



COUSP 2024

液氦反应堆中微子探测器 原型机的开发、运行和测试

清华大学 赵一飞

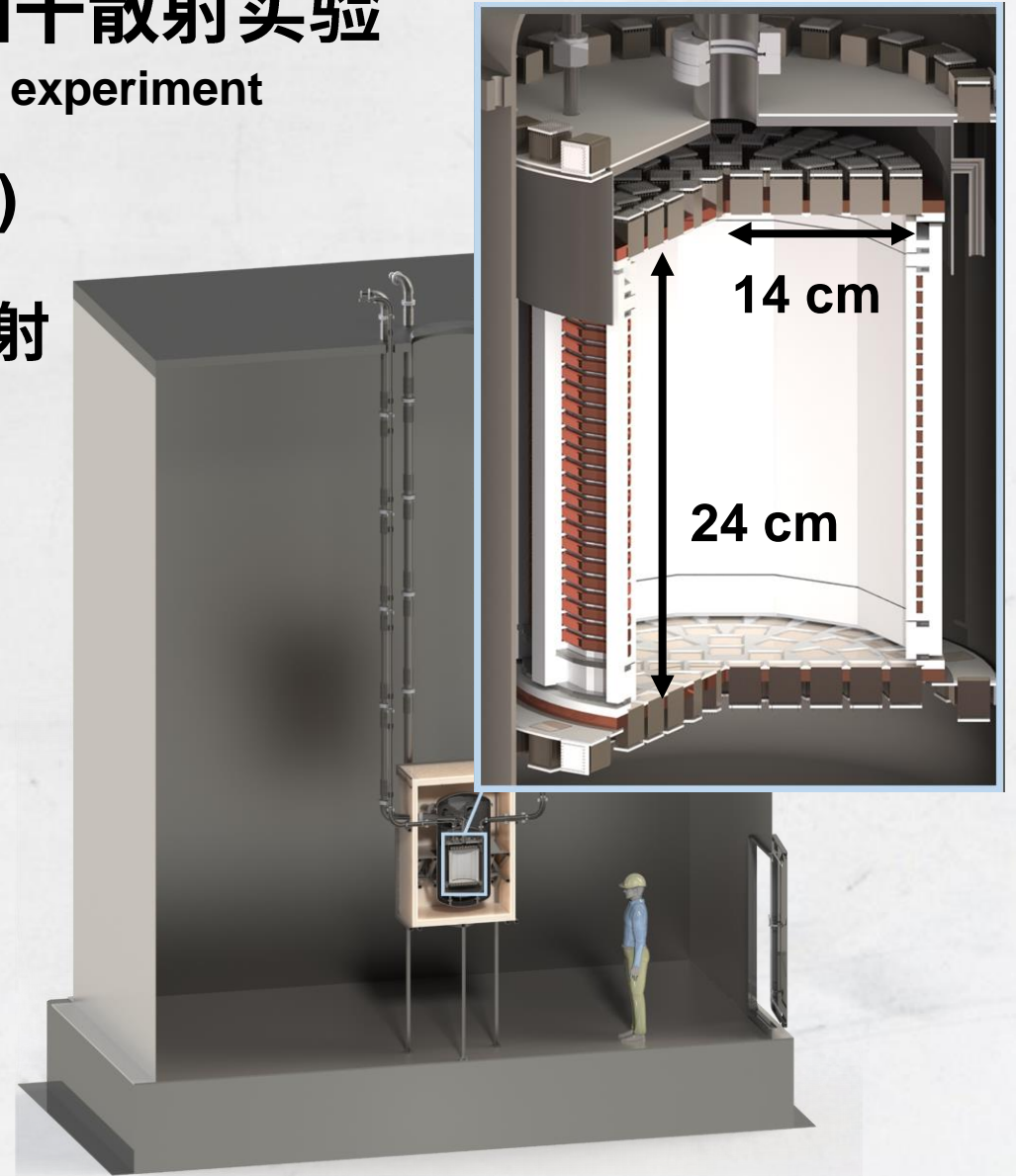
On behalf of RELICS Collaboration

2024/05/09

RELICS 实验：反应堆中微子液氙相干散射实验

REactor neutrino LIquid xenon Coherent Scattering experiment

- 探测技术：两相型氙时间投影室 (LXeTPC)
- 探测反应堆中微子和原子核的相干弹性散射
- 选址在 三门核电站
距离堆芯 ~ 25 m，流强 $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- ~ 50 kg 灵敏体积，128 光电倍增管 (PMT)
- 验证可行性、改进探测技术：
搭建小型的**原型机**



credit to X. Xiao and J. Chen

RELICS 原型机

RELICS 探测器

✓
✓
✓
✓
✓
✓
~50 kg
128

制冷、循环、纯化系统
高速信号读出、数据采集
刻度源标定
液面位置控制
4 π Veto + Muon Veto
屏蔽体、低本底材料
液氙有效质量
TPC PMT

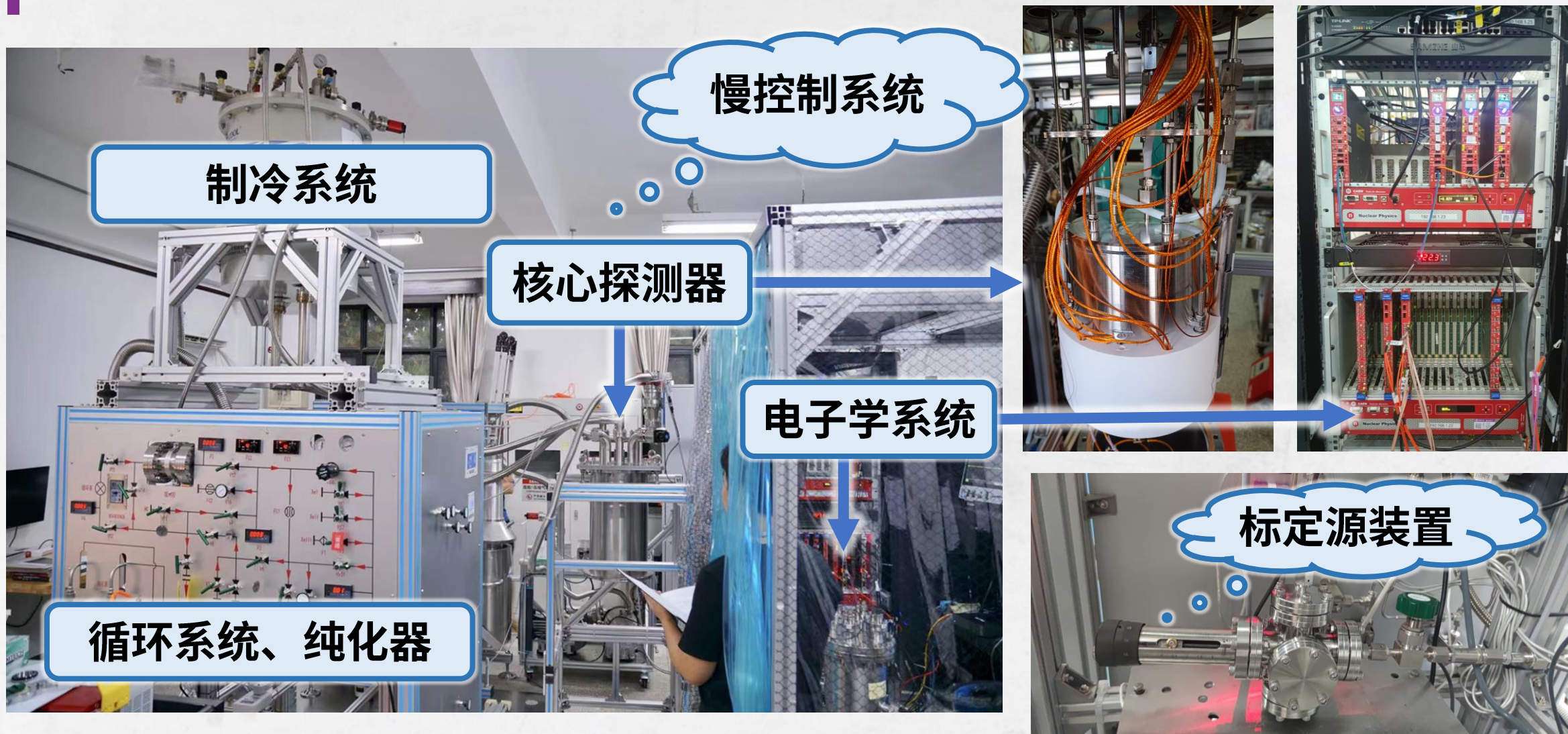
RELICS 原型机

✓
✓
✓
✓
→
SOON
✗
~0.56 kg
8

RELICS 原型机测试目标和进展

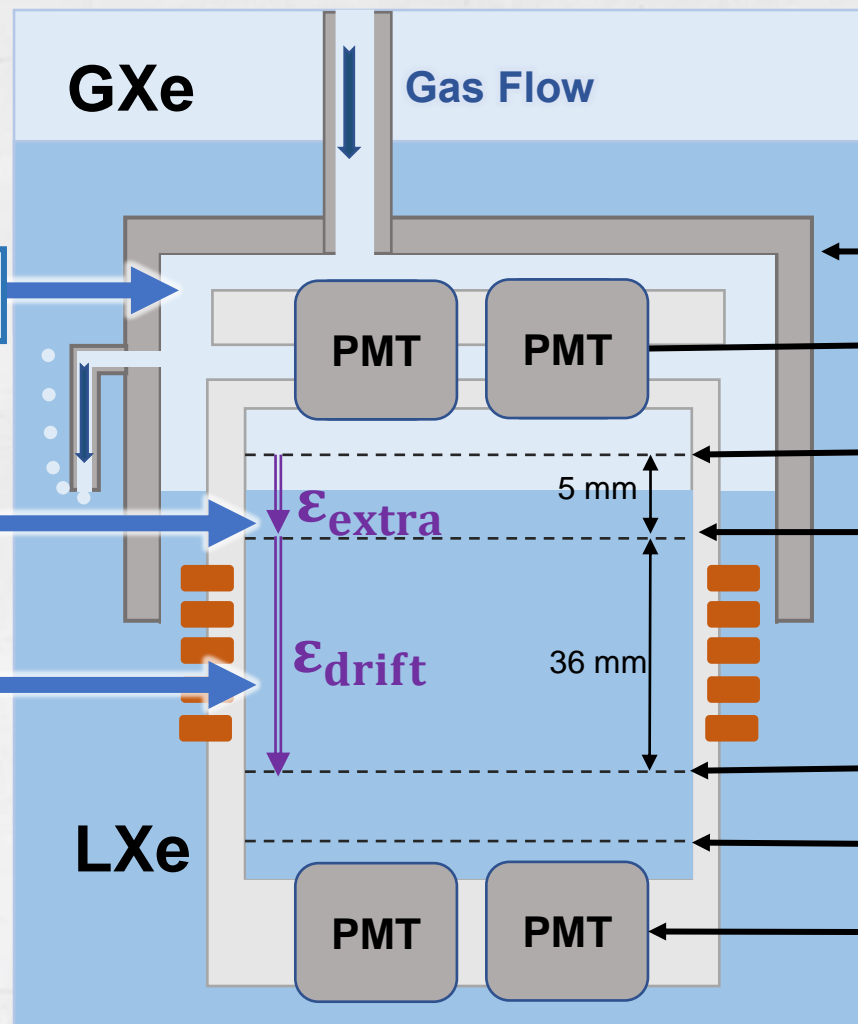
- ✓ I. 验证 RELICS 的实验技术
- ✓ II. 初步实现极低阈值探测
- ✓ III. 制作、测试刻度源，标定探测器的响应
- ▶ 理解延迟电子、电子反冲本底等本底
- ▶

