

用于极低alpha放射性材料筛选的 Micromegas气体时间投影室

上海交通大学

张文铭

2024年5月8日

第三届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会



1

课题背景与研究现状

2

低本底 α 谱仪的技术和原理

3

探测器的搭建和测试

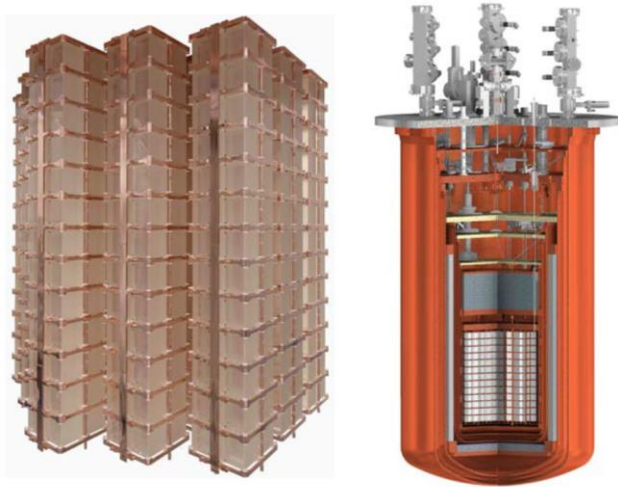
4

总结



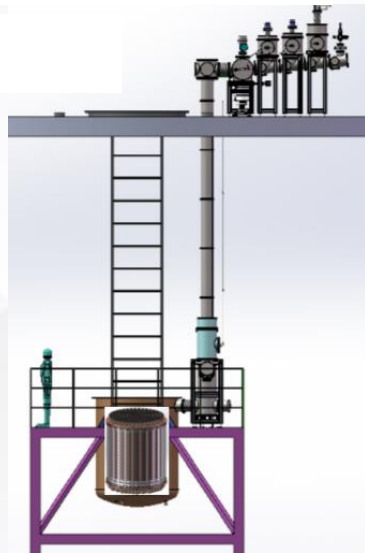
无中微子双贝塔衰变

- CUORE
- 200 公斤 ^{130}Te
- $\bar{\nu}_e == \nu_e$
- 晶体/铜表面污染



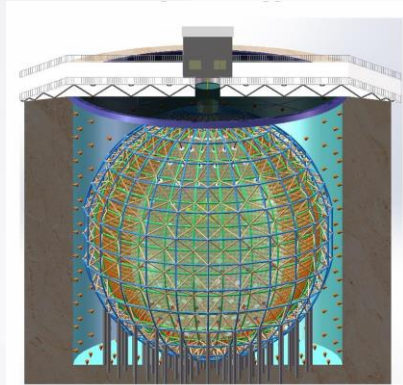
暗物质探测

- PandaX-4T
- 4吨液氙(TPC)
- WIMP粒子
- 铜和特氟龙表面污染
- 探测器及管路材料表面的氦释气



中微子探测实验

- JUNO
- 20 千吨液闪探测器
- 有机玻璃球表面, 氦子体带来污染



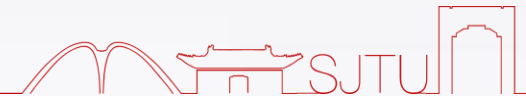
L. Zhan, Y.F. Wang, J. Cao, L.J. Wen, PRD78:111103, 2008; PRD79:073007,2009

- ◆ 20 kton LS detector
- ◆ 3% energy resolution
- ◆ 700 m underground
- ◆ Rich physics possibilities
 - ⇨ Reactor neutrino for Mass hierarchy and precision measurement of oscillation parameters
 - ⇨ Supernovae neutrino
 - ⇨ Geoneutrino
 - ⇨ Solar neutrino
 - ⇨ Atmospheric neutrino
 - ⇨ Proton decay
 - ⇨ Exotic searches

本底

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

➤ 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

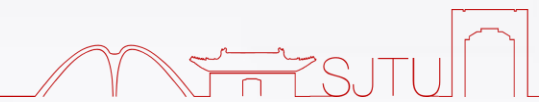




低本底测量技术现状



探测技术	典型测量对象	灵敏度	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



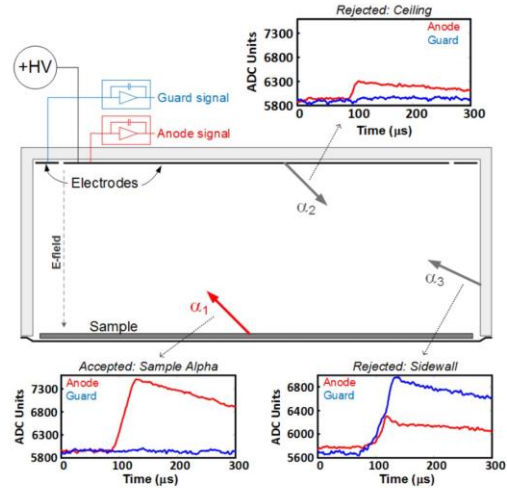


低本底测量技术现状



XIA: UltraLo-1800

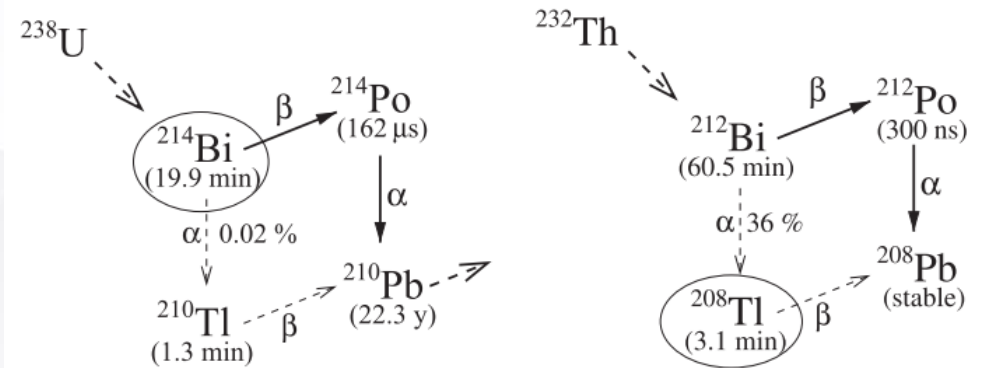
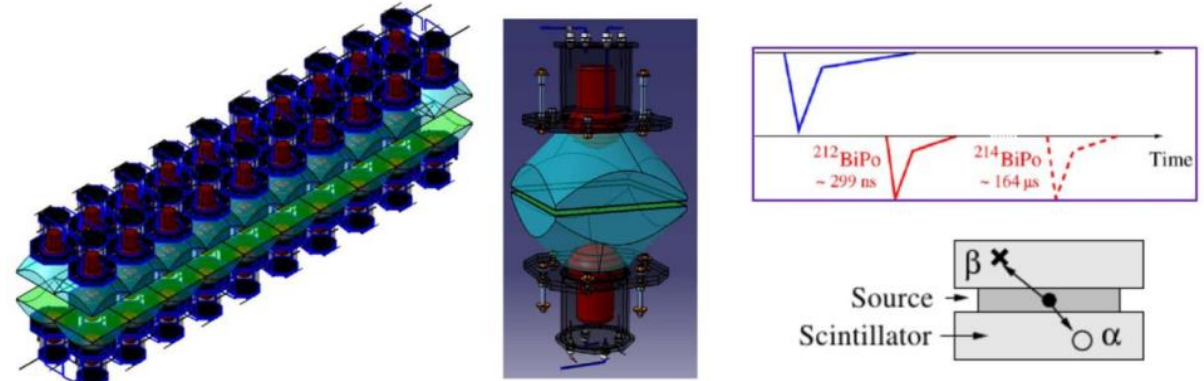
➤ 电离室



