



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

基于Micromegas的 高分辨缪子成像系统研究

王宇，刘树彬，张志永，封常青，沈仲弢，刘建国，刘昱林

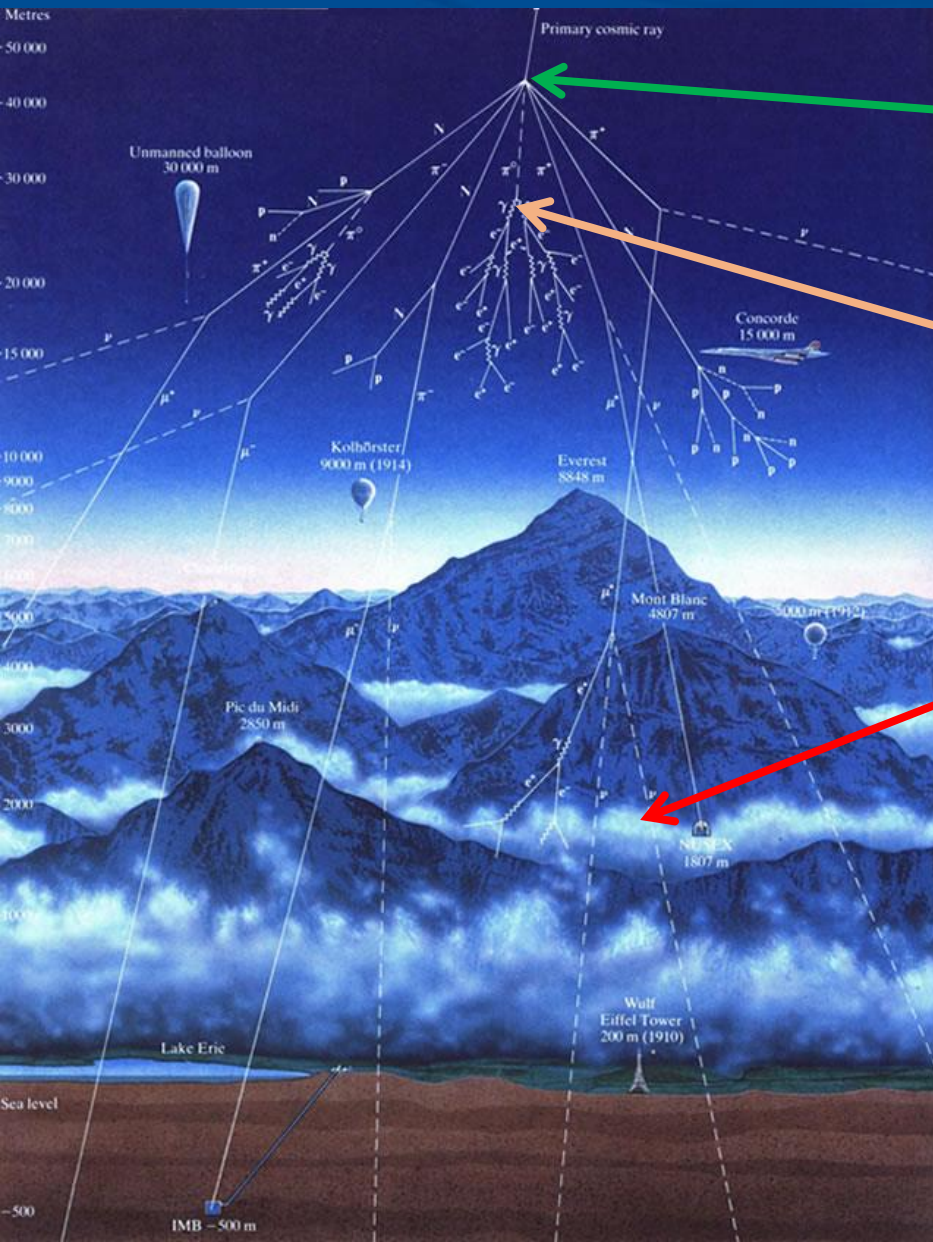
时间： 2021-10-22

中国科大缪子成像研究团队

第十届全国先进气体探测器研讨会 · 西安

- I. 研究背景
- II. 高分辨Micromegas探测器
- III. 可扩展读出电子学研究
- IV. 缪子成像样机
- V. 总结

宇宙线缪子的产生

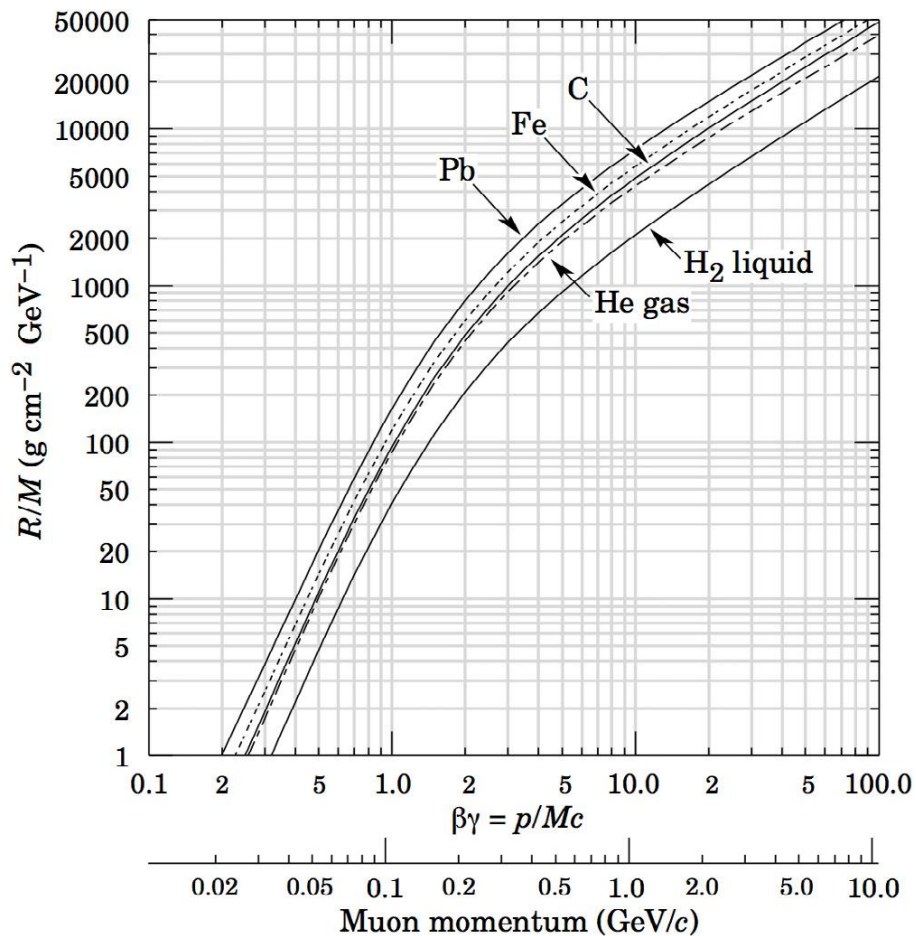


原初宇宙射线
99%是质子和氦核

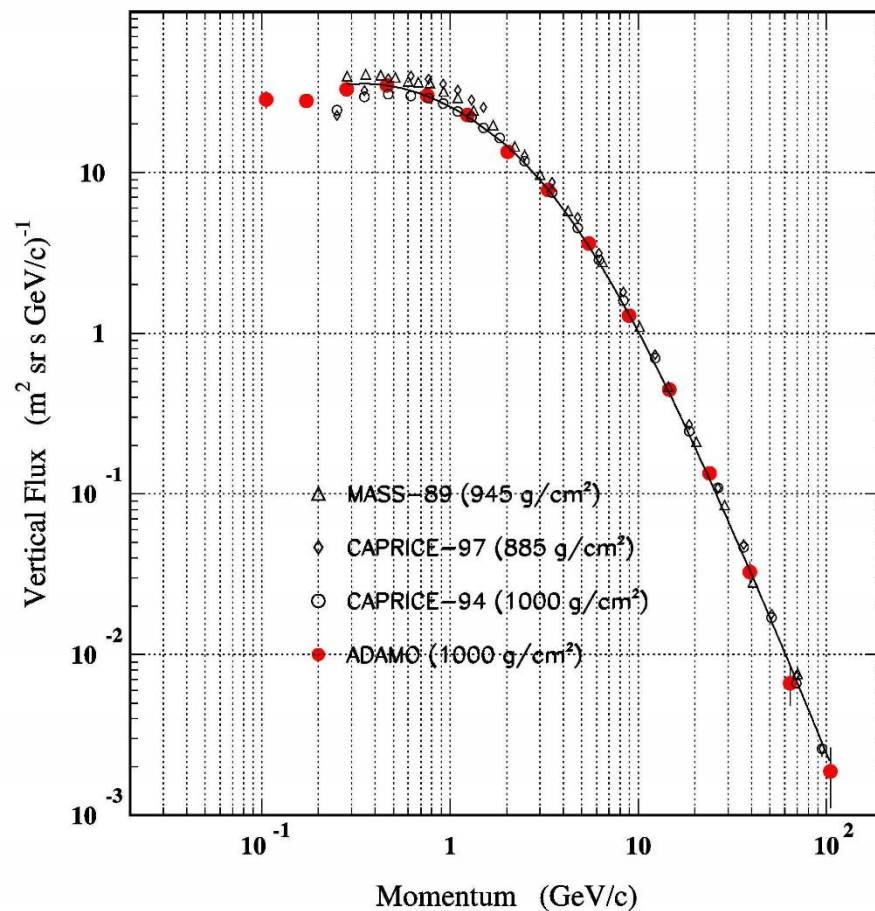
大气簇射
产生各种次级粒子

能够到地面的
绝大部分是缪子

宇宙线缪子的性质

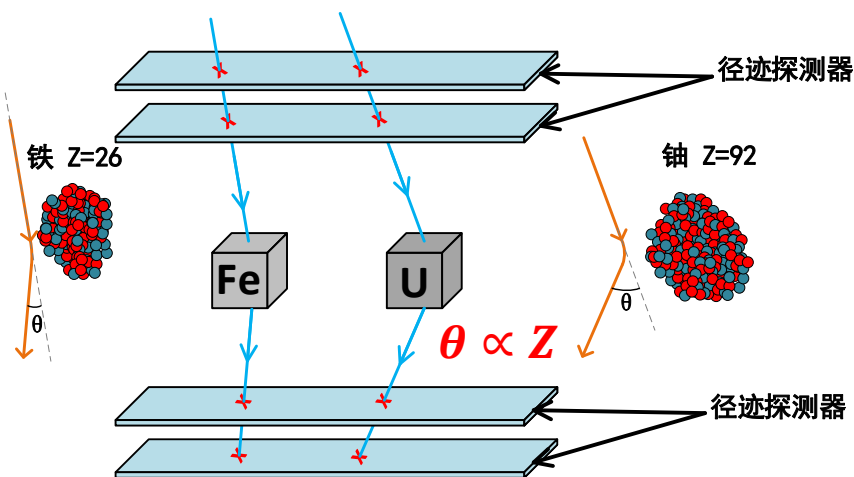


- 强穿透力
 - 穿透常见核屏蔽材料
 - 穿透数公里厚的岩石

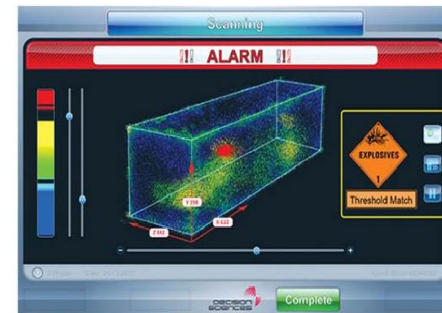


- 平均能量: $3\text{GeV} \sim 4\text{GeV}$
- 通量: $1 \text{ muon} (\text{cm}^{-2} \cdot \text{minute}^{-1})$

