

晶体中子束流测试

报告人：郭聪

中国科学院高能物理研究所

2016-08-24



主要内容

■ 一、背景介绍



WHY

■ 二、实验介绍



HOW

■ 三、实验结果



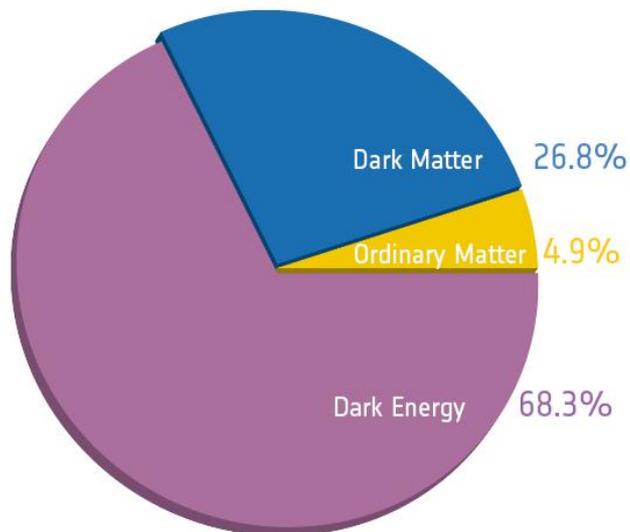
WHAT

■ 四、总结展望

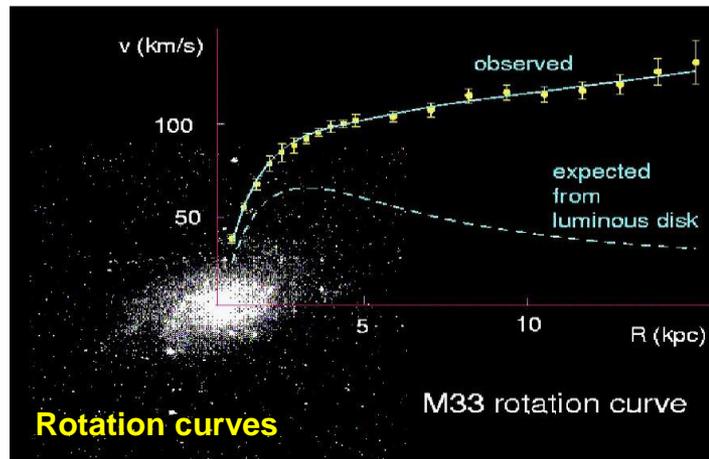


SUMMARY

一、背景介绍



物质组成



暗物质存在证据

■ 宇宙组成

- 暗能量, 暗物质, 普通物质

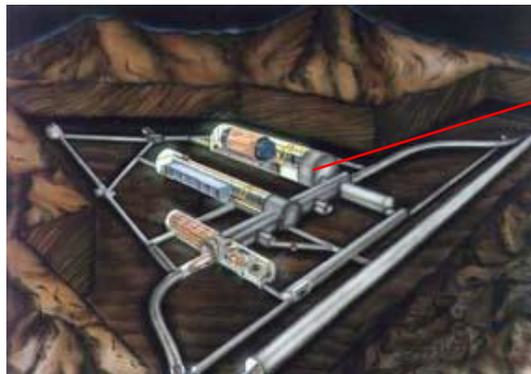
■ 暗物质

- 轴子, 弱相互作用大质量粒子 (WIMP)



暗物质探测方式

地下探测



DAMA、Xenon 等

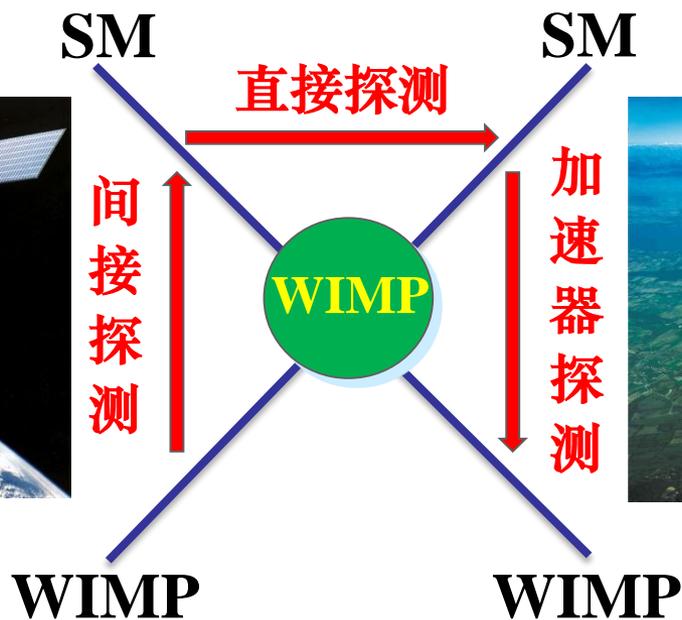
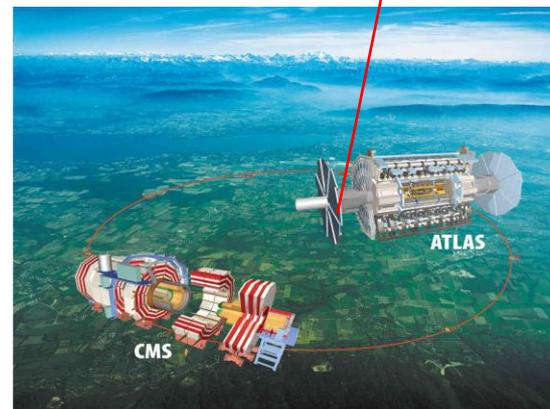
AMS02 等

空间探测



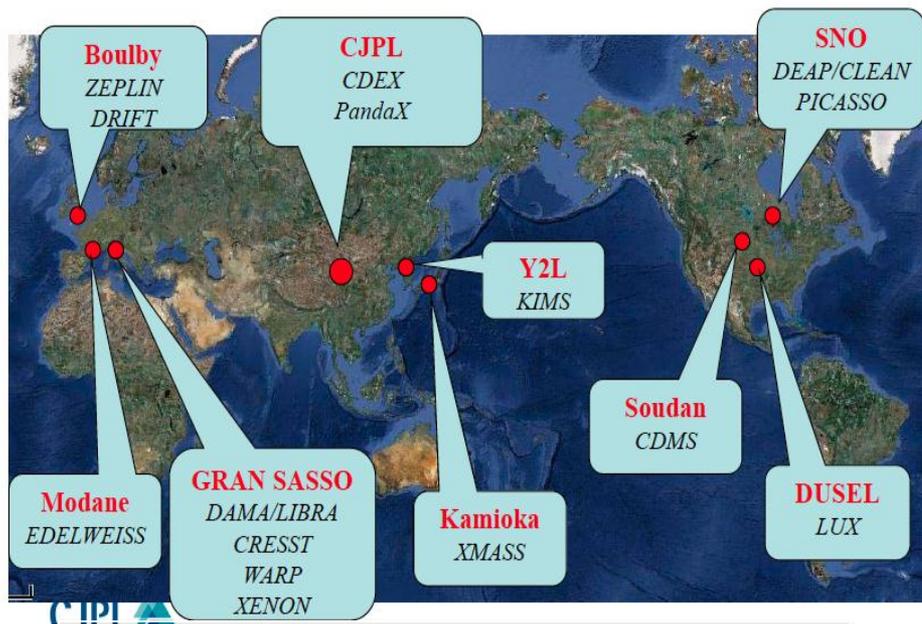
CMS、ATLAS 等

LHC

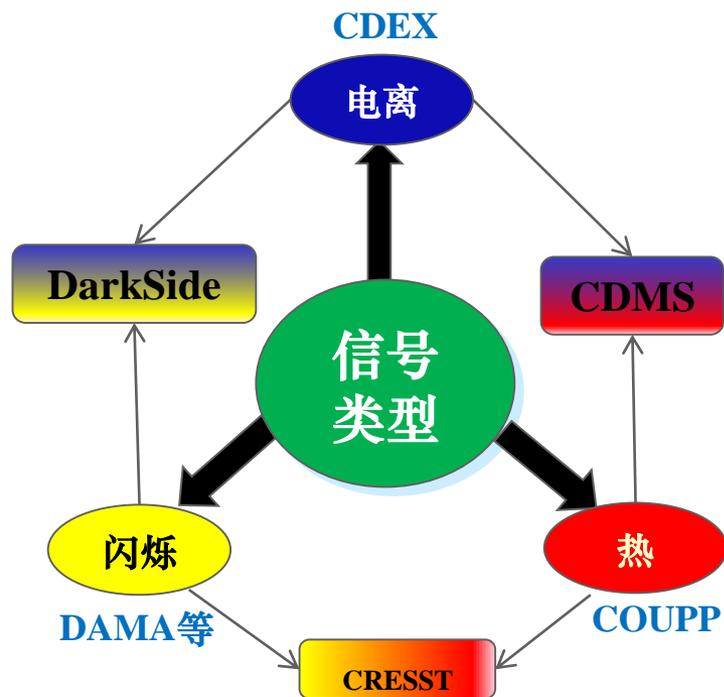


暗物质直接探测

- 直接探测分类：自旋无关，自旋相关；
- WIMP与靶核散射：测量核反冲能量；
- 信号类型：类似于中子与核子弹性散射信号；
- 本底：主要来源为 γ ，事例率比信号高三个量级以上；