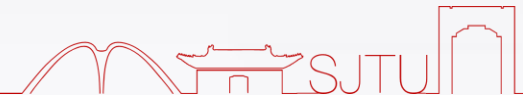
- 使用脉冲波形（上升时间、幅度和形状）鉴别侧壁、阳极和样品的 α 信号
- 本底 $0.14 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，针对半导体硅片的 α 测量
- 测量面积： 1800 cm^2

SuperNEMO: BiPo-3 探测器

➤ 塑闪



- 本底 ^{214}Bi : $1.0 \pm 0.3 \mu\text{Bq}/\text{m}^2$
- 本底 ^{208}Tl : $0.9 \pm 0.2 \mu\text{Bq}/\text{m}^2$
- 测量面积： 3.6 m^2





目录

1

课题背景与研究现状

2

低本底 α 谱仪的技术和原理

3

探测器的搭建和测试

4

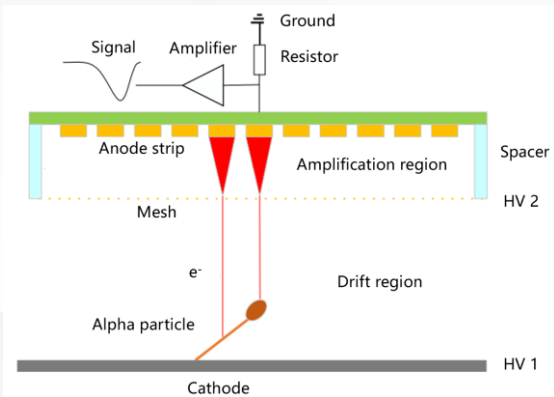
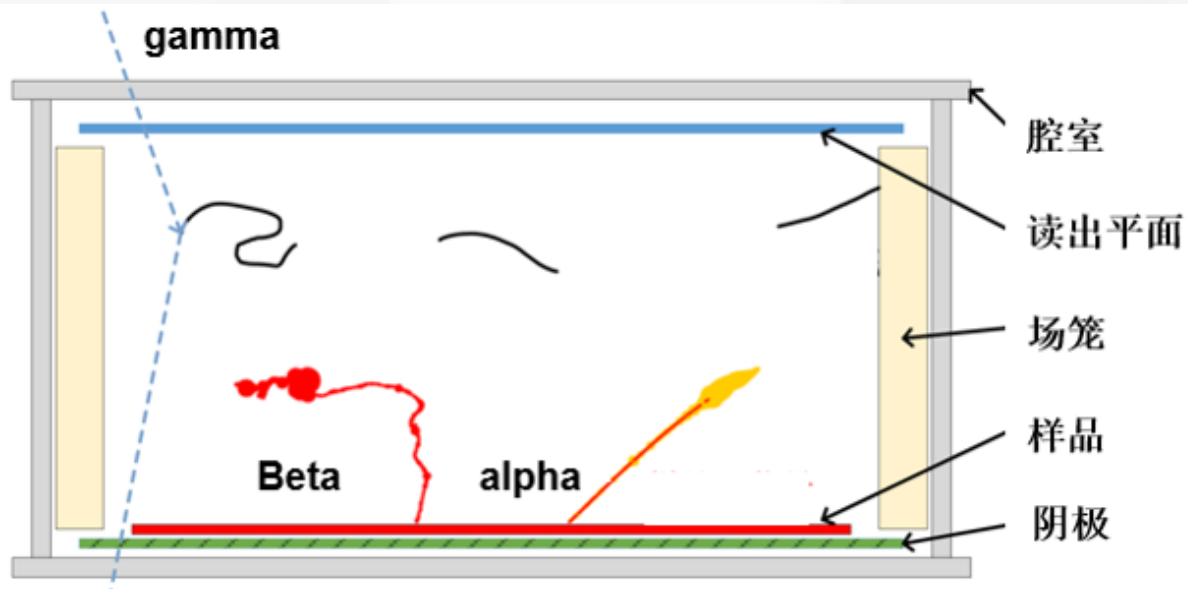
总结



气体时间投影室技术和微结构气体探测器



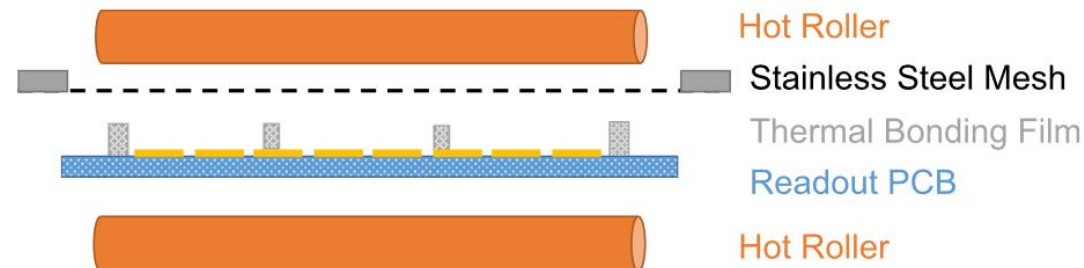
气体时间投影室 (TPC)



