



基于大面积Micromegas探测器的 缪子成像装置研究进展

王宇、刘树彬、张志永、封常青、王婷、姚志杭、张葛沣

代表缪子成像研究团队

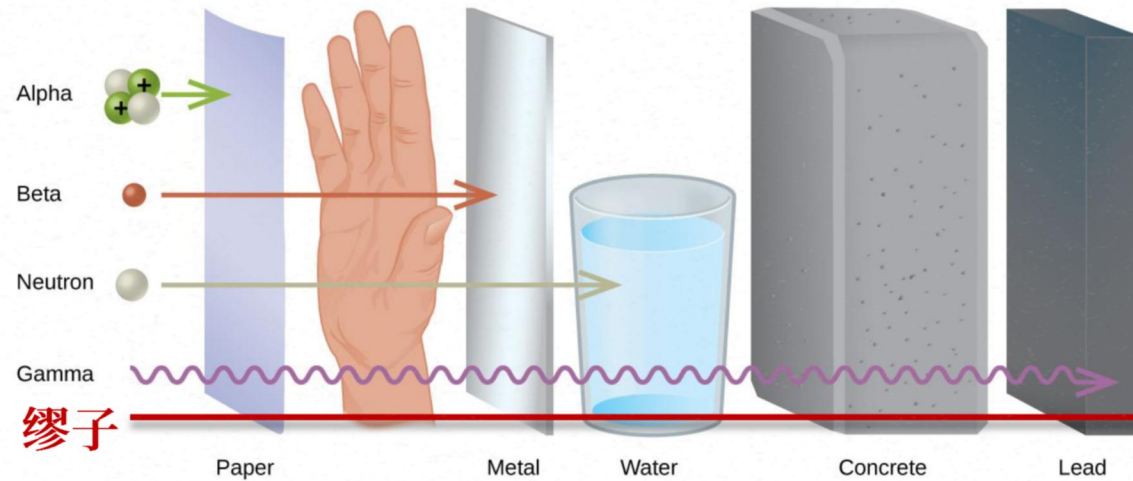
核探测与核电子学国家重点实验室 中国科学技术大学
近代物理系 中国科学技术大学

2025年8月22日

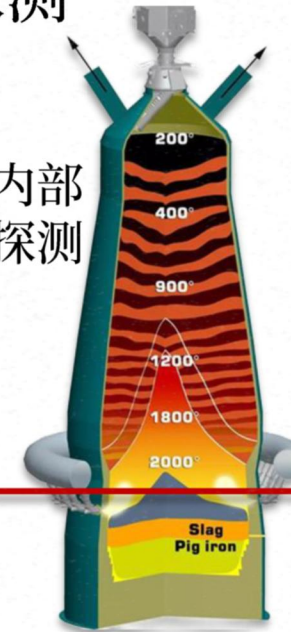


- I. 背景介绍**
- II. 缪子成像装置研制
- III. 性能测试与成像实验
- IV. 总结

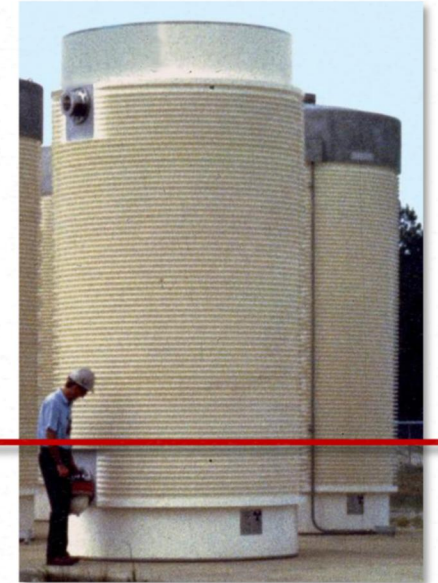
➤大型建筑和地质结构难以被常见的射线成像技术所探测



高炉内部
结构探测



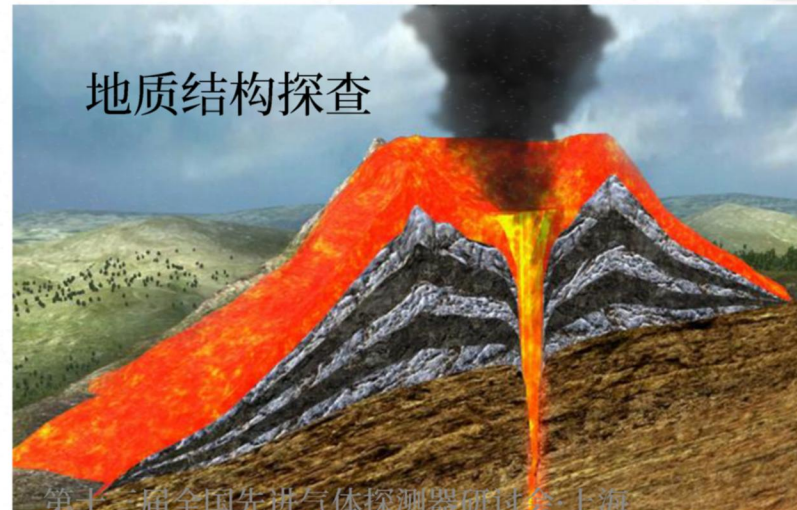
核燃料存放监察



文物探查



地质结构探查

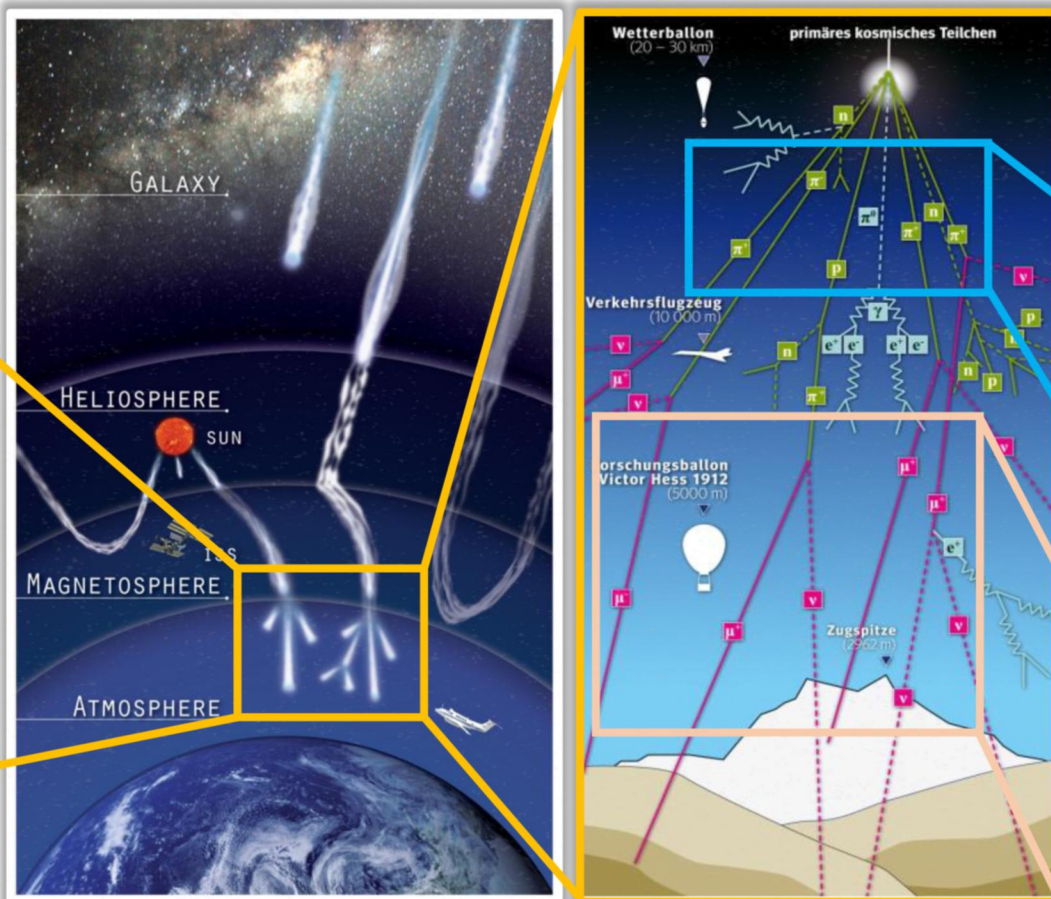
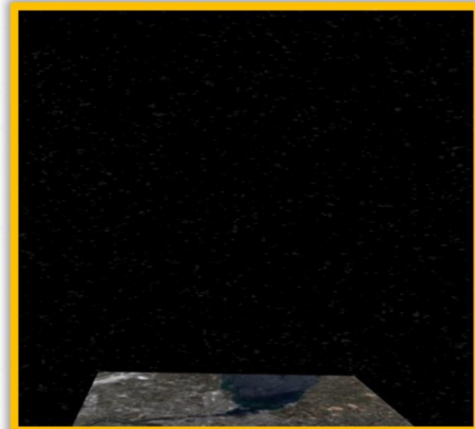


集装箱安检

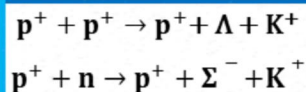
➤原初宇宙线与大气产生簇射

- 次级粒子衰变产生缪子
- 缪子寿命较长、电离能损小→能到达地面

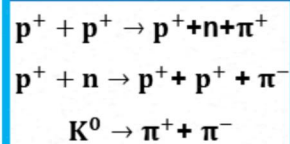
A 1 EeV (10^{18} eV) proton
cosmic ray air shower



K介子

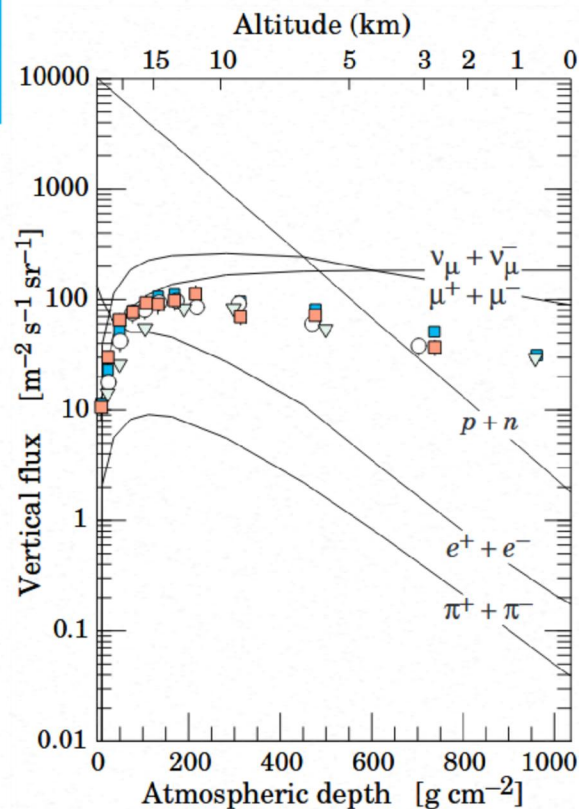
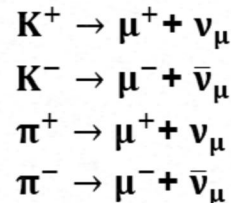


