



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

博士学位论文答辩

基于Micromegas的高分辨缪子成像系统 读出电子学研究

答辩人：王宇

导师： 刘树彬 教授 沈仲弢 副研究员

时间： 2021-05-24

目录



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

- I. 研究背景
- II. 缪子成像系统分析
- III. 编码读出研究
- IV. 读出电子学研究
- V. 缪子成像实验
- VI. 总结与展望

粒子成像的原理



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

➤ 探测粒子与物质的相互作用

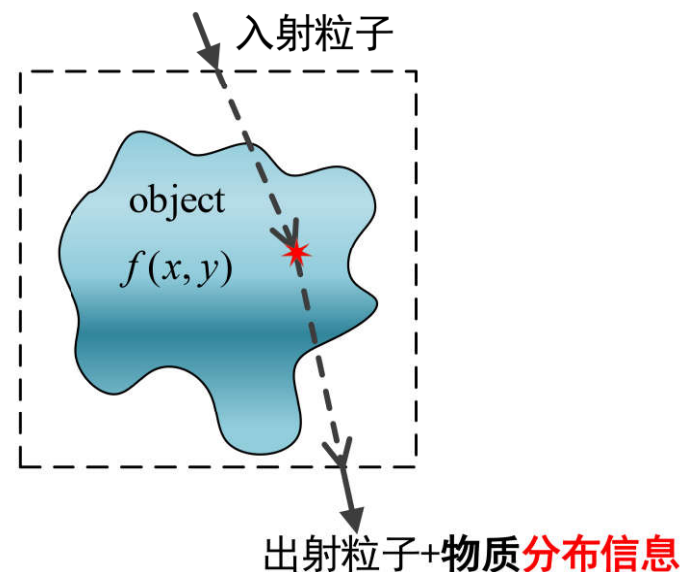
粒子与物质发生相互作用



粒子携带空间物质分布信息

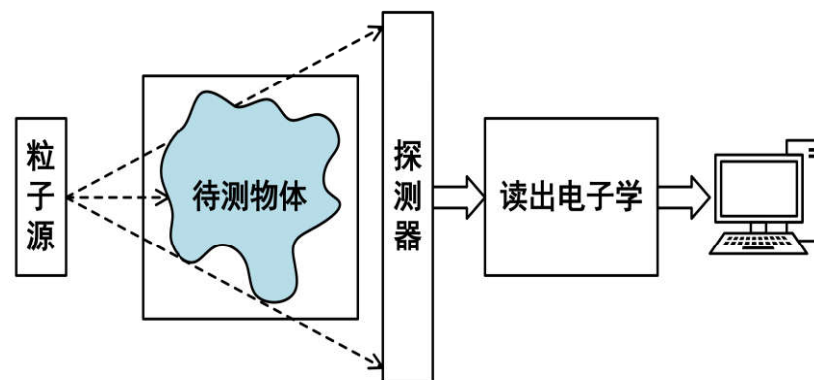


通过粒子状态重建物质分布



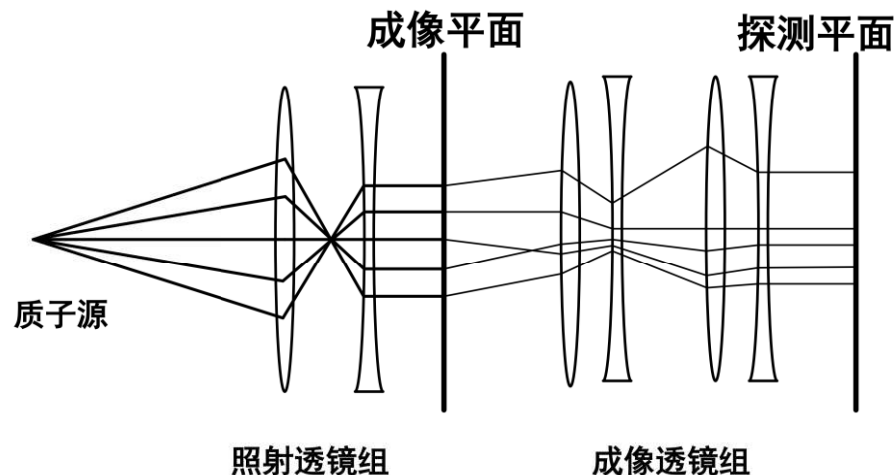
➤ 成像系统组成

- 粒子射线源
- 探测器系统
- 读出电子学系统
- 图像分析系统



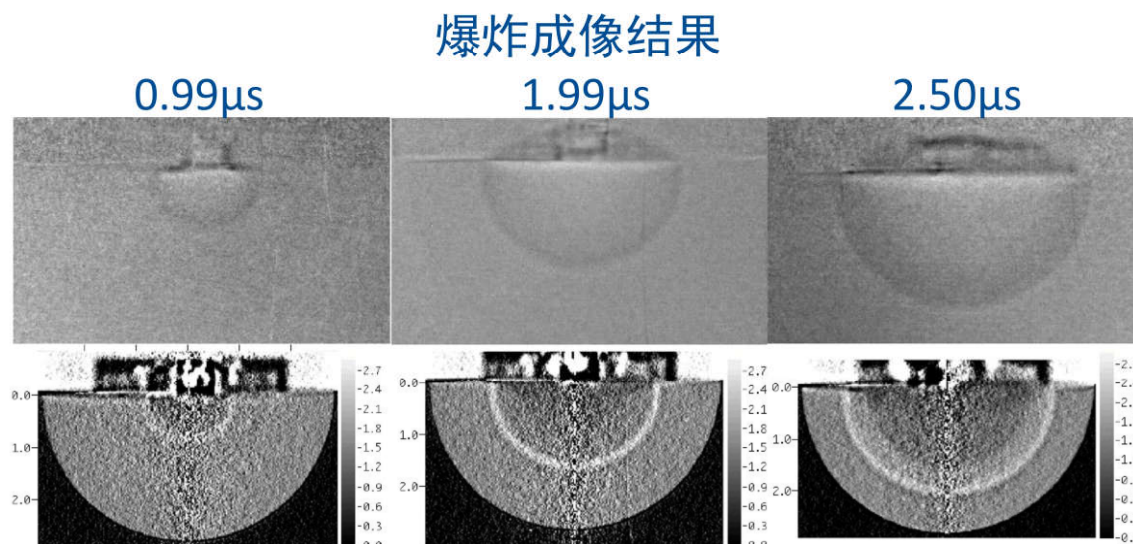
➤探测原理

- 不同物质对质子**吸收率不同**
- 对不同材料和密度区分度高
- 通过质子散射实现三维测量



➤应用场景

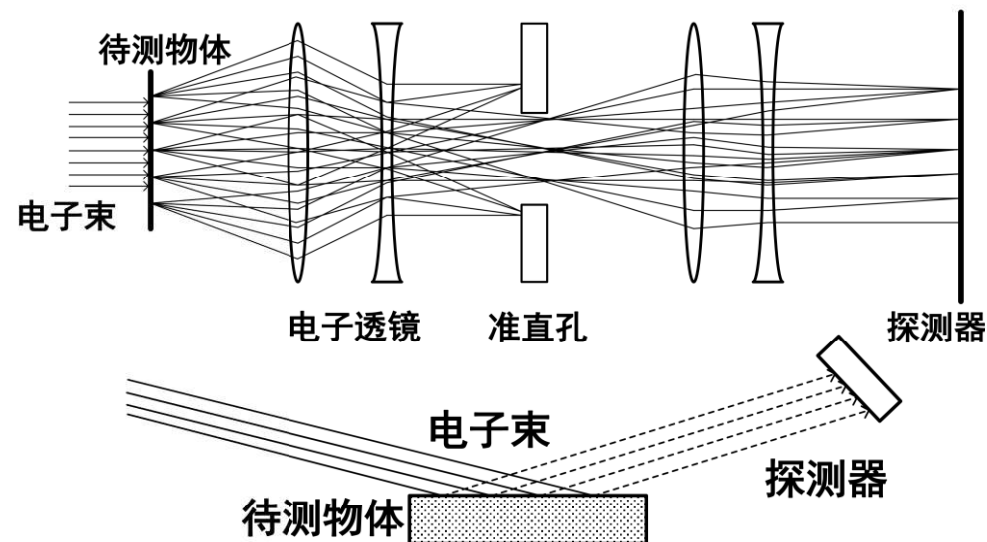
- 内爆物理研究
- 流体力学成像
- 质子医疗



参考文献: THE PROTON RADIOGRAPHY CONCEPT

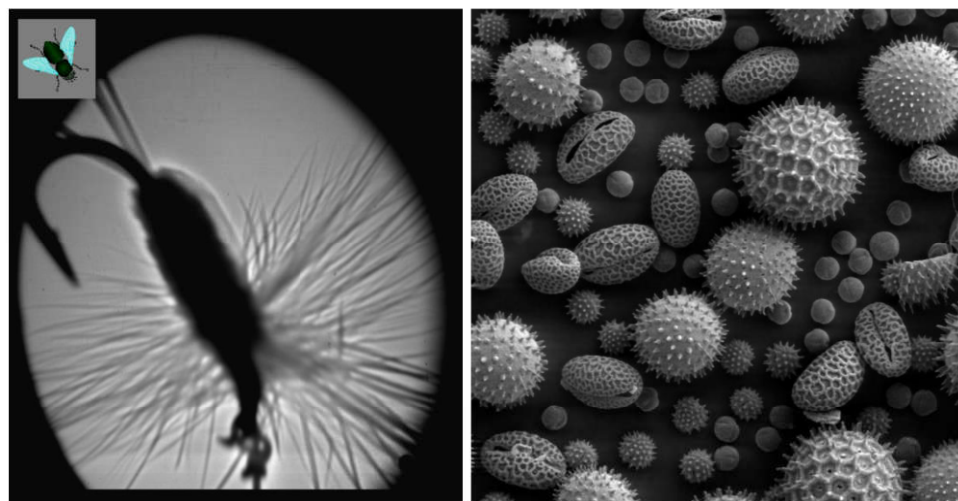
➤ 探测原理

- 电子透射成像
 - 电子被靶物质吸收率不同
- 电子背散射成像
 - 电子与晶格发生散射



➤ 应用场景

- 超薄样品成像分析
- 物质表面分析
- 微小物体成像



参考文献: Electron radiography

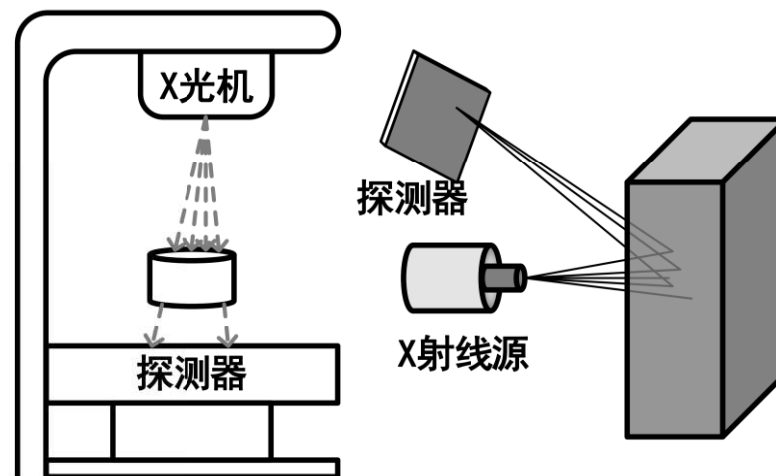
X射线成像技术



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

➤ 探测原理

- 透射式X射线成像
 - X射线吸收率不同
- 背散射X射线成像
 - 康普顿背散射效应

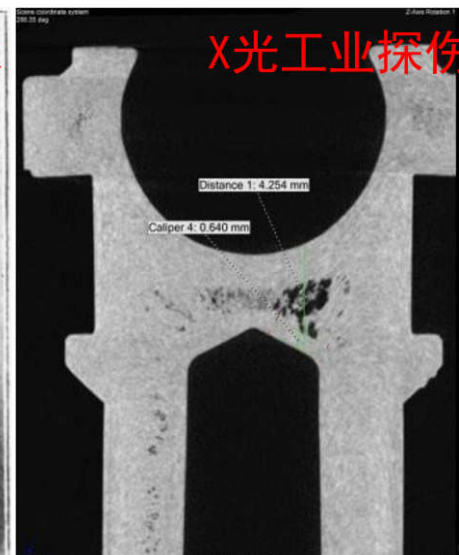


➤ 应用场景

- 医疗成像
- 工业探伤
- 安检



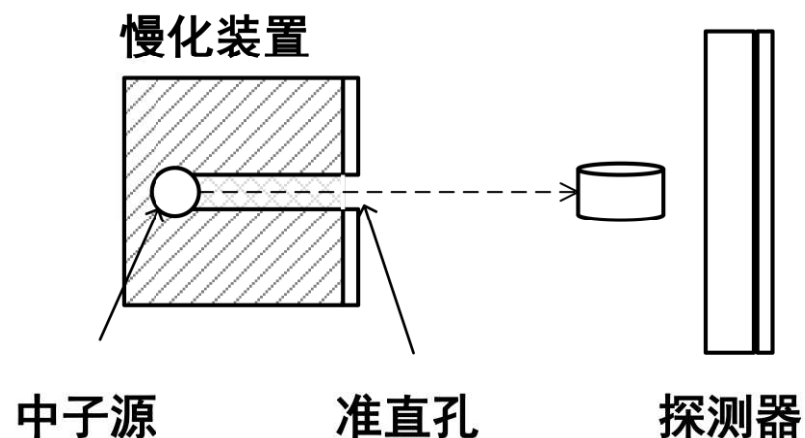
参考文献: On a New Kind of Rays



参考: www.anytesting.com

➤探测原理

- 不同物质对中子**吸收率不同**
- 中子能够穿透**重金属材料**
- 容易被氢、硼、锂等材料吸收



➤应用场景

- 核材料及包壳探测
- 高能材料缺陷检测
- 文物无损探测



➤ 穿透能力决定成像场合

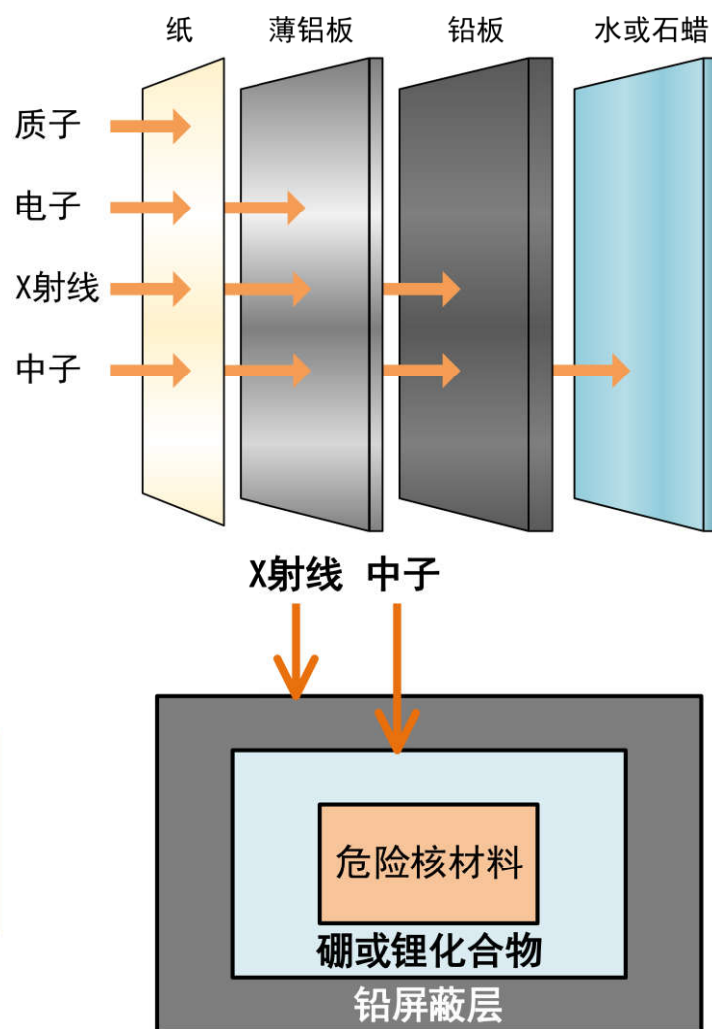
- X射线：医学成像
- 质子：流体动力学成像
- 中子：重金属结构检测
- 电子：物质表面成像

➤ 人工射线的不足

- 覆盖面小
- 易被材料屏蔽
- 存在电离辐射危险

人工射线难以实现：

- 屏蔽层中的危险核材料成像
- 大尺度物体(火山、古建筑)成像



成像技术对比



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

➤ 穿透能力决定成像场合

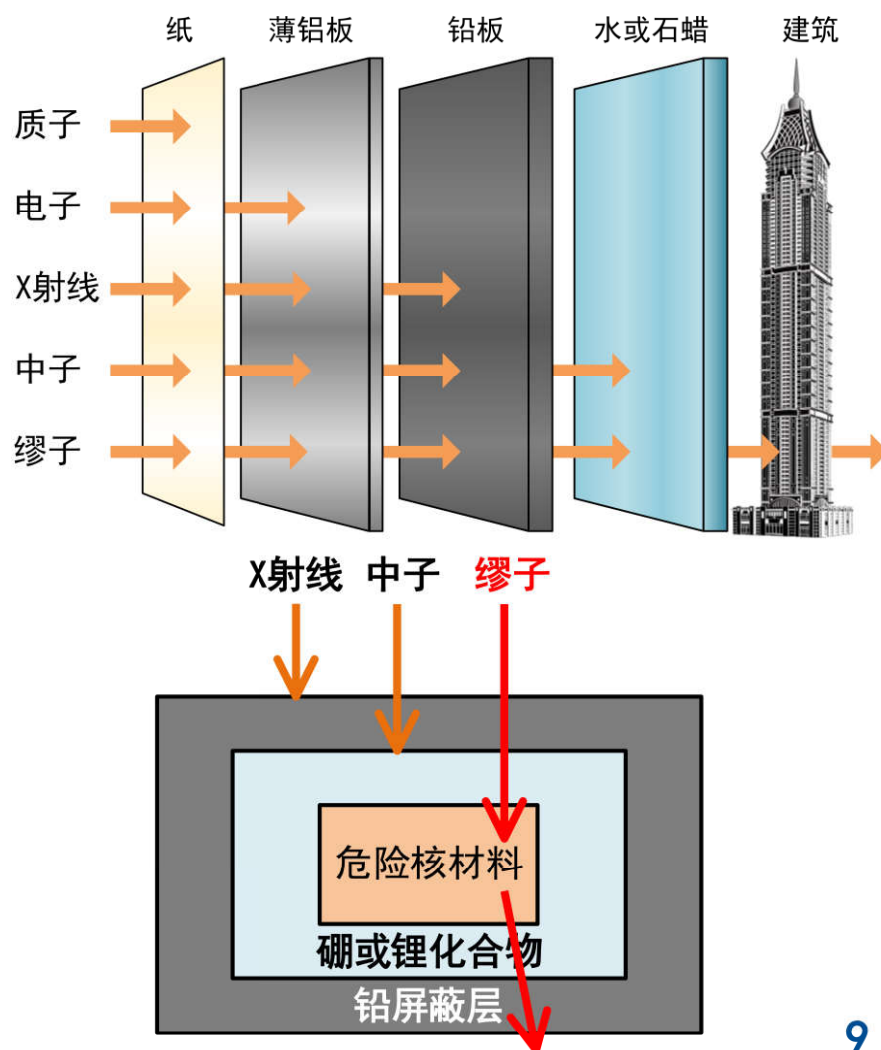
- X射线：医学成像
- 质子：流体动力学成像
- 中子：重金属结构检测
- 电子：物质表面成像

➤ 人工射线的不足

- 覆盖面小
- 易被材料屏蔽
- 存在电离辐射危险

➤ 宇宙线缪子

- 天然可得，覆盖面大
- 穿透力极强



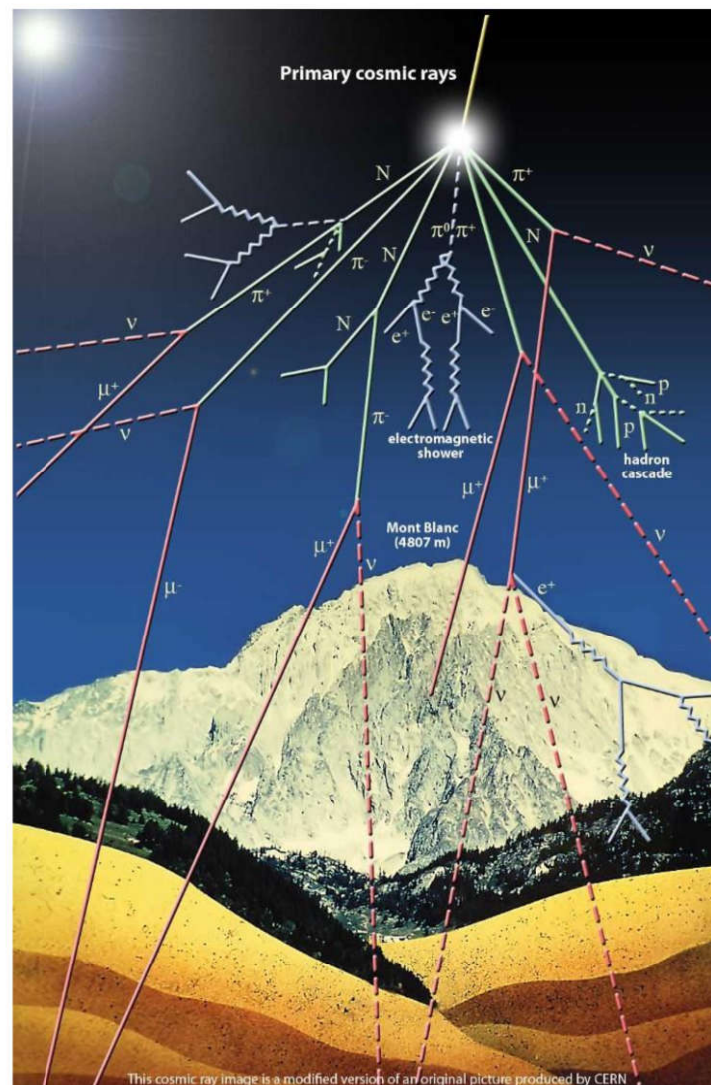
宇宙线缪子的产生与性质



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

- 由次级宇宙线产生
 - 宇宙线+大气簇射 → 次级粒子
 - kaon和pion衰变产生缪子
- 带一个单位电荷
- 韧致能损小
 - $m_{\mu} \approx 207m_e$
 - 仅为电子的四万分之一
 - 穿透力强
- 平均能量3GeV~4GeV
- 海平面通量：1个/(min·cm²)

宇宙线缪子穿透力强、覆盖面大，是理想的天然探针



➤ 能量损失

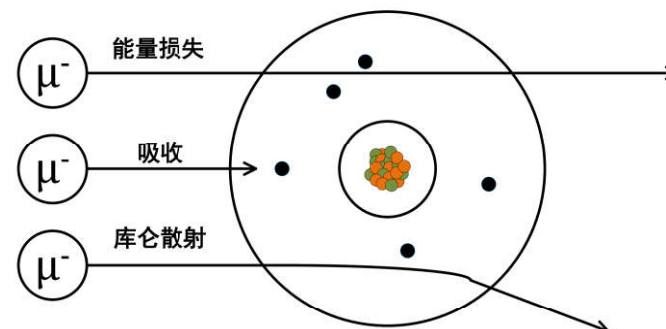
$$-\frac{dE}{dx} = a(E) + b(E)E$$

电离能损 韧致、对产生、光核作用

• 吸收:

- 沉积全部能量

$$\text{射程: } R(E) = \int_{E_0}^E \frac{1}{[a(E') + b(E')E']} dE'$$



透射成像

➤ 多次库伦散射

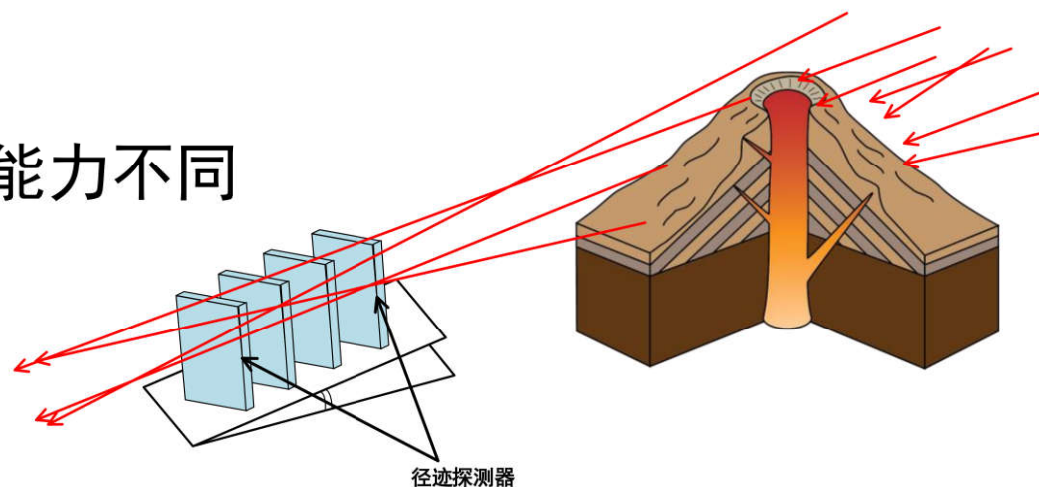
- 散射角近似服从高斯分布

$$\sigma(\theta) = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

散射成像

➤原理

- 不同厚度物体阻挡缪子能力不同
- 测量不同方向**缪子通量**
- 计算缪子吸收比例
- 反推物质密度分布



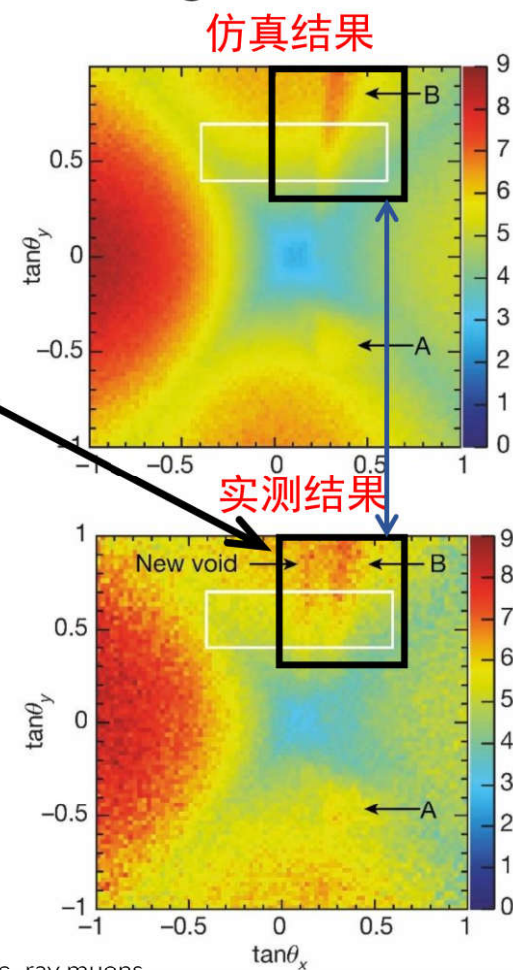
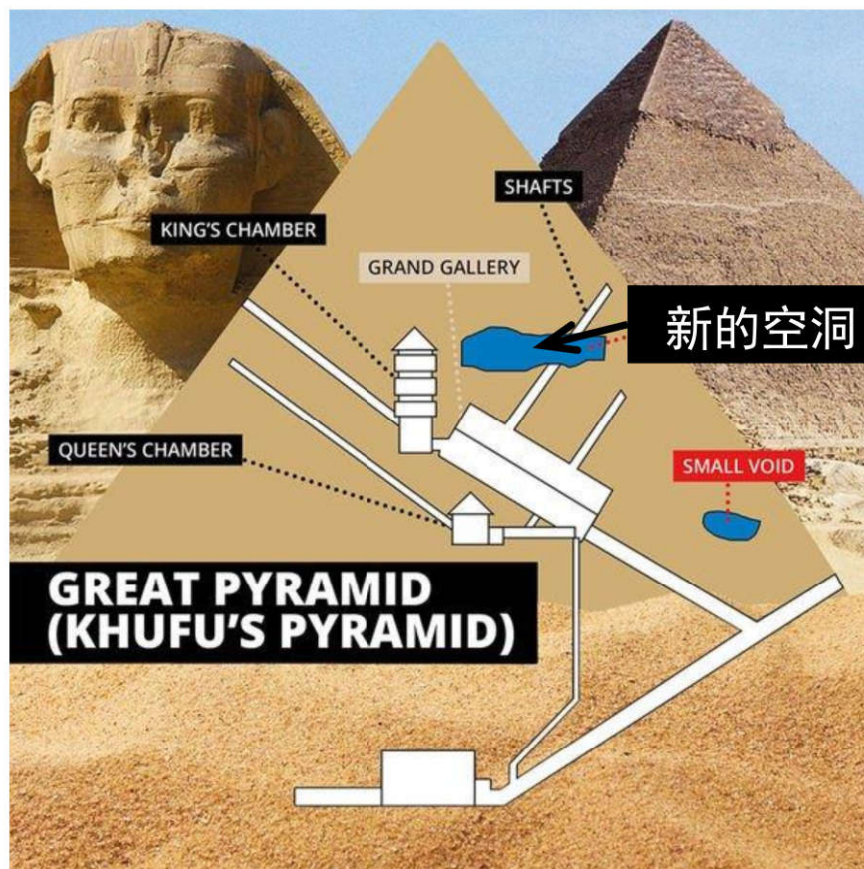
➤应用场合

- 火山监测
- 考古探测
- 矿藏探索
- 核反应堆检测



➤ 考古探测：胡夫金字塔空洞发现

- 探测手段：核乳胶室、塑闪和Micromegas探测器



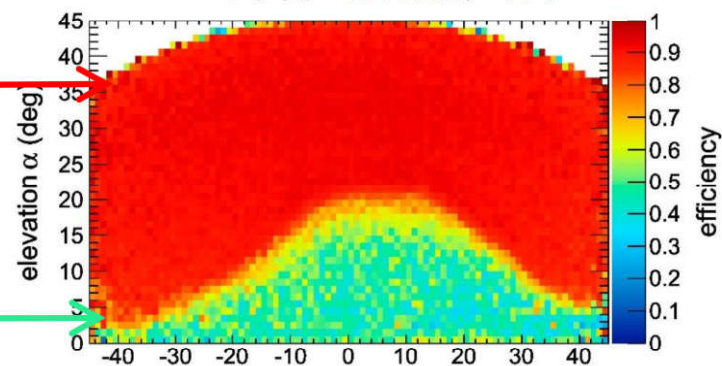
参考文献：Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons

➤火山成像：多姆山

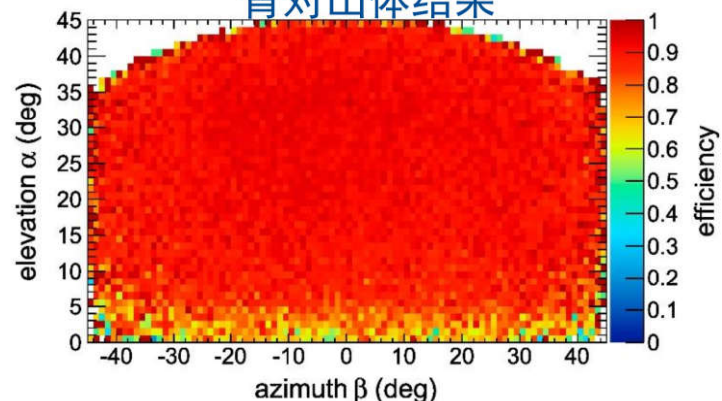
- 探测手段：塑闪和GRPC探测器
- 探测器面积： $1\text{m} \times 1\text{m}$ ，层数：4层



对着山体成像结果

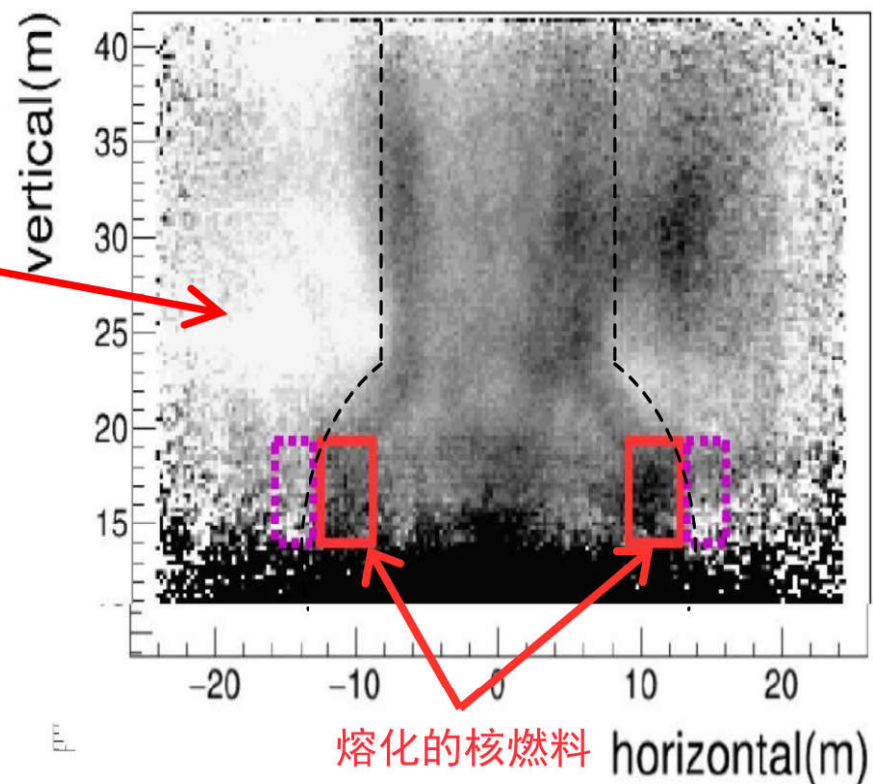
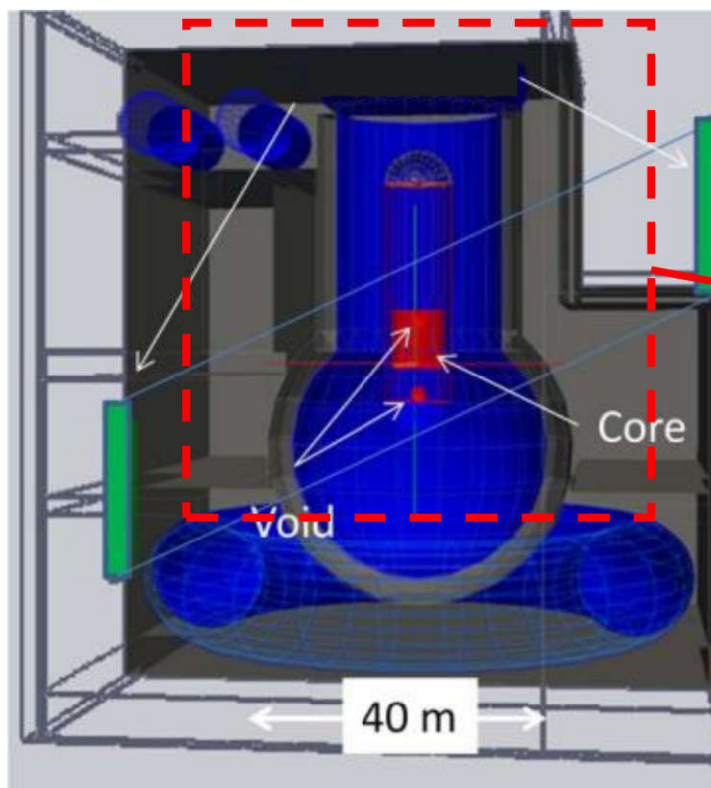


背对山体结果



➤核反应堆检测：福岛核电站成像

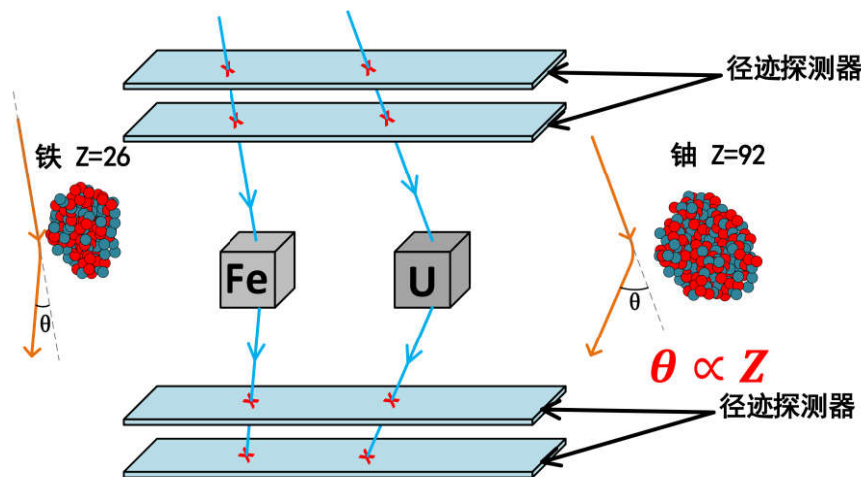
- 探测手段：塑闪探测器+MPPC
- 探测器面积：1m×1m，层数8层



参考文献：Investigation of the Status of Unit 2 Nuclear Reactor of the Fukushima Daiichi by the Cosmic Muon Radiography

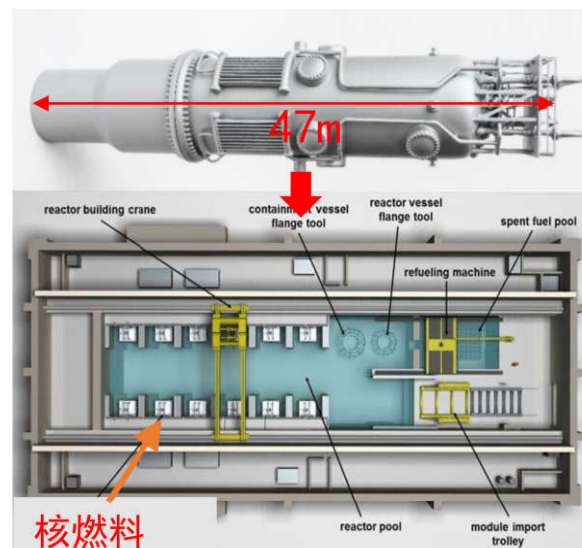
➤原理

- 缪子与物质原子核发生散射
- 出射缪子携带物质信息
- 测量缪子**径迹信息**
- 重建物质三维分布



➤应用场合

- 特殊核材料成像
- 核燃料的**监控和检测**
- 核废料**存储安全监测**

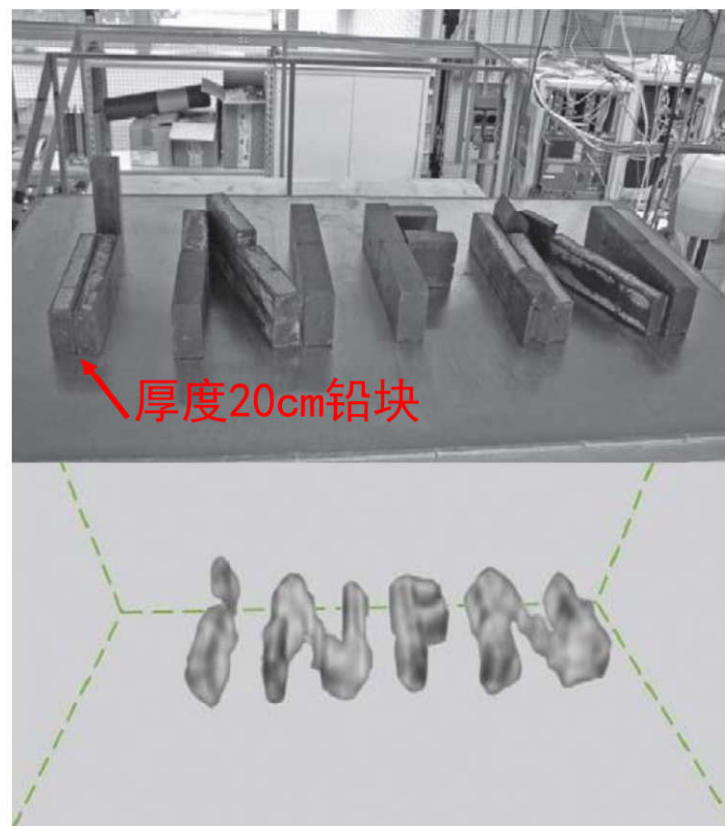
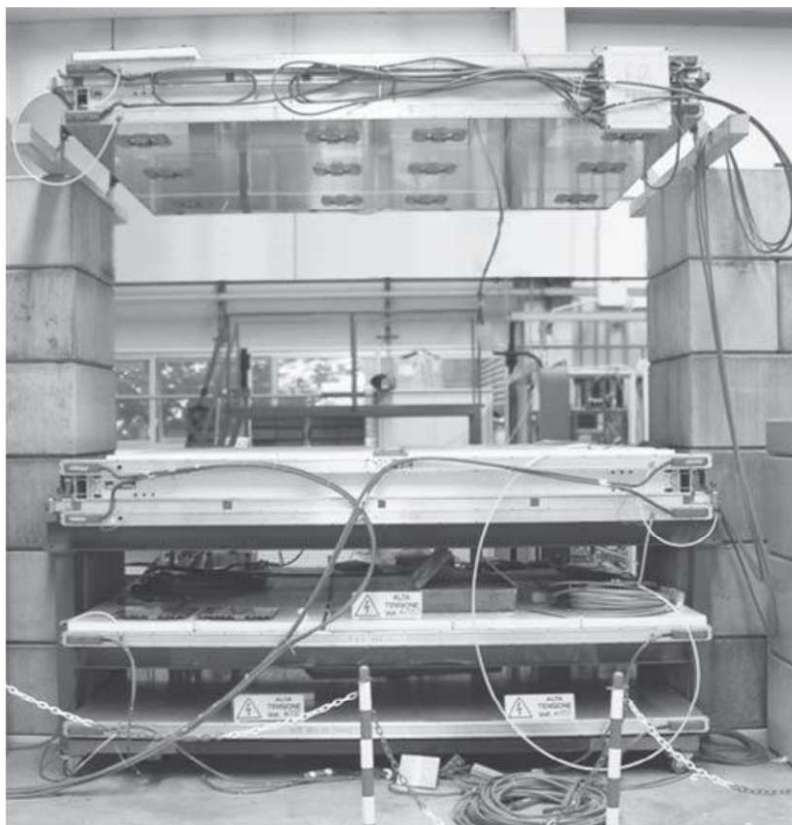


缪子对重核物质**探测灵敏度高**，**不受屏蔽材料影响**

NuScale公司小型核电站

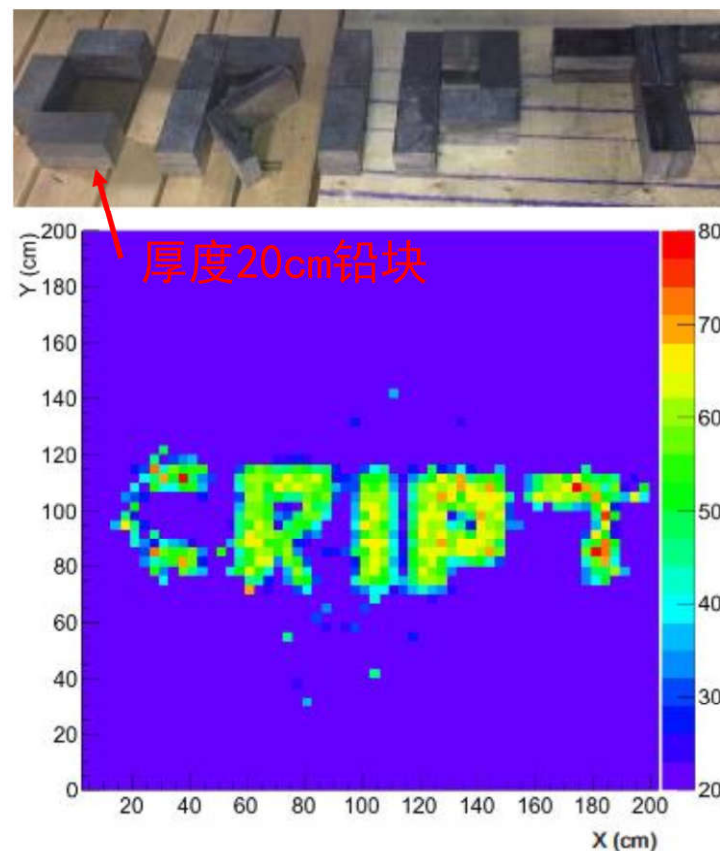
➤高Z物质成像

- 探测手段：漂移管探测器+HPTDC读出
- 探测面积： $3\text{m} \times 2.5\text{m}$ ，层数：6层



➤高Z物质成像

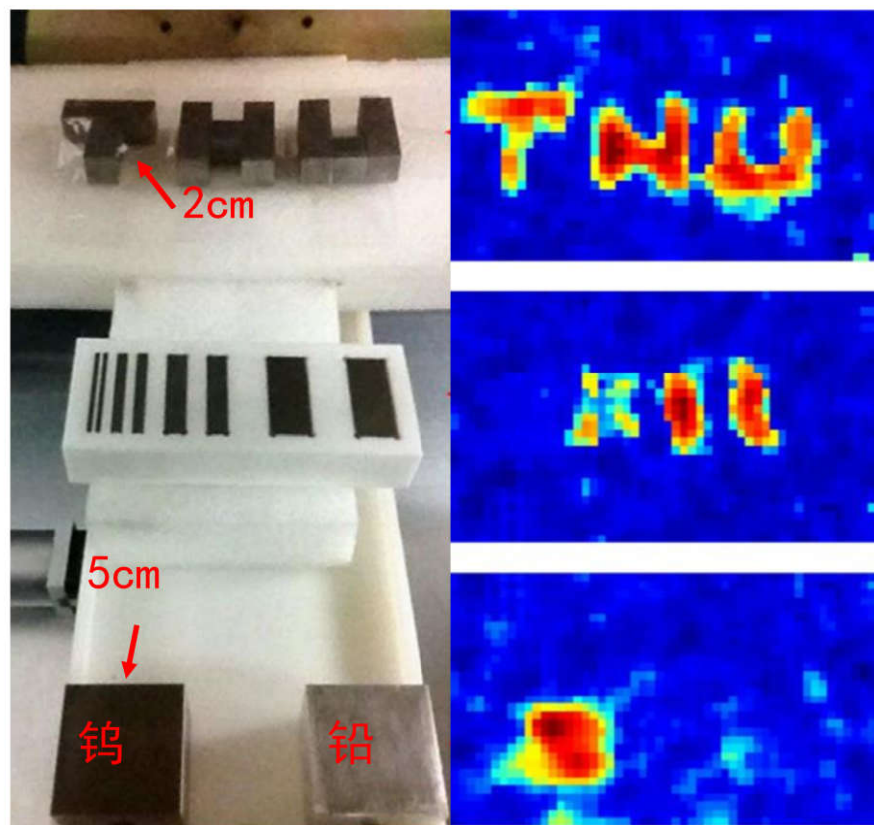
- 探测手段：塑闪探测器+PMT+商用采集卡读出
- 探测面积：1.6m×2m，层数：12层



参考文献：Construction, commissioning and first data from the CRIPT muon tomography project

➤高Z物质成像

- 探测手段：MRPC探测器+商业插件读出
- 探测面积：70cm×70cm，层数：6层



➤研究现状

- 已经在考古、火山探测等领域得到应用
- 重核物质成像原理已得到验证

➤亟待解决的问题

- 成像时间长
 - 散射成像：几天；透射成像：数月
- 成像质量不高
 - 无法提供清晰的成像结果

➤解决方案

- 大面积探测器 → 增大接收度、缩短成像时间
- 高位置分辨探测器 → 提高测量精度、提升成像质量

➤方案

- 微结构气体探测器
 - 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

➤本论文研究目标

- 多用途缪子成像装置
 - μ STC (μ Scattering and T ransmission 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

目录



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

- I. 研究背景
- II. 缪子成像系统分析
- III. 编码读出研究
- IV. 读出电子学研究
- V. 缪子成像实验
- VI. 总结与展望

➤ 衡量标准：10分钟内完成4kg的核材料成像^[1]

