



中国科学院高能物理研究所  
*Institute of High Energy Physics*  
*Chinese Academy of Sciences*

# 宇宙线缪子散射成像技术 在核反应堆方面的应用分析

报告人：翟佳佳

单位：中国科学院高能物理研究所

日期：2023年8月11日

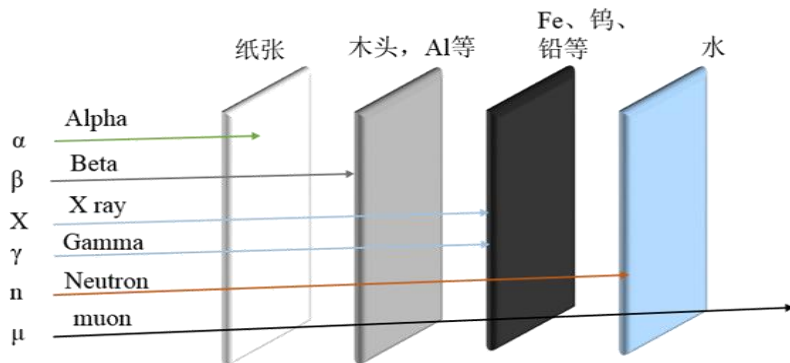


# 目录

- 一 研究背景
- 二 自研闪烁光纤系统介绍
- 三 核反应堆重建及优化
- 四 总结与展望

# 研究背景

## ■ 在反应堆内部监测、核材料无损检测等方面

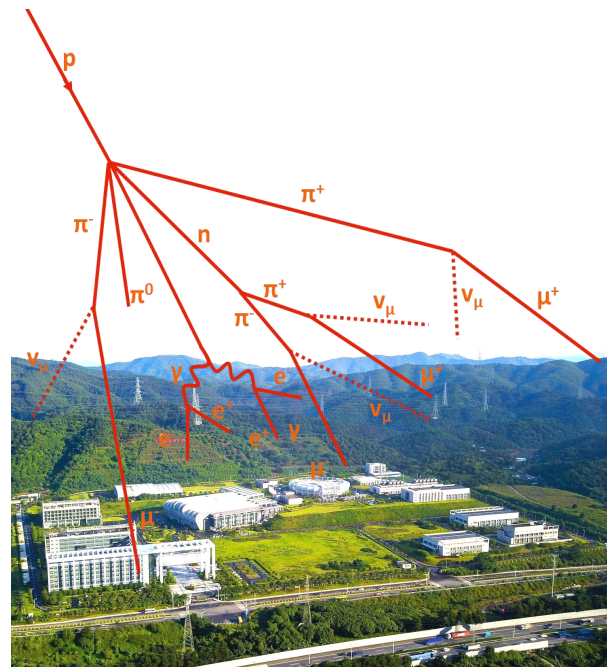


## ■ 宇宙线缪子:

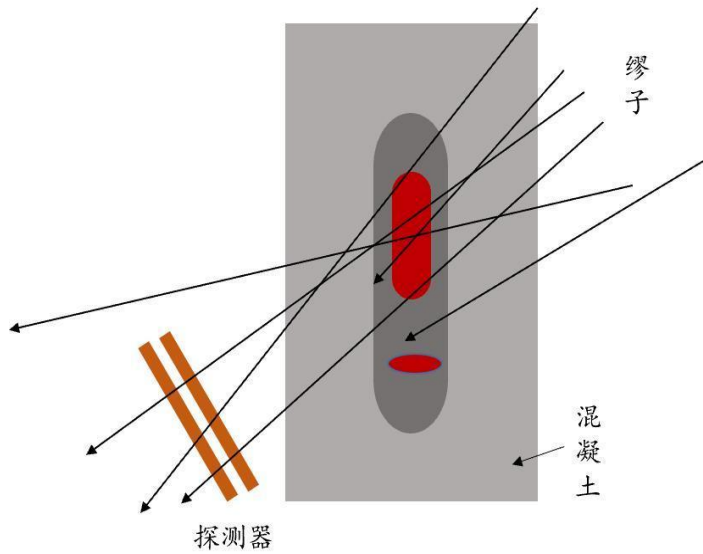
- 产生于宇宙线与大气粒子碰撞后的簇射;
- $10^4 \text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$ , 平均能量3-4GeV@地面;
- 能量高, 穿透力强, 无附加辐照。

