

用于极低放射性材料筛选的 Micromegas气体时间投影室

张文铭

2023年8月9日

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会

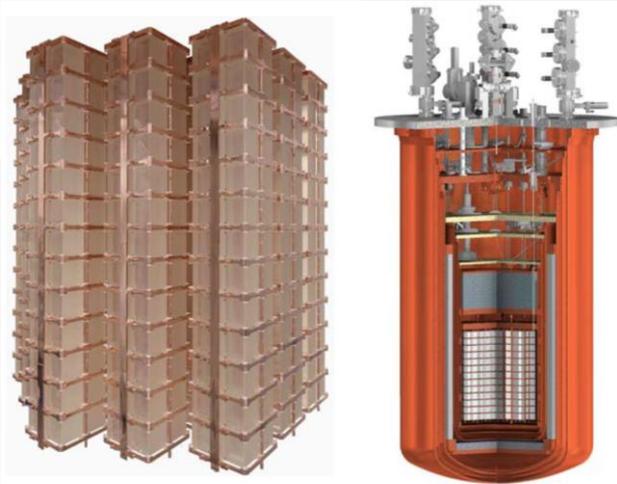


地下稀有事例探测实验和本底



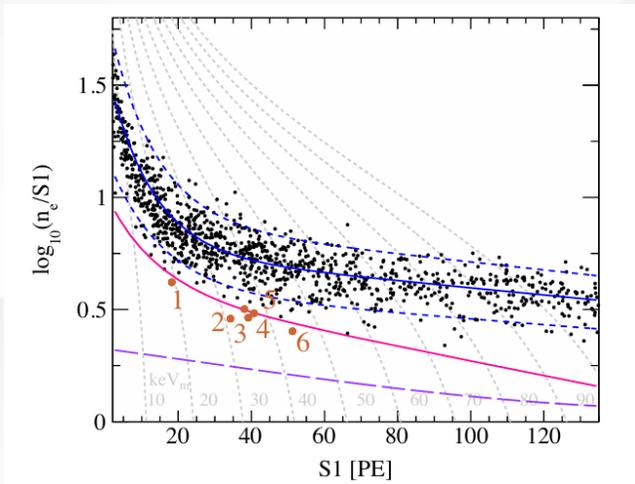
无中微子双贝塔衰变

- CUORE
- 200 kg ^{130}Te
- $\bar{\nu}_e == \nu_e$



暗物质探测

- PandaX-4T
- 4t LXe
- WIMP粒子

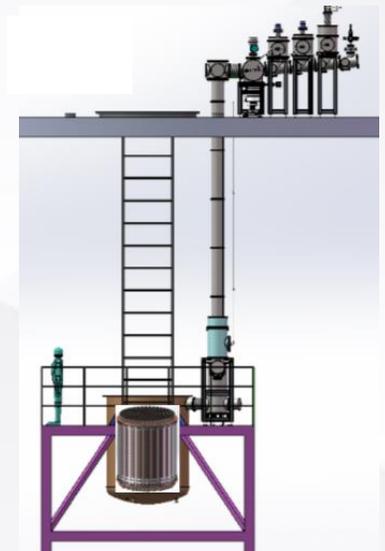


本底

- 宇宙射线及其衍生物
- 实验室环境（氡释气，高能伽马）
- 探测器材料内部放射性和表面放射性引入本底：
零件加工组装，空气中的氦气及其子核会污染材料表面

PandaX-4T 本底

Source	ER in mDRU	NR in mDRU
Materials	0.0210 ± 0.0042	$2.00 \pm 0.3 \times 10^{-4}$
^{222}Rn	0.0114 ± 0.0012	-
^{85}Kr	0.0053 ± 0.0011	-
^{136}Xe	0.0023 ± 0.0003	-
Neutrino	0.0090 ± 0.0002	$0.8 \pm 0.4 \times 10^{-4}$



- ^{222}Rn 主要来自探测器及管路材料表面的释气

- 地下稀有事例探测实验信号稀有，本底水平决定物理灵敏度

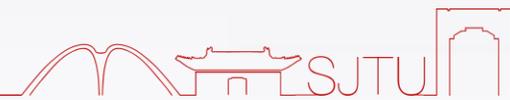




低本底测量技术现状



探测技术	典型测量对象	精度	备注
电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS	高纯无氧铜内的 重元素	ppt	克量级取样，复杂化学预处理
中子活化分析 NAA	特氟龙内的 ^{238}U 和 ^{232}Th	sub-ppt, ppt	利用中子辐照，测量窗口短
高纯锗伽马探测器 HPGe	高纯无氧铜内的 ^{238}U 和 ^{232}Th	1-10 $\mu\text{Bq/kg}$ sub-ppb, ppb	无损检测，能量分辨率高
betaCage	大面积材料表面放射性	-	CDMS 合作组提出 尚未实现
SuperNEMO BiPo-3 探测器	薄膜材料内的 ^{208}Tl 和 ^{214}Bi	本底 ^{208}Tl : $0.9 \pm 0.2 \mu\text{Bq/m}^2$ ^{214}Bi : $1.0 \pm 0.3 \mu\text{Bq/m}^2$	SuperNEMO合作组开发
UltraLo-1800	大面积材料表面放射性	本底 1.4 mBq/m^2	XIA 商用探测器



