

Screeener3D: 用于极低放射性 材料筛选的带电粒子探测器

韩柯

上海交通大学

2021/10/22

上海交通大学：杜海燕，张文铭，Karl Giboni，韩柯，孟月，王少博，张涛，赵力

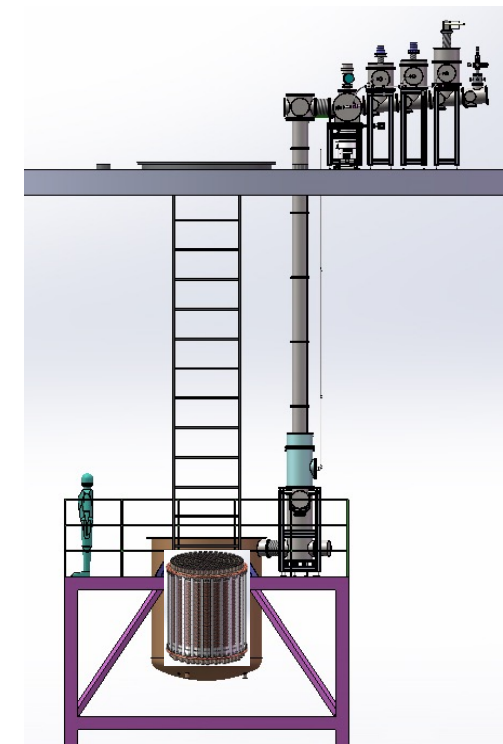
雅砻江流域水电开发有限公司：何胜明、周济芳、杜成波、刘立强

稀有事件实验中的材料表面放射性问题

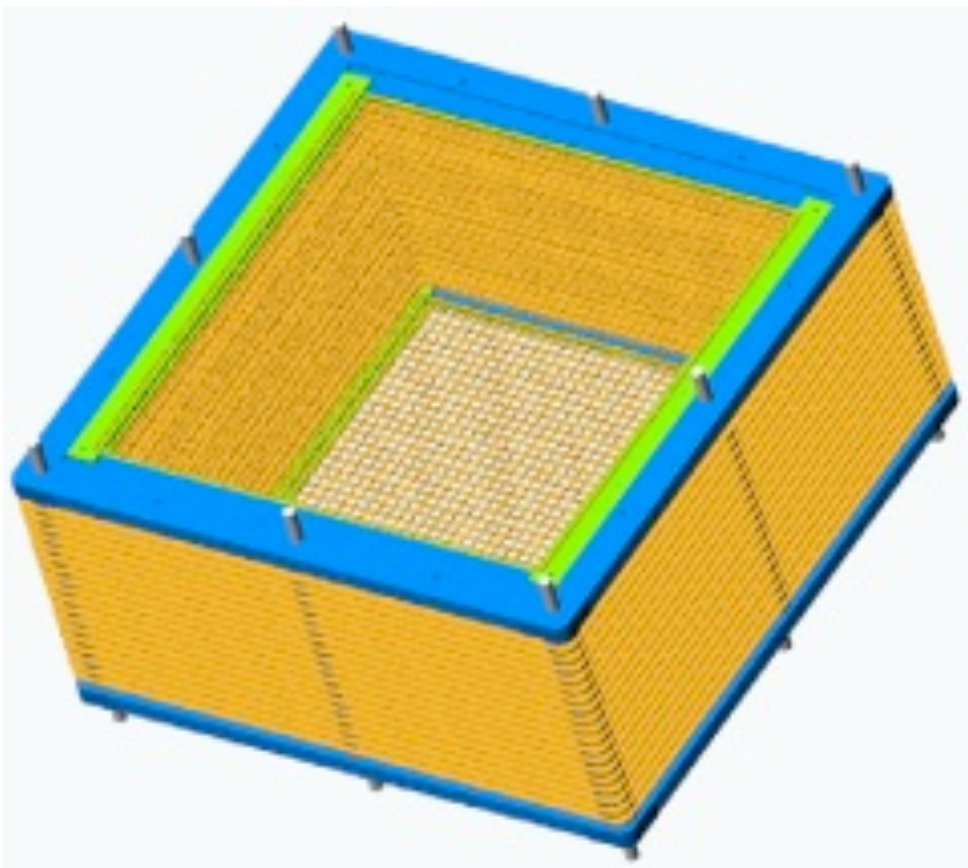
- 稀有事件实验：探测器本底水平直接决定物理灵敏度
- 放射性洁净度要求=块材洁净+表面洁净
 - 零件机械加工、组装调试、氦气及其子核→表面二次污染
- 表面污染直接、间接引入本底
 - 表面污染释放的 α 、 β 粒子→本底事件（CUORE、CDMS等）
 - 表面污染源→转移到灵敏体积→本底事件（PandaX、KamLAND-Zen等）

Summary of ER and NR backgrounds		
Source	ER in mDRU	NR in mDRU
Materials	0.0210 ± 0.0042	$2.0 \pm 0.3 \cdot 10^{-4}$
^{222}Rn	0.0114 ± 0.0012	-
^{85}Kr	0.0053 ± 0.0011	-
^{136}Xe	0.0023 ± 0.0003	-
Neutrino	0.0090 ± 0.0002	$0.8 \pm 0.4 \cdot 10^{-4}$
Sum	0.049 ± 0.005	$2.8 \pm 0.5 \cdot 10^{-4}$
2-year yield (evts)	1001.6 ± 102.2	5.7 ± 1.0
after selection (evts)	2.5 ± 0.3	2.3 ± 0.4

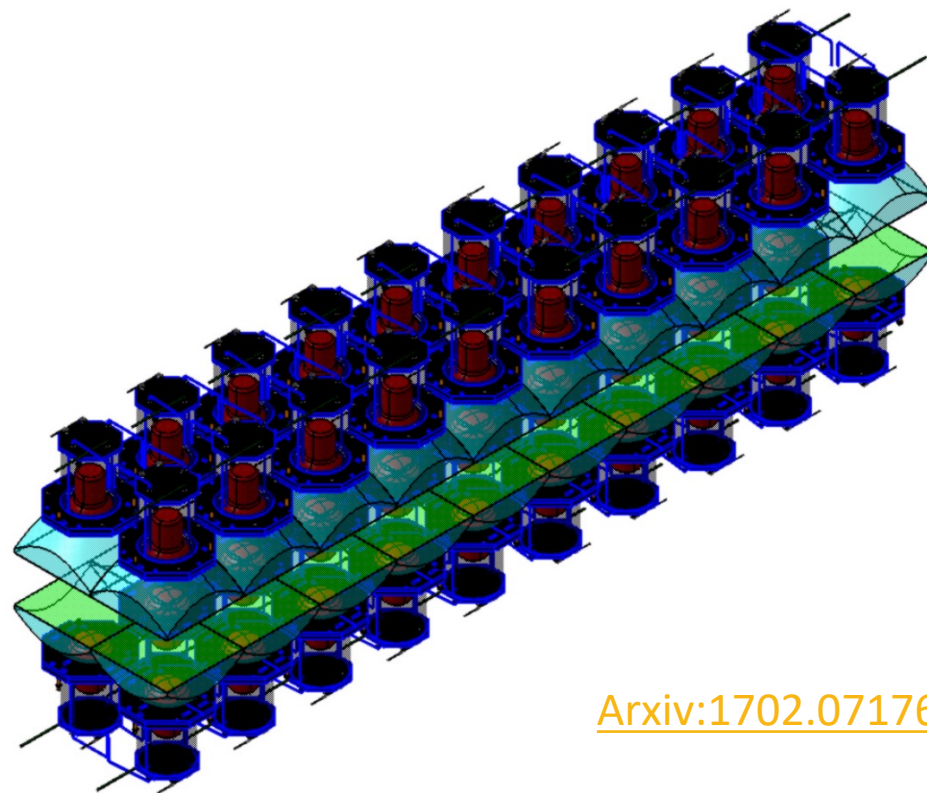
PandaX-4T实验氦气贡献电子反冲（ER）本底，氦气主要来源于探测器和相关管路材料表面的氦释气。