散射成像原理及其应用

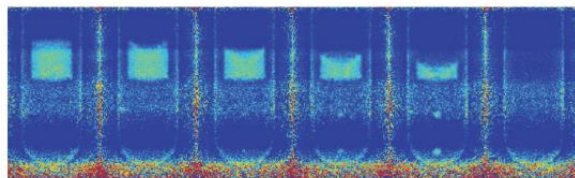
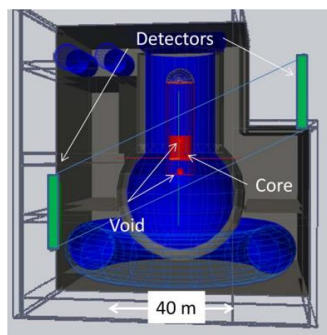


(a)



(b)

DSC公司的缪子成像检测装置



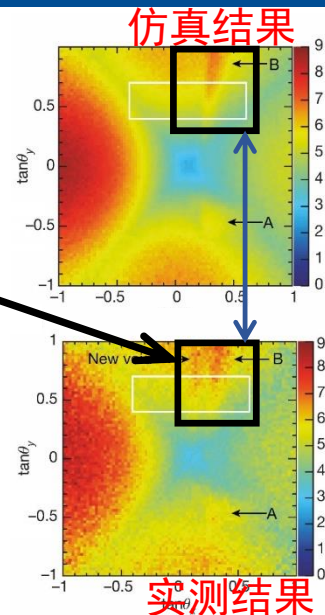
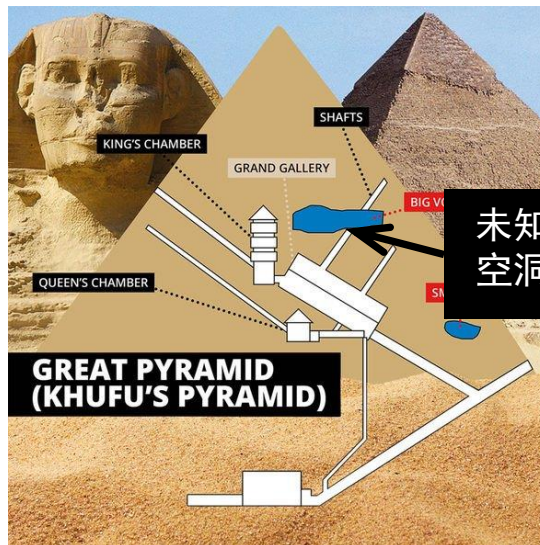
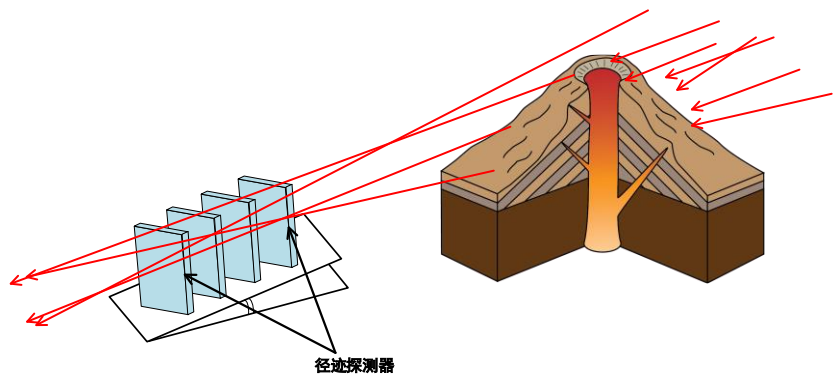
美国Los Alamos国家实验室：
福岛反应堆堆芯成像模拟，
验证了堆芯监测的可行性
(2012, PRL)



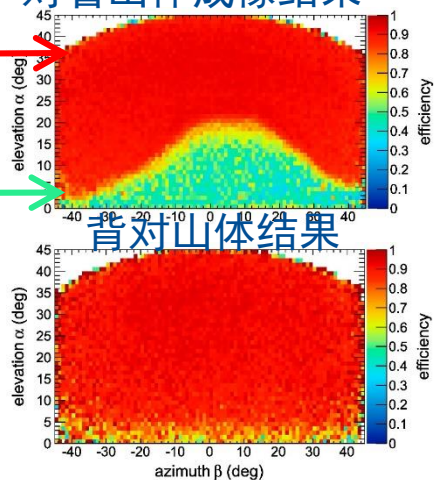
福岛第一核电站的缪子
成像检测装置

核安全检测，海关检测，核武器监测等

透射成像原理及其应用



对着山体成像结果

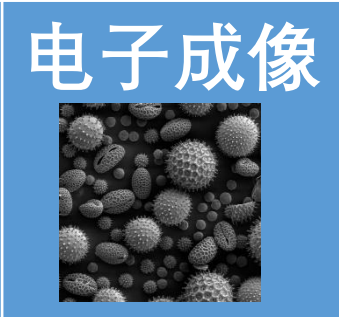
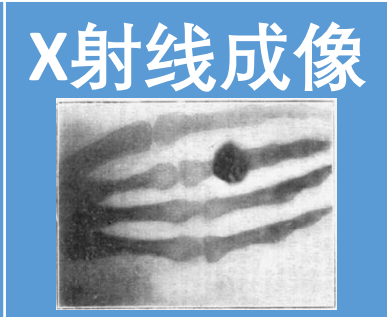
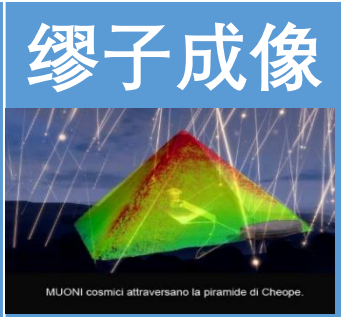


地质检测，历史遗址检测等

缪子成像与其他应用的对比



| 特点 | 缪子成像 | 中子成像 | X射线成像 | 电子成像 |
|---------|------|------|-------|------|
| 高穿透能力 | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| 无电离辐射危害 | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| 无放射源需求 | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| 三维定位 | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| 快速测量 | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |

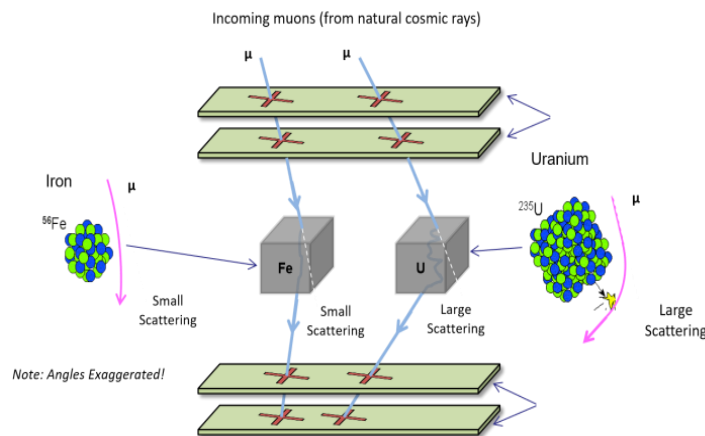


材料区分

区分铅和铀，需要达到 mrad 量级角分辨

→ 1mm 分辨，需要1米以上间距

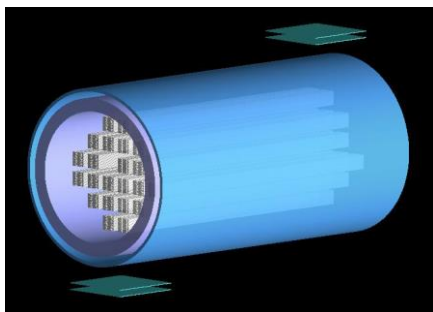
→ 0.1mm分辨，10cm以上间距



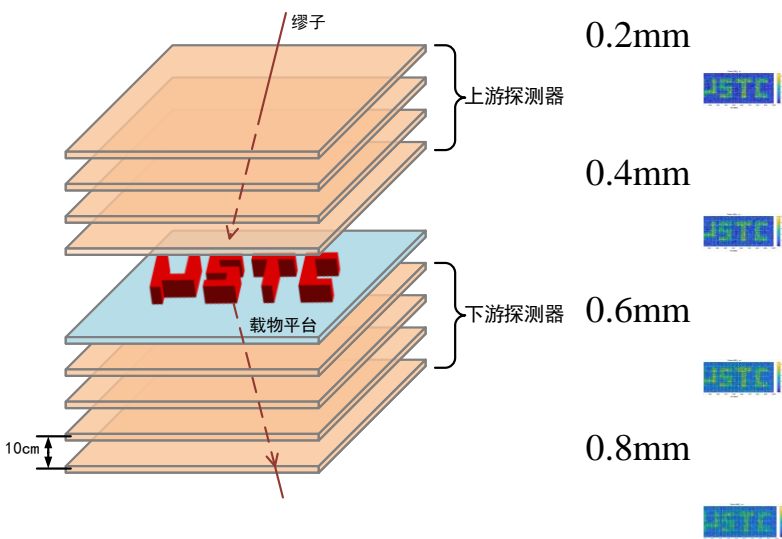
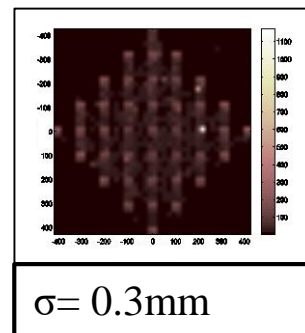
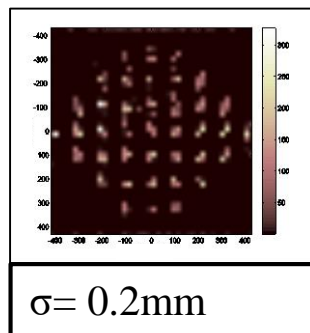
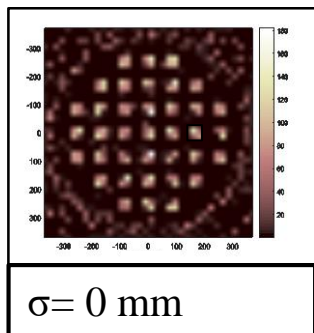
| 材料类型 | 平均原子序数 | 多次散射的 X_0 | | 不同动量下的缪子散射角 (mrad) | | |
|---------------------|--------|------------------------|-------|--------------------|-------------|-------------|
| | | g/cm^2 | cm | 0.5GeV/c | 3GeV/c | 20GeV/c |
| 空气(Air) | 7.3 | 36.7 | 28000 | 0.29 | 0.05 | 0.01 |
| 水(H ₂ O) | 7.5 | 36.1 | 36.1 | 8.01 | 1.31 | 0.20 |
| 水泥(Crt) | 11.1 | 24.6 | 10.7 | 14.7 | 2.40 | 0.36 |
| 铝(Al) | 13 | 24.0 | 8.9 | 16.1 | 2.63 | 0.39 |
| 铁(Fe) | 26 | 13.8 | 1.75 | 36.4 | 5.94 | 0.89 |
| 铅(Pb) | 82 | 6.40 | 0.56 | 64.3 | 10.5 | 1.57 |
| 铀(U) | 92 | 6.10 | 0.32 | 85.0 | 13.9 | 2.08 |

不同动量的缪子通过不同材料的散射角分布（材料厚度为3cm）

三维图像重建



核燃料干式贮存桶



对探测器的基本要求：

- 平米量级制作；
- 百微米量级位置分辨；
- 探测效率高；
- 性能稳定性；
- 低成本，便于维护；

微结构气体探测器
是优良选项！

➤ 方案

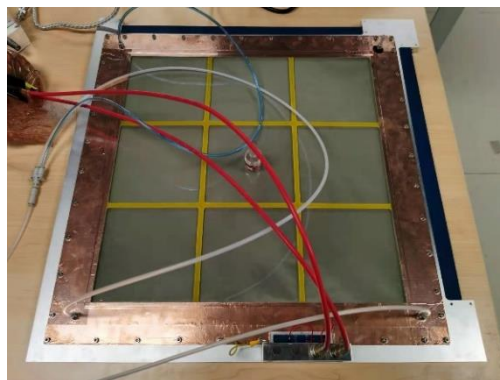
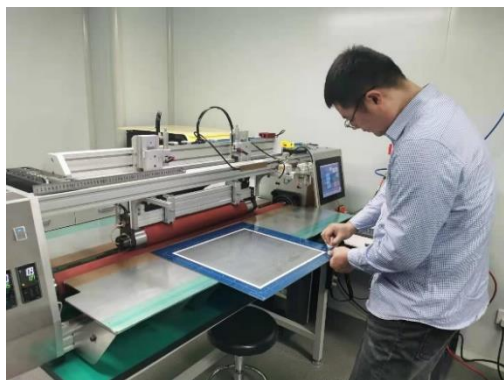
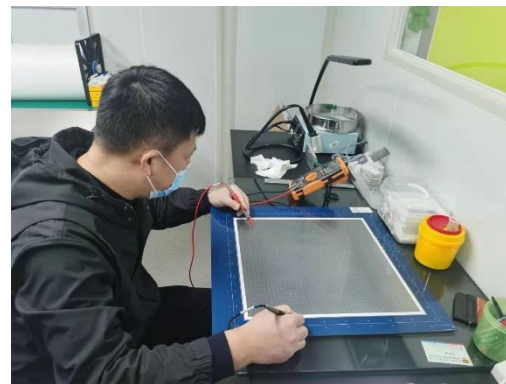
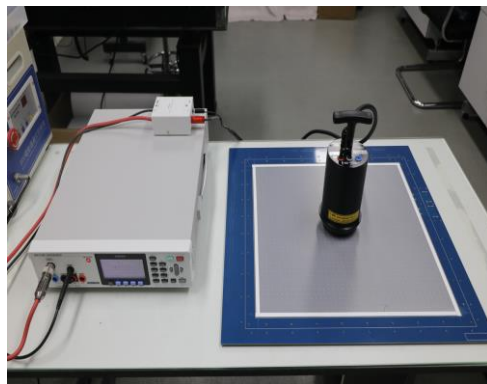
- Micromegas探测器
 - 高位置分辨：百微米量级
 - 易大面积制作
- 低噪声、高集成度读出电子学系统
 - 精确测量宇宙线信号
 - 实现大量探测器通道读出

➤ 研究目标

- 多用途缪子成像装置
- μ STC (μ Scattering and Transmission imaging faCility)
- 散射成像：特殊核材料成像与检测
- 透射成像：山体和古代遗迹成像

- I. 研究背景
- II. 高分辨Micromegas探测器
- III. 可扩展读出电子学研究
- IV. 缪子成像样机
- V. 总结

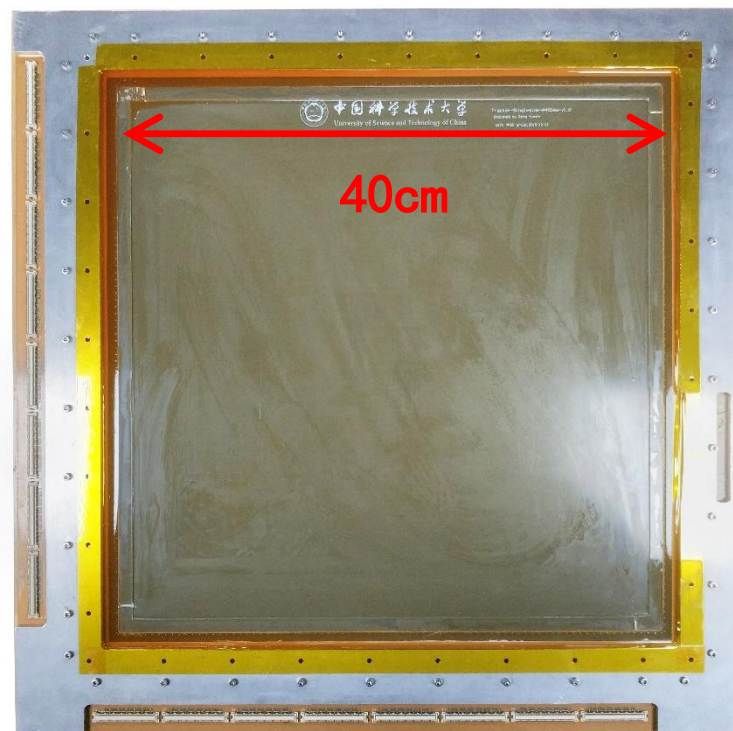
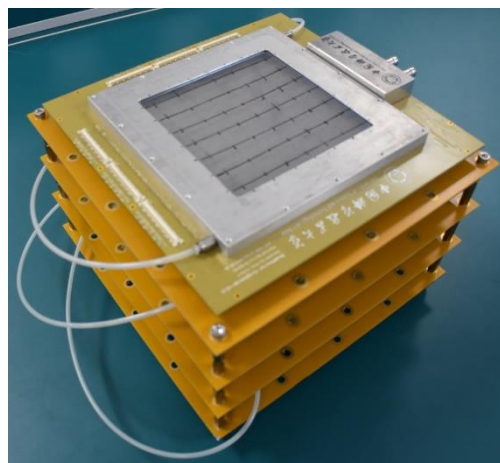
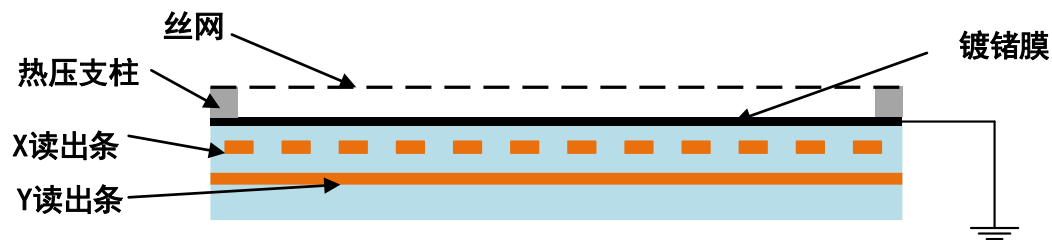
► 采用原创热压接方法：



- 自主研发整套设备
- 固化热压接工艺流程
- 具备 m^2 量级探测器制作能力

➤ 结构

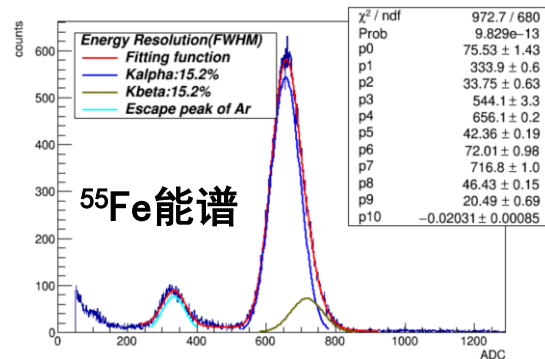
- 不锈钢微网
- 热熔胶膜支撑
- 内层二维感应读出
- 条间距 $400\mu\text{m}$



