

# 高分辨宇宙线缪子成像系统 及读出电子学研究

报告人：王宇

On behalf of  $\mu$ STC group



中国科学技术大学  
核探测与核电子学国家重点实验室

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会 湖北·恩施 2023年8月10日

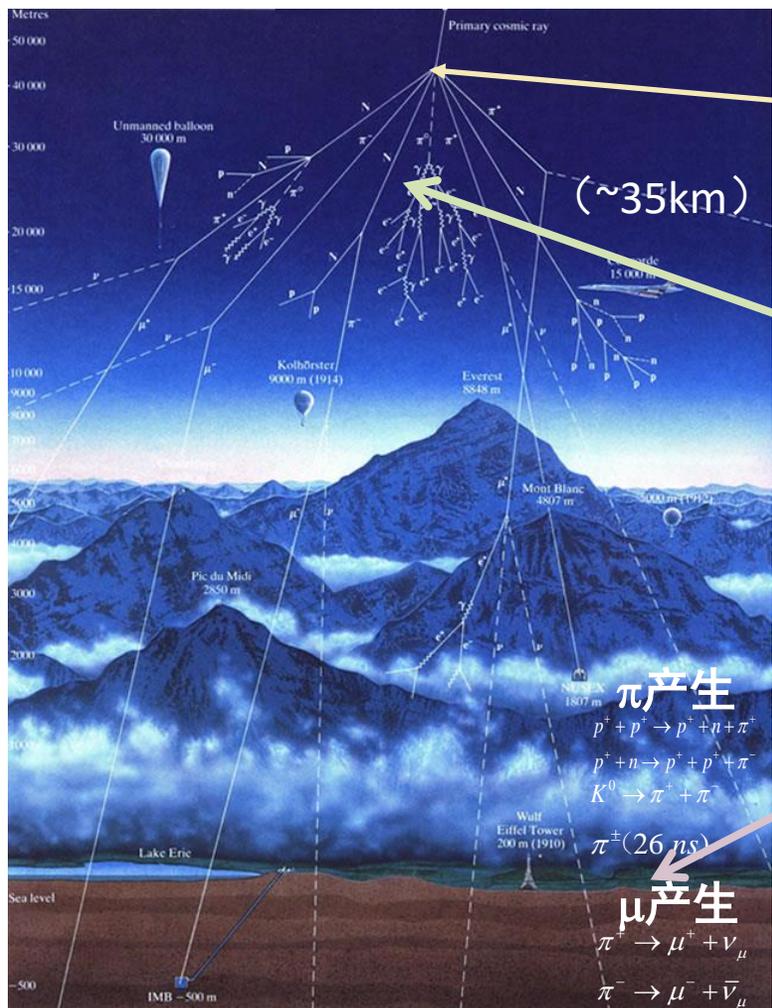
# 目录

- › 研究背景
- › 缪子成像装置
- › 低噪声、高集成度读出电子学
- › 成像实验
- › 总结

# 研究背景

## 宇生缪子

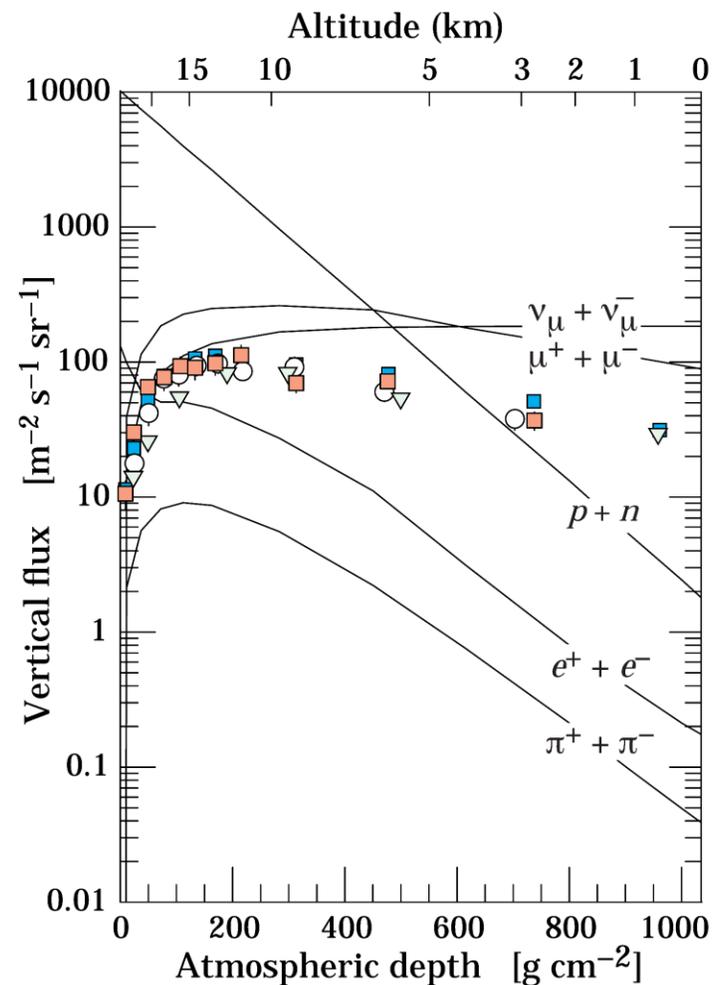
– 平均能量约3~4GeV, 强度约 $10^4 \text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$