## ■ 研究目标及应用领域:

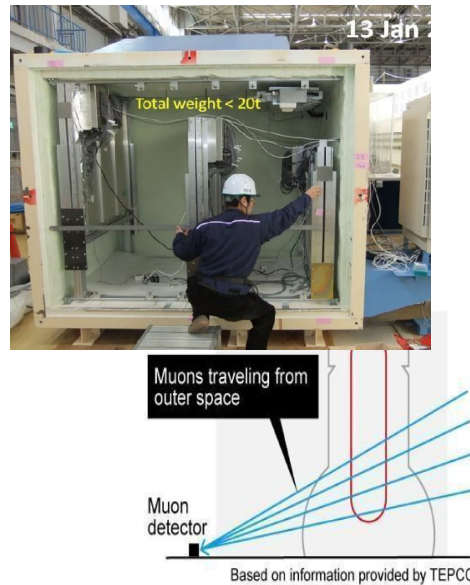
- 利用宇宙线缪子成像技术对反应堆堆芯实现无损探测和成像;
- 未来为核材料、核运行、核退役、核应急等领域, 提供新型透视技术。



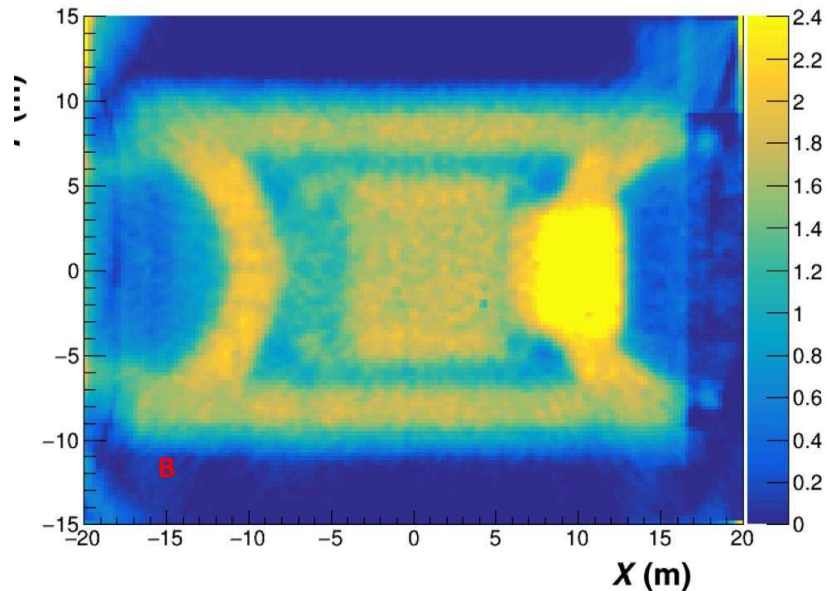
# 宇宙线缪子透射成像



缪子透射成像示意图



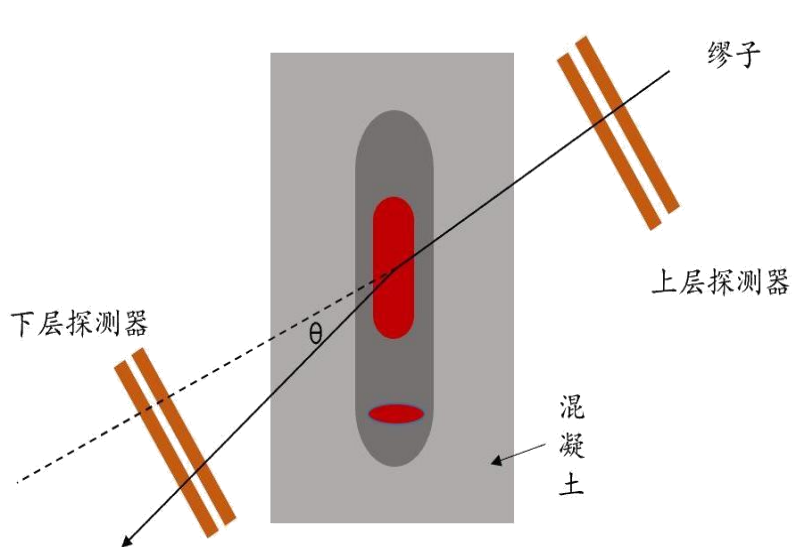
福岛透射成像装置示意图



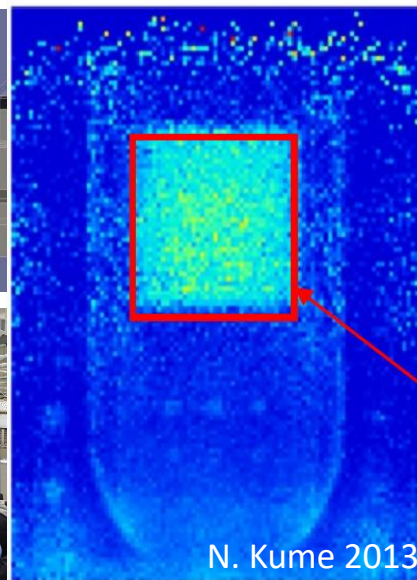
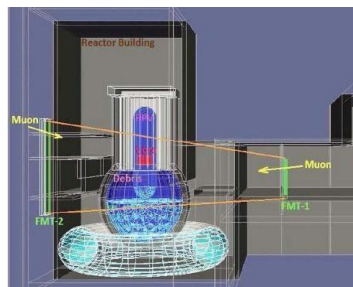
法国G2反应堆透射成像, Procureur et al (2023)

- 缪子透射成像采用单边探测器，通过探测缪子通量的变化进行成像，适用于通量显著变化的场景。
- 对于无法引起缪子通量显著变化的物体，例如小型核反应堆、核材料以及核废料的监测等，可采用缪子散射方法成像。

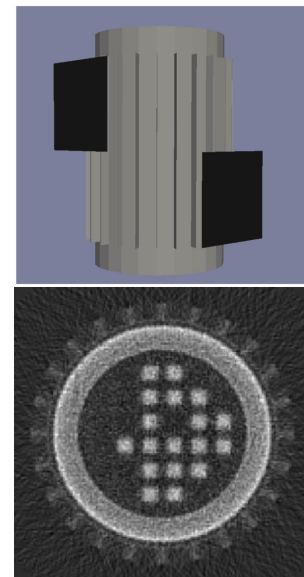
# 宇宙线缪子散射成像原理



缪子散射成像示意图



福岛散射成像及模拟



乏燃料干式贮存桶成像模拟