π 介子

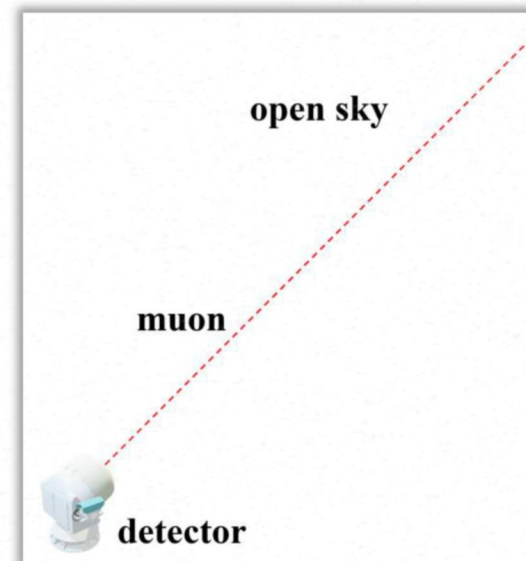
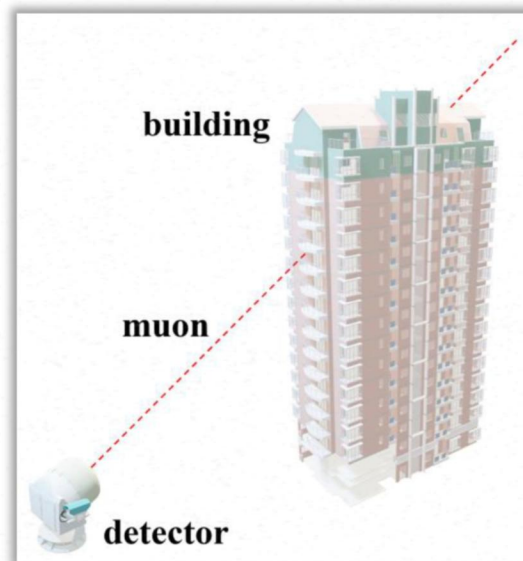
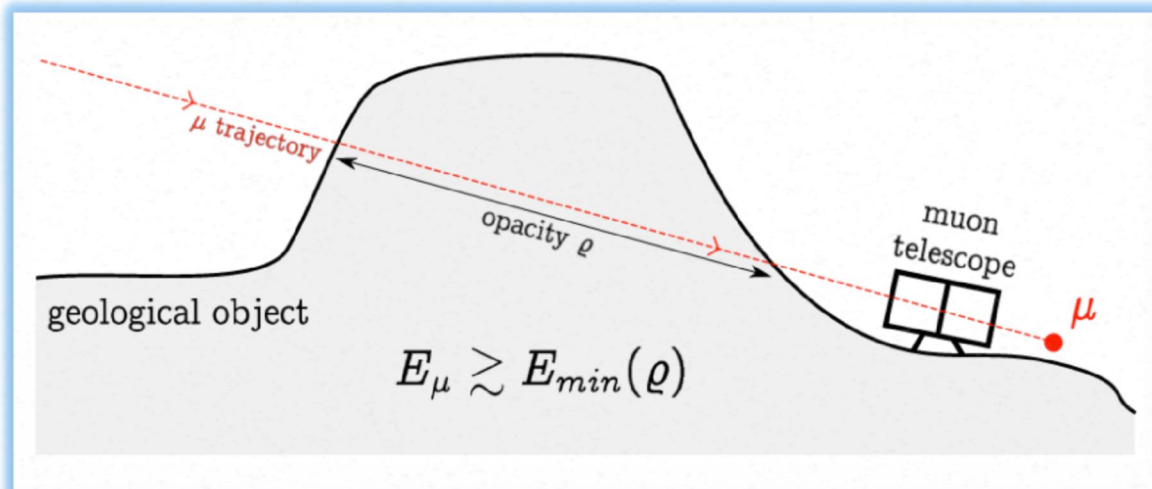


衰变

缪子

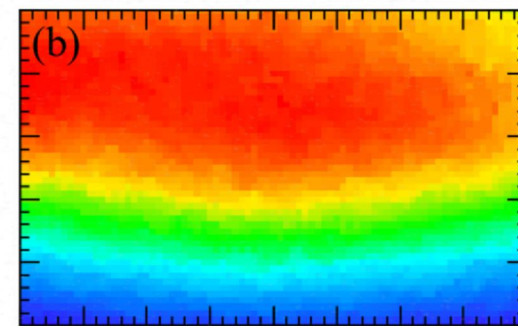
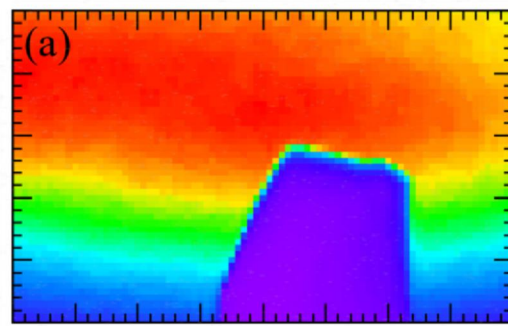


➤ 物体吸收缪子比例与其质量厚度相关

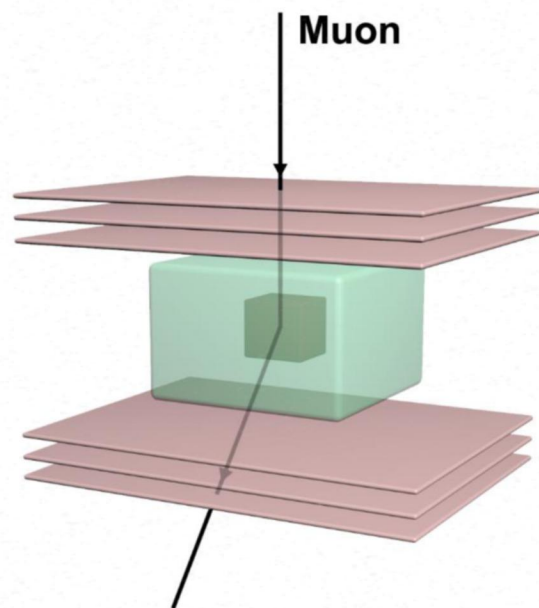


$$T = \frac{N_{\mu,att}(\theta_z)}{N_{\mu,ori}(\theta_z)} = \frac{\int_{E_{min}(\varrho)}^{\infty} I(E, \theta_z) dE}{\int_0^{\infty} I(E, \theta_z) dE}$$

$$\varrho(L) = \int_L \rho(\xi) d\xi = \bar{\rho} \times L$$

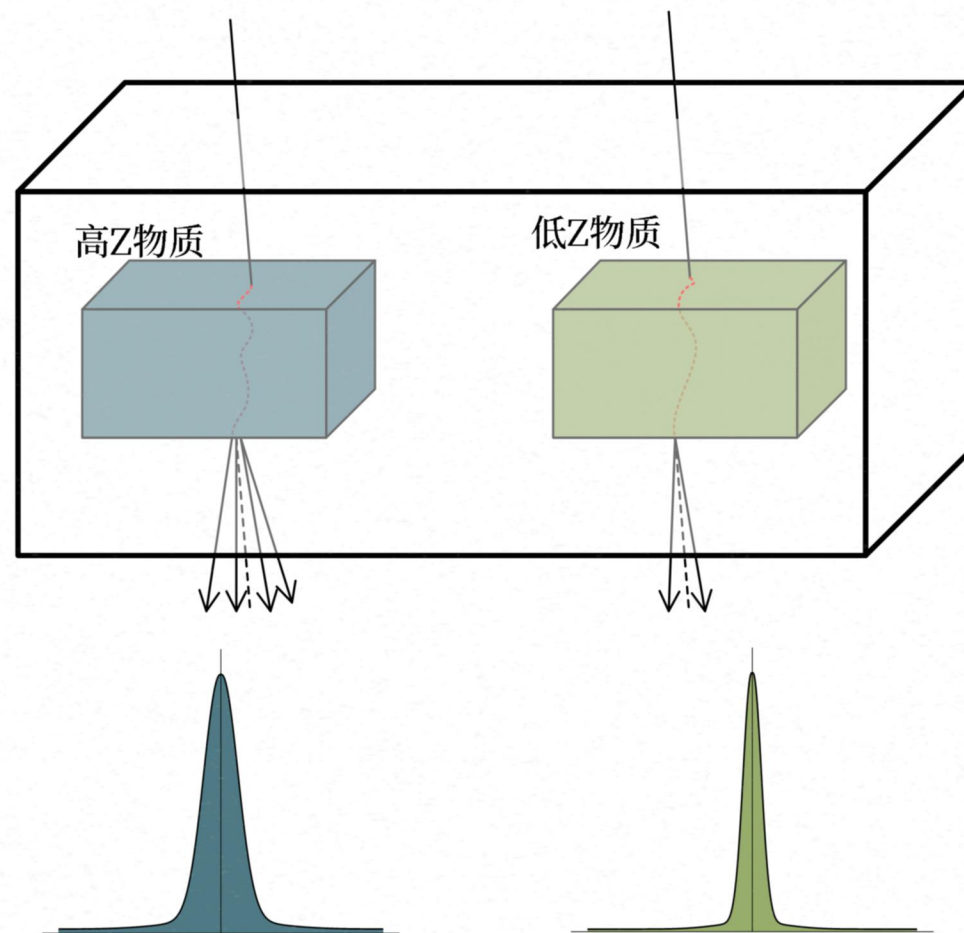


➤不同物质和对缪子的散射能力不同



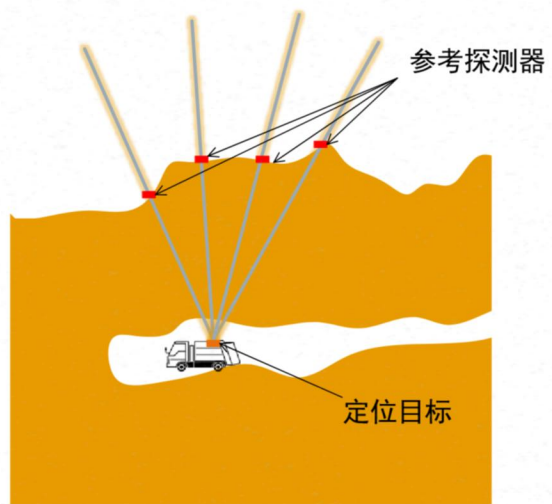
$$\theta_{MS} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} (1 + 0.038 \ln(x / X_0))$$

$$X_0 \approx \frac{716.4 \text{ g/cm}^2}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log(287 / \sqrt{Z})}$$