5. 9keV X-ray 测试

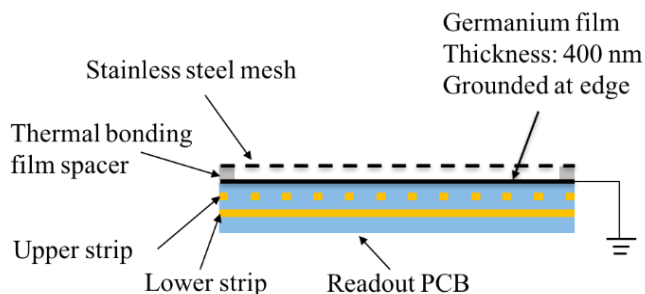
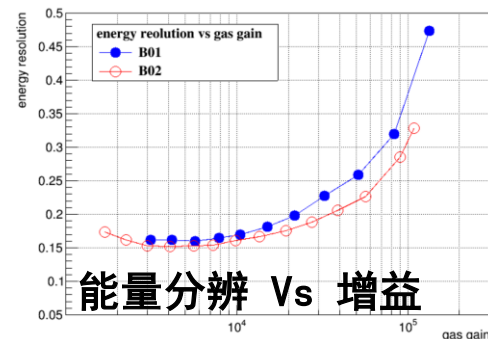
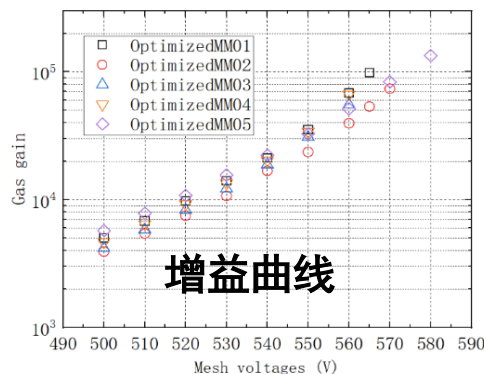
- 高增益: $\sim 10^5$ (Ar+CO₂)
- 能量分辨: $\sim 15\%$ (FWHM)
- 增益非均匀性: 6.3% @ gain =5000

同等测试条件下,
国际最优指标!

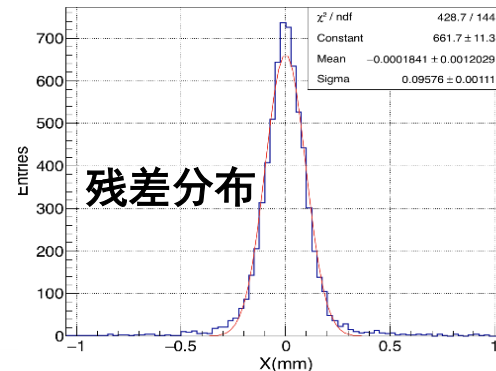
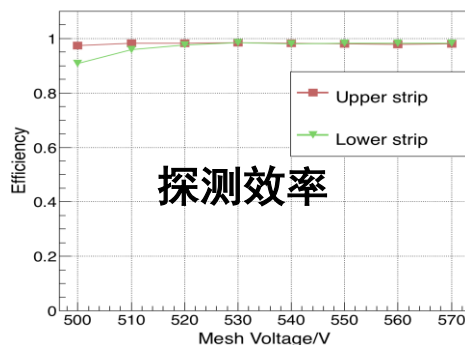


电子束流测试 (5GeV)

- 探测效率: >98%
- 位置分辨: 75 μm



两维定位方法



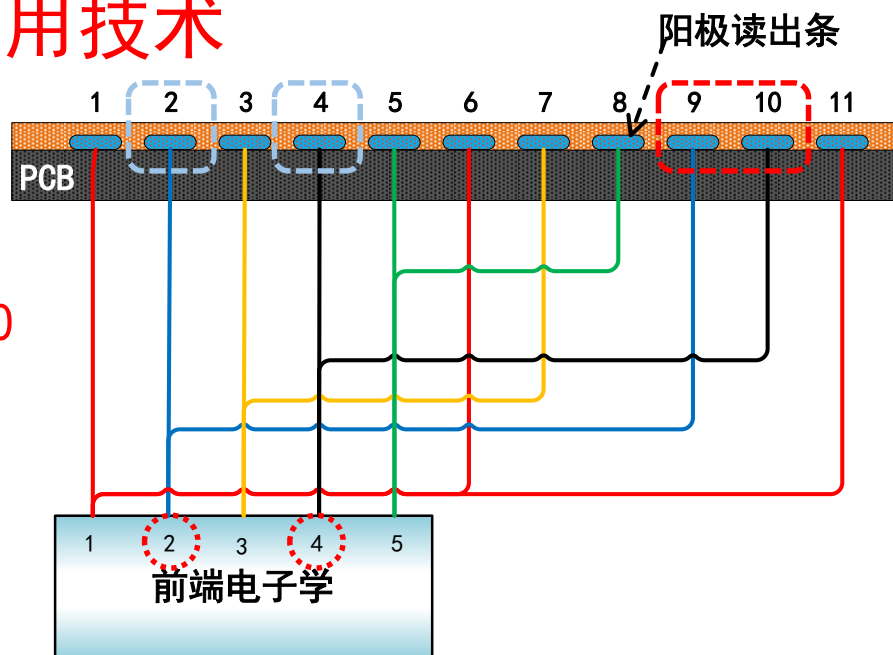
- I. 研究背景
- II. 高分辨Micromegas探测器
- III. 可扩展读出电子学研究
- IV. 缪子成像样机
- V. 总结

- 高位置分辨所面临挑战
 - 海量读出通道数
 - 系统复杂度、功耗、成本增加
- 宇宙线缪子事例特点
 - 事例率低、击中位置稀疏

➤ 解决方案：读出通道复用技术

如：

电子学有信号通道为2, 4时
可能的探测器击中为2, 4, 9, 10
由连续性可得击中通道为9, 10



- 电子学通道数 $2k+1$, 可解码 $C_{2k+1}^2 + 1$ 个阳极条
- 升序交插编码, 构成欧拉回路

| 行 | 编码表 |
|---|---|
| 1 | $1_1, 2_2, 3_3$ |
| 2 | $1_4, 4_5, 2_6, 5_7, 3_8, 4_9, 5_{10}$ |
| 3 | $1_{11}, 6_{12}, 2_{13}, 7_{14}, 3_{15}, 6_{16}, 4_{17}, 7_{18}, 5_{19}, 6_{20}, 7_{21}$ |
| . | |
| K | $1_{C_{2k-1}^2+1}, (2k)_{C_{2k-1}^2+2}, 2_{C_{2k-1}^2+3}, (2k+1)_{C_{2k-1}^2+4}, 3_{C_{2k-1}^2+5}, (2k)_{C_{2k-1}^2+6}, \dots, (2k-1)_{C_{2k-1}^2-2}, (2k)_{C_{2k-1}^2-1}, (2k+1)_{C_{2k-1}^2}$ |
| | $1_{C_{2k+1}^2+1}$ |

- 升序增加, 重复率低, 可继承, 可扩展
- 根据多条击中情况, 可去除前几行编码

➤ 哈密顿回路编码方案

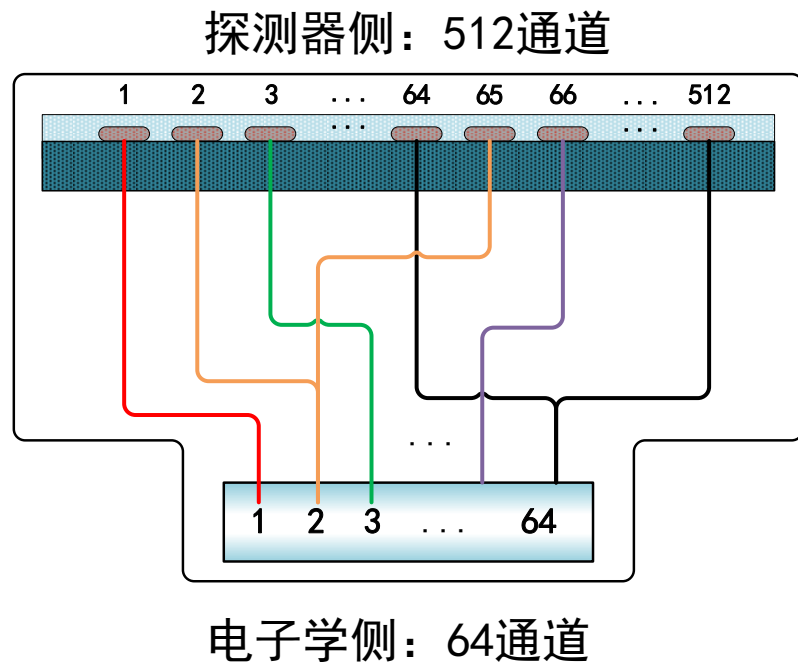
- n电子学通道
 - 最小复用间隔为n-4
- 在任意n-5通道范围内，电子学和探测器通道一一对应
- 最大读出探测器通道数
 - n为奇数： $C_n^2 + 1$ 如：63路电子学最大可读出1954路探测器
 - n为偶数： $C_n^2 - \frac{n-2}{2} + 1$ 64路电子学最大可读出1986路探测器