- 缪子散射成像采用双边探测器，通过探测缪子穿过材料前后偏转角进行分布式成像；
- 对比透射成像具有速度快、精度高的优点

# 缪子探测与成像技术发展历程

地质勘探

首次用**透射成像**方法对隧道上方的冰层厚度进行了测量。

考古发现

应用缪子成像对两座金字塔内部进行勘探。

山体成像

日本用塑闪开展了针对筑波山最高峰和次高峰的成像。

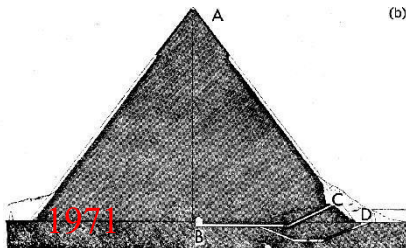
核材料成像

美国LANL首次提出缪子**散射成像**。展示出核材料成像前景。

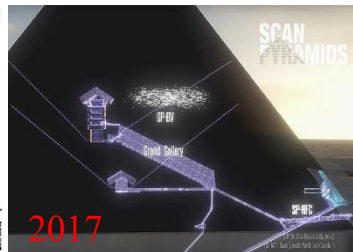
反应堆监测

用于**日本福岛反应堆**检测，显示出在核安全领域的重大潜力。

1950s



1970

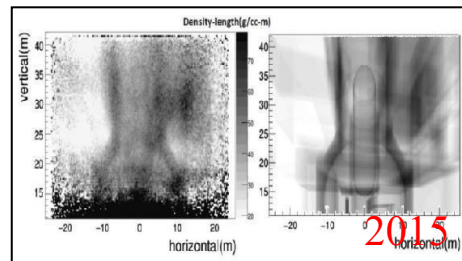


1994

2003



2011

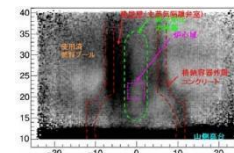
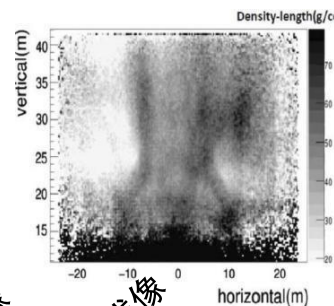
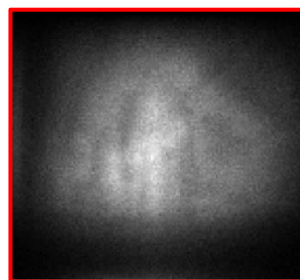
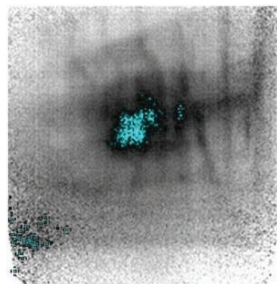