散射角：出射径迹与入射径迹夹角

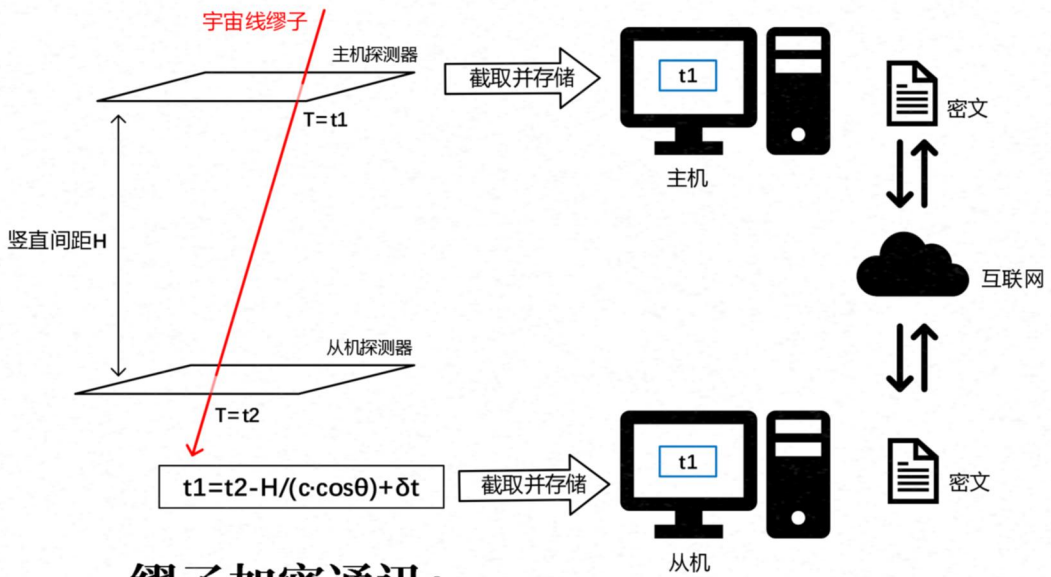
散射位移：出射径迹与入射径迹之间的位置偏差



缪子定位:

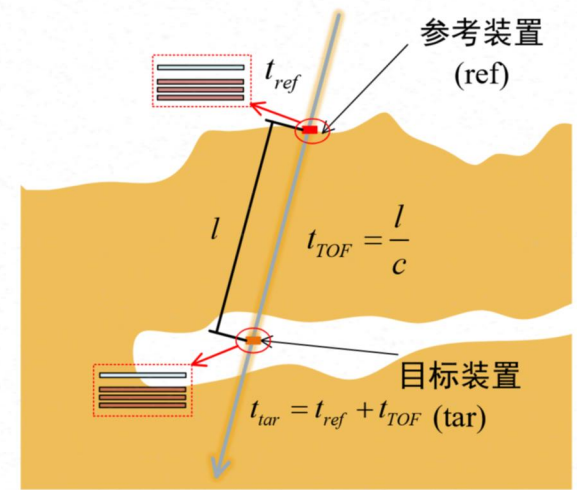
- 利用宇宙线缪子直线飞行的性质

$$(c \times (t_p - t_i))^2 = (x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2 + (c \times t_{error})^2$$



缪子加密通讯:

- 对称加密方案
- 缪子可穿过设备之间的障碍物实现密钥传输
- 一个缪子传输一个短密钥
- 加密的数据通过传统方式进行传输



缪子时间同步:

- 利用宇宙线近似光速飞行的性质

$$t_{TOF} = \frac{l}{c} = t_{tar} - t_{ref}$$

$$t_{local} = t_{abs} + t_{m1} + l/c - t_{m2}$$



I. 背景介绍

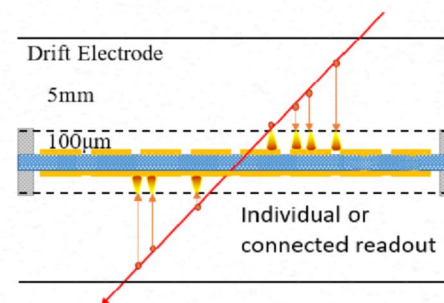
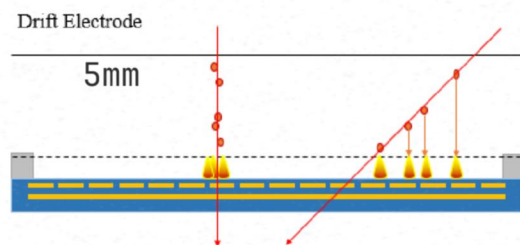
II. 缪子成像装置研制

III. 性能测试与成像实验

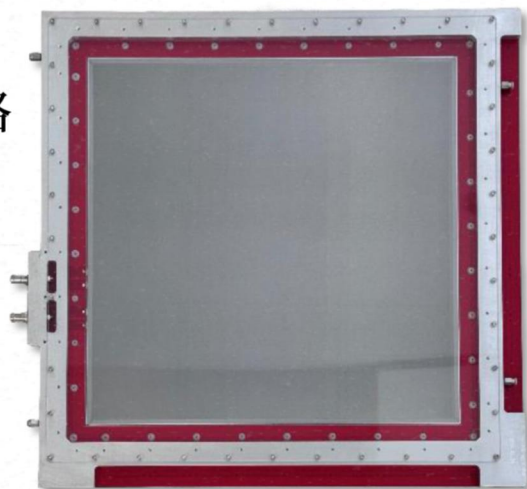
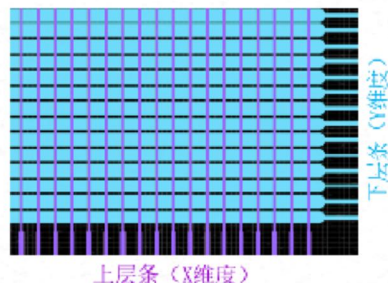
IV. 总结

➤ 探测器参数

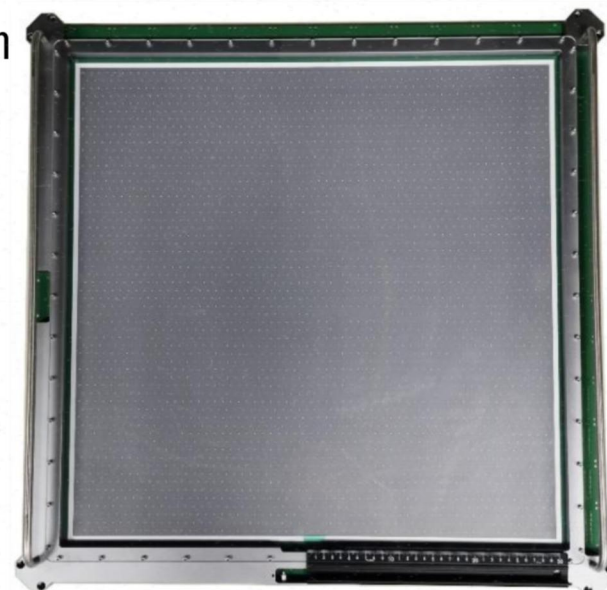
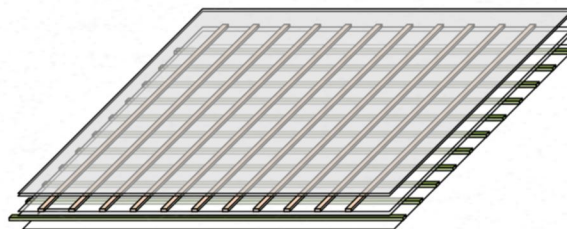
- 漂移区：5mm，放大区：100 μ m
- 条间距：0.4mm



- 灵敏面积400mm $\times$ 400mm
- 单面气室二维读出
- 读出条数：2000路



- 灵敏面积600mm $\times$ 600mm
- 双面气室二维读出
- 读出条数：3000路



► 利用ASIC对探测器信号进行波形采样读出

- 每块板卡集成4片芯片，共256路读出通道
- 每通道由电荷灵敏前放、成形电路、开关电容阵列、比较器等结构组成
- 采样率1MHz~100MHz可配置
- 动态范围可选：0~120fC、240fC、1pC和10pC