世界上的地下实验室和大量的暗物质实验



直接探测实验现状

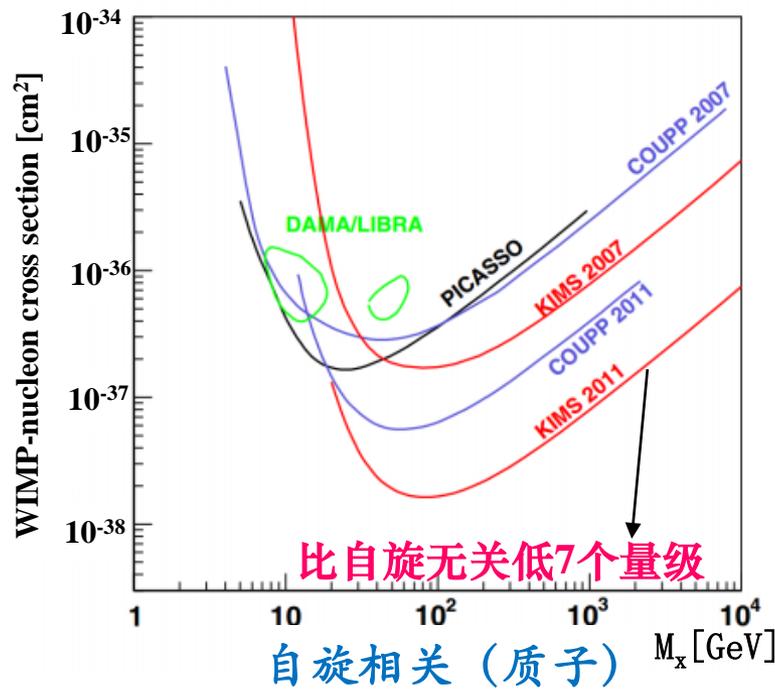
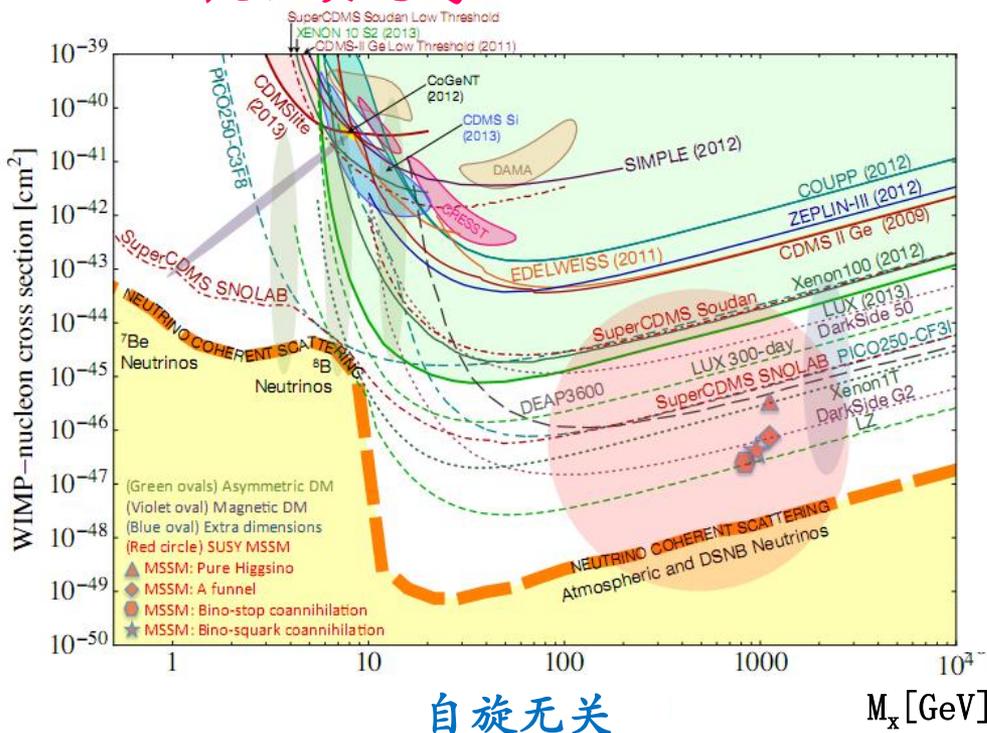
■ 自旋无关

- 规模大，灵敏度高，接近中微子本底

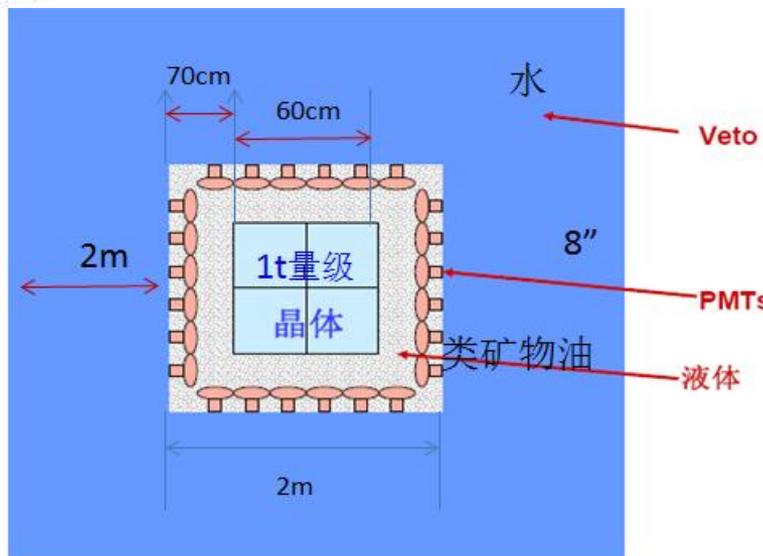
■ 自旋相关

- 实验规模小，灵敏度低（比自旋无关截面低7个量级），需要做大
- 含F晶体在自旋相关暗物质探测方向很有优势， ^{19}F 具有最大的自

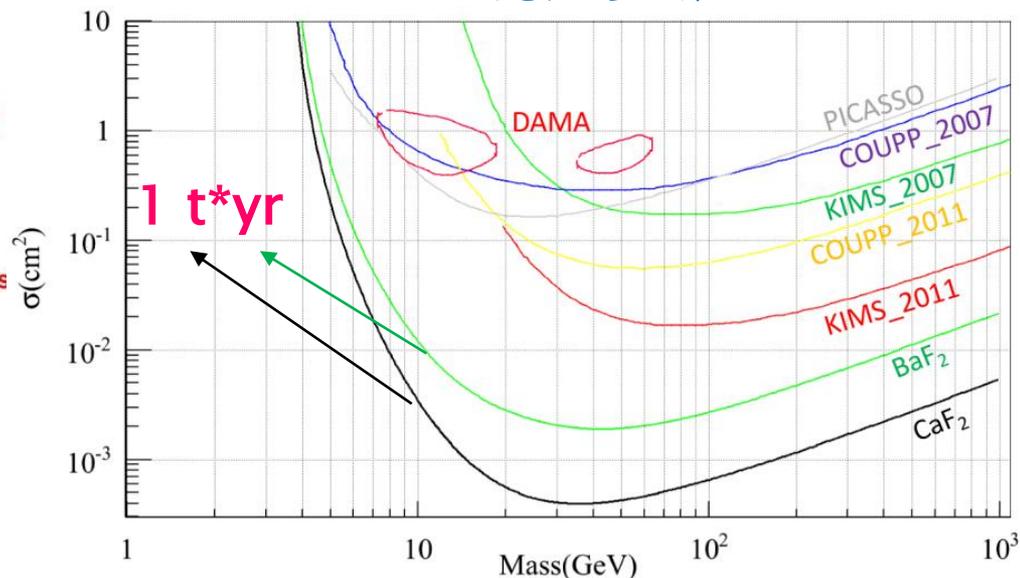
旋相关因子



实验预期与待解决问题



灵敏度预期



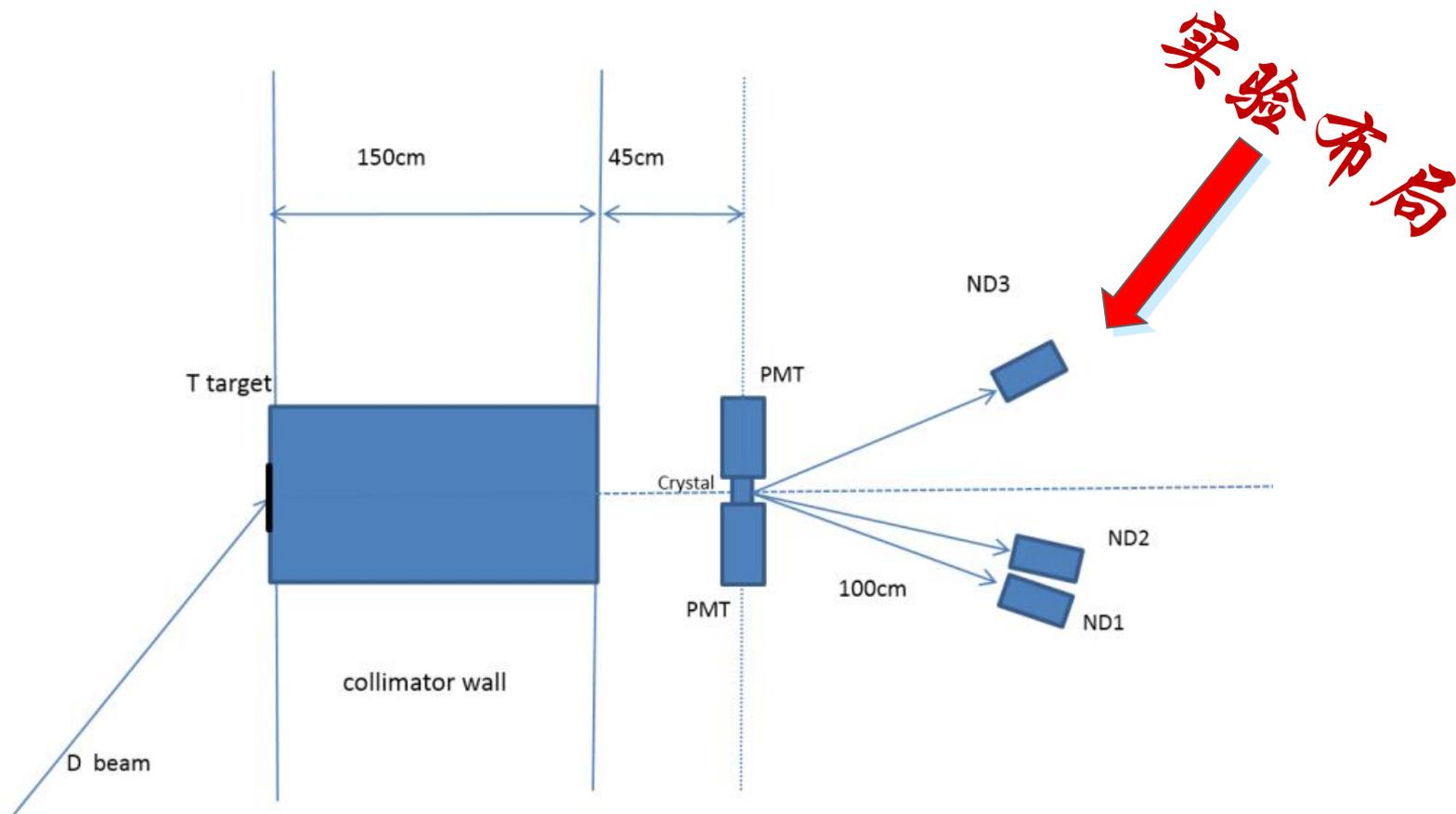
- $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 与 BaF_2 晶体内部放射性本底较高;
- $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 与 BaF_2 本底区分能力尚无准确结果;