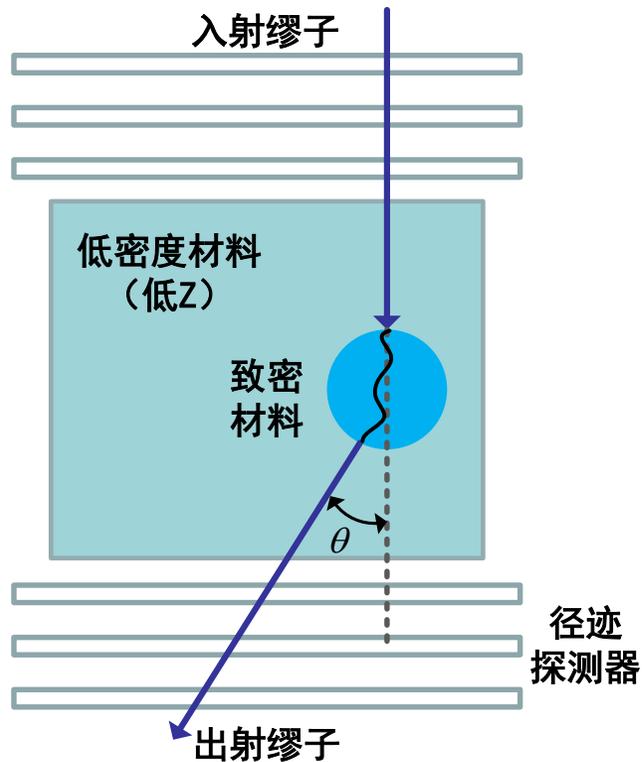
原初宇宙线：  
99%是质子和氦核

大气簇射  
产生各种次级粒子

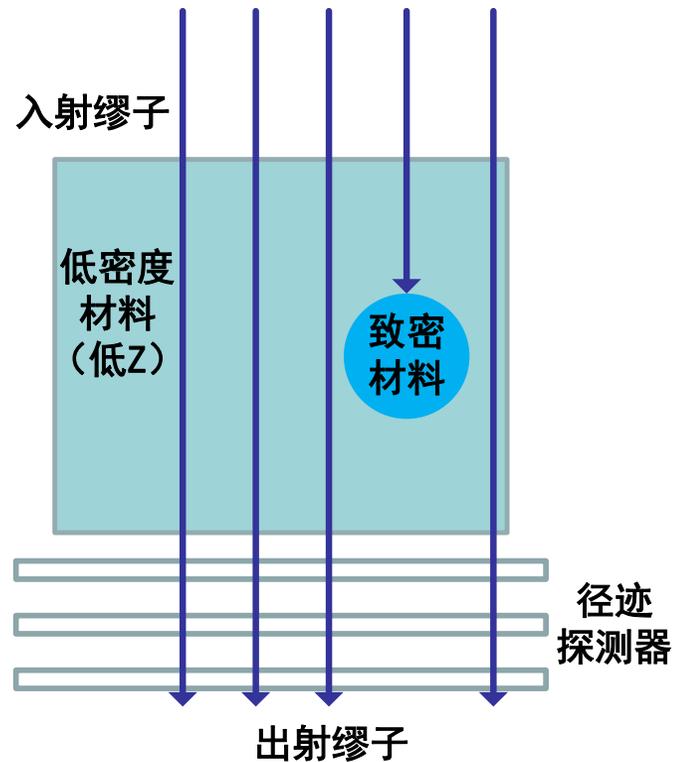
能够到地面的  
绝大部分是缪子



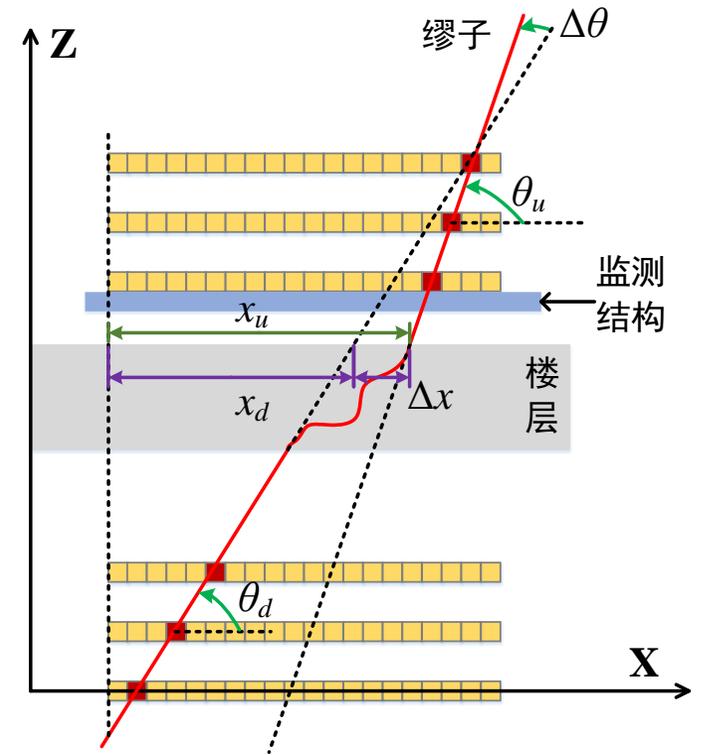
# 缪子成像分类及原理



散射成像  
Muon Tomography



透射成像  
Muon Radiography



缪子计量学  
Muon Metrology

# 繆子成像装置设计

›  $\mu$ STC :  $\mu$ (muon) Scattering tomography & Transmission radiography imaging facility