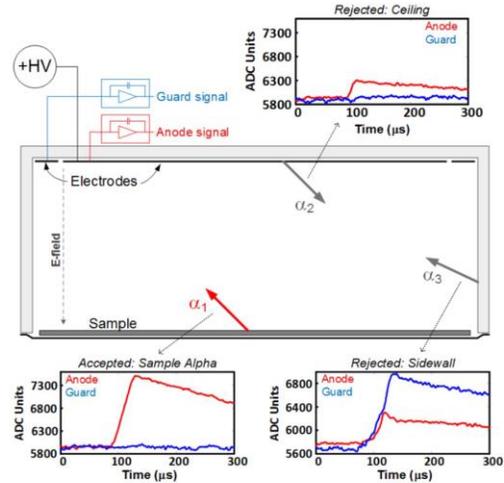


低本底测量技术现状



XIA: UltraLo-1800

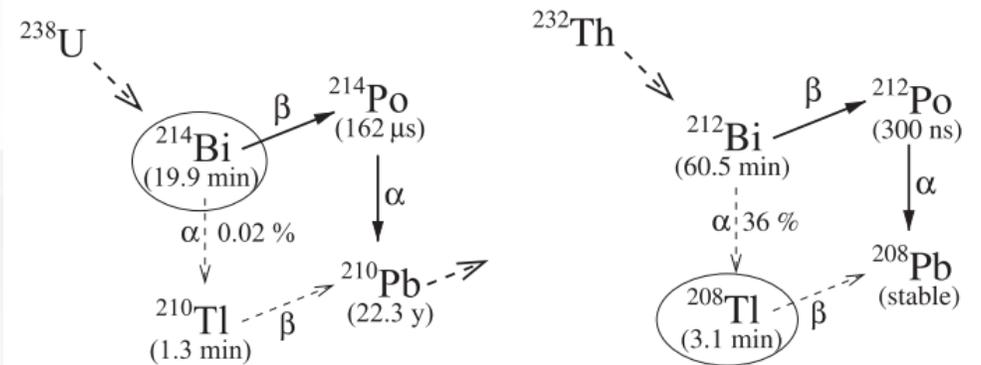
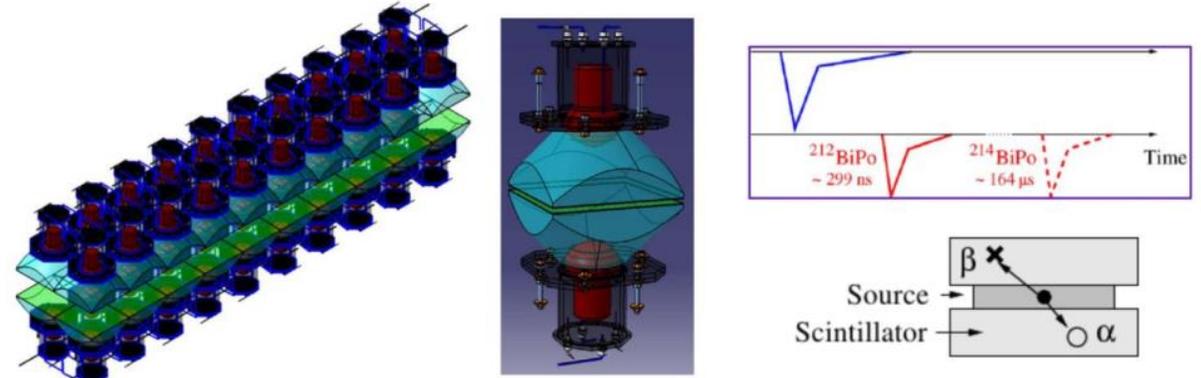
➤ 电离室



- 使用脉冲波形（上升时间、幅度和形状）鉴别侧壁及阳极的本底
- 本底 10^{-4} c/cm²/hr, 针对半导体硅片阿尔法测量
- 测量面积: 1800 cm²

SuperNEMO: BiPo-3 探测器

➤ 塑闪



- 本底 ^{214}Bi : 1.0 ± 0.3 μBq/m²
- 本底 ^{208}Tl : 0.9 ± 0.2 μBq/m²
- 测量面积: 3.6 m²

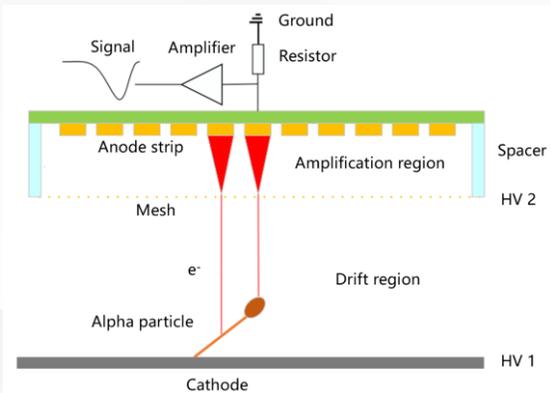
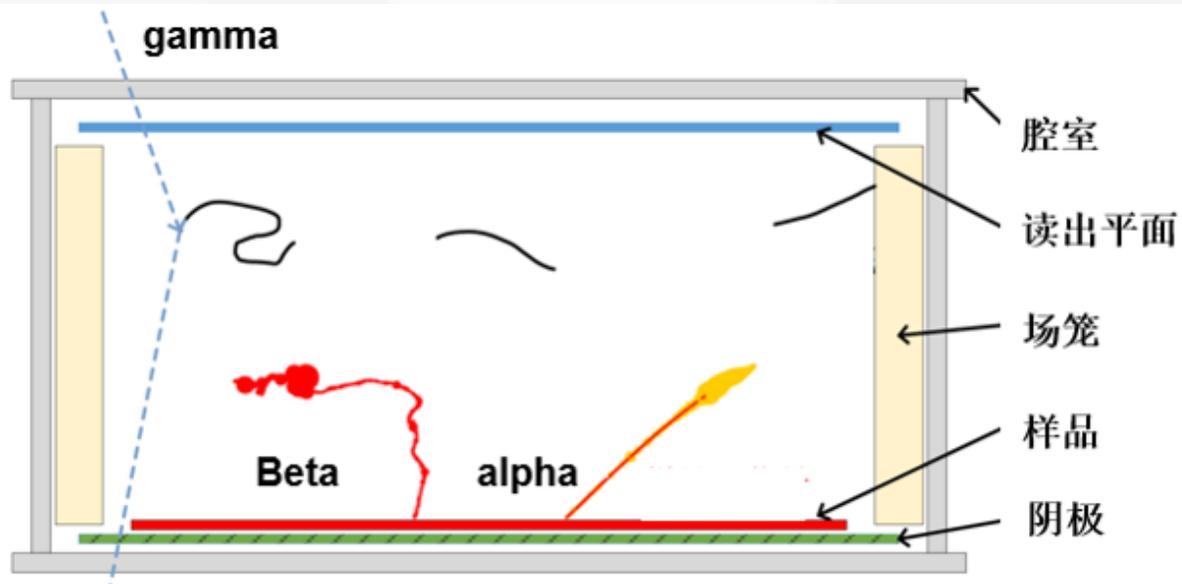




气体时间投影室技术和微结构气体探测器



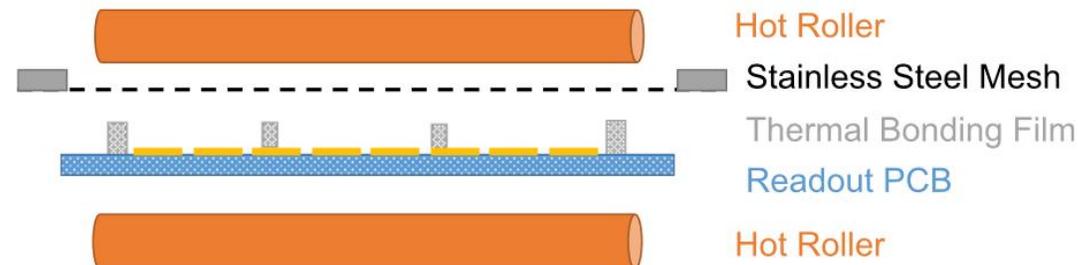
气体时间投影室 (TPC)