束流测试



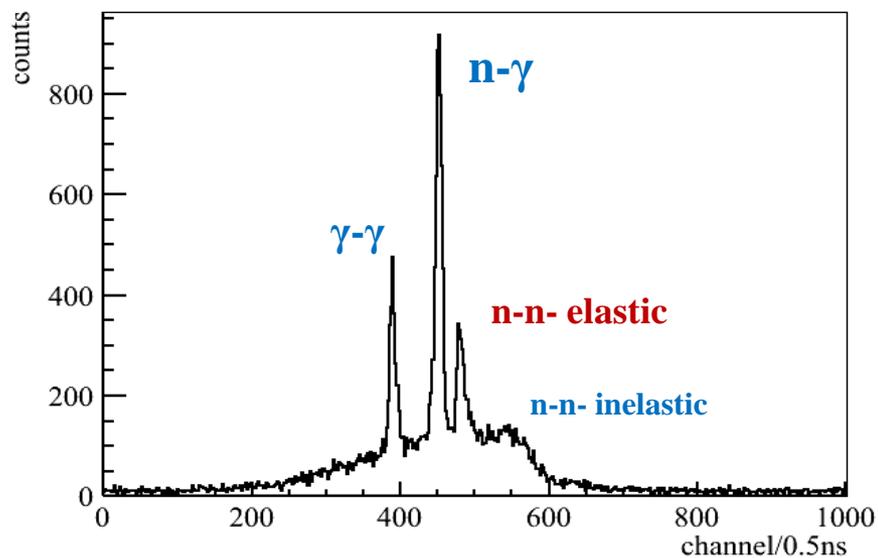
二、实验介绍



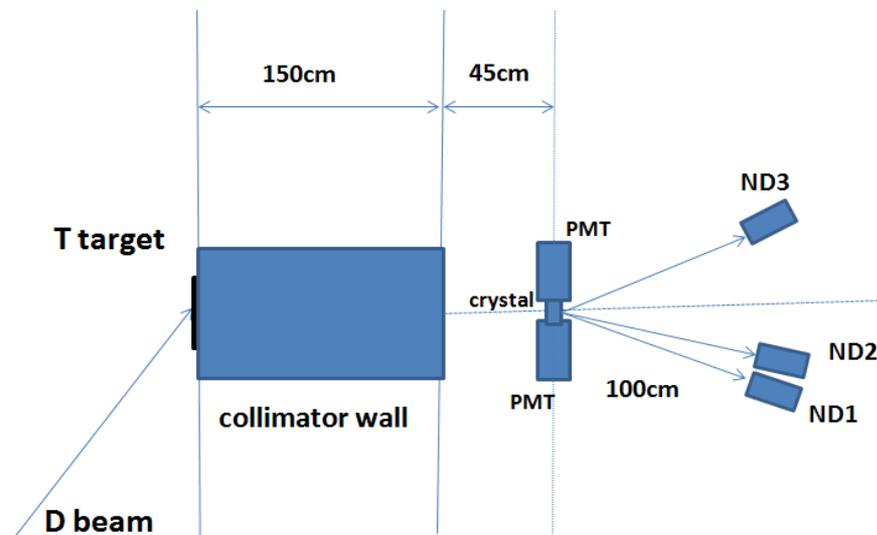
- 1、实验装置：中国原子能研究院高压倍加器，14.7 MeV脉冲中子束流；
- 2、测试晶体：CsI(Na) ^{【1】}、CaF₂(Eu)、BaF₂；



束流数据—事例组成



飞行时间谱

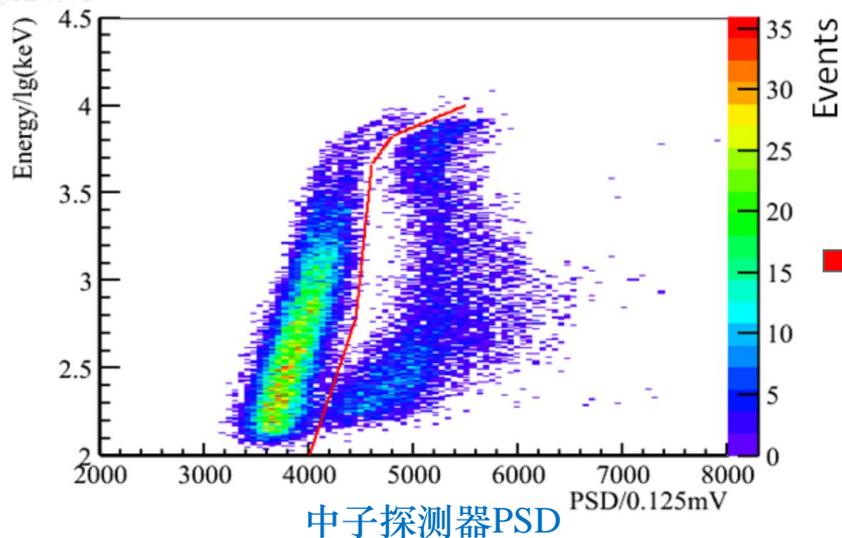


实验布局图

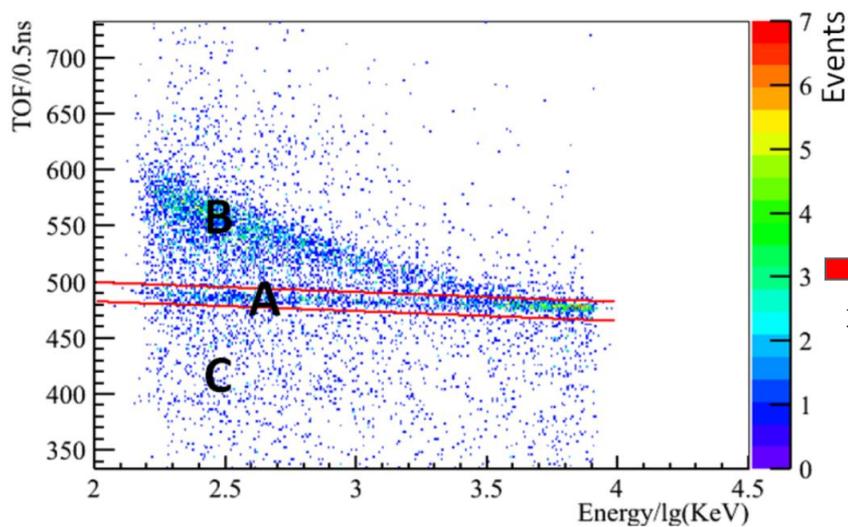
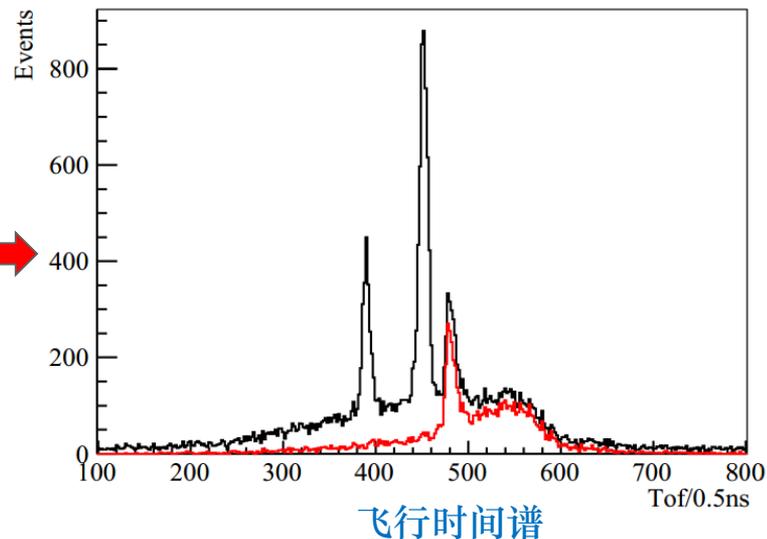
➤ 国内外发表的同类实验中最为准确的飞行时间谱；

