



西湖大學
WESTLAKE UNIVERSITY

RELICS反应堆中微子探测实验

REactor neutrino **LI**quid xenon **C**oherent **S**cattering experiment (RELICS)

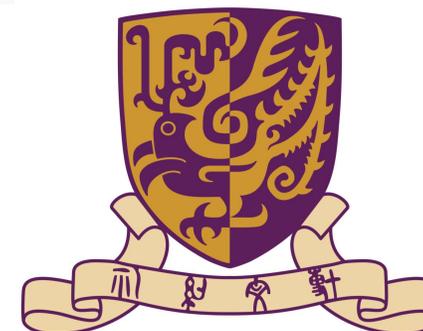
On behalf of the RELICS collaboration

杨继军(西湖大学)

第三届地下和空间物理与宇宙物理前沿问题研讨会

RELICS合作组

RELICS collaboration 2024



中微子-原子核相干弹性散射 (CE ν NS)

Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering, CE ν NS

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 9, NUMBER 5

1 MARCH 1974

Coherent effects of a weak neutral current

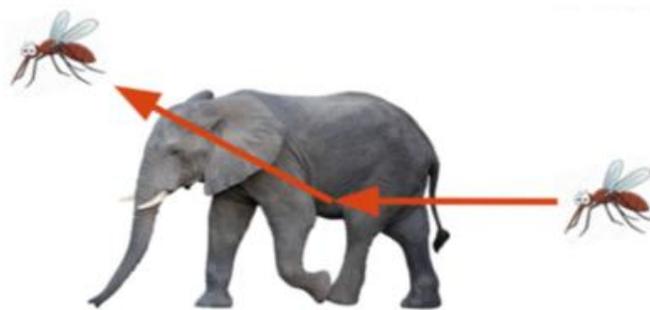
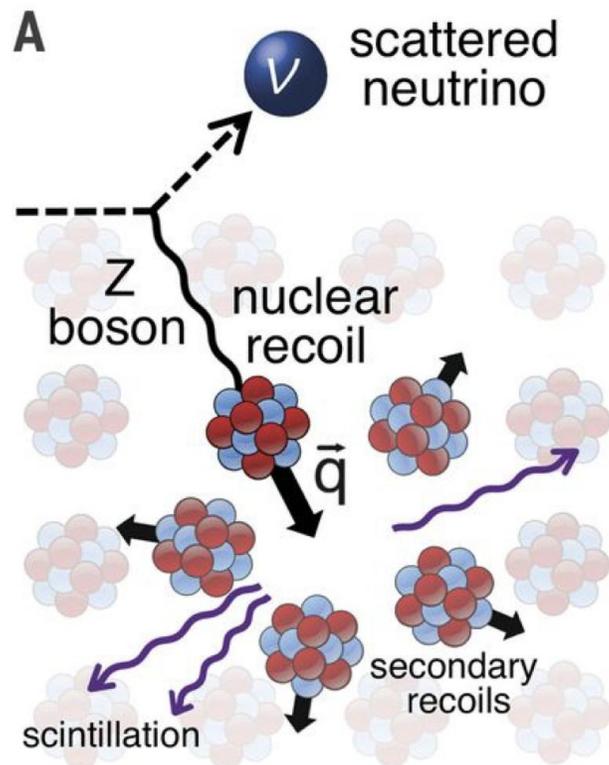
Daniel Z. Freedman†

National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510

and Institute for Theoretical Physics, State University of New York, Stony Brook, New York 11790

(Received 15 October 1973; revised manuscript received 19 November 1973)

† If there is a weak neutral current, then the elastic scattering process $\nu + A \rightarrow \nu + A$ should



中微子与核交换Z粒子:

- 反冲过程将原子核作为一个整体
- 发生相干散射中微子能量连贯至 $E_\nu \sim 50 \text{ MeV}$

中微子波长大于原子核的尺度: $qR < 1$

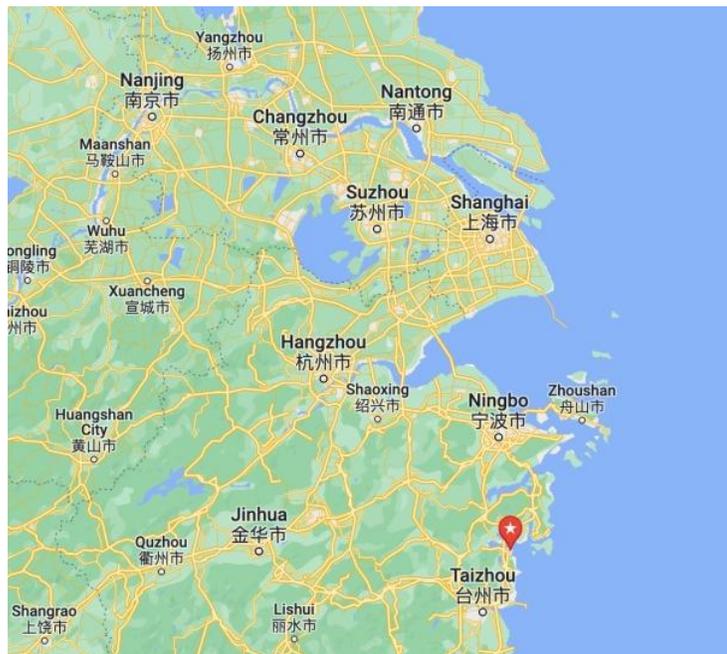
- q : 转移动量
- R : 原子核尺度大小
- 反冲能量极低 $\sim < 5 \text{ keV}$

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 M \left(1 - \frac{MT}{2E_\nu^2}\right) F(Q^2)^2.$$

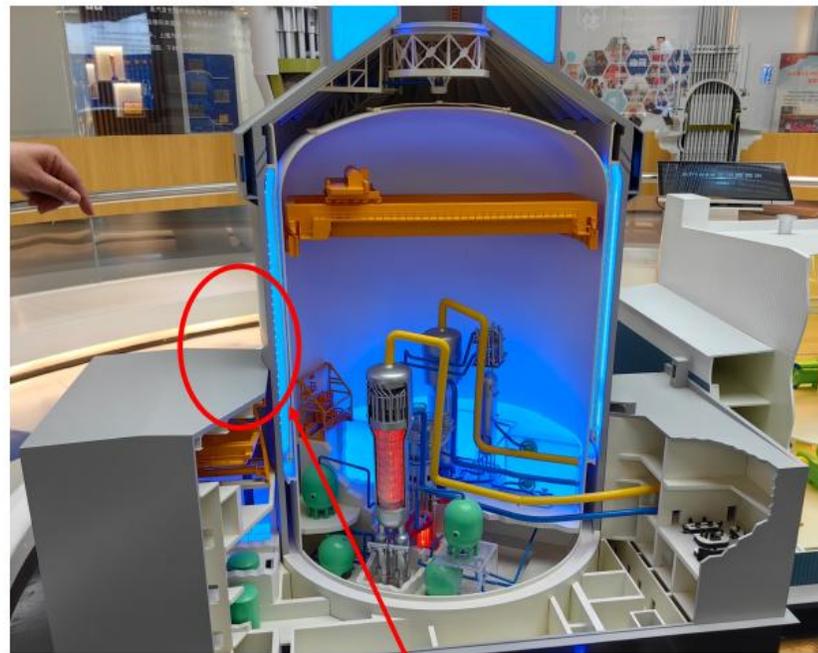
$$Q_W = N - (1 - 4 \sin^2 \theta_W) Z$$

$$Q_W \propto N \implies \frac{d\sigma}{dT} \propto N^2$$

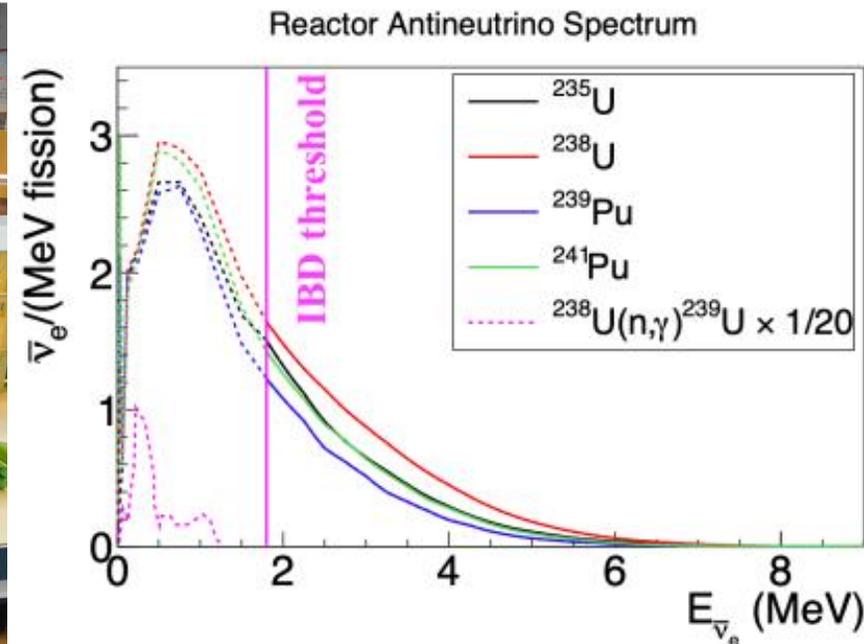
RELICS反应堆中微子探测实验



浙江台州三门核电站



预期探测器摆放位置

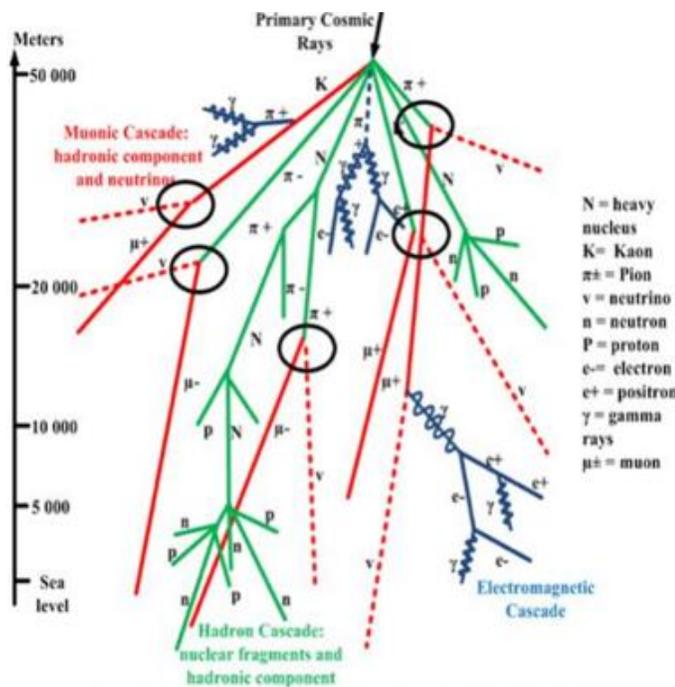


反应堆中微子能谱

- 反应堆功率 $\sim 3\text{GW}$ ，距离反应堆 $\sim 25\text{m}$ ；
- 预期中微子流强 $\sim 1\text{e}13\text{u}/\text{cm}^2/\text{s}$ ；中微子能量 $E_{\nu} \sim \text{MeV}$ ；