不同复用比的编码电路

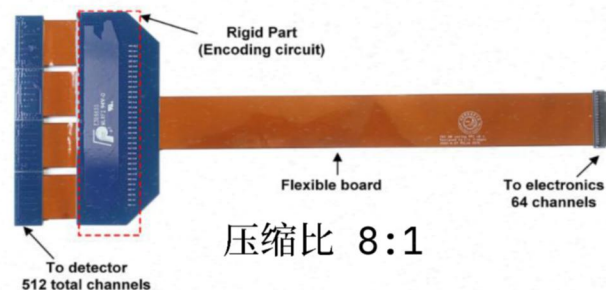


压缩比 6:1

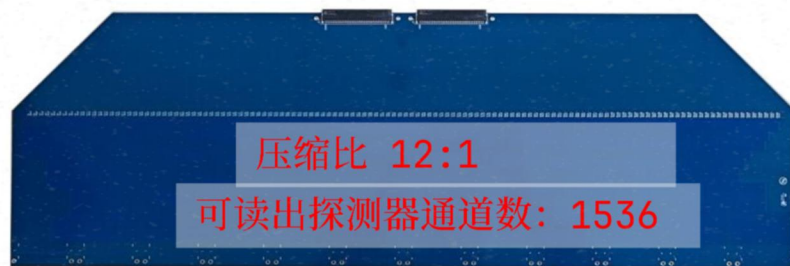


压缩比 16:1

可读出探测器通道数: 1024



压缩比 8:1

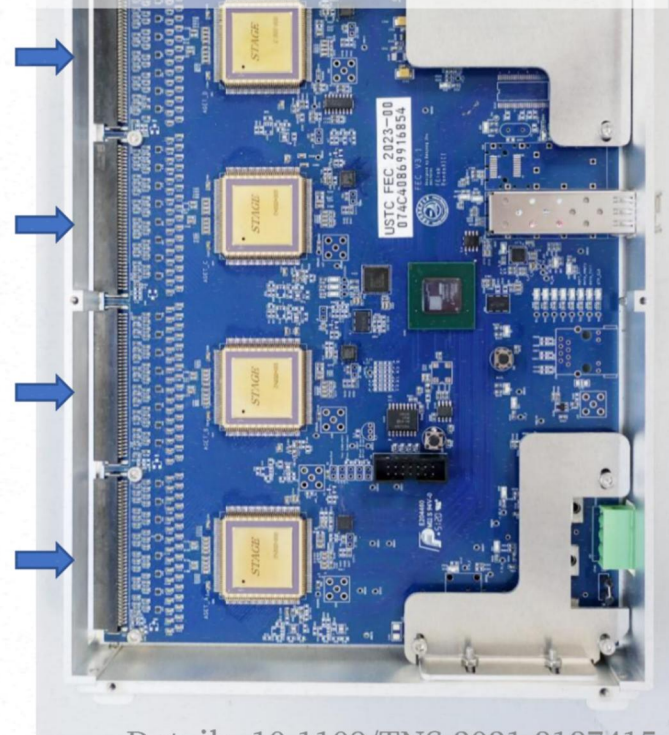


压缩比 12:1

可读出探测器通道数: 1536

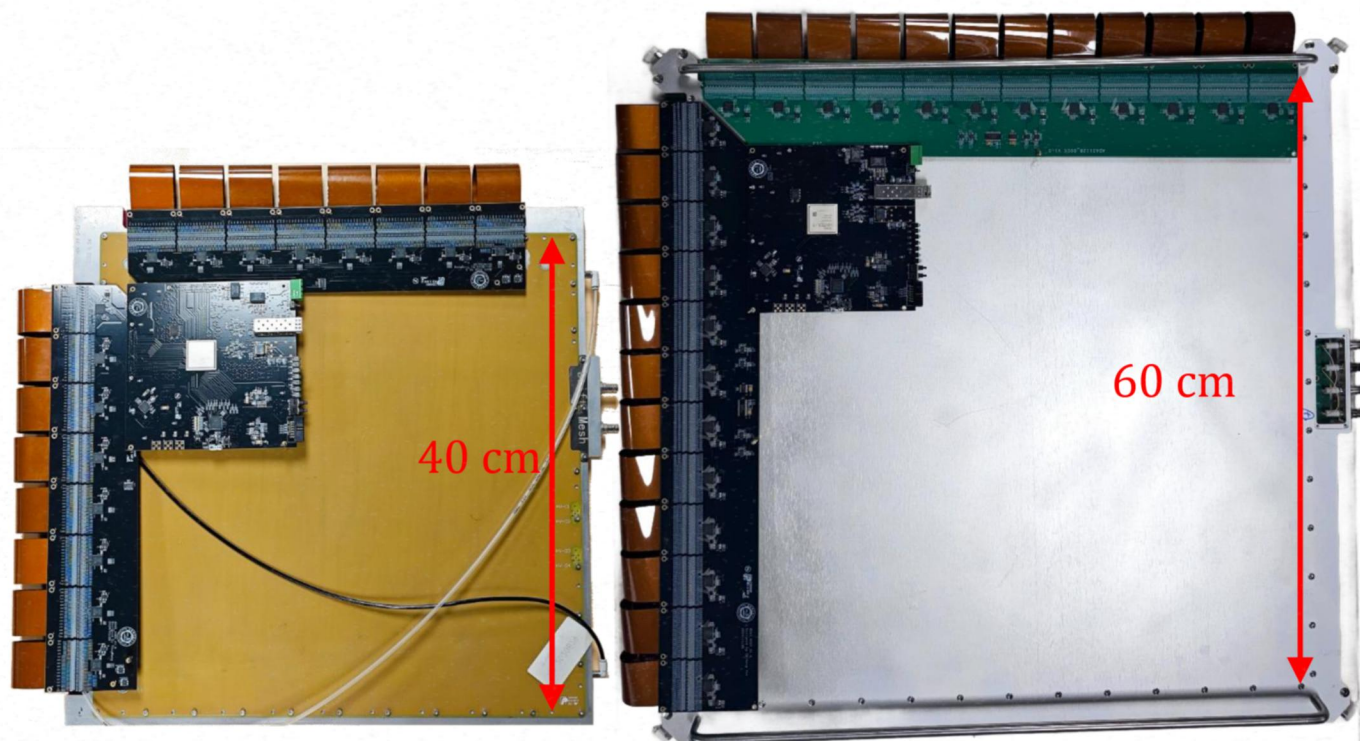
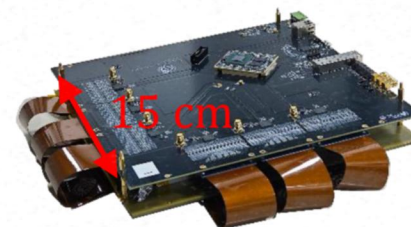
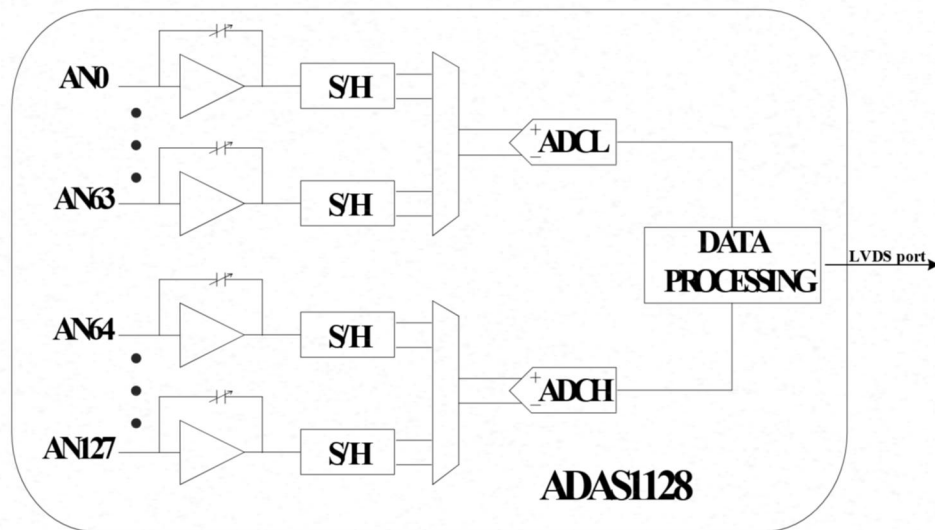
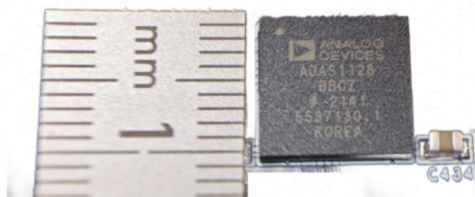
基于STAGE芯片的波形采样
前端电子学