散射成像装置  
 $\mu$ STC-T

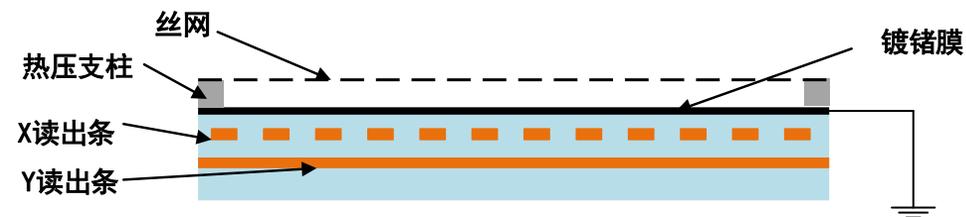


透射成像装置  
 $\mu$ STC-R

# 热压接Micromegas探测器

## 结构

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



15cm × 15cm



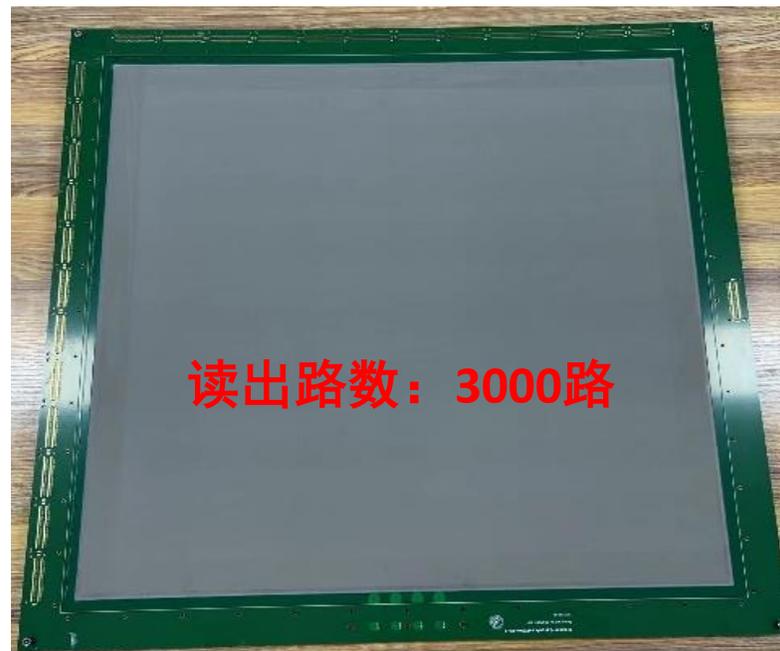
读出路数：768路

40cm × 40cm



读出路数：2000路

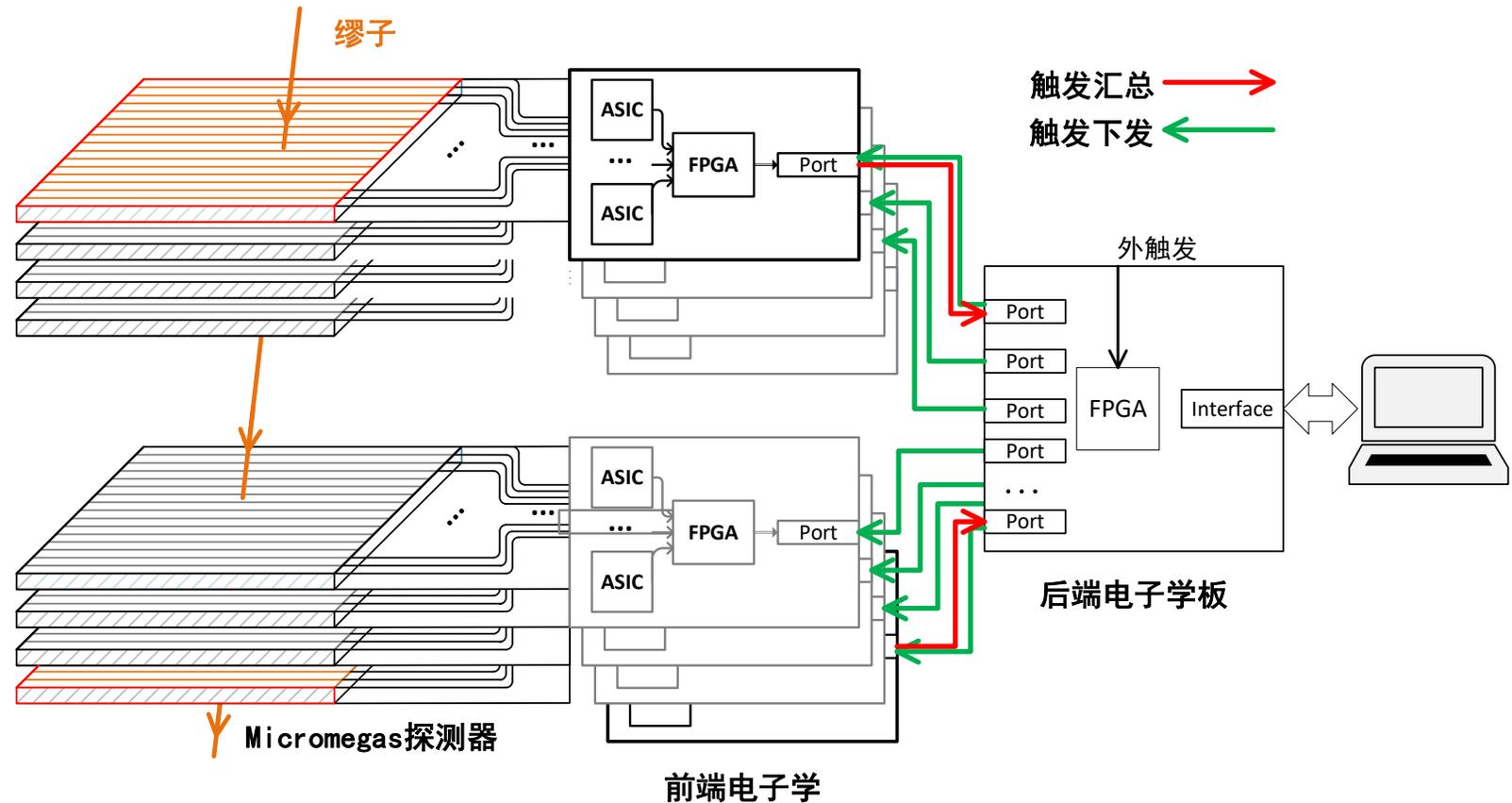
60cm × 60cm



读出路数：3000路

# 读出电子学架构

- › 上万路探测器通道
- › 适配不同的工作模式：散射、透射、计量学
- › 适配不同触发模式



# 电子学通道编码复用方案

- › 宇宙线缪子事例击中位置稀疏
  - ⇒ 利用合理的规则，将电子学通道复用