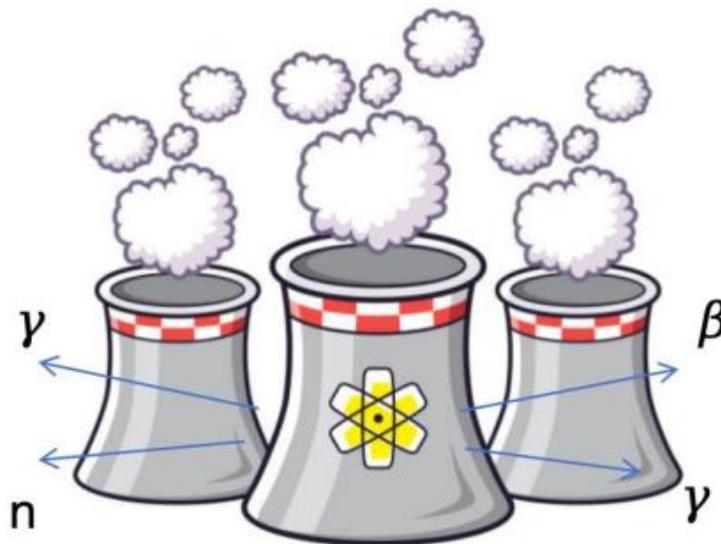
实验本底的主要来源

宇宙线



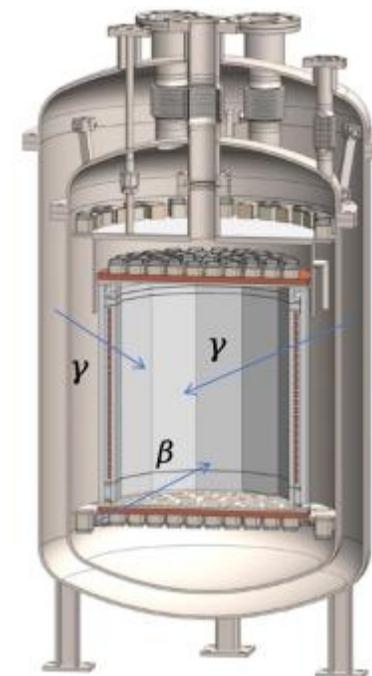
- 宇宙线缪子;
- 宇宙线中子;

反应堆



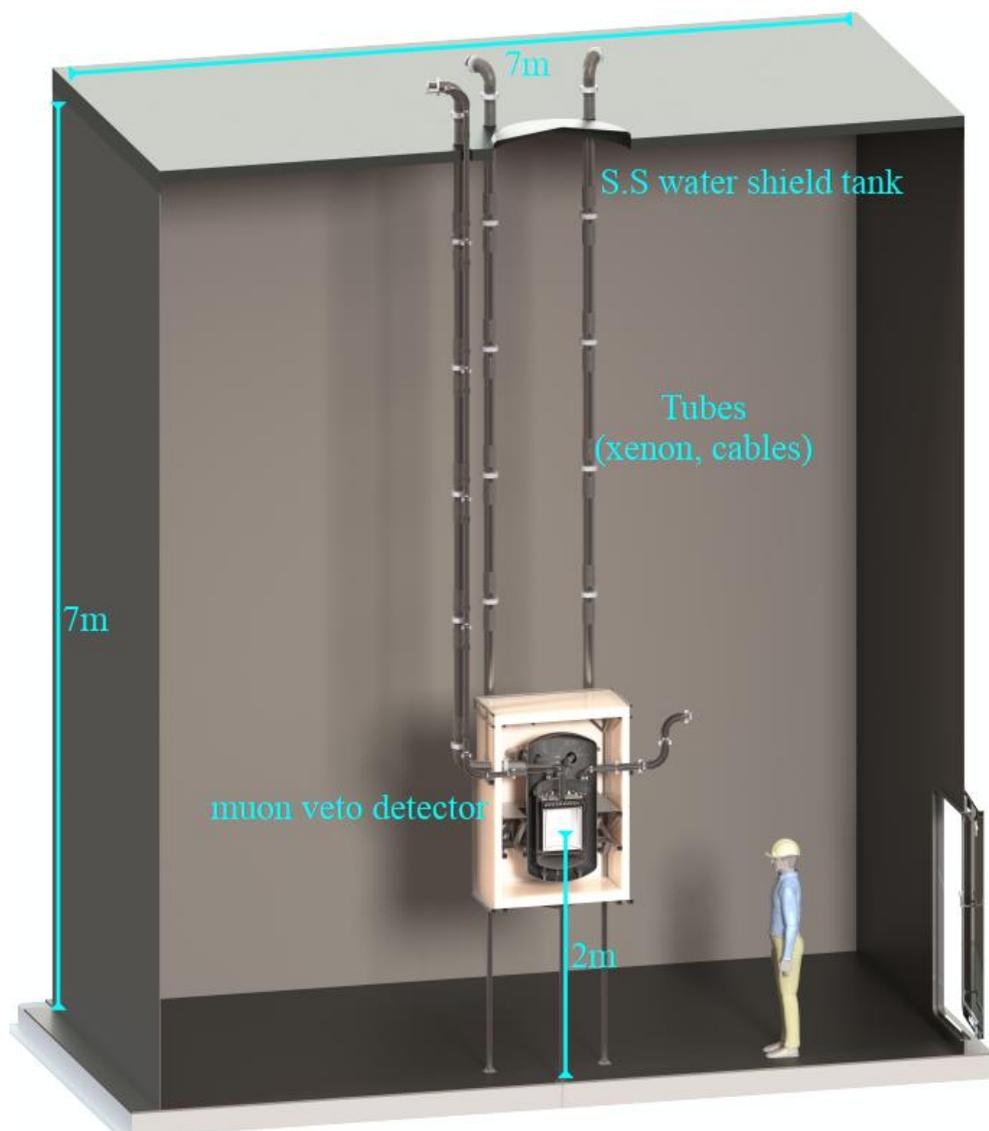
- 反应堆产生的中子、伽马;