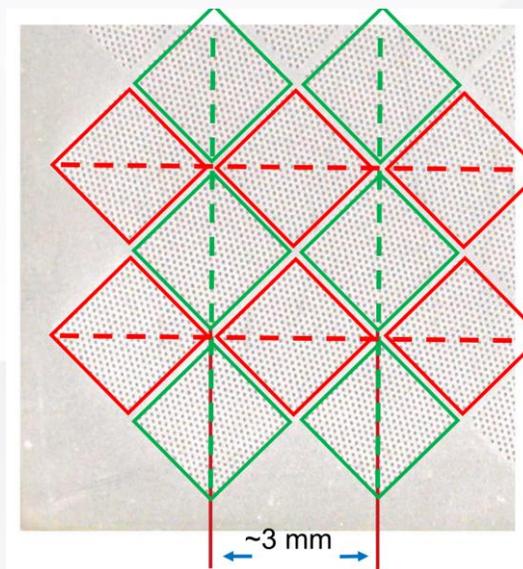
➤ 样品放置于内部，记录粒子能量、径迹信息

微结构气体探测器

➤ Readout: 20×20 cm²



FENG J, ZHANG Z, LIU J, et al. A thermal bonding method for manufacturing Micromegas detectors[J]. 2021, 989: 164958.

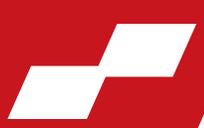


➤ 热压接Micromegas，条读出

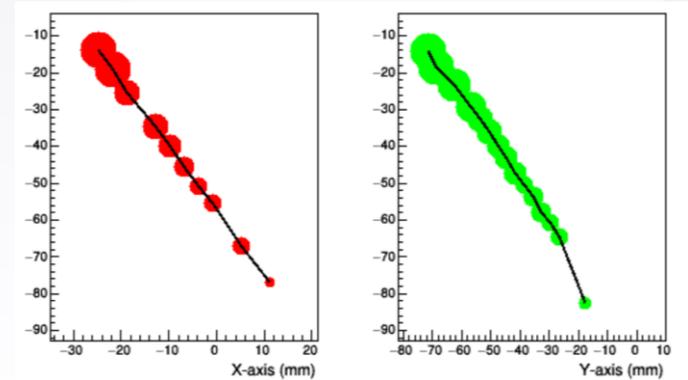
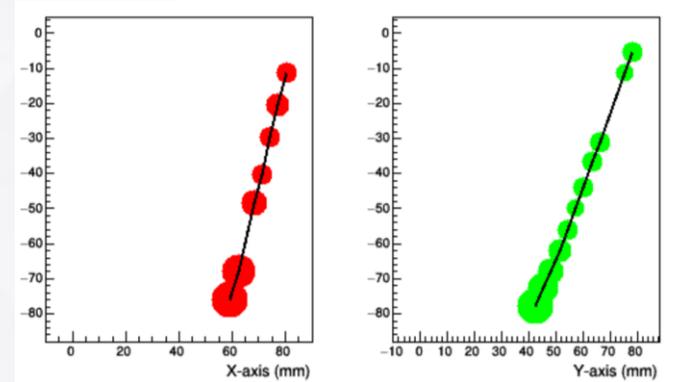
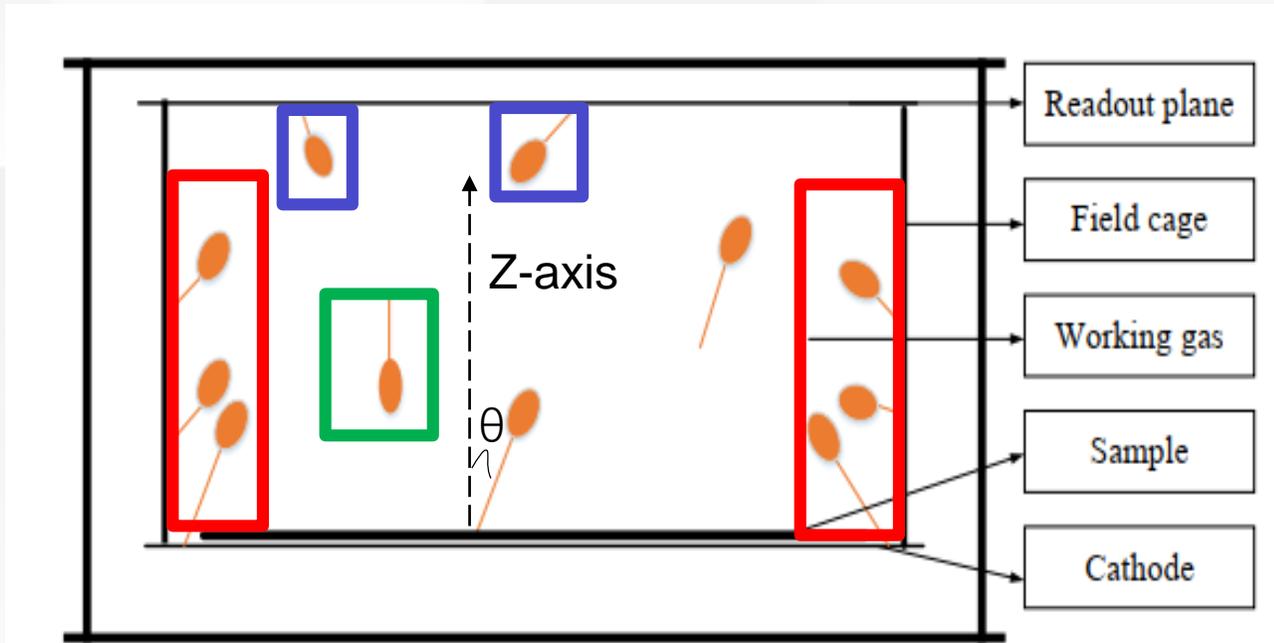




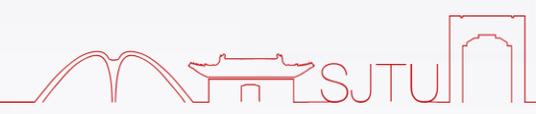
粒子径迹重建和信号-本底筛选



信号-本底筛选方法 (Track-related)