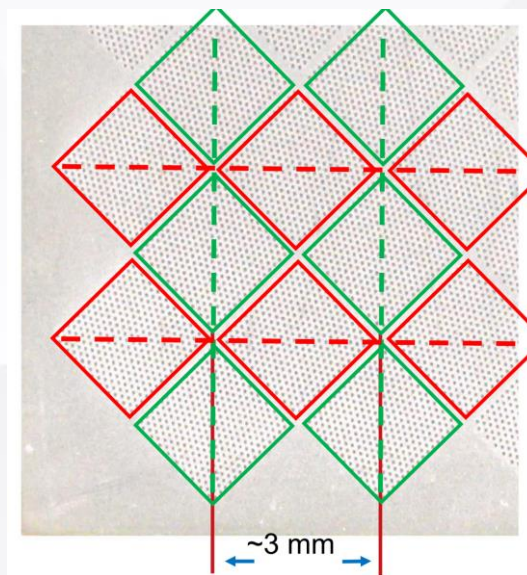
➤ 样品放置于内部，记录粒子能量、径迹信息

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

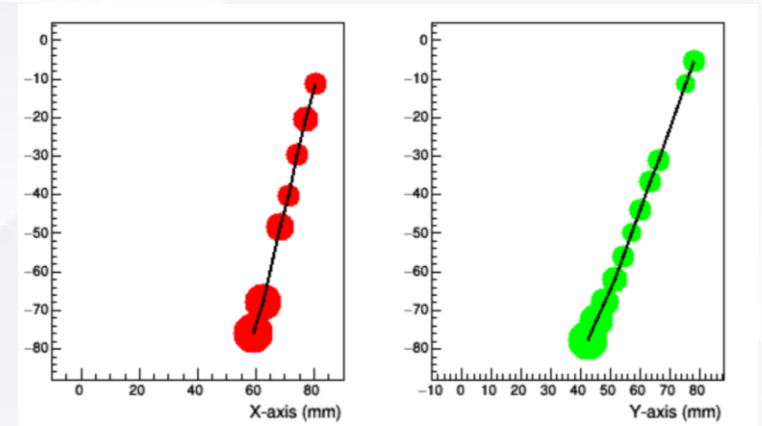
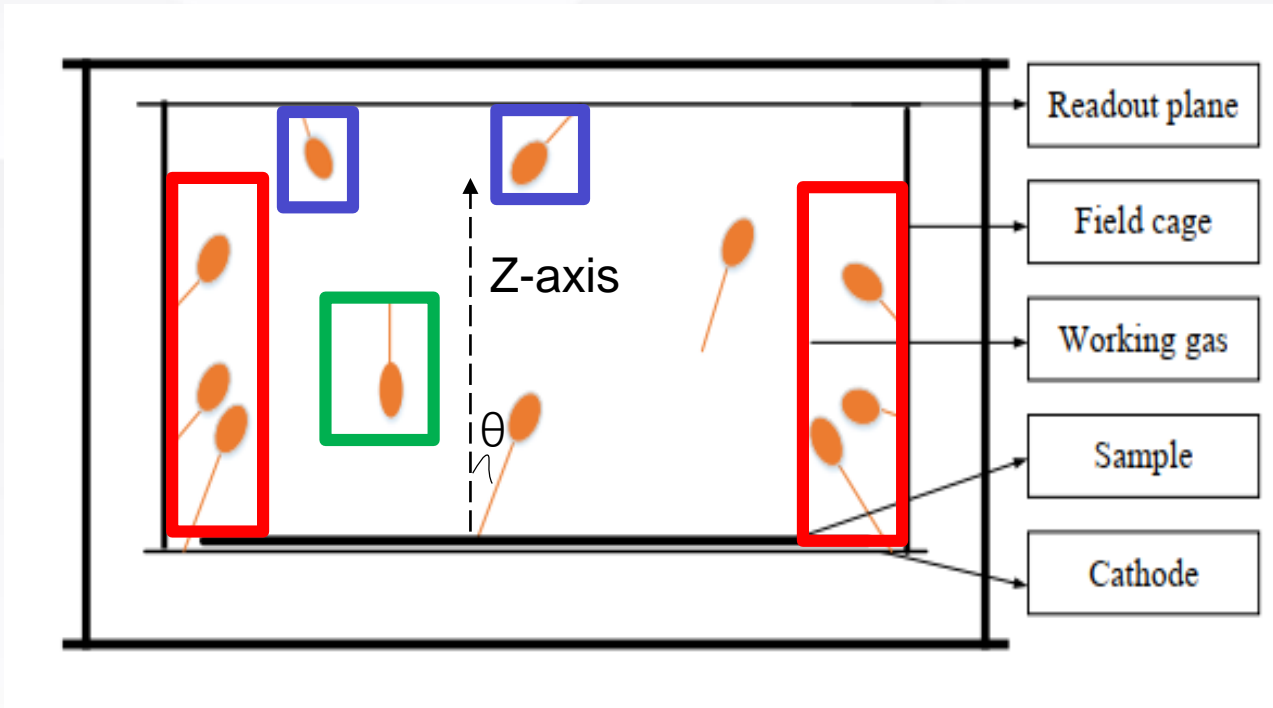




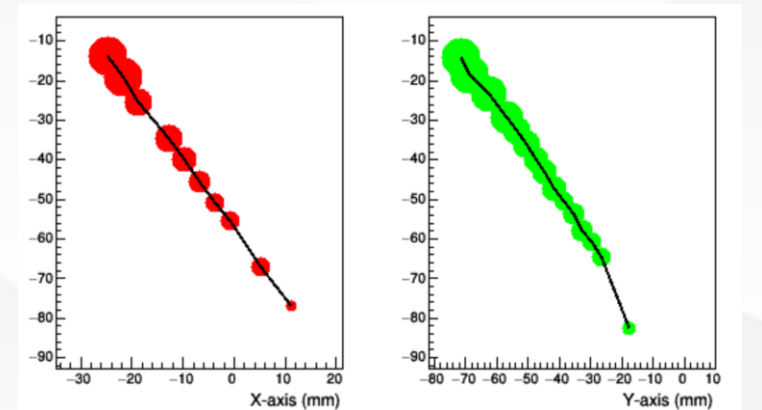
粒子径迹重建和信号-本底筛选



信号-本底筛选方法---Track-related

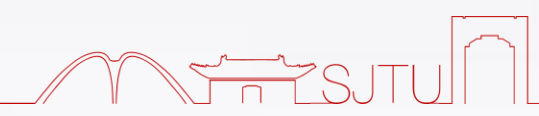


由上往下的 α 径迹



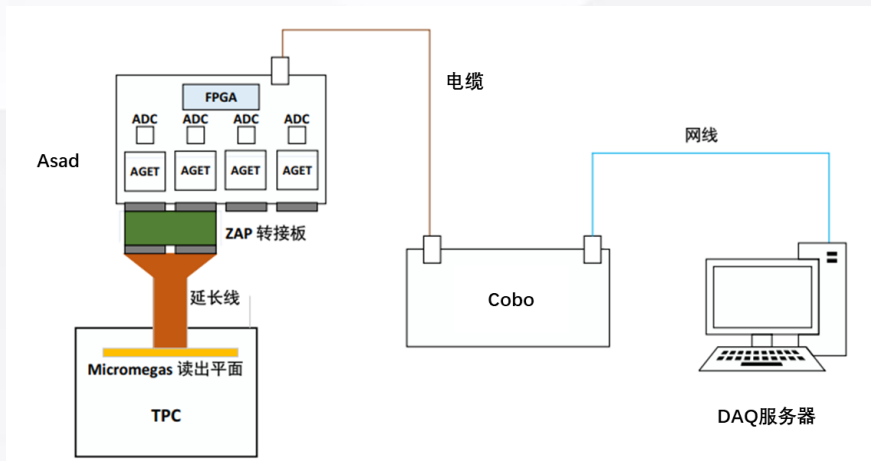
由下往上的 α 径迹

- 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**。





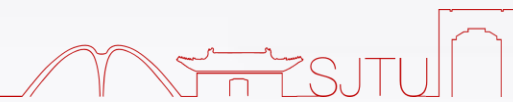
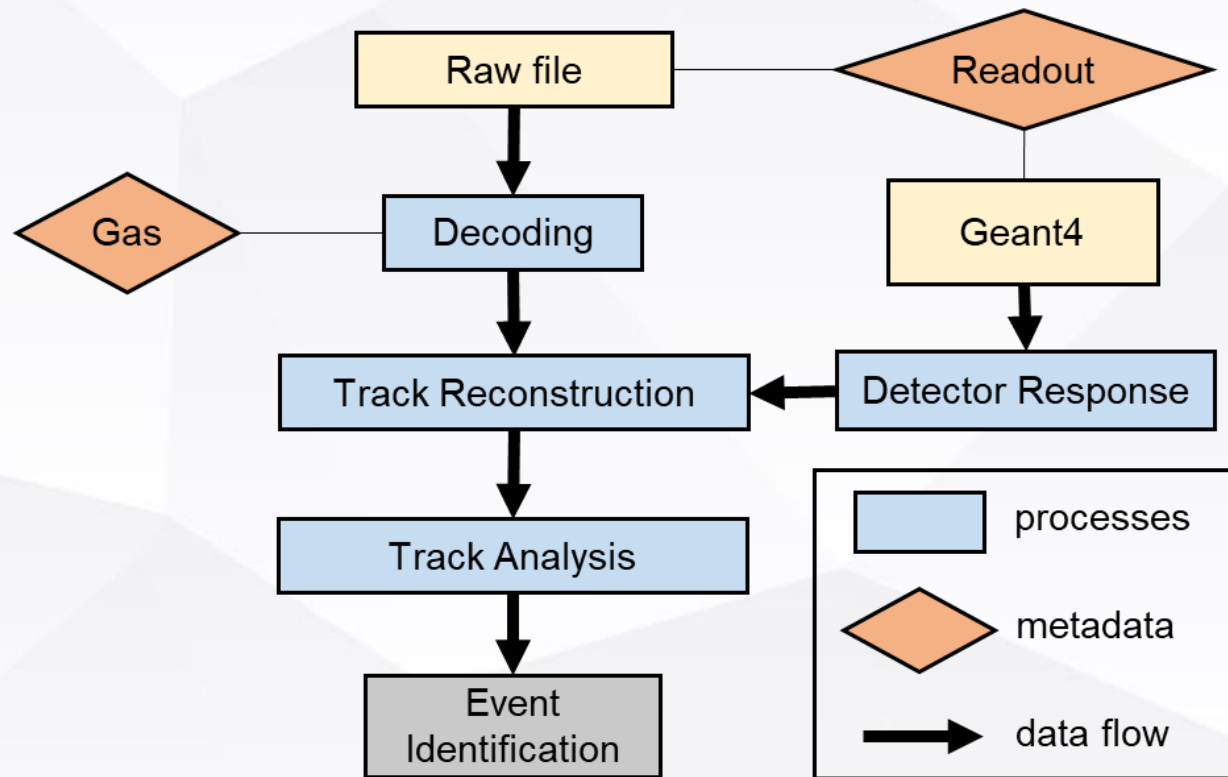
数据采集与获取系统(Cobo-Asad, Concentration Board , ASIC Support and Analog-Digital conversion)