探测器材料



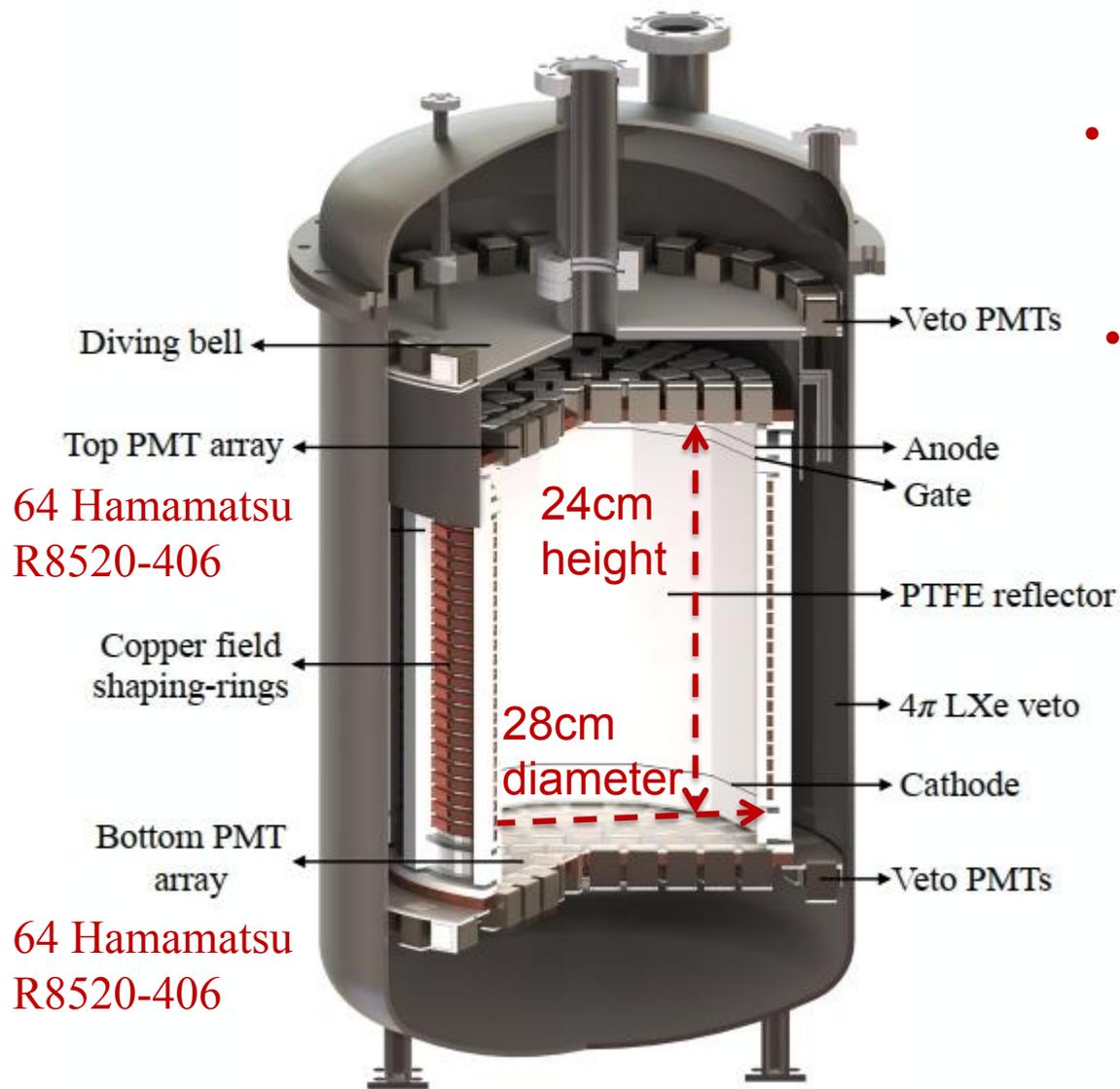
- 材料放射性释放的中子、伽马、贝塔

RELICS实验屏蔽体

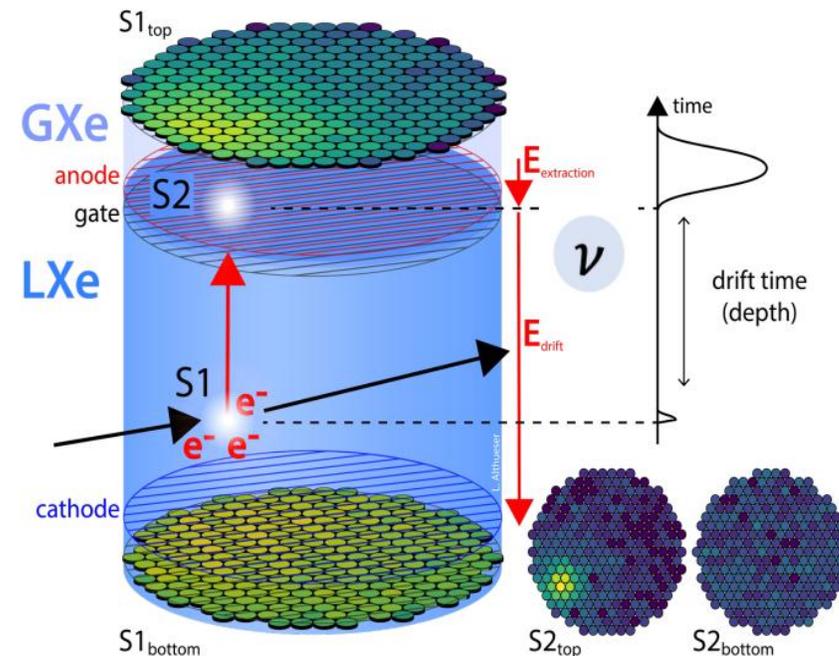


- 水屏蔽体, 7m*7m*7m, (降低宇宙线本底、反应堆本底)
- 考虑到底部本底, 探测器底部抬高1.5m
- 4 π 方向缪子反符合塑闪探测器, 预计探测效率99%;
- 所有探测器材料将进行低本底筛选;

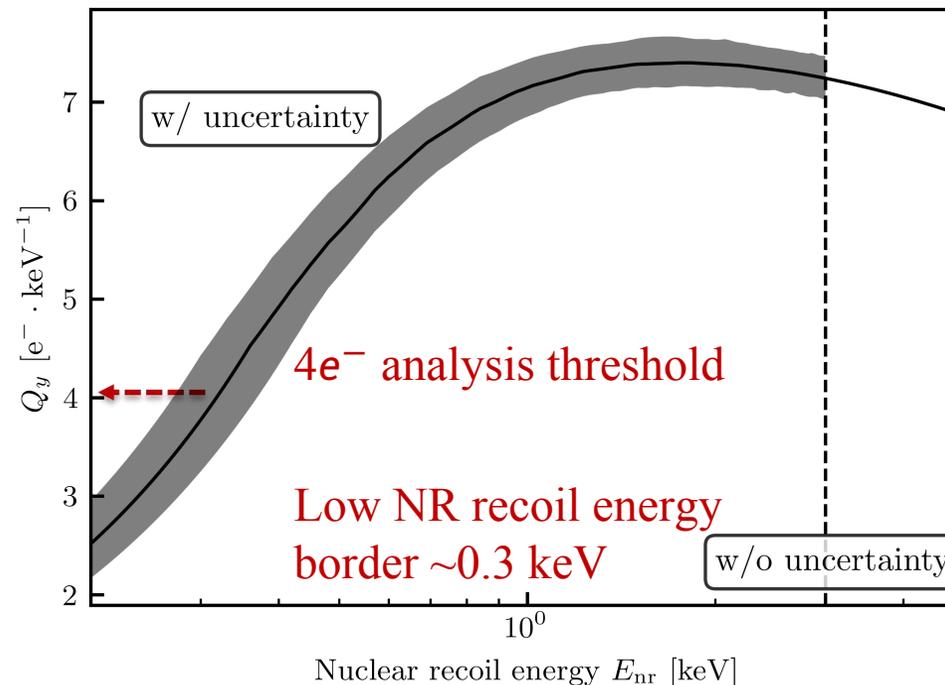
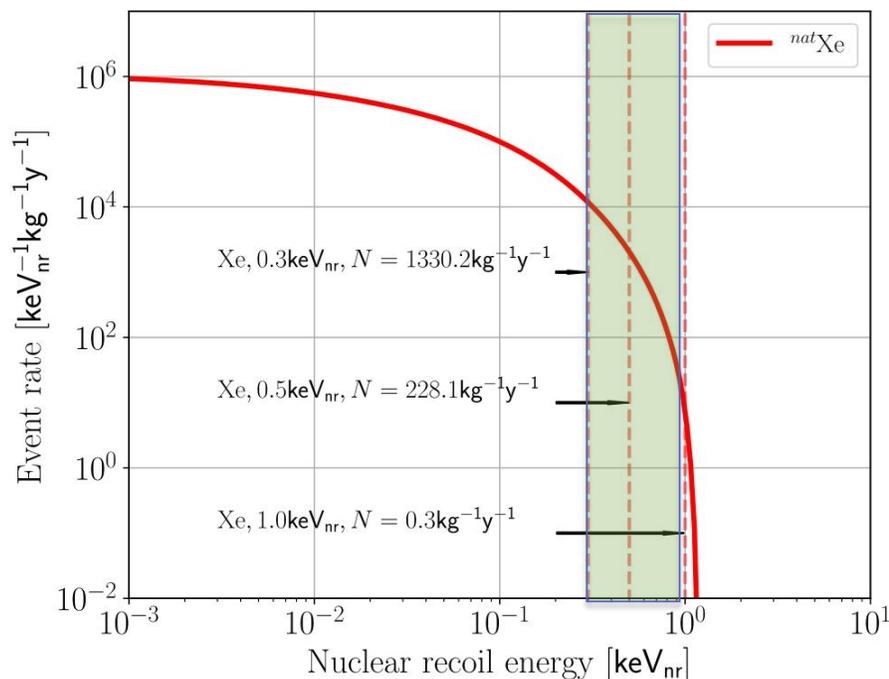
RELICS探测器



- Extraction field 10kV/cm
- drift field 500V/cm ν



- 有效质量32kg液氙，4π反符合层；
- 伽马、贝塔事例率被压低~5倍；
- 反冲能量 ~ 0.3-1keV；
- S2 only分析(沉积能量太低，低阈值探测)；