事例挑选

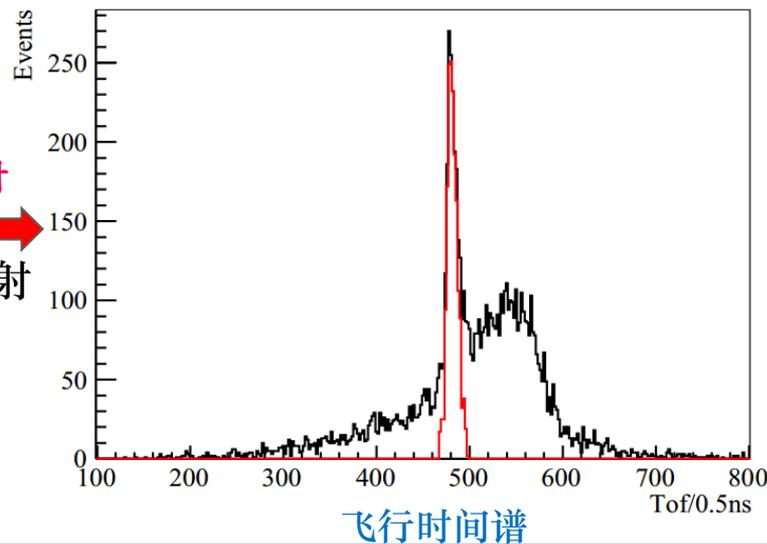
➤ 使用二维cut条件，有效去除本底



中子
γ

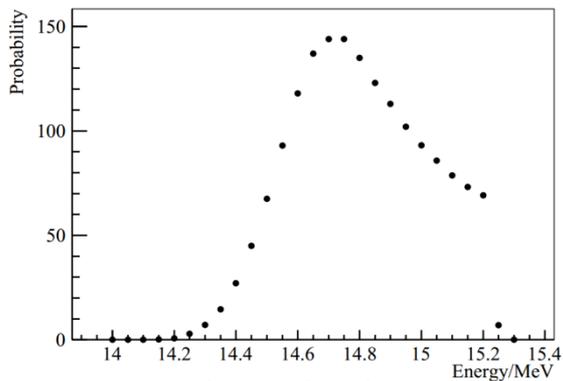


弹性散射
非弹性散射

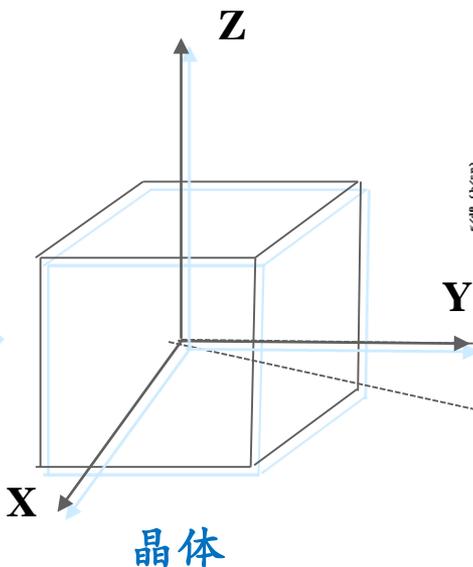




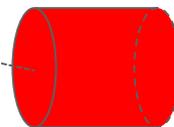
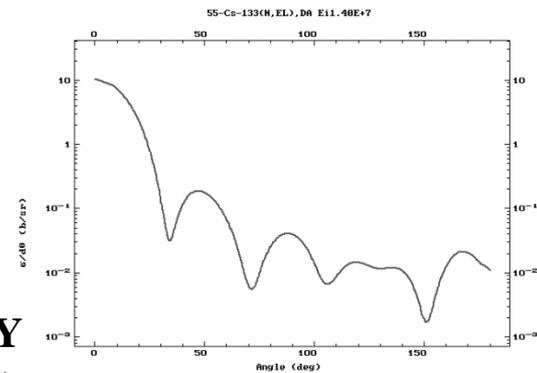
弹性散射事例模拟



中子能谱



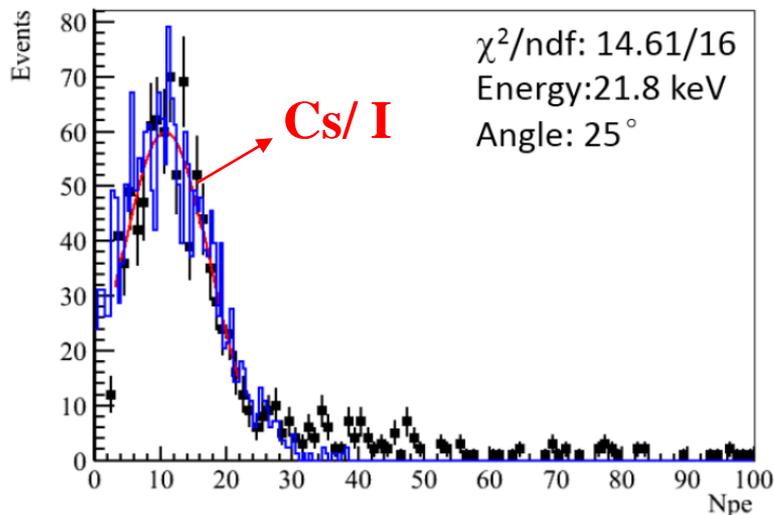
晶体



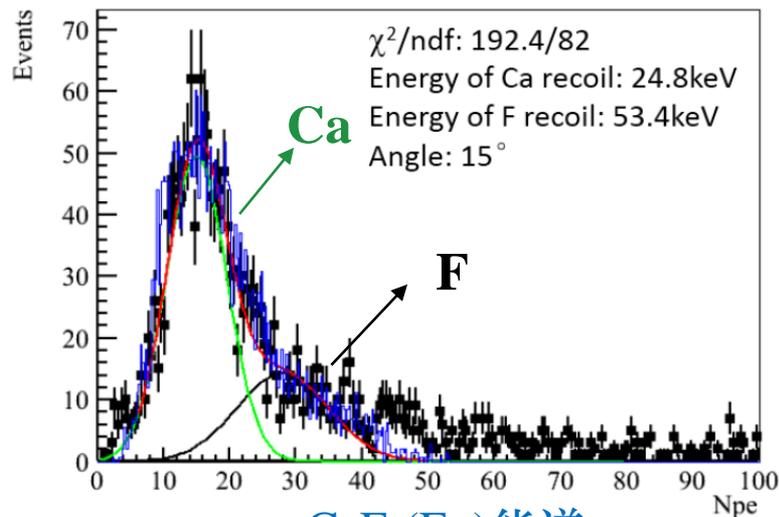
ND

- 中子能量按照能谱进行抽样;
- 弹性散射事例均匀分布于晶体之内;
- 出射方向按照截面进行抽样;
- 中子探测器按照击中位置的不同而产生不同的效率;