➤ 方案优势

- 复用间隔最大
- 通道均匀利用
- 任意子回路具有相同性质
- 不损失探测器信息

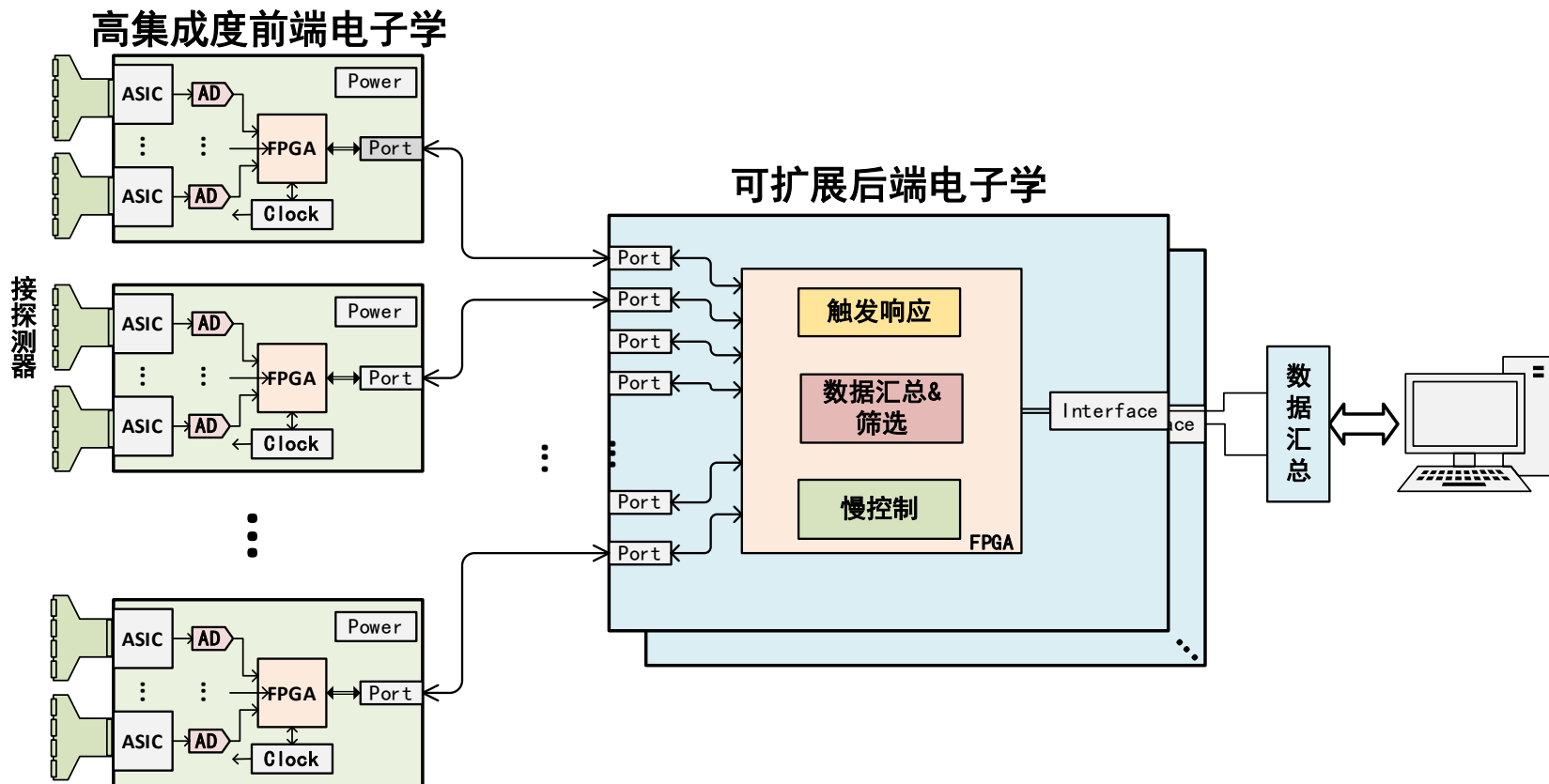
➤ 哈密顿回路编码方案

- 512路编码为64电子学通道
- 任意59个连续探测器通道内
 - 电子学与探测器通道一一对应
 - 与直接读出方案等效



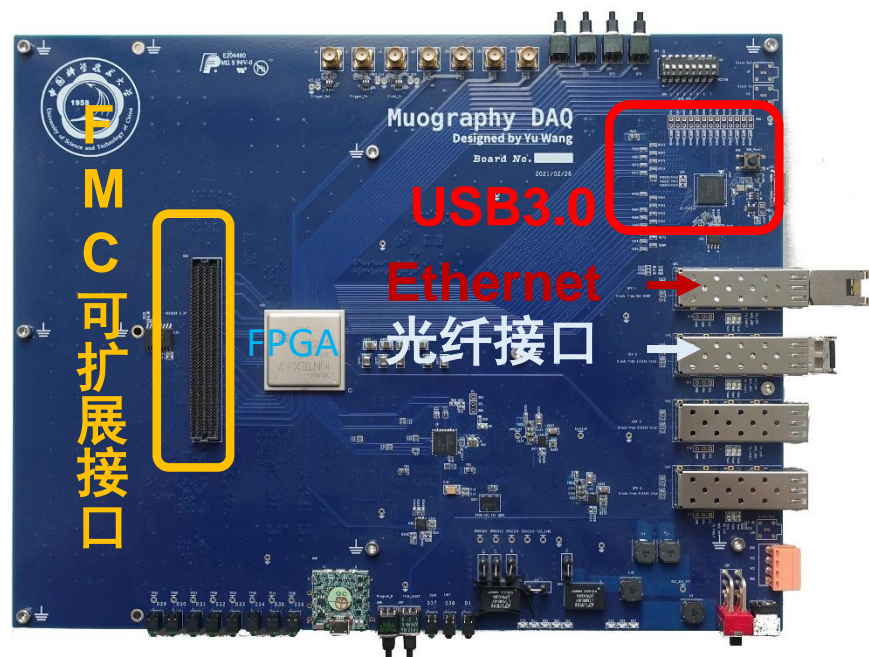
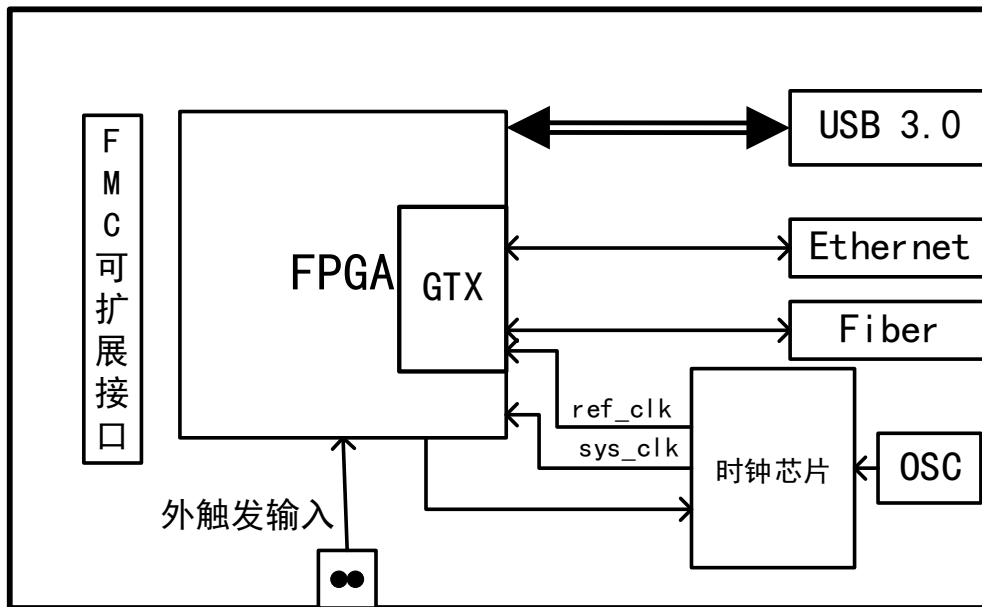
通用可扩展的系统架构

- 高集成度前电子学+可扩展后端电子学
- 适应不同体量的成像系统



➤ 子主板设计

- 前端接口放置于子板，可扩展至不同类型前端
- 多种数据传输接口，适应不同成像场合



前端电子学板

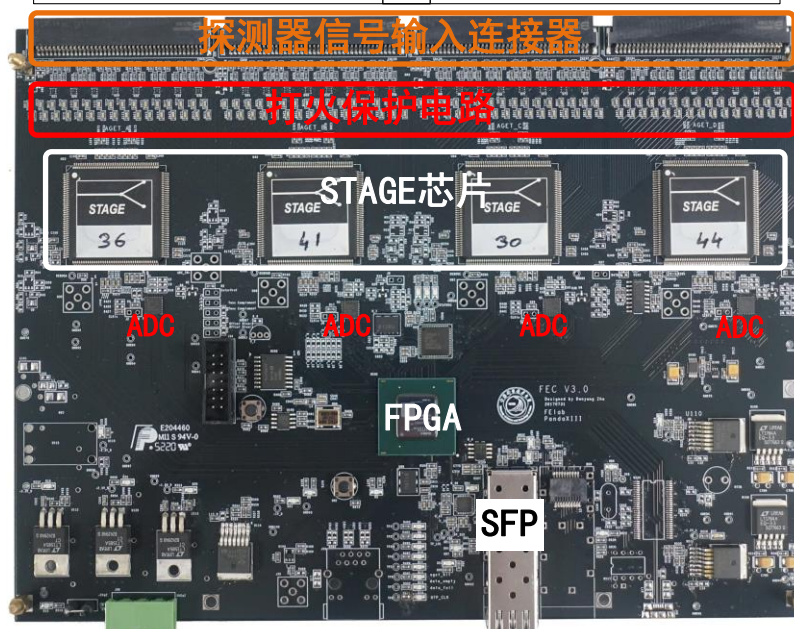
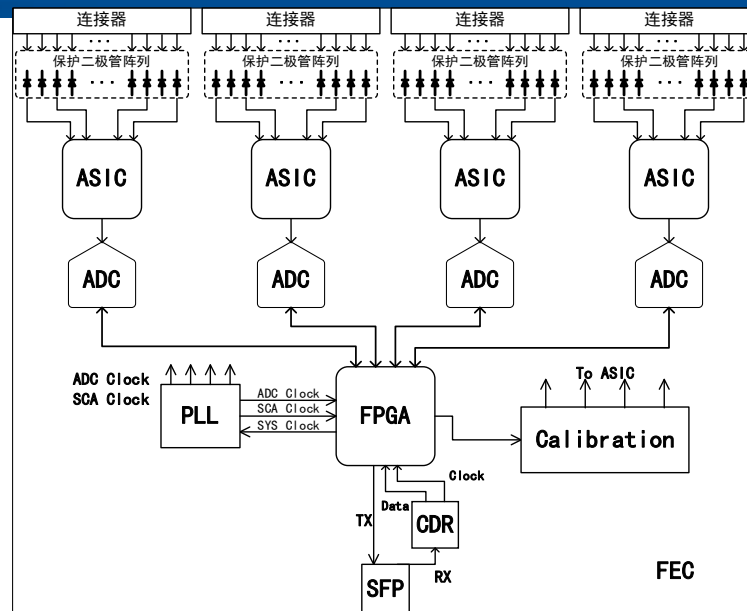