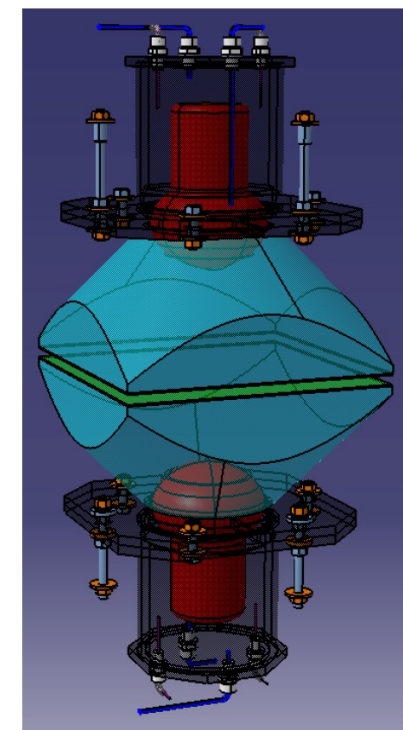
仪器与方法	典型对象	典型精度	设备举例	备注
高纯锗 (HPGe) γ 谱线分析	高纯无氧铜内的 ²³⁸ U和 ²³² Th	1-10 μ Bq/kg (10 ⁻⁸ -10 ⁻⁹ g/g)	清华GeTHU; 意大利GeMPI	无损检测, 对样品没有任何影响
中子活化分析 (NAA)	特氟龙内的 ²³⁸ U和 ²³² Th	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻¹¹ g/g	美国MIT, UC Davis 中子活化设施	需要利用中子辐照; 测量窗口短
电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS)	高纯无氧铜内的重元素	10 ⁻¹² g/g	美国PNNL实验室; 国内多家单位	克量级取样; 复杂化学预处理
带电粒子谱仪 (CPS)	大面积材料表面放射性	10 ⁻⁴ -10 ⁻² Bq/m ²	法国BiPo-3; XIA公司 Ultralo 1800	对材料表面的 α 粒子, 电子放射性灵敏



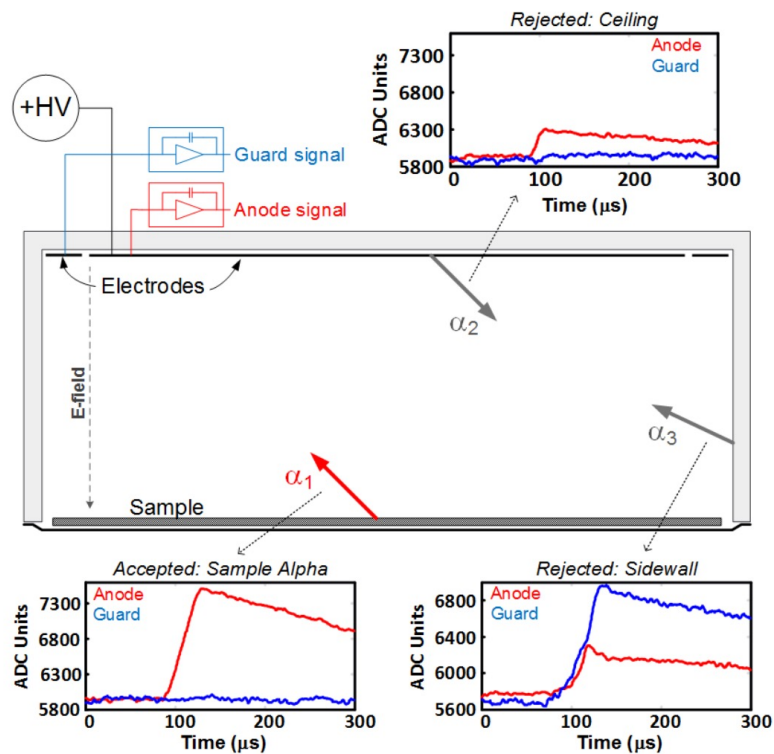
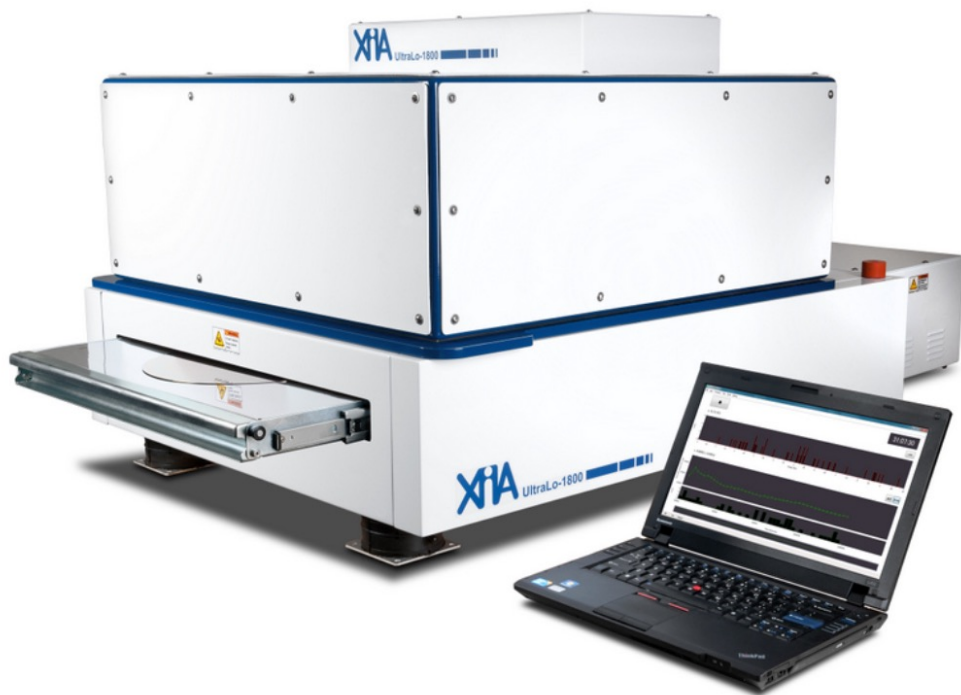
BetaCage : CDMS实验组提出的低本底MWPC设计, 未能实现



[Arxiv:1702.07176](https://arxiv.org/abs/1702.07176)