I. RELICS 原型机探测器系统



credit to L. Xie

I. 核心探测器



潜水钟

顶部光电管阵列

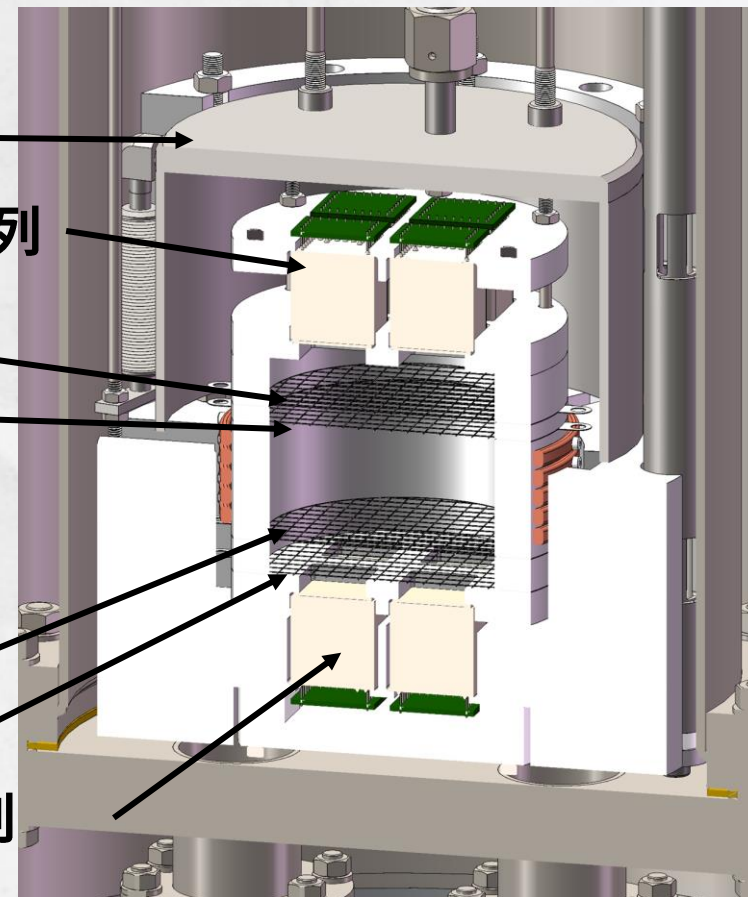
阳极

门电极

阴极

屏蔽极

底部光电管阵列



Credit to L.Xie

I. 慢控制系统

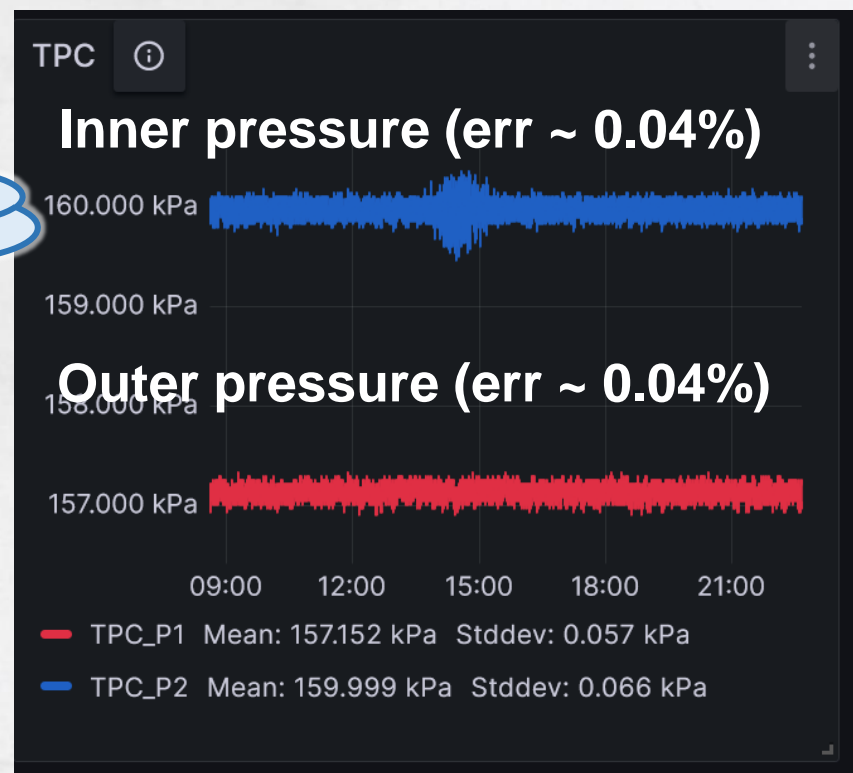
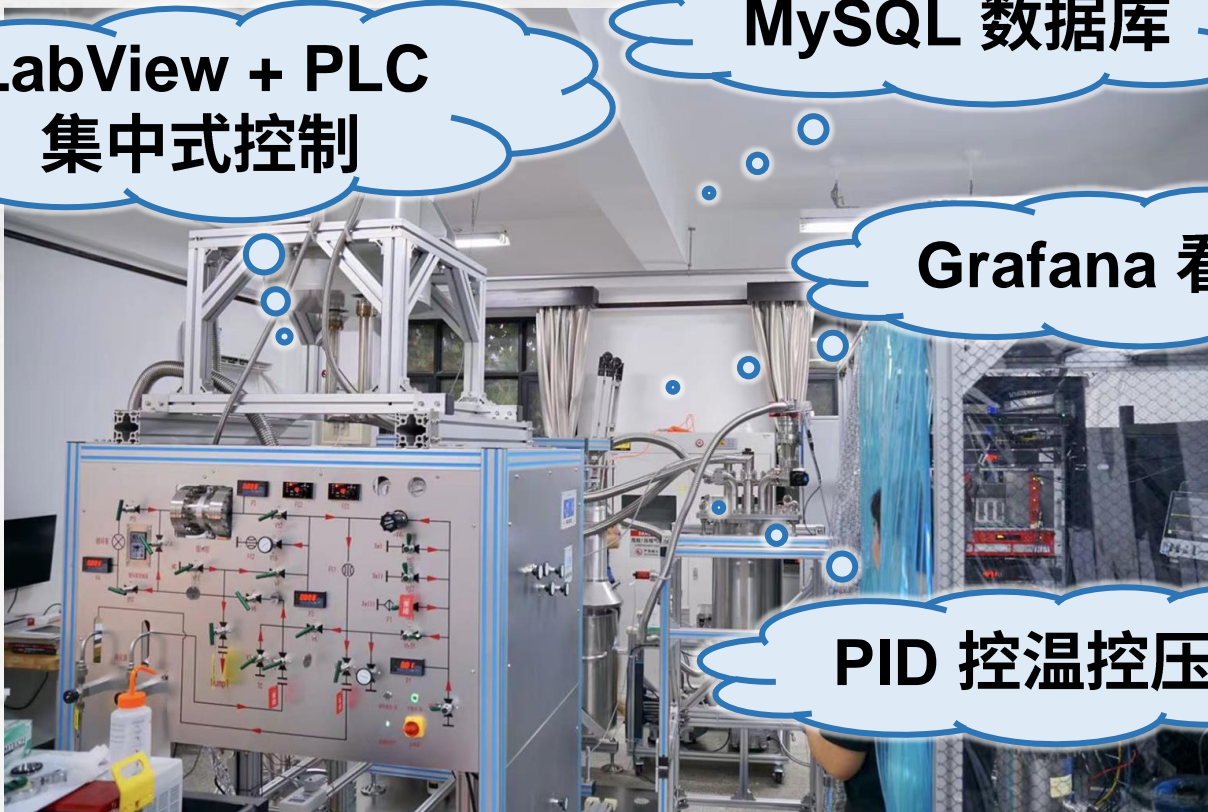
无论是 RELICS 探测器还是原型机，都需要探测器状态长期稳定

LabView + PLC
集中式控制

MySQL 数据库

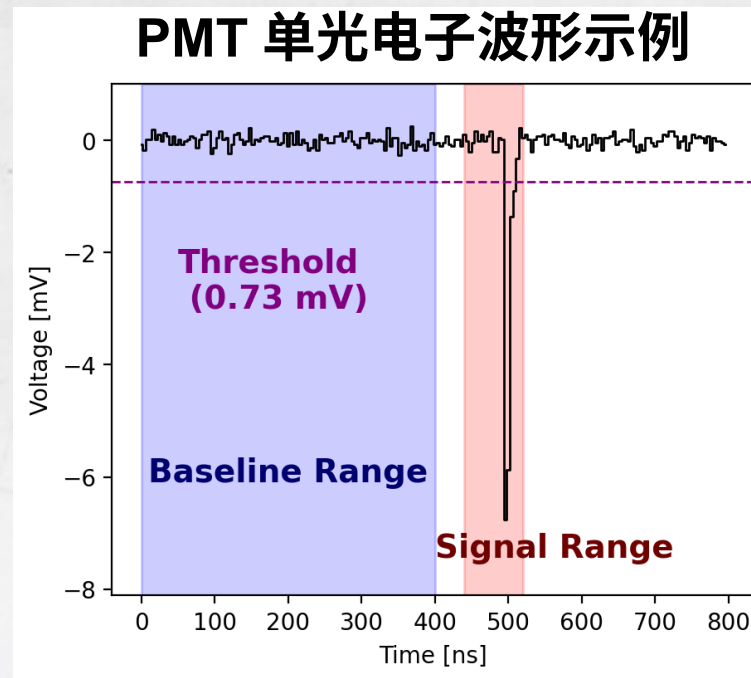
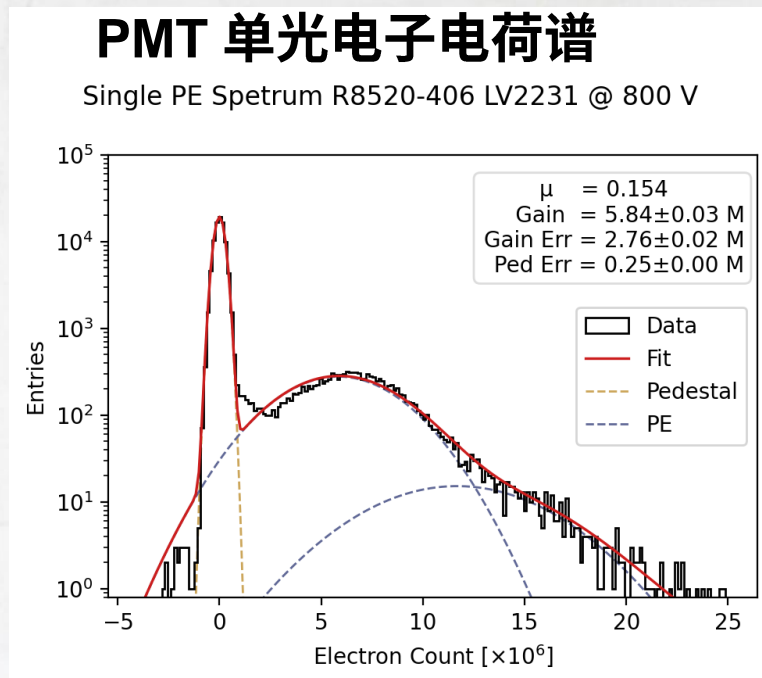
Grafana 看板

PID 控温控压



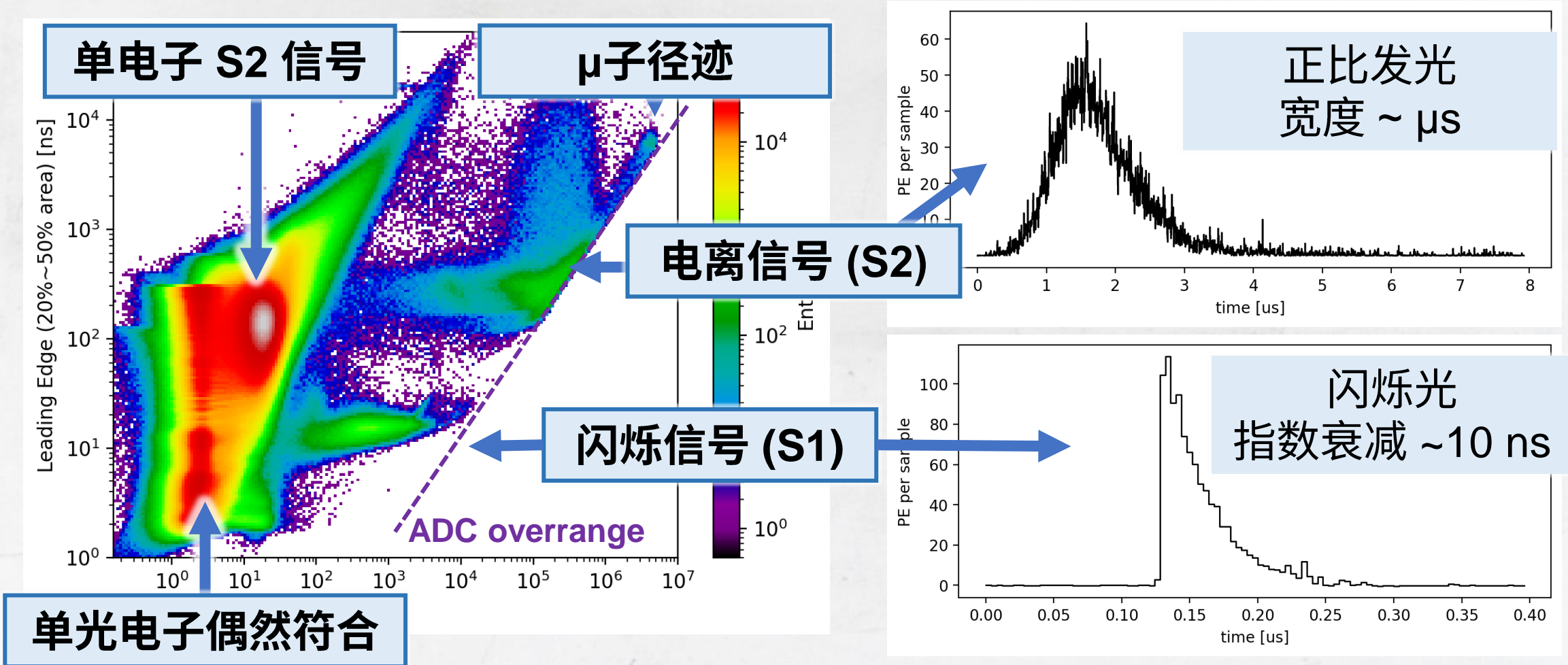
I. 信号读出、电子学、数据采集和处理

- 1inch PMT 实现 **单光电子 (Single PE) 读出**，单光电子探测效率 > 90%
- 通过 Flash ADC **动态基线自触发** 采集来自 PMT 的信号
- 基于 python 进行波形处理、符合、事件分类和分析