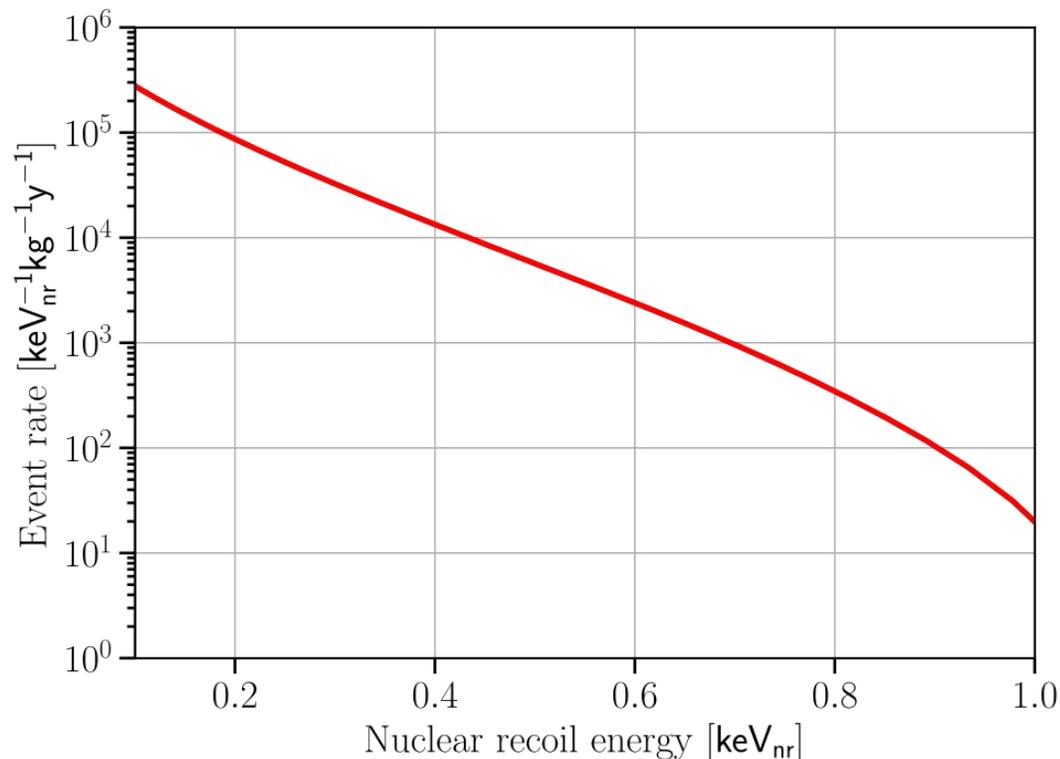
- 反应堆中微子与Xe核碰撞的事例率分布

$$E = 13.7\text{eV} \left(\frac{cS1}{g_1} + \frac{cS2}{g_2} \right)$$

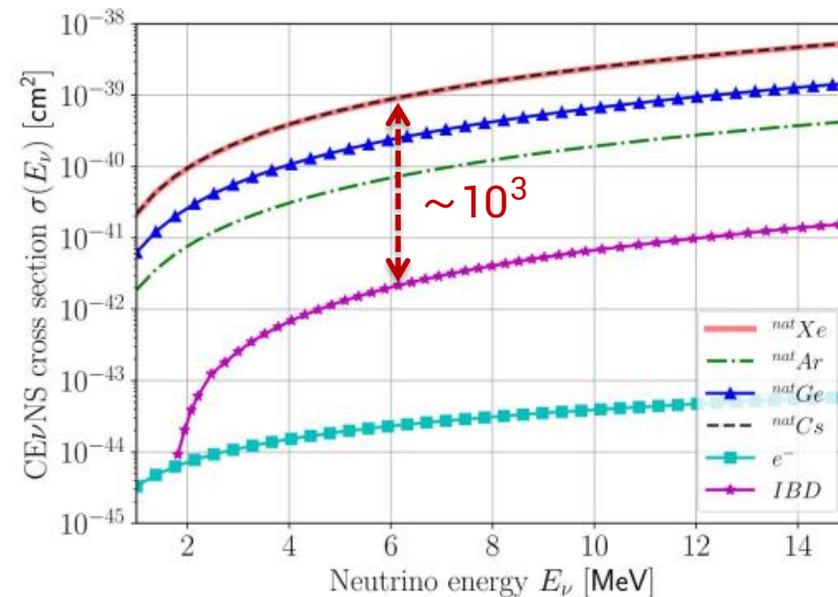
- 由于本底信号的构成，选择4电子作为分析阈值
- $g1 \sim 0.115 \text{ PE}/\text{photon}$
- $g2 \sim 30 \text{ PE}/e$;

CE ν NS事例率

$$\bullet \frac{dN}{dE_R} = N_t \int \phi(E_\nu) \frac{d\sigma}{dE_R} dE_\nu$$

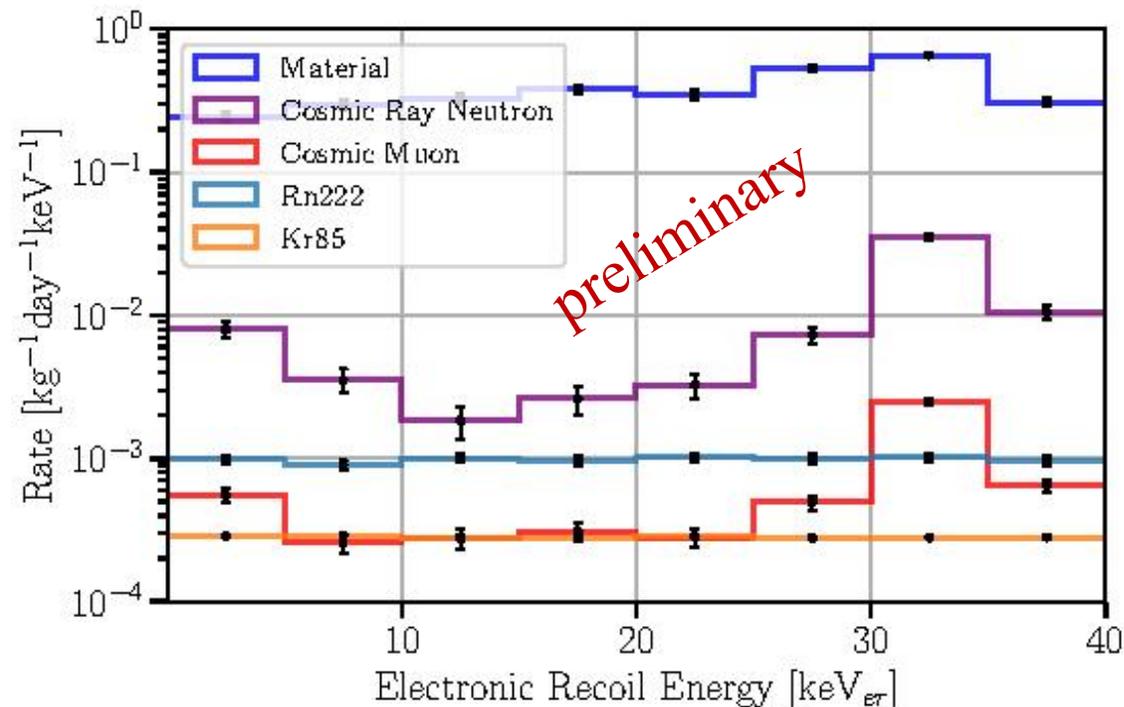
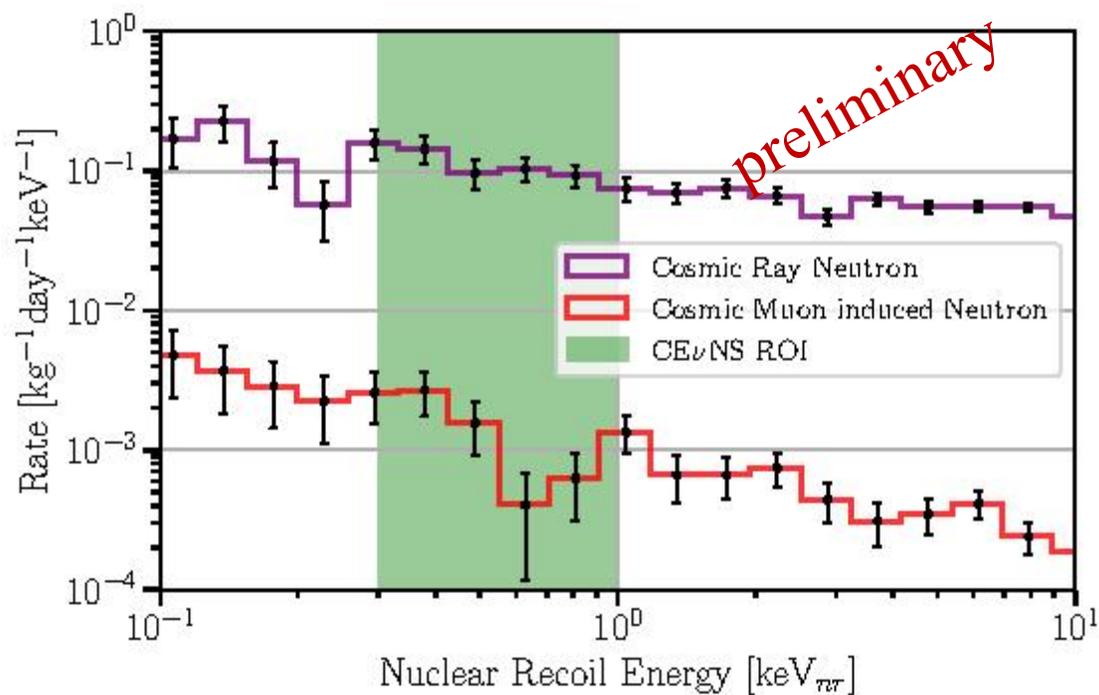


- 探测器能区内信号的分布



- 中微子流强 $\sim 1e13 \nu \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$;
- 低能区 $[0.3, 1] keV_{nr}$;
- $32 kg \cdot year$ 曝光量;
- 预计13673.5个CE ν NS事例;