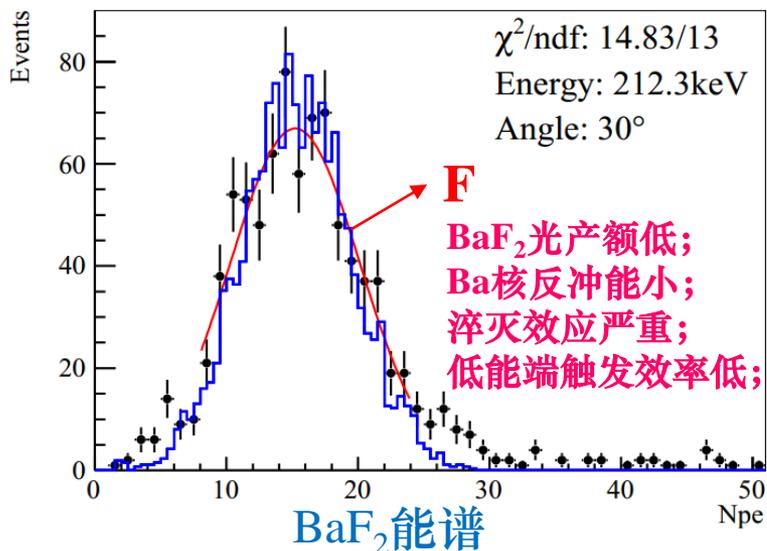
三、实验结果



CsI(Na)能谱



CaF₂(Eu)能谱



BaF₂能谱

➤ 黑点为数据，蓝线为模拟，红线绿线为拟合结果；

➤ 模拟结果与数据结果一致；

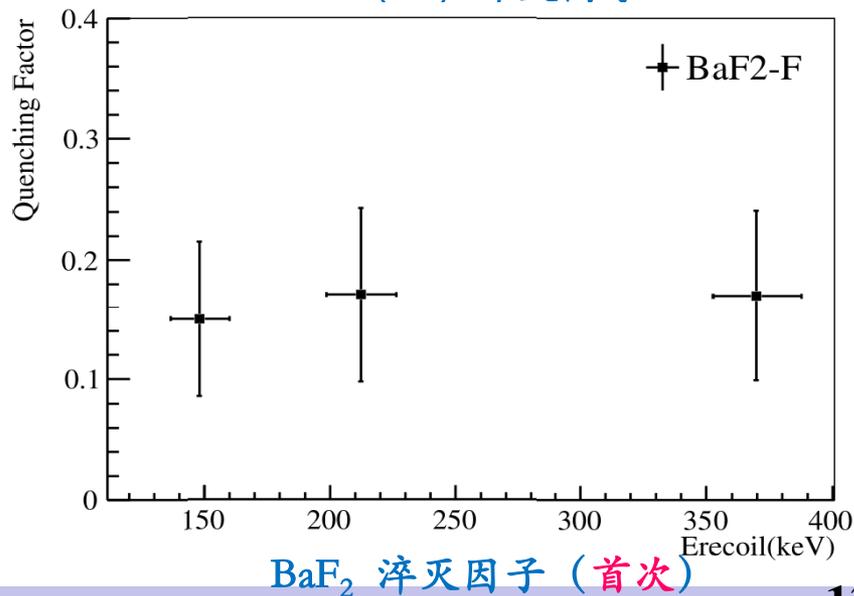
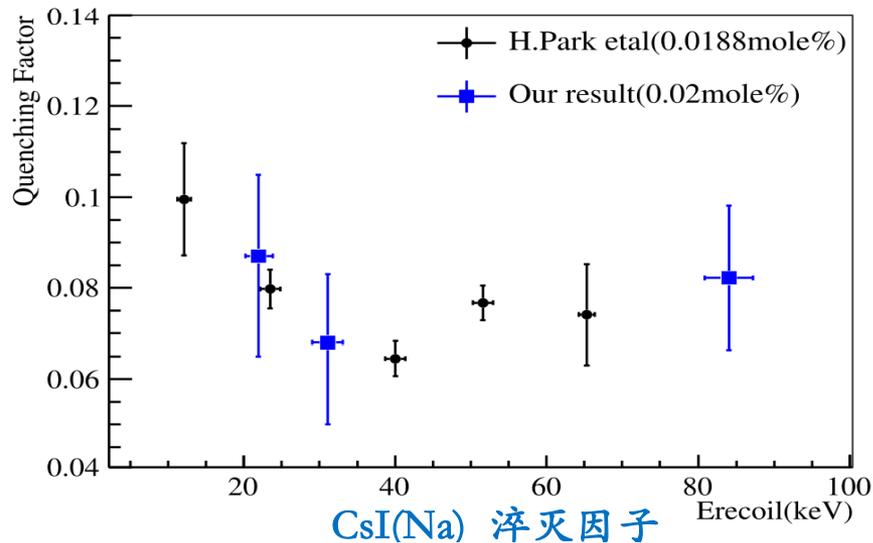
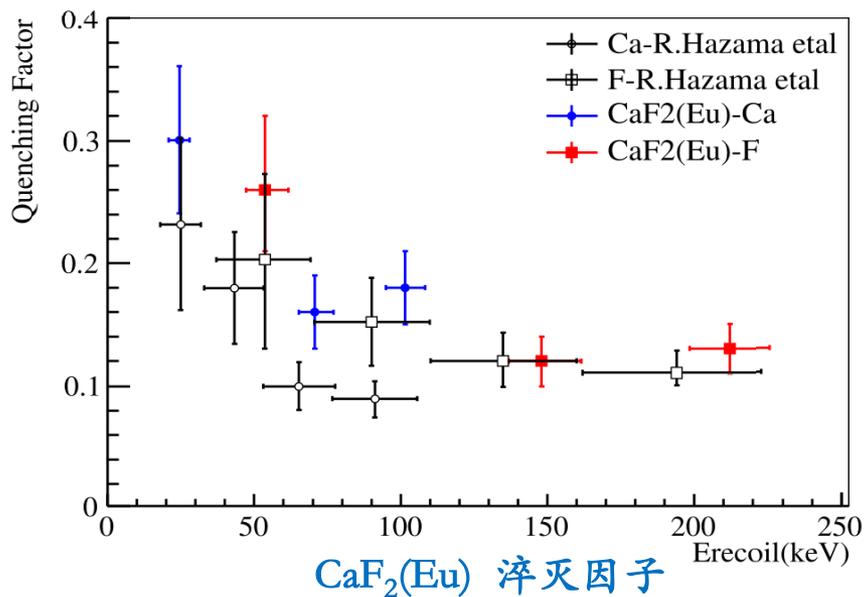
淬灭因子

➤ 淬灭因子对暗物质能量测量至关重要

$$\text{淬灭因子: } Q = \frac{E_{meas}}{E_{recoil}}$$

E_{meas} : 实验中测到的能量;

E_{recoil} : 反冲能, 计算得到的能量;



晶体n/γ分辨能力 [2]

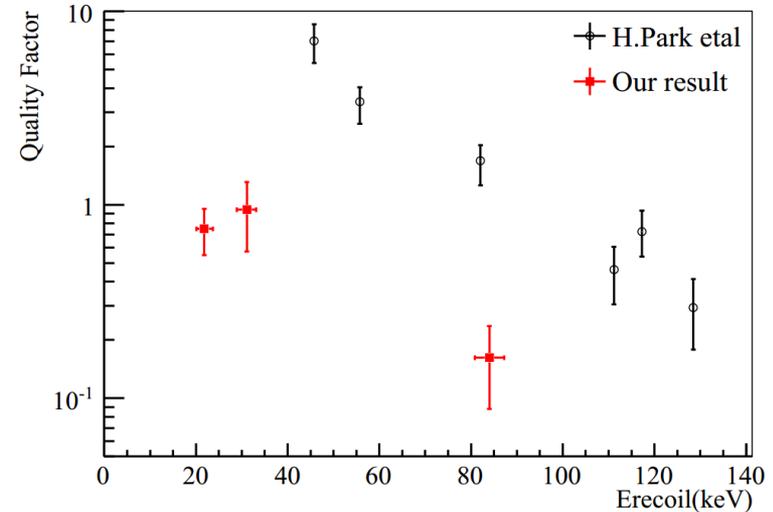
➤ 品质因子: $K = \frac{\beta(1-\beta)}{(\alpha-\beta)^2}$

α : 某一判别条件下, 信号通过的比例;

β : 同一判别条件下, 本底通过的比例;

➤ 品质因子为区分核反冲、电子反冲事例的标志, 取值范围 $(0 \sim +\infty)$, 越接近0, 代表分辨能力越强!

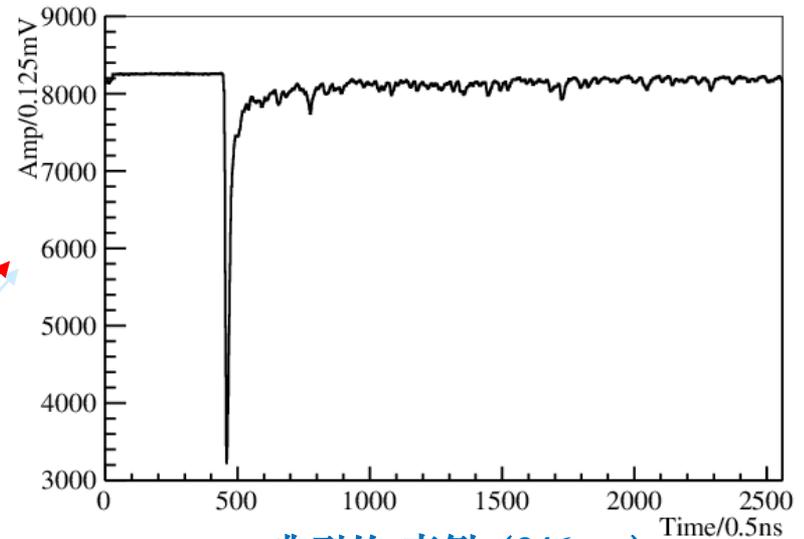
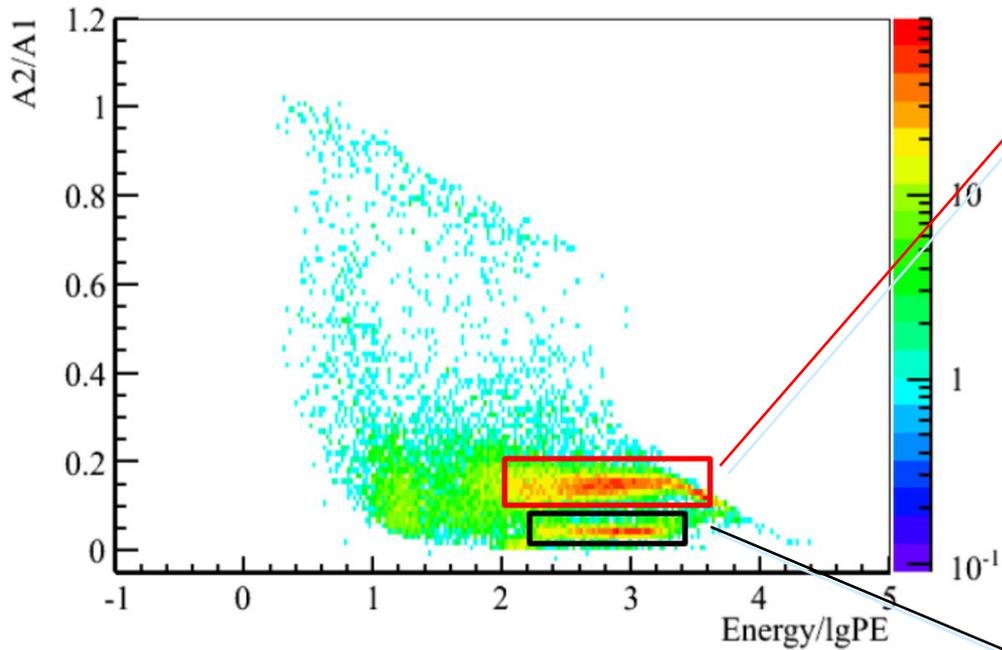
➤ 提出新的判别因子, 将KIMS结果 (之前发表最好) 提高一个量级;