I. 波形和事件的识别和重建

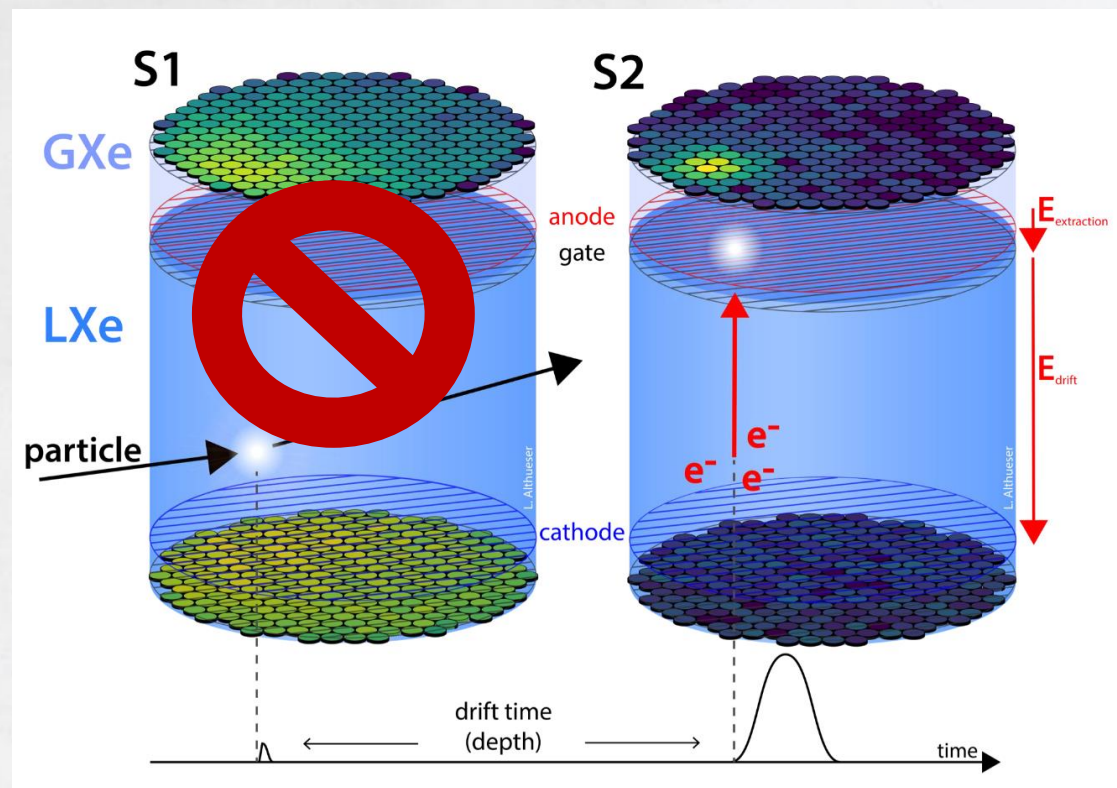
通过 **波形面积** (\sim 能量) 和 **上升时间** (\sim 事件类型) 初步区分波形和事件



II. 低阈值探测原理

- RELICS 主要挑战：高宇宙线本底下的低阈值探测
探测低至 **0.3 – 1 keV** 反冲能的 CEvNS 信号
- 闪烁光 (S1) 产额、探测效率都很低
→ 仅探测电离信号 (S2-only), 阈值更低!
- S1 则可用于探测器校准等

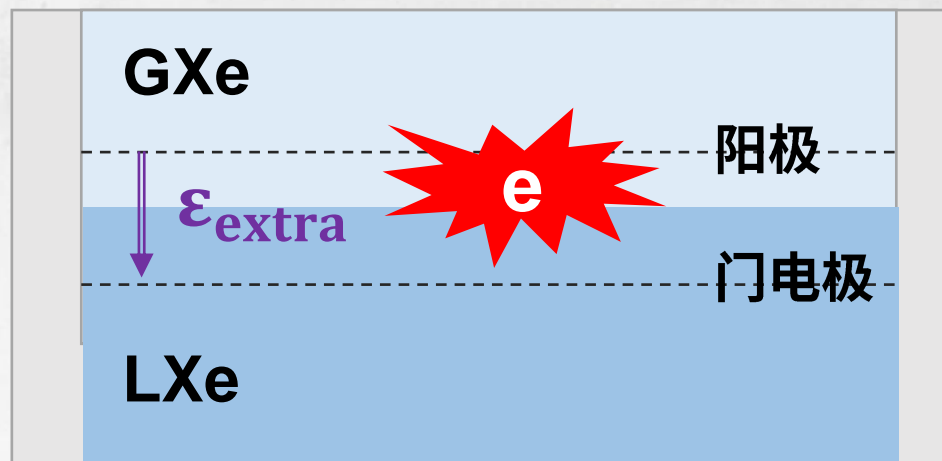
	闪烁光信号 (S1)	电离电子信号 (S2)
产额 NEST, 1keVnr, 0.5 kV/cm	3.5	7.1
探测效率	< 15%	~ 100 %