RELICS实验直接本底

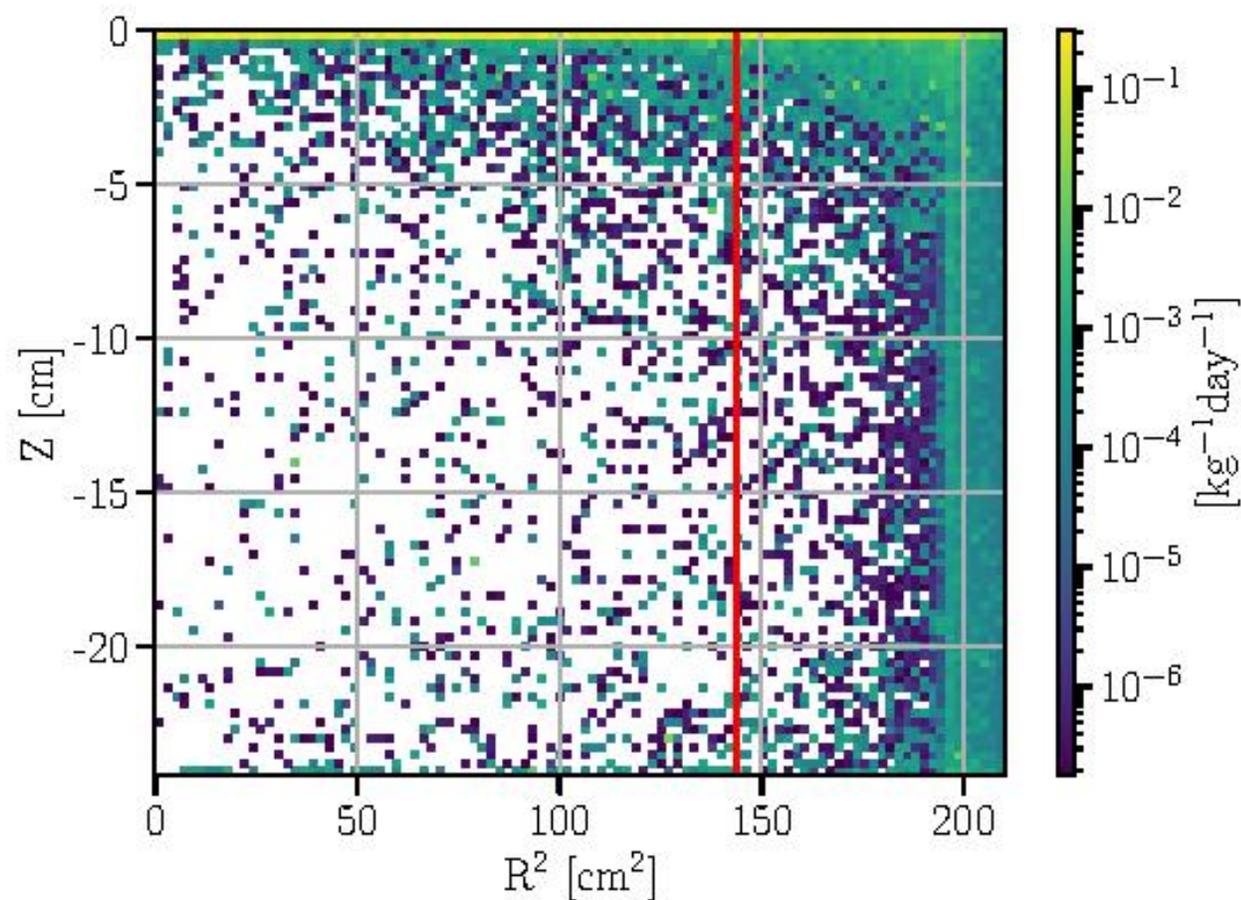
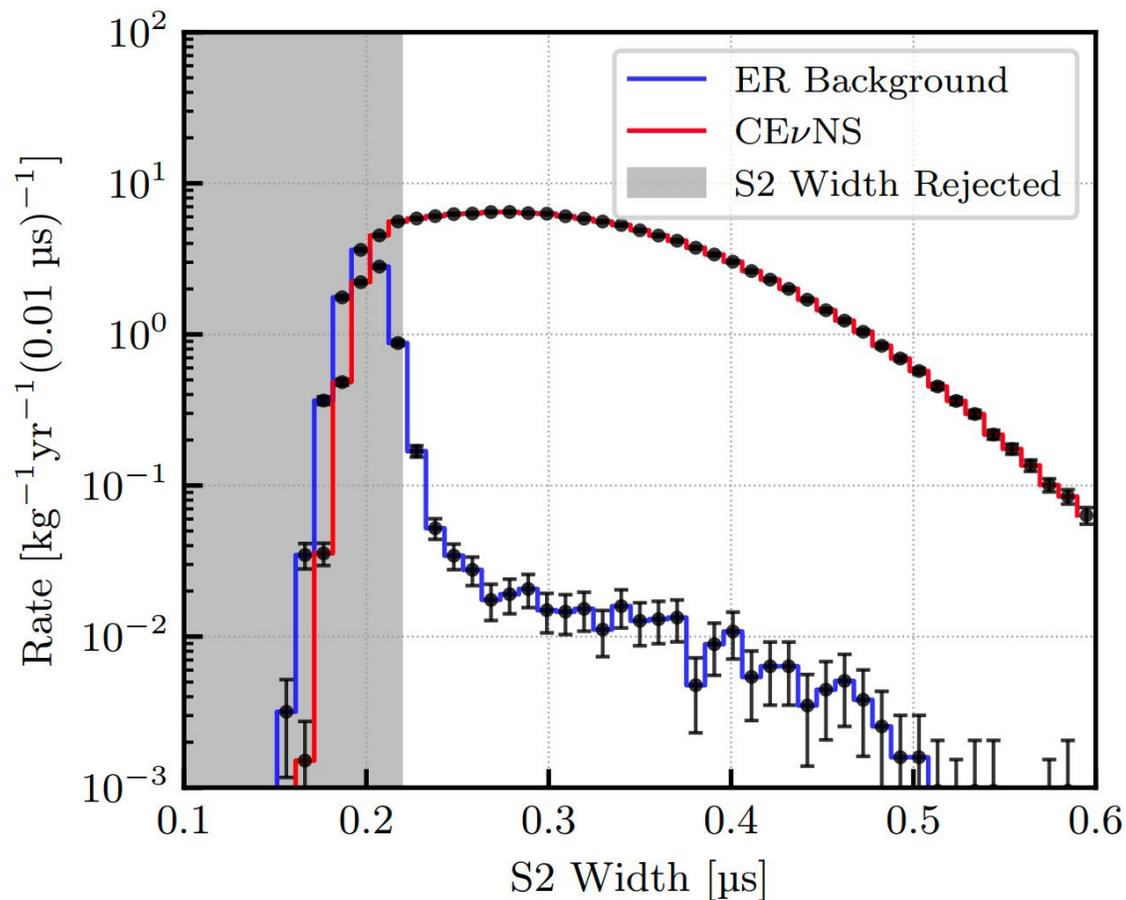


- 核反冲本底 $[0.3, 1] \text{keV}_{nr}$, $(7.7 \pm 0.7) \times 10^{-2} \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$

- 宇宙线中子本底比宇宙线缪子引入的中子高2个量级
- (LXe-veto、单次散射、有效体积筛选、99%缪子探测效率)

- 电子反冲本底 $[0, 40] \text{keV}_{er}$:
 $(9.0 \pm 0.3) \times 10^{-3} \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$
- 探测器材料是主要的电子反冲本底来源