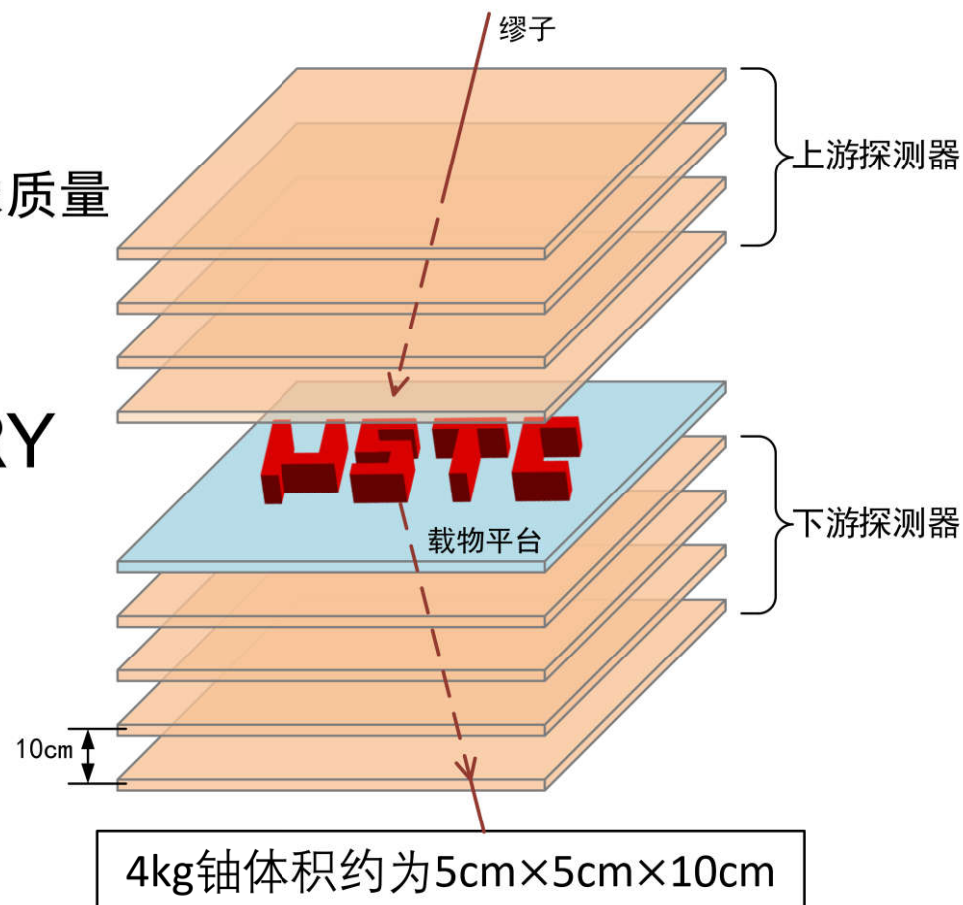
➤ 影响因素

- 位置分辨率
 - 较好位置分辨利于提高成像质量
- 探测面积
 - 覆盖常见的核材料检测

➤ 仿真工具：GEANT4+CRY

➤ 仿真条件

- 自然动量和角分布缪子
- 10分钟缪子照射量
- 材料厚度10cm，宽度5cm

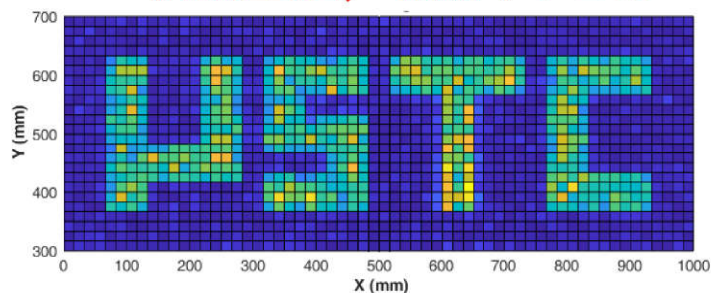


散射成像仿真结果

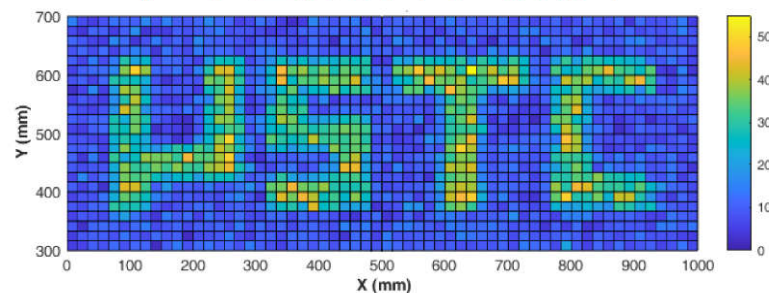


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

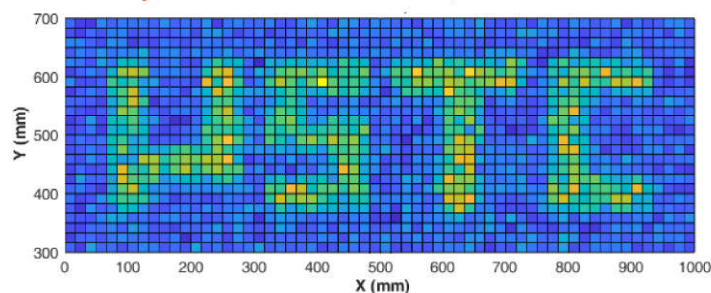
精确重建，噪点率：24%



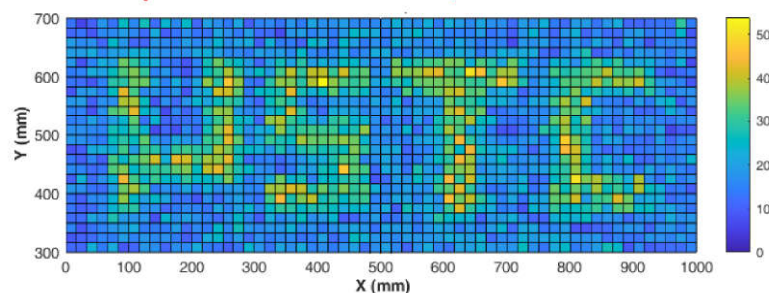
200 μ m位置分辨率，噪点率：58%



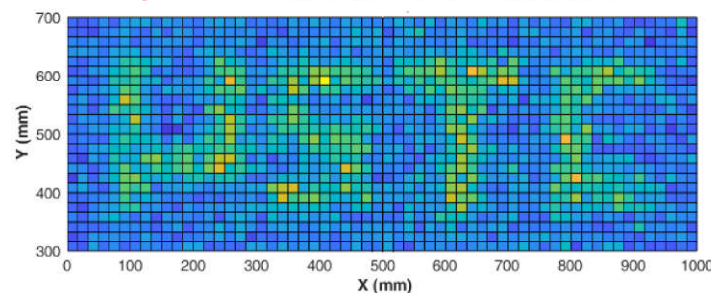
400 μ m位置分辨率，噪点率：65%



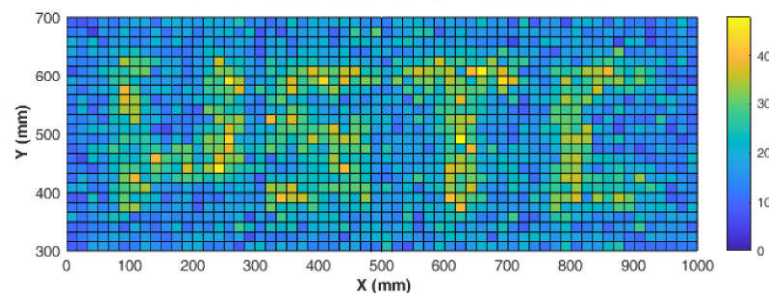
600 μ m位置分辨率，噪点率：69%



800 μ m位置分辨率，噪点率：72%



1mm位置分辨率，噪点率：74%



➤ 位置分辨率需百微米量级

➤标准： 2分钟完成4kg核材料鉴别，误判率<5%^[1]

➤原理：

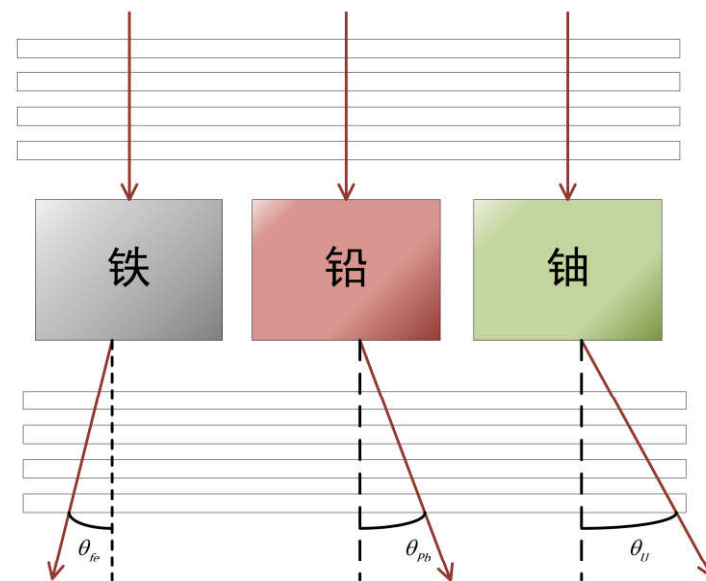
- 缪子在不同材料中散射角的标准差不同
- 在95%的置信度下，区分不同材料

➤仿真条件

- 材料厚度10cm，质量4kg
- 2分钟缪子照射量

➤影响因素

- 位置分辨率
- 缪子散射角统计涨落



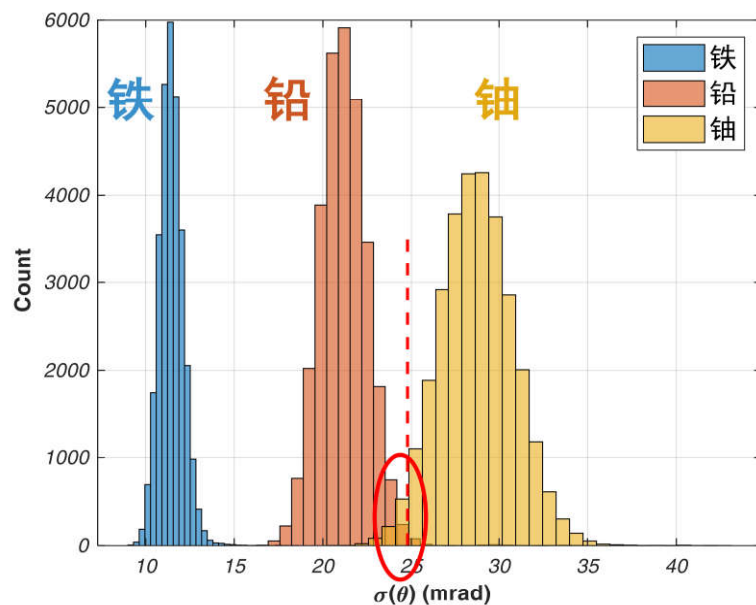
$$\sigma(\theta) = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

核材料鉴别仿真结果



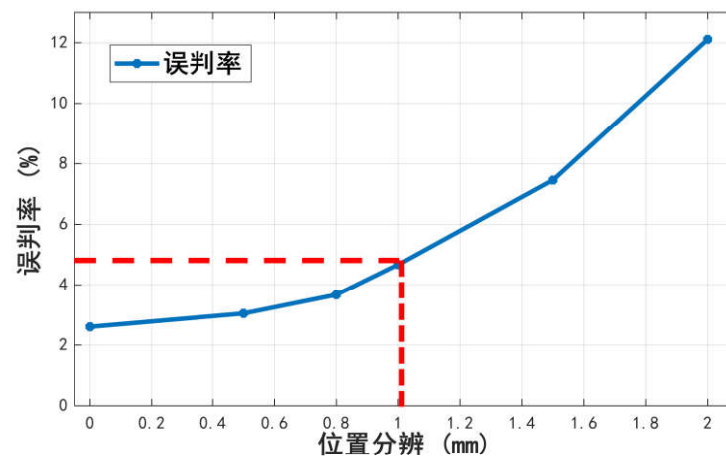
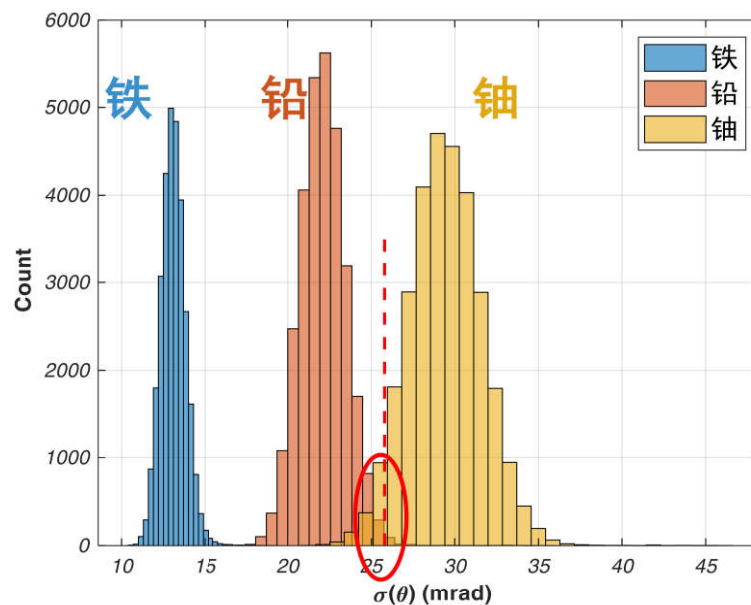
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

精确重建，误判率：2.1%



2分钟缪子通量
4kg的铁、铅和铀区分
误判率<5%

1mm位置分辨率，误判率:4.6%



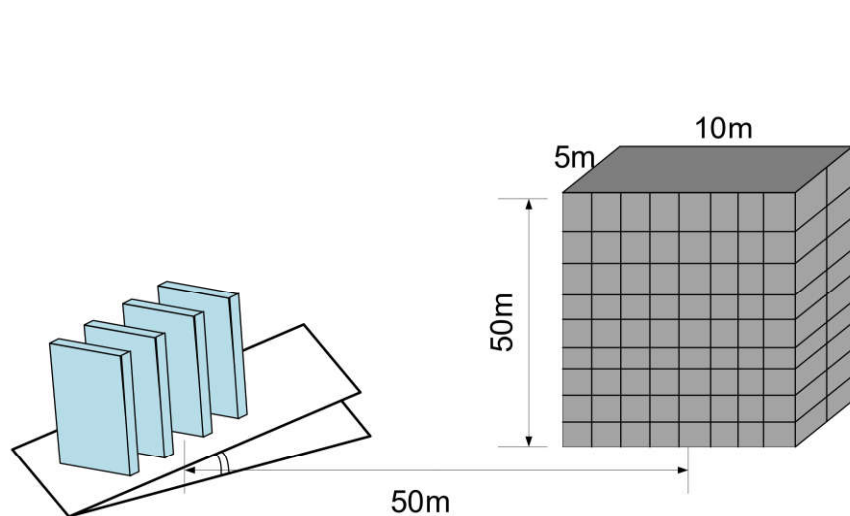
➤位置分辨率需好于1mm

透射成像仿真

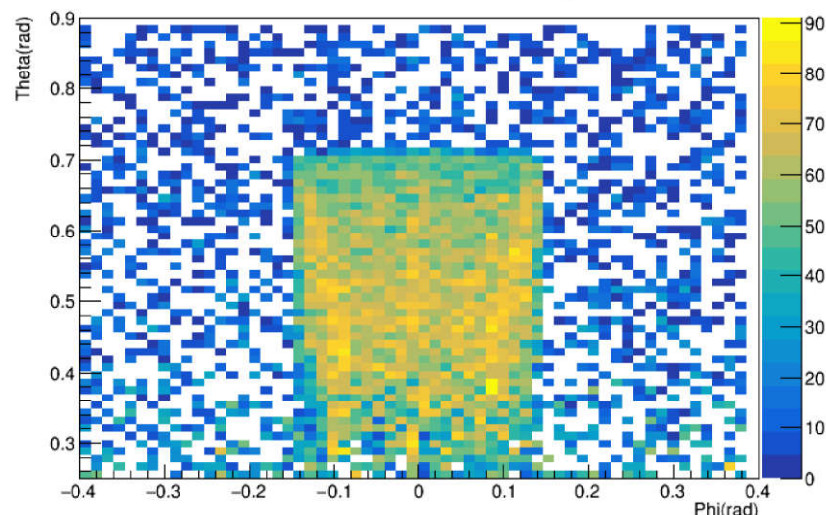


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 目标：在数小时内完成建筑物或山体成像
- 主要影响因素：探测器接收度
 - 透射成像对位置分辨率要求更低
- 仿真条件：40cm×40cm探测器，24h成像时间
- 若采用1m×1m探测器，4小时内可完成成像



40×40cm²探测器24小时仿真结果



图片来源：刘昱林 Muon成像模拟，缪子成像组会2020.10.26.

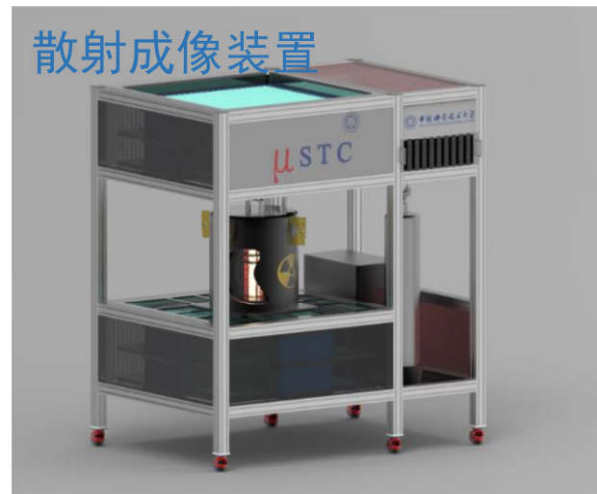
➤ 目标

- 高位置分辨率通用缪子成像系统
- 散射成像
 - 10分钟时间内完成核材料成像
- 透射成像
 - 4小时内完成对山体和建筑物成像

➤ 参数

- 探测面积：1m×1m
- 位置分辨率：百微米量级
- 径迹重建效率好于95%
 - 多层探测器利于提高重建效率
 - 散射成像：8层
 - 透射成像：4层

散射成像装置



透射成像装置



Micromegas探测器



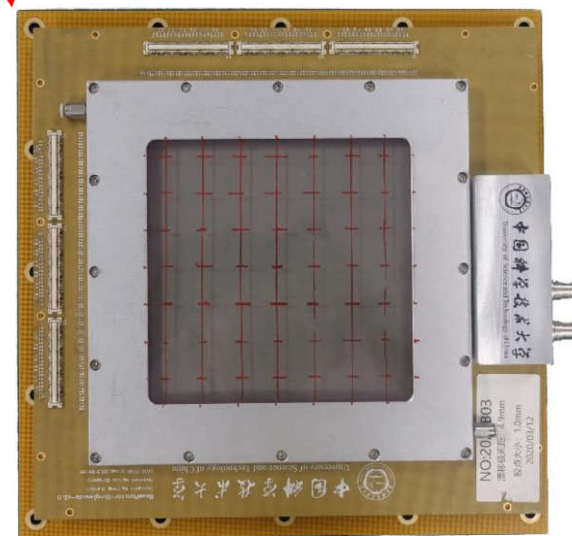
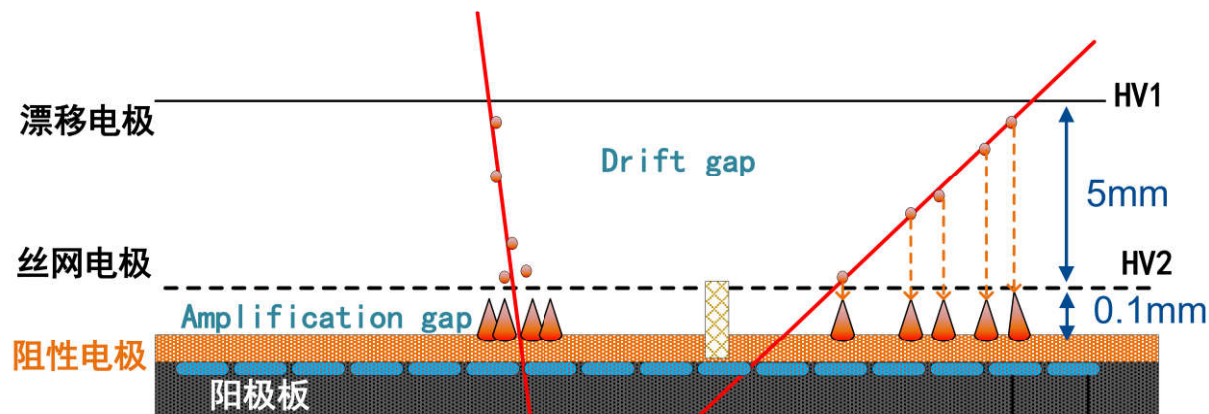
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤构成

- 漂移电极
- 丝网电极
- 阻性电极
- 阳极板

➤性能特点

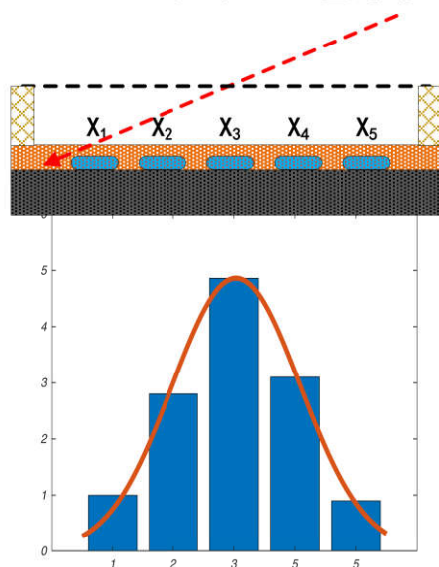
- 增益大: $10^4 \sim 10^5$
- 位置分辨率高: 百微米
- 性能稳定



二维读出Micromegas
条间距 $400\mu\text{m}$

目前已有工艺成熟的Micromegas探测器

- 成像系统目的：精确重建缪子径迹
- 探测器目标：精确记录缪子击中位置
 - 位置重建方法：电荷重心法



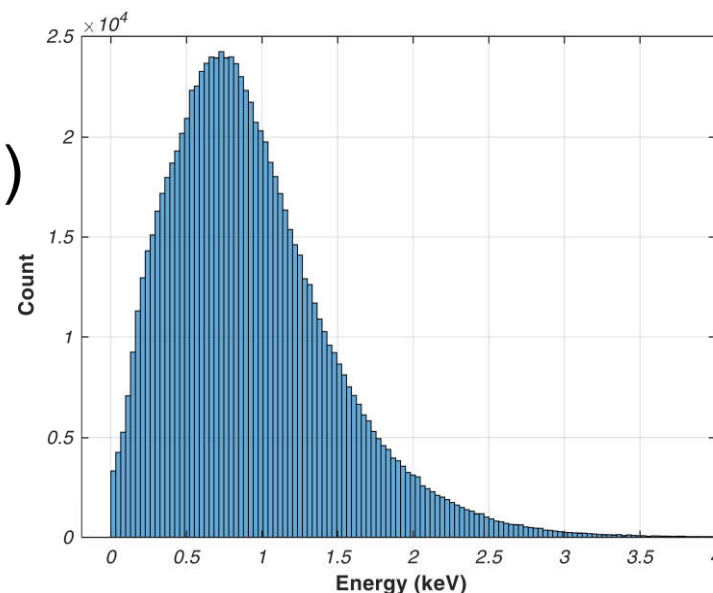
$$x_{hit} = \frac{(\sum x_i \cdot Q_i) I_i}{\sum Q_i}$$

x_i 为击中位置, Q_i 为电荷量
 I_i 为修正项

- 电子学目标
 - 记录信号击中通道
 - 准确测量电荷量

➤ 动态范围

- 能量范围：0.2keV~3.5keV (95%)
- 探测器增益： 10^4
- 电荷测量范围：12fC~190fC
- 分布在2~5通道上
- 单个通道范围：**2.4fC~95fC**