BiPo-3 : SuperNEMO实验组设计建造PMT阵列, 测量Bi-Po耦合

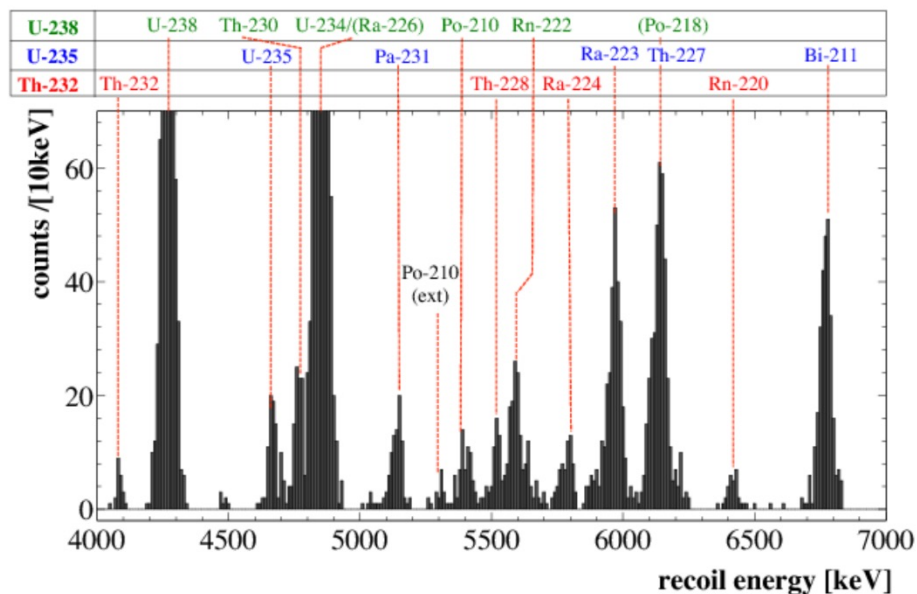


XIA Ultra-lo 1800 : 主要针对半导体硅片测量 ;
9%FWHM@4.6MeV ; 10^{-4} c/cm²/hr , 满足硅片
5 α 每天的要求

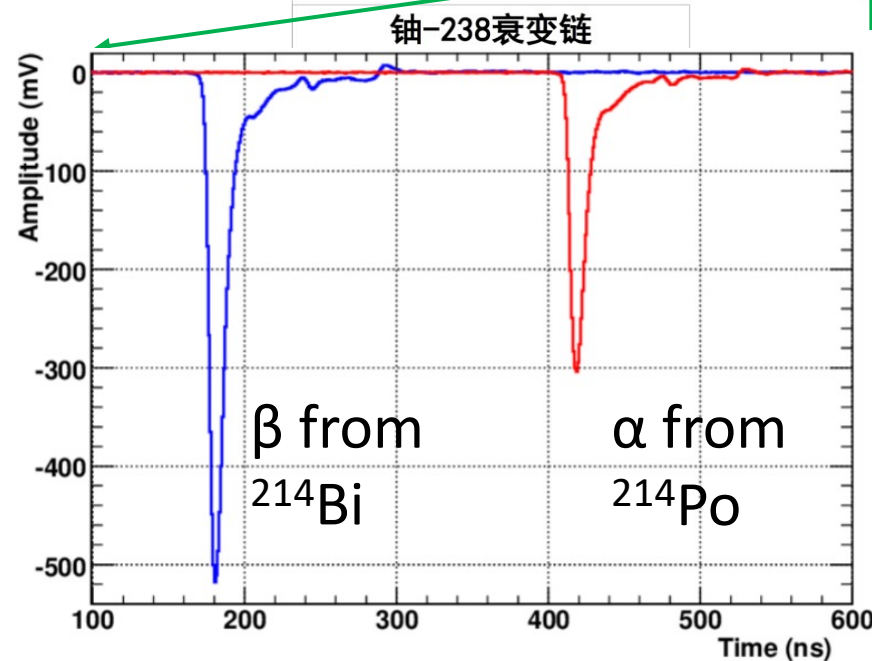
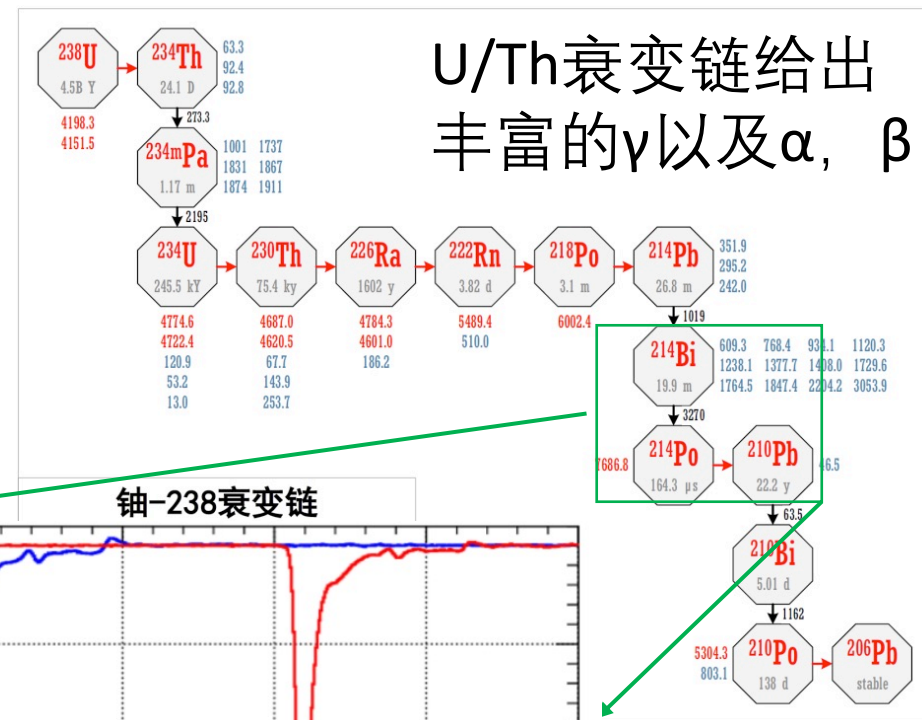
Canberra LB4200 : 最大5
寸硅片 ; 约 10^{-2} c/cm²/hr

利用其放出的 α/β 粒子, 测量材料表面放射性

- 高能 α 粒子的特征谱线可用于分辨不同表面污染
- β 测量针对无 γ 释放 (如 ^{209}Pb) 或者 γ 强度很小 (如 ^{210}Pb) 的同位素
- 同时测量 α, β 的Bi-Po耦合技术