- α 粒子的径迹近乎是一条直线，径迹末端存在布拉格峰
- a. 借助径迹起点位置可识别并去除**场笼**及其附近的本底；
- b. 根据径迹方向可识别并去除**读出平面**的本底和一半的**气体**本底；
- c. 根据触发读出条的个数去除短径迹的粒子，很可能来自**气体**和**读出平面**。

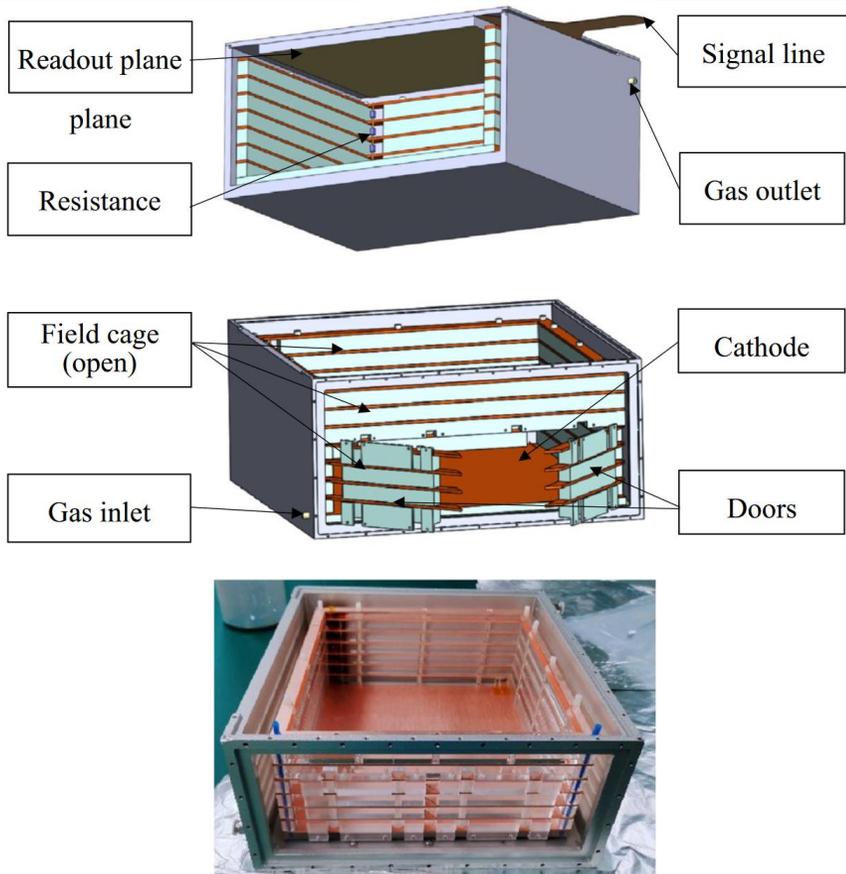




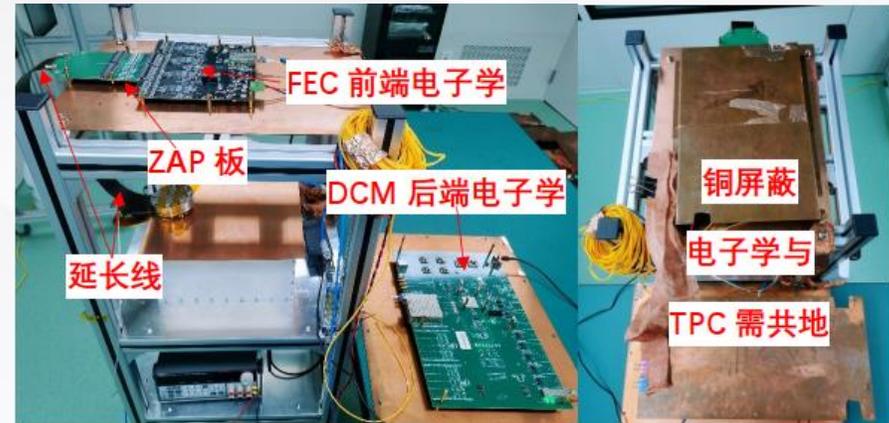
原型机的搭建和测试



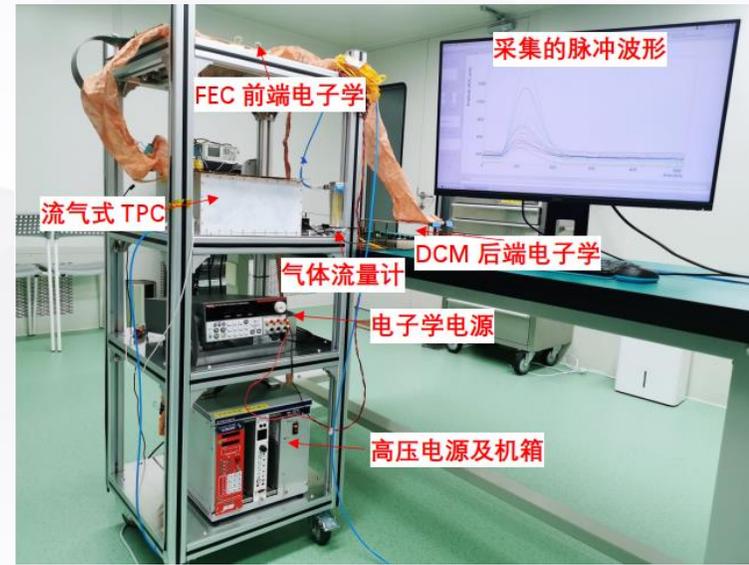
原型机



- 铝合金腔体+亚克力铜条场笼+单块Micromegas (20×20 cm²)



- 数据采集与获取系统 (DCM-FEC)



- 流气式原型探测系统

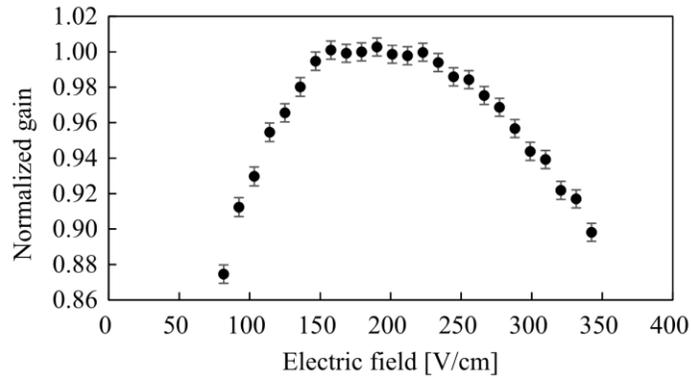
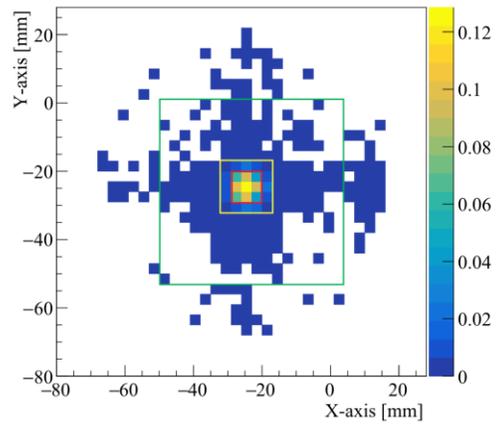