- 在2011年福岛核事故之前，缪子成像是一种以研究为目的的前沿技术，主要应用在地质勘探和小尺寸核材料检测等方面。五十年代开始，用于山体、金字塔、火山、核材料等。
- 福岛核事故之后，使用缪子成像技术完成了对各个反应堆堆芯的成像及评估工作。

■ 缪子成像技术引发世界性关注和重视

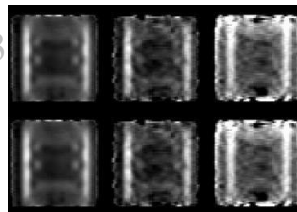
# 福岛核事故的启示

- 福岛核事故给全世界的核电事业带来普遍的负面影响，包括中国。
- 缪子成像技术的应用在机组成像。



验证成功

验证成功



2016 筹备安装

# 散射成像探测器背景

2003

LANL基于drift tube搭建了第一台小型缪子散射成像原型机

位置分辨0.4mm

2011

清华设计完成了基于MRPC的缪子散射成像探测器系统

位置分辨1mm

2015

加拿大CRIPT实现了基于塑闪探测器的成像系统

位置分辨1.73mm

2019

中科大完成了基于Micromegas探测器的成像系统

位置分辨0.15mm

- 基于气体探测器的位置分辨可以到亚毫米量级，可用于对位置分辨性能需求较高的场景。
- 闪烁体探测器相对紧凑，对环境变化不敏感，在核反应堆以及核废料的监测方面优势突出。
- 但是受限于自身尺寸，位置分辨在毫米级别，无法满足高性能快速成像的需求。

■ 基于闪烁体探测器完成亚毫米级位置分辨的缪子散射成像研究



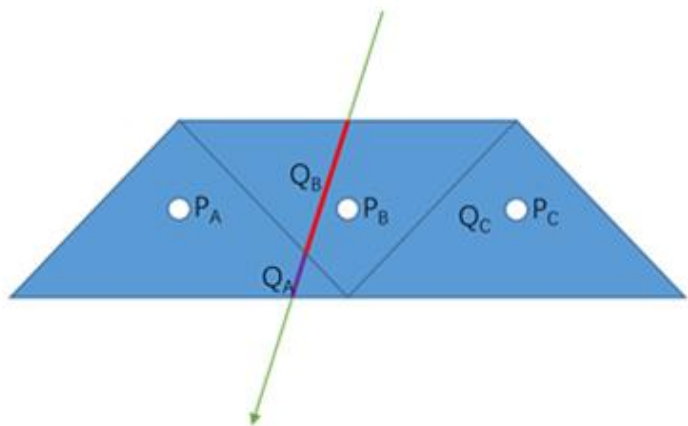
# 目录

- 一 研究背景
- 二 自研闪烁光纤系统介绍
- 三 核反应堆重建及优化
- 四 总结与展望

# 探测器设计

## ■ 结构设计原理

- 缪子在通过探测器时能量沉积的大小，与径迹长短是成比例的。
- 在A和B晶体条中的光输出 $Q_A$ 和 $Q_B$ ，与缪子在两个晶体中的径迹长短成比例。
- 可以通过径迹分配法实现高位置分辨探测器的设计。
- 通过闪烁光在闪烁体上的加权平均值来计算粒子击中探测器位置的方法称为重心法。