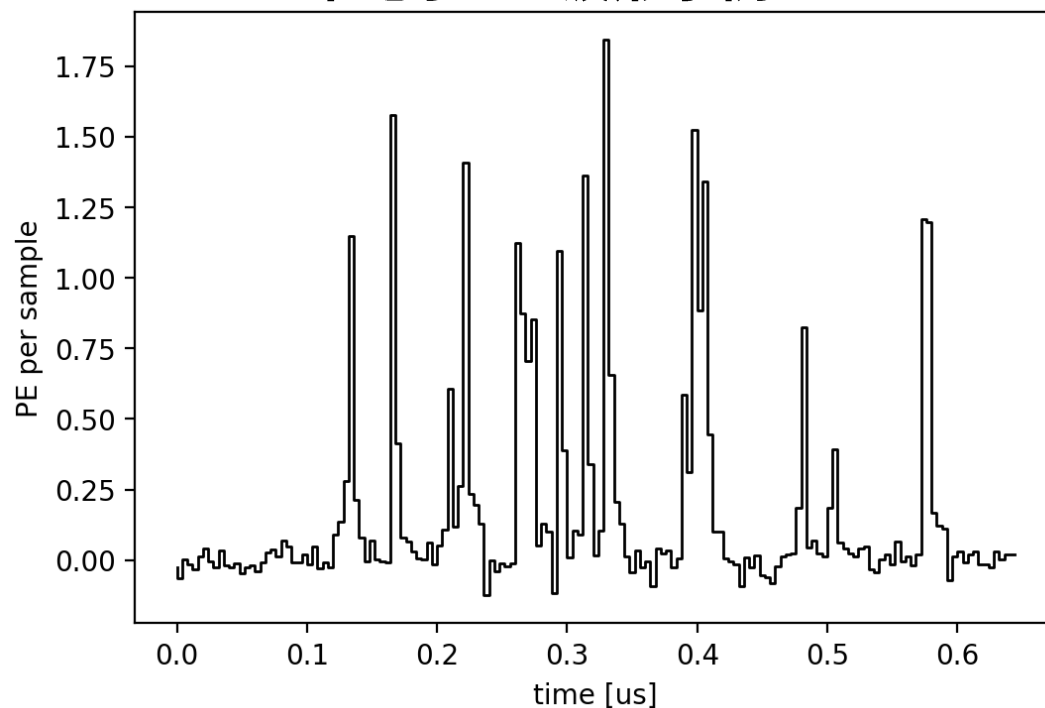
credit to XENON collaboration

II. 低阈值探测和单电子读出实现

实现高 S2 探测效率，需要实现 **单个电离电子 S2 信号** 读出



单电子 S2 波形示例

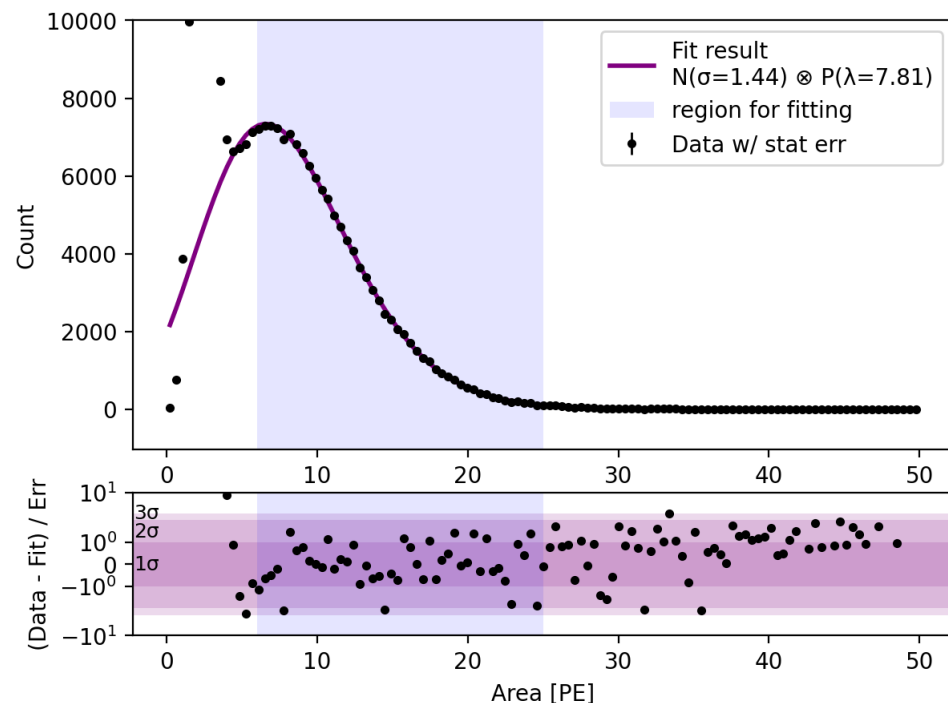


II. 低阈值探测和单电子读出的实现

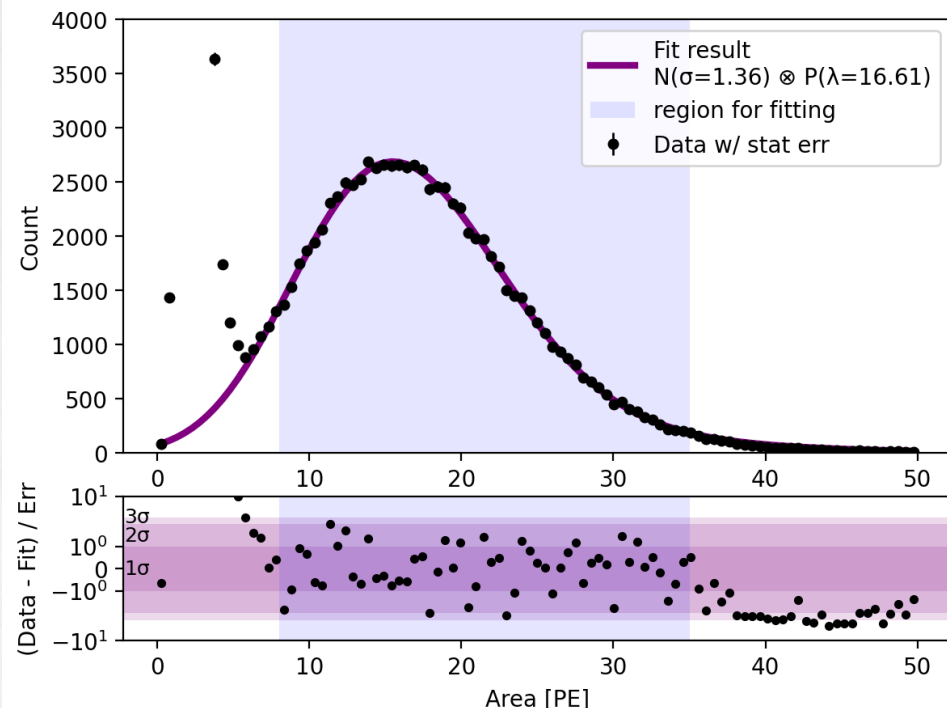
提高拉出电场，提高单电子增益 \rightarrow 可以提高单光电子分辨率

初步证明 具备单个电子探测能力

单电子 S2 增益 7.81 PE @ 1.35 bar -3600 V

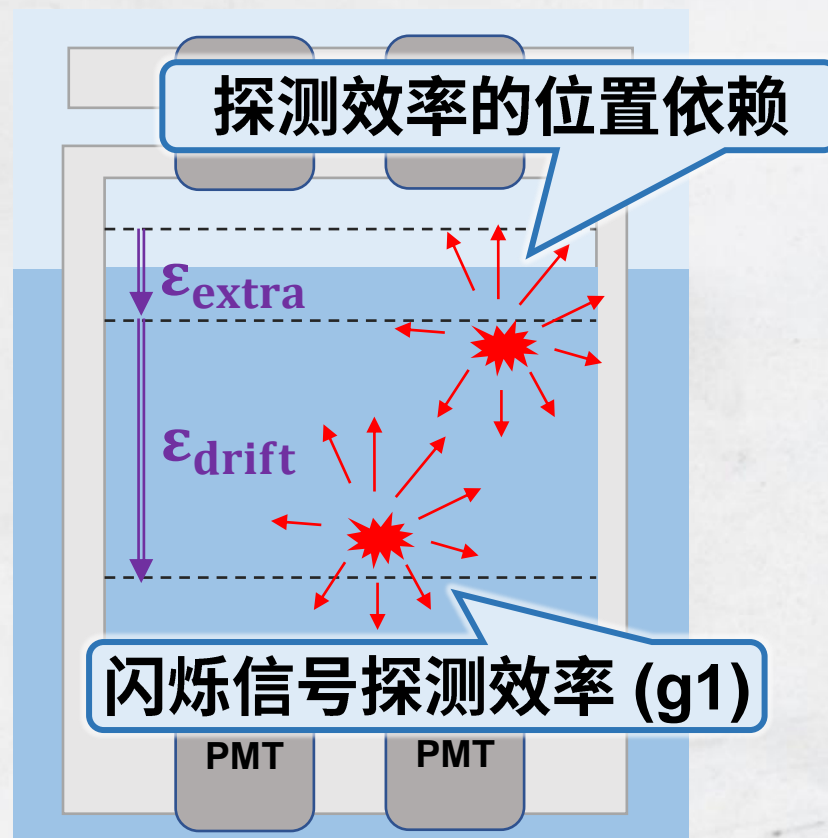
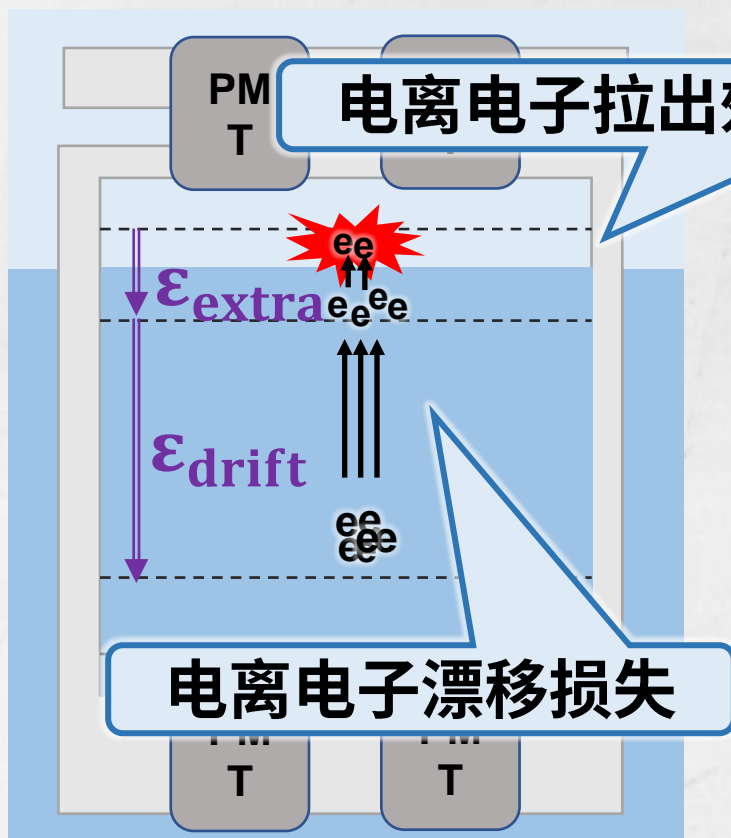


单电子 S2 增益 16.61 PE @ 1.6 bar -5400 V



III. 探测器标定

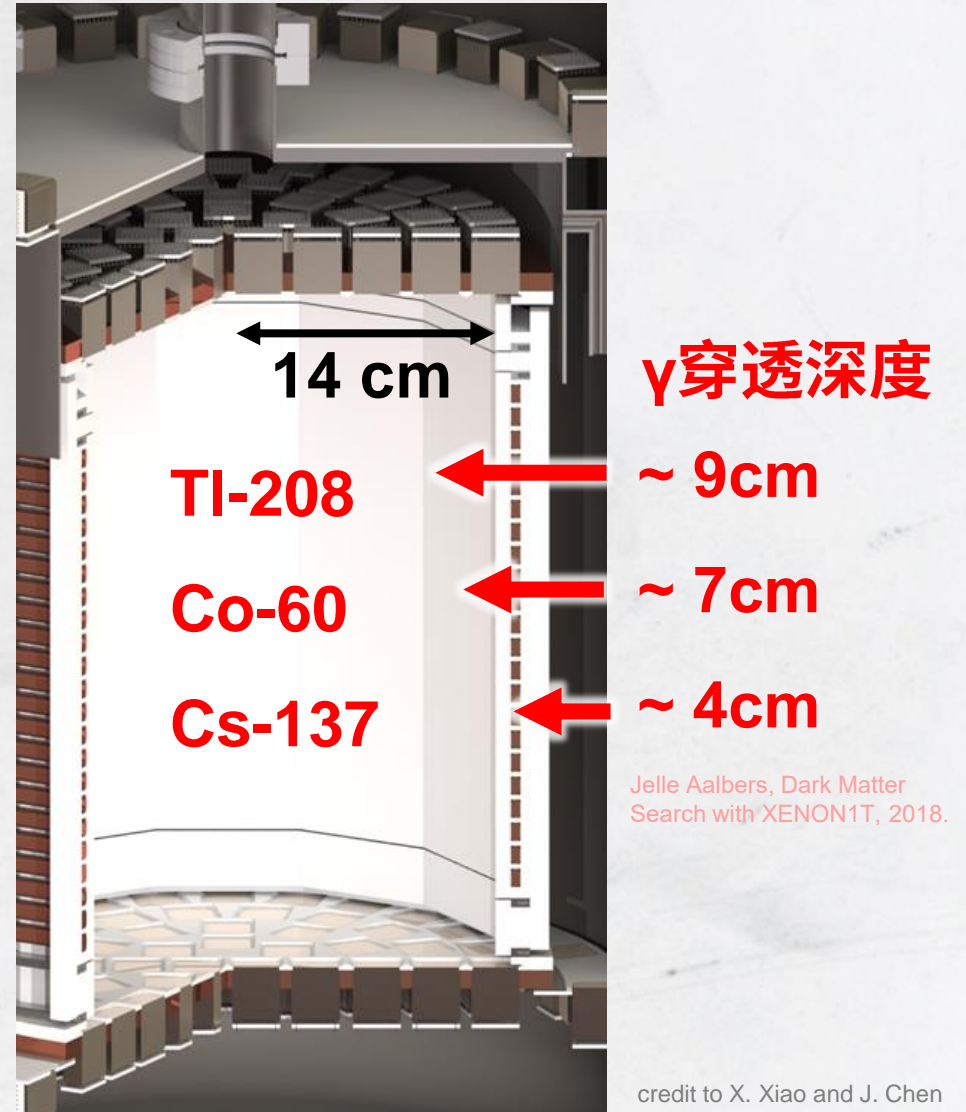
确定一些探测器的参数...



... 需要依靠特定能量的刻度源

III. 内刻度源 (Ar-37, Kr-83m) 及研制

- Co-60 等外源的 γ 在氙中强烈吸收 (< 10 cm)
无法实现探测器各位置均匀刻度

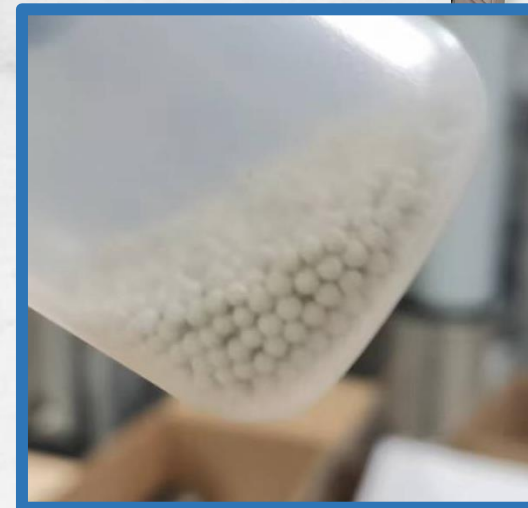
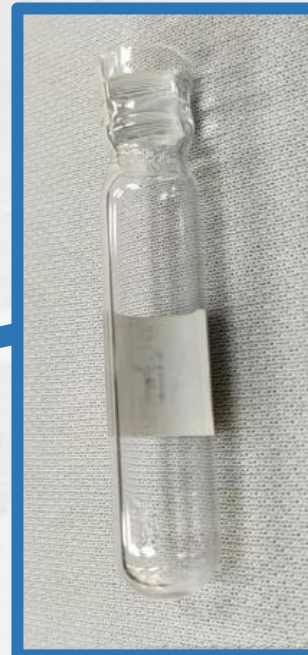
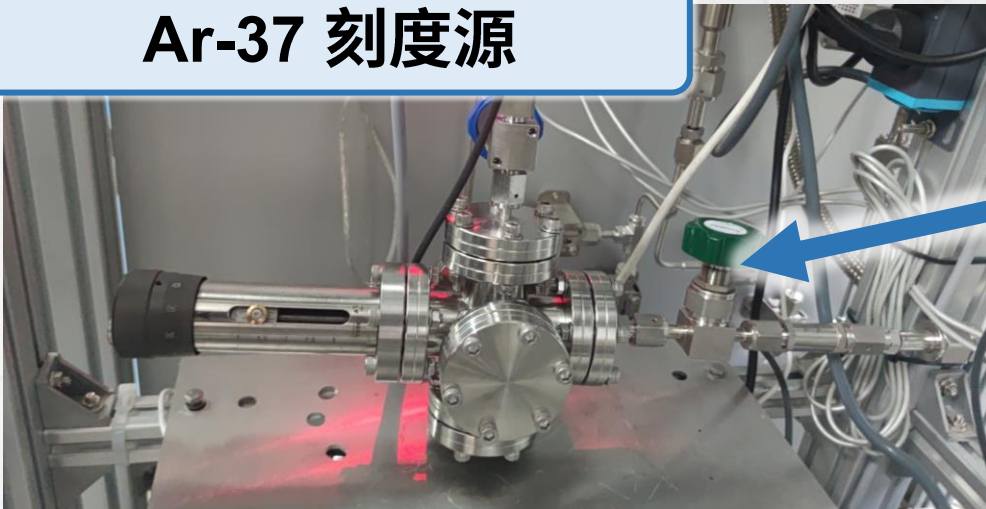


III. 内刻度源 (Ar-37, Kr-83m) 及研制

- Co-60 等外源的 γ 在氩中强烈吸收 ($< 10\text{ cm}$)
无法实现探测器各位置均匀刻度
- 采用稀有气体内刻度源 (Ar-37, Kr-83m) : keV 能区均匀刻度
- 研制 Ar-37、Kr-83m 源及引入装置