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

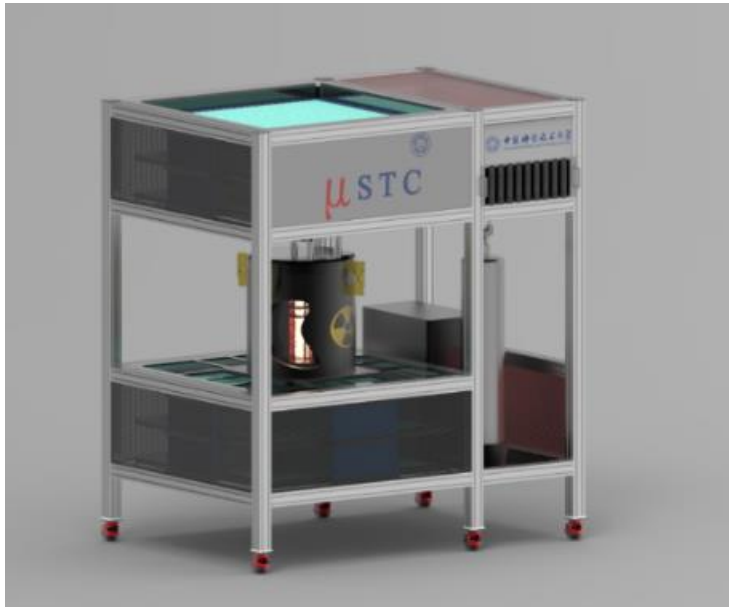
➤ 参数

- 动态范围：0~120fC
- 噪声：小于0.2fC

➤ 单板256路读出通道



- I. 研究背景
- II. 高分辨Micromegas探测器
- III. 可扩展读出电子学研究
- IV. 缪子成像样机
- V. 总结



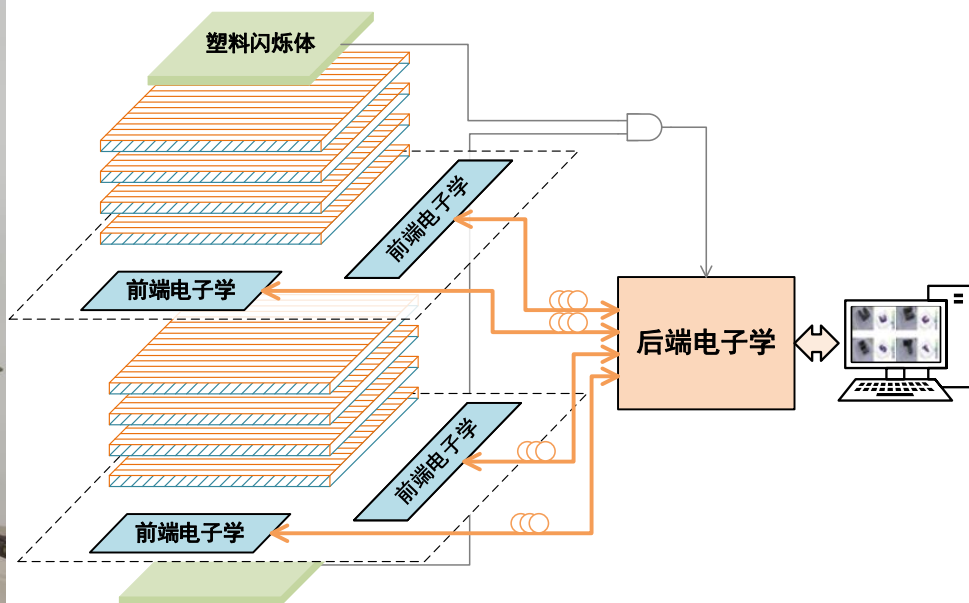
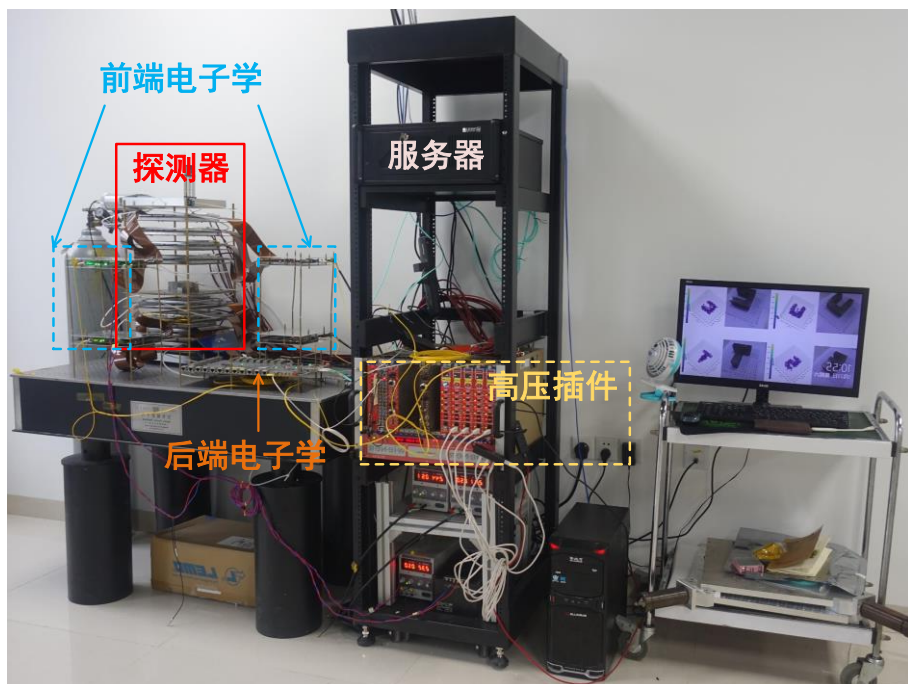
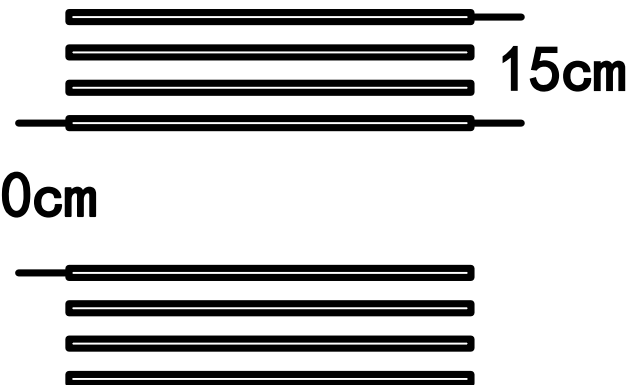
μ STC: μ (muon) Scattering tomography &
Transmission imaging faCility

第一代样机： 散射成像

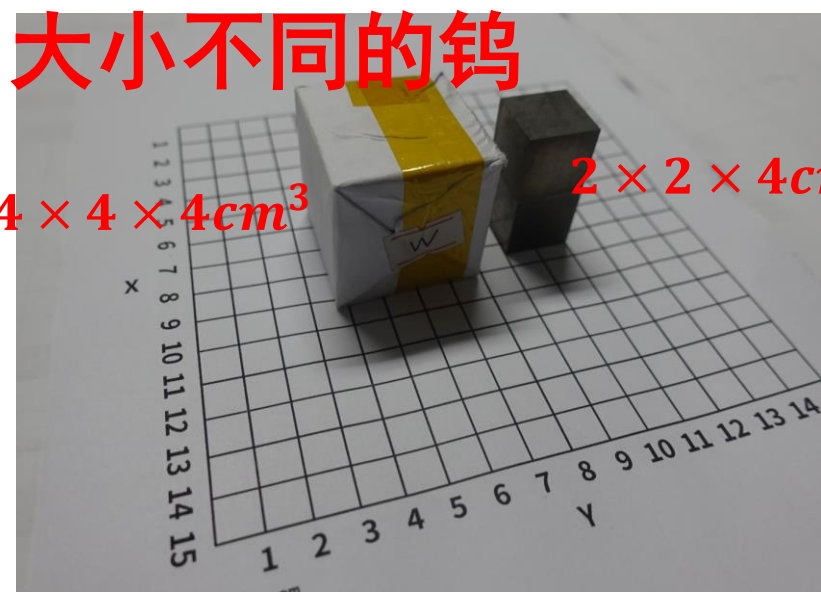


➤ 散射成像实验样机

- 尺寸：15cm × 15cm × 50cm
- 层数：8层
- 共6144路，编码后1024路读出通道



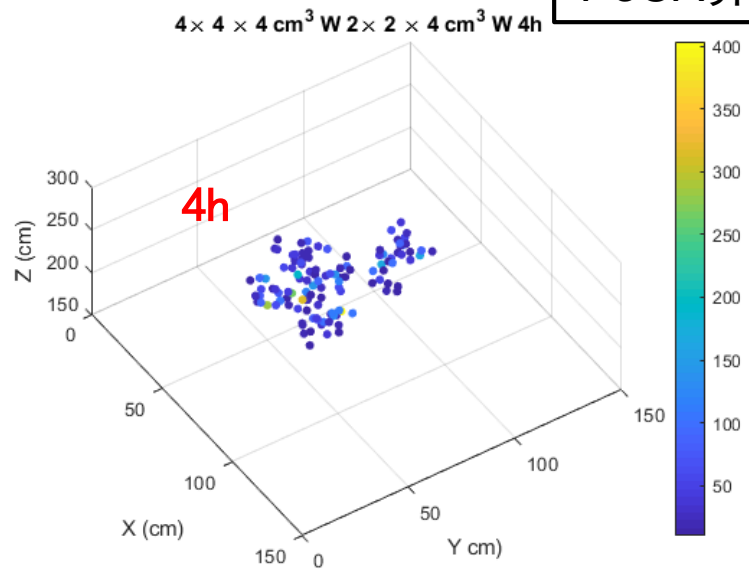
编码方案1测试结果



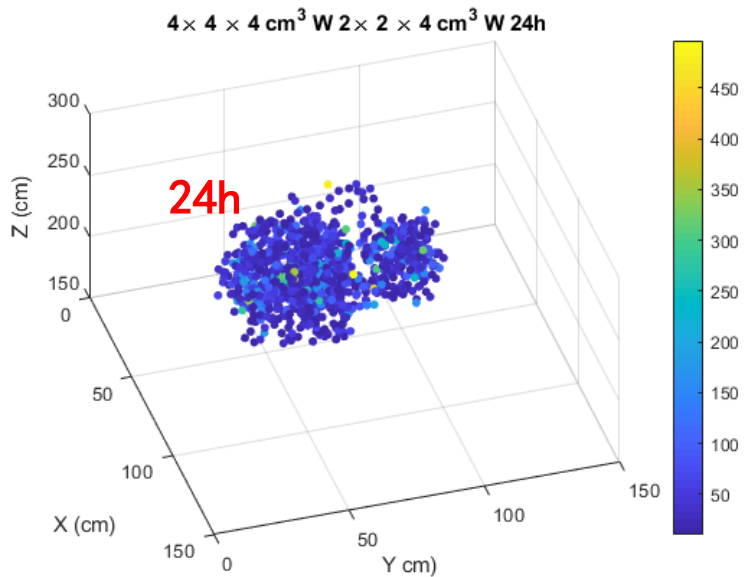
$4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$