慢控监测系统 (电压、电流和气压)



数据分析框架(REST, Rare Event Search Toolkit)



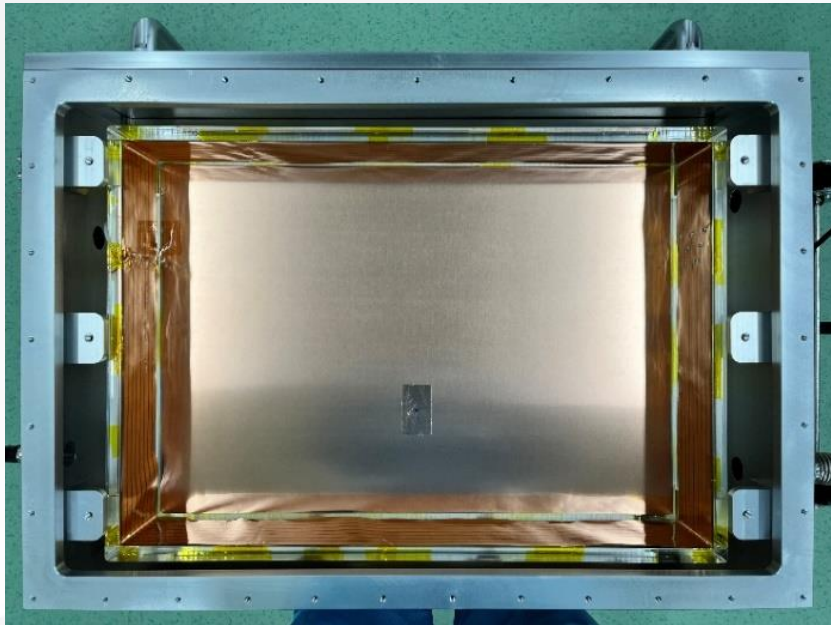


探测器材料低本底处理



低本底探测器材料组件选择和处理

- 无氧铜阴极：去脂(碱性清洗剂Alconox) ->酸洗(柠檬酸/双氧水) ->超纯水冲干->氮气吹干->六十度烘干1h
- 亚克力+柔性PCB场笼：Alconox擦拭->超纯水清洗->氮气吹干
- 铝合金内壁：Alconox擦拭->超纯水清洗->氮气吹干
- 气体：getter纯化



➤ 探测器内部结构



➤ 铜阴极处理流程





目录

1

课题背景与研究现状

2

低本底 α 谱仪的技术和原理

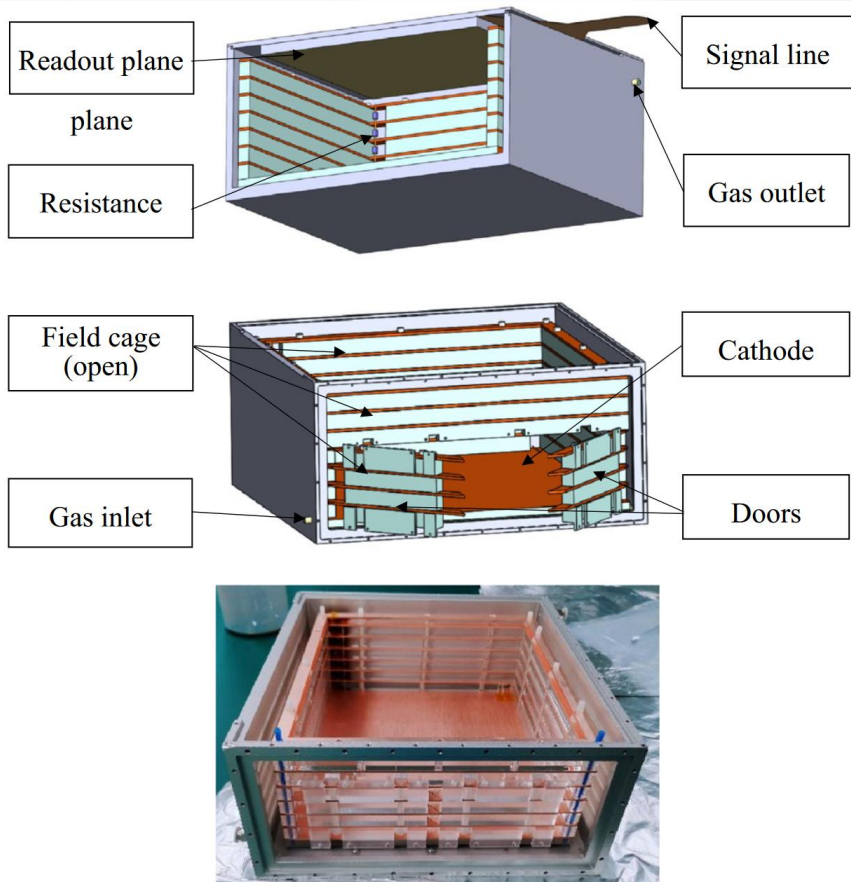
3

探测器的搭建和测试

4

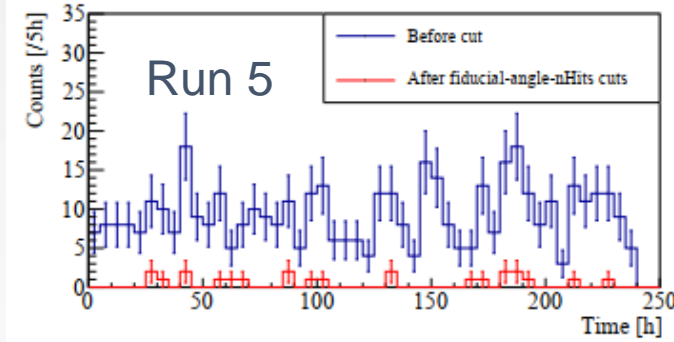
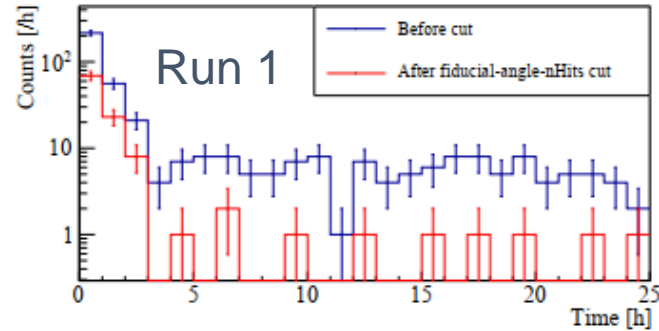
总结