  - 可将所需读出通道数降低一个数量级

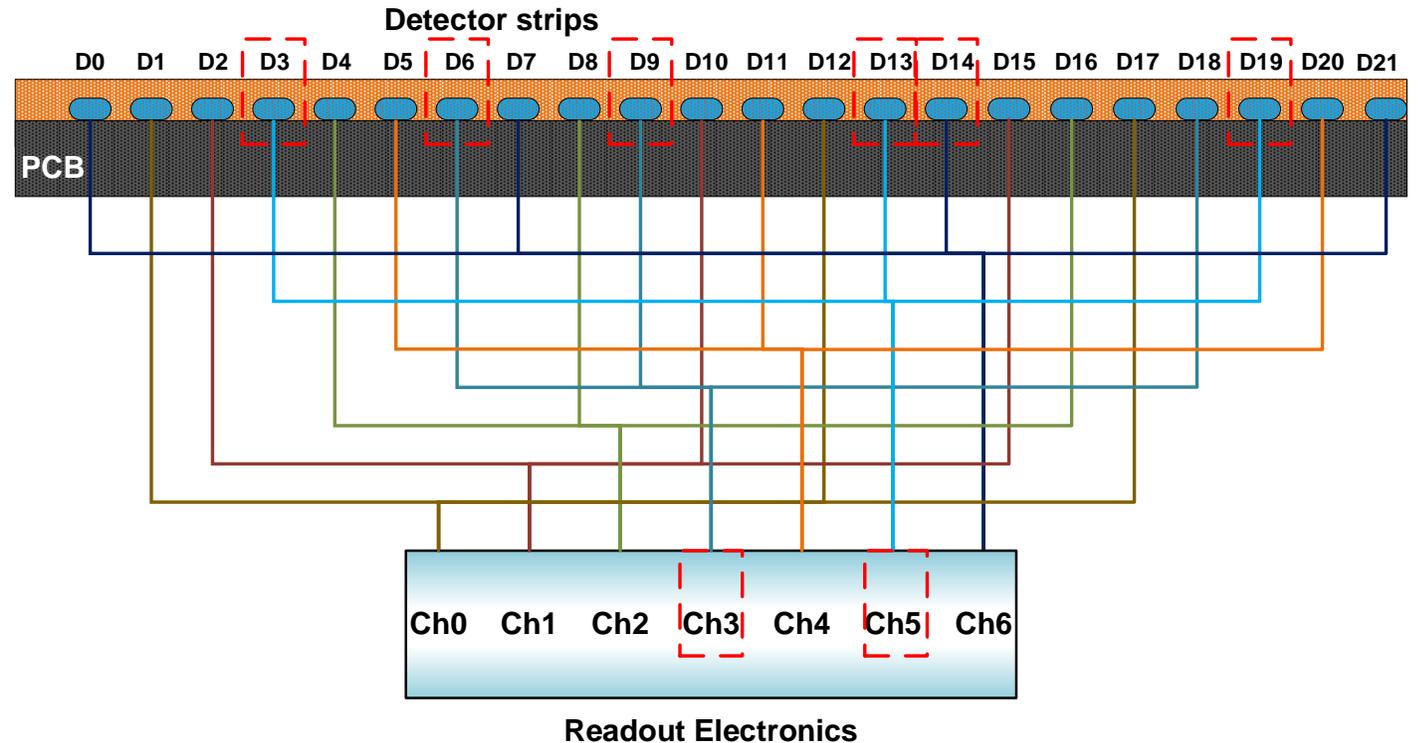
如：

电子学有信号通道为3, 5时

可能的探测器击中为

3, 6, 9, 13, 14, 19

由连续性可得击中通道为13, 14



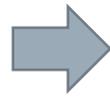
# 电子学通道编码复用方案

## › 通道复用方案用欧拉图论进行描述

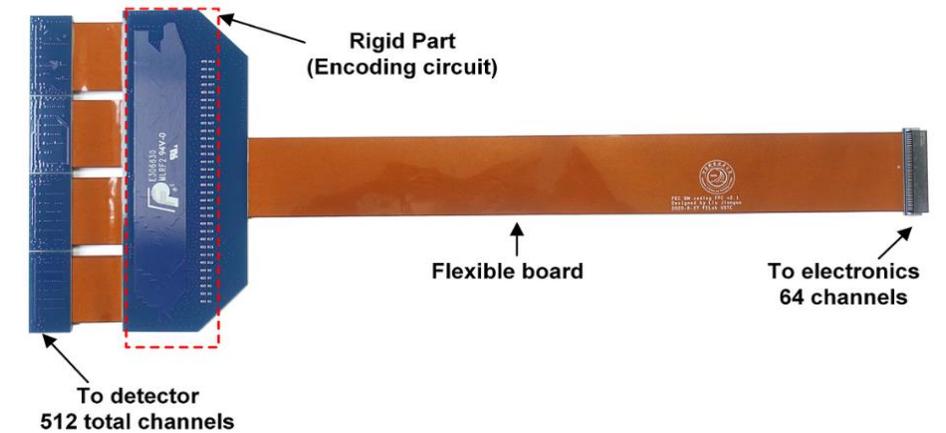
### - 三套方案

- › 交插编码读出方案
- › 完全图的欧拉回路编码读出方案
- › 二分图的欧拉回路编码读出方案

探测器：  
386通道



探测器：  
512通道

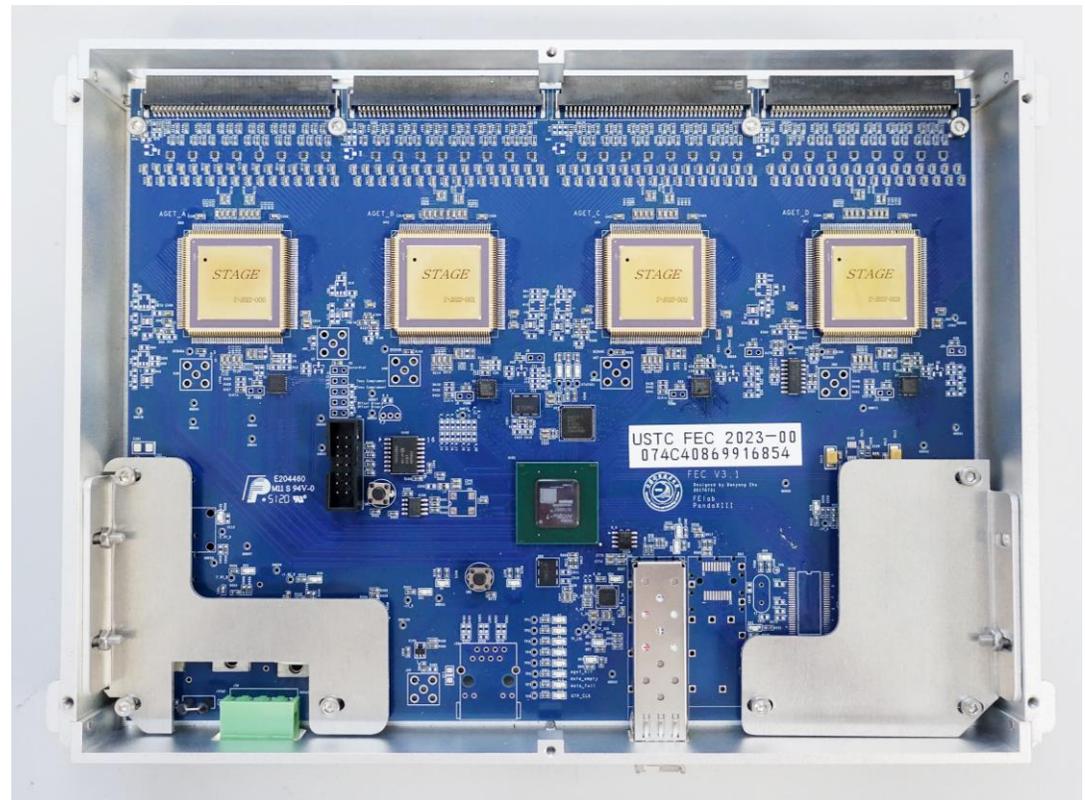
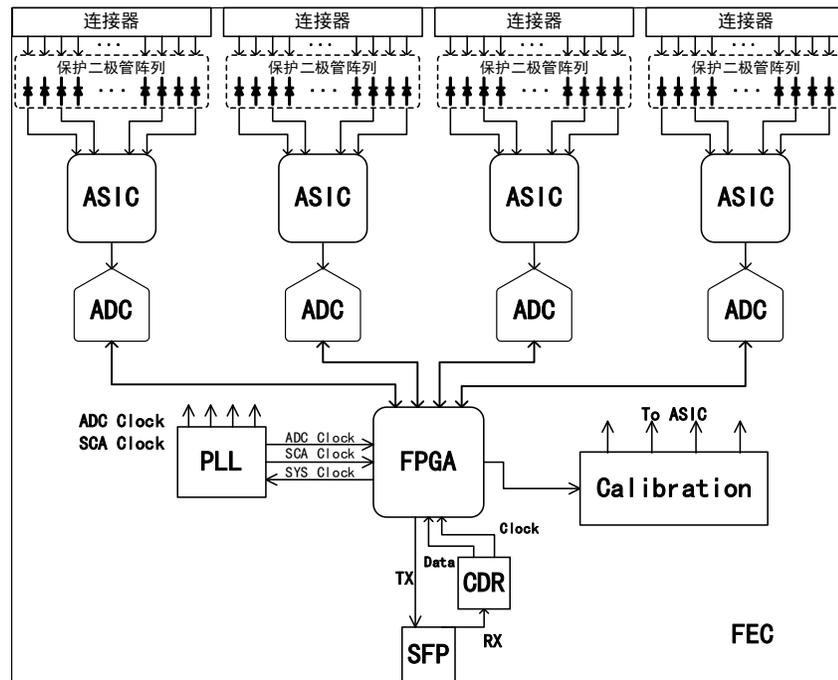