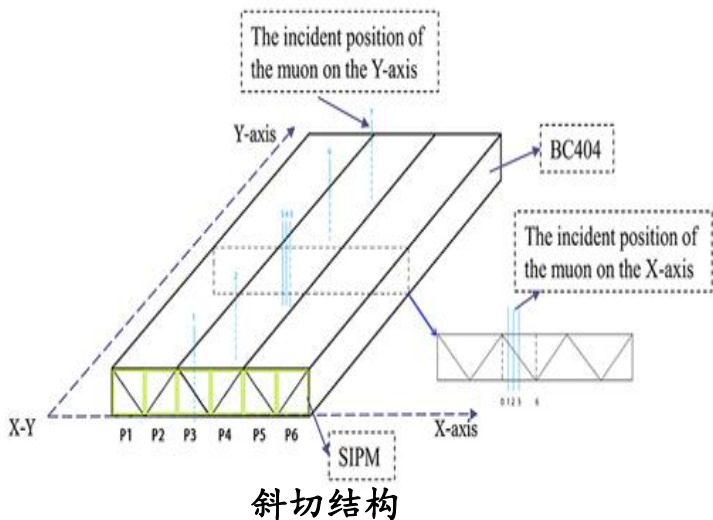
### 重心法

$$P_N = \frac{P_A \cdot Q_A + P_B \cdot Q_B + P_C \cdot Q_C}{Q_A + Q_B + Q_C}$$

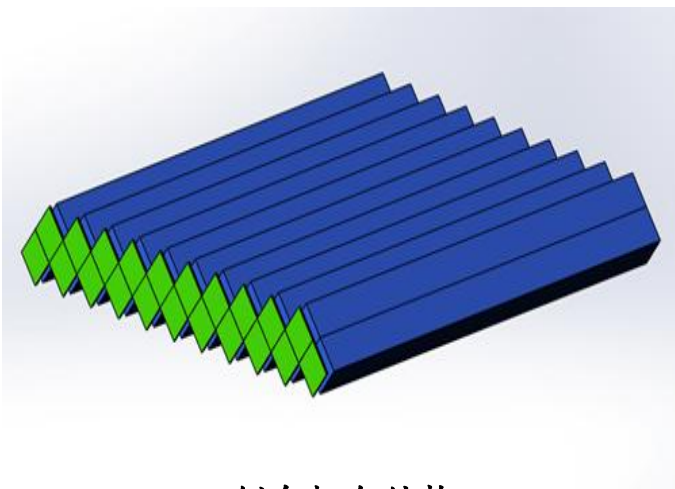
# 探测器设计一

## ■ 斜切与侧向耦合

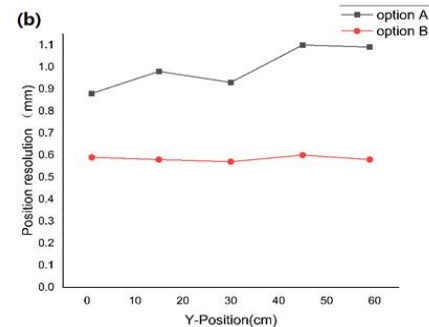
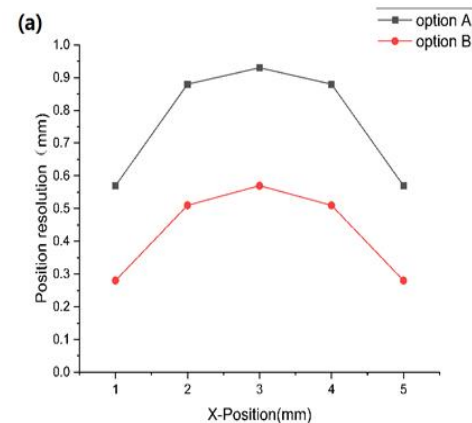
- 类型：塑料闪烁体
- 截面：6mm × 6mm
- 结构：斜切和侧向耦合
- 读出：SiPM一对一读出