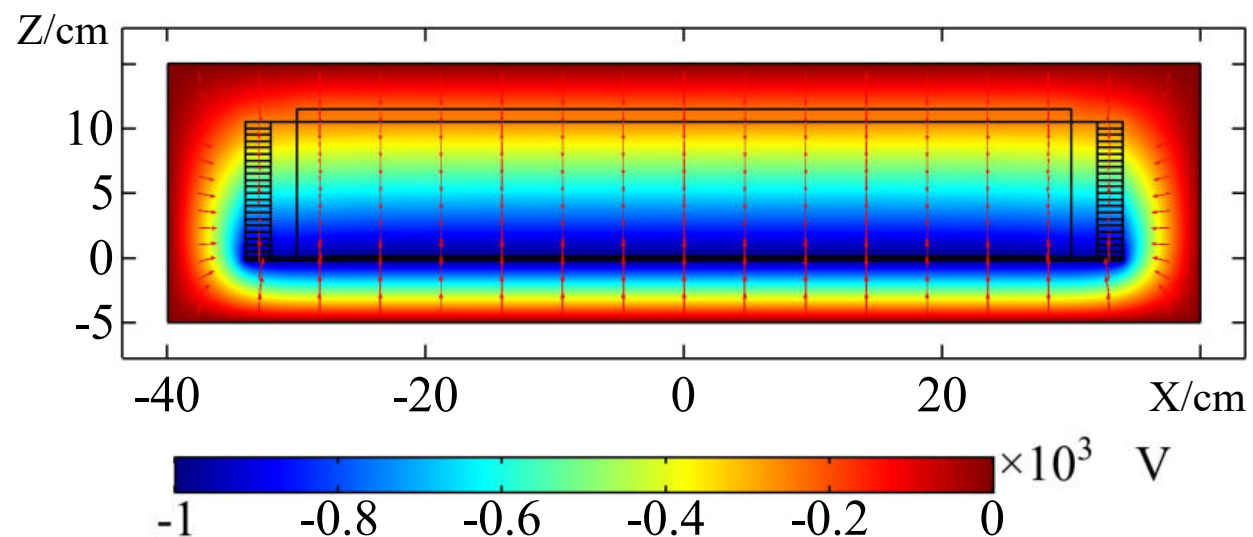
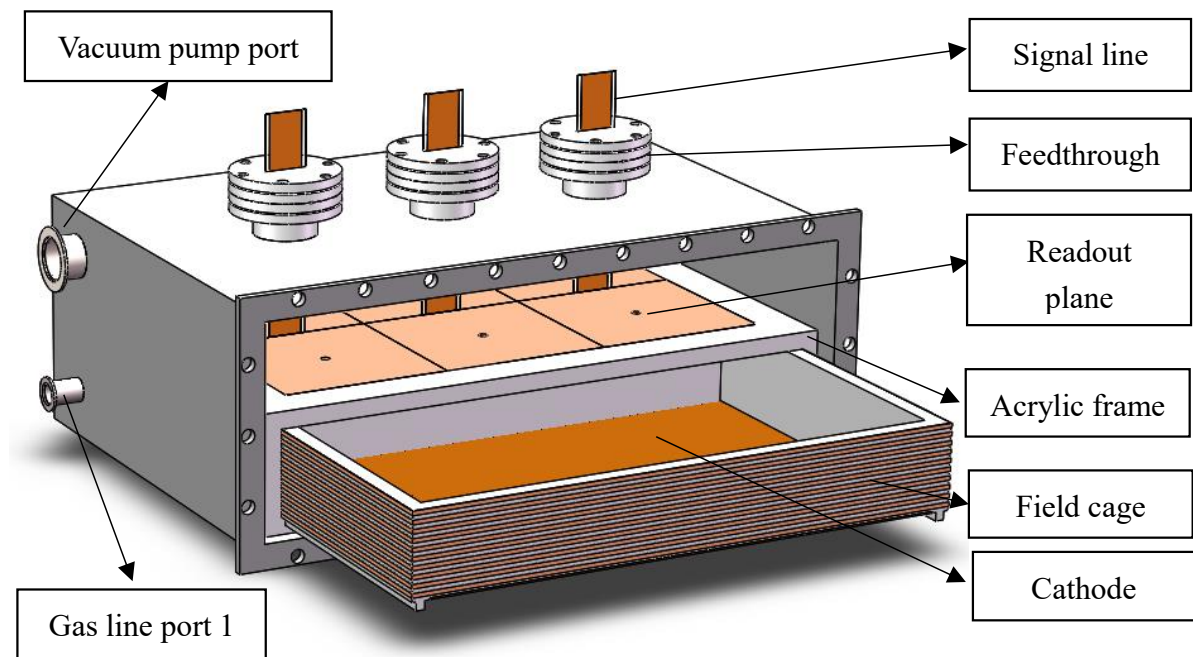


CRESST 实验测量的 α 粒子谱线

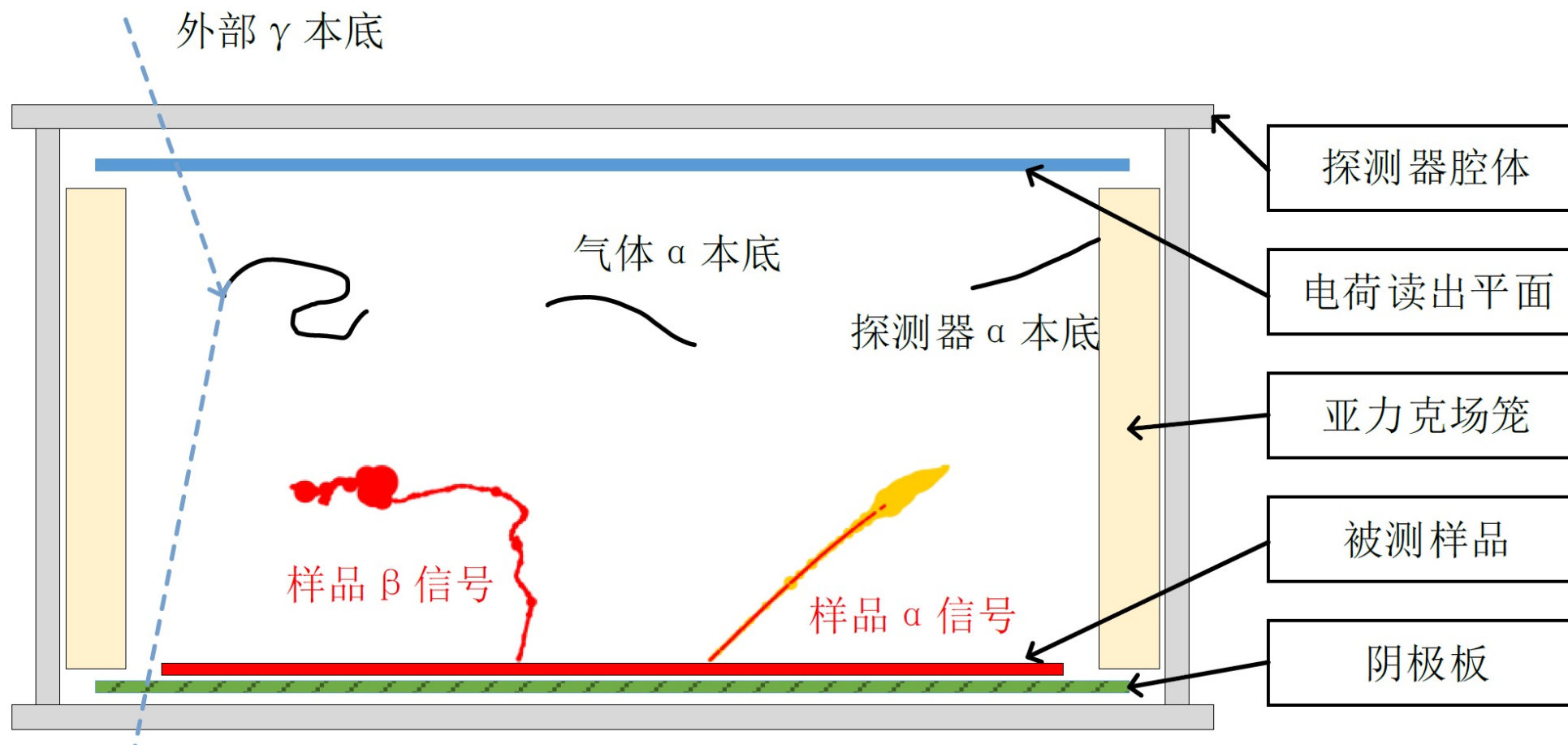


探测器概念设计

- 常压氙气、氙气 (0.5-1.5 bar)
时间投影室探测器 (TPC)
- $40 \times 60 \text{cm}^2$ 电荷读出平面；10cm 漂移距离
- 基于Micromegas + AGET的多通道读出
- 平板型样品直接放置于阴极板上方，保证 α 能量完全沉积到TPC中