原型机的搭建和测试

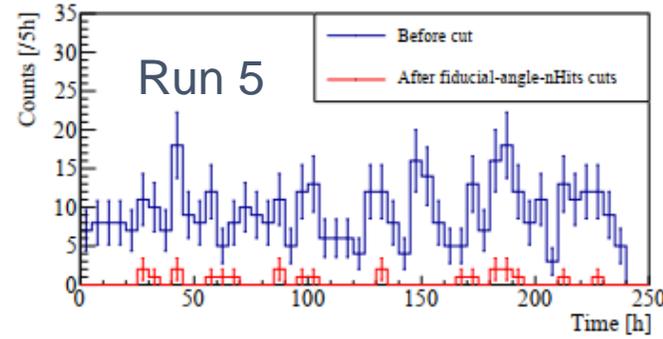
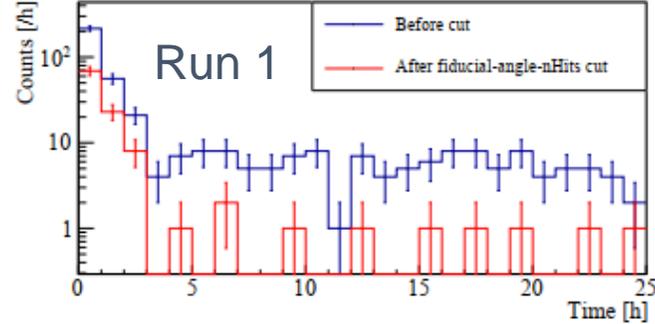


原型机刻度和运行条件优化



- 1 bar Ar-7% CO₂
- ²⁴¹Am刻度: 9.5% FWHM@5.485 MeV
- 倍增电场: 35 kV/cm - 漂移电场: 179 V/cm
- 50 MHz (10 μs)

原型机本底测试

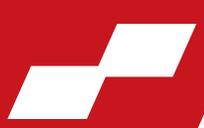


Run	Flush rate L/min	Run time hour	Counts counts/hour	After cuts counts/hour
1	0.55	25.30	16.56 ± 0.81	4.35 ± 0.41
2	0.55	39.00	3.87 ± 0.32	0.38 ± 0.10
3	0.35	25.00	4.20 ± 0.41	0.32 ± 0.11
4	0.73	158.25	2.06 ± 0.11	0.20 ± 0.04
5	0.20	240.00	1.88 ± 0.09	0.10 ± 0.02
6	0.10	90.00	2.69 ± 0.12	0.23 ± 0.03

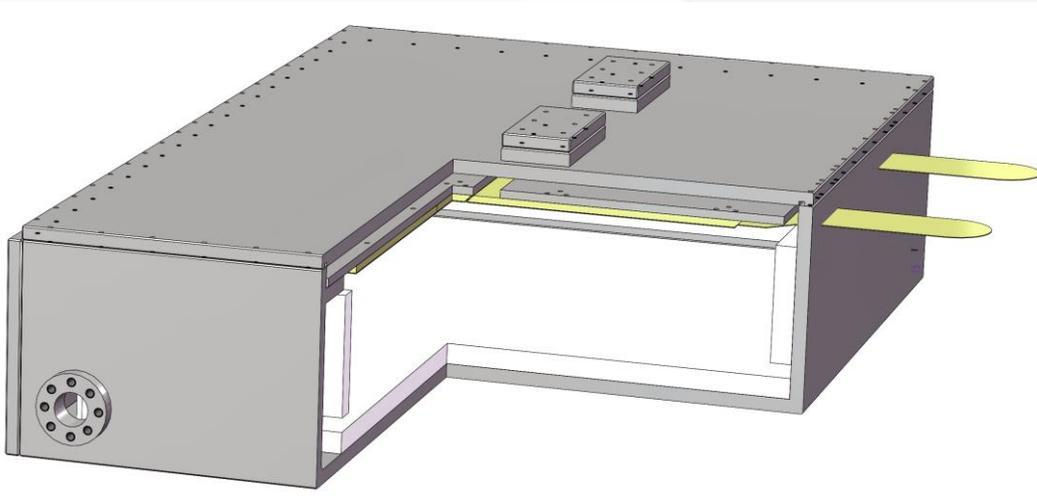
- 本底运行未放置任何样品, 信号-本底筛选后剩余的本底事例主要来自阴极铜板;
- 原型机的本底水平不高于: $0.13 \pm 0.03 \mu\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$, 与 UltraLo 1800 ($0.14 \mu\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$)基本持平。



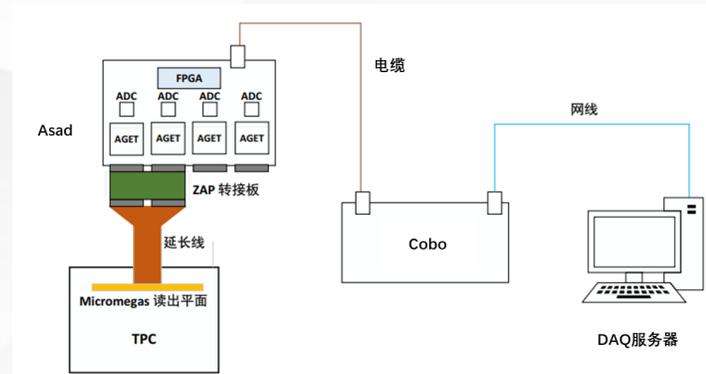
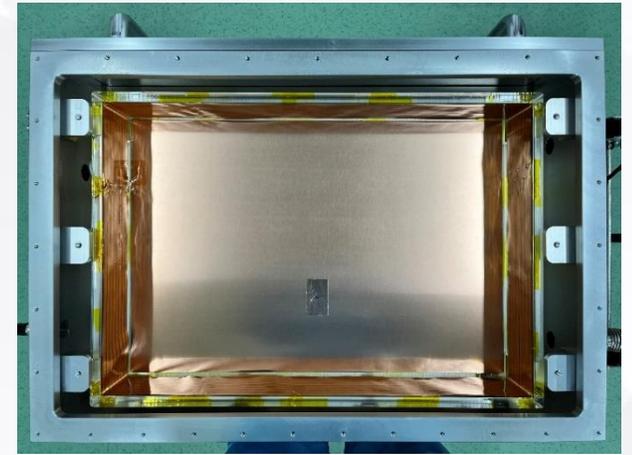
全体积带电粒子谱仪设计和建造