➤ 电子学噪声：**小于0.8fC**

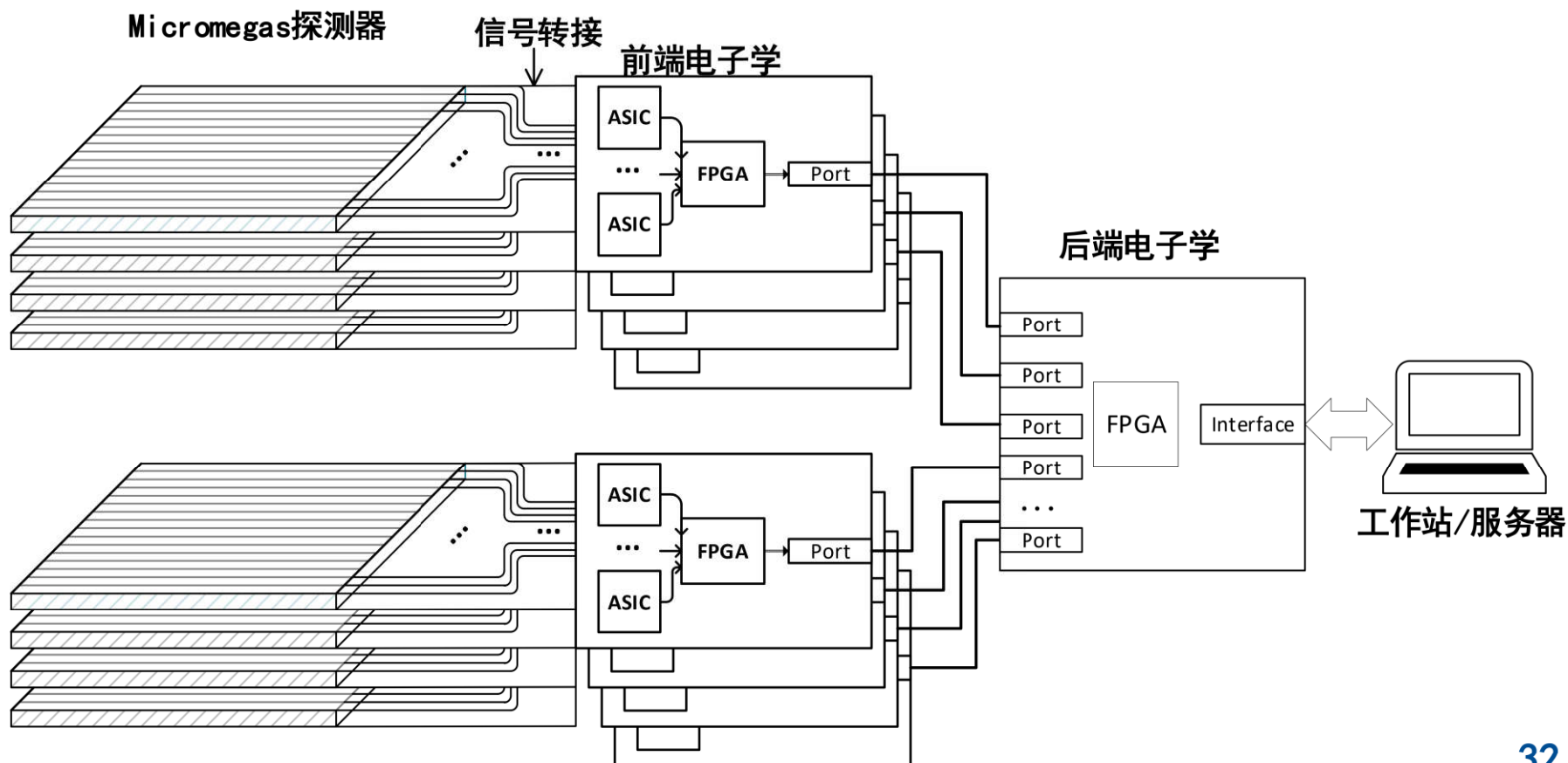
宇宙线缪子在5mm厚氙气中沉积能量
氙气平均电离能30e/eV

➤ 读出通道数

- 探测面积 $1m^2$ ，条宽 $400\mu m$ ，单个探测器5000路
- 散射成像：8层探测器共**40000路**
- 透射成像：4层探测器共**20000路**

➤ 读出电子学系统

- 低噪声、高集成度 → 满足Micromegas读出需求
- 可扩展性和通用性 → 适应不同体量和不同成像场合



目录

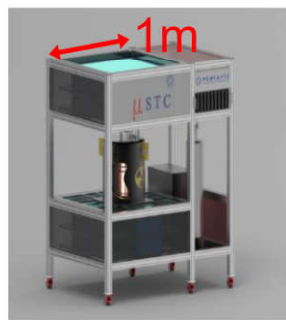


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

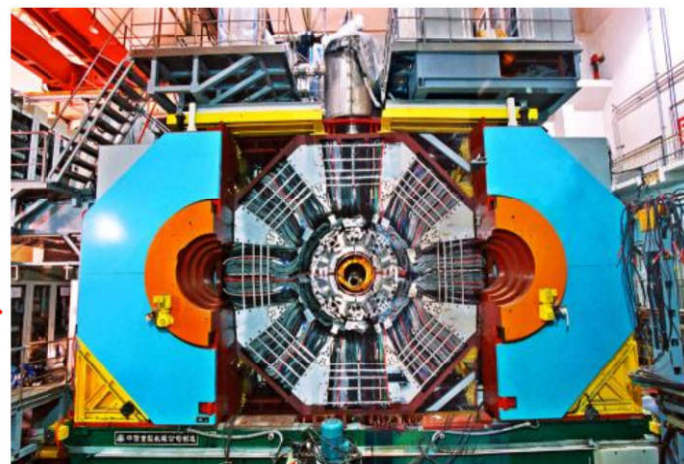
- I. 研究背景
- II. 缪子成像系统分析
- III. 编码读出研究
- IV. 读出电子学研究
- V. 缪子成像实验
- VI. 总结与展望

➤ 面临挑战

- 上万路读出通道数
- 复杂度大、功耗高
- 成本难以接受



散射成像装置



BES III

读出通道数40000路

宇宙线事例特点：

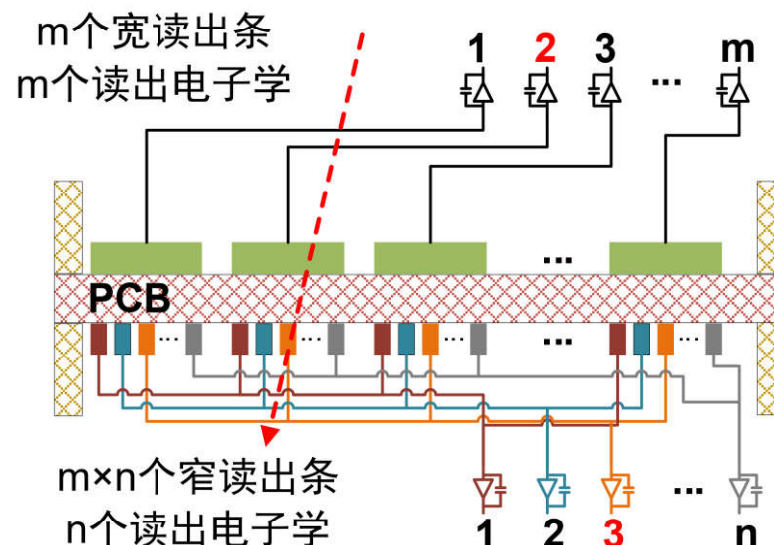
1. 击中位置稀疏
2. 事例率低 $1/(cm^2 \cdot min)$

➤ 解决方案：读出通道复用技术

- 少量读出通道实现大量探测器通道读出
- 减小读出系统规模、降低复杂度和成本

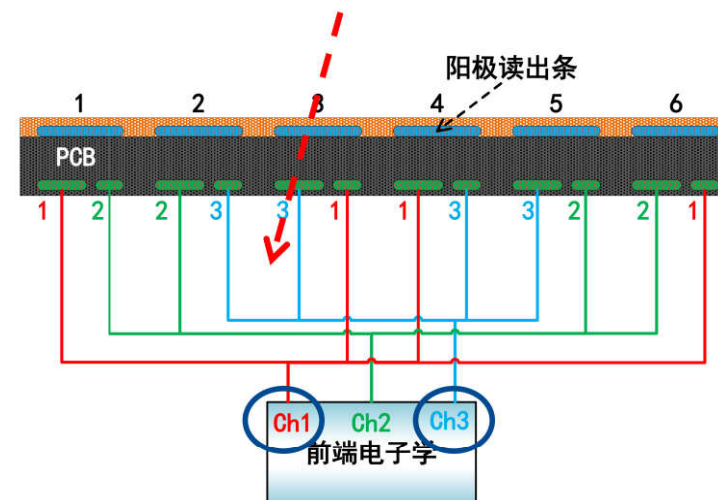
➤ “粗细结合” 读出

- 使用双面Micromegas
- 上下探测器同时产生电离信号
- $m \times n$ 个探测器通道
- $m+n$ 个电子学读出



➤ 电荷感应编码读出

- 额外一层面积不同的感应条
- 比较感应条电荷量大小



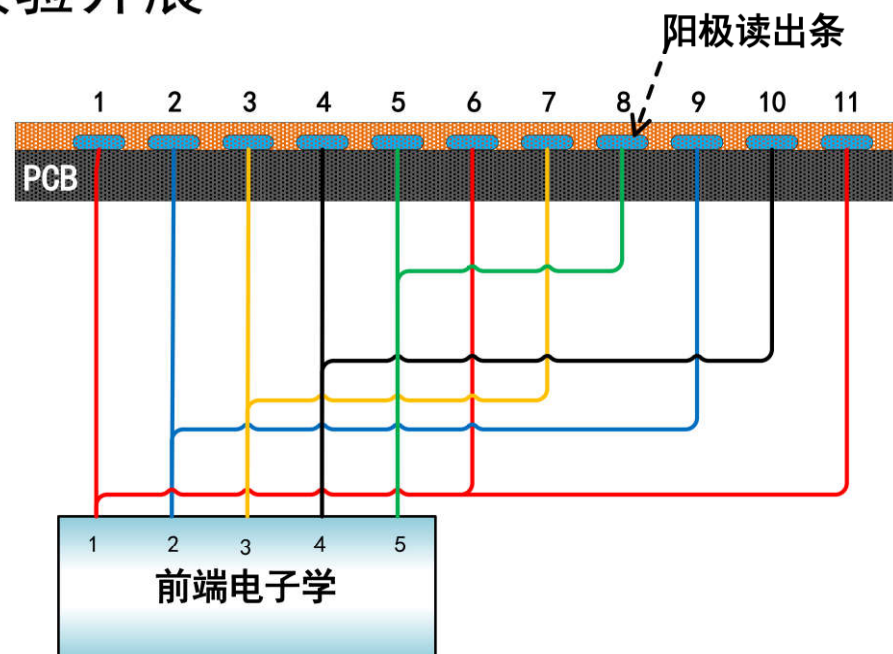
两种方案均需要对探测器进行特殊设计

➤ 直接编码读出

- 一个电子学通道连接多个探测器通道
- 探测器电离信号分布在相邻的探测器条上
- 探测器信号击中通道是连续的
- 独立于探测器设计，利于实验开展

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

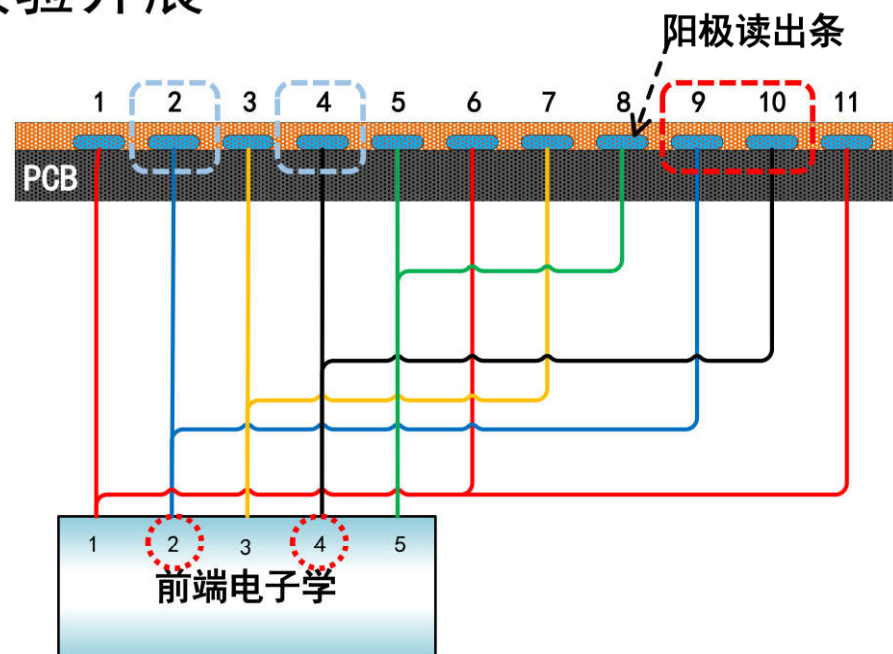


➤ 直接编码读出

- 一个电子学通道连接多个探测器通道
- 探测器电离信号分布在相邻的探测器条上
- 探测器信号击中通道是连续的
- 独立于探测器设计，利于实验开展

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



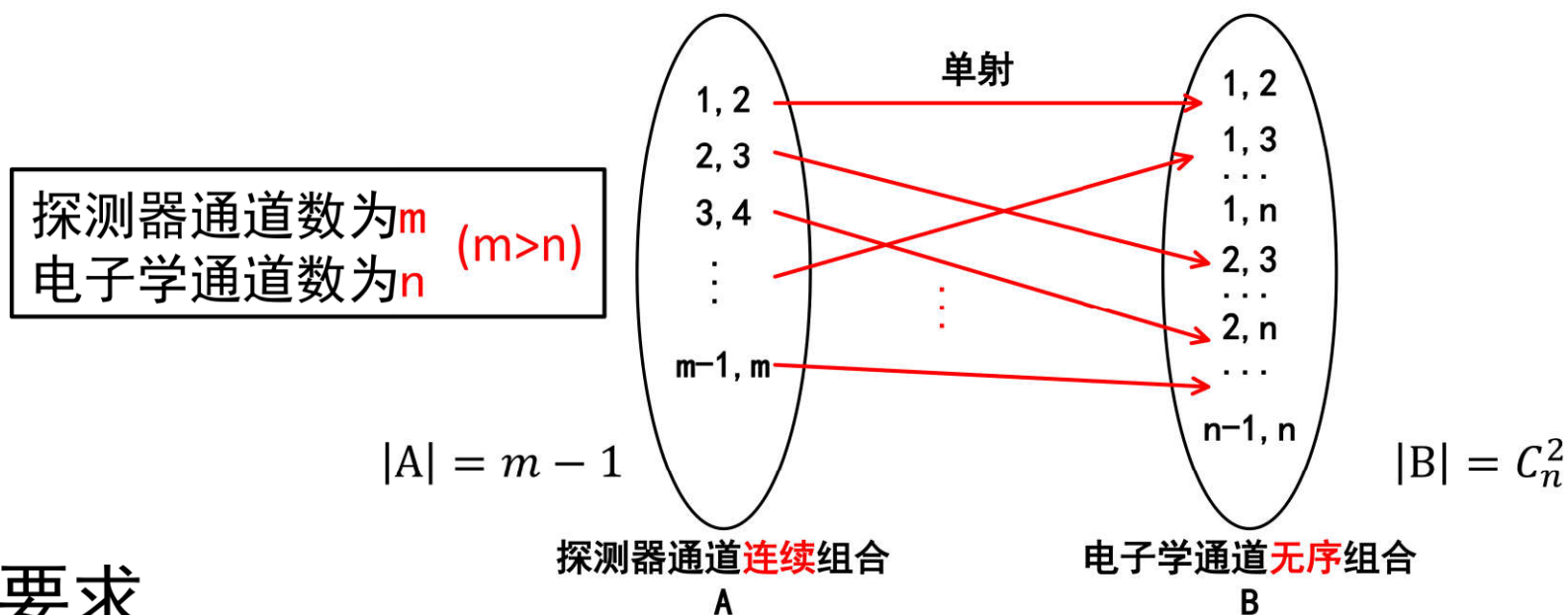
直接编码规则



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

➤规则

- 建立集合A到集合B的**单射**
- 每个探测器通道对应**唯一**一个电子学通道
- 一个电子学通道对应**多个**探测器通道



➤要求

- 至少**击中两个连续的**探测器通道

直接编码的数学模型

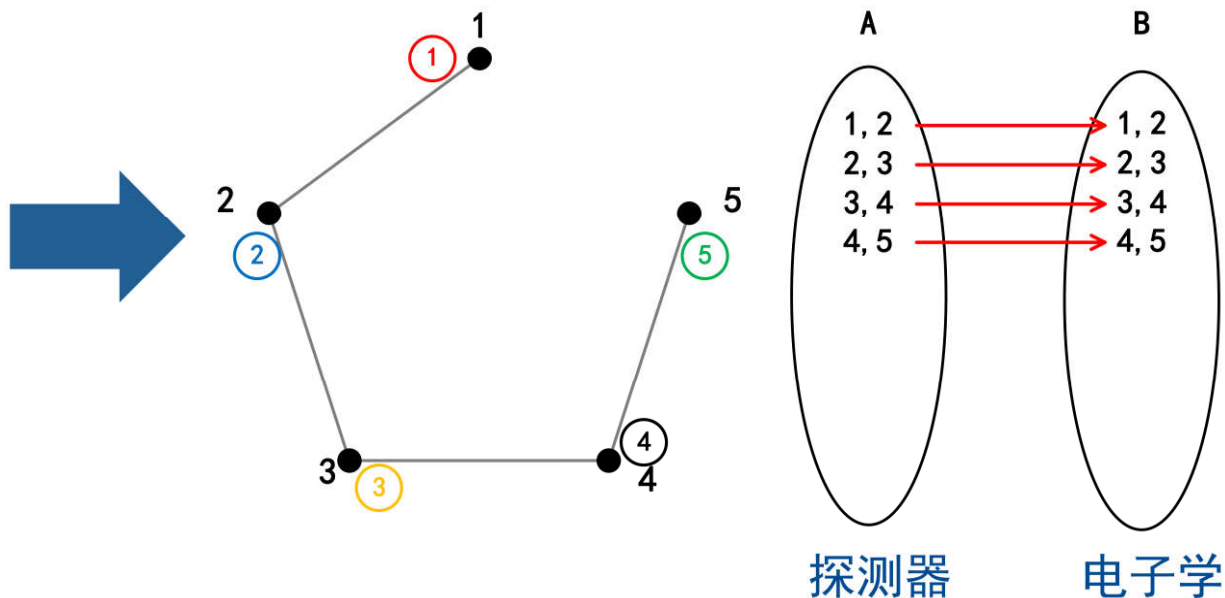
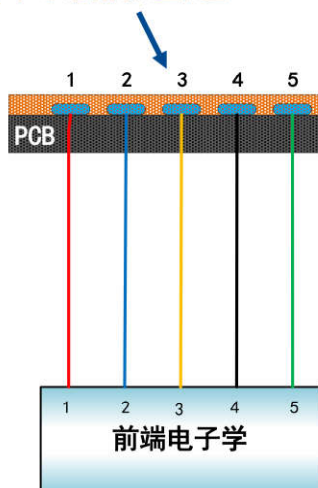


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对的电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

探测器通道



直接编码的数学模型

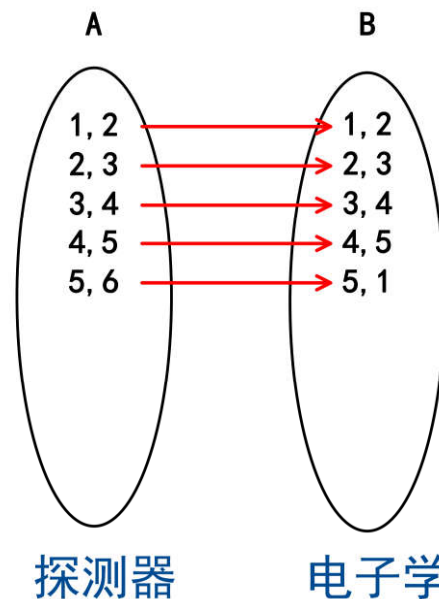
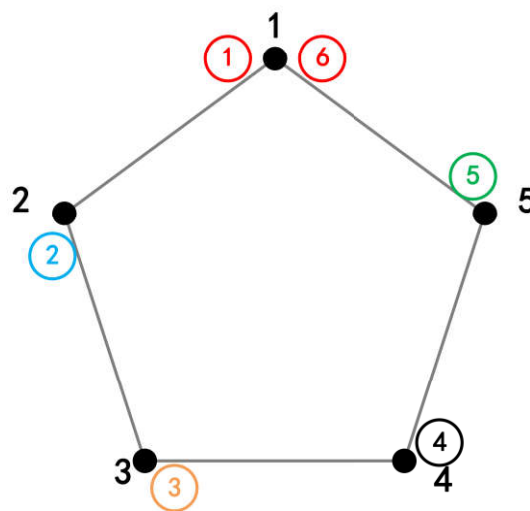
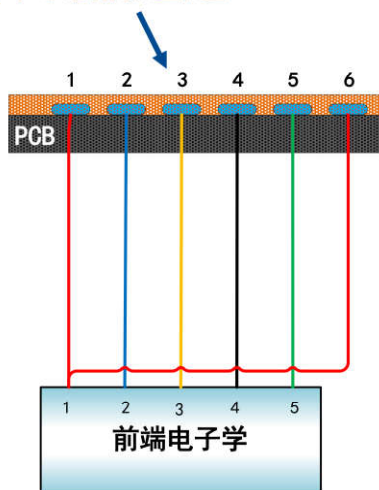


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

探测器通道



直接编码的数学模型

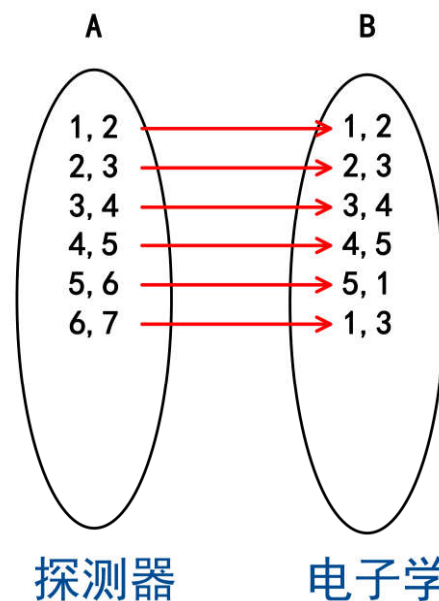
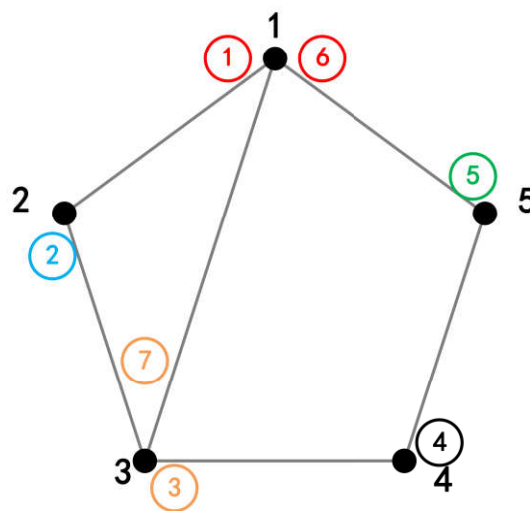
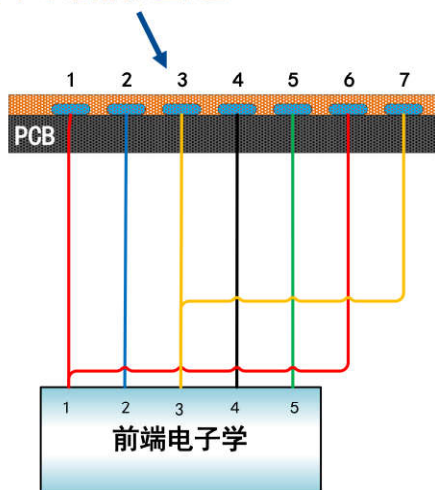