斜切结构



侧向耦合结构



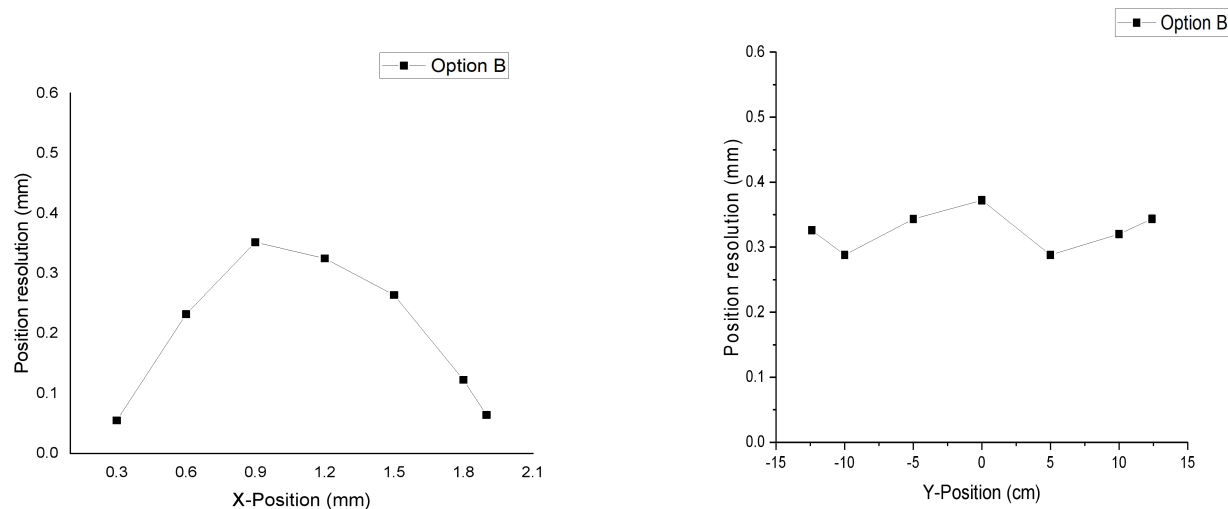
位置分辨模拟结果

# 探测器设计二

## ■ 塑闪与闪烁光纤

- 塑料闪烁体方案切割到6mm工艺复杂，且还需考虑是否内嵌波移光纤。
- 闪烁光纤目前有截面 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的成品，且性能稳定。

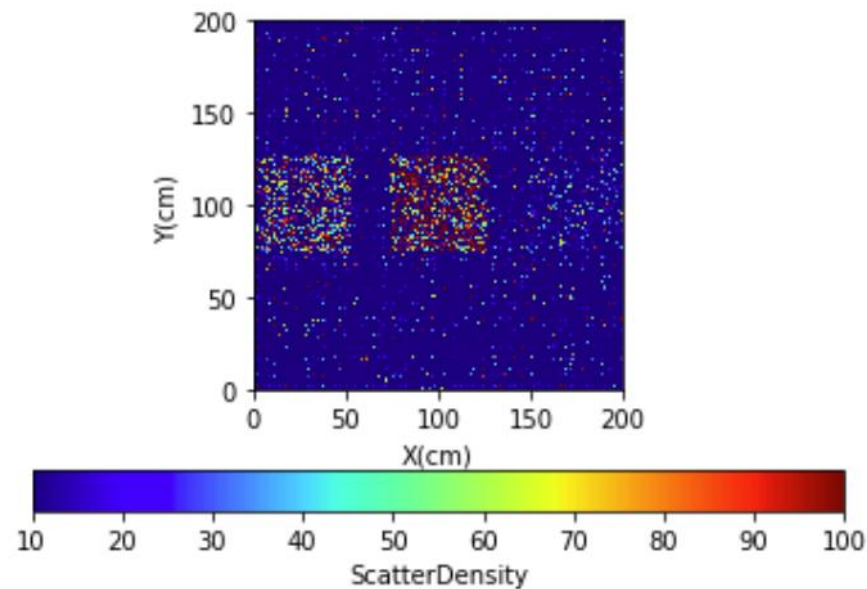
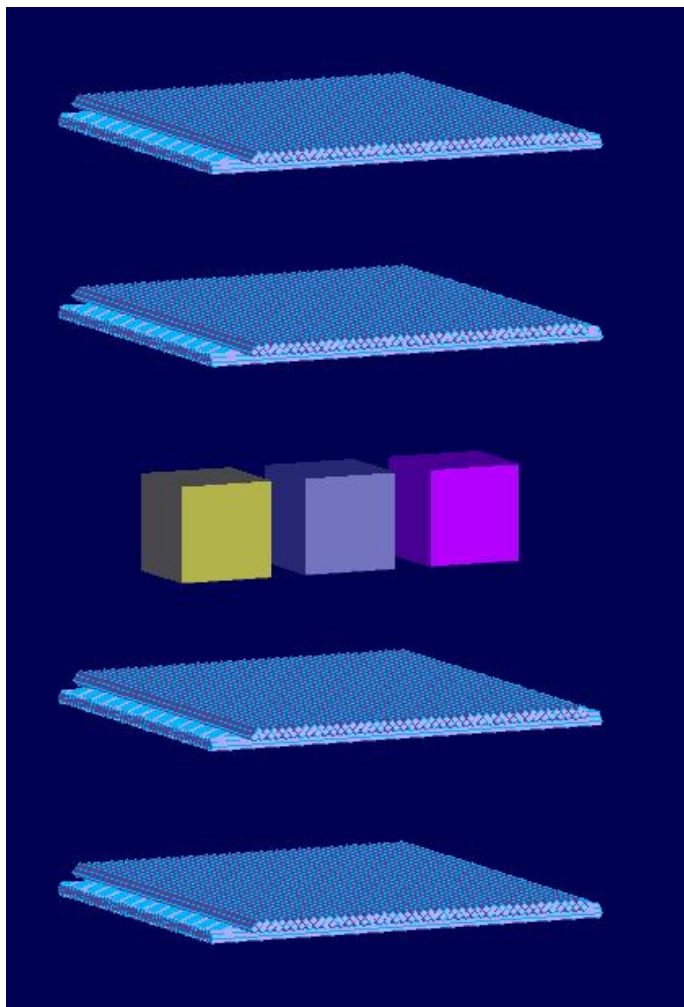
- 类型：闪烁光纤
- 截面： $3\text{mm} \times 3\text{mm}$
- 结构：侧向耦合