探测器：  
512通道



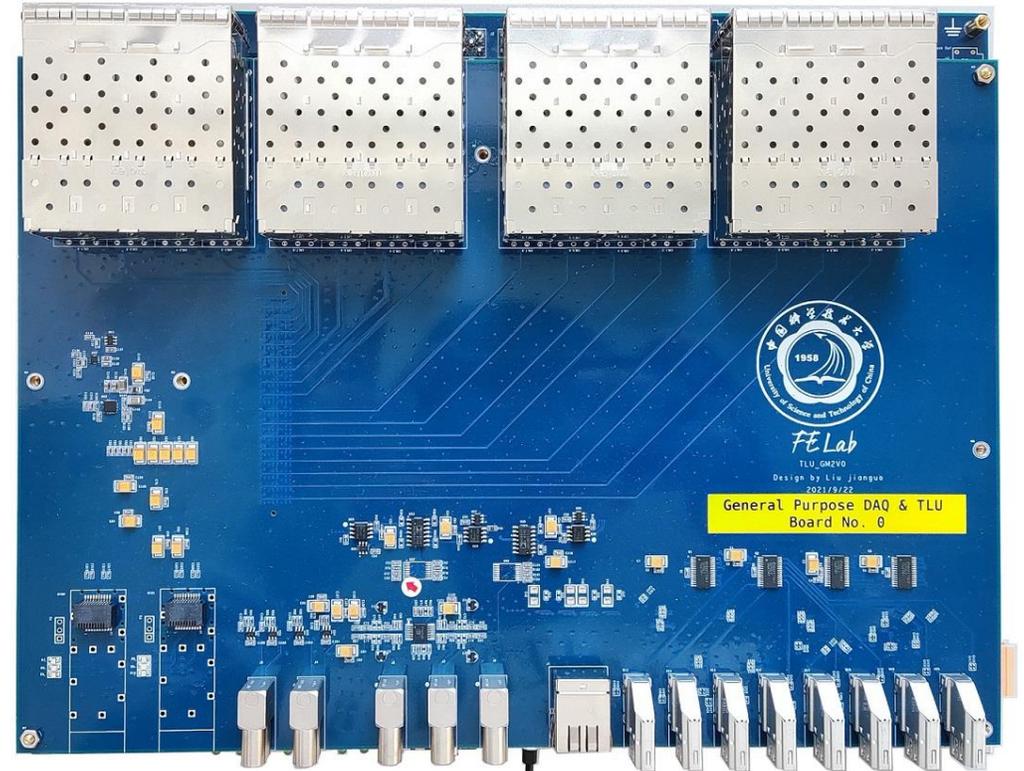
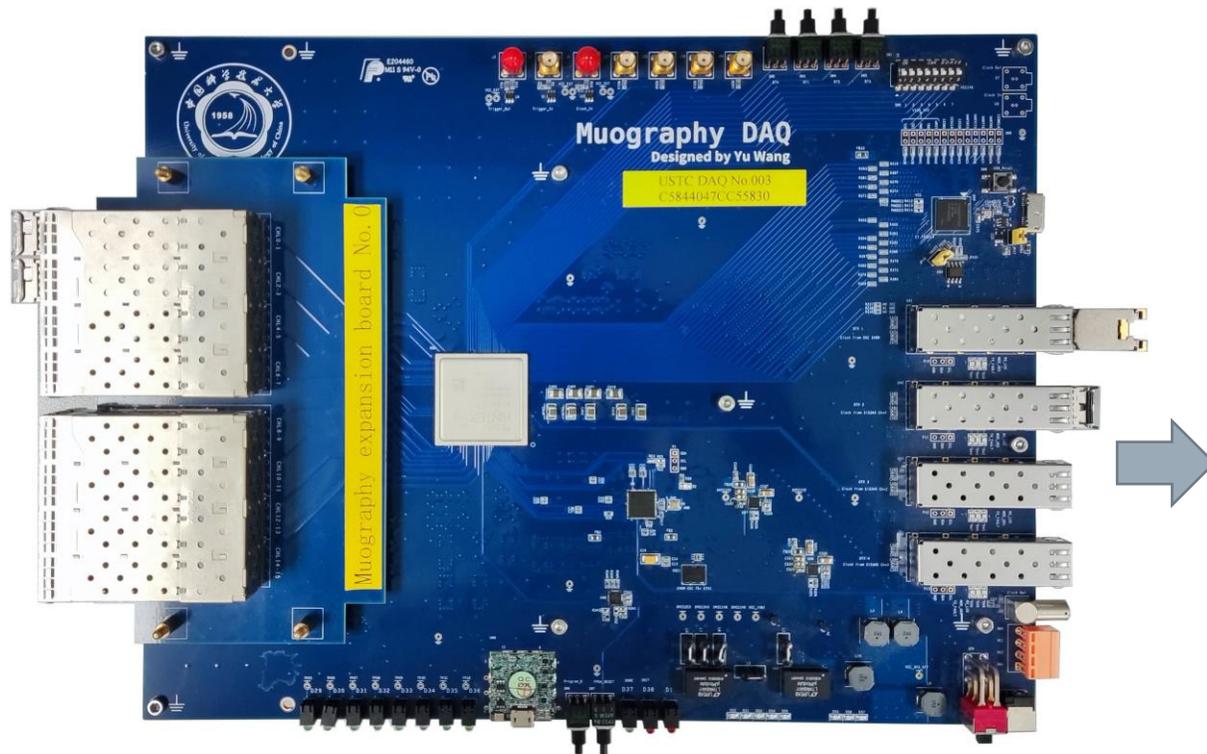
# 前端电子学

- › 读出通道数：256路
- › 动态范围：0~120fC/240fC/1pC/10pC
- › 噪声：0.2fC (@120fC量程)



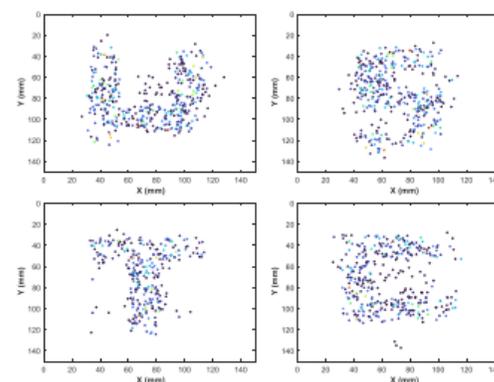
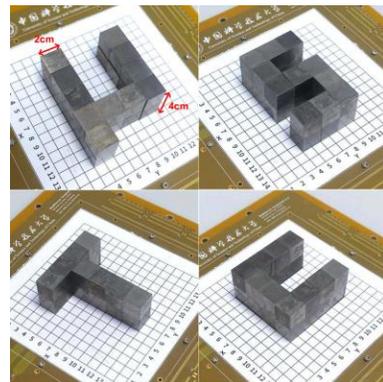
# 后端电子学

- › 采用FMC板卡设计
  - 适配不同规模 and 不同类型的前端
  - 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TLU功能

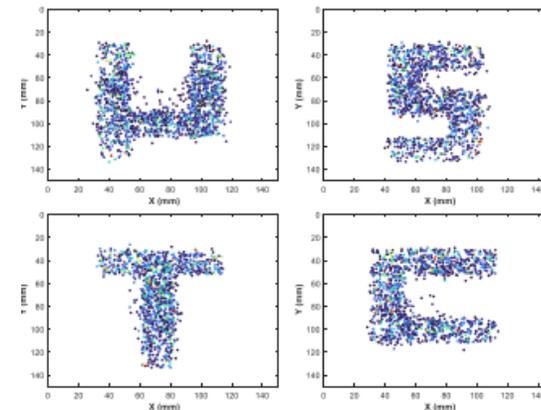


# 第一代样机成像实验

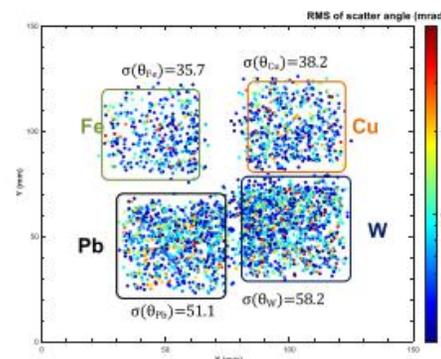
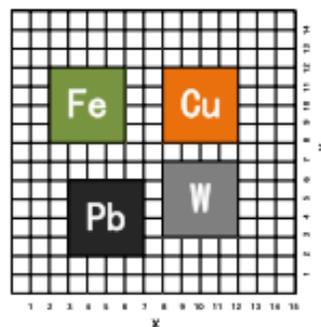
- 有效面积:  $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 
  - 8层探测器
- 电子学编码比6:1



4-hour exposure



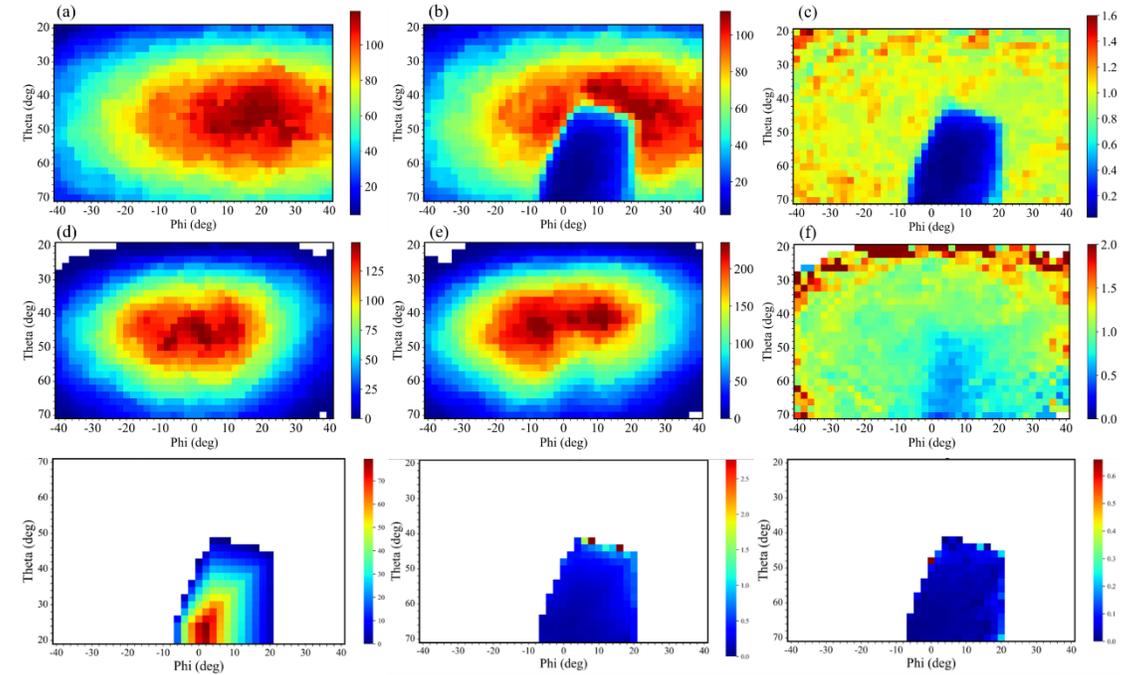
24-hour exposure



# 第一代样机成像实验

## 透射成像样机

- 四层 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  Micromegas
- 约 $100\ \mu\text{m}$ 位置分辨



