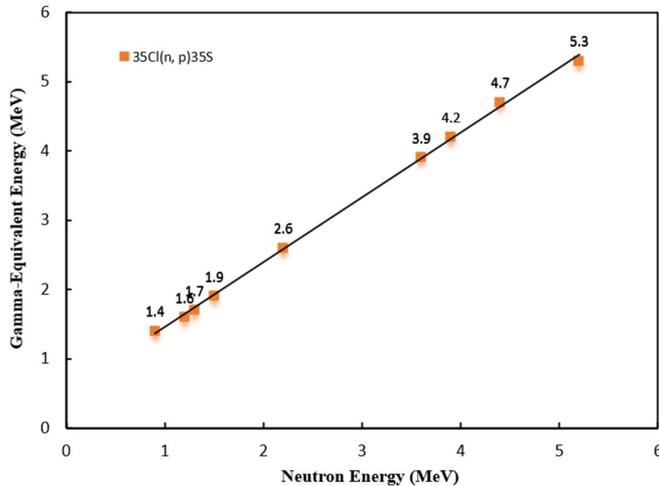
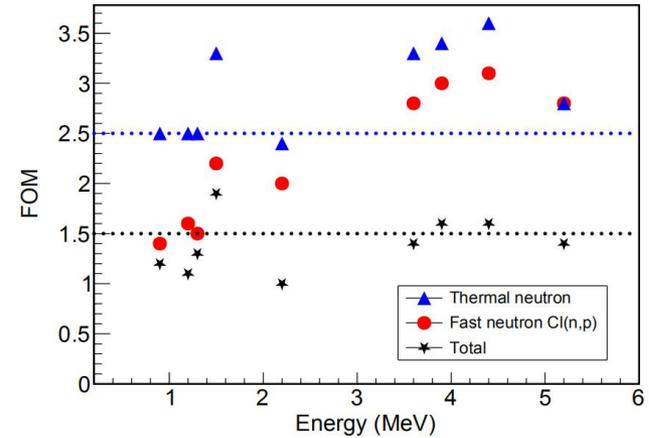
- 3.2MeV, 热中子
- 1.8MeV, $^{35}\text{Cl} (n, p) ^{35}\text{S}$
- 6.1MeV, 热中子叠峰
- FOM值约1.3





CLYC快中子能谱探测

- $Cl(n, p)S$ 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%，quenching factor约0.9
 - 快中子FOM值稍差于热中子
 - 在3MeV存在热中子干扰

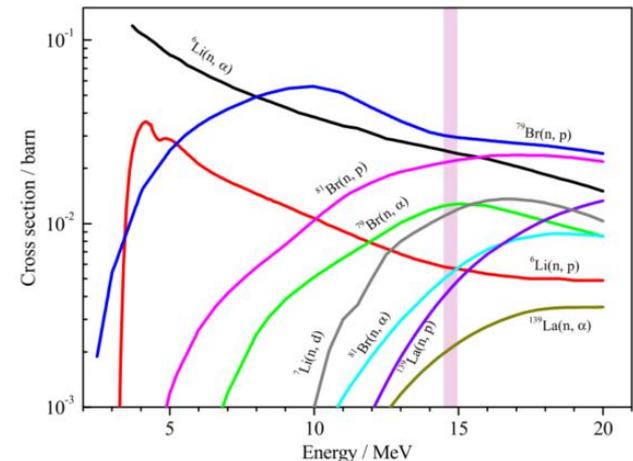
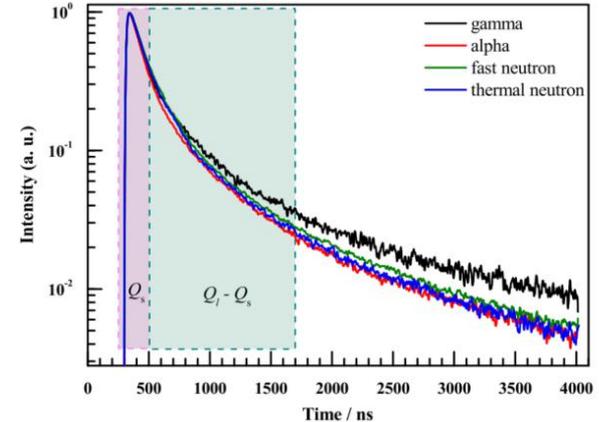