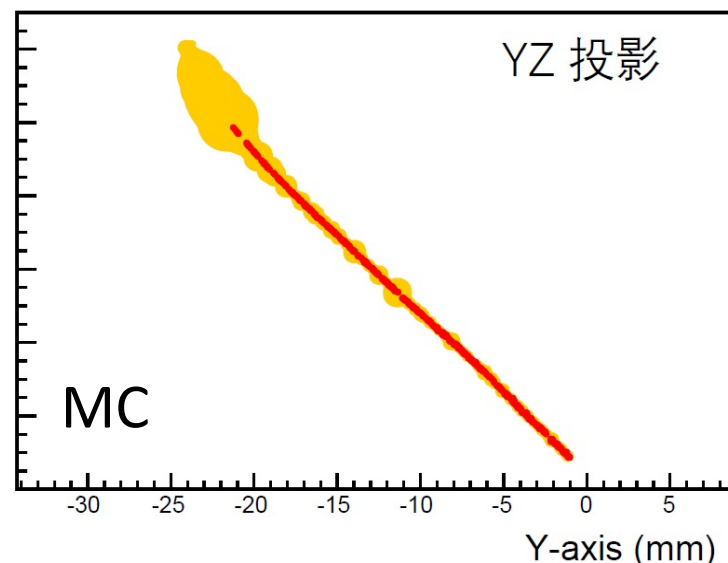
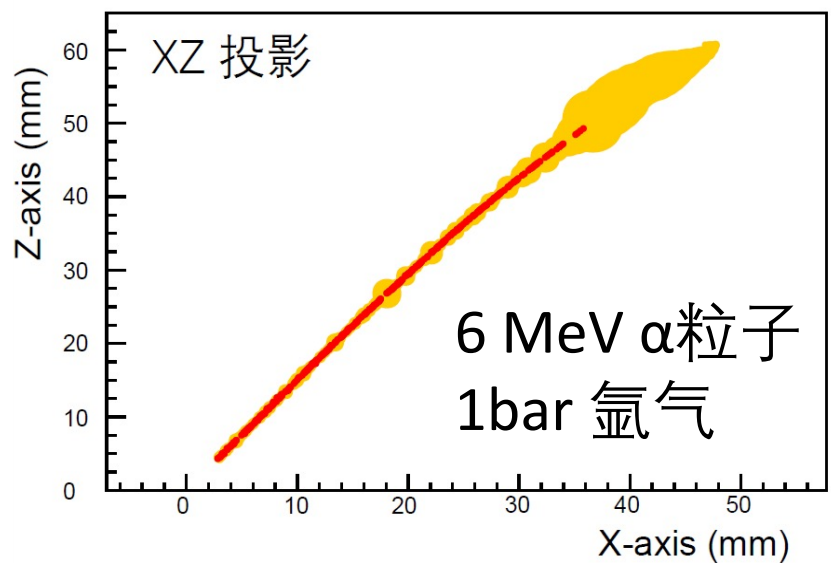
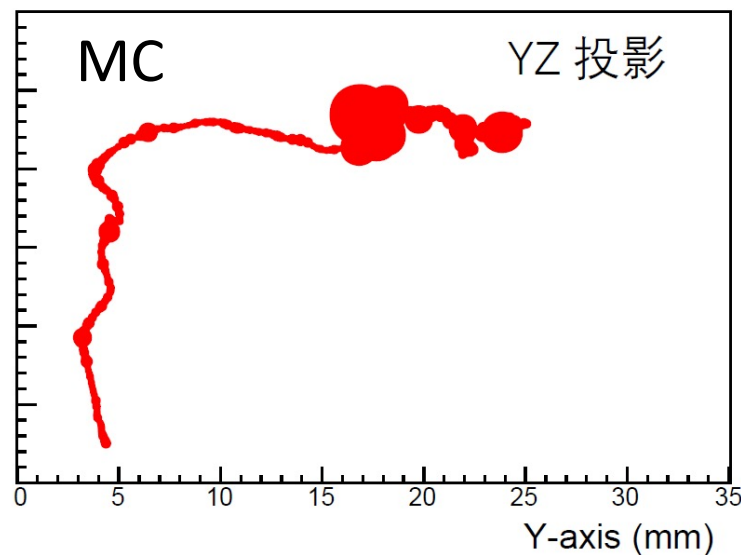
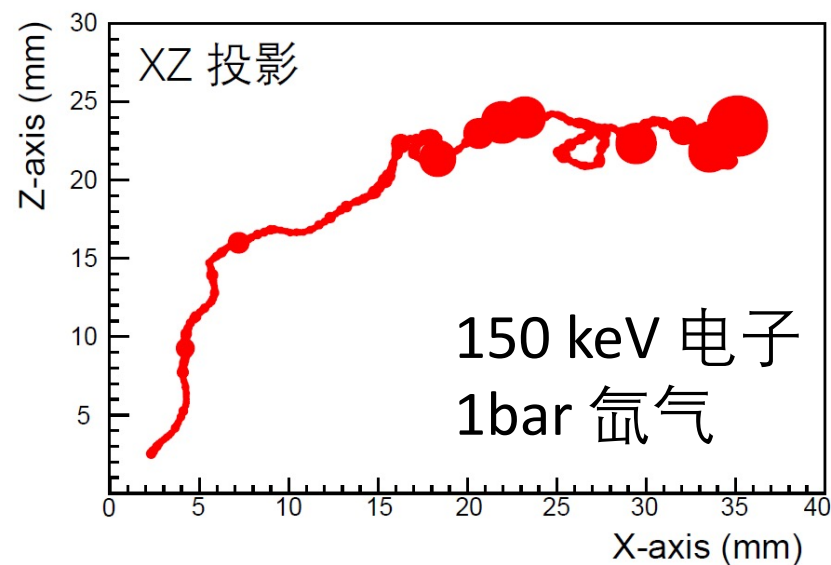