原型机的搭建



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

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

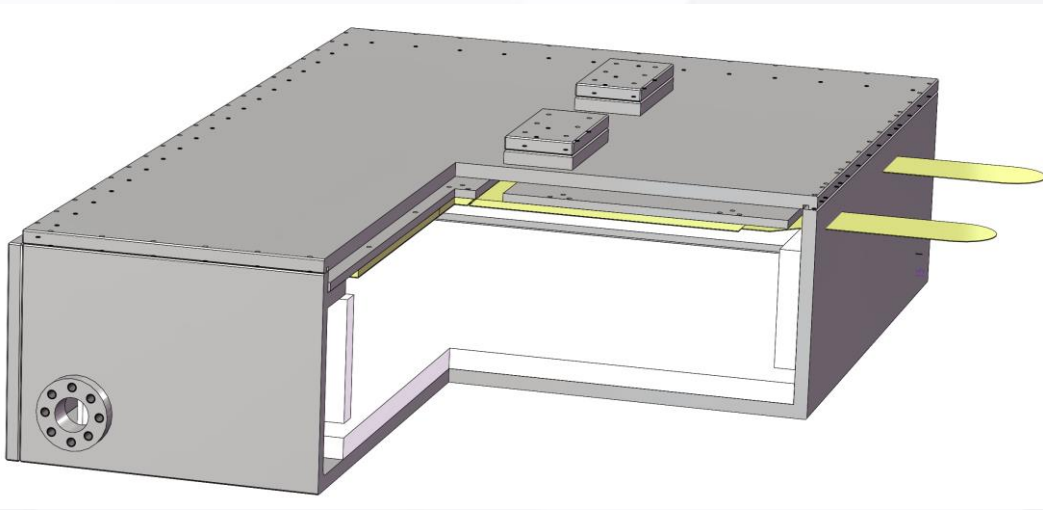
- 本底运行未放置任何样品，信号-本底筛选后剩余的本底事例主要来自阴极铜板。
- 原型机的本底水平不高于：0.13 ± 0.03 μBq/cm²，与 UltraLo 1800 (0.14 μBq/cm²)基本持平。



全体积带电粒子谱仪设计和建造



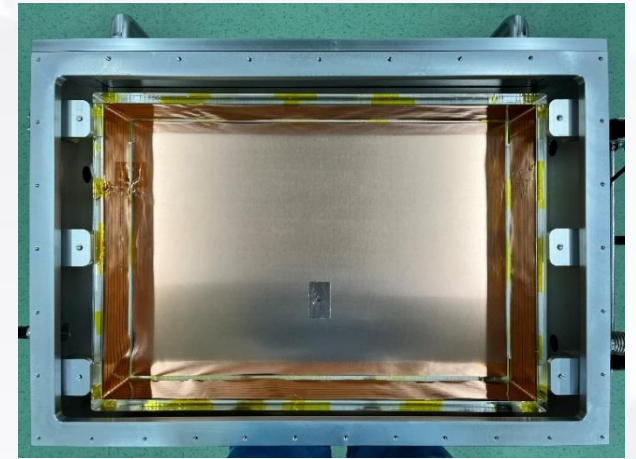
全体积带电粒子谱仪



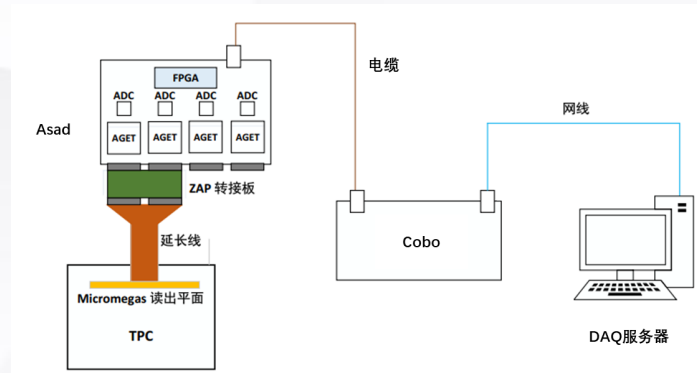
- 全体积时间投影室 (0.5-1.5 bar Argon/Xenon)
- 电荷读出面积: $40 \times 60 \text{ cm}^2$ (2×3 Micromegas)
- 漂移距离: 10 cm (容积24L)
- 柔性 PCB场笼+Cobo-Asad electronics
- 样品直接放置于阴极板, 保证阿尔法能量完全沉积



读出平面Micromegas



探测器内部实物图



Cobo-Asad



探测器外部实物图

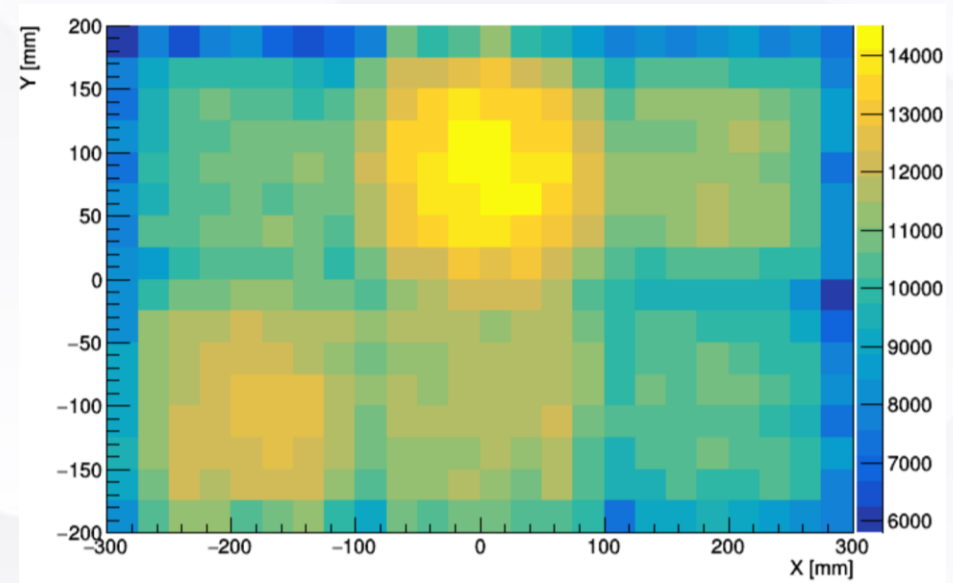
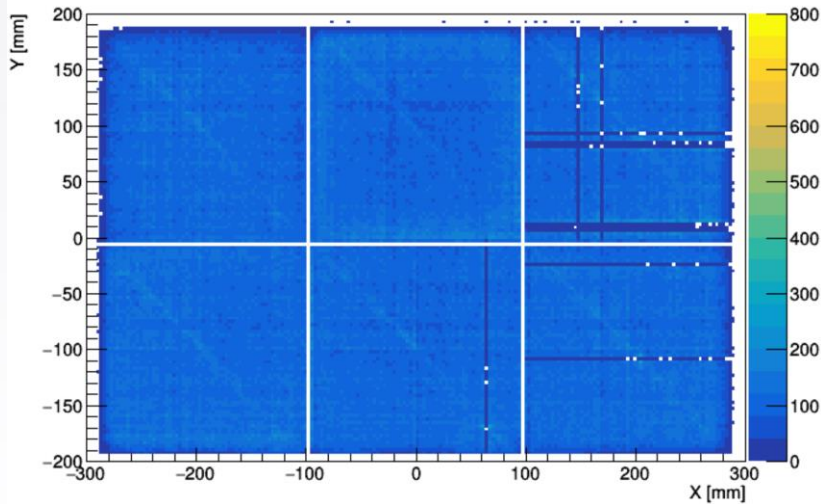
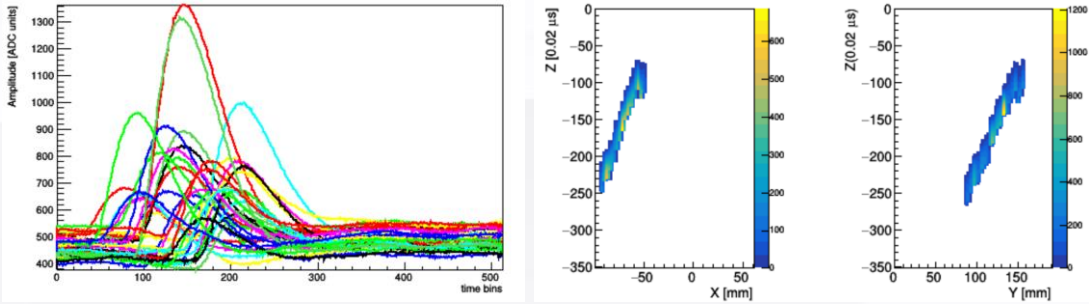