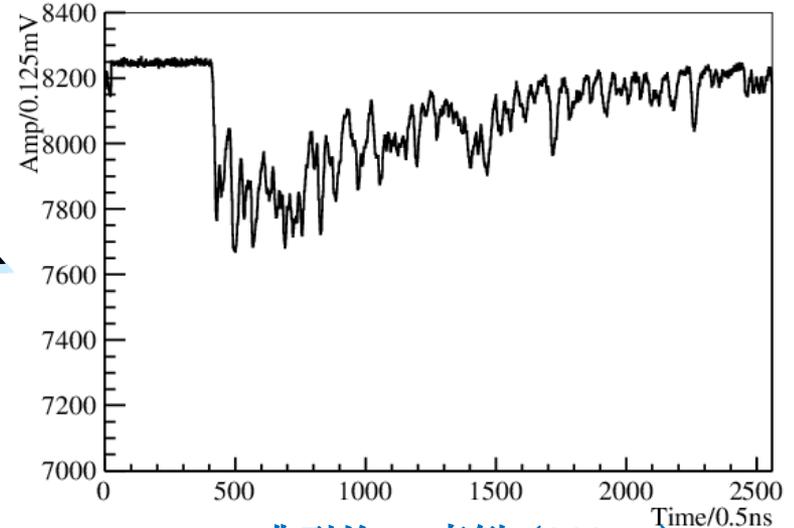
CsI(Na)品质因子



BaF₂ 晶体结果讨论 [3]



典型的 γ 事例 (346p.e.)

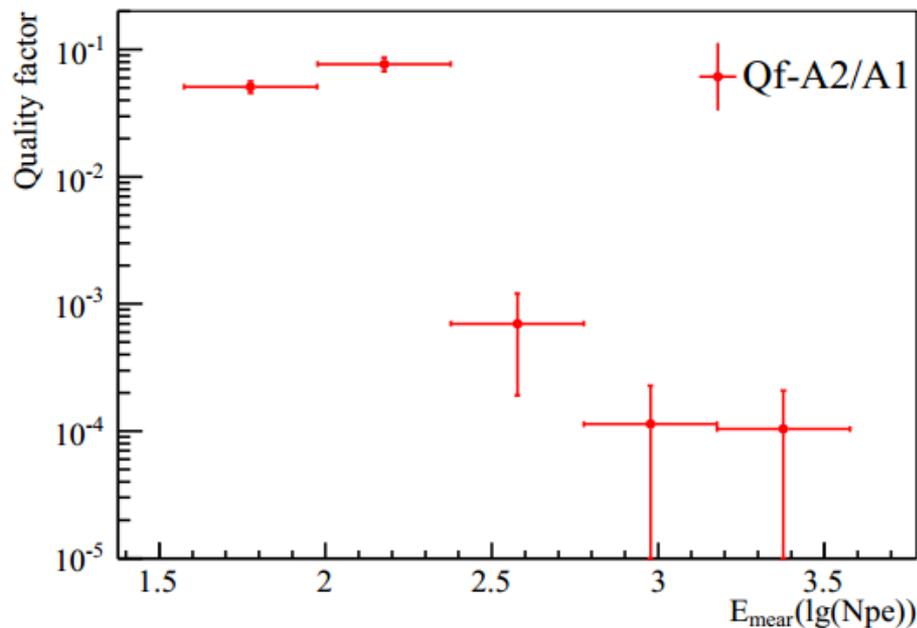
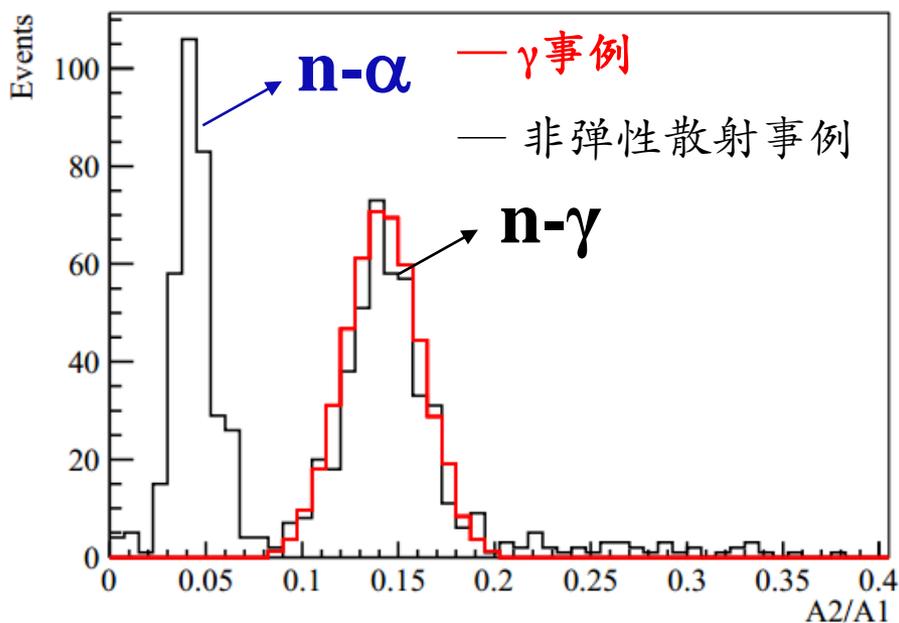


典型的n- α 事例 (344p.e.)

A2: 信号前25ns的电荷;
A1: 整个信号的电荷;
A2/A1: 快信号所占的比重;



BaF₂ 晶体结果讨论



➤ BaF₂ 晶体在高能端具有很好的 n/γ 分辨能力；



四、总结与展望

- 通过调研、计算发现，自旋相关的暗物质直接探测实验是一个“浅矿区”，理论预言含F晶体在此领域具有一定的优势；
- 为测试晶体的n/γ分辨能力进行束流测试实验，获得晶体n/γ分辨能力的准确结果；
- CsI(Na)晶体在低能端具有一定的n/γ分辨能力，CaF₂(Eu)晶体没有发现明显的n/γ分辨能力，BaF₂晶体在高端具有极好的n/γ分辨能力；
- CaF₂(Eu)与BaF₂晶体内部放射性过高是其在自旋相关暗物质探测领域的应用的主要限制，降低其内部天然放射性是关键；

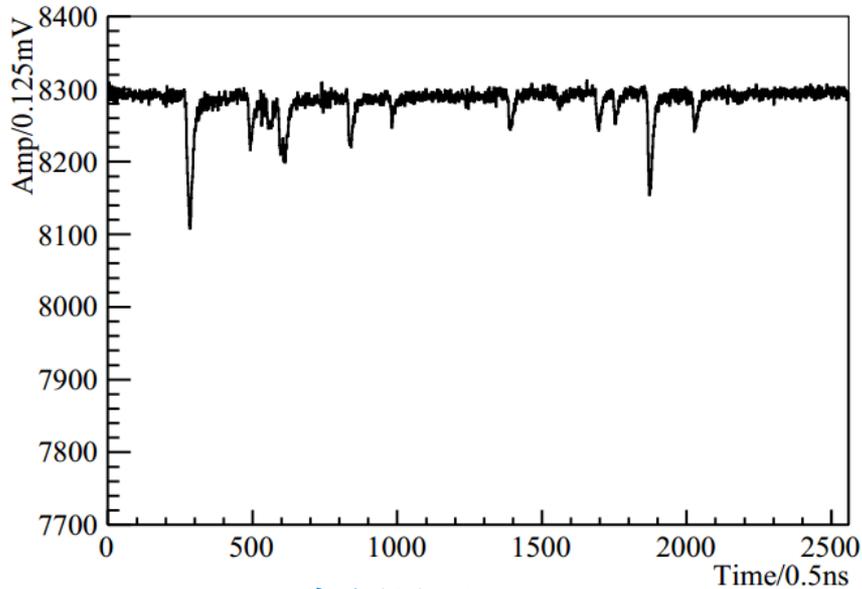


backup

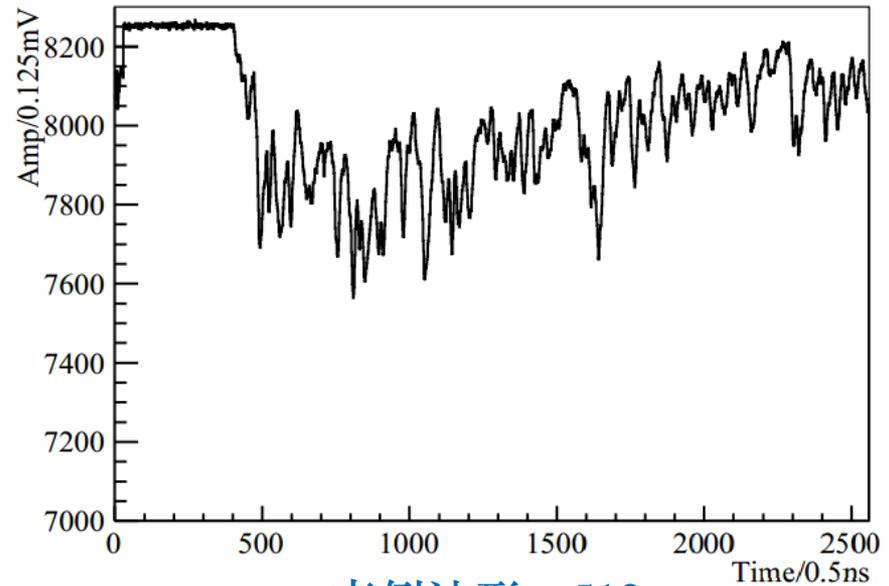


波形举例

▶ 不同于普通的高能物理实验，晶体衰减时间长，基线影响大



事例波形—13p.e.