# 第二代样机成像实验

- › 探测器有效面积：40 cm × 40 cm
  - 单层通道数：2048路
- › 电子学编码比：8:1



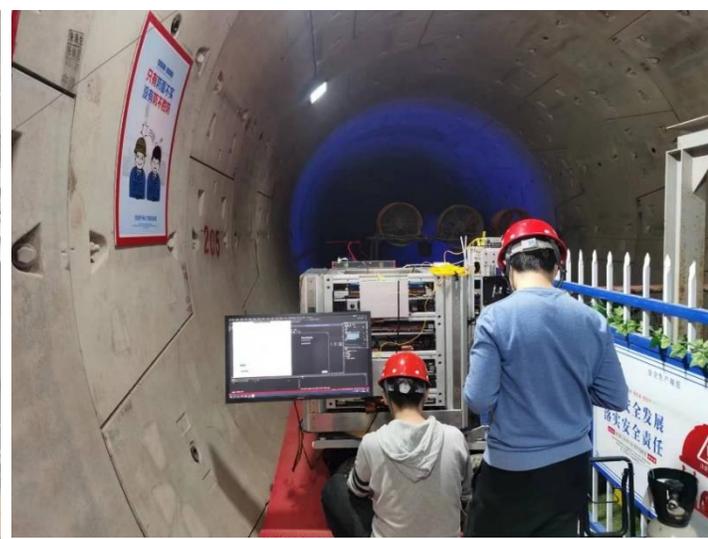
散射成像样机  $\mu\text{STC-T-G2}$   
8层



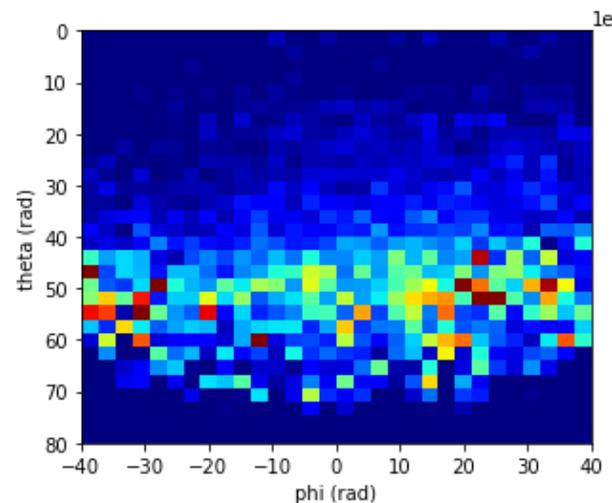
透射成像样机  $\mu\text{STC-R-G2}$   
4层

# 透射成像实验

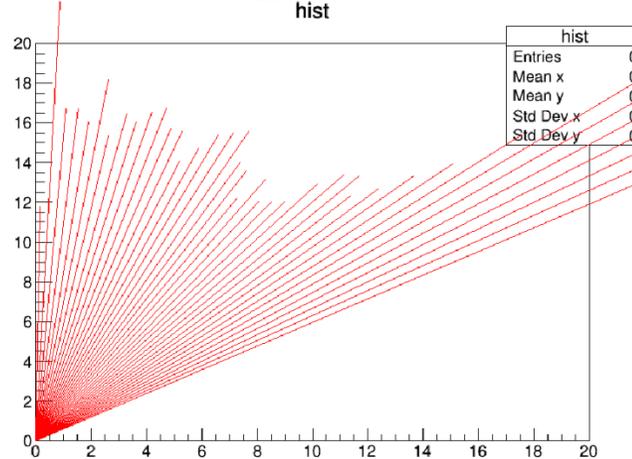
- › 地铁施工隧道成像实验
  - 装置放置在地铁隧道内
  - 地铁隧道与河道垂直
- › 施工同时开展测量
  - 灰尘、水气、震动等不利因素
  - 验证了装置在严苛环境中的稳定性



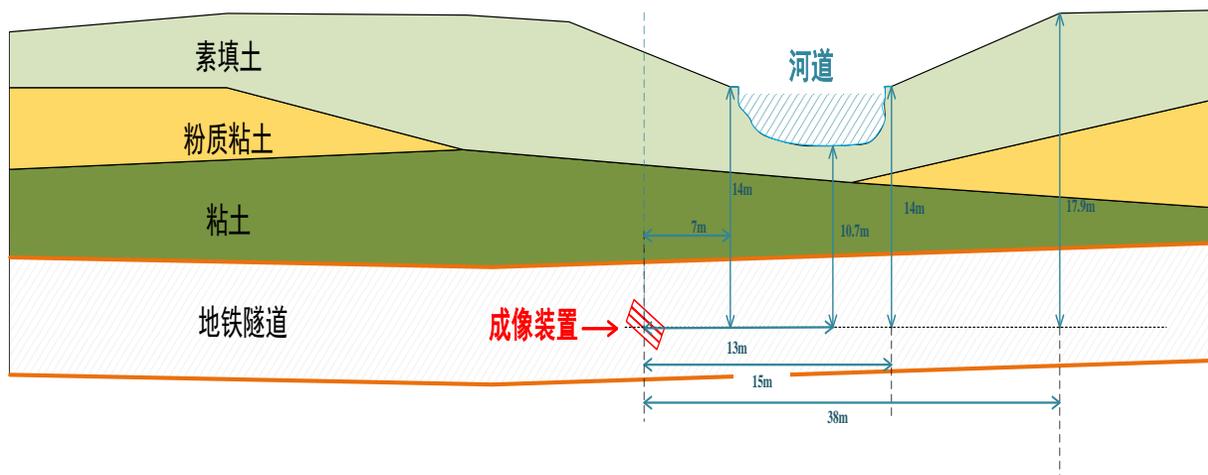
- › 装置放置在隧道中，以 $30^\circ$ 角对准河道
- › 分别测量河道方向和反方向的缪子通量
  - 反向测量缪子作为通量参考
- › 测试时间18天
  - 河道12天
  - 背景6天