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

探测器通道



直接编码的数学模型

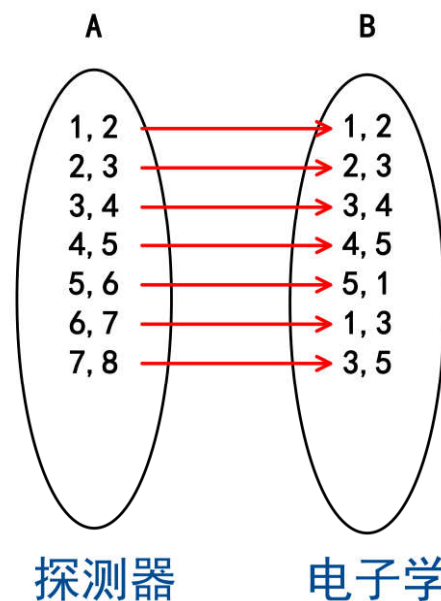
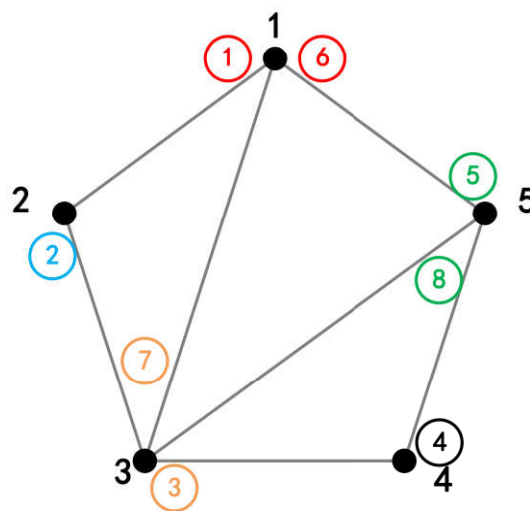
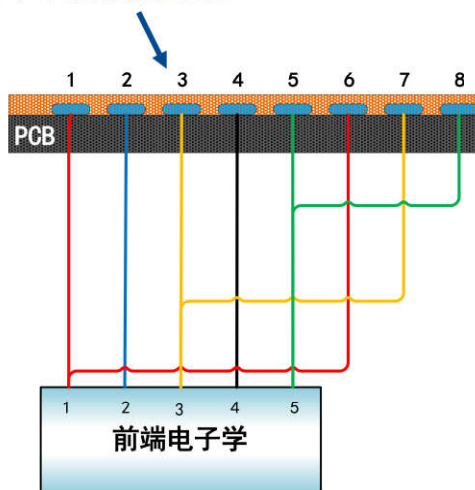


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

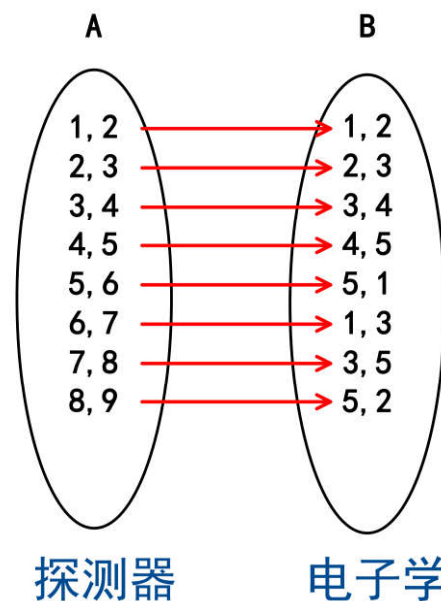
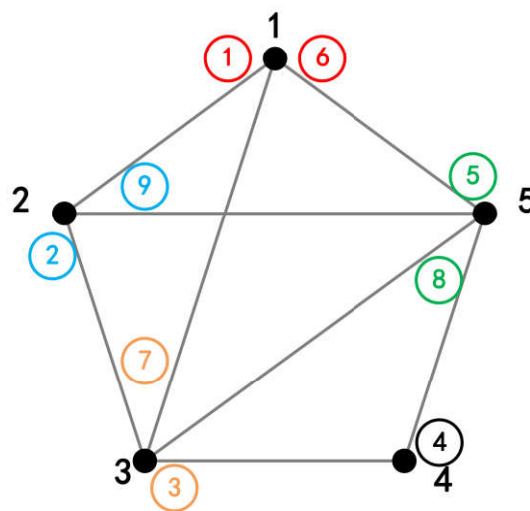
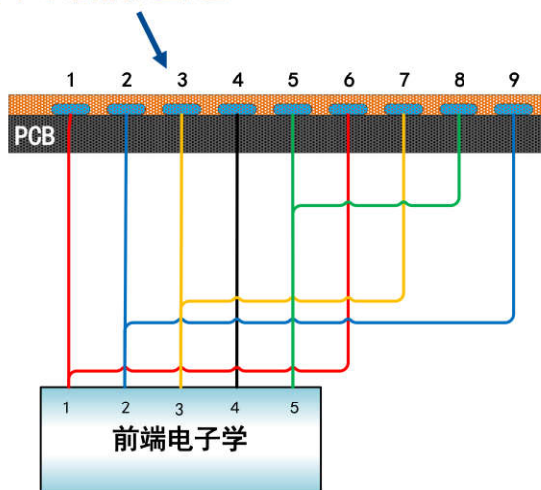
探测器通道



➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

探测器通道



直接编码的数学模型

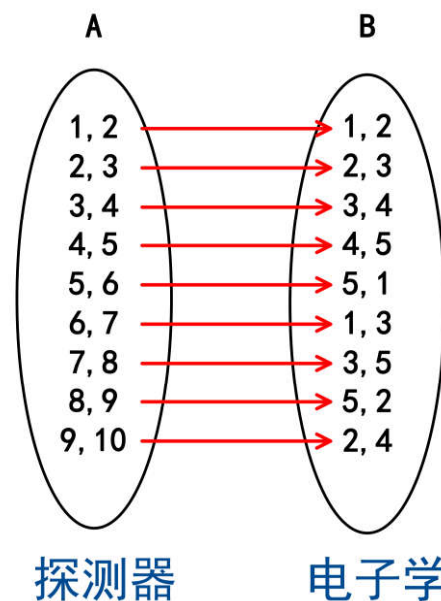
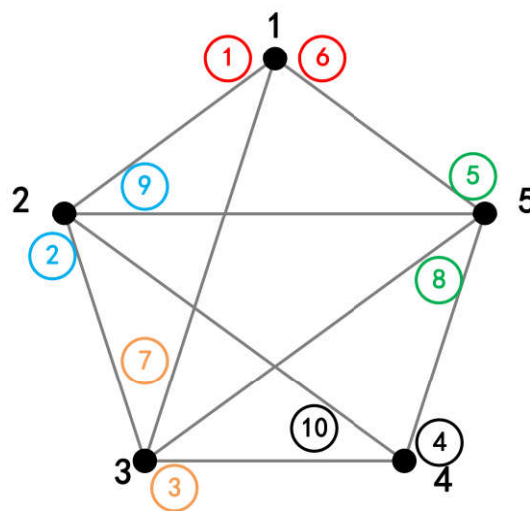
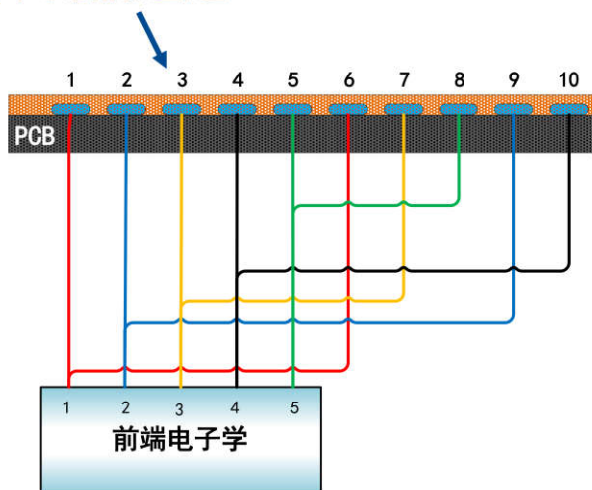


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

探测器通道



直接编码的数学模型

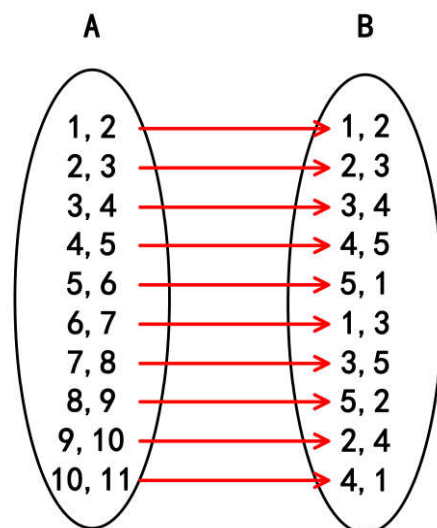
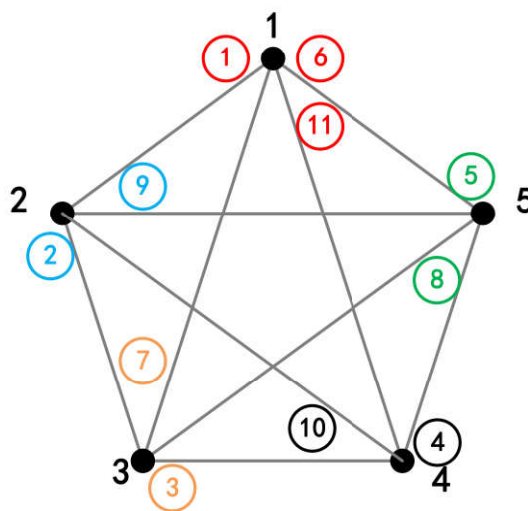
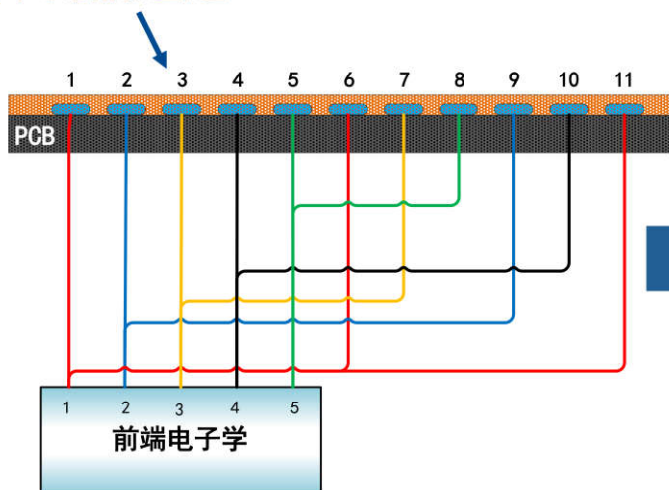


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 编码图

- 电子学通道：顶点，探测器通道：圆圈数字①②...
- 一对连续的探测器通道映射到一对电子学通道
- 两点间连线表示该电子学通道组合已被利用

探测器通道



探测器

电子学

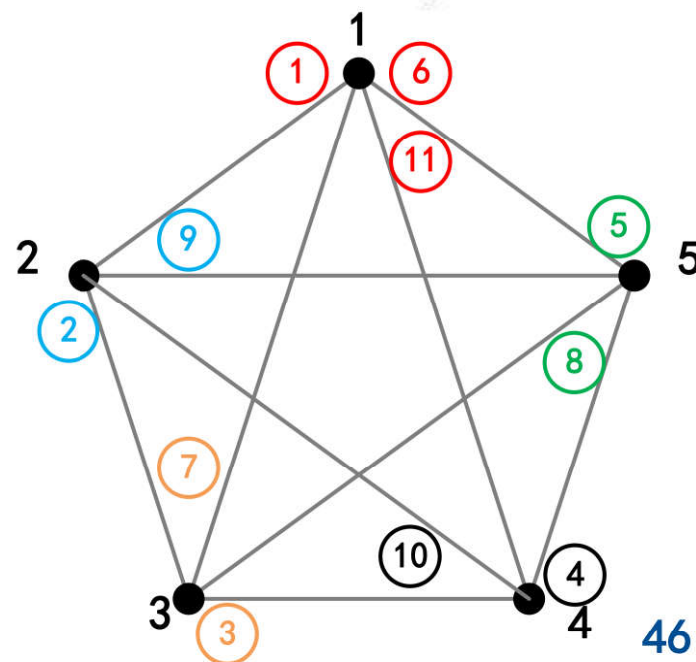
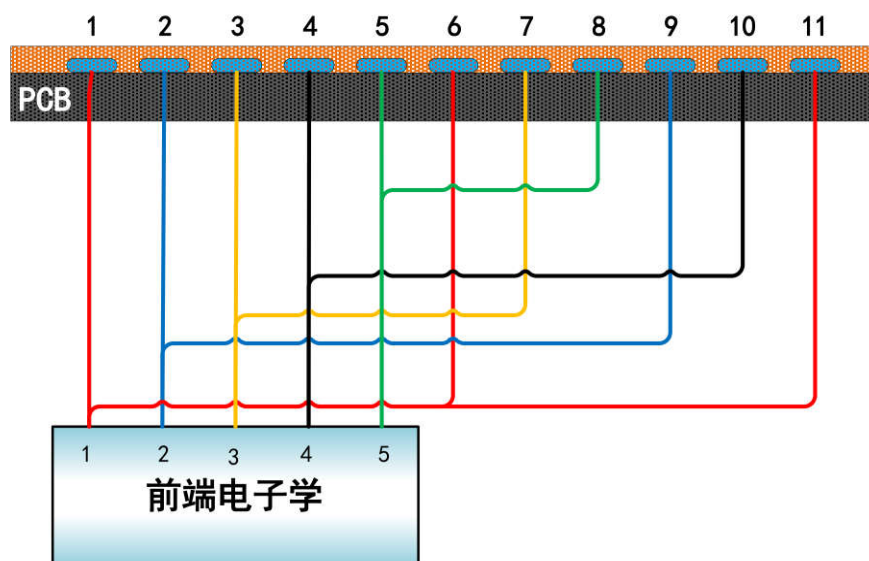
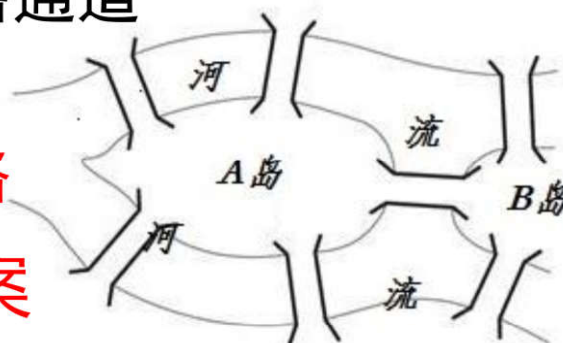
编码图为电子学通道和探测器通道对应关系

七桥问题→一笔画问题：
从一个点出发，不经过重复的边回到原点

➤ 编码图构造方法

- 电子学通道为顶点，圆圈数组为探测器通道
- 两两之间连线表示该组合被使用
- 编码方案为一笔画完所有边→欧拉回路

➤ 欧拉回路不唯一，存在多种编码方案



➤优点

- 升序增加、可继承、可扩展

row	list of encoded multiplexing connections
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	$1_{c_{2k-1}^2+1}, (2k)_{c_{2k-1}^2+2}, 2_{c_{2k-1}^2+3}, (2k+1)_{c_{2k-1}^2+4}, \dots \dots (2k-1)_{c_{2k-1}^2-2}, (2k)_{c_{2k-1}^2-1}, (2k+1)_{c_{2k-1}^2}$ $1_{c_{2k+1}^2+1}$

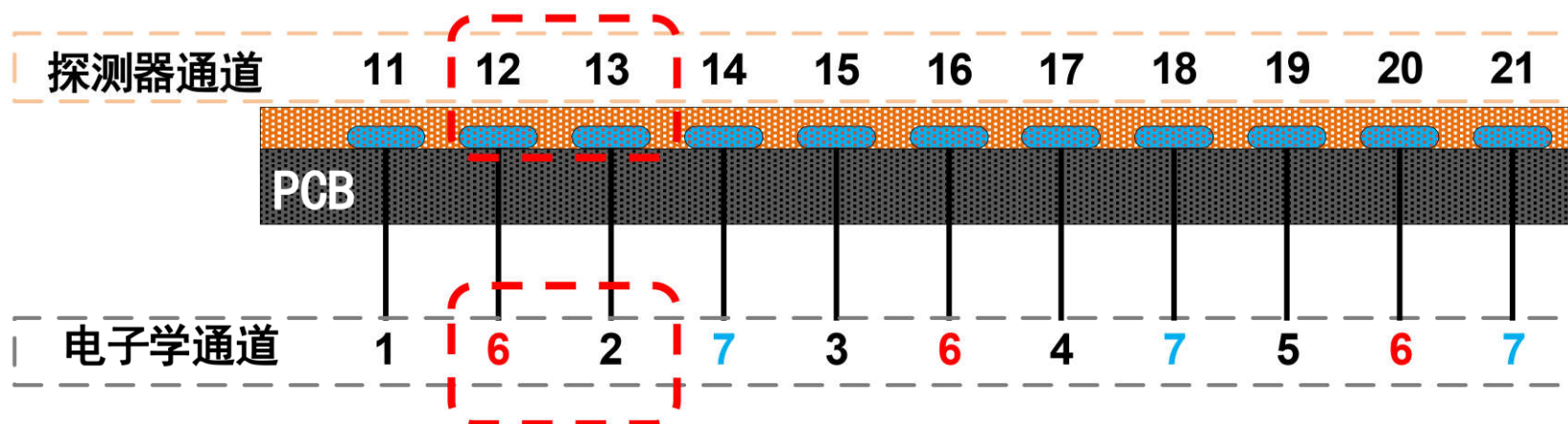
➤缺点

- 击中通道数多时，解码结果可能**错误**
 - 电子学读出: 3, 6, 4, 7通道
 - 可能的解码结果: {15, 16, 17, 18} 或 {14, 15, 16, 17, 18}
- 电子学通道**复用比率不均匀**