全体积带电粒子谱仪的初步测试



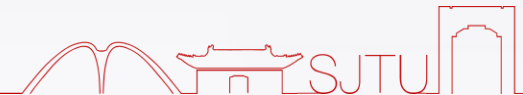
宇宙射线Muon测试



增益二维分布图

➤ 检查探测器运行情况，监测探测器长时间稳定运行

➤ 使用宇宙射线Muon粒子（MIP粒子）对探测器读出平面进行增益分析

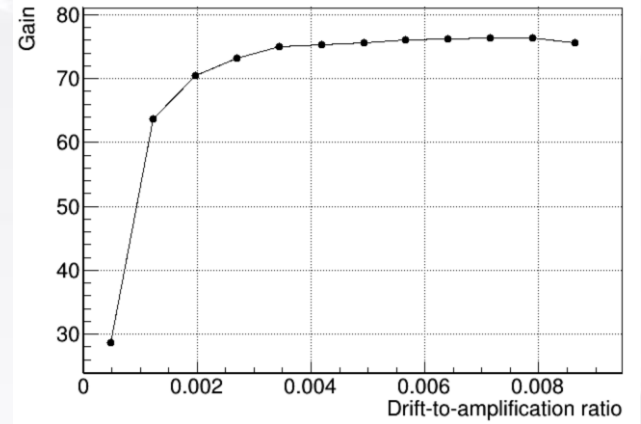
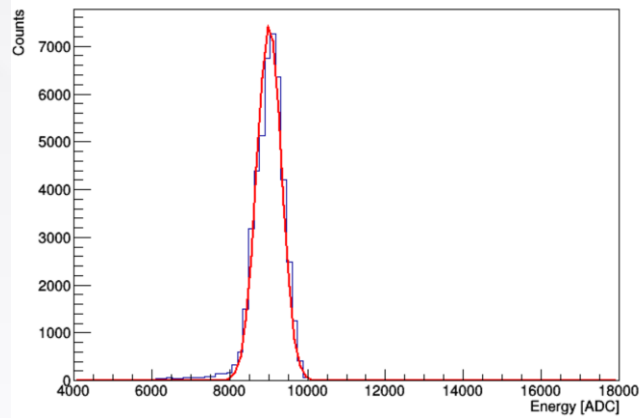
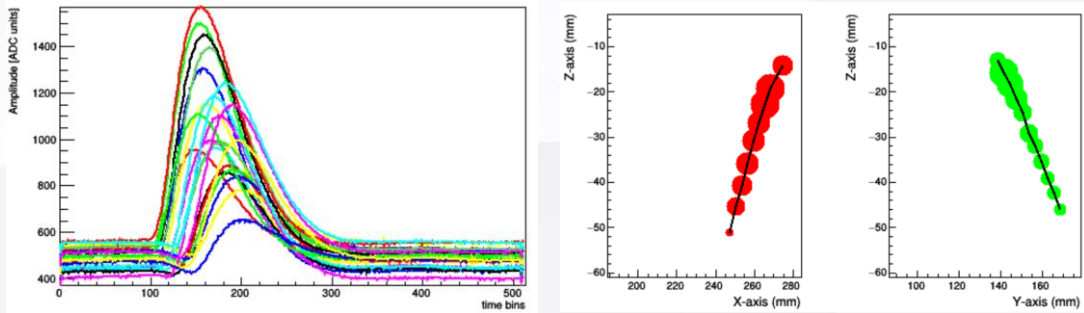




全体积带电粒子谱仪的初步测试

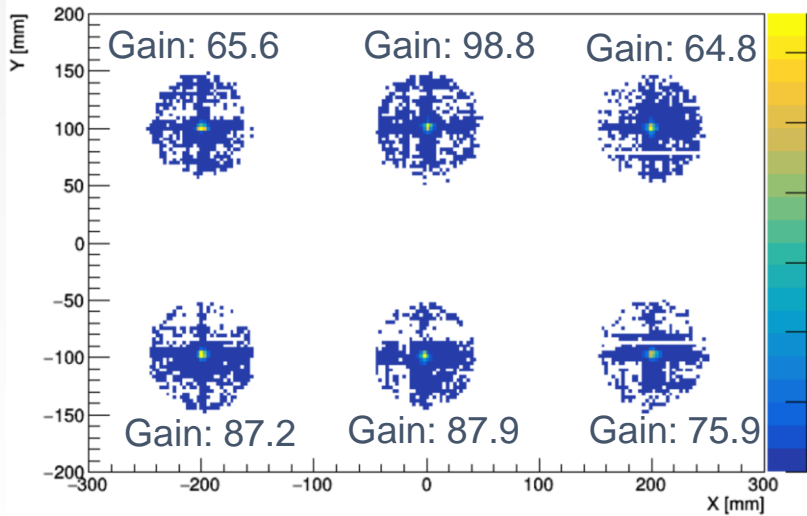


Alpha刻度 (Am-241源)