顺着河道方向结果



截面缪子统计分布



# 透射成像实验

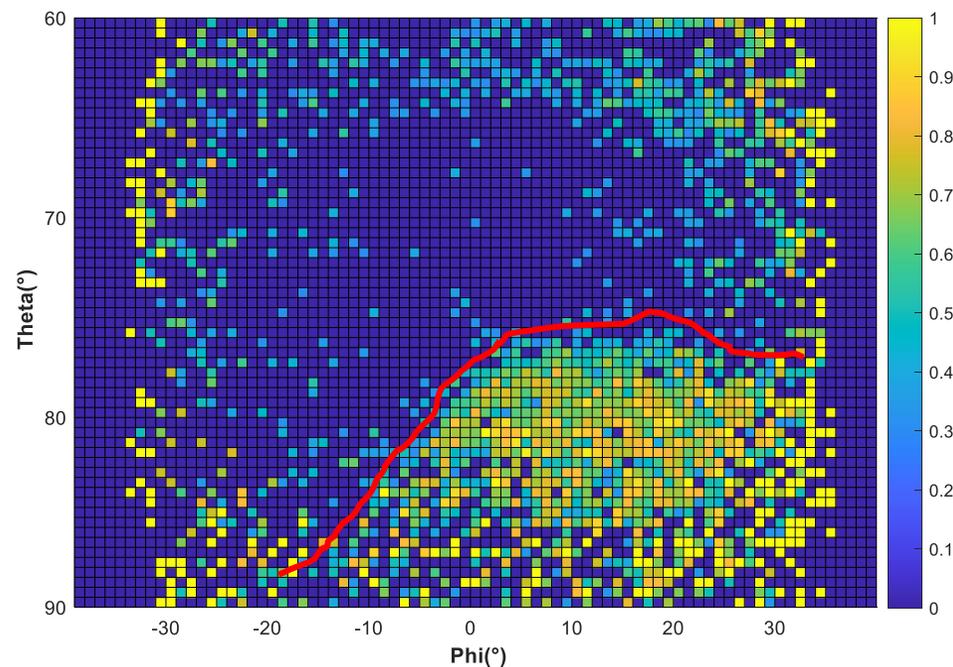
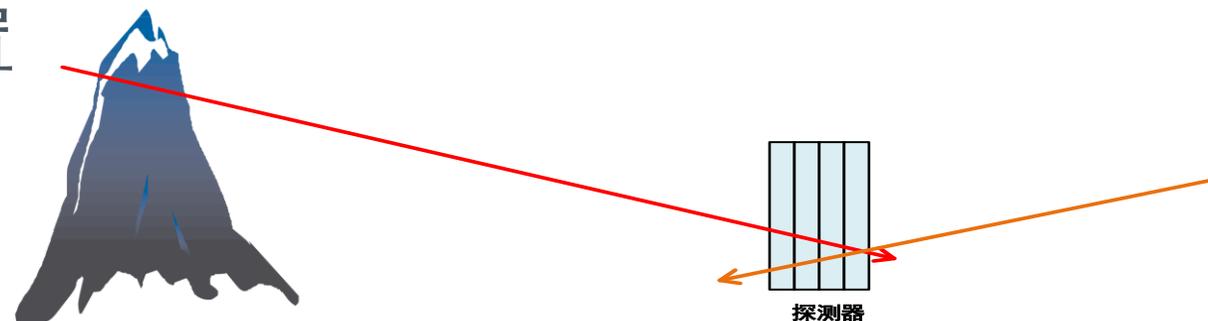
## 合肥西郊大蜀山成像

› 装置距山顶垂直距离260m，水平距离900m



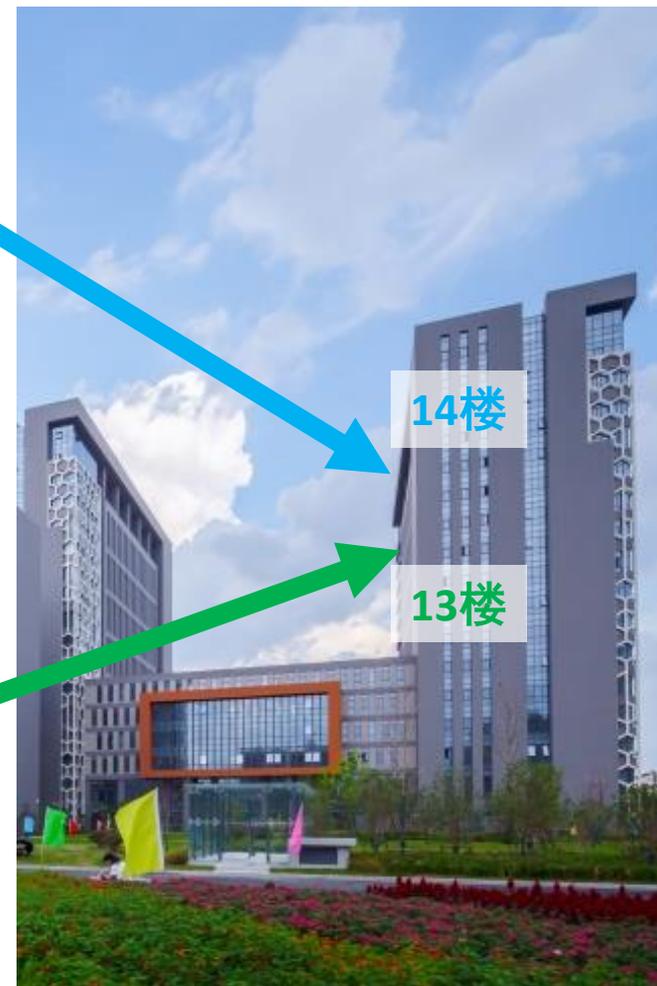
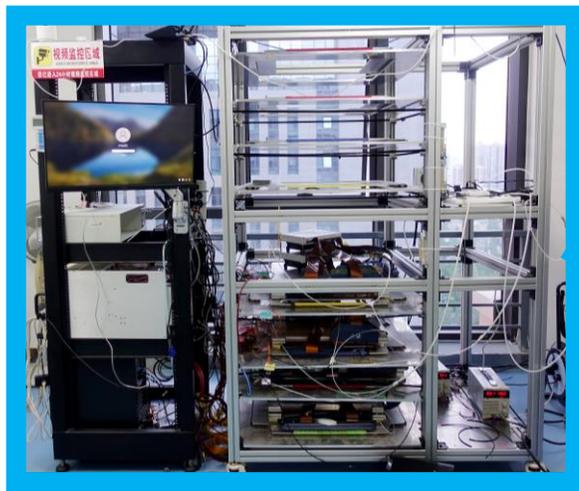
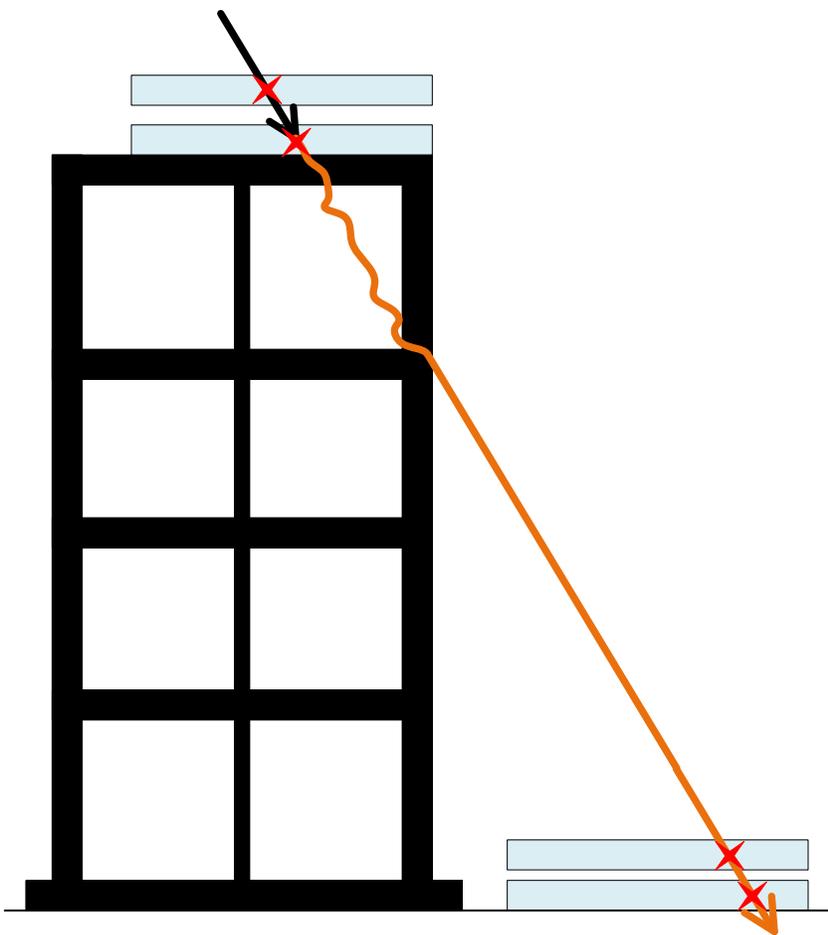
# 成像结果