模拟信号输入



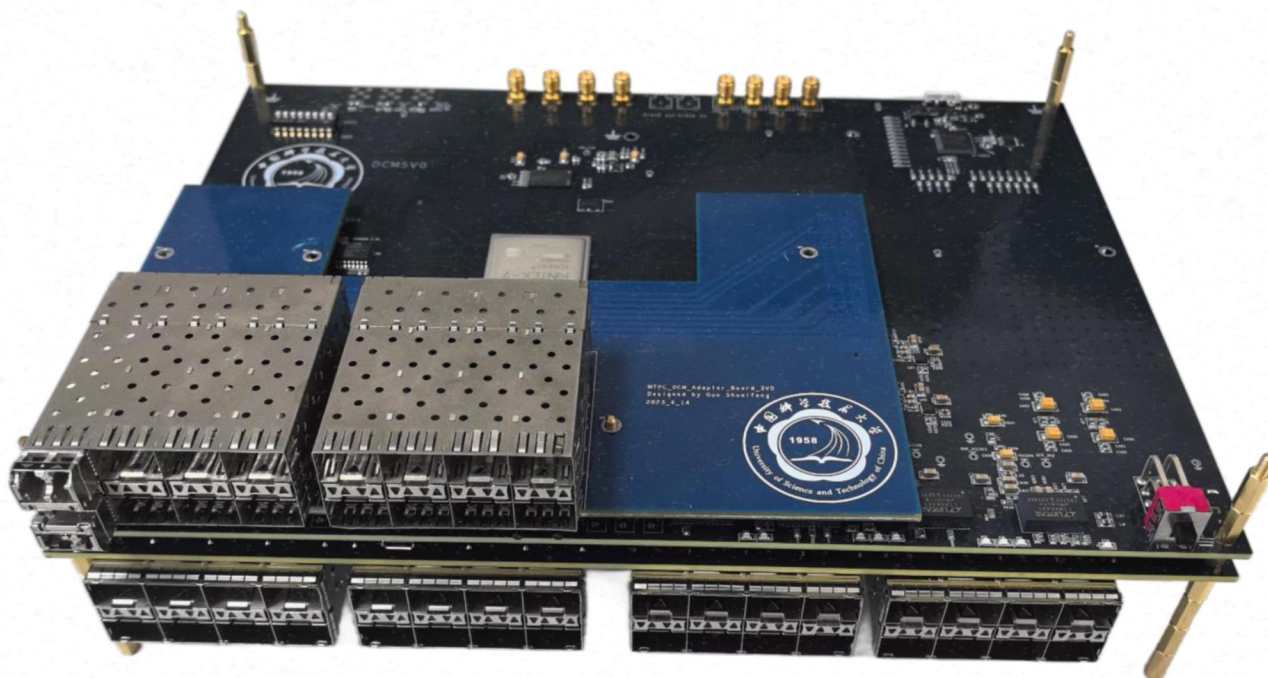
► 利用高集成度电流积分芯片对信号进行读出

- 记录击中位置和电荷量信息
- 单片芯片可读出128通道，面积约1 cm × 1 cm
- 支持连续采样



➤ 后端电子学

- 适配不同规模 and 不同类型的前端
 - 与前端电子学采用光纤互联，可远距离通讯
- 多种数据传输接口，适应不同成像场合
- 支持触发输入、输出和分发功能

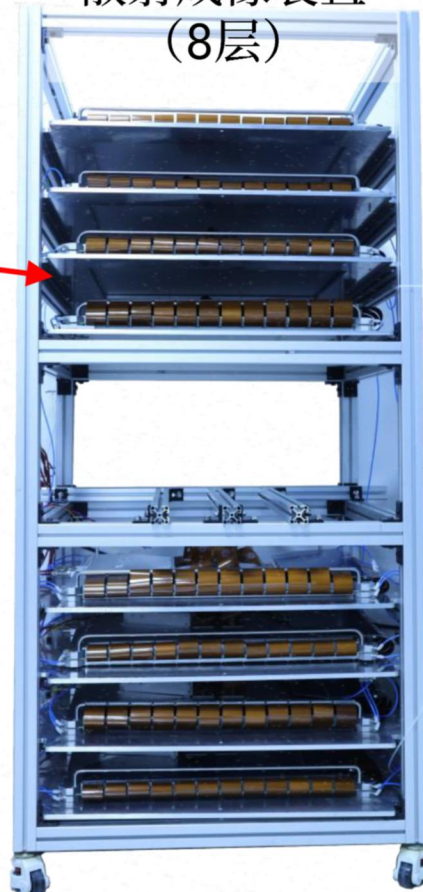


- 利用灵敏面积为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的Micromegas探测器和两套读出电子学各搭建了一系列的成像装置