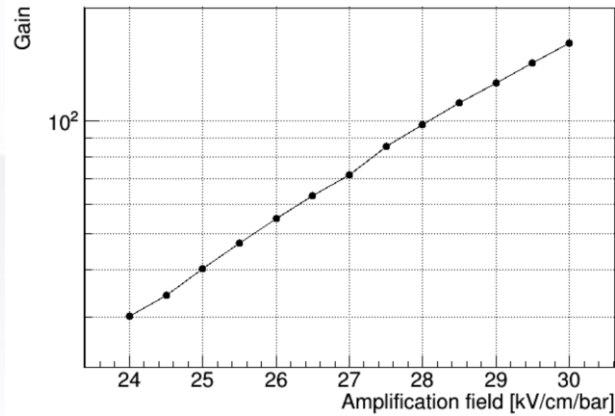
Am-241能谱

增益随漂移场变化

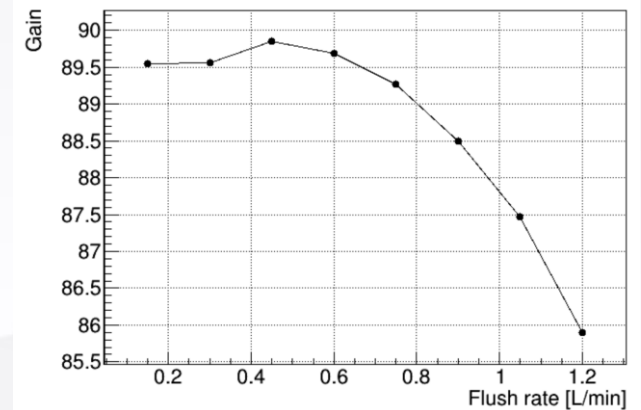


α 径迹起点分布二维图

- 使用Am-241源对各个Micromegas模块进行增益刻度



增益随倍增场变化



增益随气体流速变化

- 利用Am-241能谱的5.485MeV能峰刻度探测器，扫描倍增场、漂移场、气体流速，优化探测器工作条件



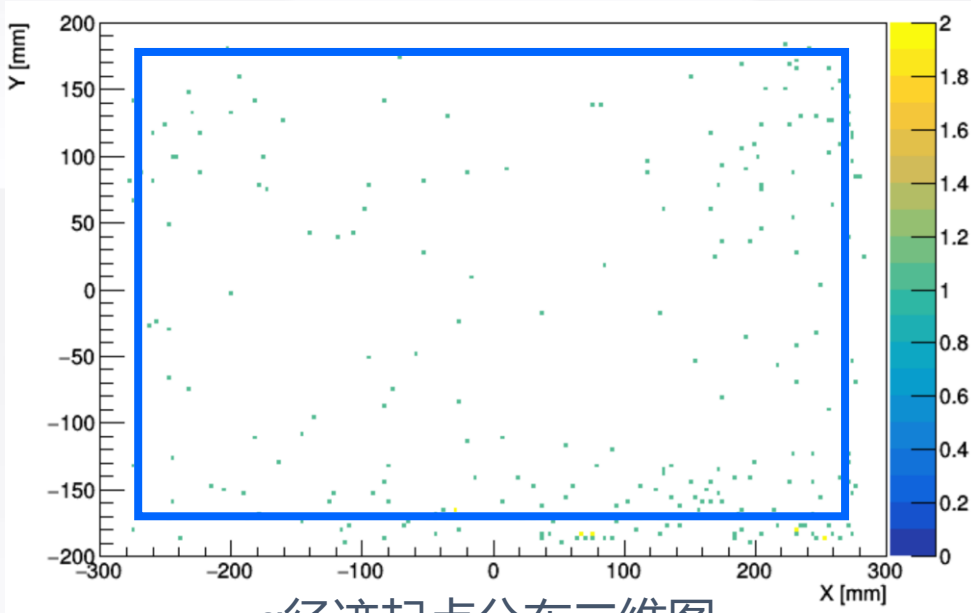


全体积带电粒子谱仪的本底测量

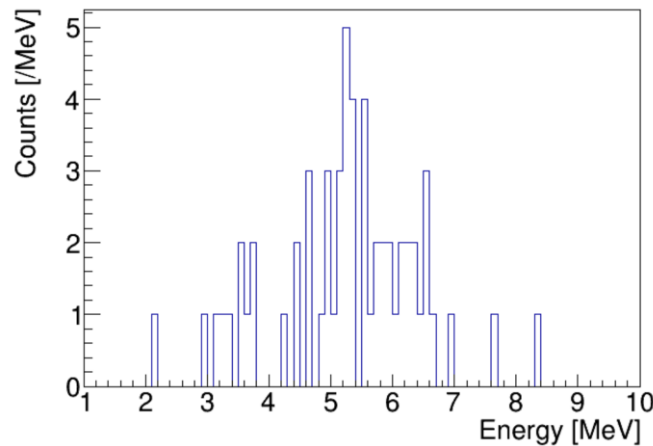


探测器内在 α 本底测试 (铜阴极+气体)

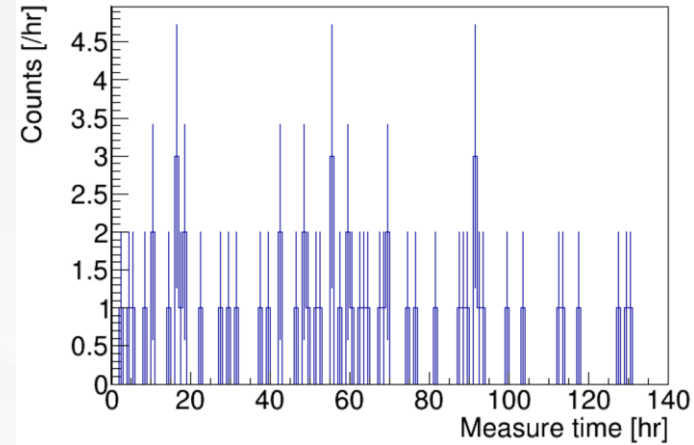
测试气体---1bar Ar-7%CO₂ (0.1 L/min)



α 径迹起点分布二维图



本底能谱



本底计数



➤ 全体积TPC (铜阴极+气体) α 本底: $(0.27 \pm 0.02) \times 10^{-6}$ Bq/cm² (Track-related 筛选alpha本底: 能量1-10MeV, 径迹方向朝上, FV cut 2.7cm排除掉来自场笼的本底)

➤ 多轮探测器全体积TPC α 本底测试 (μ Bq/cm²)

充氦气静置一个月

酸洗铜阴极

更换亚克力场笼 (减少亚克力材料体积)

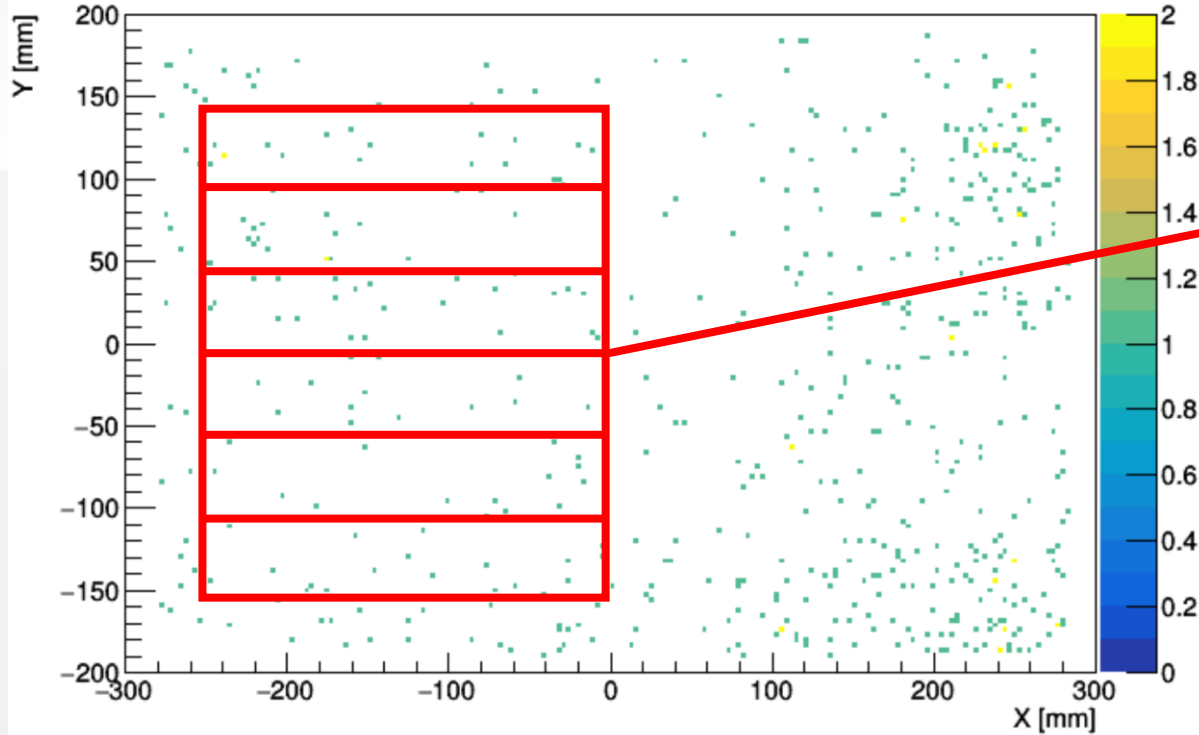
$1.29 \pm 0.06 \longrightarrow 0.82 \pm 0.06 \longrightarrow 0.47 \pm 0.03 \longrightarrow 0.27 \pm 0.02$