$2 \times 2 \times 4 \text{ cm}^3$

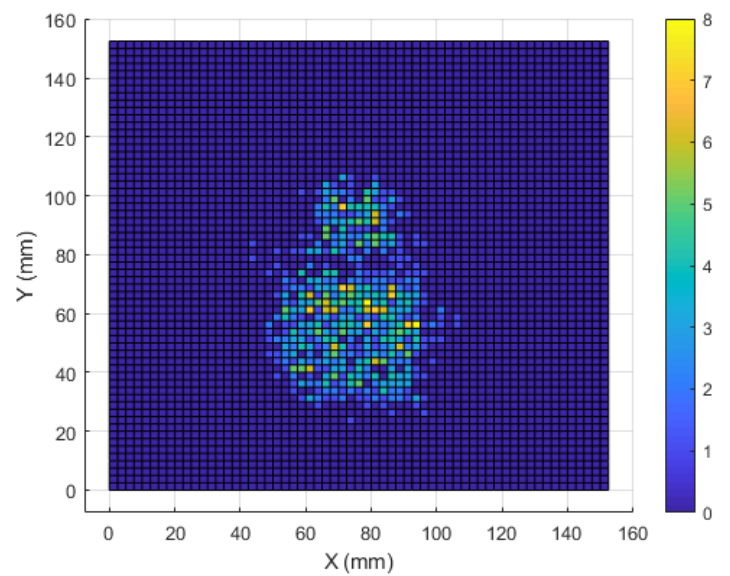
PoCA算法



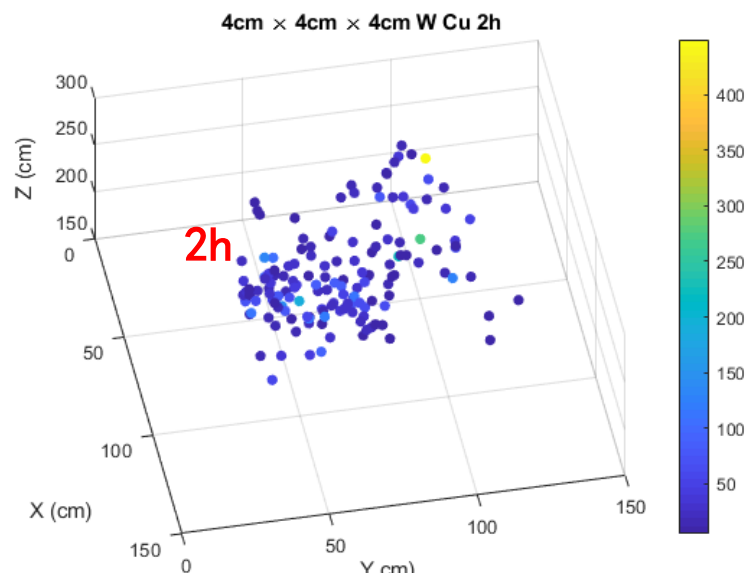
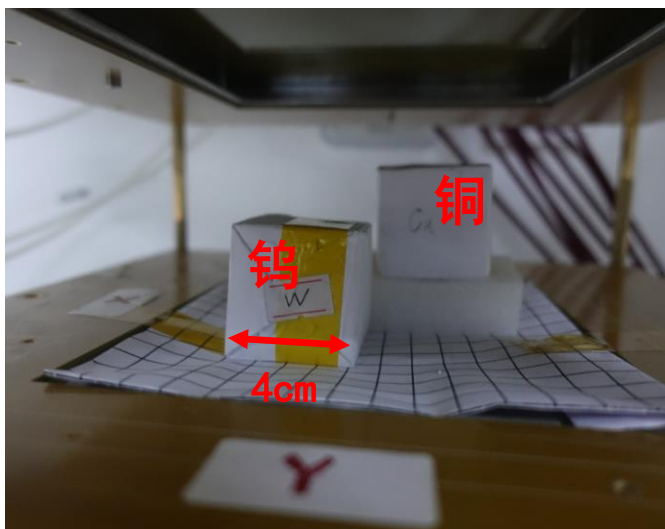
4h



24h

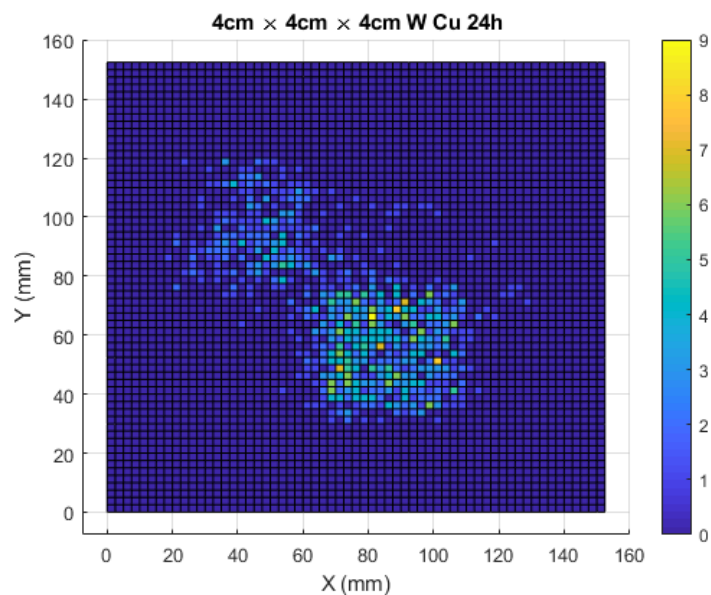
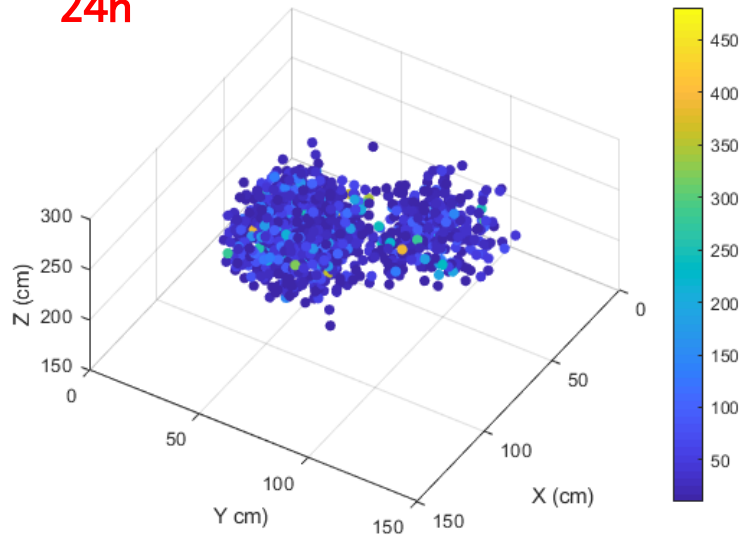