Rb83 / Kr-83m 刻度源

Ar-37 刻度源



III. 气体探测器：验证刻度源的特性

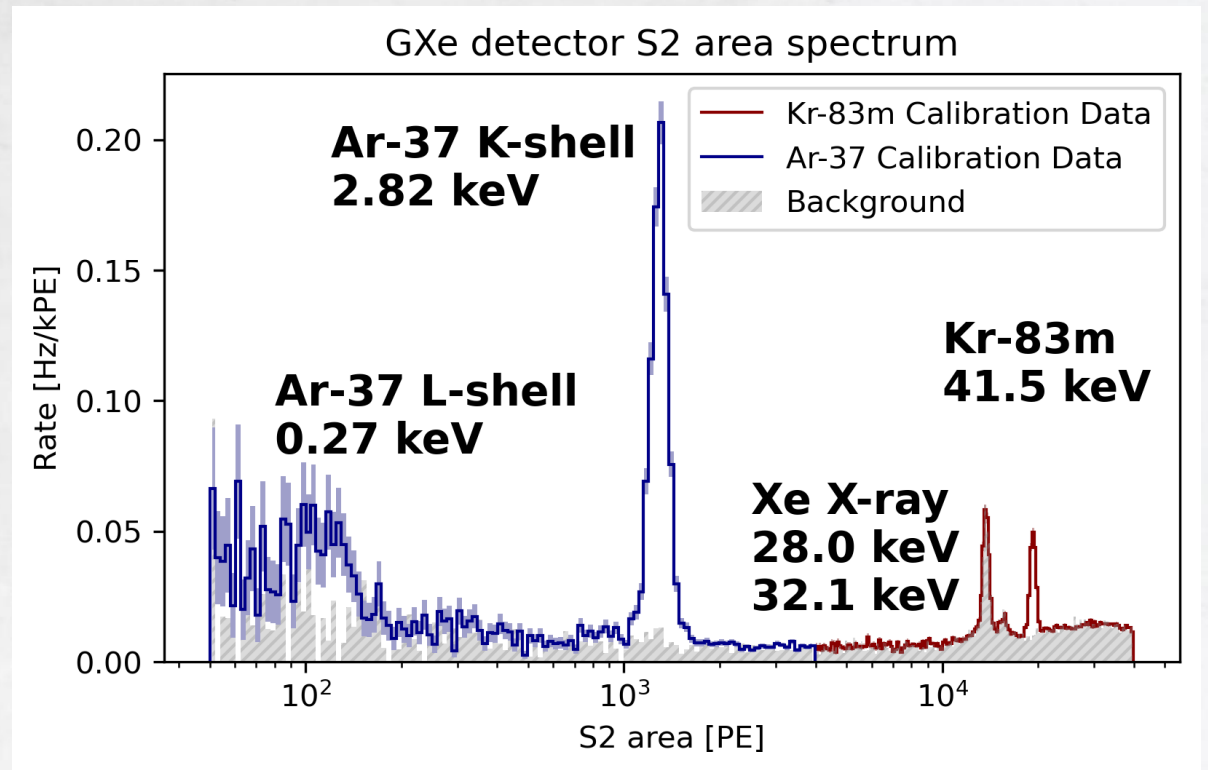
将原型机先作为 **气体氩探测器** 运行，测量制作的刻度源 **注入情况、活度** 等

- 气体探测器 **运行更简单、信噪比很高**，可获得较高分辨率的能谱
- 可作为 LXeTPC 参照

刻度源		能量 (keV)	半衰期
Kr-83m		32.1	1.83 h
		9.4	154 ns
Ar-37	K-shell	2.82	35 d
	L-shell	0.27	

10.1103/physrevd.96.112009
10.48550/arXiv.2211.14191

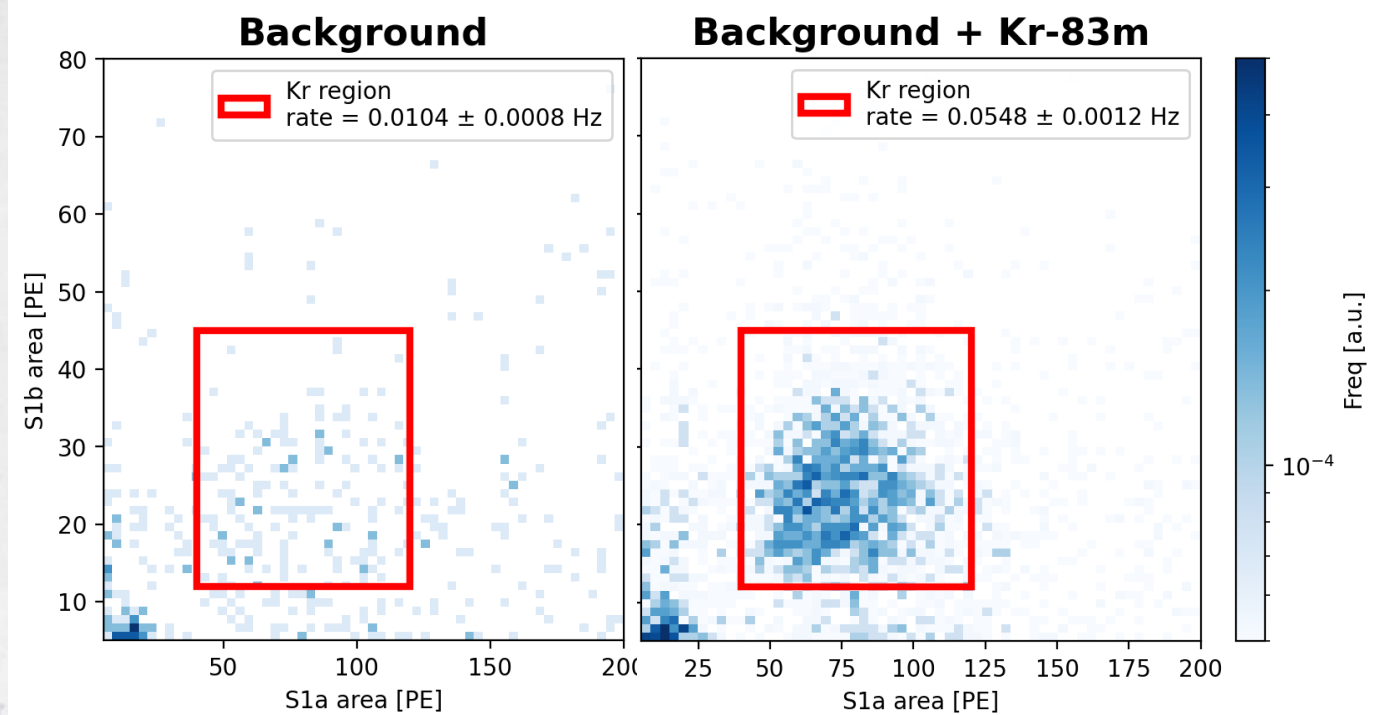
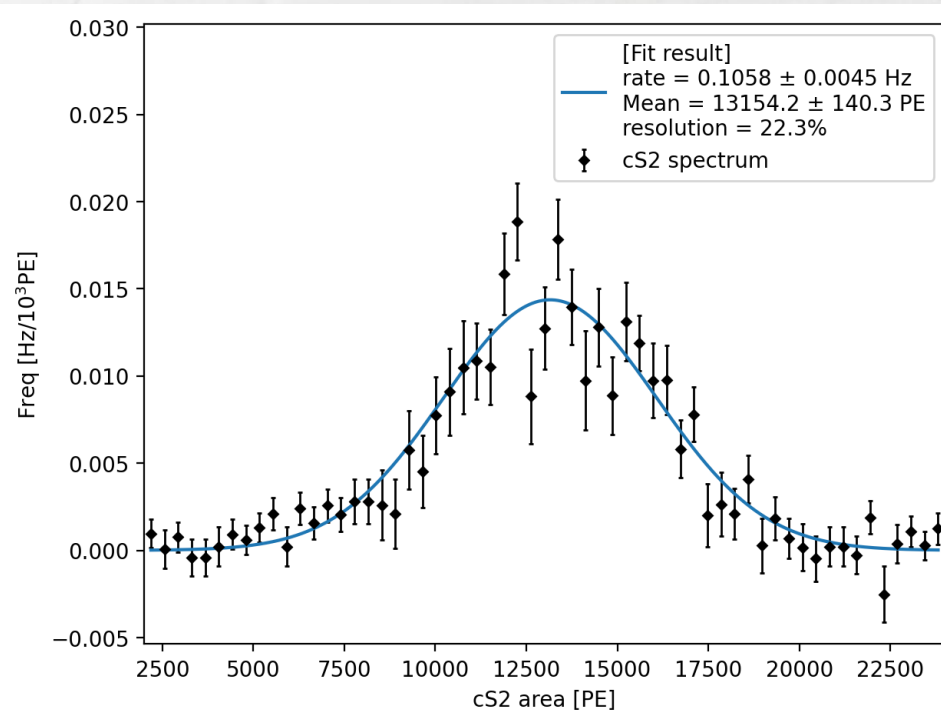
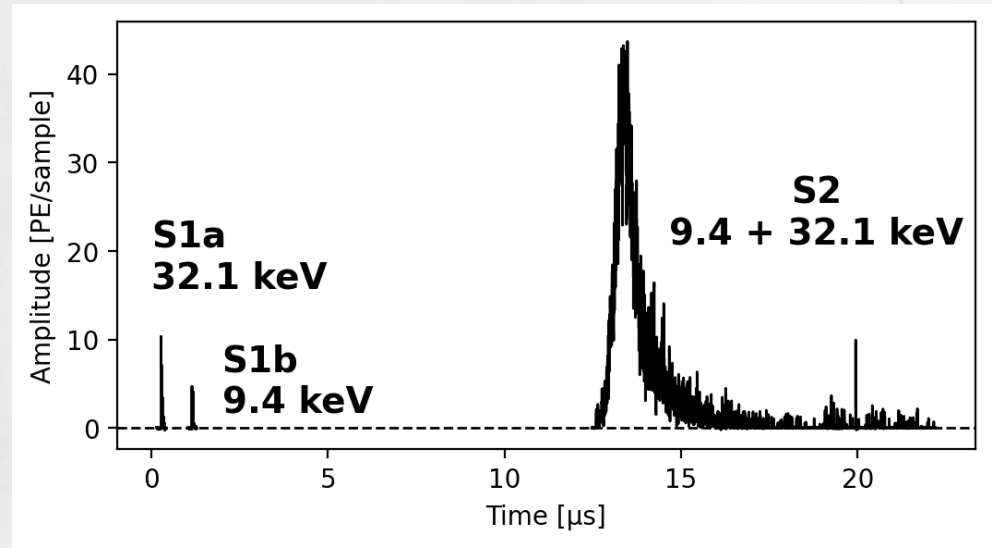
2024/5/9