➤ Track-related 筛选alpha本底: 能量1-10MeV, 径迹方向朝上, FV cut 2.7cm排除掉来自场笼的本底



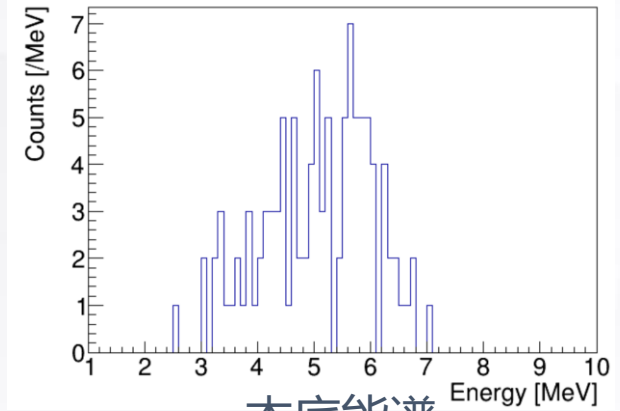
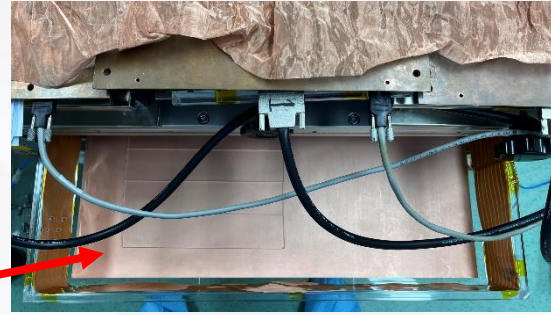


亚克力样品测试 (JUNO生产)

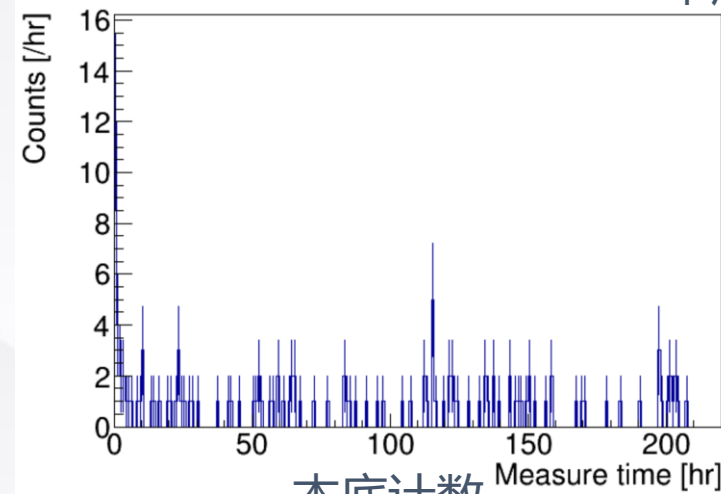


α径迹起点分布二维图

- 亚克力样品6块5*25 cm²: 10.31-11.01于隧道环境中打磨, Rn~250Bq/m³
- 打磨流程: 打磨掉表层-水抛-贴膜 撕膜-酸洗-超声波清洗-贴膜



本底能谱



本底计数

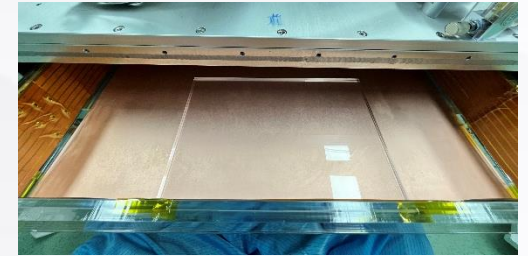
- 测试气体---1bar Ar-7%CO₂ (0.1 L/min)
- 亚克力样品+气体的α放射性: 0.20 ± 0.02 μBq/cm²
- Cu阴极+气体的α本底: 0.17 ± 0.02 μBq/cm²
- 估计亚克力样品的α放射性: 0.03 ~ 0.20 μBq/cm²



亚克力表面阿尔法放射性测量

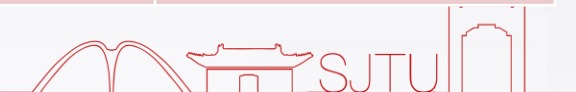


亚克力样品测试 (JUNO生产)



	普通亚克力	低本底亚克力 (塑料贴膜)	低本底亚克力 (牛皮纸贴膜)	低本底亚克力1 (塑料贴膜+打磨)	低本底亚克力2 (塑料贴膜+打磨)
Measure area [cm ²]	600	1000	500	750	750
Measure time [hr]	45	68	42	203	250
Contamination of sample + gas [$\mu\text{Bq}/\text{cm}^2$]	1.00 ± 0.1	0.60 ± 0.05	0.86 ± 0.1	0.20 ± 0.02	0.24 ± 0.02
Background of cathode Cu + gas [$\mu\text{Bq}/\text{cm}^2$]	0.48 ± 0.03	0.50 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02
Estimated contamination of sample [$\mu\text{Bq}/\text{cm}^2$]	0.52~1.00	0.10~0.60	0.48~0.86	0.03~0.20	0.07~0.24

➤ Track-related 筛选alpha本底: 能量1-10MeV, 径迹方向朝上, FV cut 2.7cm排除掉来自场笼的本底





目录

1

课题背景与研究现状

2

低本底 α 谱仪的技术和原理

3

探测器的搭建和测试

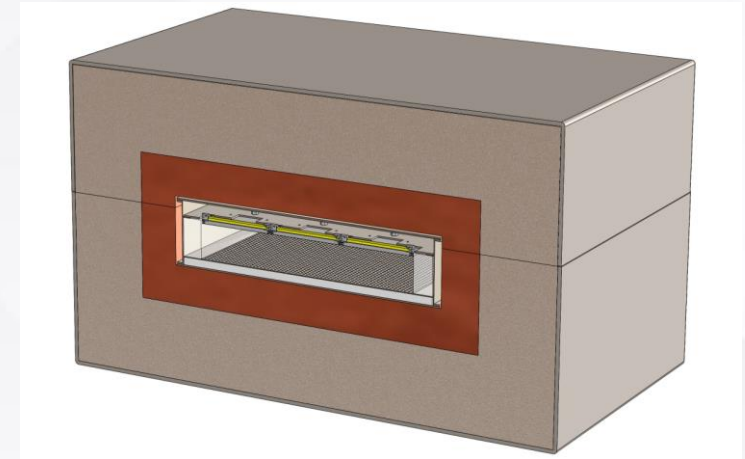
4

总结



❶ 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
- 测量JUNO低本底亚克力表面 α 放射性：0.03 ~ 0.20 $\mu\text{Bq}/\text{cm}^2$



探测器与屏蔽体

❷ 下一步计划

- 进一步降低探测器内在本底，提高谱仪灵敏度；优化设计，简化操作流程
- 开发电子信号-本底筛选办法，开展10~500keV电子信号探测
- 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

❸ 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



气体系统 (充气、循环)