位置重建**不确定性增加!**

➤ 读出电子学通道复用间隔太小

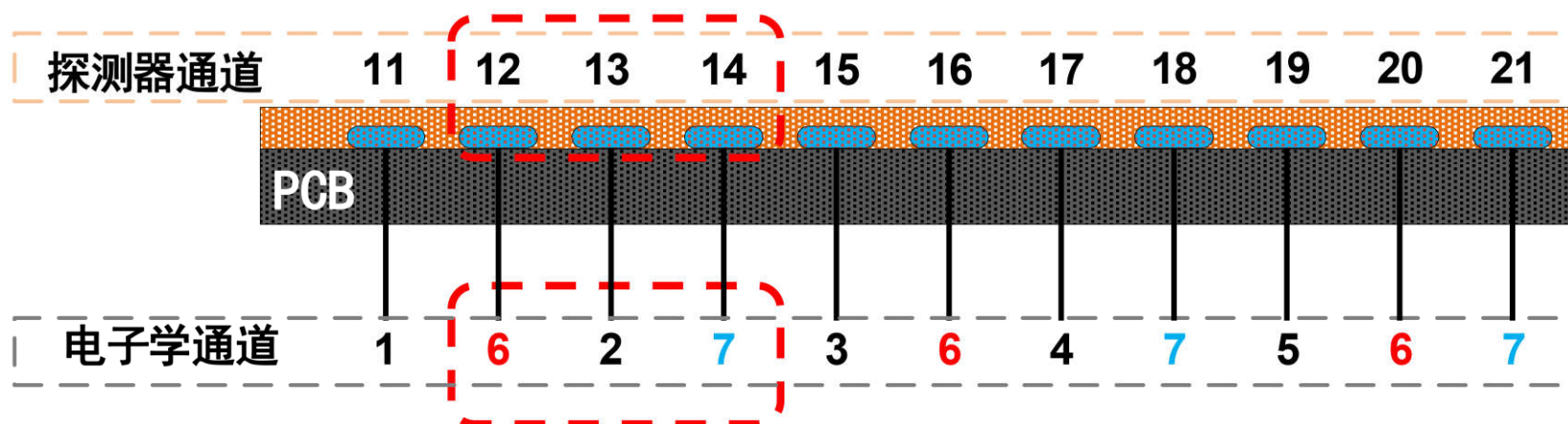
- 每5个探测器通道，电子学通道会重复一次
- 探测器的击中信息丢失



2个通道击中，能正确解码

➤ 读出电子学通道复用间隔太小

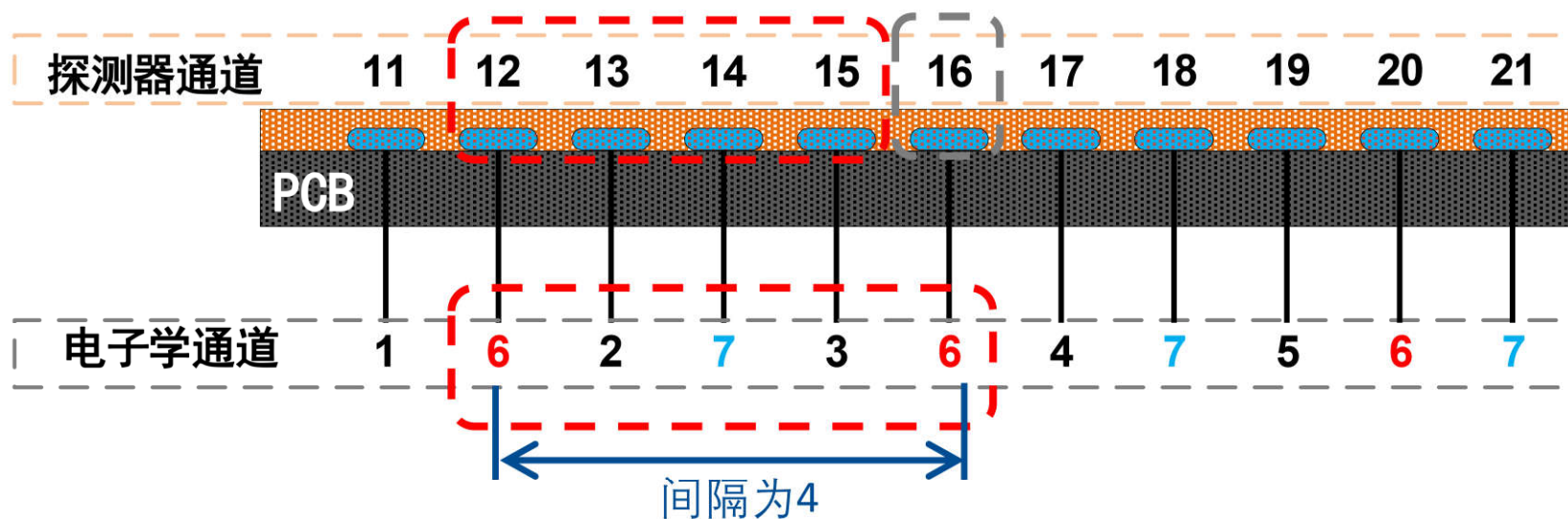
- 每5个探测器通道，电子学通道会重复一次
- 探测器的击中信息丢失



3个通道击中，能正确解码

➤ 读出电子学通道复用间隔太小

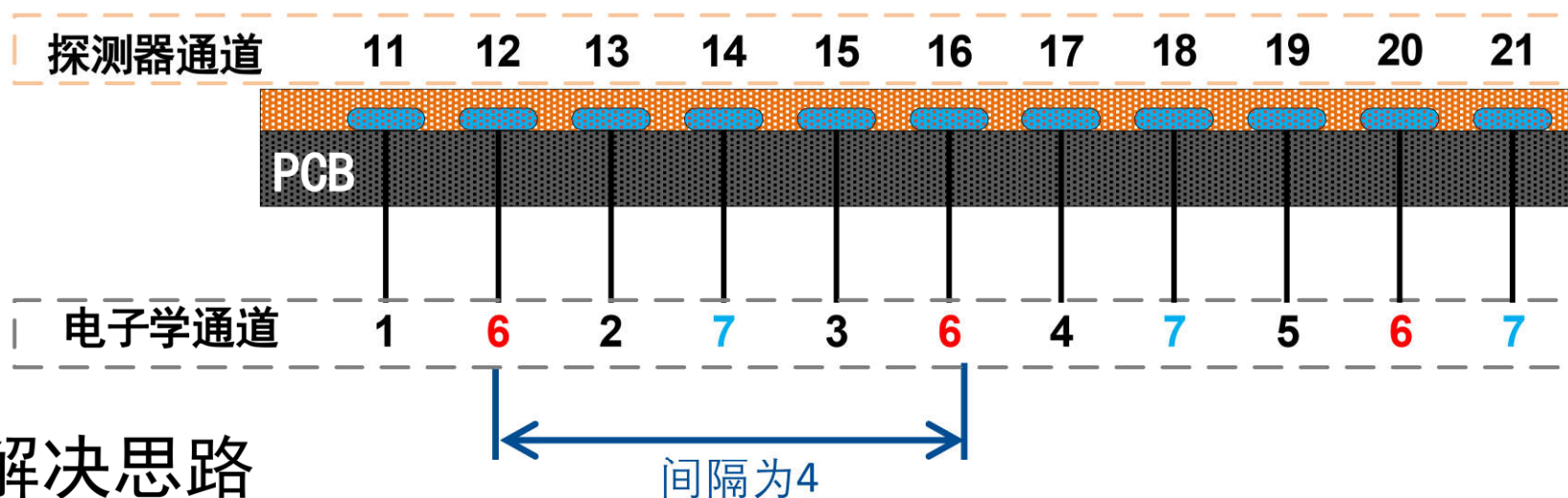
- 每5个探测器通道，电子学通道会重复一次
- 探测器的击中信息丢失



4个通道击中，**解码出现错误**

➤ 读出电子学通道复用间隔太小

- 每5个探测器通道，电子学通道会重复一次
- 探测器的击中信息丢失



➤ 解决思路

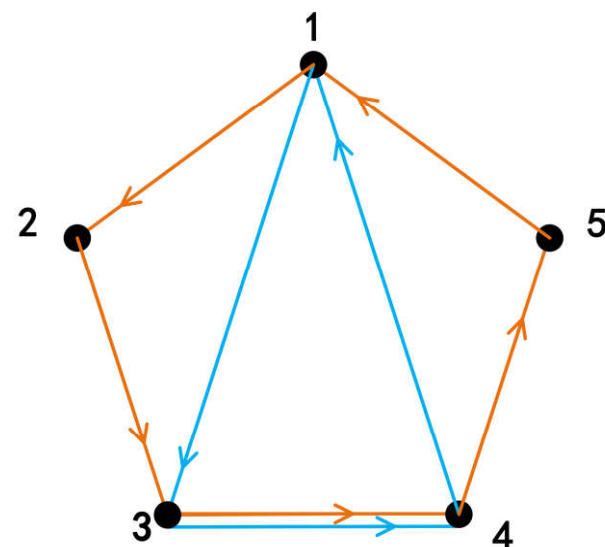
- 电子学通道复用间隔尽可能大
- 最佳方案: 超过单次事例击中探测器通道数

➤ 优化原理

- 编码方案等效于构造欧拉图
- 边的数目为欧拉子回路长度
- 子回路长度即为读出电子学复用间隔

➤ 优化要求

- 电子学通道**复用间隔尽可能大**
→ 最小子回路的长度尽可能大
- 电子学通道**均匀读出**
→ 每个顶点都要被遍历相同次数



橙色子回路长度：5
蓝色子回路长度：3

➤ 问题描述

- 给定 n 个顶点，构造欧拉回路，使得其任意子回路长度最大
- 每条子回路都要遍历所有顶点

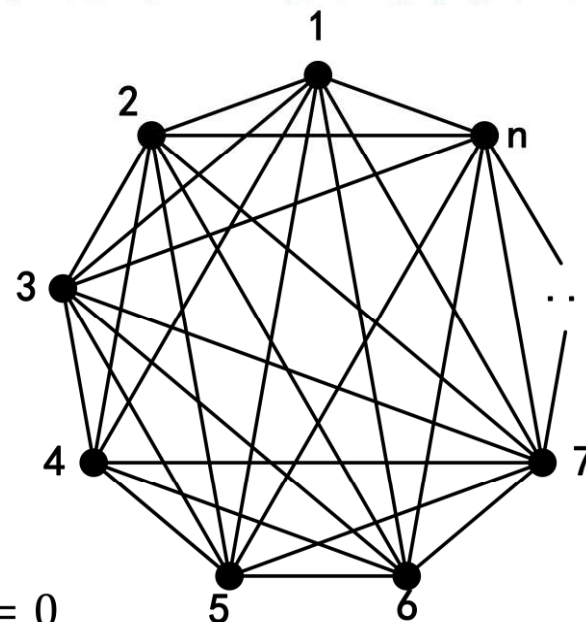
➤ 数学方案

- 构造哈密顿回路
- n 个顶点的欧拉图
 - 最短欧拉子回路长度为 $n-4$

$$H(k): n-1 \rightarrow v_0(k) \rightarrow v_1(k) \rightarrow \cdots \rightarrow v_{n-2}(k) \\ k \in (0, 1, \dots, n-2)$$

$$\text{其中 } v_i(k) = \begin{cases} k & \text{if } i == 0 \\ (v_{i-1}(k) + i) \bmod (n-1) & \text{if } i \% 2 == 1 \\ (v_{i-1}(k) - i) \bmod (n-1) & \text{if } i \% 2 == 0 \end{cases}$$

$$\text{目标回路: } H_0 \rightarrow H_2 \rightarrow \cdots \rightarrow H_{(n-5)/2} \rightarrow H_{(n-3)/2} \rightarrow H_{(n-3)/2-2} \rightarrow \cdots \rightarrow H_1 \rightarrow (n-1)$$





➤ 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

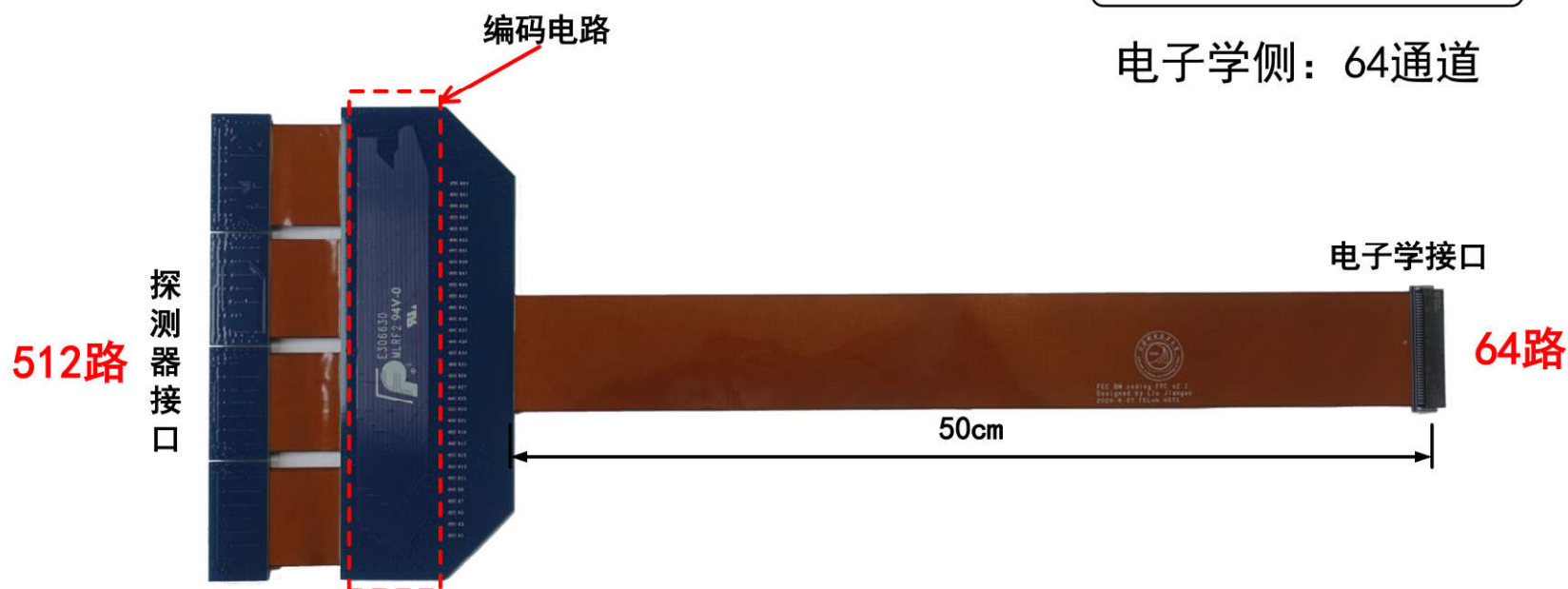
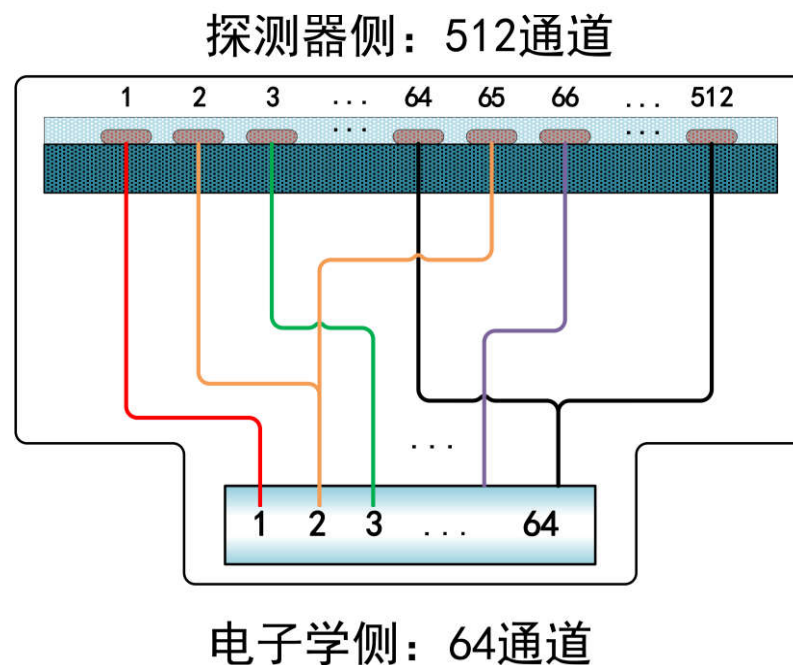
- 通道均匀利用

- 任意子回路具有相同性质

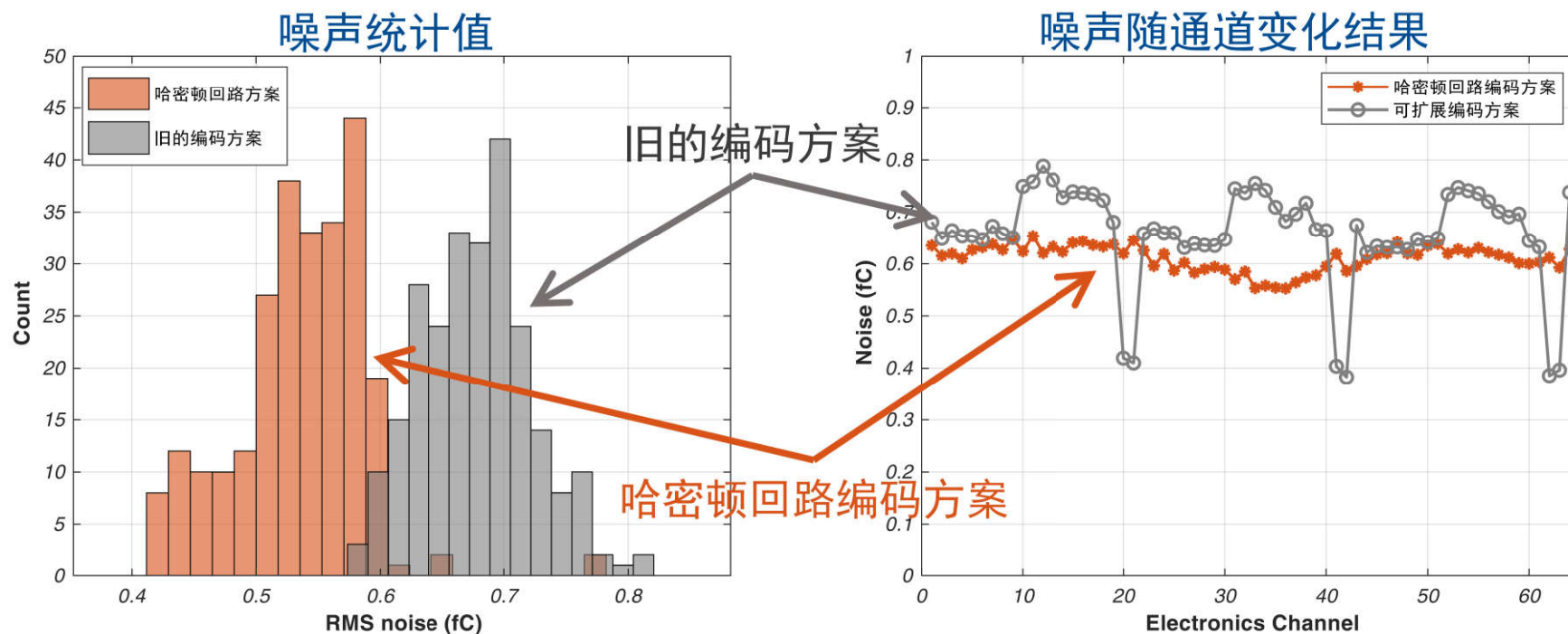
- 不损失探测器信息

➤ 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——对应
 - 与直接读出方案等效



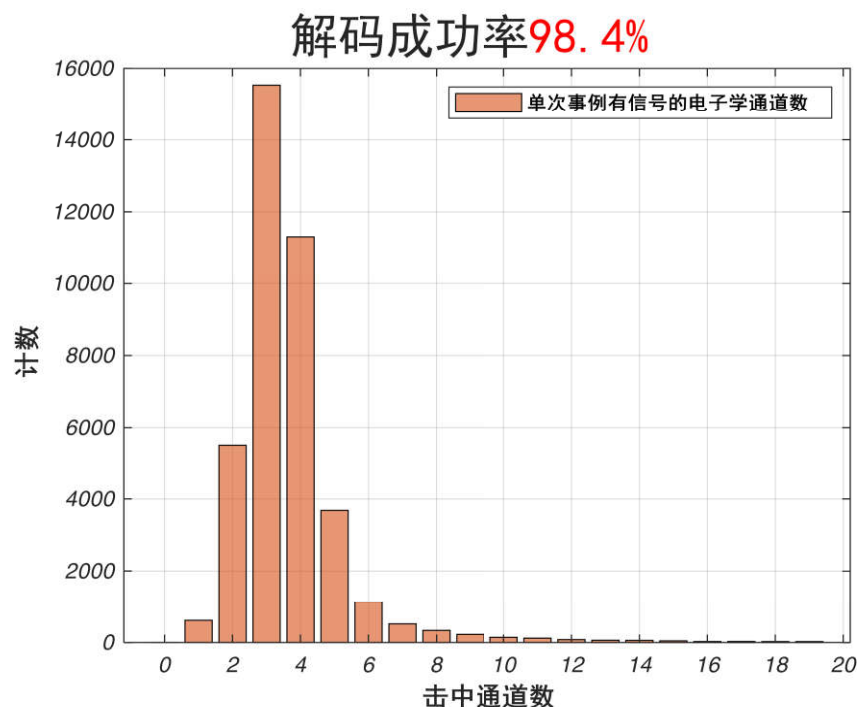
- 探测器电容增大引入额外噪声
- 哈密顿回路方案噪声小于 $0.6fC$ 、分布更均匀
 - 满足实验需求
 - 通道性能一致性更好，更利于解码