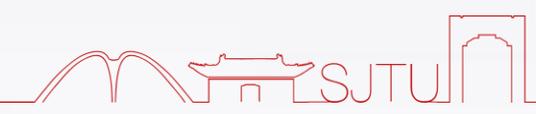
全体积带电粒子谱仪



- 全体积时间投影室 (0.5-1.5 bar Argon/Xenon)
- 电荷读出面积: $40 \times 60 \text{ cm}^2$ (2×3 Micromegas)
- 漂移距离: 10 cm
- 柔性 PCB场笼+Cobo-Asad electronics
- 样品直接放置于阴极板, 保证阿尔法能量完全沉积



Cobo-Asad

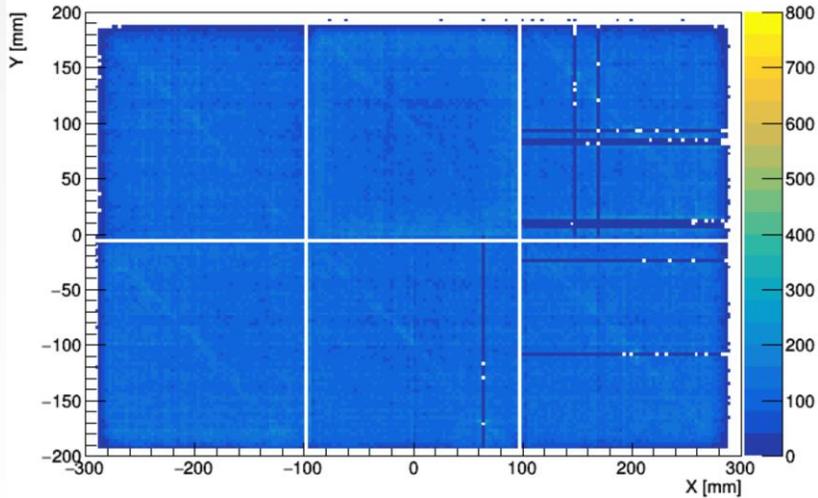
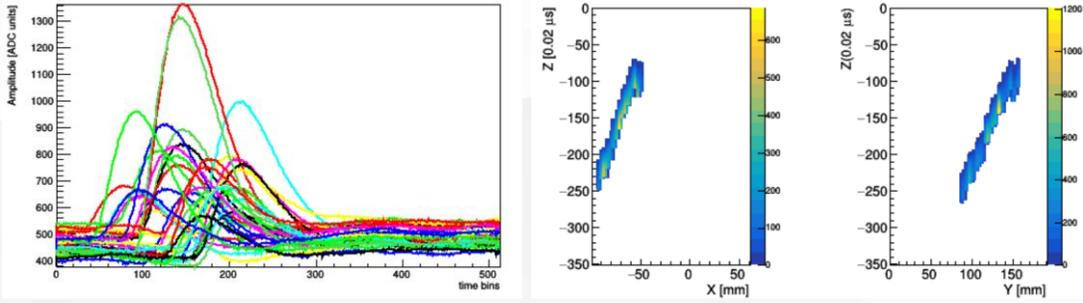




全体积带电粒子谱仪的初步测试

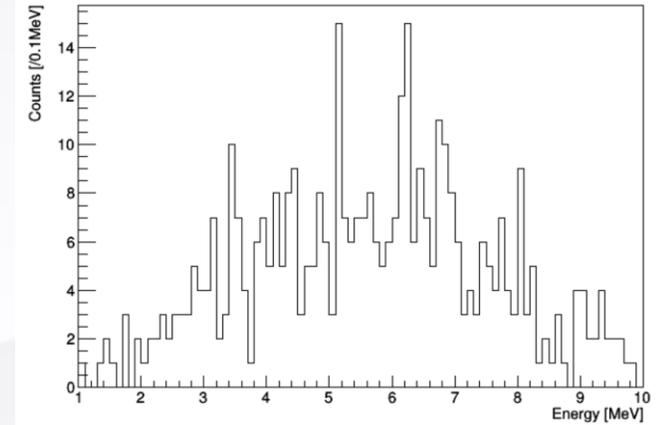
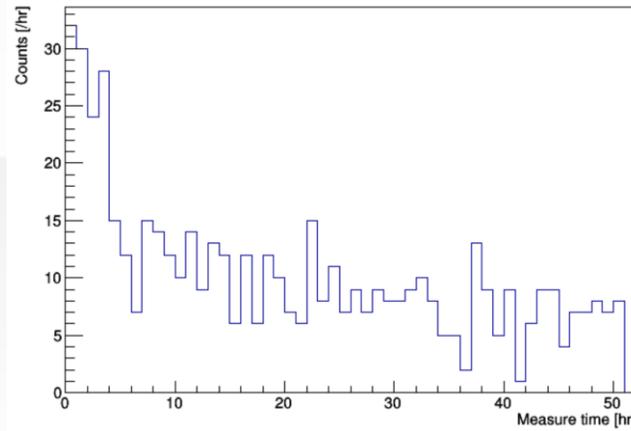
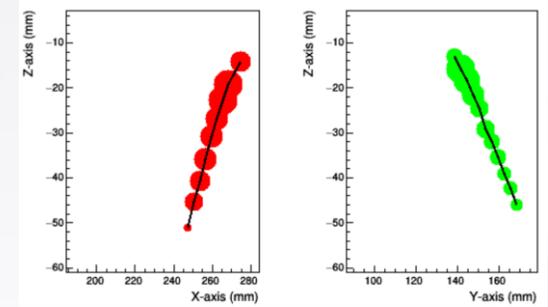
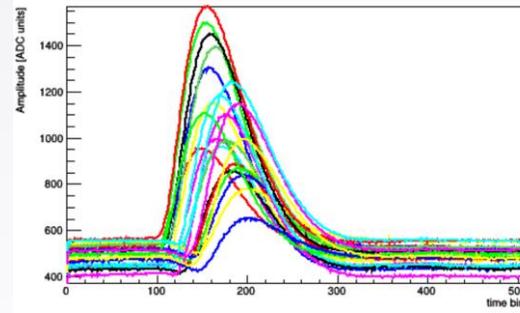