CLLB中子伽马探测

Cs₂LiLaBr₆:Ce

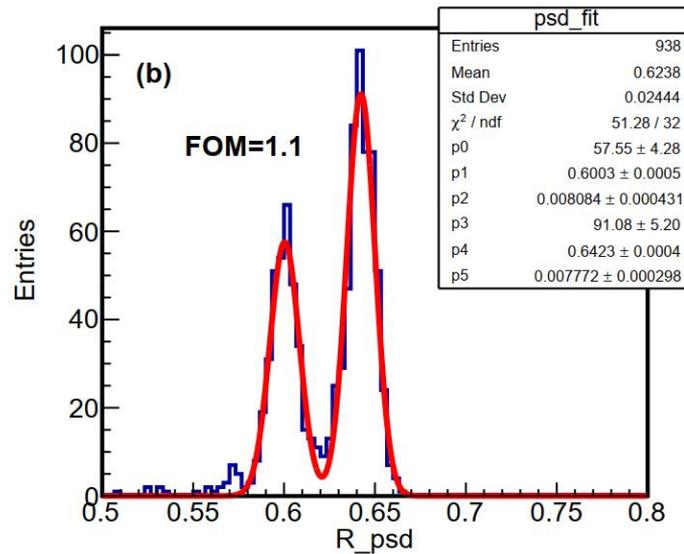
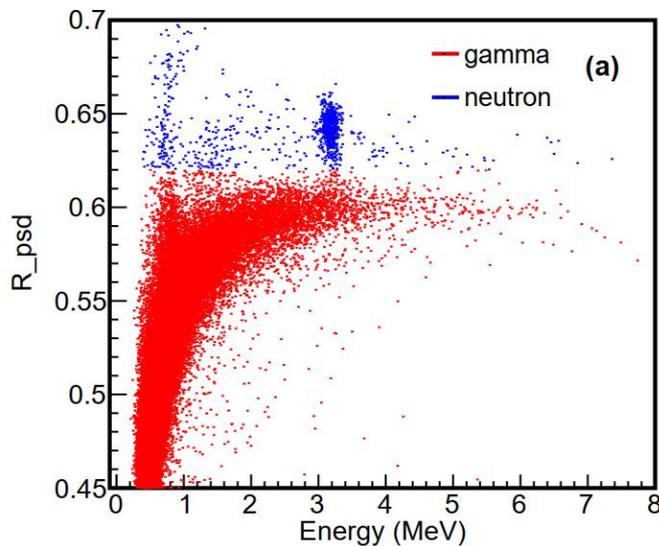
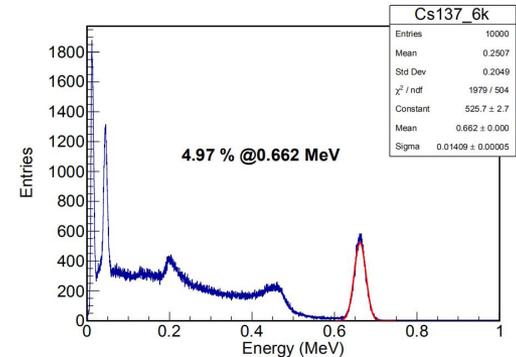
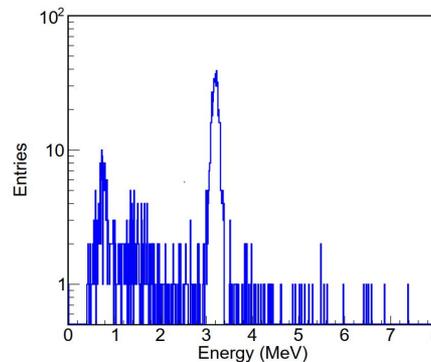
- 中国计量大学研制
 - 17% Li6富集度，密度4.2 g/cm³
- 中子伽马多模探测
 - 基于Li6的热中子探测
 - 基于Br的快中子探测 (>3MeV)
 - 优良的伽马分辨率
 - 良好的中子、伽马甄别能力





CLLB快中子探测 (5.2 MeV)