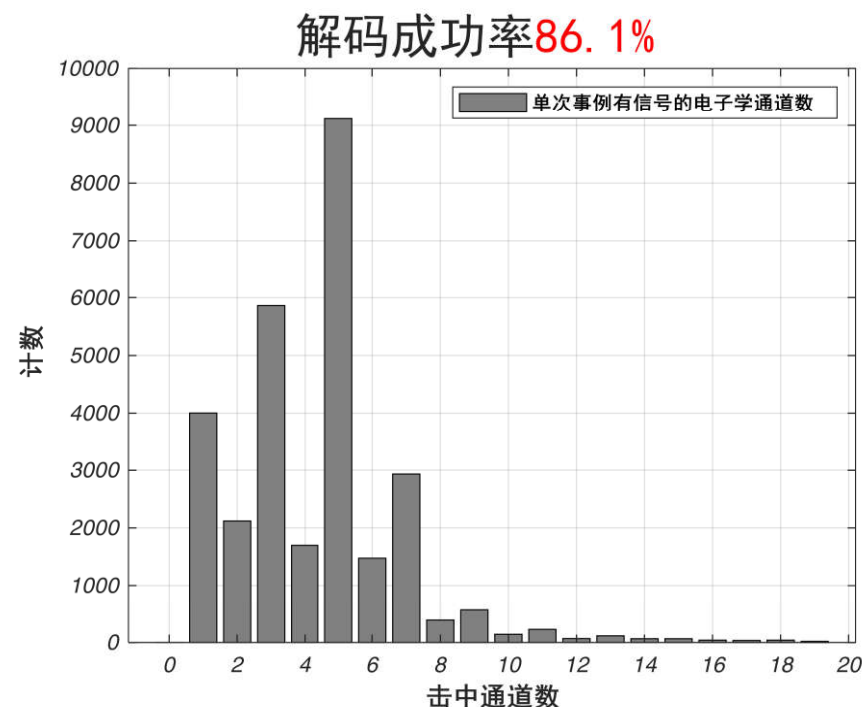
➤ 击中通道测试

- 测试条件：利用Micromegas测量宇宙线缪子击中
- 成功解码条件：至少两个通道有信号

➤ 哈密顿回路编码方案几乎不损失事例



哈密顿回路编码方案



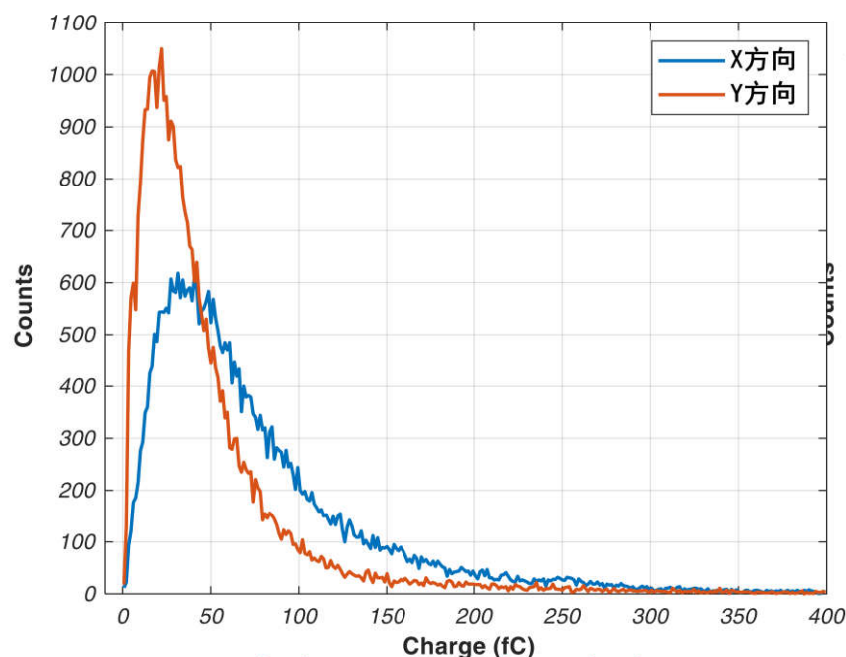
旧的编码方案

➤测试方法

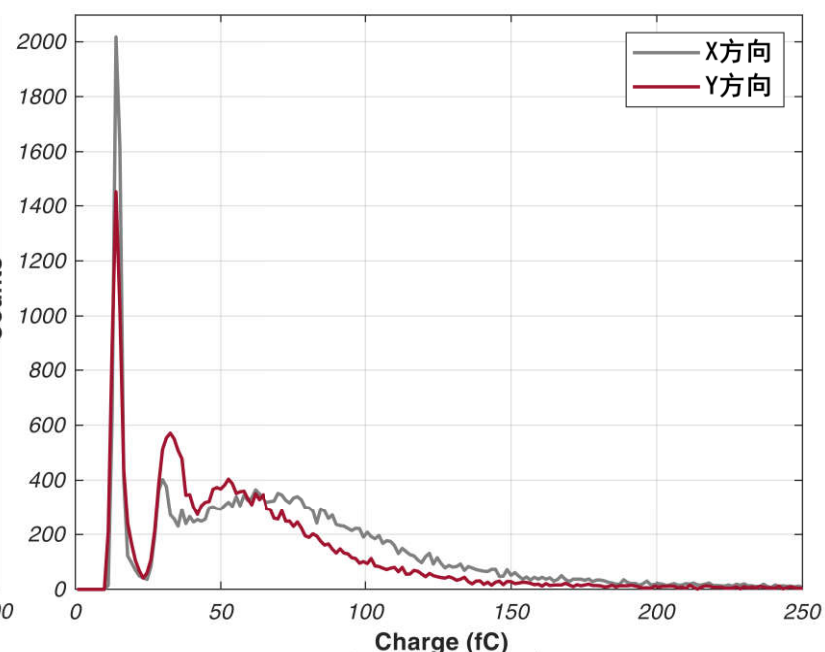
- 测量MIP在探测器中沉积能量
- 将成功解码通道电荷量加和

➤电荷测量准确性将影响最终位置分辨率

- 哈密顿回路编码方案能**正确重建电荷量分布**



哈密顿回路编码方案



旧的编码方案

目录



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

- I. 研究背景
- II. 缪子成像系统分析
- III. 编码读出研究
- IV. 读出电子学研究
- V. 缪子成像实验
- VI. 总结与展望

➤ 缪子成像读出需求

- 多通道读出，编码后：2500路~5000路
- 满足散射成像、透射成像两种工作模式
- 适应不同成像场合、不同面积探测器读出需求

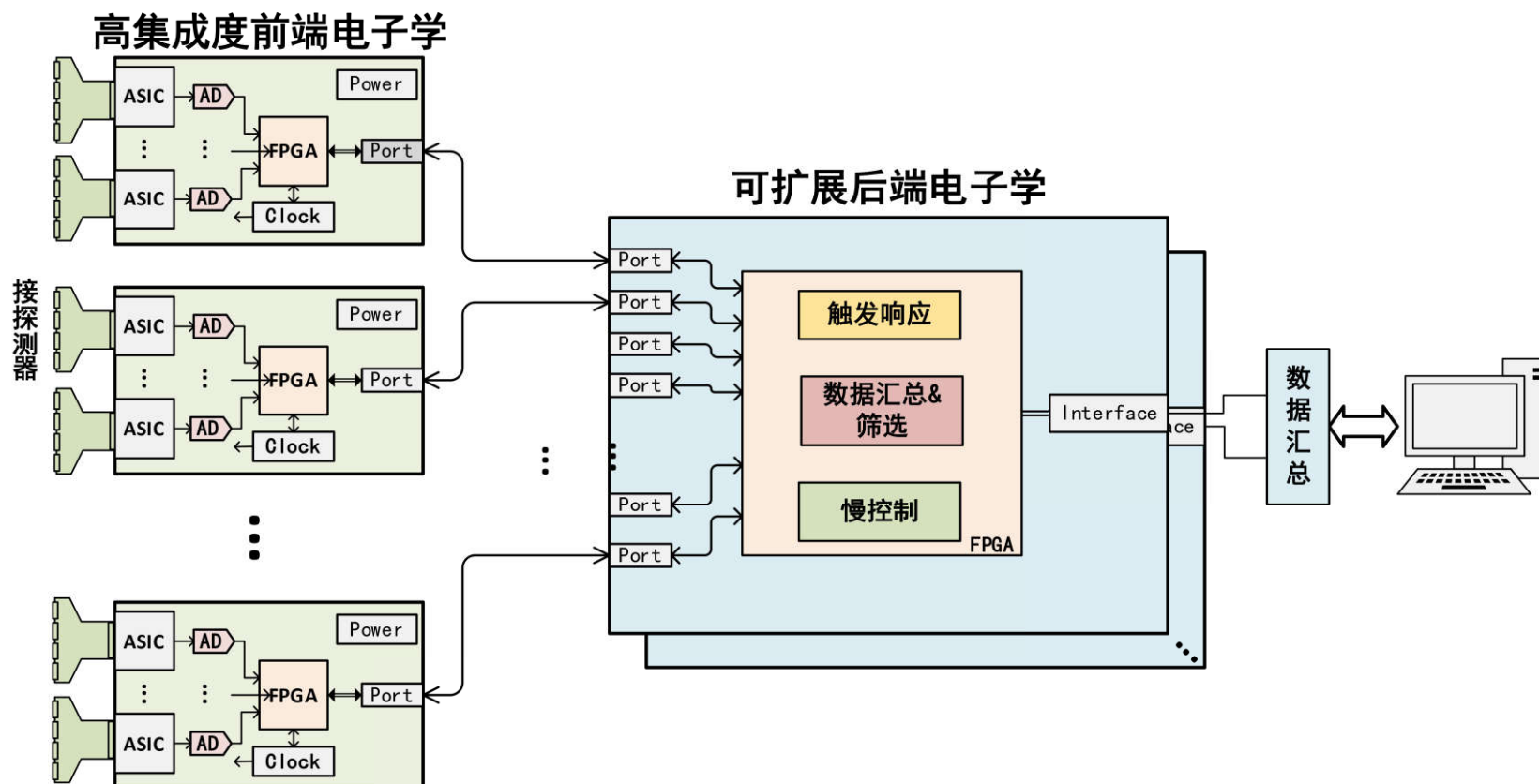


➤ 通用可扩展的读出电子学系统

- 模块化设计，提高系统集成度
- 协议和接口可扩展设计，适应不同成像模式

► 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

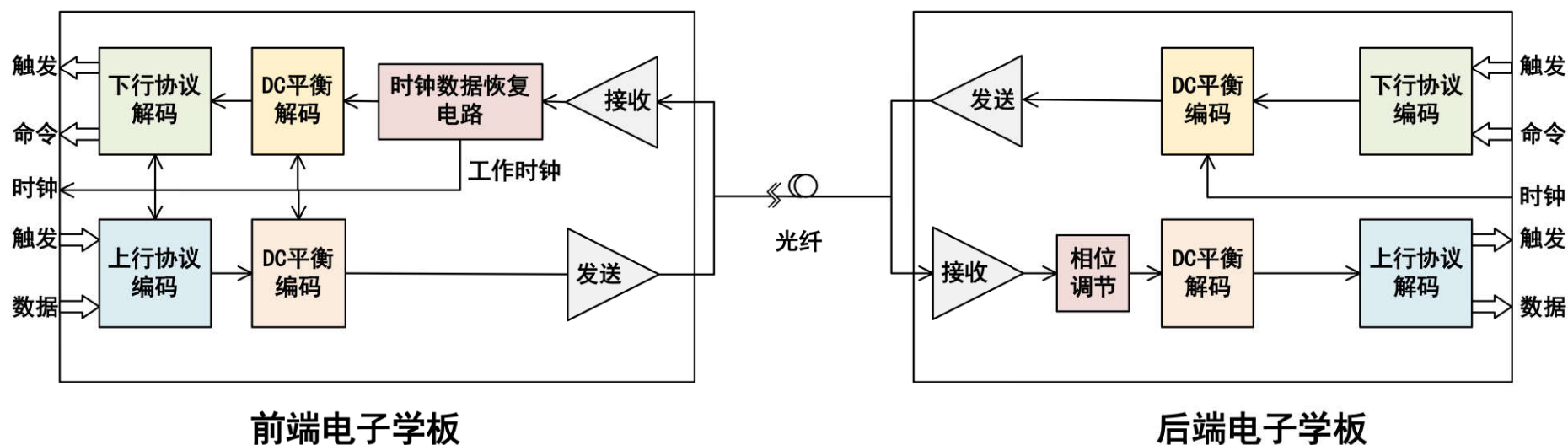


➤ 光纤链路传输

- 传输距离长、连接简单、体积小

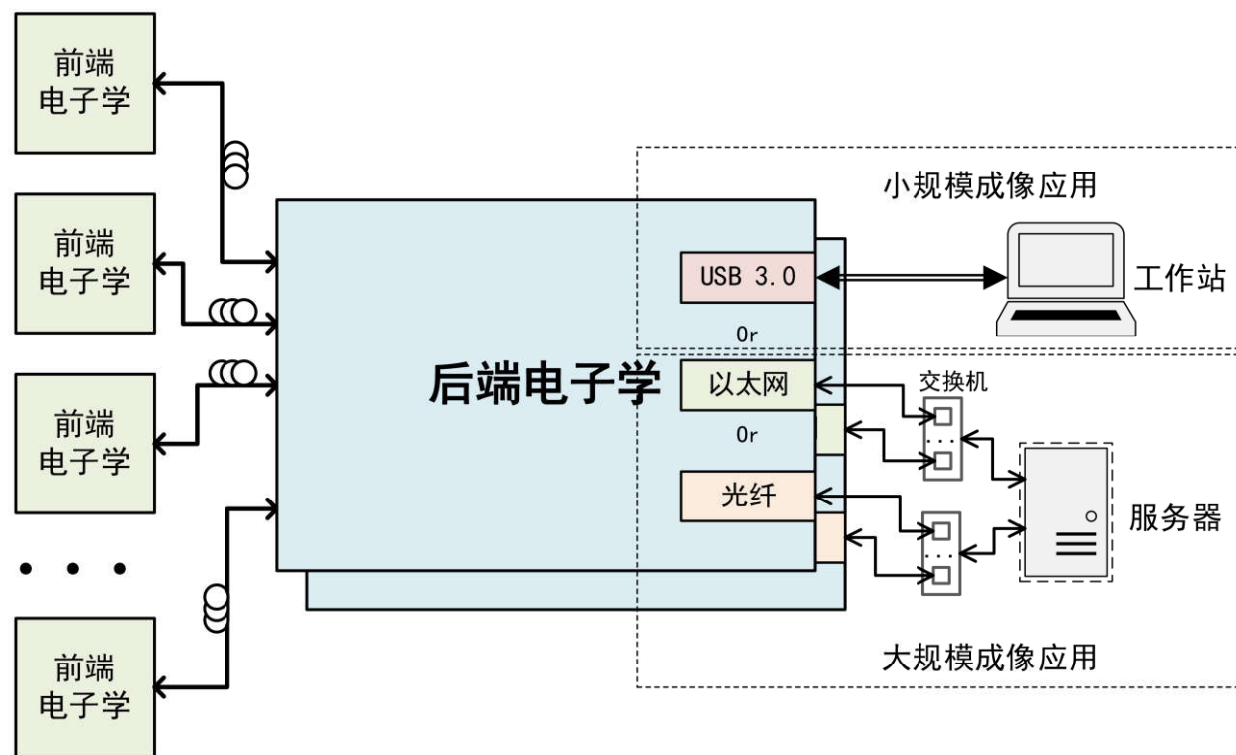
➤ 自定义传输协议

- FPGA普通IO实现：**集成度高、可扩展**
- 单根光纤实现**数据和时钟传输**



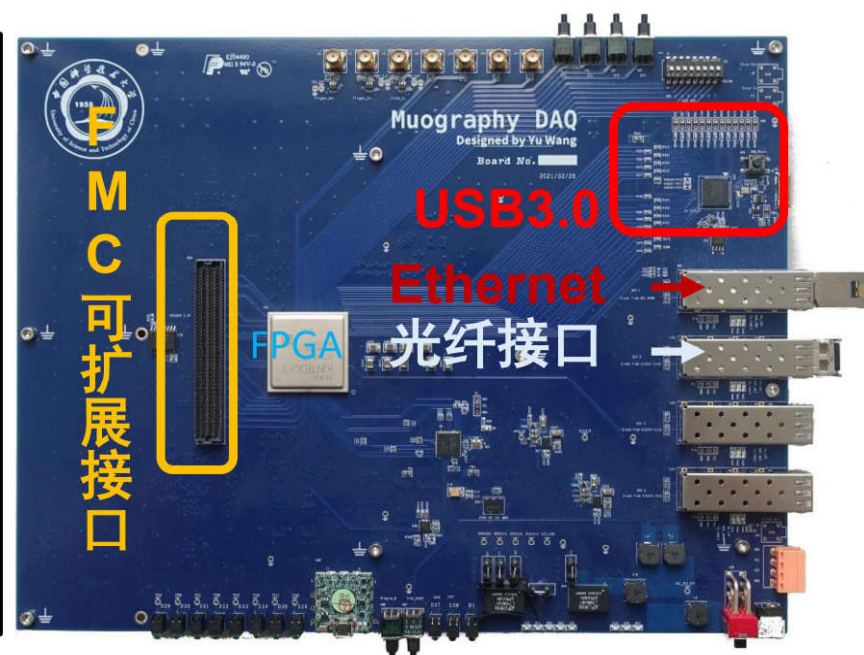
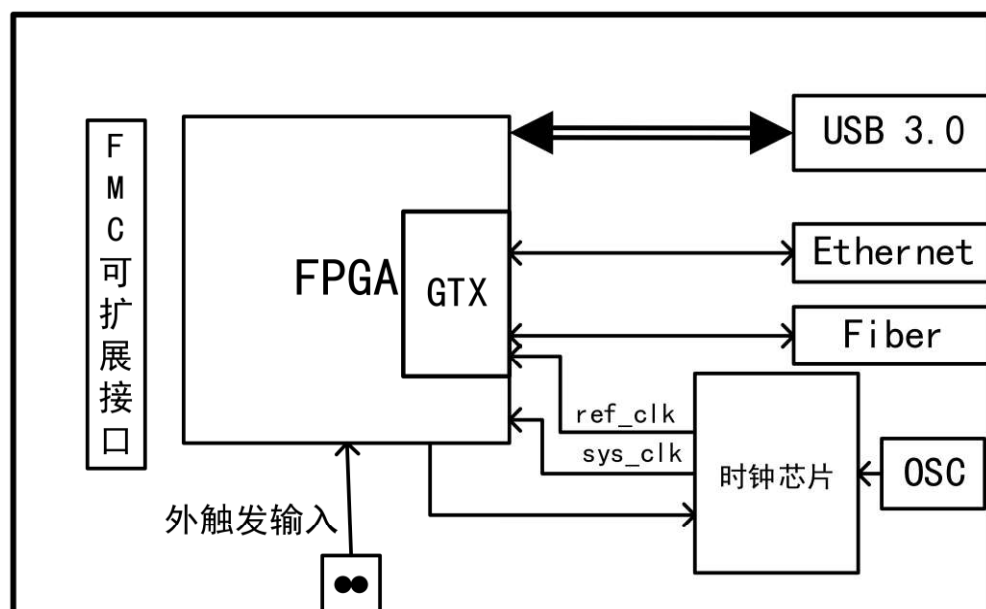
➤ 不同数据传输接口

- 针对成像应用和成像规模灵活可配置
- 可扩展至未来更大规模成像实验



➤ 子母板设计

- 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



前端电子学板介绍

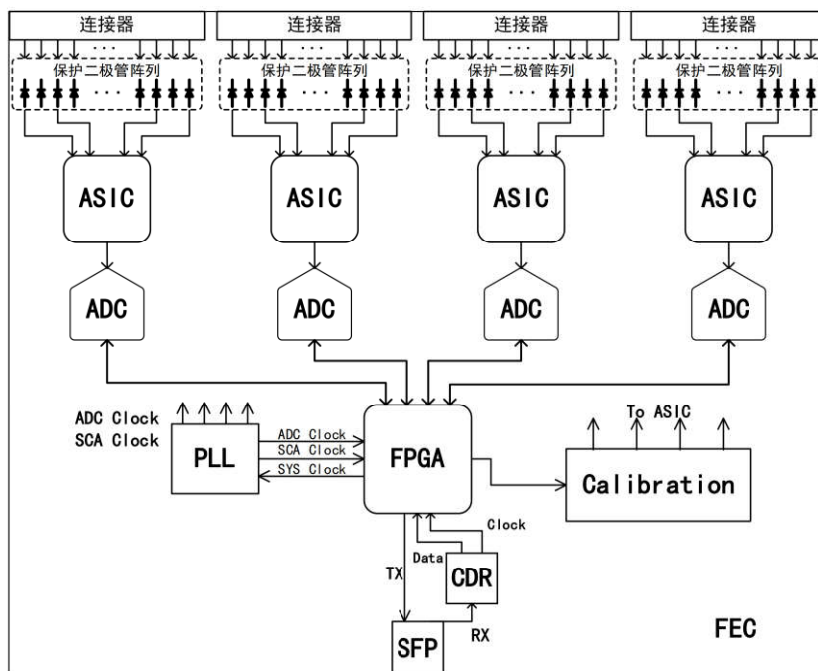


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤ 参数

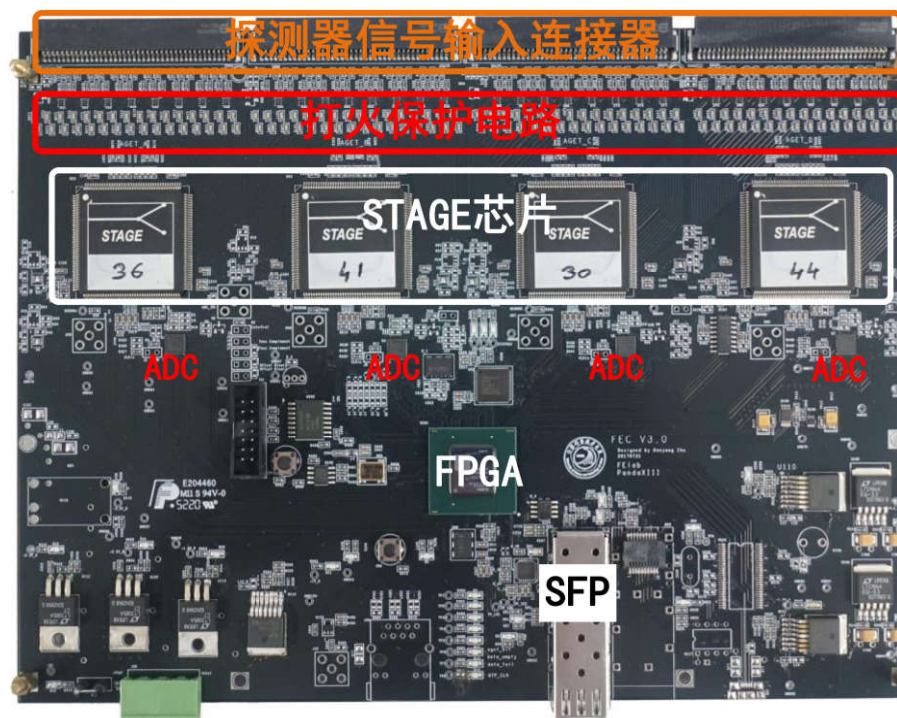
- 动态范围：0~120fC
- 噪声：小于0.2fC

➤ 单板256路读出通道



成像实验需求

- 动态范围：0~95fC
- 噪声：小于0.8fC

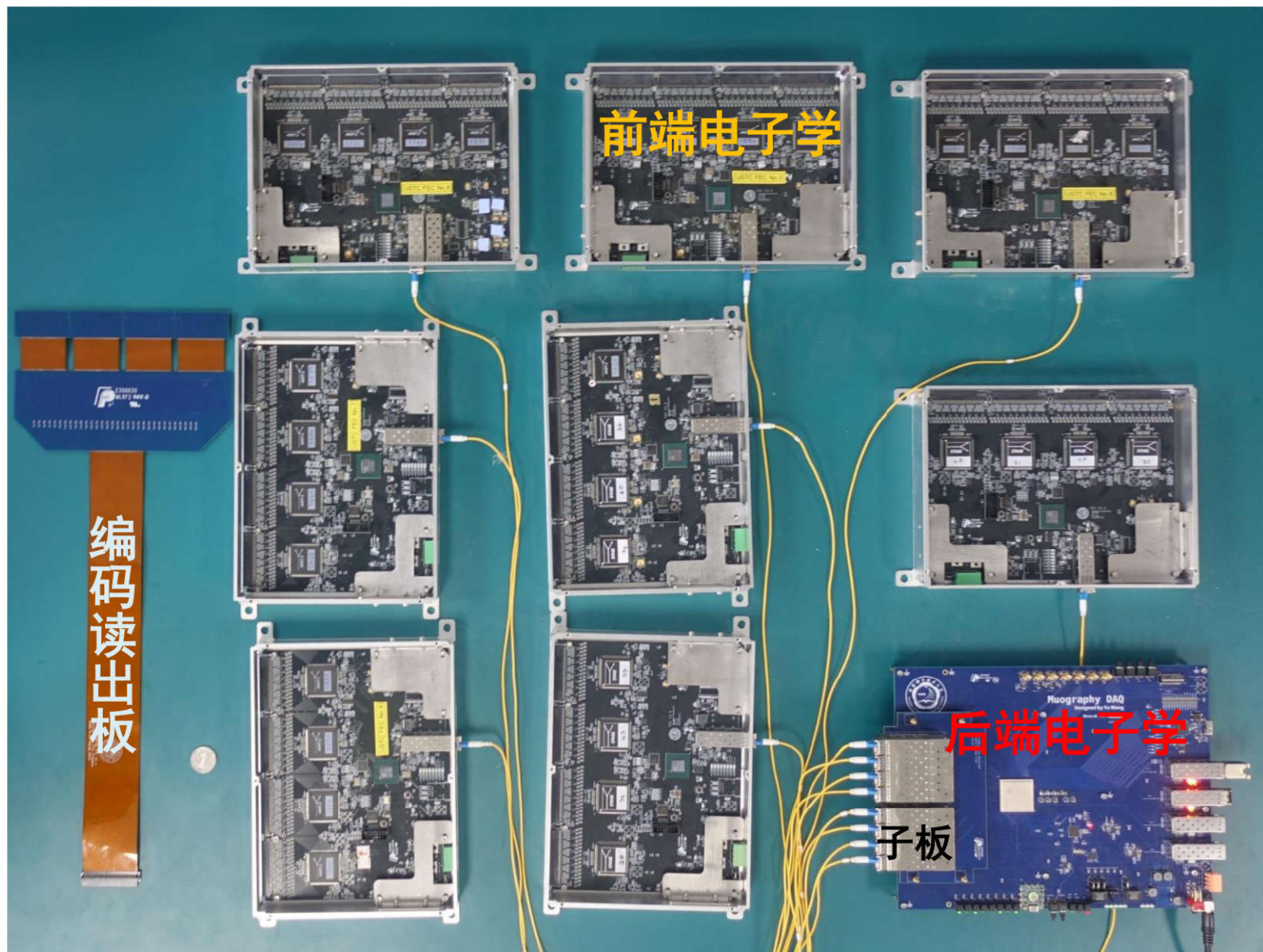


* 董家宁, “PandaX-III 实验前端读出电子学方法研究,” 博士, 中国科学技术大学, 2017.

读出电子学原型系统



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



► 误码率

- 后端电子学 $\longleftrightarrow$ PC/服务器

方案	速率	比特数	误码	误码率 (99%置信度)
USB	190MB/s	4.6×10^{14}	0	$< 1 \times 10^{-14}$
光纤	4.8Gbps	4.66×10^{14}	0	$< 1 \times 10^{-14}$

- 后端电子学 $\longleftrightarrow$ 前端电子学

- 测试时间8天

方向	速率	比特数	误码	误码率 (95%置信度)
下行	200Mbps	1.498×10^{14}	0	$< 2 \times 10^{-14}$
上行	400Mbps	2.995×10^{14}	0	$< 1 \times 10^{-14}$

在宇宙线成像所需时间范围内传输链路稳定

目录



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

- I. 研究背景
- II. 缪子成像系统分析
- III. 编码读出研究
- IV. 读出电子学研究
- V. 缪子成像实验**
- VI. 总结与展望

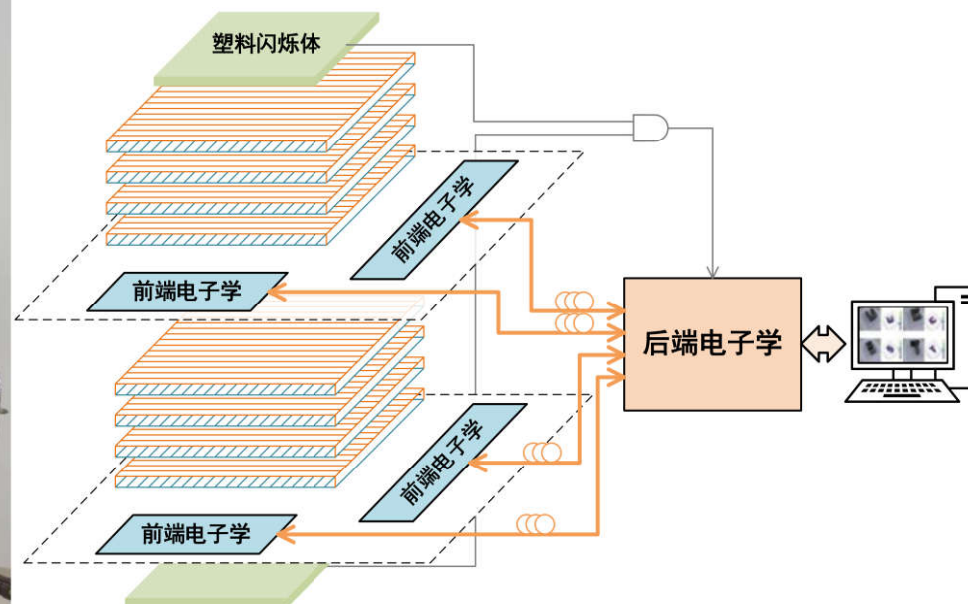
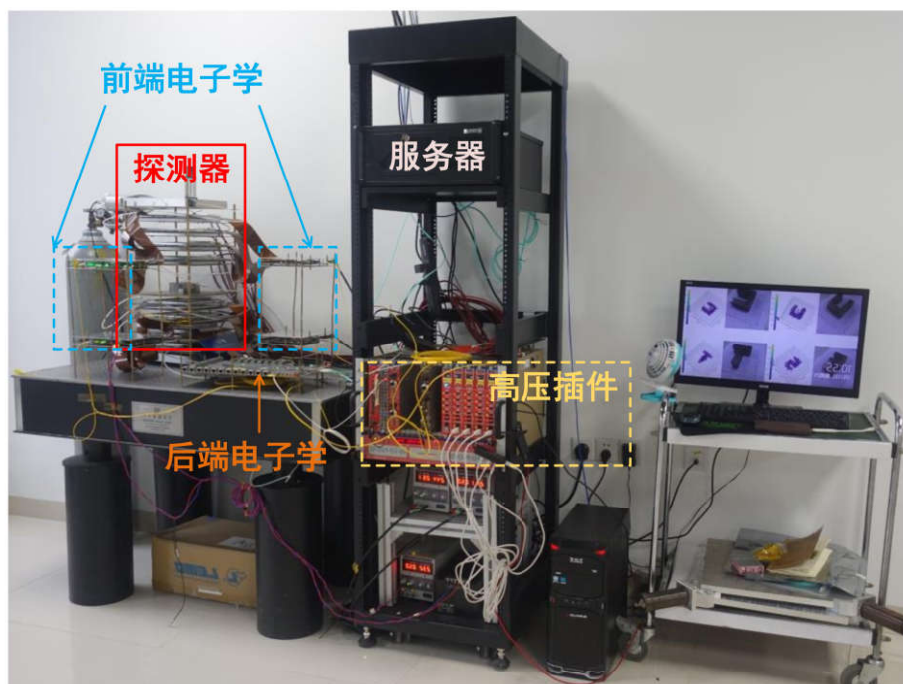
散射成像实验平台