用于极低放射性材料筛选的时间投影室技术：能量+径迹



- 粒子鉴别
- 高位置分辨率
- 本底去除
- 高效率 (>90%)
- 大幅面 ($\sim 2000\text{cm}^2$)
- 可调工作气体、气压

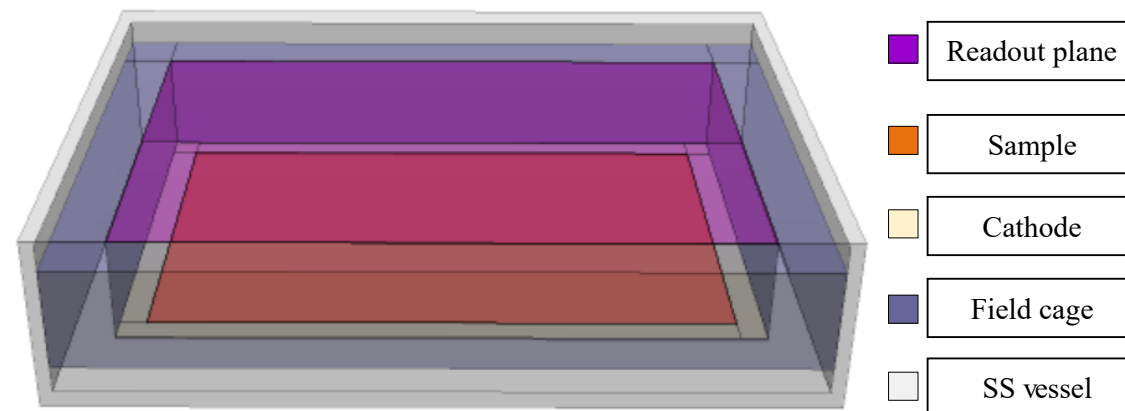
气体TPC核心优势：径迹+能量测量 → 鉴别与定位



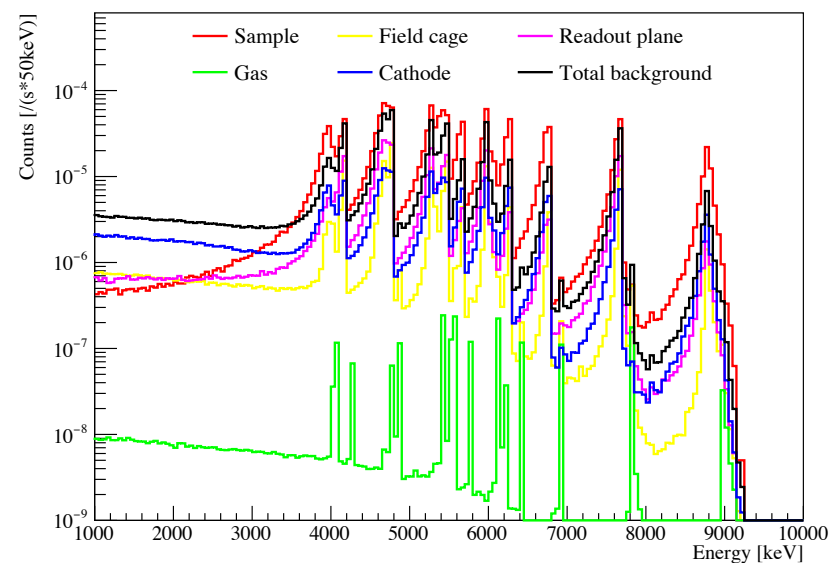
- 粒子鉴别：利用径迹的弯曲程度和 dE/dx 可以明确区分 α/β
- 利用 dE/dx 与布拉格峰确定 α/β 径迹起点，明确放射性来源
 - 去除探测器材料对于 α 测量的影响
 - 大大抑制 β 测量中环境和探测器本底的影响

- 利用GEANT4 + REST 模拟分析框架重建了探测器几何。
- 对于alpha 区间, 开展探测灵敏度研究, 预期灵敏度可达 $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^2$ 以下

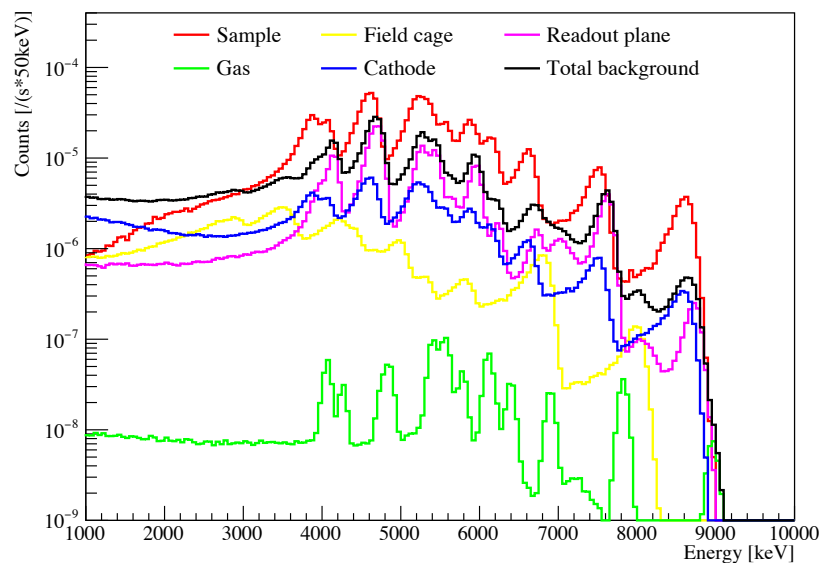
Sensitive Gaseous Volume: 60x40x10 cm, 1 bar Ar