编码方案1测试结果

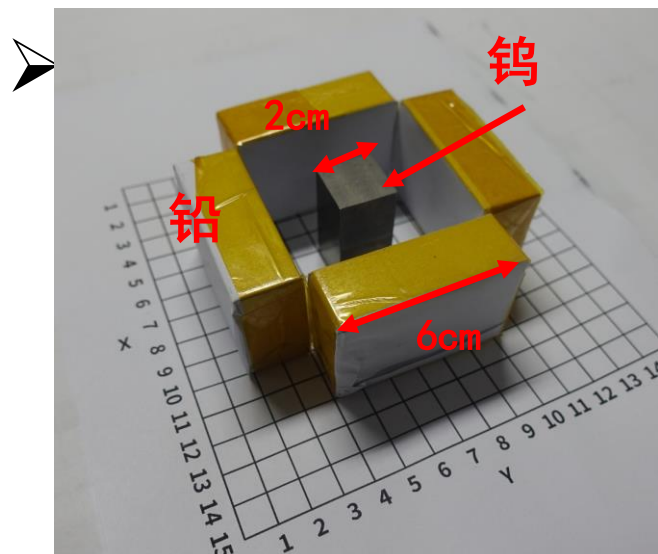


24h

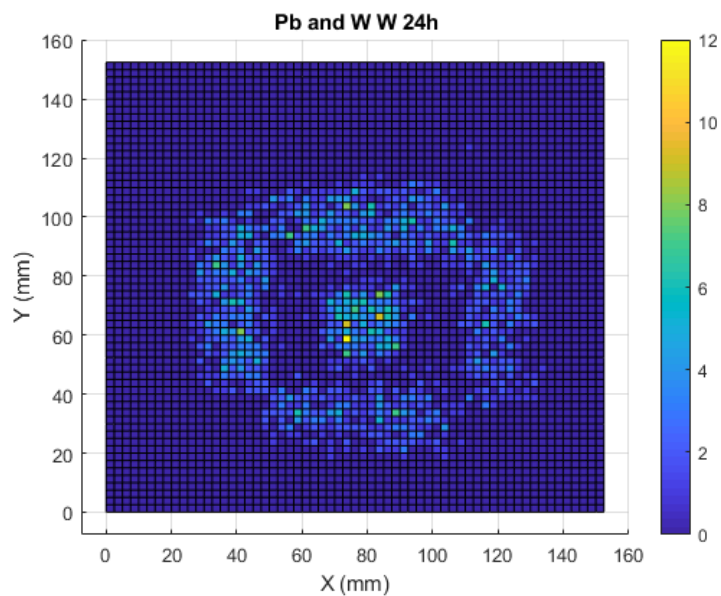
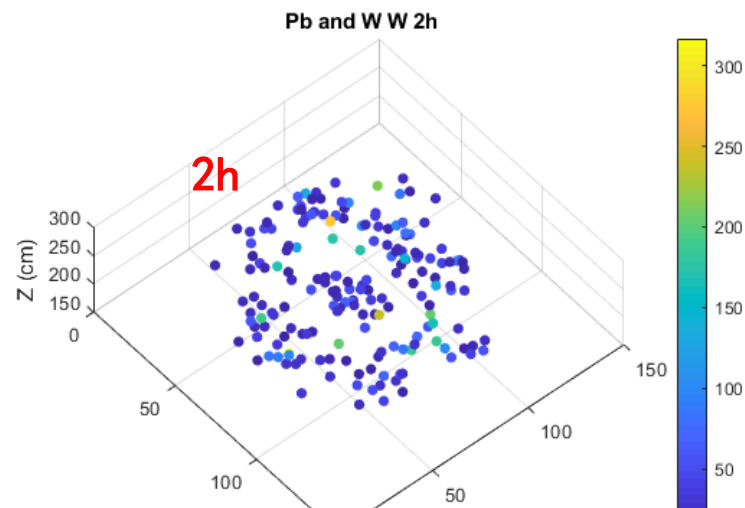
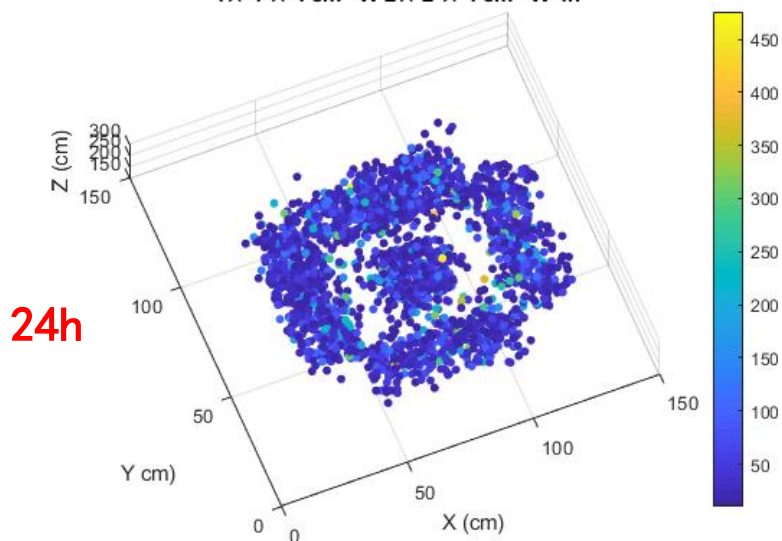
4cm × 4cm × 4cm W Cu 24h



编码方案1测试结果



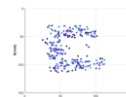
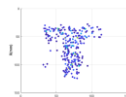
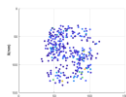
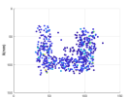
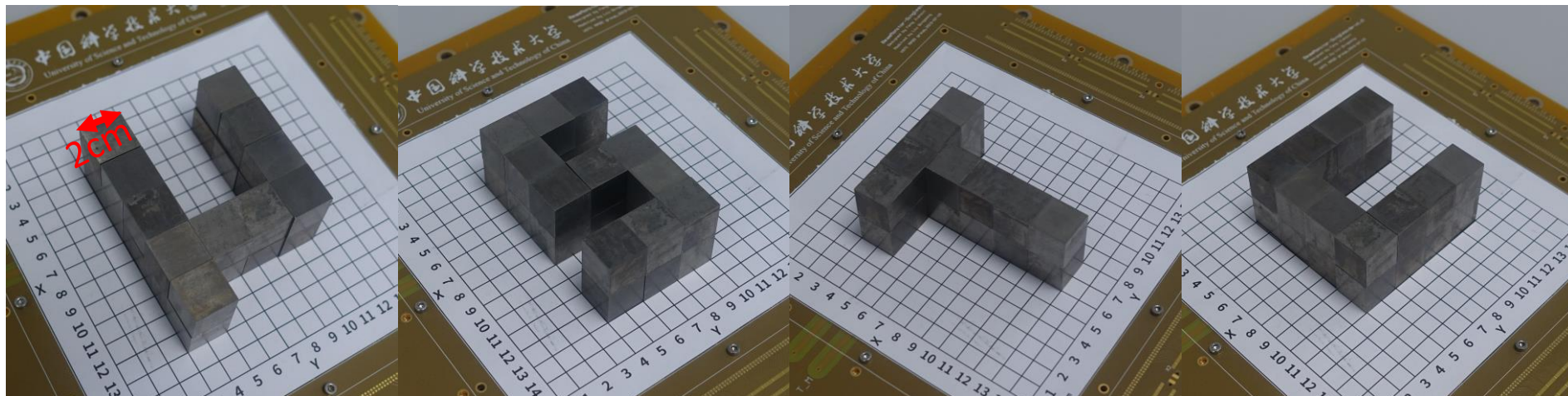
$4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3 \text{ W } 2 \times 2 \times 4 \text{ cm}^3 \text{ W } 4 \text{ h}$



编码方案2测试结果



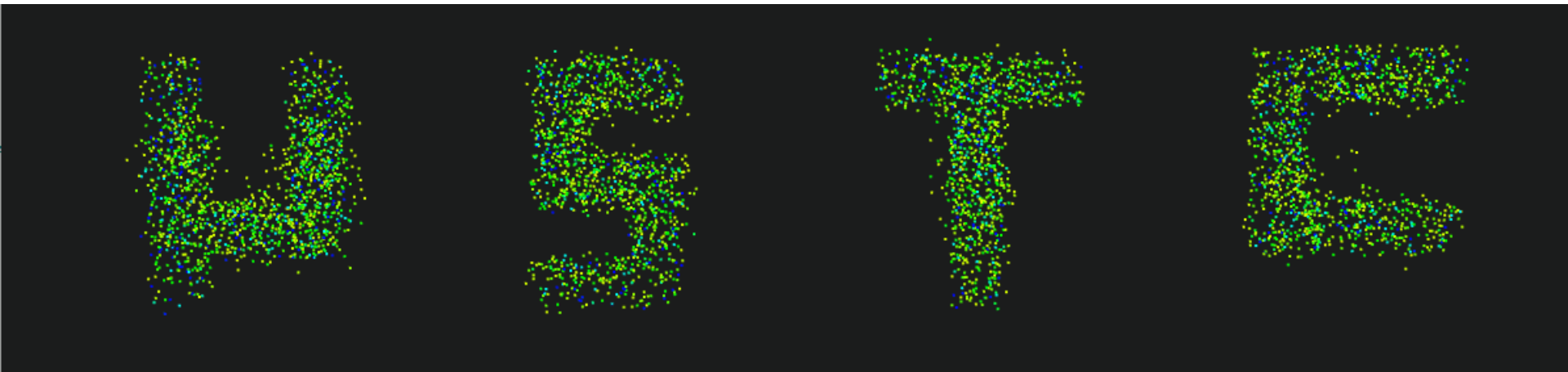
- 样品：钨，尺寸2cm，厚度4cm
- 测试时间：4小时



编码方案2测试结果



➤24小时

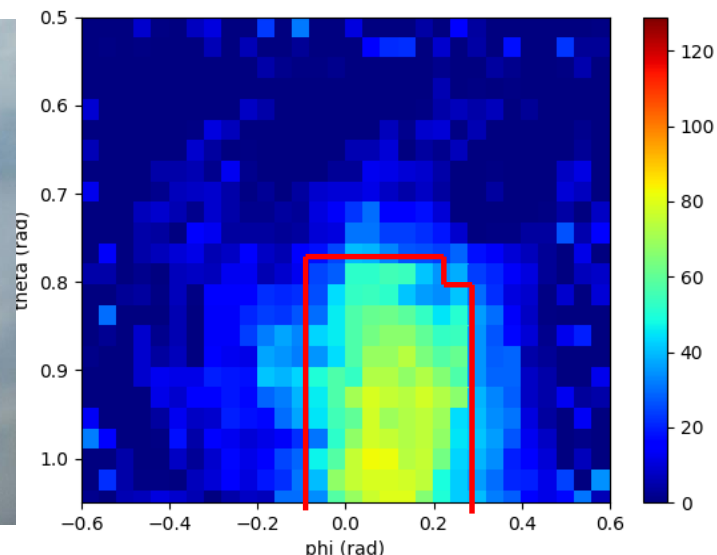
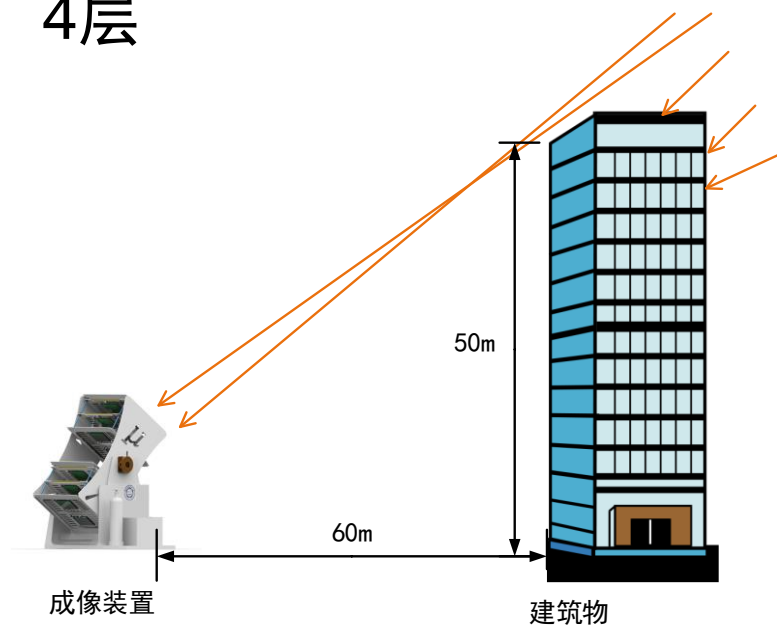


第一代样机：透射成像



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

面积：15cm × 15cm，层数：4层



第二代样机 (400mm→600mm)



设计调整



实际装配:



- I. 研究背景
- II. 高分辨Micromegas探测器
- III. 可扩展读出电子学研究
- IV. 缪子成像样机
- V. 总结

➤ 结论

- 缪子成像研究已经被广泛开展，应用领域非常丰富，基于大面积高分辨的气体探测器具有其独特优势
- 完成了缪子散射与透射成像样机建造和实验室验证
- 搭建了散射成像和透射成像两套装置

➤ 下一步计划

- 大面积缪子成像装置研究
- 第二代样机搭建和实验开展



谢谢

感谢向本研究提供资助和支持的国家自然科学基金杰出青年科学基金项目
《核电子学方法研究及应用 (No. 12025504) 》