16

III. 原型机的 Kr-83m 标定

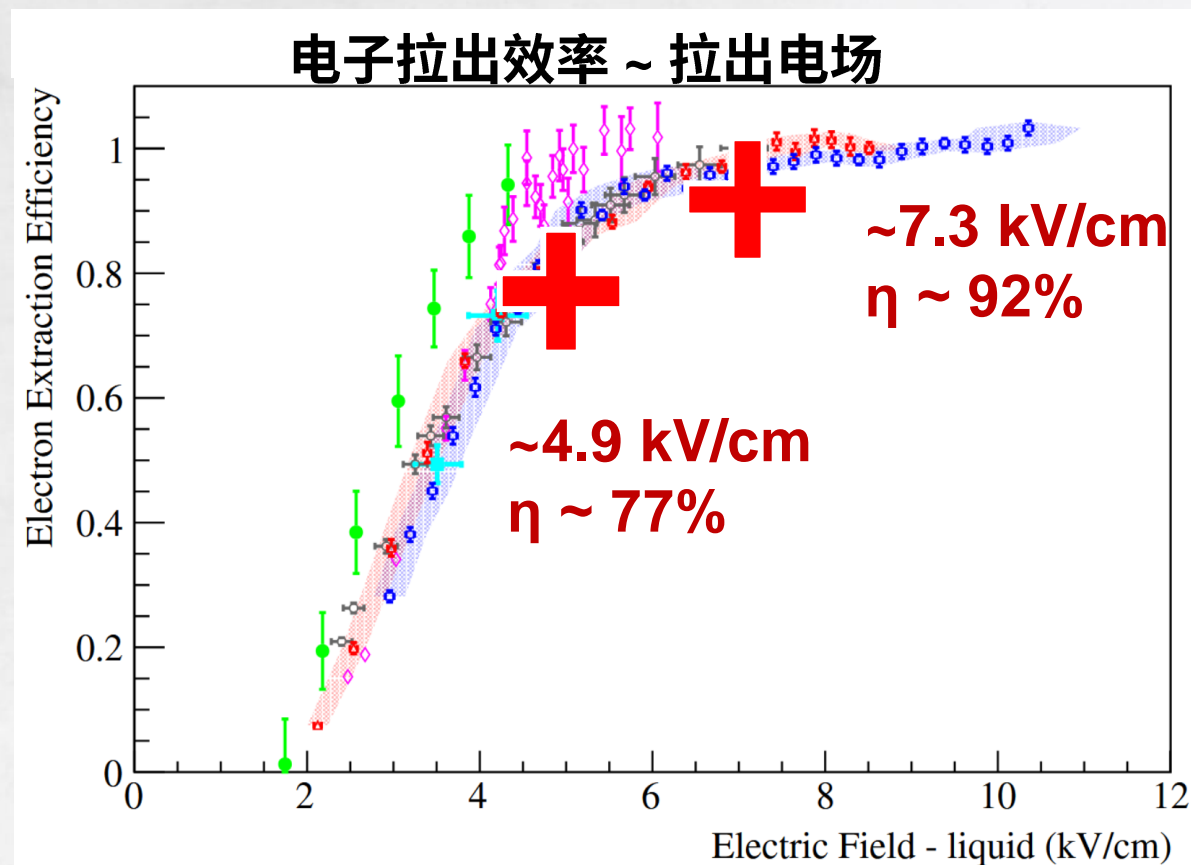
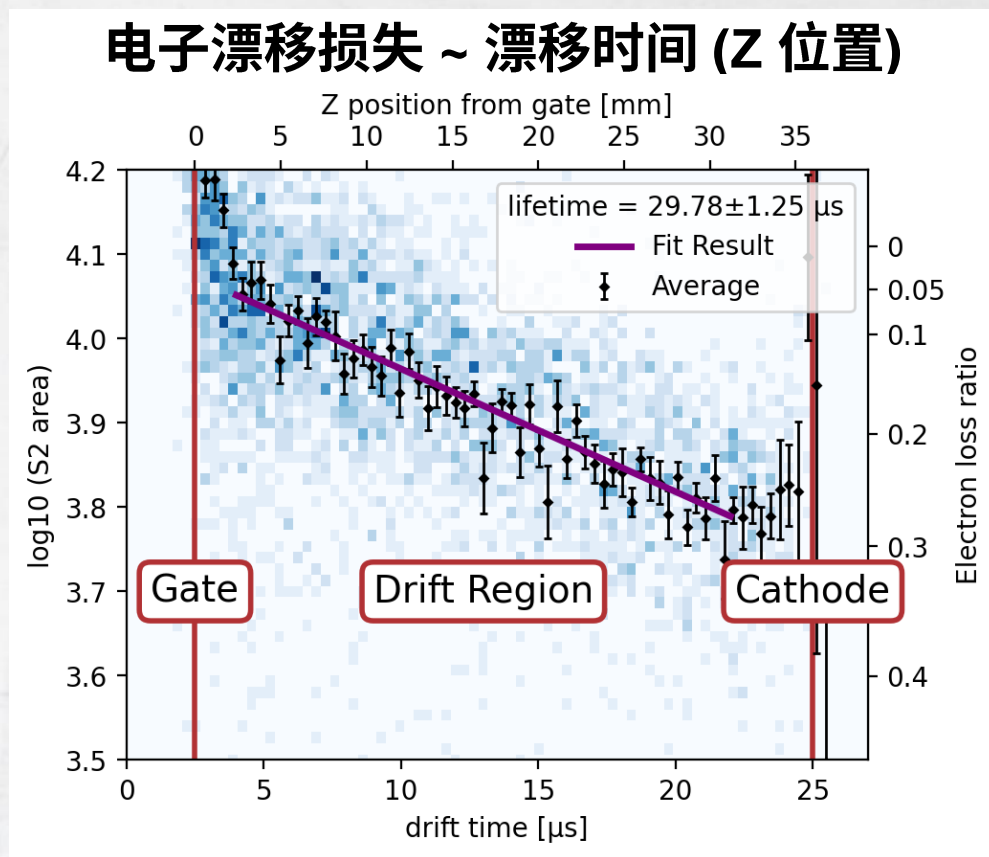
- 实现 Kr-83m 源的开发和注入
- 探测到 Kr-83m 半衰期 154 ns 的两级衰变所产生的 **双 S1 事件**



III. 原型机的 Kr-83m 标定

☑ S2 标定: 迈向 ~100% 电离电子探测效率的目标

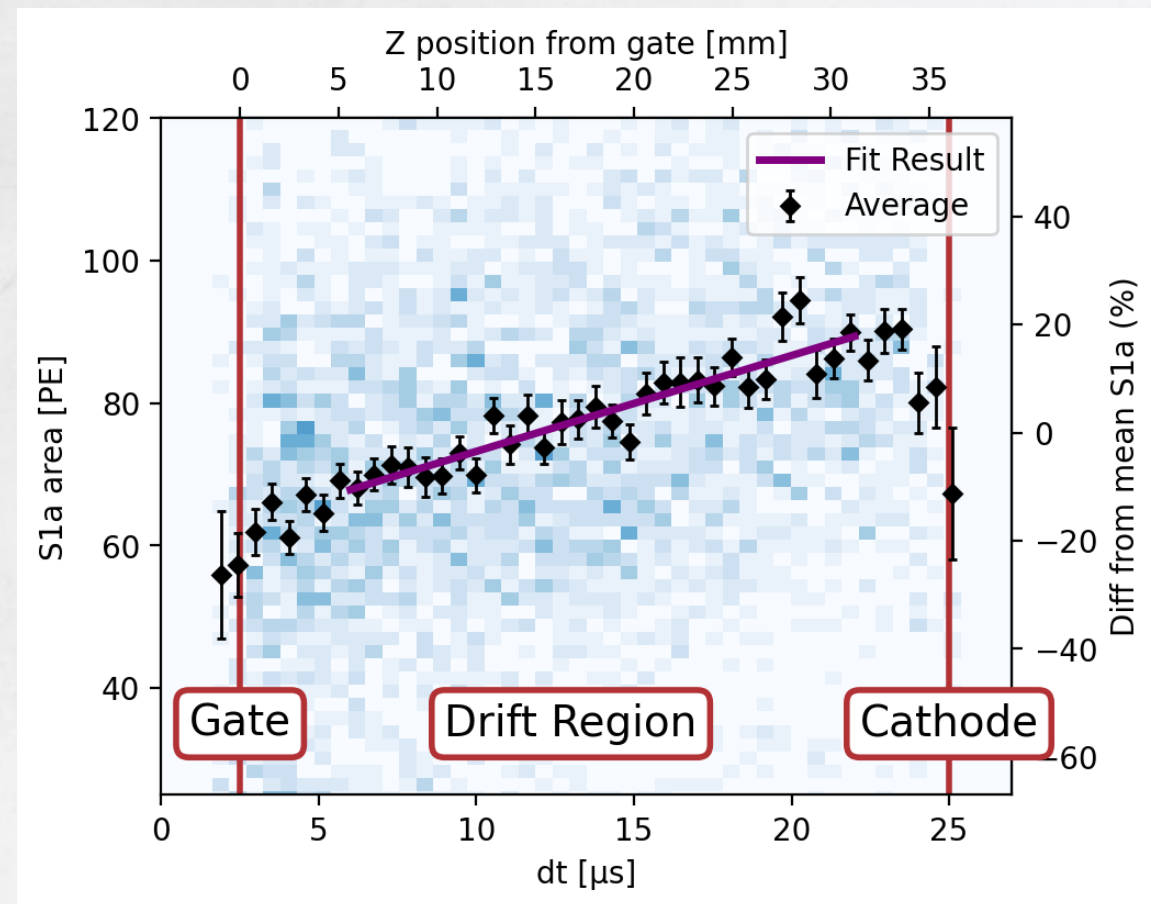
电子漂移损失 (↔ 液氙杂质含量) + 电子拉出效率 (↔ 拉出电场强度)



III. 原型机的 Kr-83m 标定

☑ S1 标定: 理解探测效率、探测器均匀性

- S1a 有 ~ 40% 的 z 方向不均匀性
 - 闪烁光探测效率 $g_1 = 0.044 \text{ PE / ph}$ 是预期的 30% ~ 50%
- 考虑光的探测效率还需要提升!

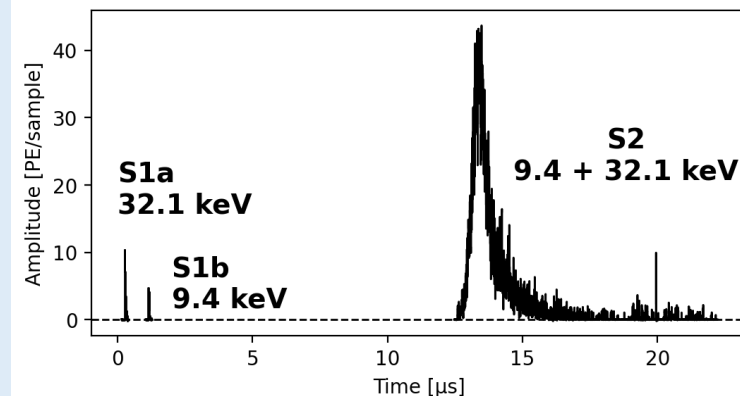
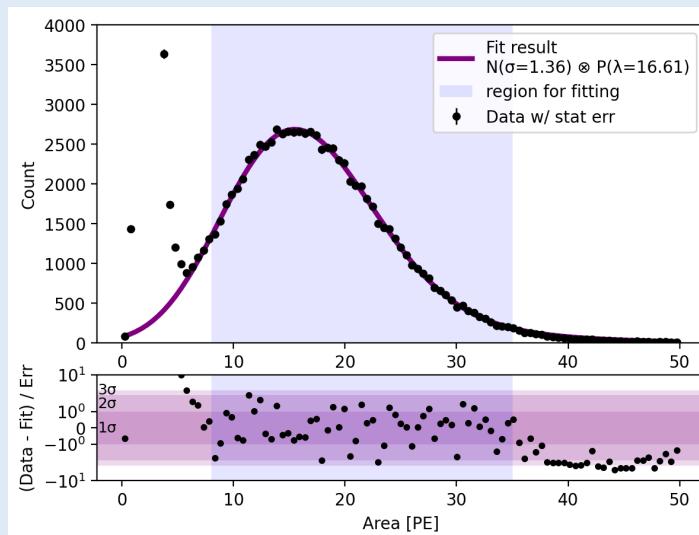