宇宙射线μ子



➤ 探测器长时间稳定运行

α 本底



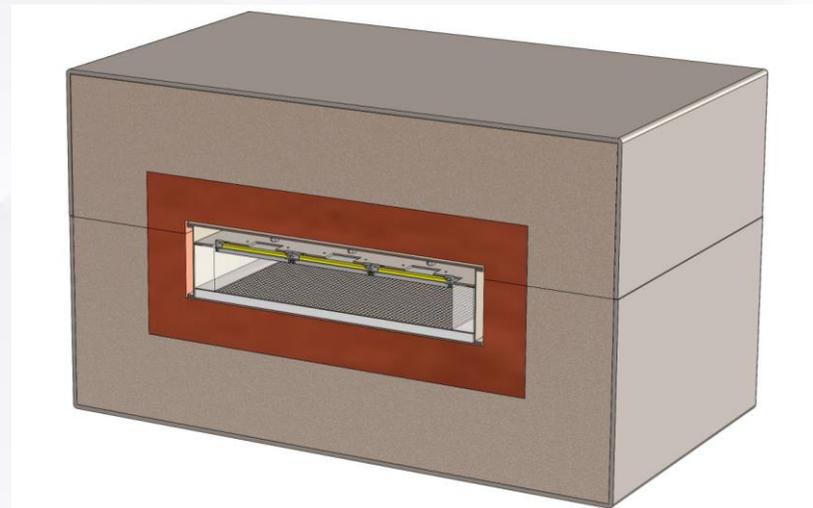
- 本底随时间逐步下降
- 剩余本底大部分可能还是来自于附着的氡气 (大于 6 MeV)
- 初步α本底: $1.39 \pm 0.07 \mu\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ (Track-related cut)





④ 极低本底带电粒子谱仪

- 结合气体时间投影室技术和热压接Micromegas电荷读出模块
- 粒子径迹鉴别降低本底
- 大幅面、高探测效率、高灵敏度



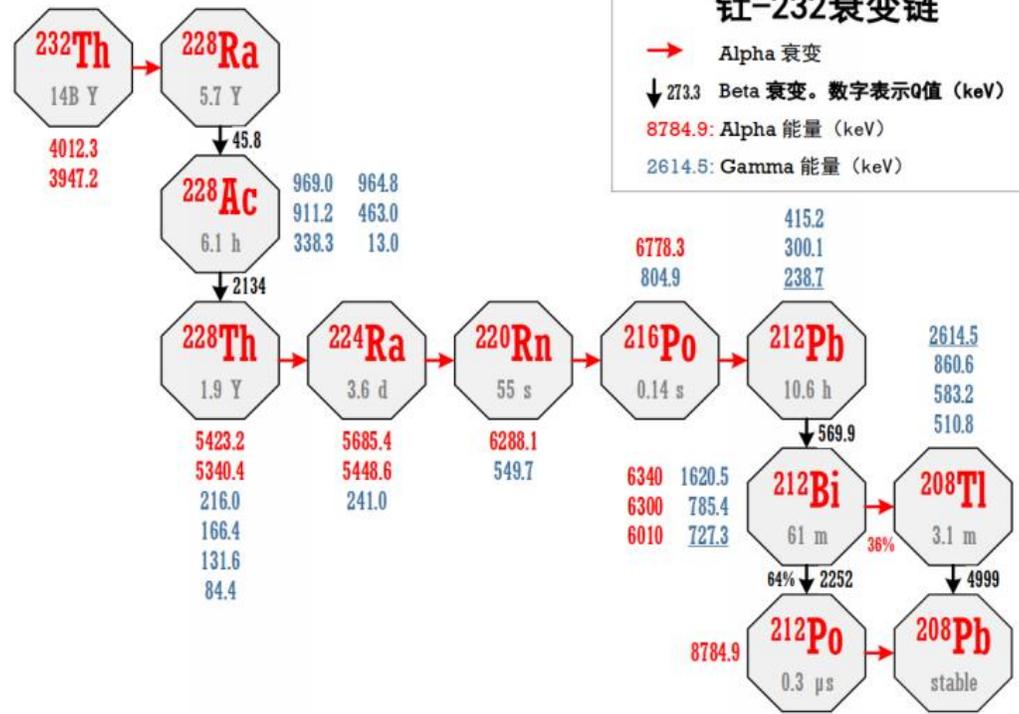
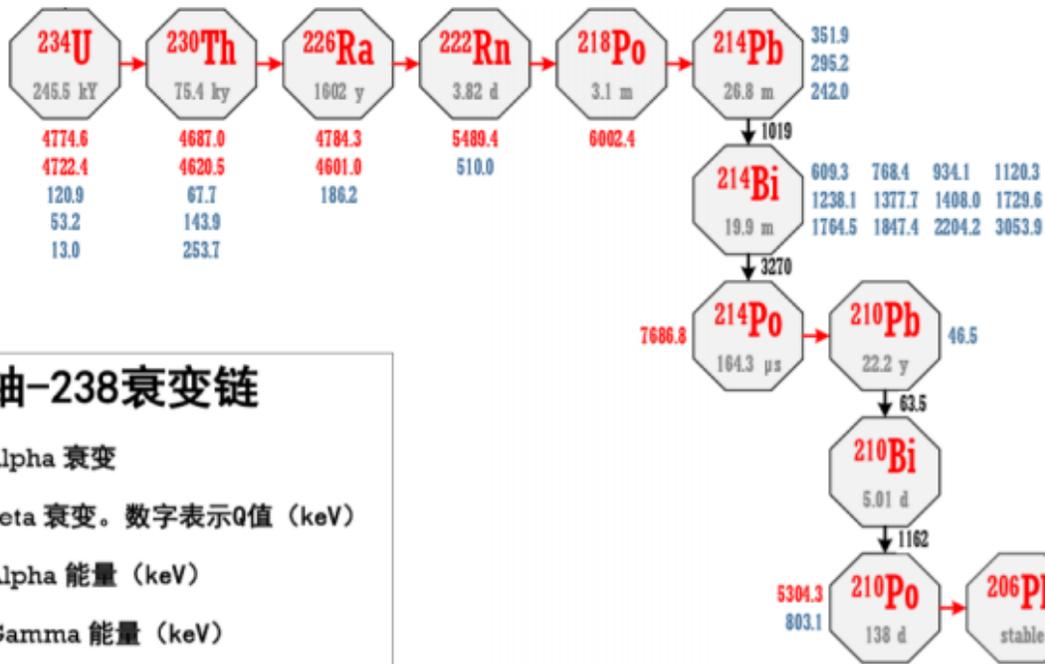
④ 下一步计划