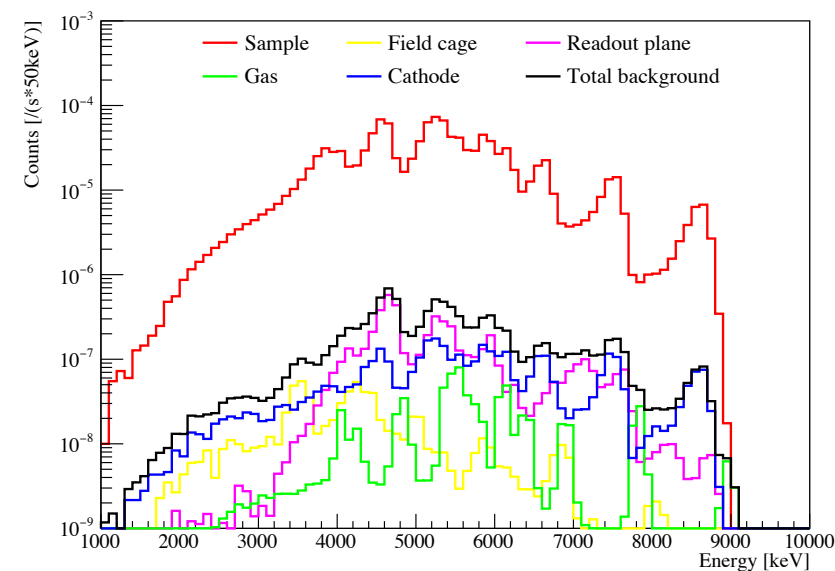
GEANT4 spectrum



+ Energy smearing

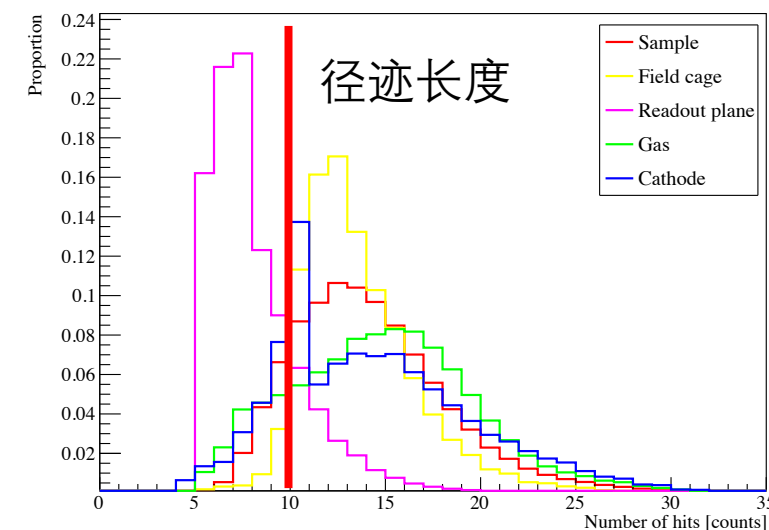
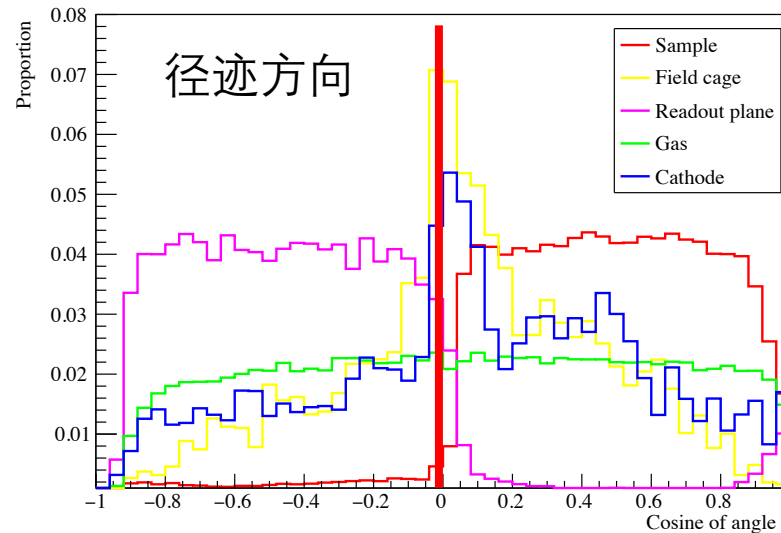
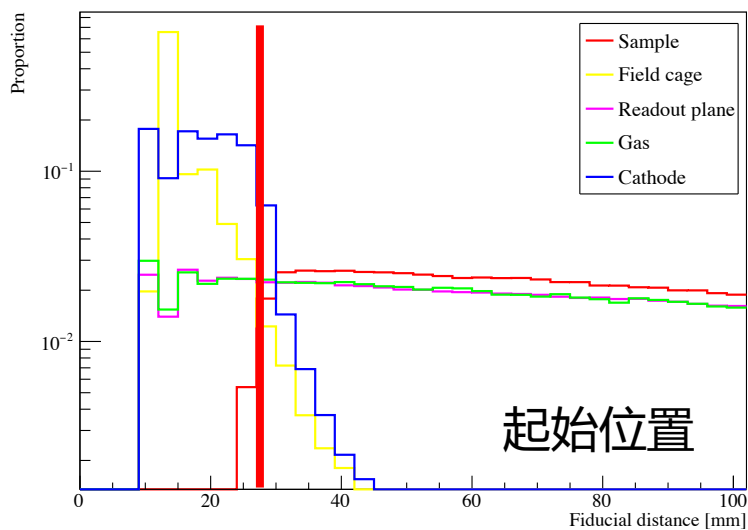
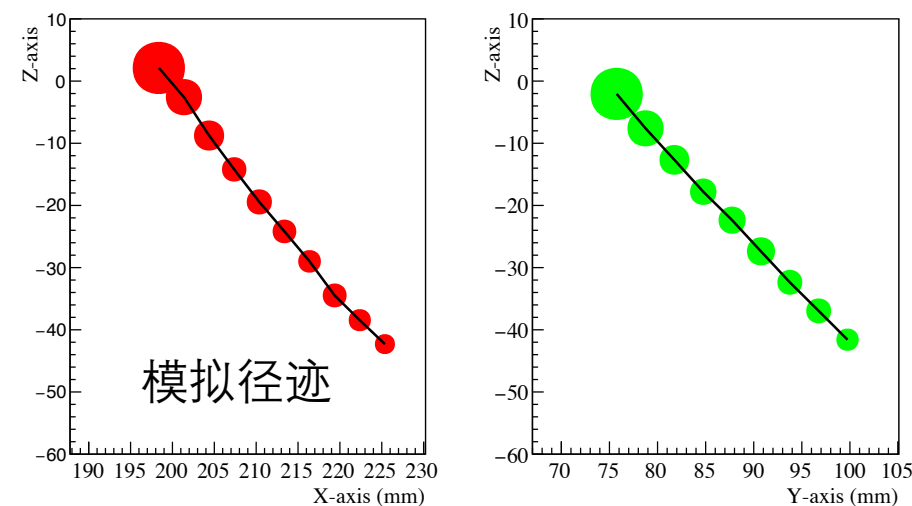


+ Topological cuts

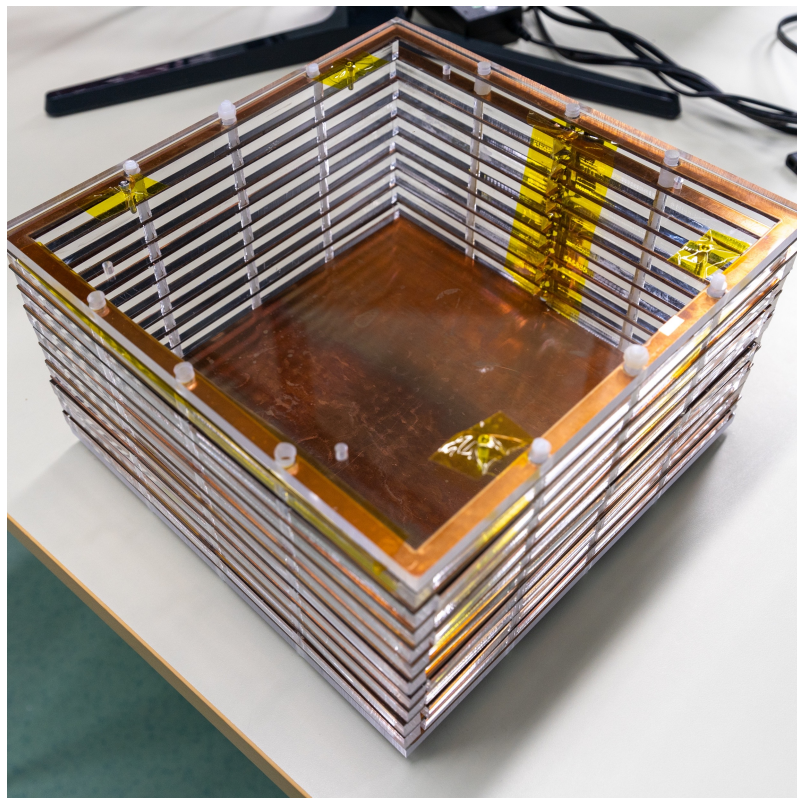


径迹相关cuts (Topological cuts)

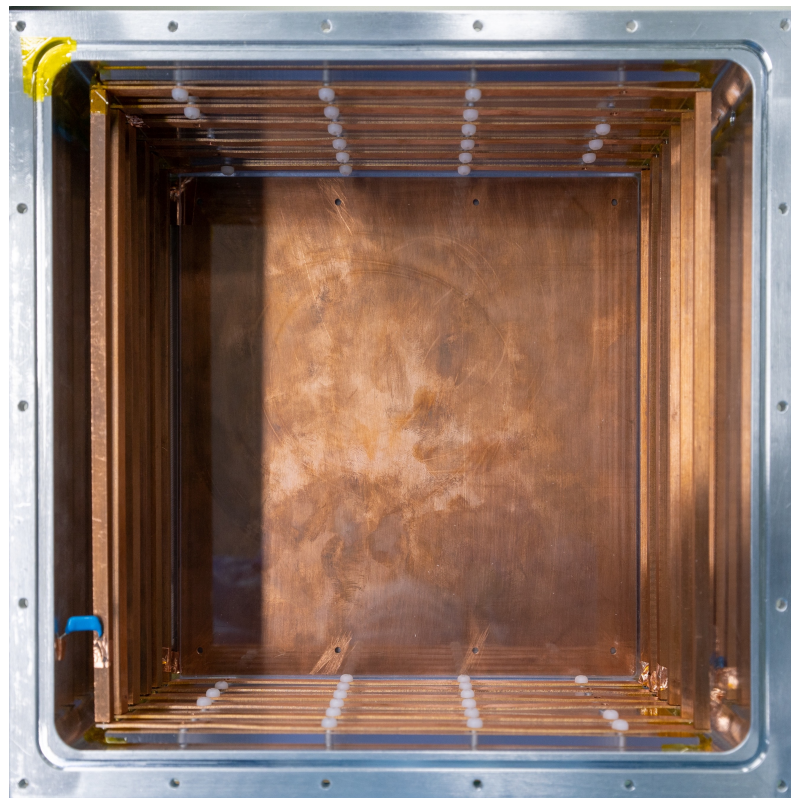
- 利用径迹起始位置, 方向, 长度逐步对事件进行筛选, 压低本底的情况下尽可能的保留信号
- 最终在1-10MeV的区间, 本底事件率小于1个每天