- ›  $\mu$ STC-R-G2装置垂直于地面放置
  - 同时测量两个方向缪子
  - 单次实验完成信号和本底测量
- › 装置运行 > 4个月
  - 15天左右数据看出山体轮廓



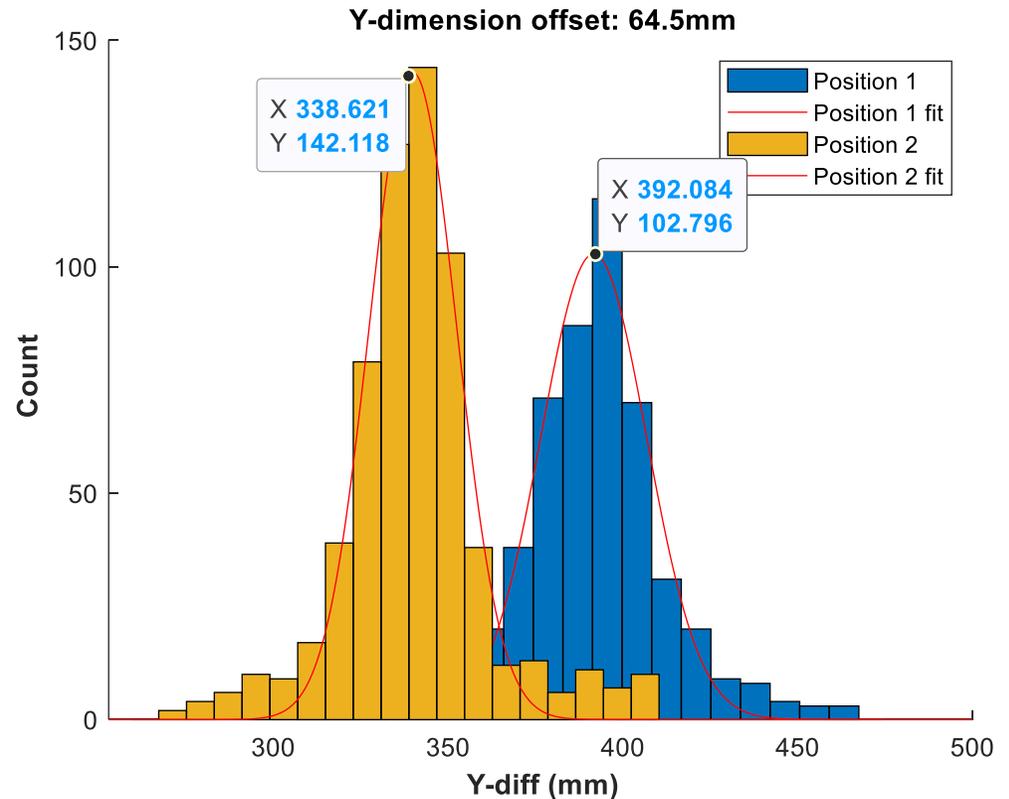
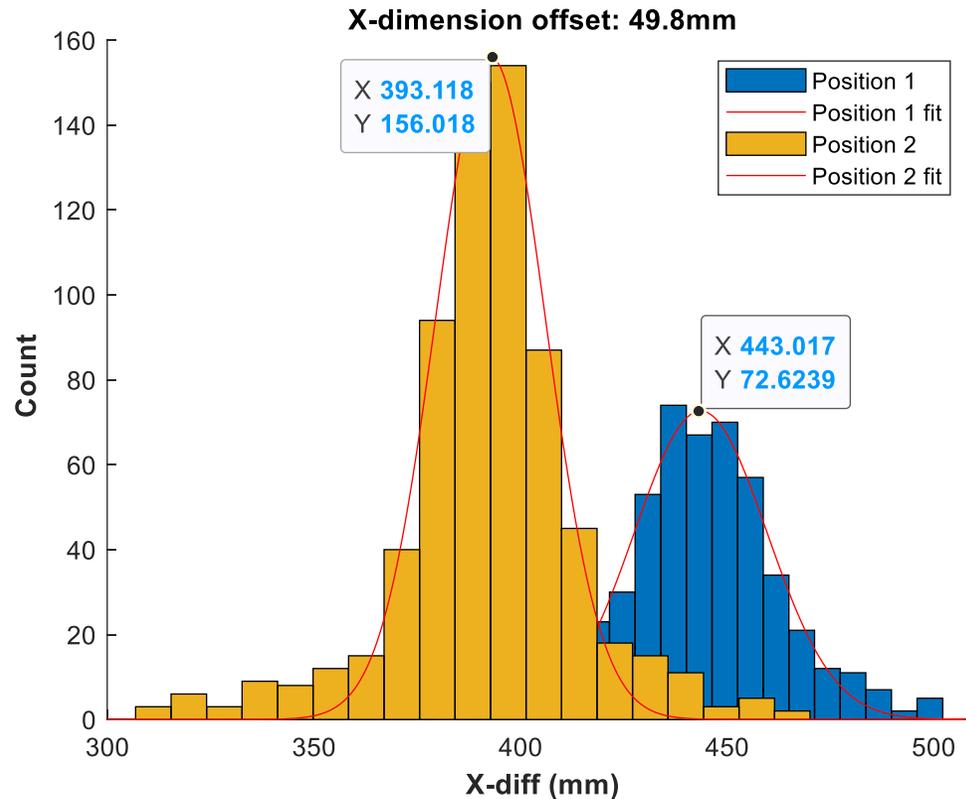
# 位移测量实验

› 利用缪子径迹为直线的特点测量大尺度物体微小位移



# 位移测量实验

- › 分别在两个位置处测量同一条径迹击中位置
  - 两个位置差即为位移量
- › 两台装置通过光纤同步



# 总结&展望

- › 利用Micromegas探测器和低噪声电子学以及编码读出方案搭建了一套大面积缪子成像装置
- › 结合通道编码复用方案，微结构气体探测器具有较好的位置分辨和较大的面积，适合用于缪子成像装置搭建
- › 本研究在不同环境下开展透射成像和缪子计量学实验，缪子成像在大尺度物体测量上还有很大的发展空间

## 展望

- › 散射成像装置搭建，为算法研究团队提供数据
- › 更大面积的探测装置建设，适中的目标： $1\text{m} \times 1\text{m}$
- › 更高压缩比的编码复用方案

# 谢谢

感谢向本项目提供资助和支持的国家自然科学基金  
《核电子学方法研究及应用（No. 12025504）》  
《微结构气体探测器通道编码复用方法研究（No. 12205297）》

感谢为本项目测试提供支持的安徽省地震台和中国建筑第八工程局有限公司