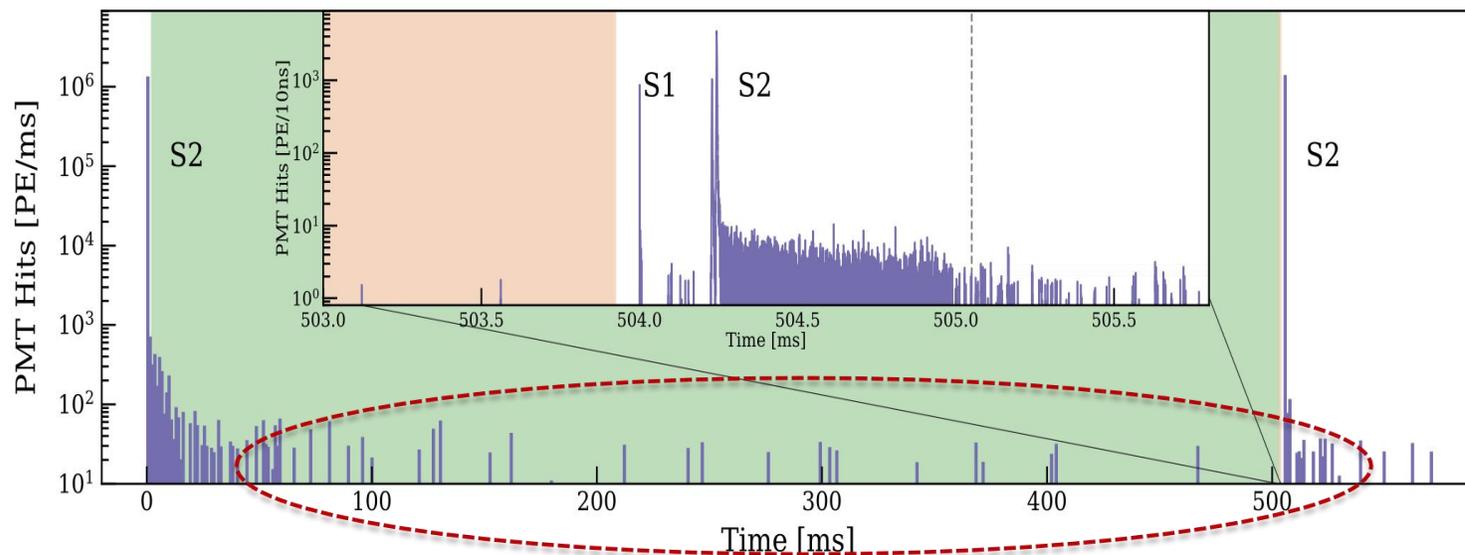
利用S2宽度压低材料本底



- 探测器顶部屏蔽效果差，对电子反冲本底贡献更高；
- 若S2 宽度大于0.22 μs ，本底排除率94%，CE ν NS存活率86%

延迟电子本底

E. Aprile *et al.* (XENON), Phys. Rev. D 106, 022001(2020)

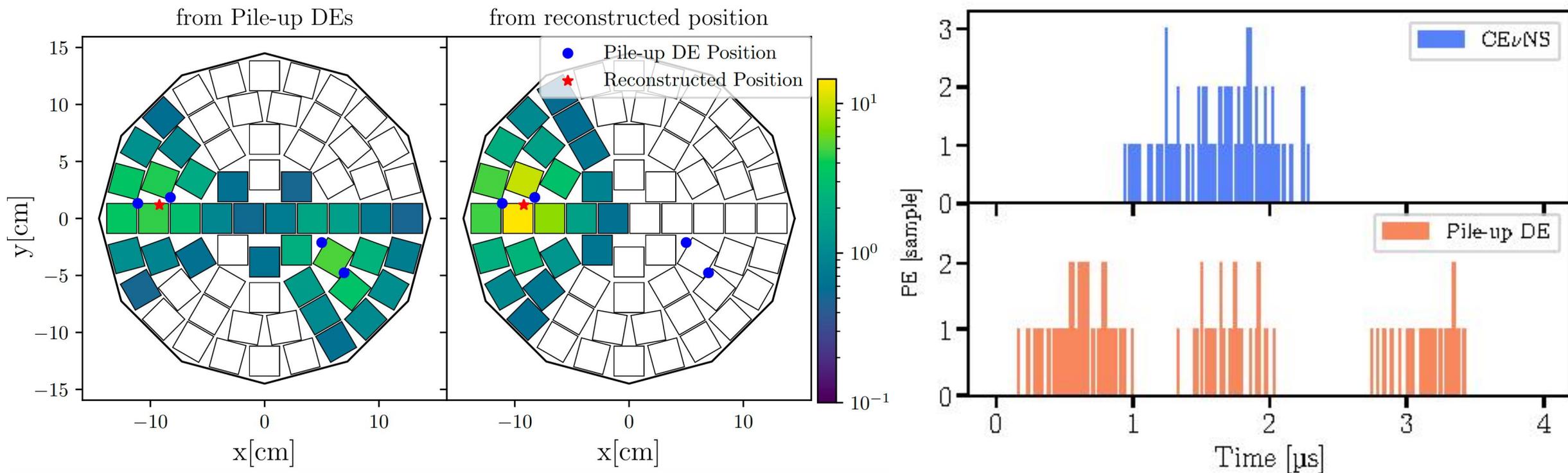


模拟32kg.year曝光量下CE ν NS
和延迟电子pile-up事例数

N_e	CE ν NS	DE pile-up
3	3.5×10^4	9.8×10^8
4	1.5×10^4	7.3×10^6
5	6.9×10^3	6.9×10^5
6	3.2×10^3	7.5×10^4

- 大信号后伴随离散的单电子、多电子信号,秒级别时间内,事例率呈幂指数衰减;
- 宇宙线缪子(10Hz)是主要的延迟电子本底来源;
- 延迟电子堆叠可能会被误鉴别为多电子事件,事例率远高于CE ν NS信号的事例率;

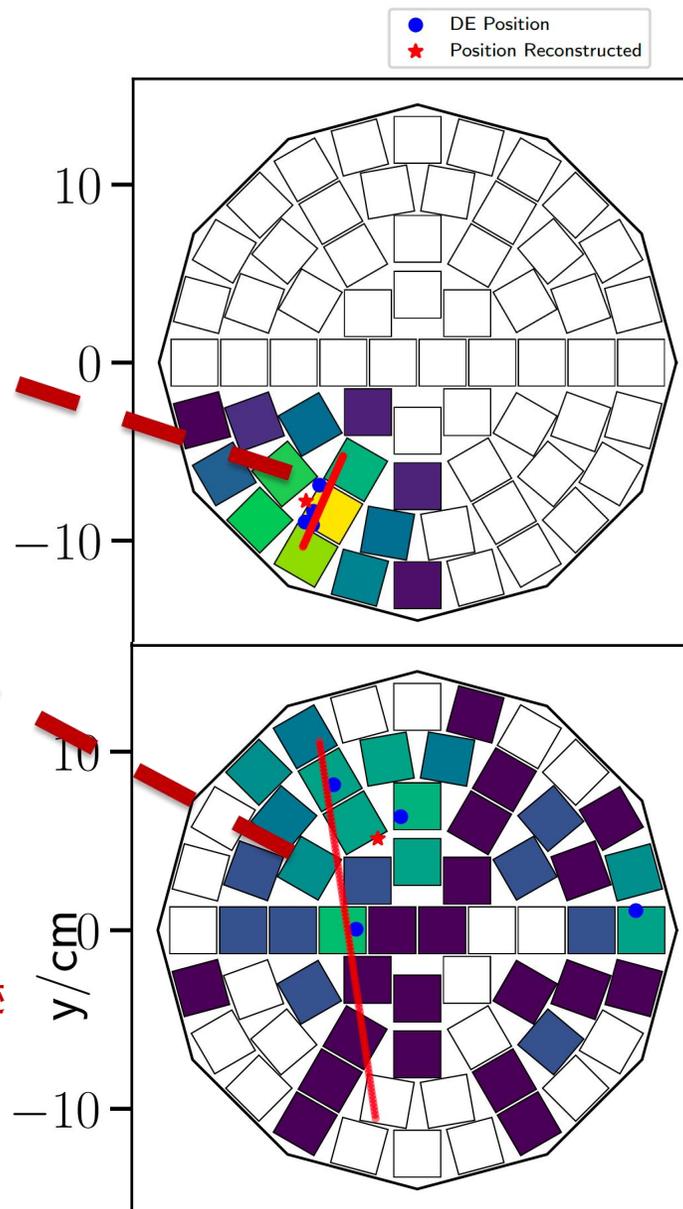
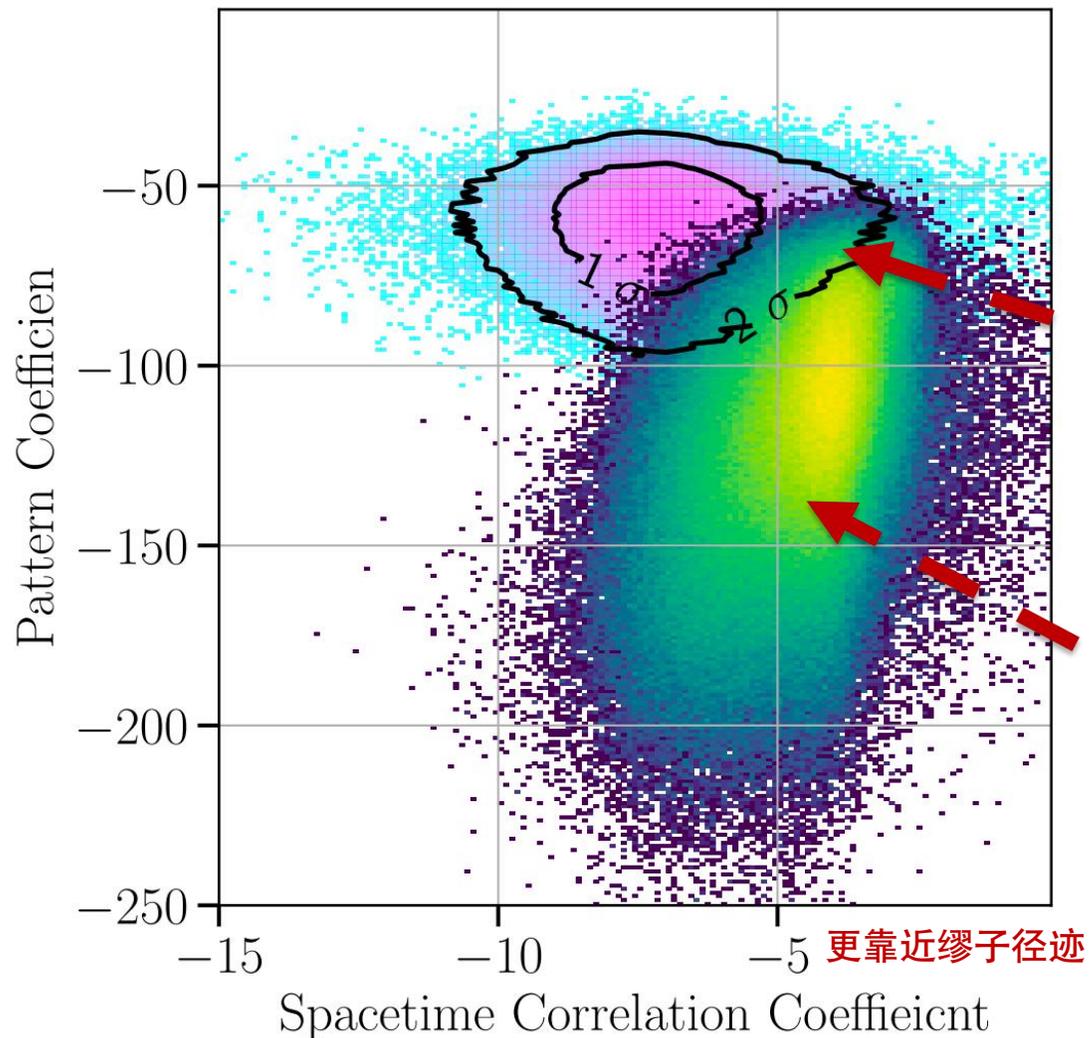
延迟单子的区分



- 宇宙线缪子来自各个方向，产生的延迟电子pattern相对分散；
- CEνNS事例是单一位置的核反冲，pattern呈点状集中特征；
- 根据波形特征进行区分；