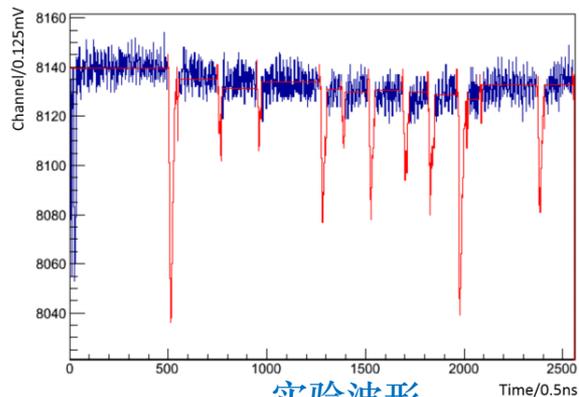


事例波形—512p.e.

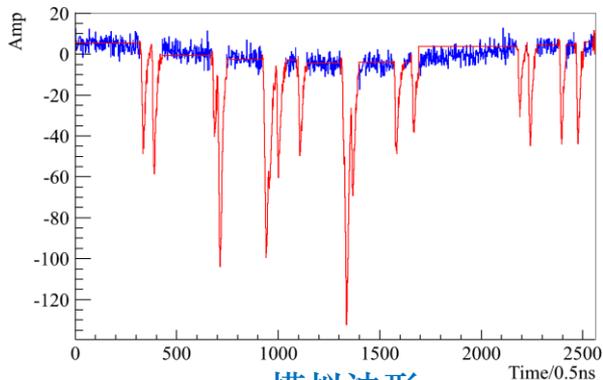
- 1、CsI(Na) 衰减时间：630ns；
- 2、CaF₂(Eu) 衰减时间：940ns；
- 3、BaF₂ 衰减时间：0.9ns($\sim 1/6$), 650ns ($\sim 5/6$) ；



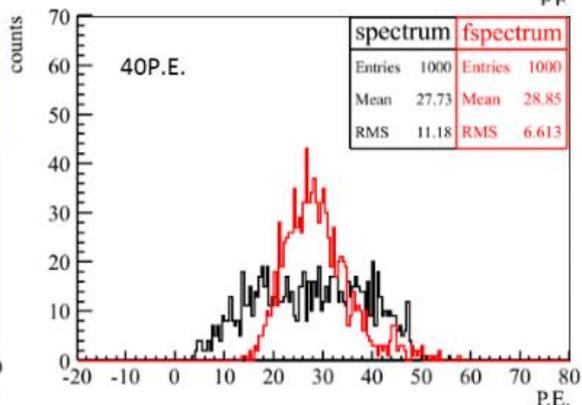
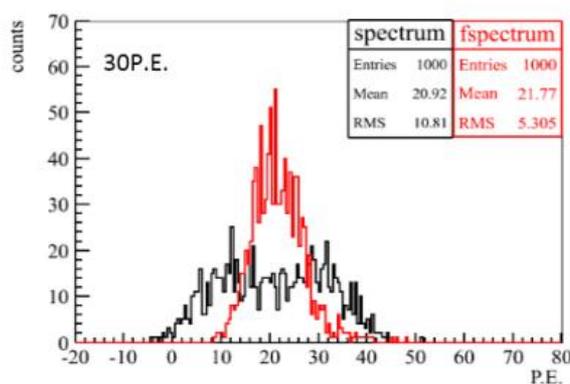
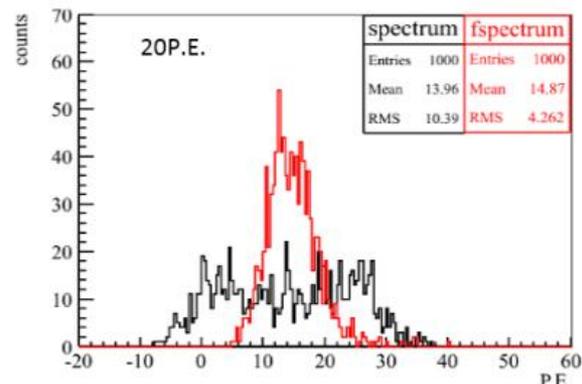
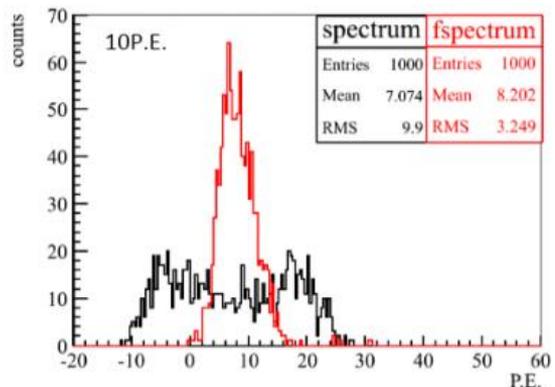
能量重建—浮动基线法



实验波形



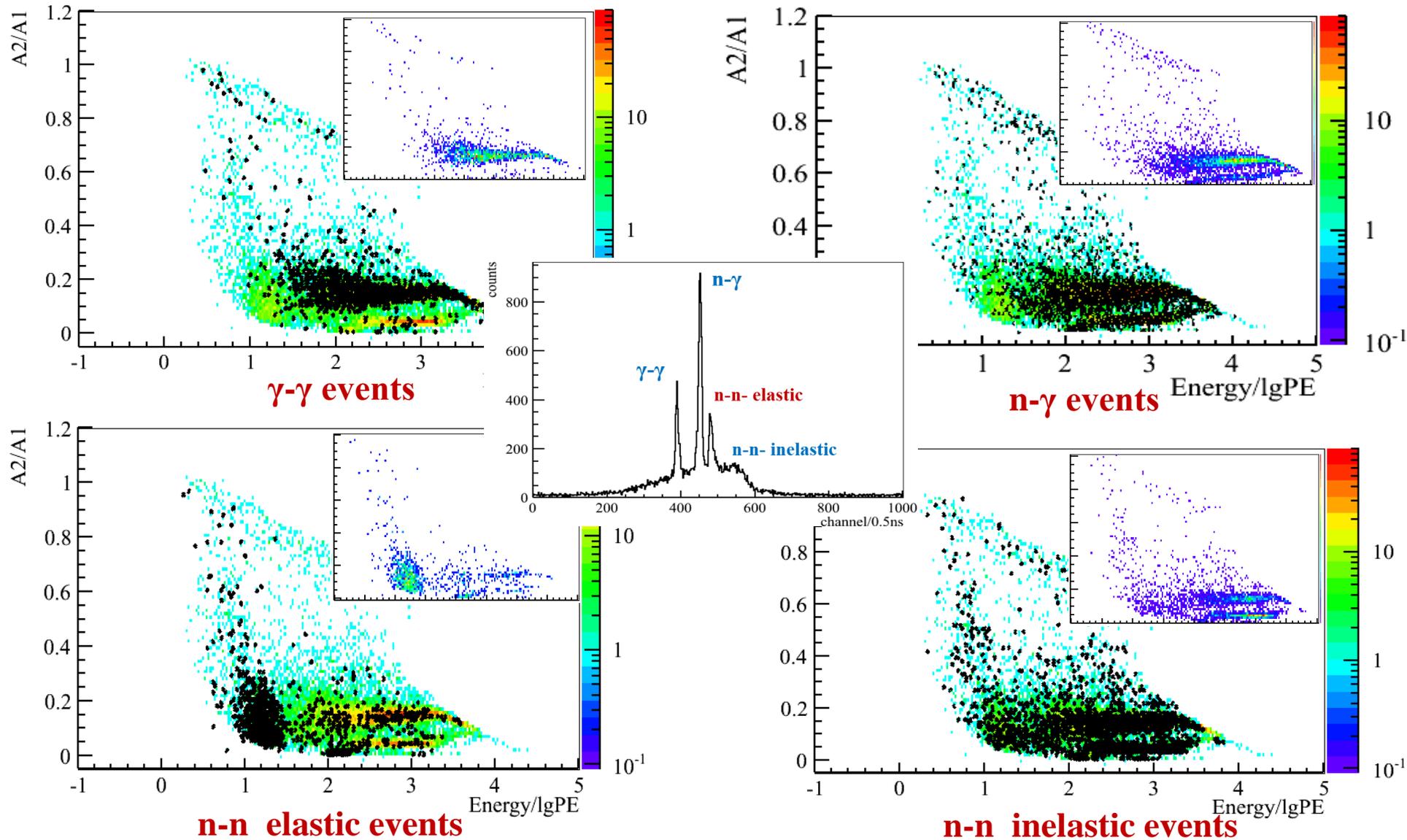
模拟波形



- 加速器带来干扰，基线波动大；
- 实现利用浮动基线法计算能量的新想法，提高能量重建精度；



BaF₂ 晶体结果讨论

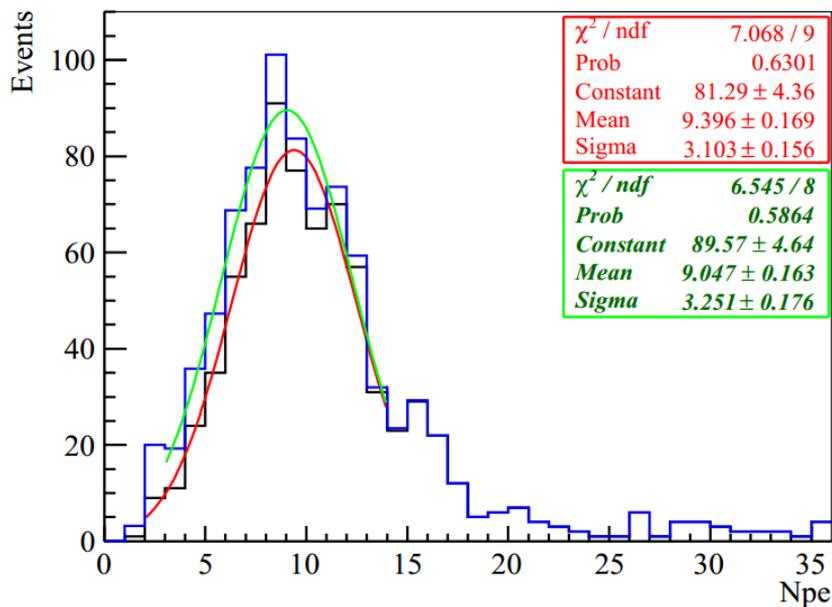


实验结果——淬灭因子误差分析

淬灭因子: $Q = \frac{E_{meas}}{E_{recoil}}$

E_{meas} : 实验中测到的能量;