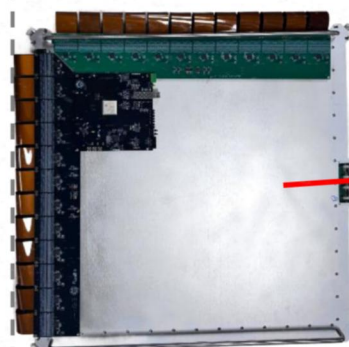


透射成像装置（4层）

散射成像装置
（8层）



基于编码复用+波形采样读出方案



透射成像装置（4层）



基于电流积分芯片读出方案



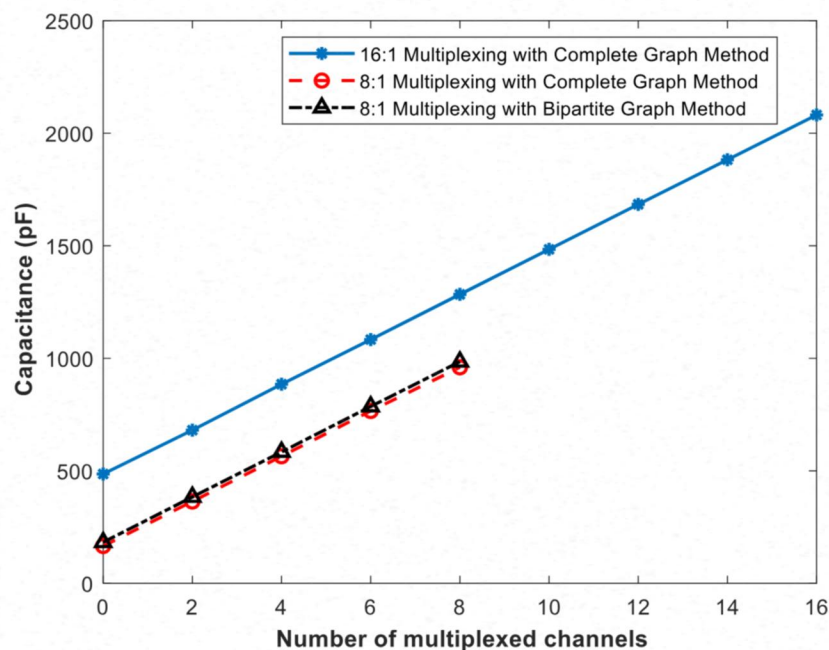


- I. 背景介绍
- II. 缪子成像装置研制
- III. 性能测试与成像实验**
- IV. 总结

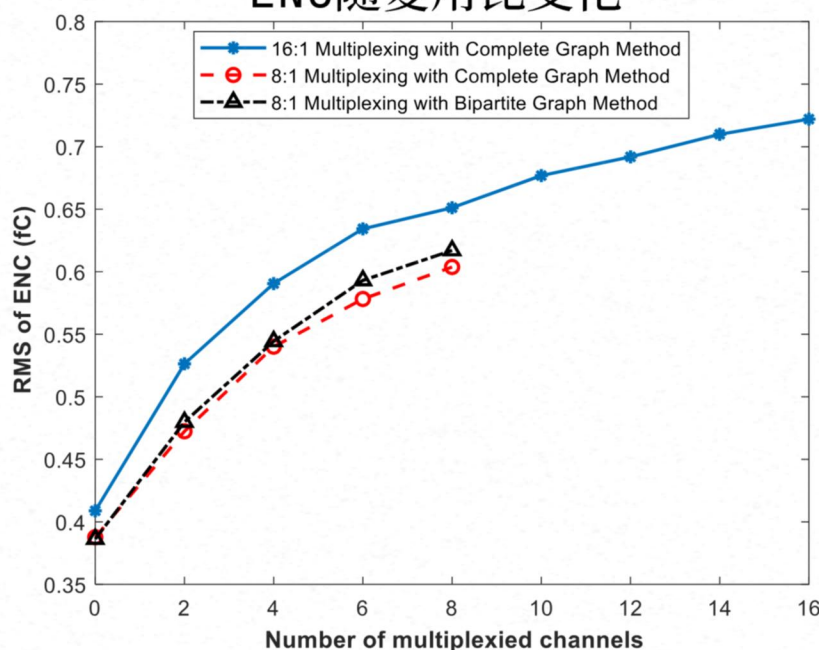
➤ 编码复用带来的直接影响：电子学等效输入电容增大

- 电荷灵敏前放等效输入噪声(ENC)增加
- 电荷灵敏前放增益降低

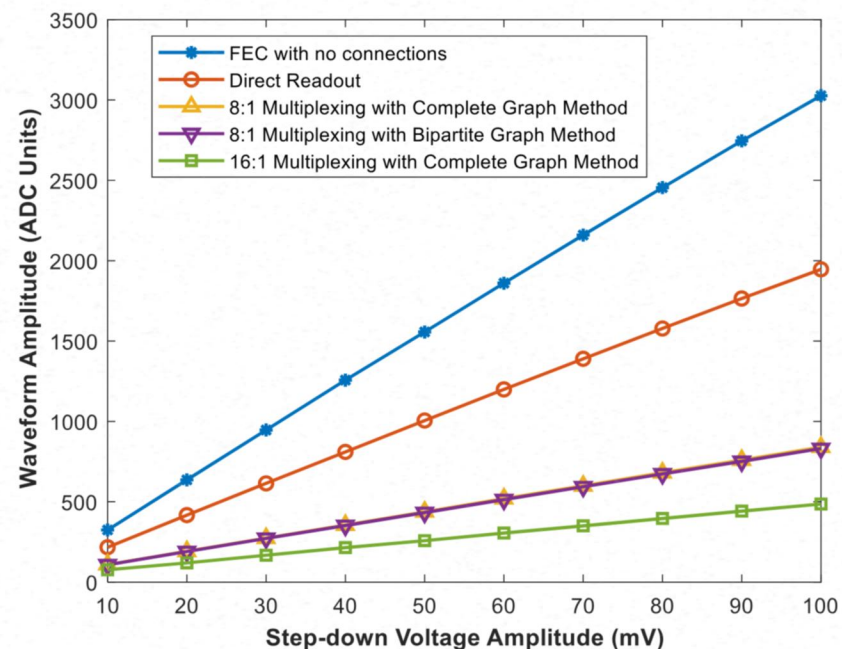
电容随复用比变化



ENC随复用比变化

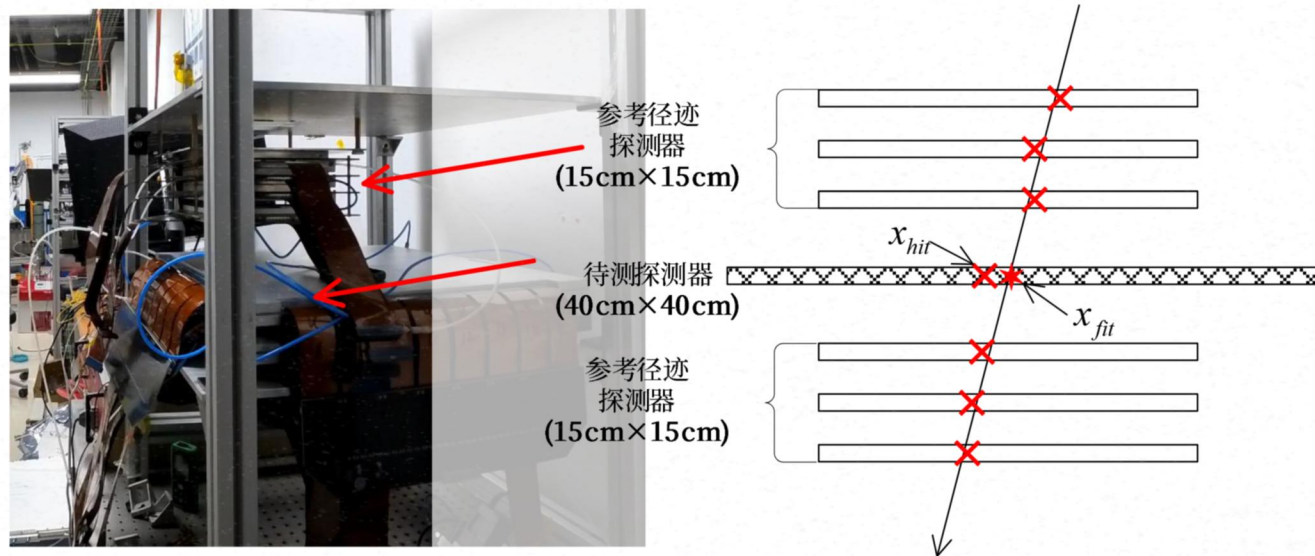


不同编码比对应的电子学刻度曲线



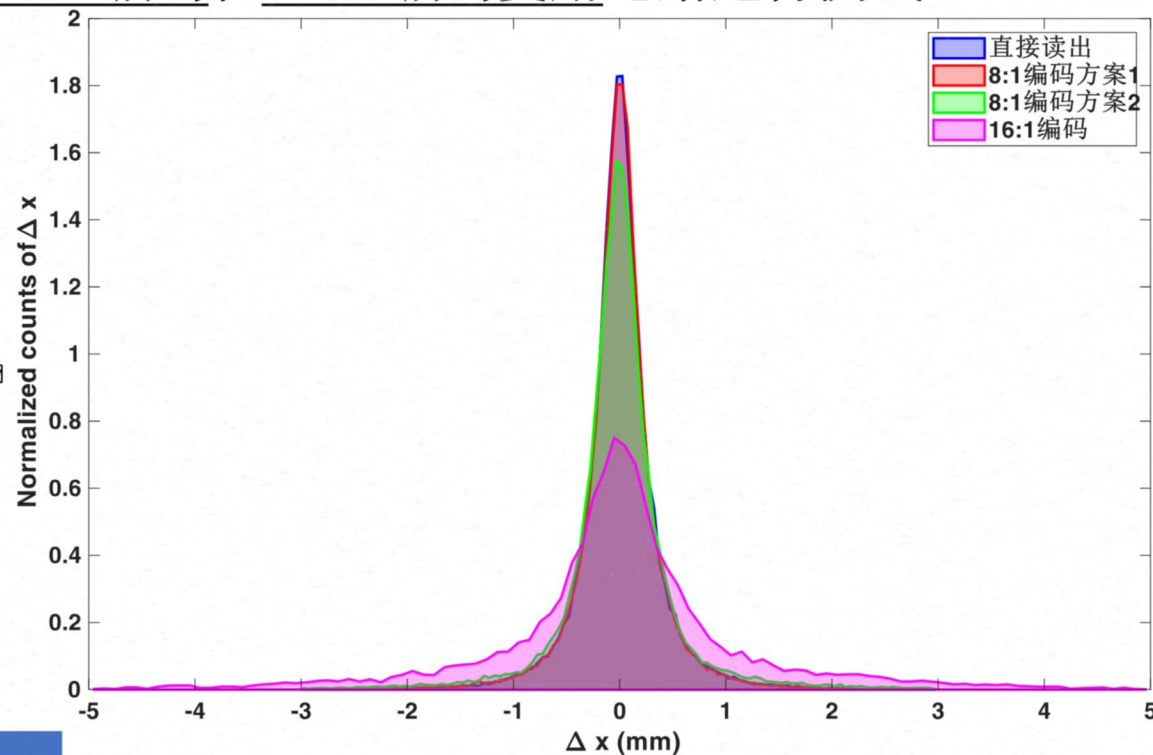
➤ 利用径迹测量平台对不同编码比电路进行测试

- 使用小面积Micromegas探测器构成参考径迹测量系统
- 对400 mm×400 mm的探测器进行不编码、两种8:1编码和16:1编码复用电路进行测试

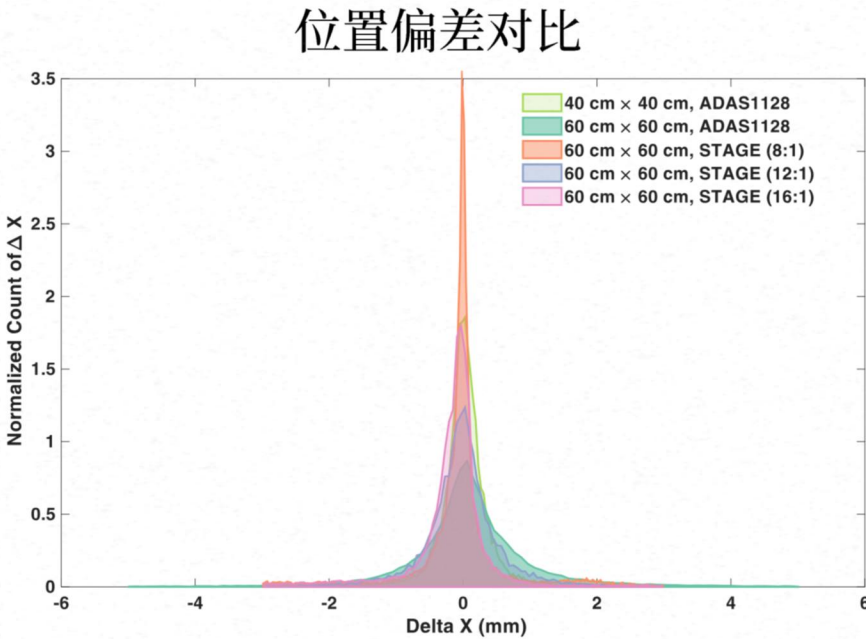
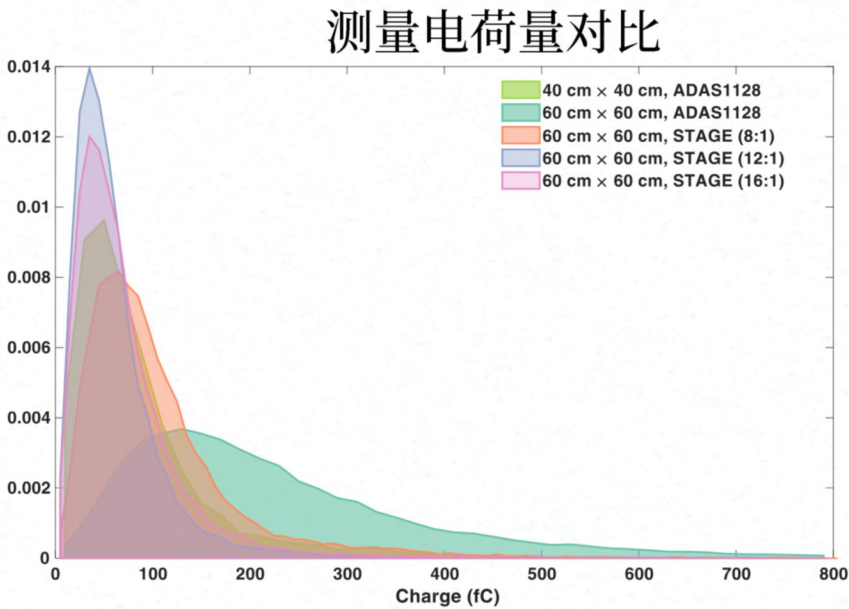


效率对比

不编码	8:1编码方案1	8:1编码方案2	16:1编码
96.7%	94.5%	94.3%	93.6%



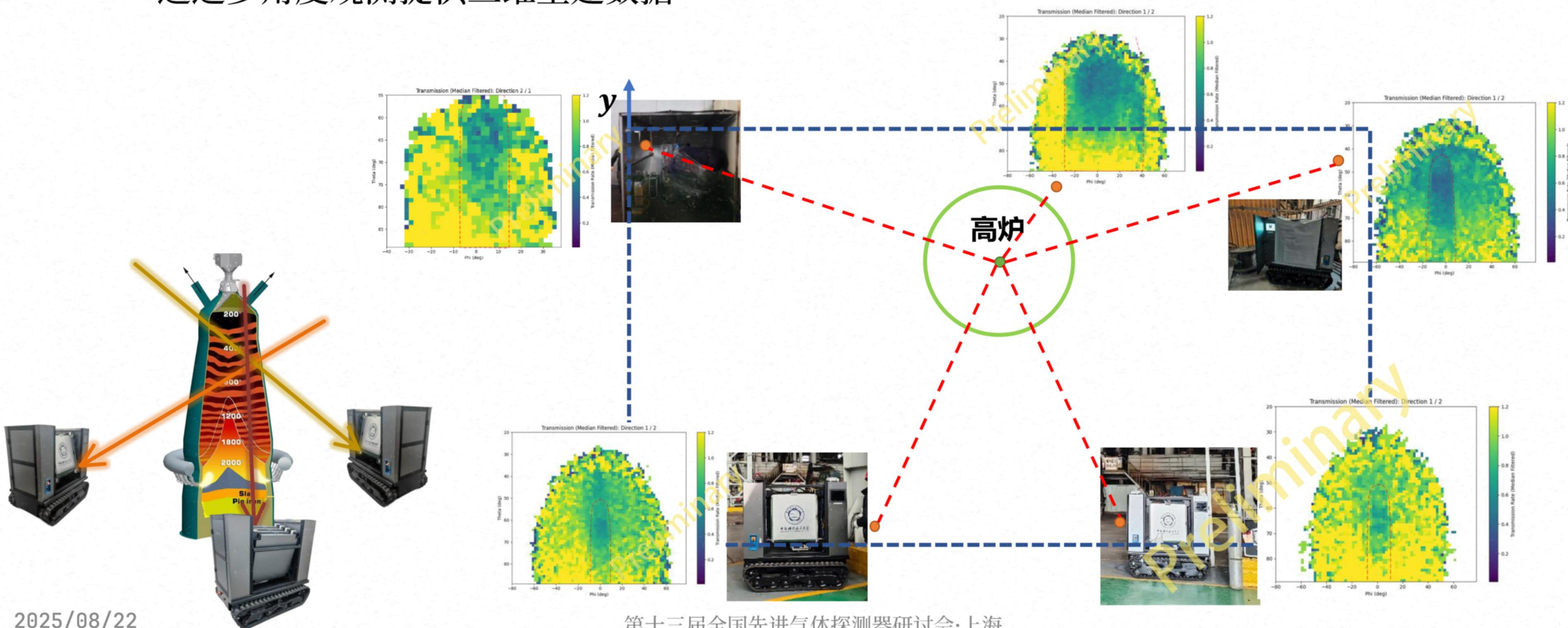
- 利用6层探测器，对不同读出方案测试
- ADAS1128电子学读出600 mm × 600 mm和400 mm × 400 mm探测器
 - 波形采样电子学+不复用、8:1、12:1和16:1编码复用电路读出600 mm × 600 mm探测器



效率对比					
ADAS 400	ADAS 600	波形采样 不复用	波形采样 8:1	波形采样 12:1	波形采样 16:1
95.5%	97.7%	97.8%	93.2%	92.2%	91.5%