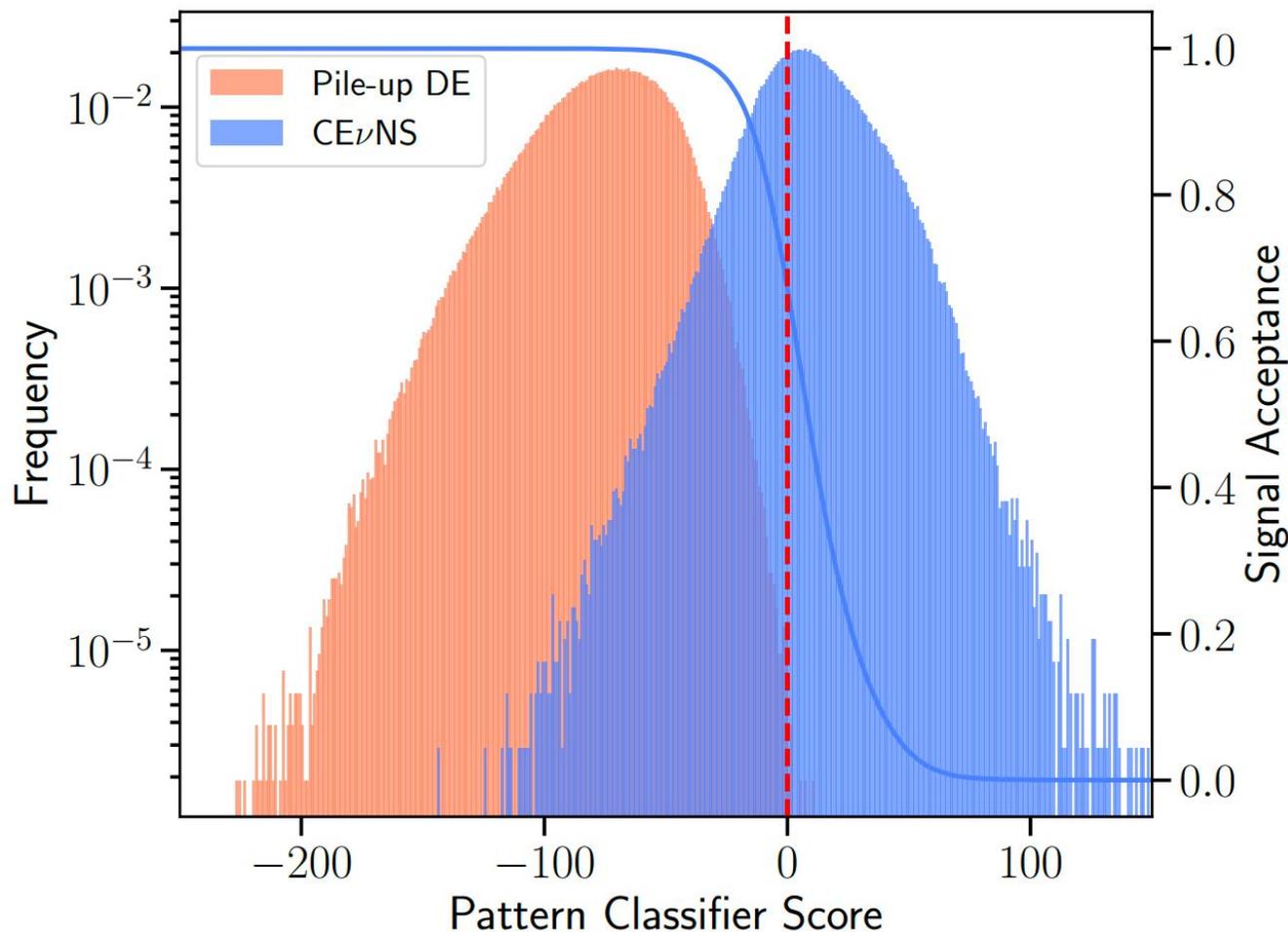
延迟电子的区分

更像点状事件



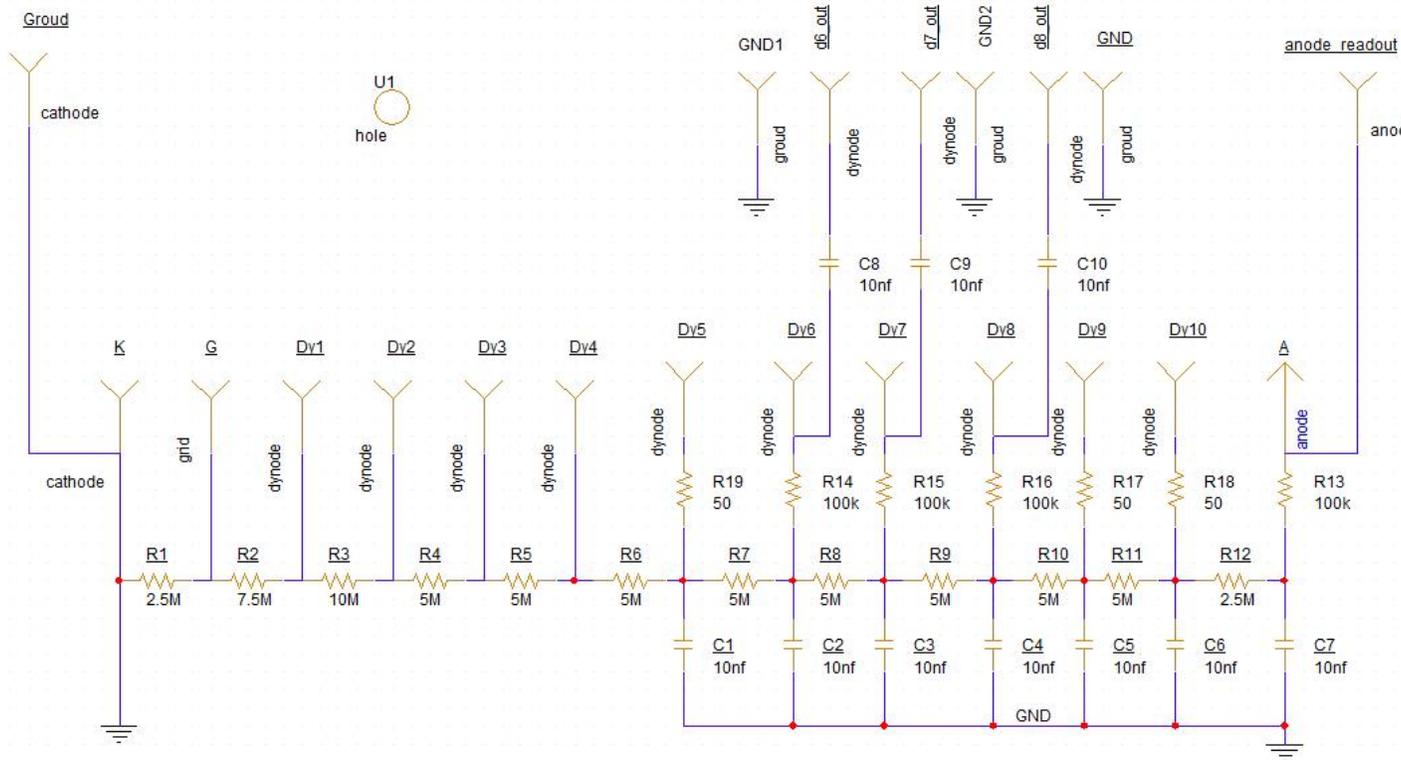
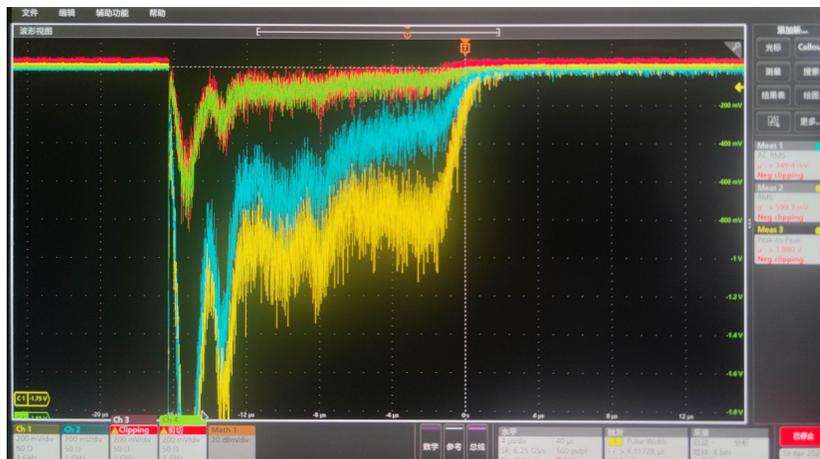
- 垂直缪子的延迟电子分布
- 区分度小

- 水平缪子的延迟电子分布
- 区分度大



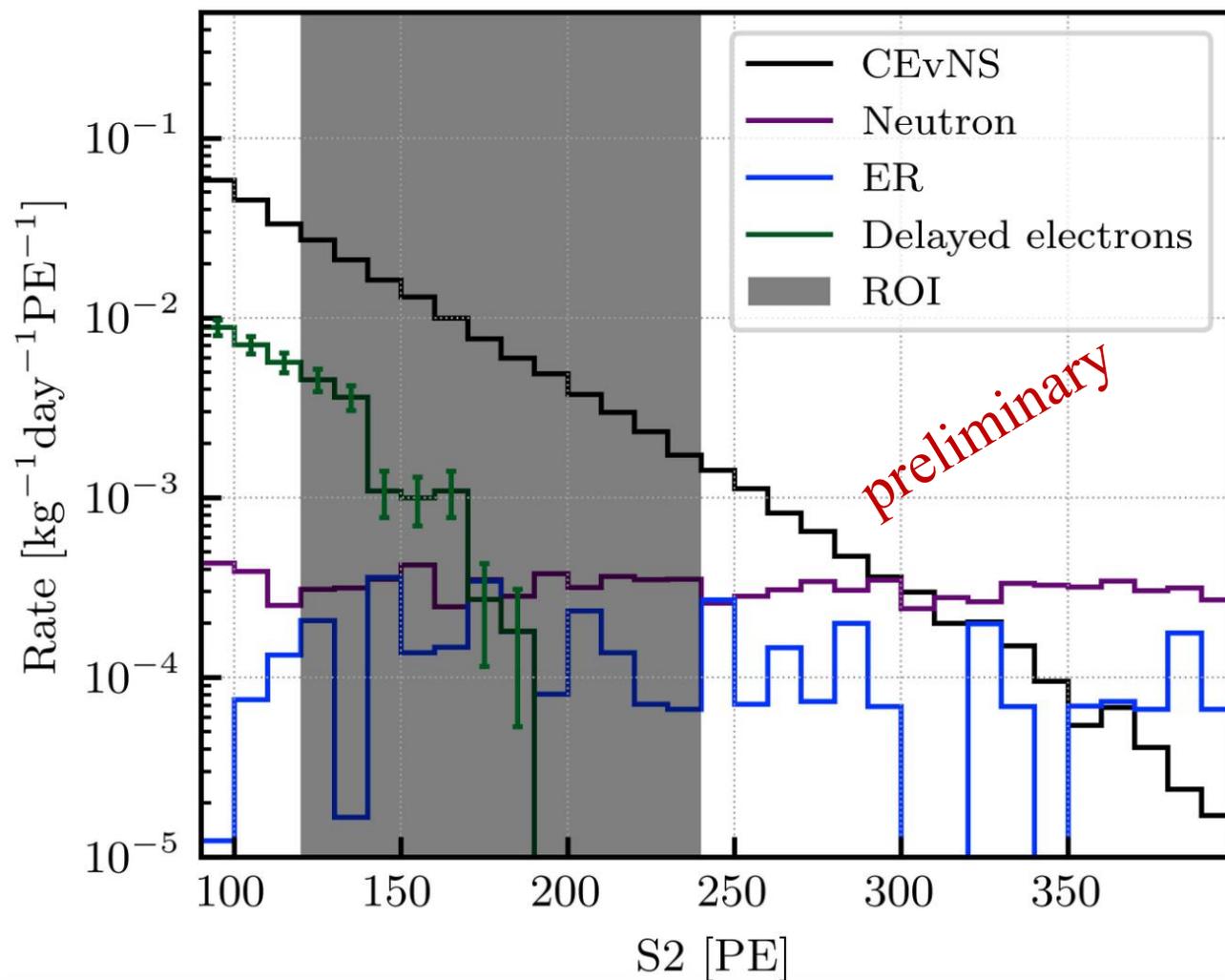
- 基于高维空间中分布，区分CEνNS和延迟电子堆叠本底；
- 最终将该本底压低4个数量级，信号损失33%。