E_{recoil} : 反冲能, 计算得到的能量;



晶体	系统误差
CsI(Na)	18.6%
CaF ₂ (Eu)	15.4%
BaF ₂	41.5%

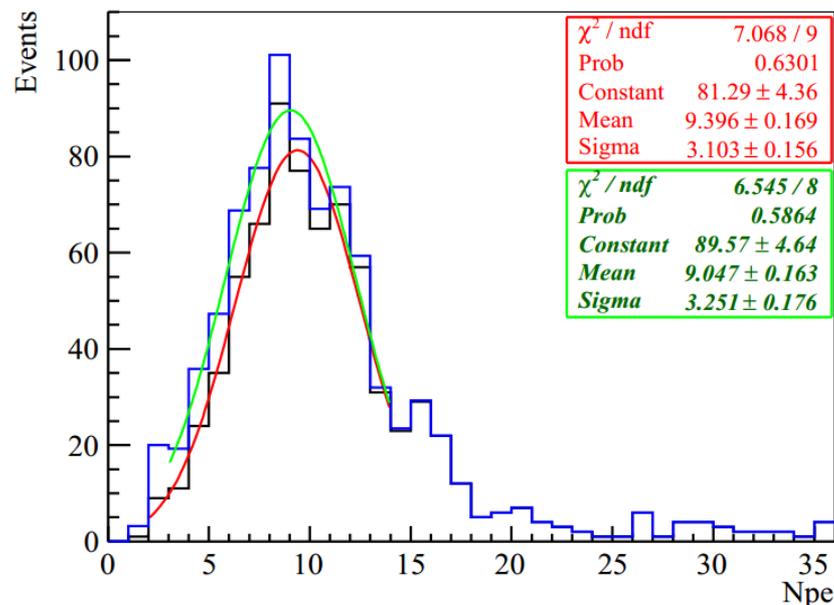
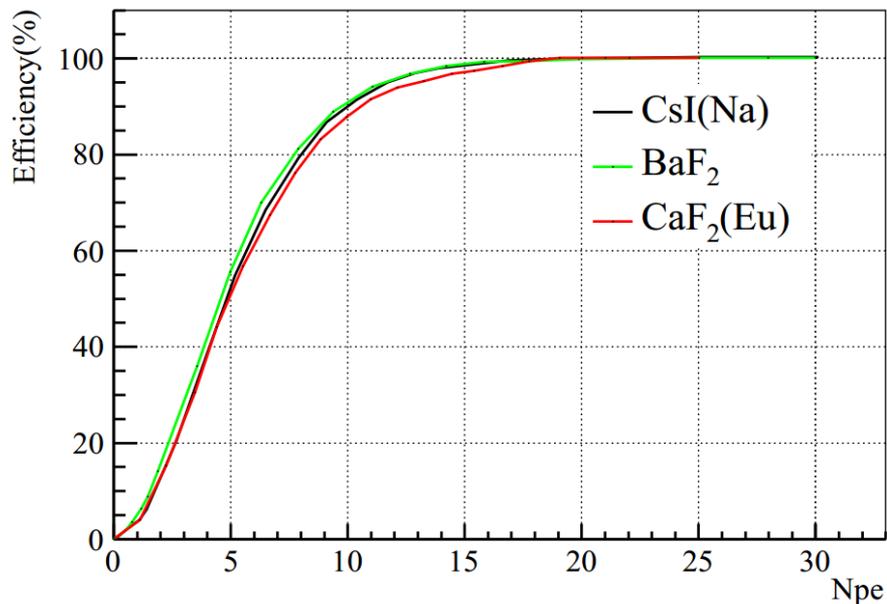
系统误差

晶体	角度	中子探测器	效率误差
CsI(Na)	25°	ND3	14.6%
	30°	ND1	14.6%
	50°	ND2	0
CaF ₂	15°	ND2	2.3%
	25°	ND3	0
	30°	ND1	0
BaF ₂	25°	ND3	4.0%
	30°	ND1	1.3%
	40°	ND2	0

效率误差



触发效率模拟



- 阈值设置：两PMT收到1p.e.以上，且时间时间间隔在100ns以内；
- 晶体衰减时间长，光子按照晶体衰减时间向外发射，在低能时触发效率较低；
- 10p.e. 以上效率接近100%，对目标能量影响不大；



暗物质能量沉积

核子反冲能:

$$E_R = \frac{M_\chi v^2}{2} \frac{4M_\chi M_A}{(M_\chi + M_A)^2} \frac{1 - \cos\theta}{2}$$

假设暗物质与核子对头碰撞，且 $M_\chi = M_A$ ，那么核子平均能量:

$$\langle E_R \rangle = \frac{1}{2} M_\chi v_0^2 \approx 15 \text{ keV} \leftarrow \begin{array}{l} M_\chi = 50 \text{ GeV}/c^2 \\ v_0 = 220 \text{ km/s} \end{array}$$

核子最大能量:

$$E_{\text{max}} = \frac{1}{2} M_\chi v_{\text{esc}}^2 = \frac{v_{\text{esc}}^2}{v_0^2} \langle E_R \rangle \approx 6 \langle E_R \rangle$$

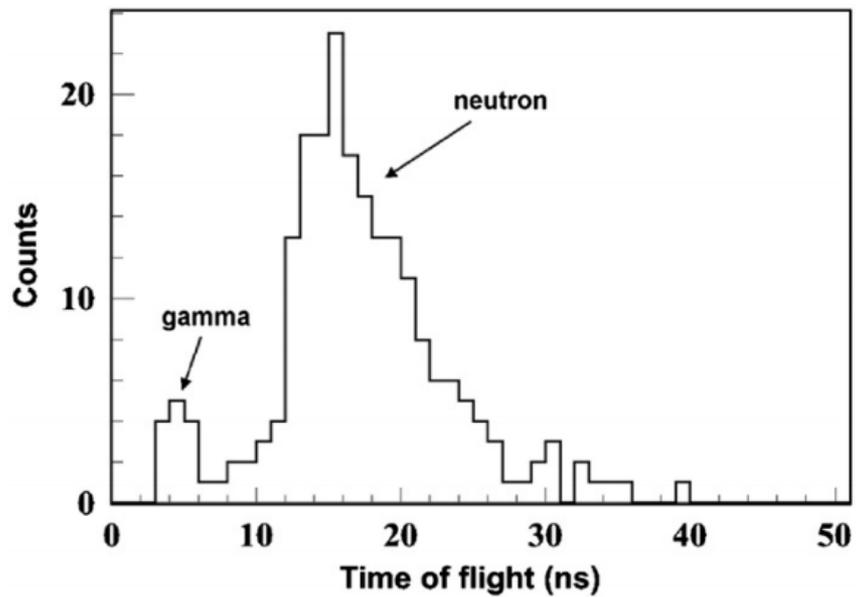
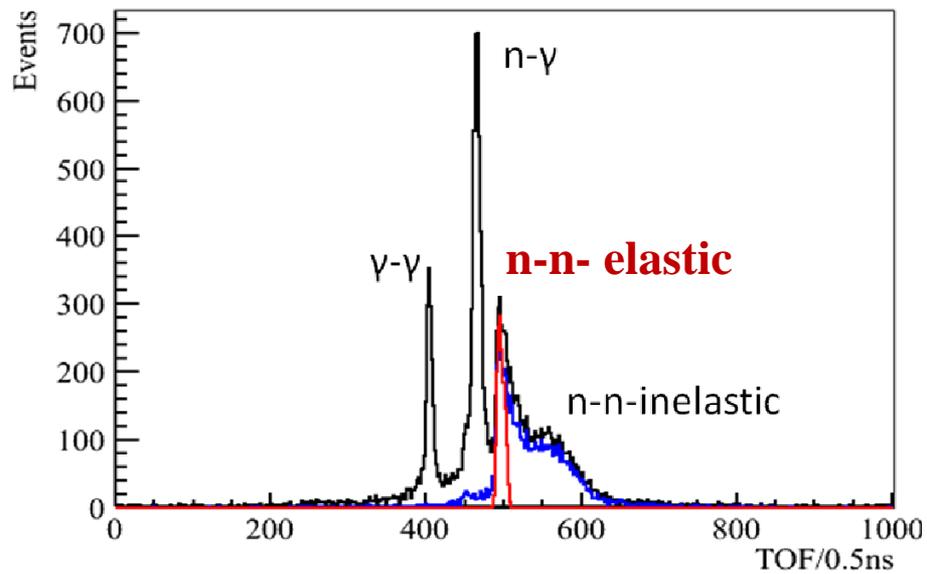


Fig. 5. TOF spectrum of neutron and γ . The right peak is from neutrons while the left small peak is from γ s.



束流与中子探测器飞行时间谱