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

➤ 散射成像实验样机

- 探测器面积：15cm × 15cm
- 层数：8层



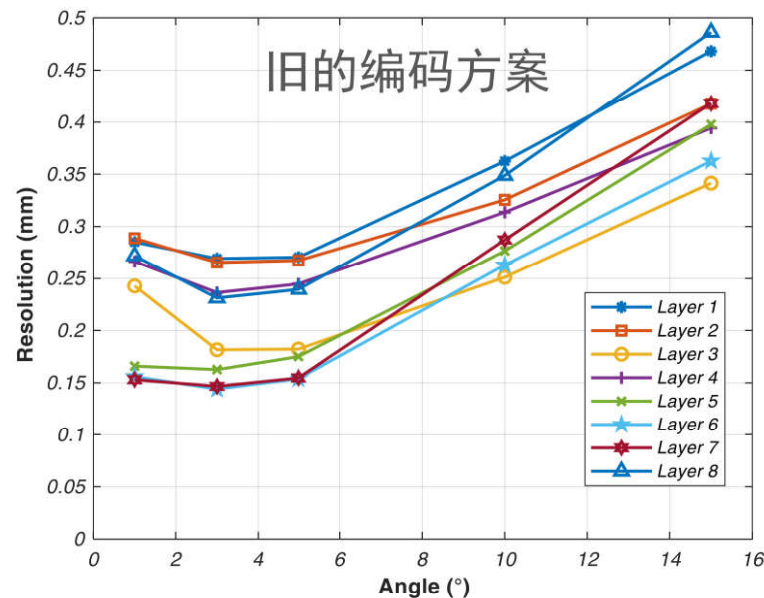
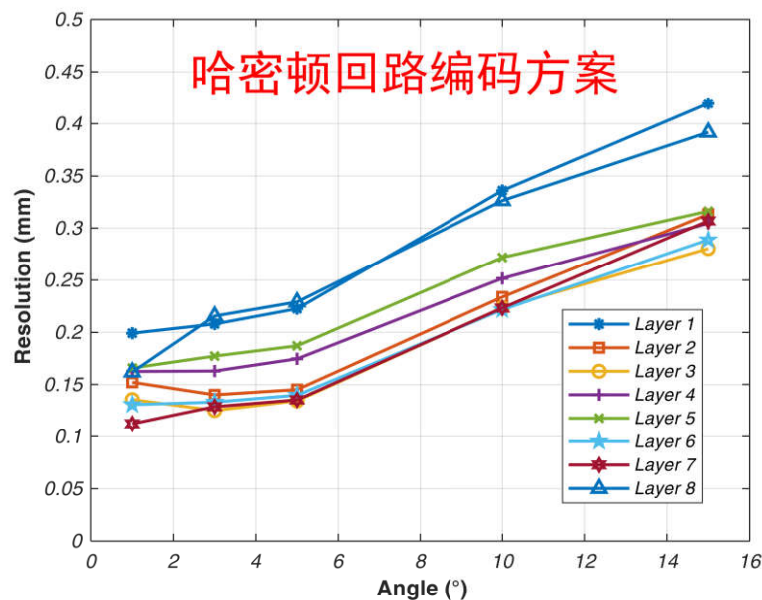
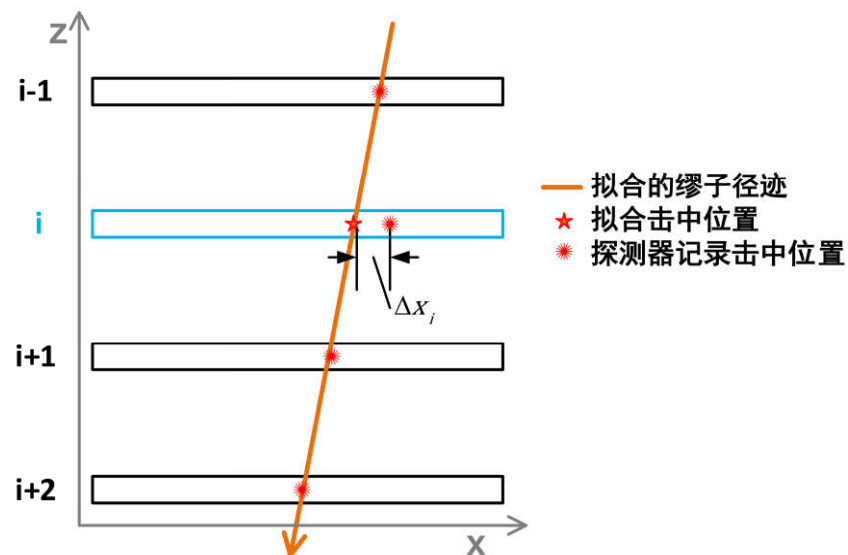
位置分辨性能测试



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

➤ 测量位置晃动

- 利用其他层击中信息拟合
- $\Delta x = x_{fit} - x_{hit}$
- 晃动: $\sigma(\Delta x)$

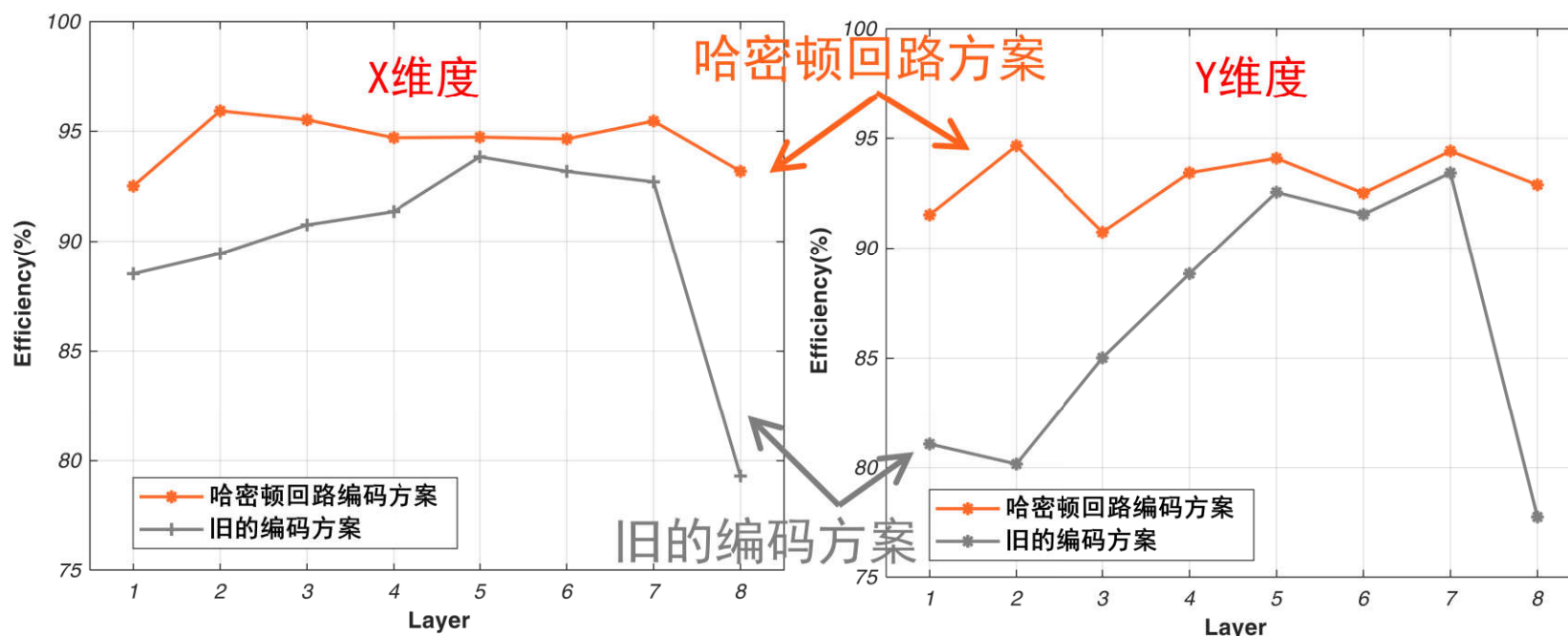


➤效率

- 利用其余层拟合缪子径迹
- 判断目标层是否有击中
- 三层探测器确定径迹

径迹重建率

编码方案	上游	下游
哈密顿回路方案	95.5%	96.0%
旧的编码方案	83.0%	89.5%



散射成像实验

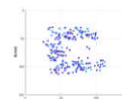
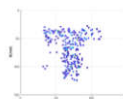
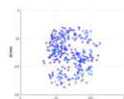
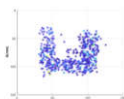
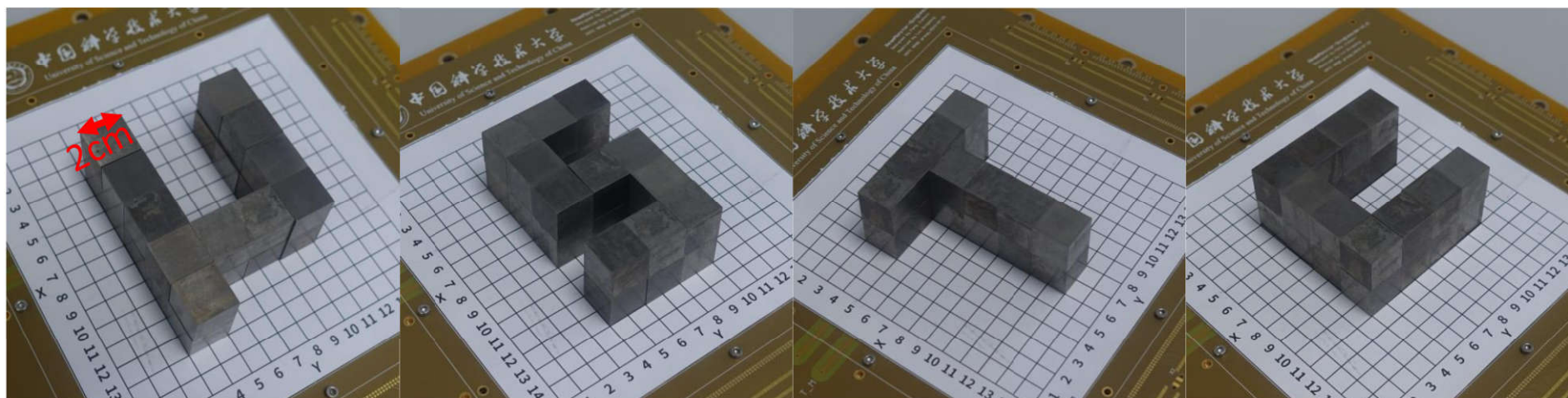


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

➤样品：钨，尺寸2cm，厚度4cm

PoCA算法

➤测试时间：4小时

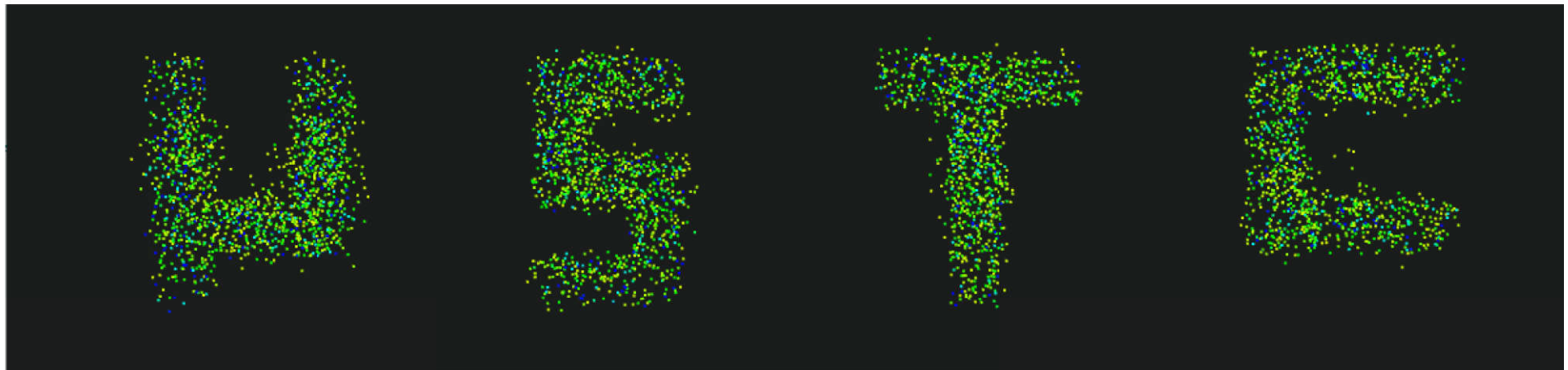
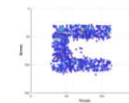
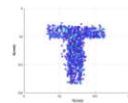
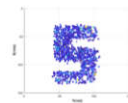
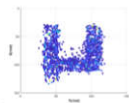


散射成像实验



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

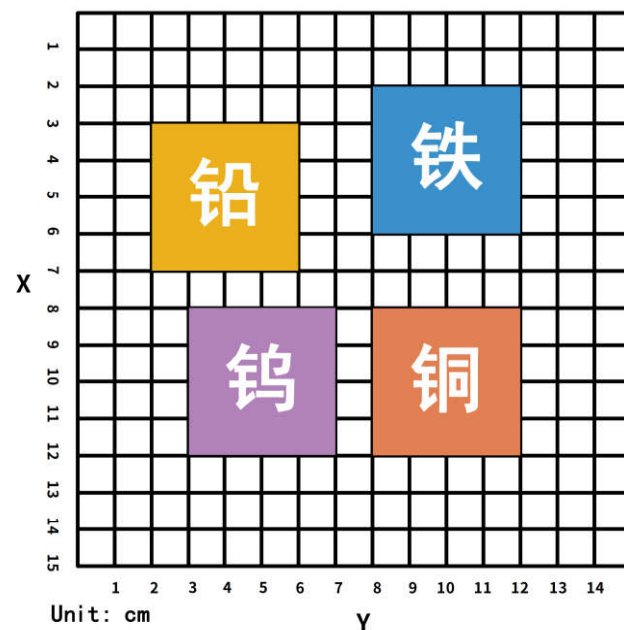
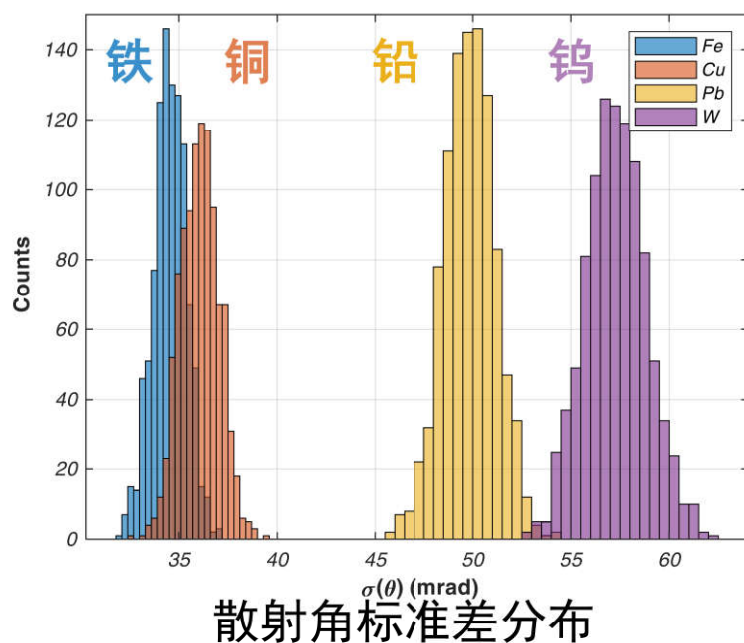
➤24小时



➤ 散射角重建测试

➤ 4cm厚度样品

- 铁、铅、钨相互区分
- 铜、铅、钨相互区分

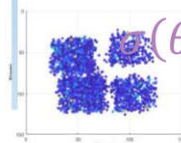


$$\sigma(\theta_{Pb}) = 51$$

$$\sigma(\theta_{Fe}) = 35$$

$$\sigma(\theta_W) = 58$$

$$\sigma(\theta_{Cu}) = 38$$



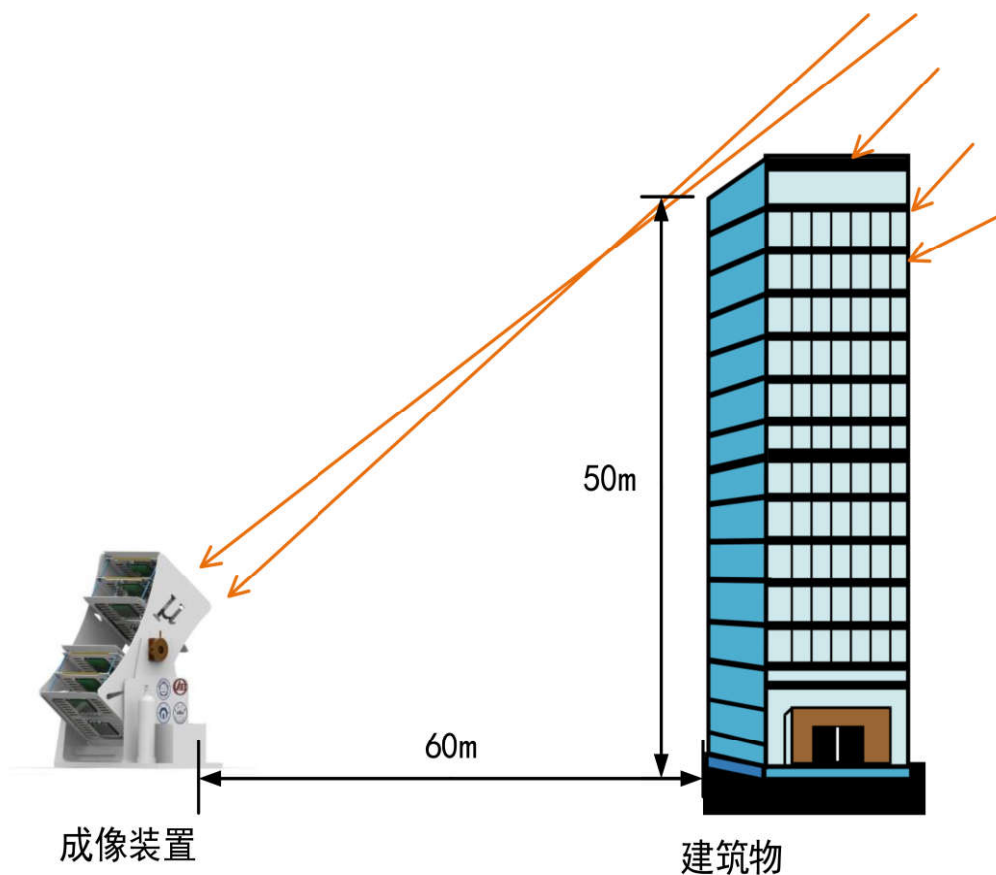
透射成像实验装置



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

► 散射成像实验样机

- 面积：15cm × 15cm，层数：4层



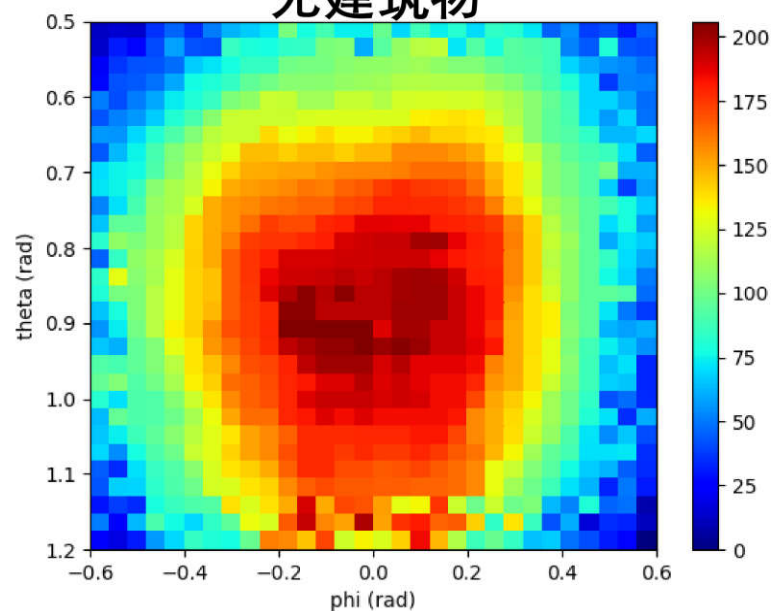
透射成像实验结果



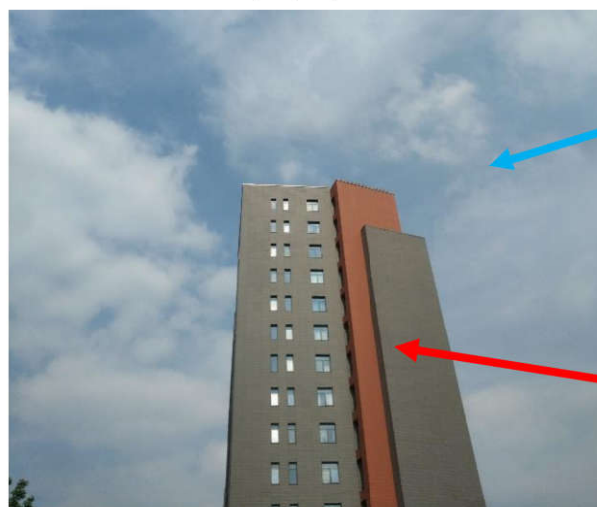
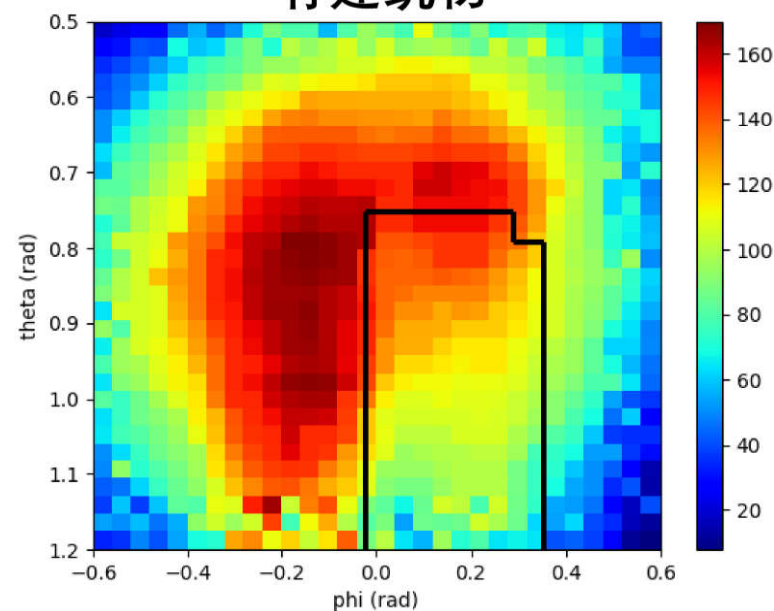
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

测试时间：7天

无建筑物

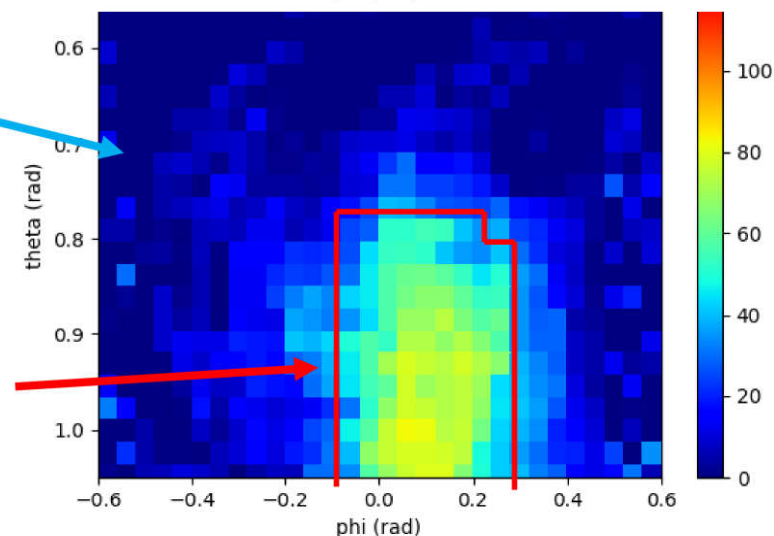


有建筑物



天空

建筑物



目录



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

- I. 研究背景
- II. 缪子成像系统分析
- III. 编码读出研究
- IV. 读出电子学研究
- V. 缪子成像实验
- VI. 总结与展望

➤总结

- 根据缪子成像实验开展了相关分析和电子学设计
- 发展了编码读出研究，将读出通道数降低一个量级
- 完成读出电子学设计与测试，成功搭建成像实验样机
- 完成厘米量级物质成像和区分，完成建筑物成像实验

➤创新点

- 国内首次针对高分辨率 Micromegas 探测器开展缪子成像读出电子研究，实现了可扩展的成像读出电子学系统设计
- 针对宇宙线缪子信号特点，实现了基于哈密顿回路的编码方案，其效果与直接读出一致。

➤ 展望

- 针对编码方案和数据压缩进行优化，进一步降低系统复杂度和数据量
- 开展山体和古建筑成像和大面积探测器成像实验，展示缪子成像的广阔应用前景
- 面对规划中的高能加速器缪子源，可将本论文研究内容扩展至人工缪子源成像



- **WANG Y**, LIU S, FENG C, 等. Readout Electronics for CEPC Semidigital Hadron Calorimeter Preprototype[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(7): 1064 – 1069. DOI:10.1109/TNS.2019.2917289.
- **WANG Y**, LIU S, SHEN Z, 等. Auto Calibration Method for the Front-end Electronics in Digital Hadron Calorimeter[C]. 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). DOI:10.1109/I2MTC43012.2020.9128494.
- 元光远, 沈仲弢, **王宇**, 等. 基于FELIX的微结构气体探测器读出电子学系统设计[J]. 原子能科学技术, 2019, 54(6): 1034 – 1040. DOI:10.7538/yzk.2020.youxian.0043.
- ZHANG J., LIU S, **WANG Y**, et al,. “Transient waveform recording utilizing TARGET7 ASIC” Journal of instrumentation, vol.12, no.2, April, 2017. DOI:10.1088/1748-0221/12/04/T04009.



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

谢谢
请您评审