- 通过酸洗钝化、更换低本底材料等降低内在本底，提高谱仪灵敏度；优化设计，简化操作流程
- 安装屏蔽体，在锦屏地下实验室开展低本底材料表面放射性测量和筛选

④ 长期目标：每天1个阿尔法本底，探测灵敏度达到 $0.01 \mu\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$

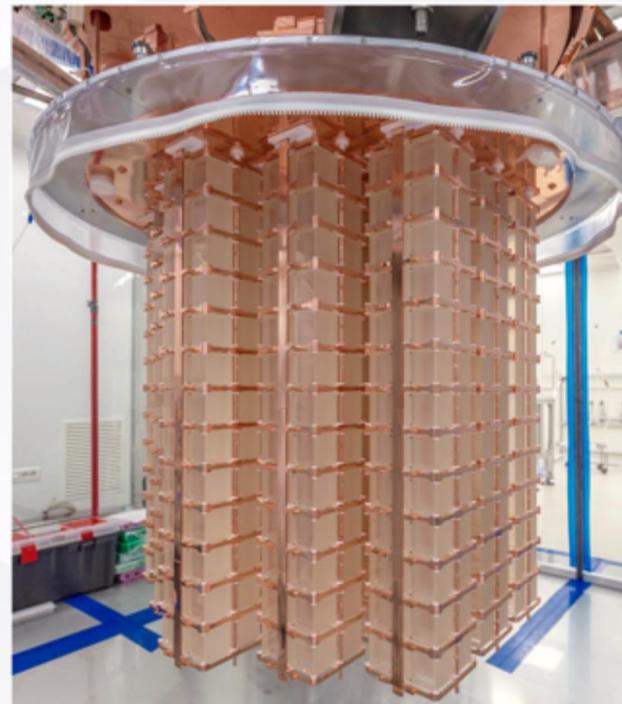
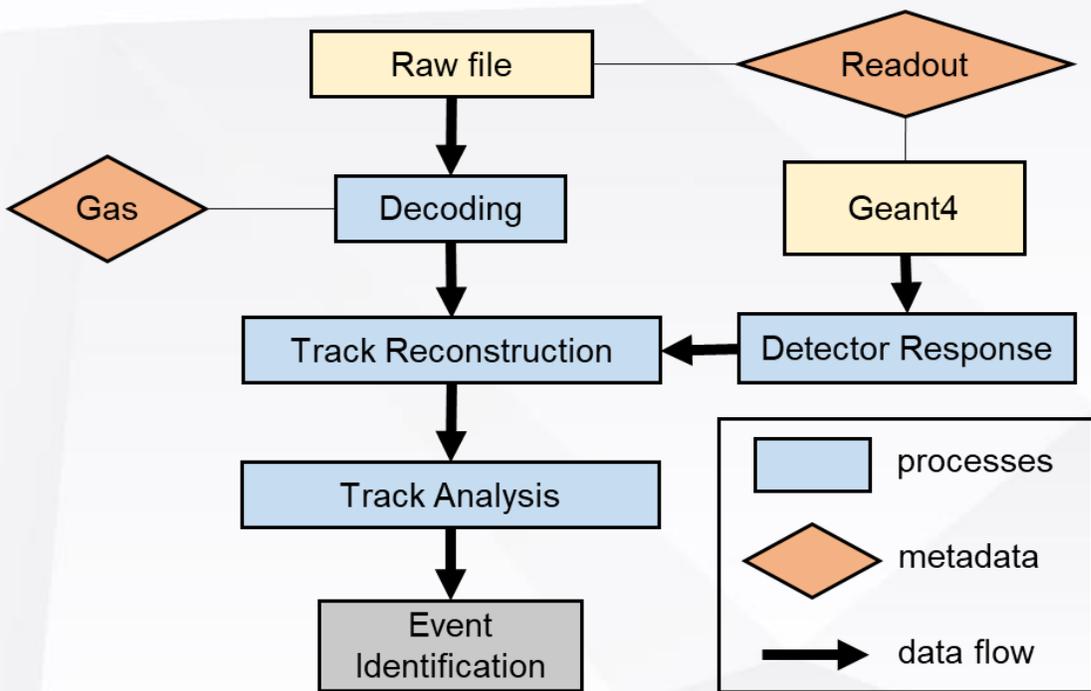
谢谢关注

饮水思源 爱国荣校



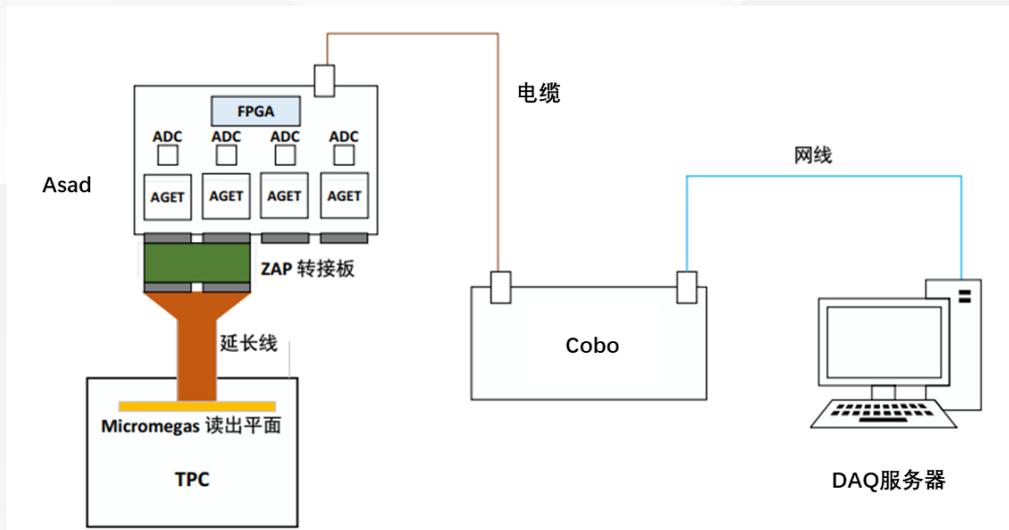


数据分析框架REST





数据采集与获取系统 (Cobo-Asad)



慢控监测系统 (电压、电流和气压)



气体系统 (充气、循环)