产高炉观测实验

- 高炉容积2800 m³、装置布置于高炉的四个点位
- 通过多角度观测提供三维重建数据

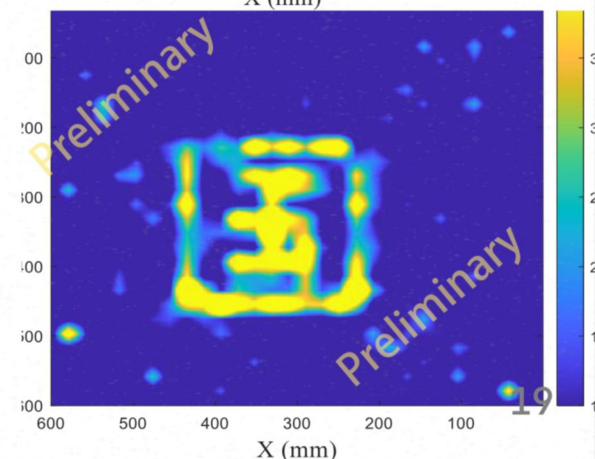
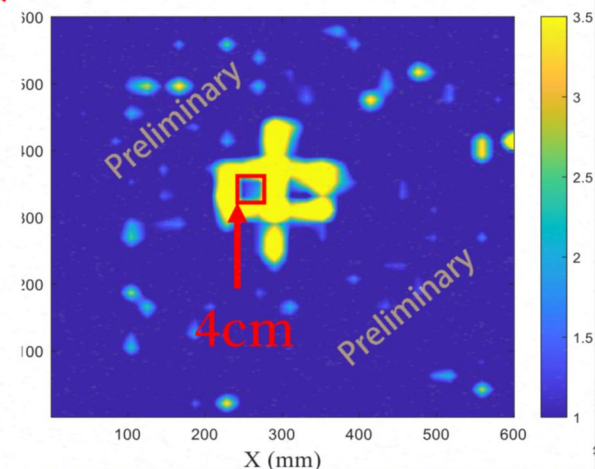
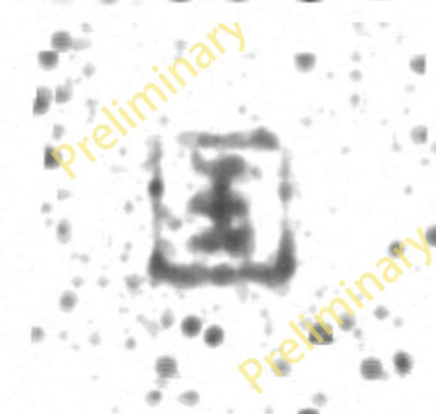
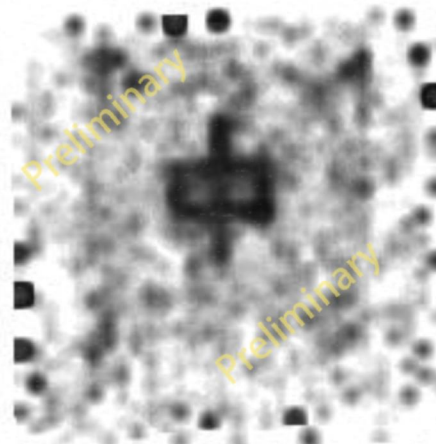
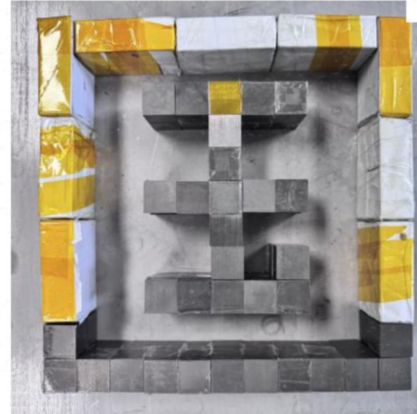
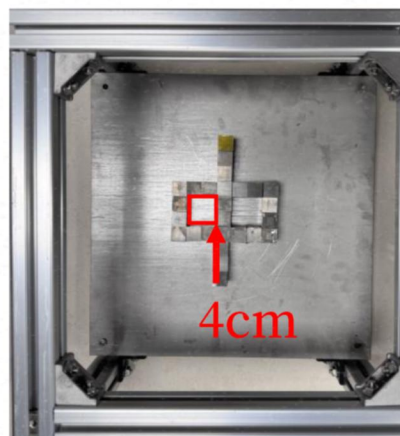
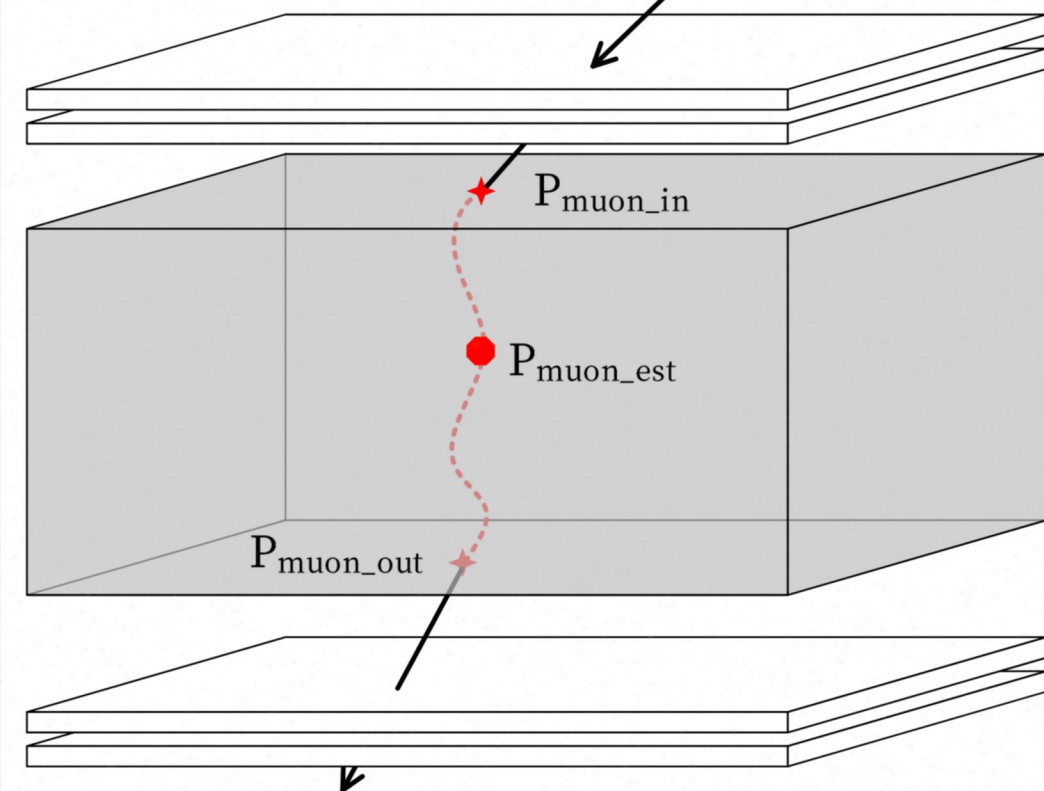


➤ 缪子径迹估计算法 (MuTEA, Muon Trajectory Estimate Algorithm)