RELICS 原型机开发、测试和运行总结

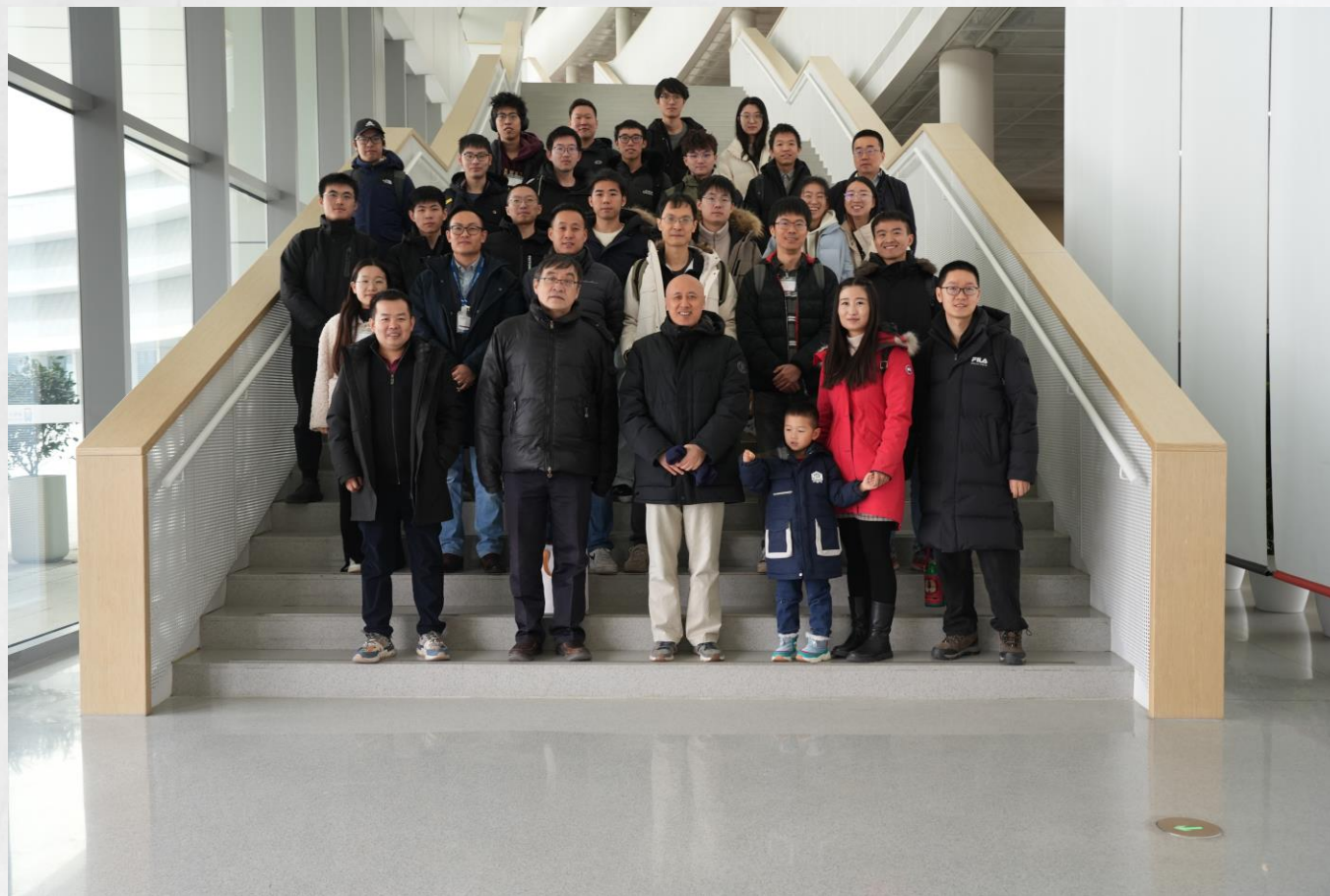
刻度源研制、测试与探测器标定

低阈值探测的测试和单电子探测的实现

原型机及配套系统的搭建、调试、运行



RELICS Collaboration



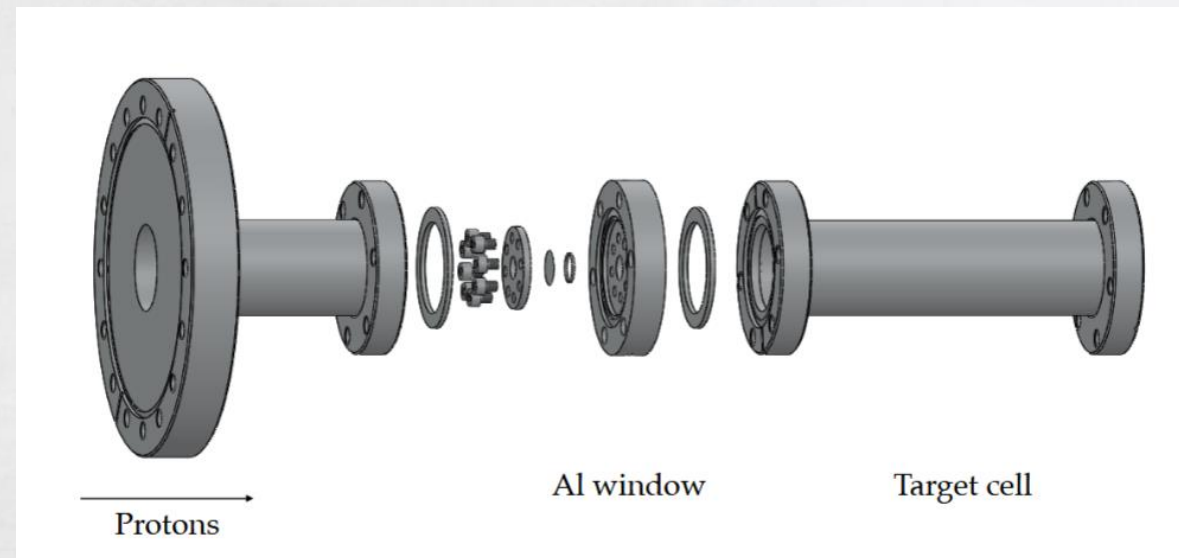
※ 本研究获得国家重点研发项目和北京市自然科学基金“启研”项目的支持

Thanks!

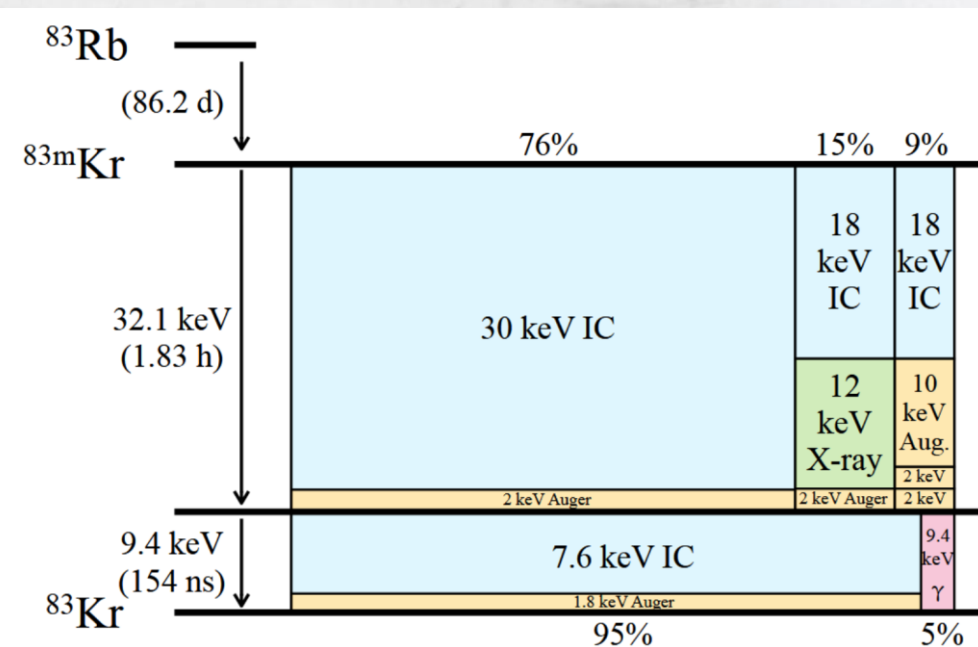
Backup: Kr-83m 和 Ar-37 源

- Kr-83m 生成: $\text{Kr-83}(p, n) \text{Rb-83}$
- Ar-37 生成: $\text{Ar-36}(n, \gamma) \text{Ar-37}$

10.48550/arXiv.2211.14191



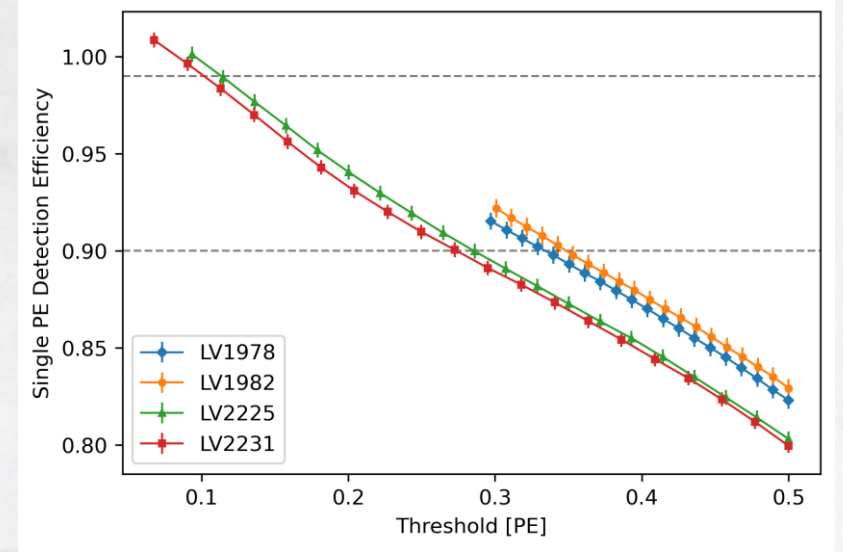
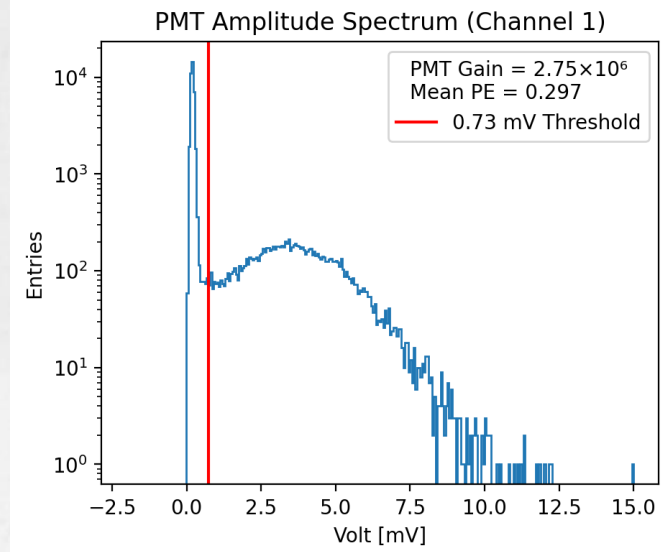
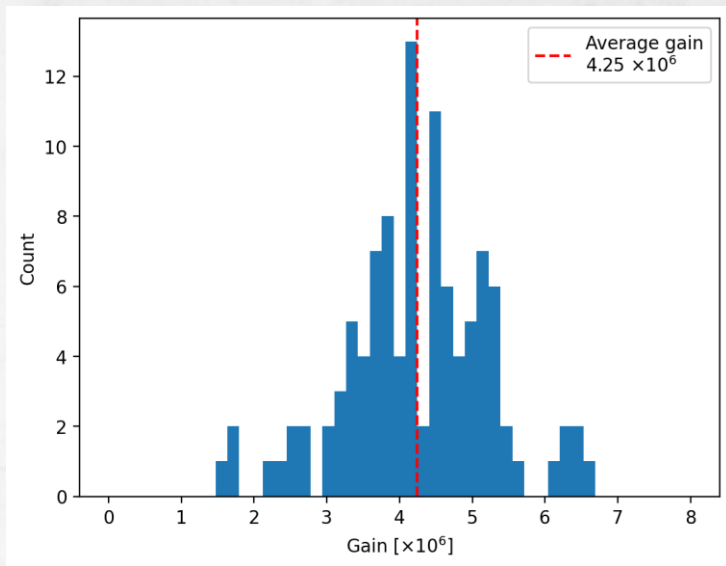
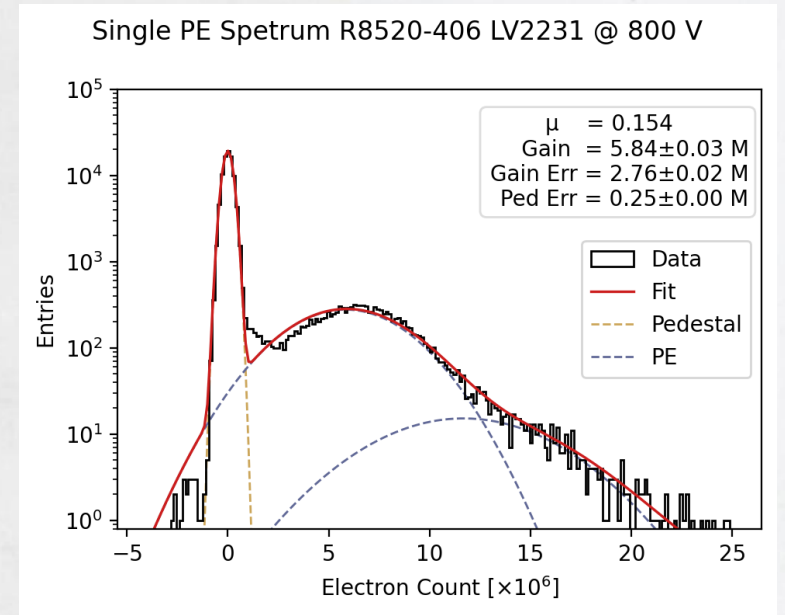
10.1103/PhysRevC.105.014604