- 仅观测到热中子峰
 - ng甄别能力差于CLYC
 - 热中子效率偏低
- 能量分辨优于CLYC

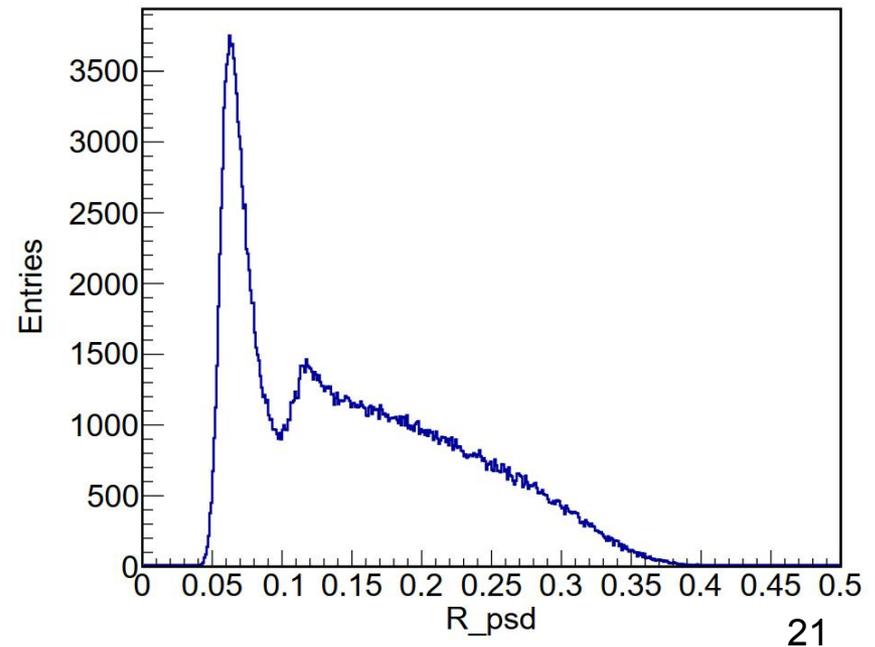
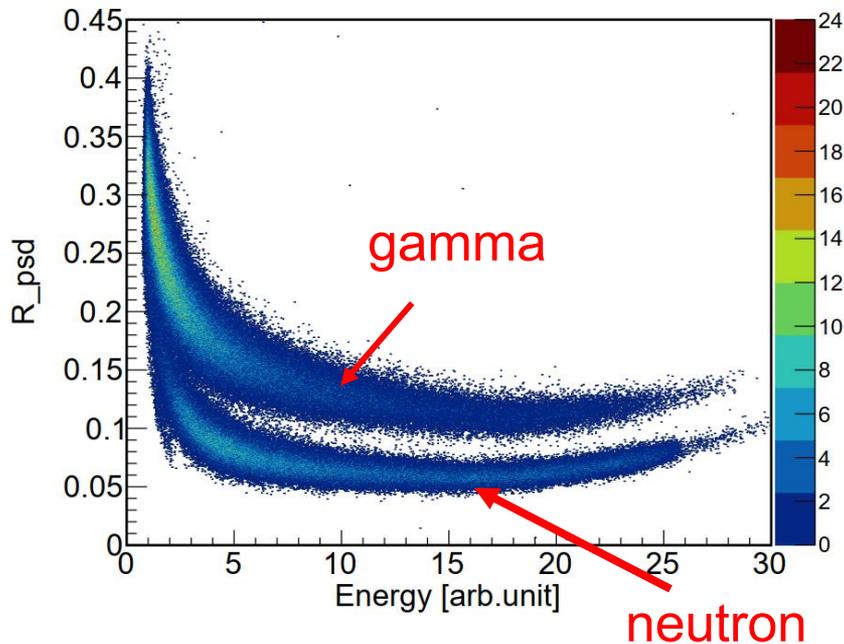




塑料闪烁体

● 塑料闪烁体

- 基于弹性散射实现快中子探测
- 无重元素，伽马全能峰不可见
- 中子、伽马甄别效果稍差





小结

- 研究了CLYC、CLLB、PS中子伽马多模探测器的性能
 - CLYC综合性能最优，实现快中子、热中子、伽马能谱探测
 - 热中子、快中子信号存在一定的差异
 - 实现了堆积脉冲的psd甄别
 - ANN网络在psd甄别领域优势显著



致谢

- 感谢科技部、基金委、四川省科技厅等的资助
- 感谢合作者
 - 高能所：钱森，王志刚，...
 - 中国计量大学：秦来顺，...
 - 课题组成员：曲国峰、刘星泉、林炜平，...
 -
- 欢迎到四川大学访问指导
- 谢谢！