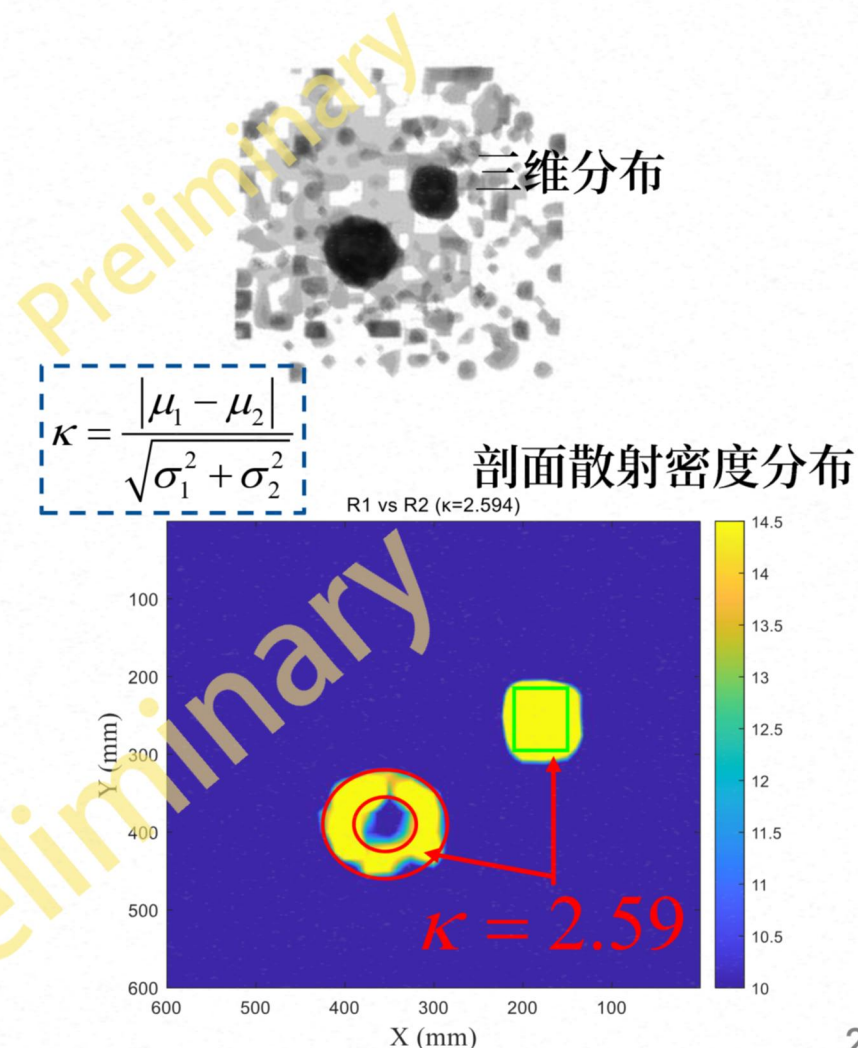
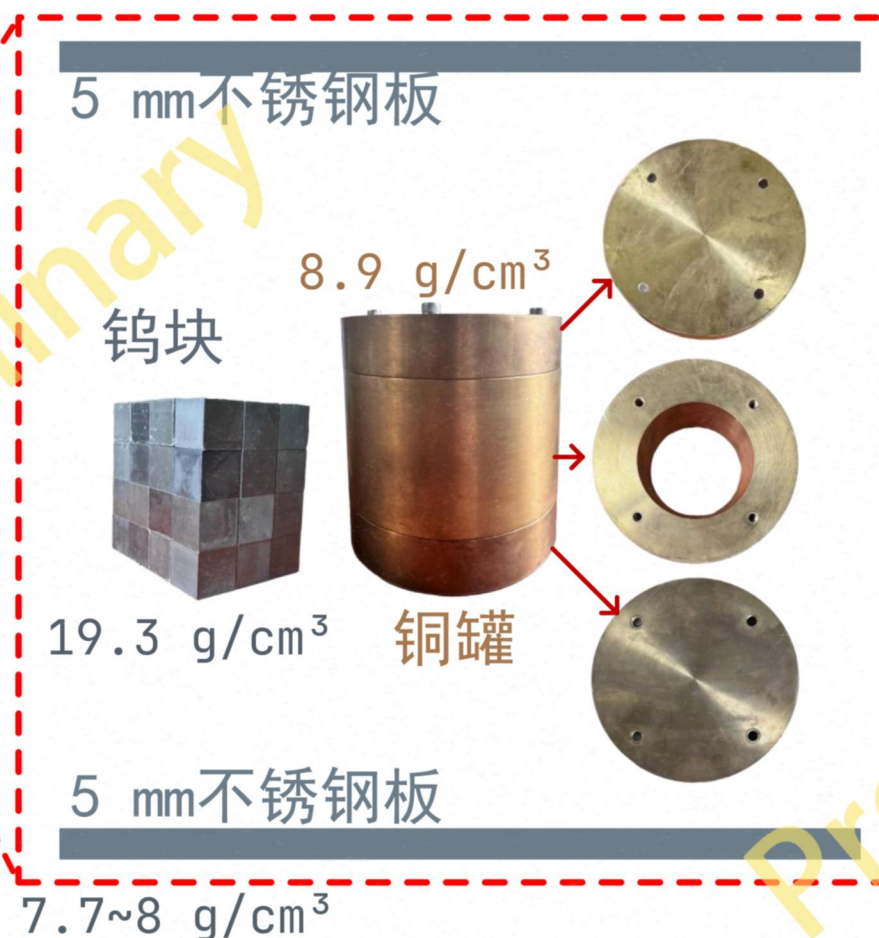
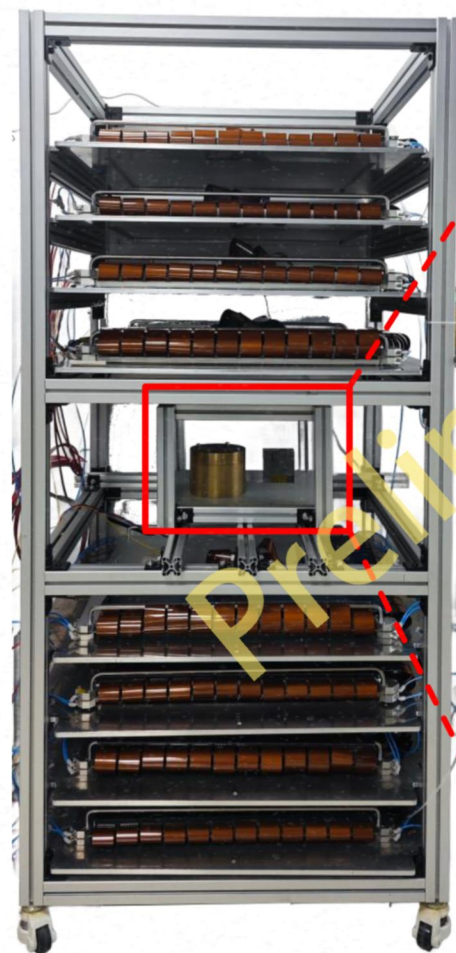
- 利用缪子散射公式和条件概率公式对缪子在物质中的径迹进行估计
- 缪子入射、出射径迹 (方向、位置) $\Rightarrow$ 缪子在待成像空间中概率

$$P(\overrightarrow{P_{in}} \rightarrow \overrightarrow{P_{out}} | \overrightarrow{P_{est}}) = \frac{P(\overrightarrow{P_{in}} \rightarrow \overrightarrow{P_{est}}) \cdot P(\overrightarrow{P_{est}} \rightarrow \overrightarrow{P_{out}} | \overrightarrow{P_{in}} \rightarrow \overrightarrow{P_{est}})}{P(\overrightarrow{P_{in}} \rightarrow \overrightarrow{P_{out}})}$$

两块5mm厚的不锈钢板中夹着的钨块

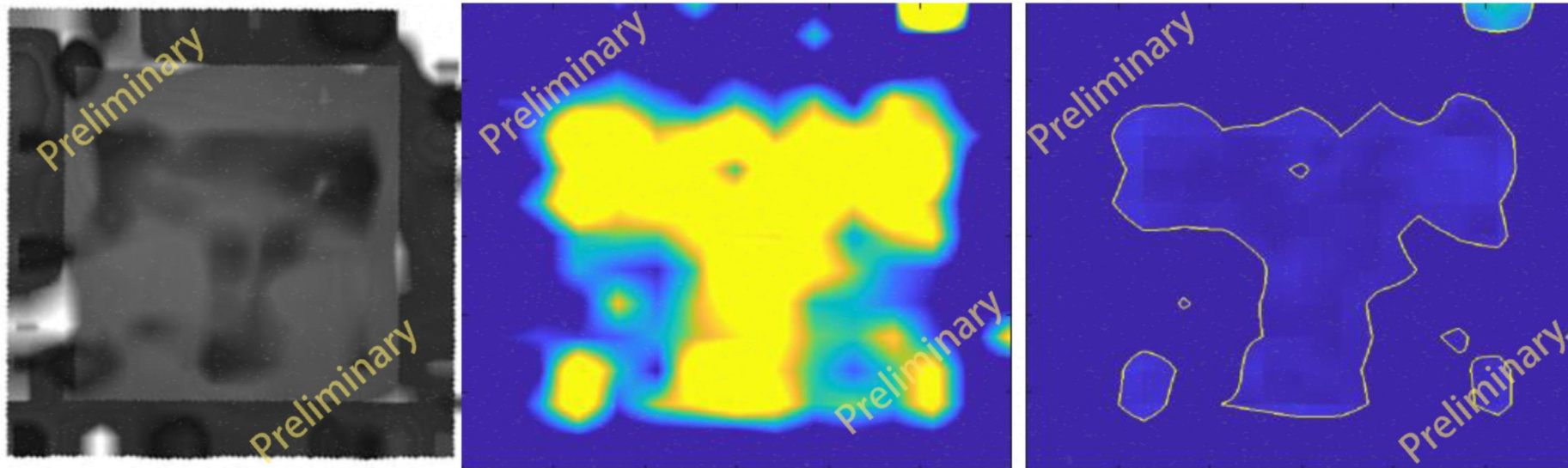
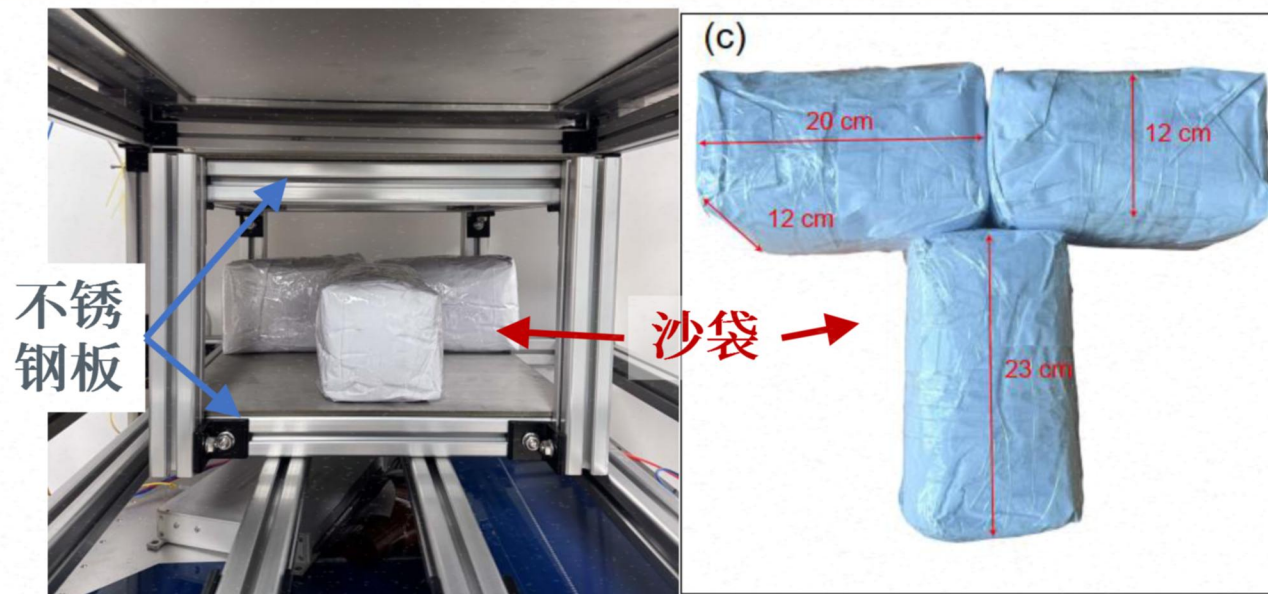


►对不锈钢板屏蔽后的中、高Z物质成像



► 对低Z物质成像

- 干沙放置于两层5mm厚的不锈钢钢板之间
- 密度
 - 干沙: $1.4 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$
 - 不锈钢: $7.7 \sim 8 \text{ g/cm}^3$
 - 铝型材: 2.7 g/cm^3





I. 背景介绍

II. 缪子成像装置研制

III. 性能测试与成像实验

IV. 总结

➤总结

- 宇宙线缪子成像技术在屏蔽材料成像、大尺度结构成像、地质结构探查等方面具有极大的应用潜力
- Micromegas探测器及相应的读出电子学技术为缪子成像提供了高精度的径迹测量方案，提供了更为紧凑的装置结构设计
- 在宇宙线缪子应用中，Micromegas所需大量读出通道的挑战可由编码复用或者高集成度读出芯片来解决，并保持较高的效率和位置分辨
- 通过实验室测试和复杂环境实验，验证了装置的长期运行稳定和复杂环境的适应性
- 散射成像方面，开发了一种缪子径迹估计算法，提升屏蔽条件下的成像质量

➤展望

- 结构更紧凑的缪子成像径迹探测装置研制
- 针对更多场景开展观测实验、数据分析和成像结果重建工作

谢谢