扩展光电管信号读出范围



- 高能缪子使PMT饱和，无法精确重建其径迹、能量，以对延迟电子本底建模；
- 因此，需要通过前端打拿极读出，扩展读出高能信号能力；
- 同时通过多电容并联，增大输出线性；

RELICS实验信号与本底



CEvNS信号与本底事例数

	Events/(32kg · year)
CEvNS	13673.5
宇宙线中子本底	470.4
宇宙线 μ 诱发中子	2.3
电子反冲本底	232.0
延迟电子	1429
本底总数	2133.7

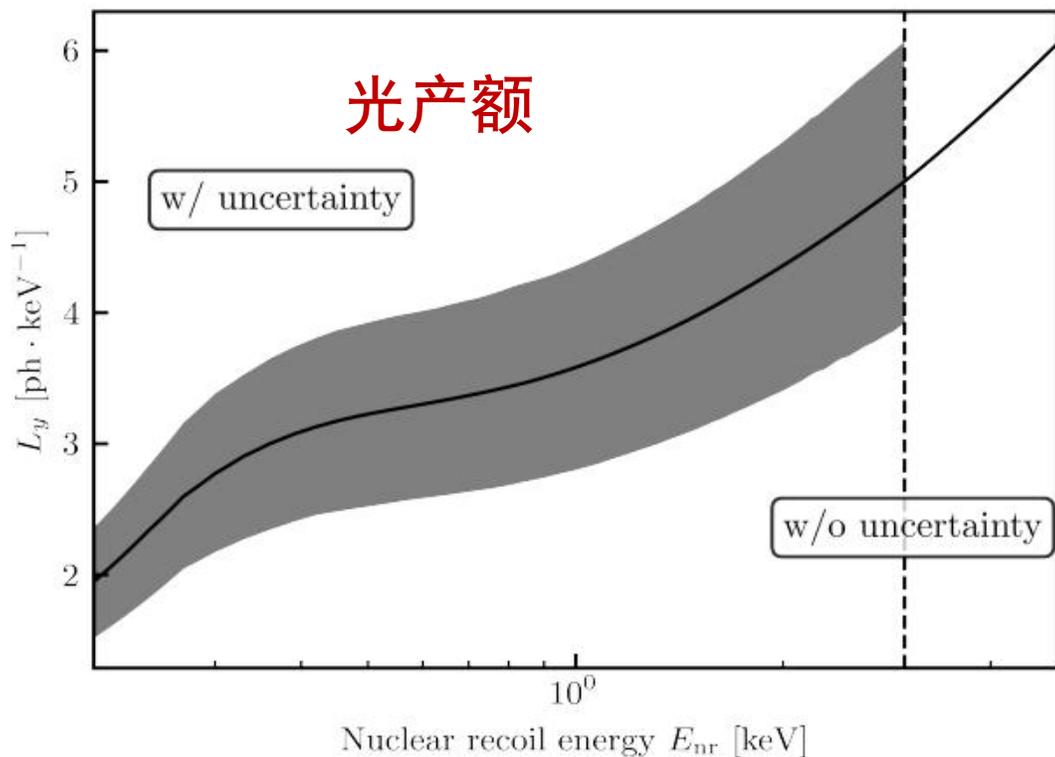
- 延迟电子为首要本底
- 宇宙线中子为次要本底
- 信号探测区CEvNS超出本底~5倍

- 我们确定了RELICS实验主要的本底来源，包括堆叠延迟电子、宇宙线中子、和探测器放射性。
- 我们预期在实验中通过软硬件手段，最终实现 6:1的信噪比。
- RELICS实验有望利用反应堆中微子对弱混合角进行测量，并为反应堆监测技术开发提供支撑。



西湖大學
WESTLAKE UNIVERSITY

Backup Slides



探测器参数

PTFE 反射率	99%
液氙瑞丽散射长度	30cm
液氙吸收长度	50m
电极反射	57%
PMT量子效率	33%
PMT信号收集效率	75%
双光电子概率	21.9%
单电子增益	30 PE/e ⁻

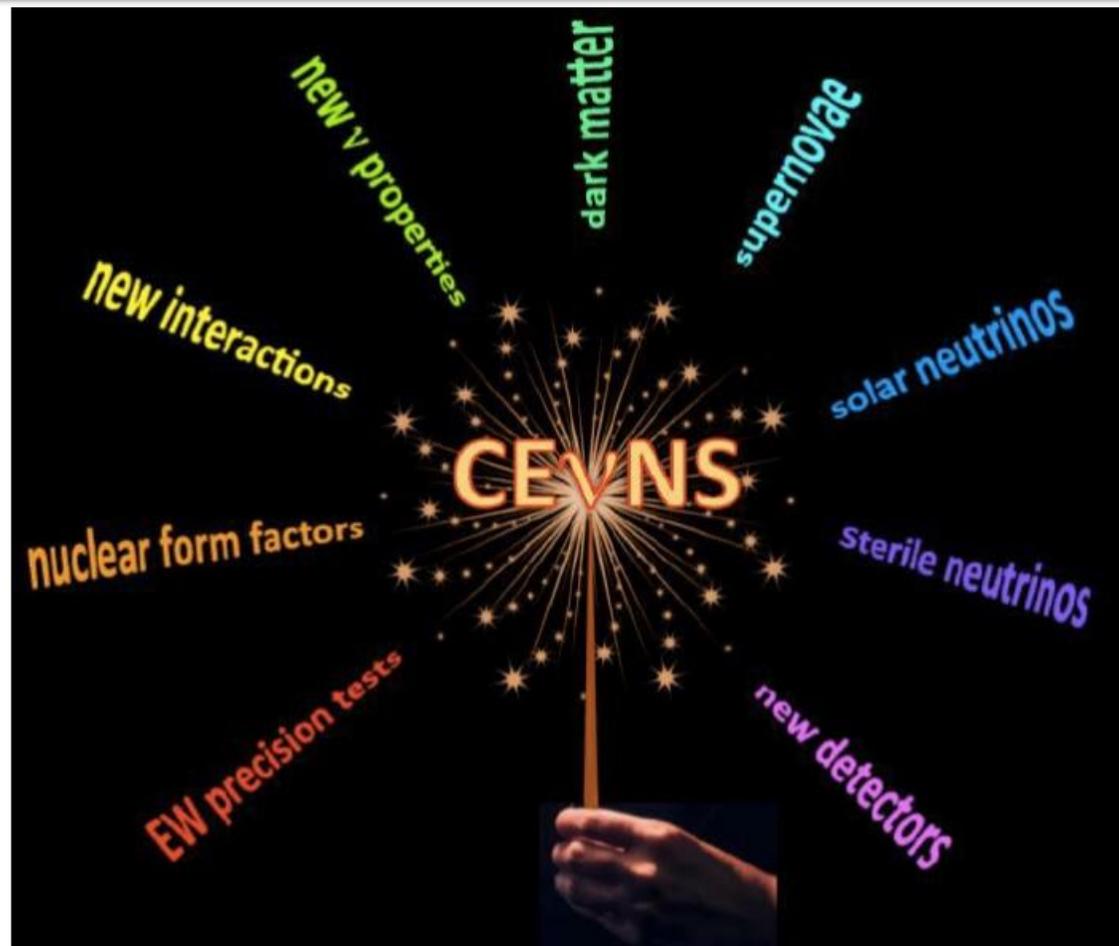
- 极低反冲能量液氙光产额很少

$$E = 13.7\text{eV} \left(\frac{cS1}{g_1} + \frac{cS2}{g_2} \right)$$

- $g_1 \sim 0.115 \text{ PE}/\text{photon}$
- $g_2 \sim 30 \text{ PE}/e^-$;

CEvNS研究的意义

- 粒子物理：
 - 低动量转移下的弱混合角
 - 中微子非标准相互作用
 - 中微子反常磁矩
 - 惰性中微子
- 天体物理：
 - 暗物质直接探测的重要本底
 - 天体中微子探测的新手段
- 核物理：
 - 原子核的形状因子
- 中微子探测的应用：
 - 中微子探测器小型化
 - 反应堆监测



E. Lisi @Neutrino 2018