位置分辨模拟结果

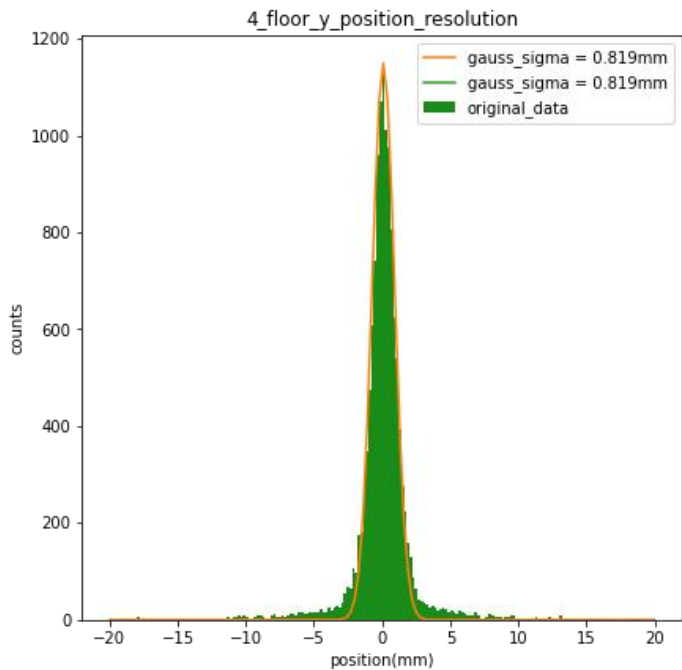
- 模拟结果表示位置分辨小于 $0.4\text{mm}$ ，满足亚毫米设计需求。