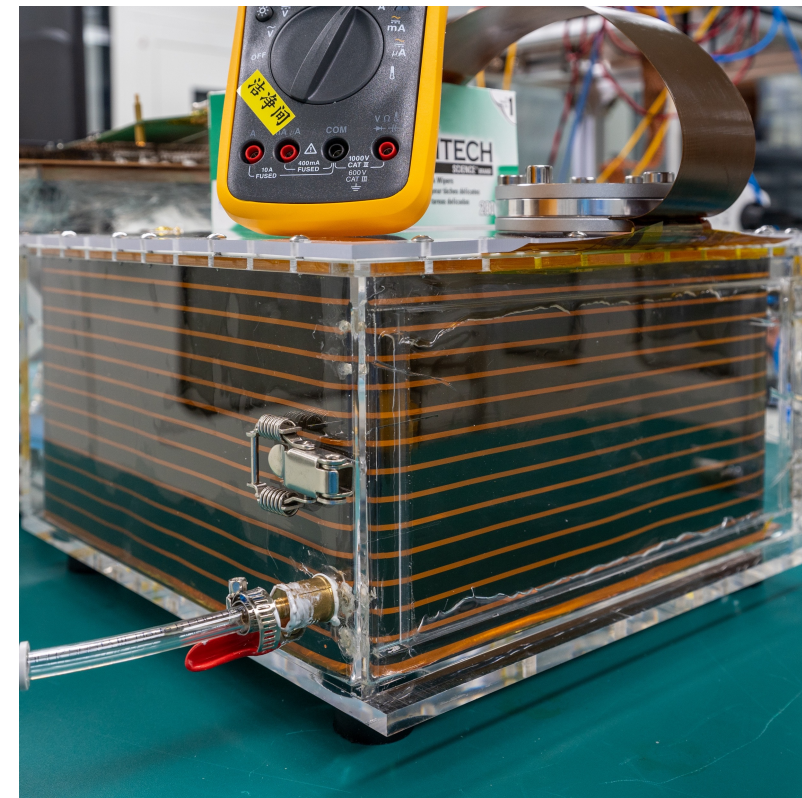
多轮原型探测器迭代 (单块 Micromegas)



亚克力+铜条场笼
@圆桶腔体



场笼 + 适配铝合金腔体



柔性PCB场笼 + 适配亚克力腔体

多轮原型探测器迭代 (单块 Micromegas)



- 利用气体探测器的能量+径迹特性测量样品表面污染

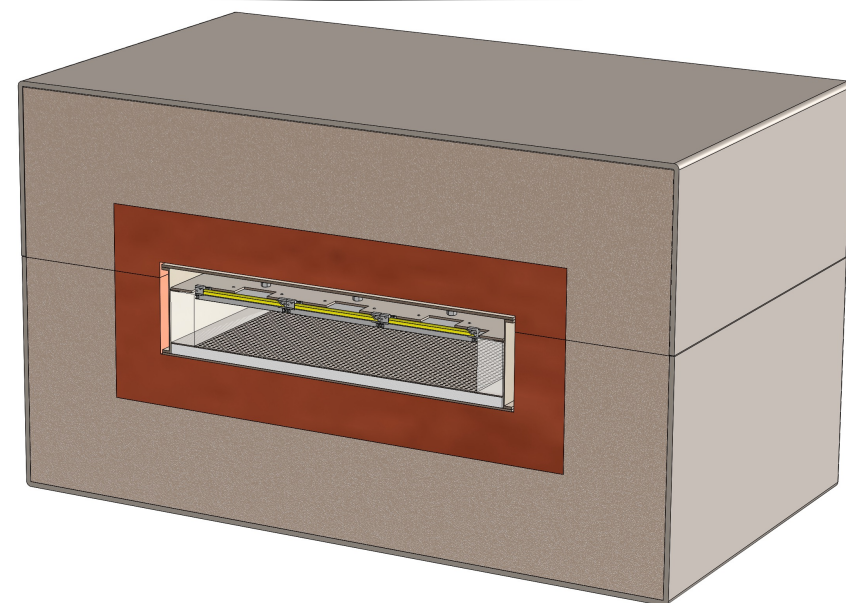
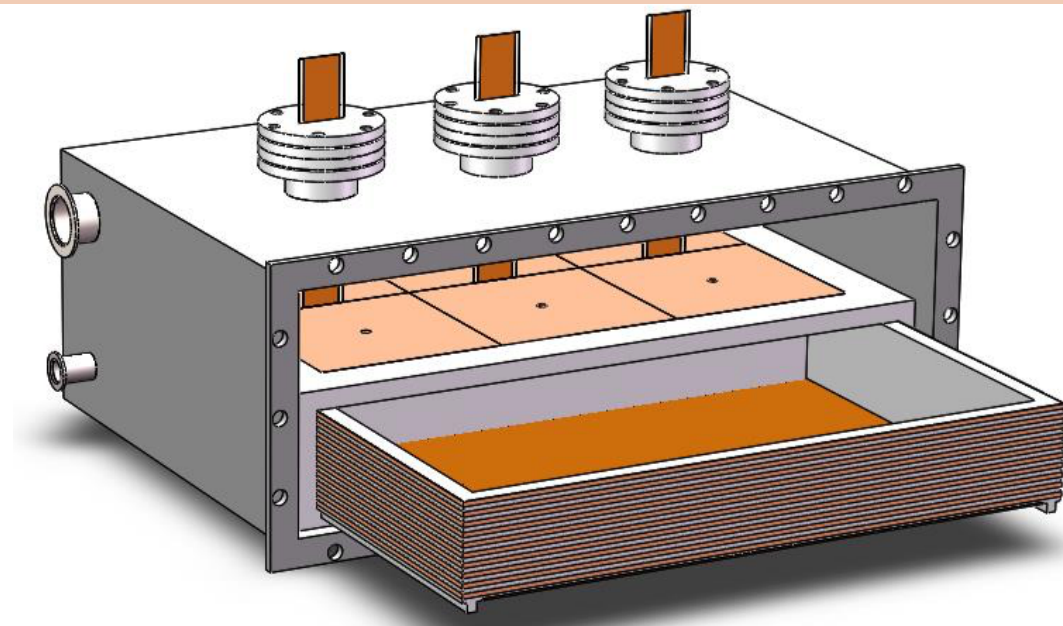
- 粒子鉴别去除本底
- 大幅面、高灵敏度、高效率
- 长期目标为 α 测量灵敏度为 $10^{-8}\text{Bq}/\text{cm}^2$

- 近期进展

- 完成 400cm^2 原型探测器搭建与运行, 优化中
- 精细本底模拟与 α 测量灵敏度分析

- 下一步计划

- 设计建设全体积探测器
- 开展低本底探测器材料筛选



谢谢各位关注