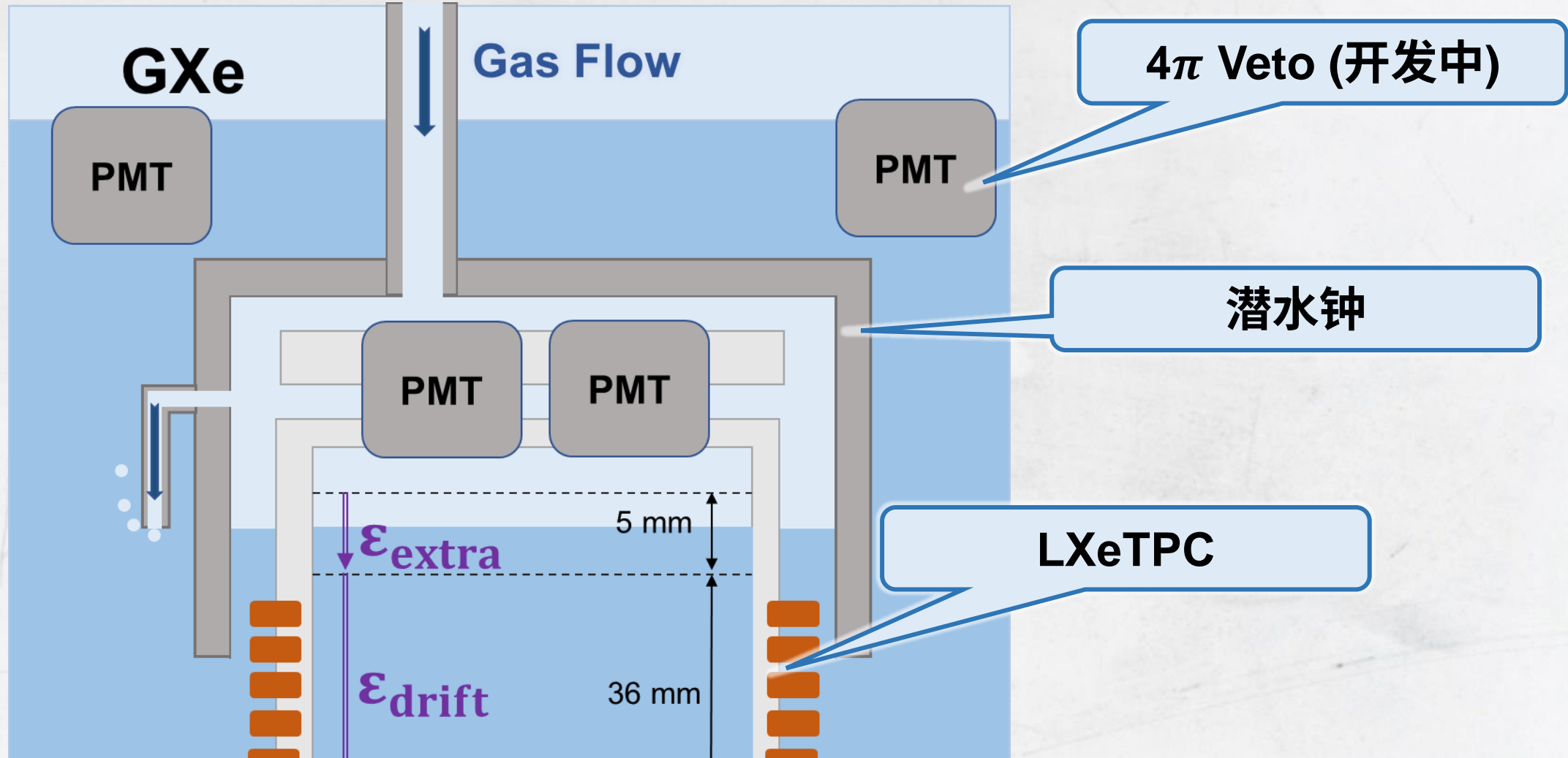
10.1103/physrevd.96.112009

Backup: 1 inch PMT 单光子探测灵敏度

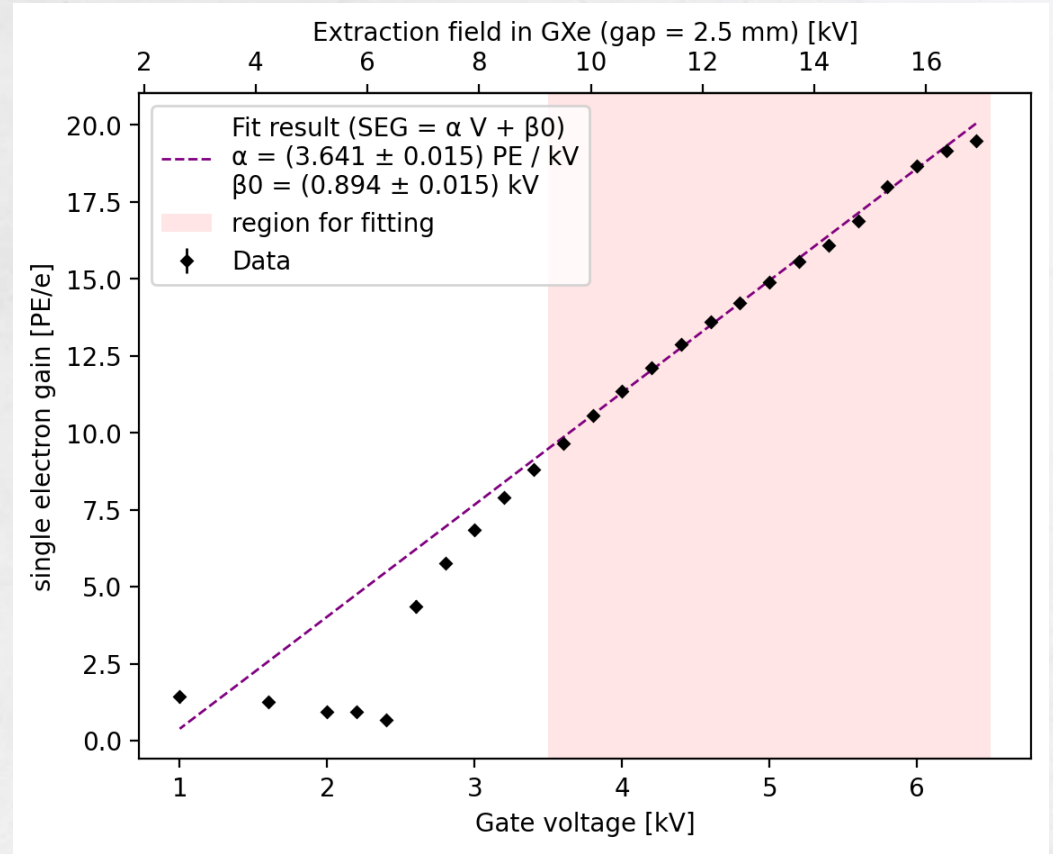
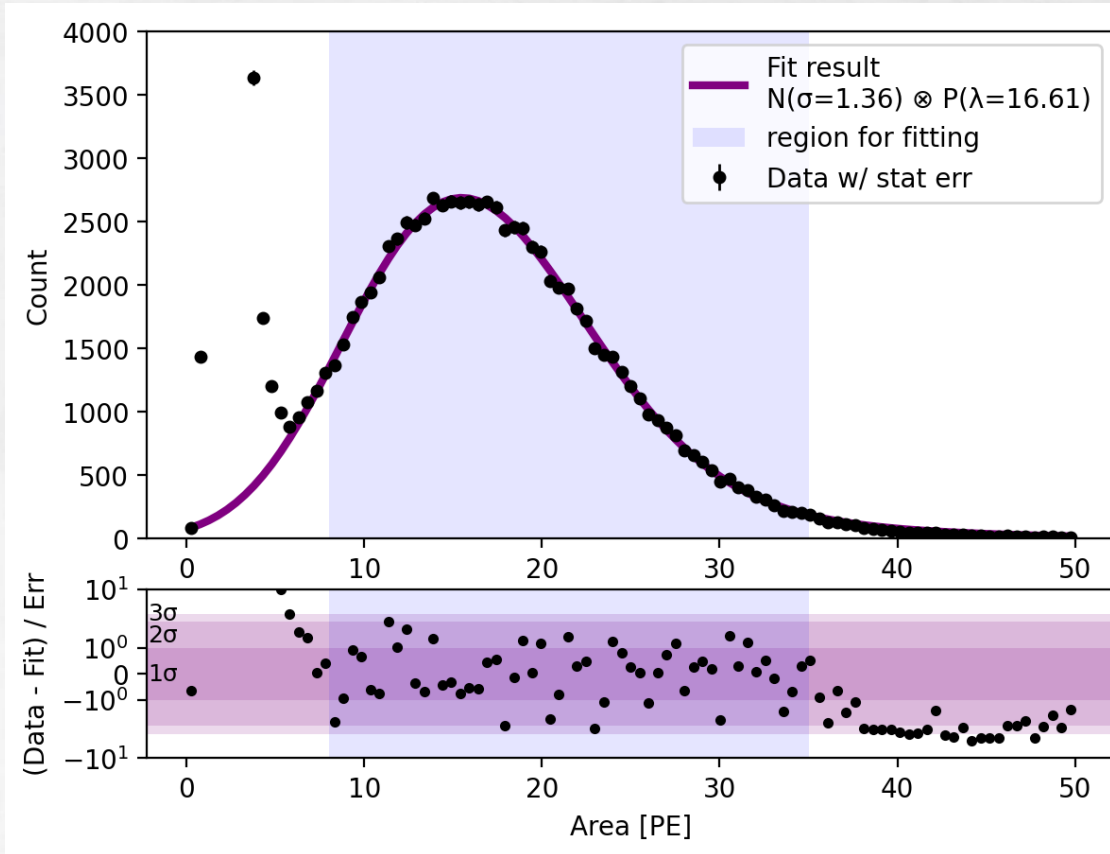
- R8520-406 1 inch PMT
- 平均增益 4.25×10^6



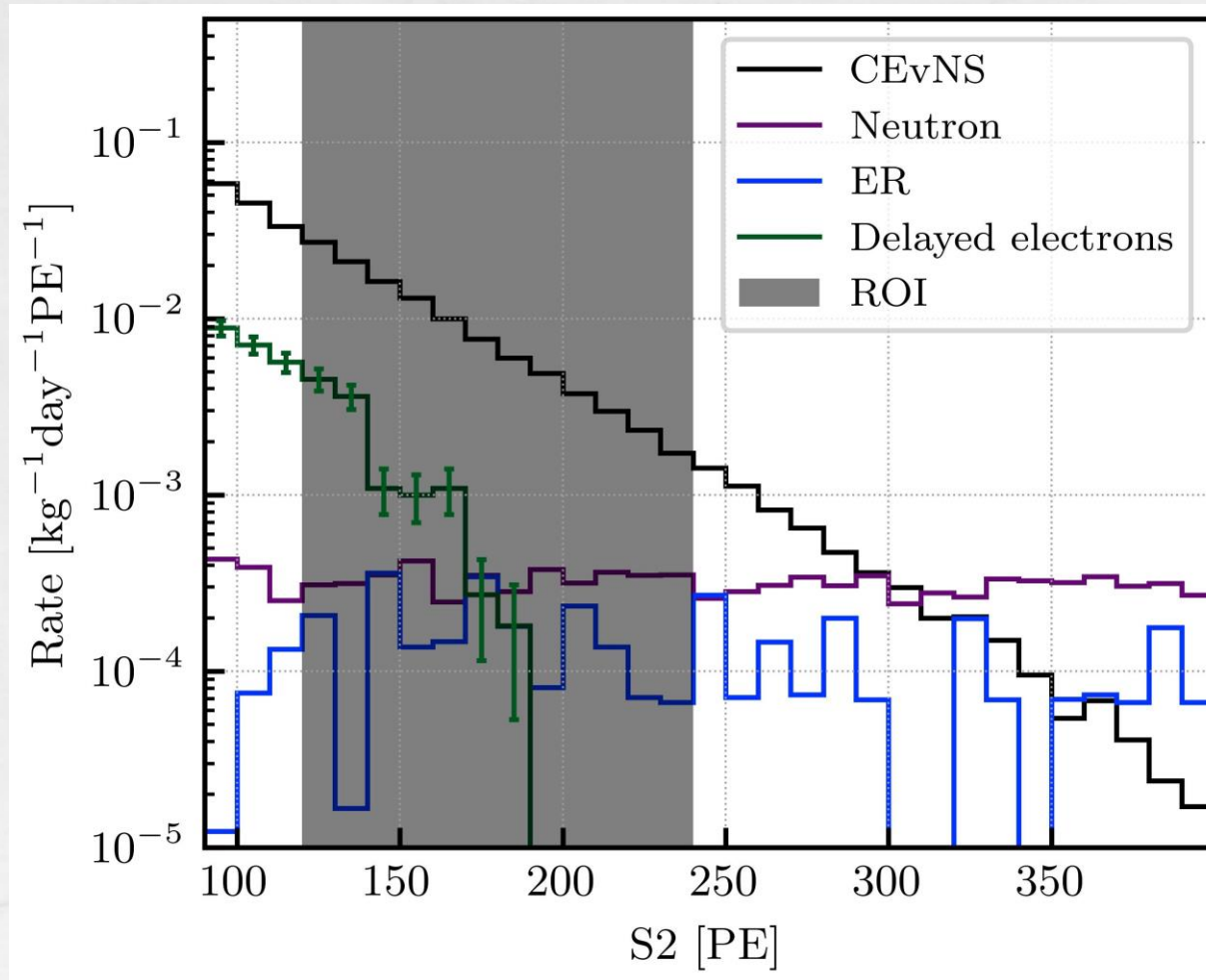
Backup: 潜水钟和 4π Veto



Backup: 单电子S2增益



Backup: 灵敏度分析



Backup: RELICS Timeline