# 探测器系统仿真

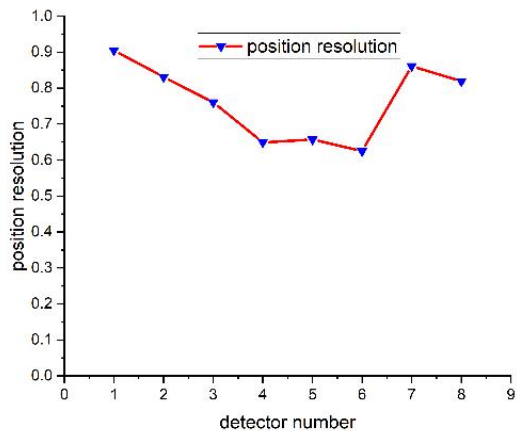


对不同材料重建的仿真结果  
左、中、右分别为铅、铀、铁

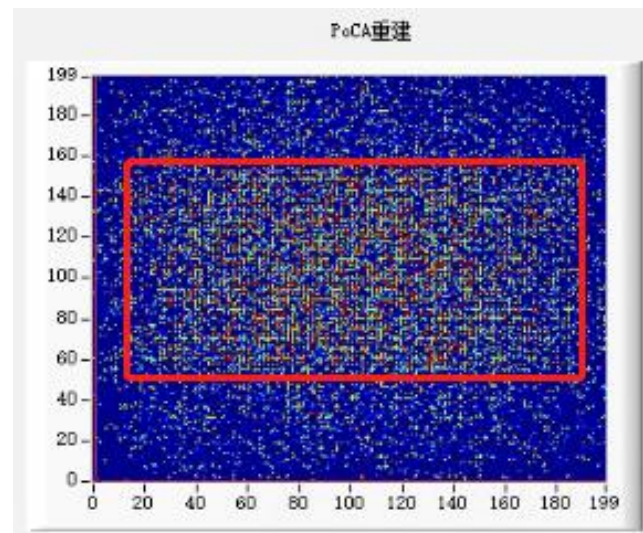
# 实验测试



实测单层探测器位置分辨结果



八层探测器的位置分辨



单一铅的实测结果

# 目录

- 一 研究背景
- 二 自研闪烁光纤系统介绍
- 三 核反应堆重建及优化
- 四 总结与展望

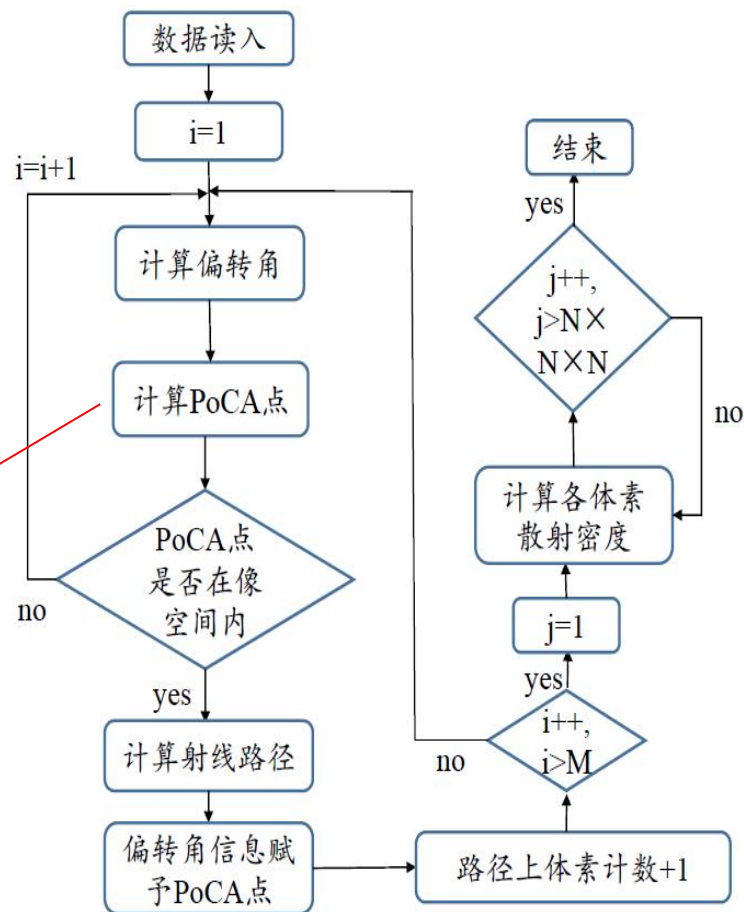
# 反应堆模型重建算法

## ■ PoCA算法原理及实现

PoCA算法假设缪子在材料中只散射一次，散射点所在的体素被称为PoCA点。散射点通过缪子入射方向与出射方向径迹延长线的交点进行计算。散射密度计算如下：

$$\hat{\lambda} = \sum_{i=1}^M \frac{\theta_i^2}{ML_i}$$

入射和出射直线求交点，若异面，直接投影到XZ和YZ平面后，在两个平面内各自求交点后，再求平均。

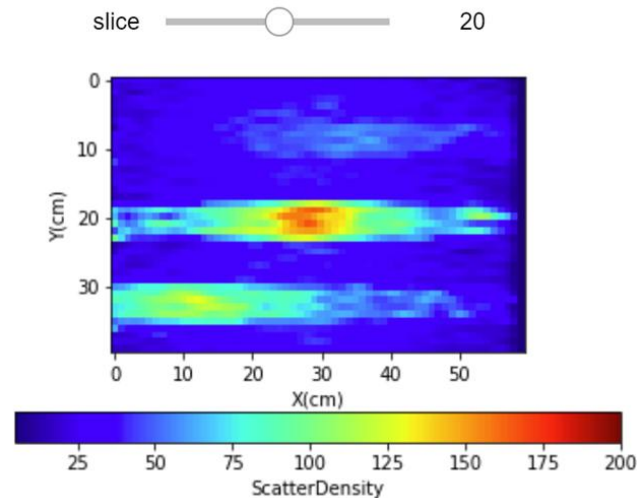
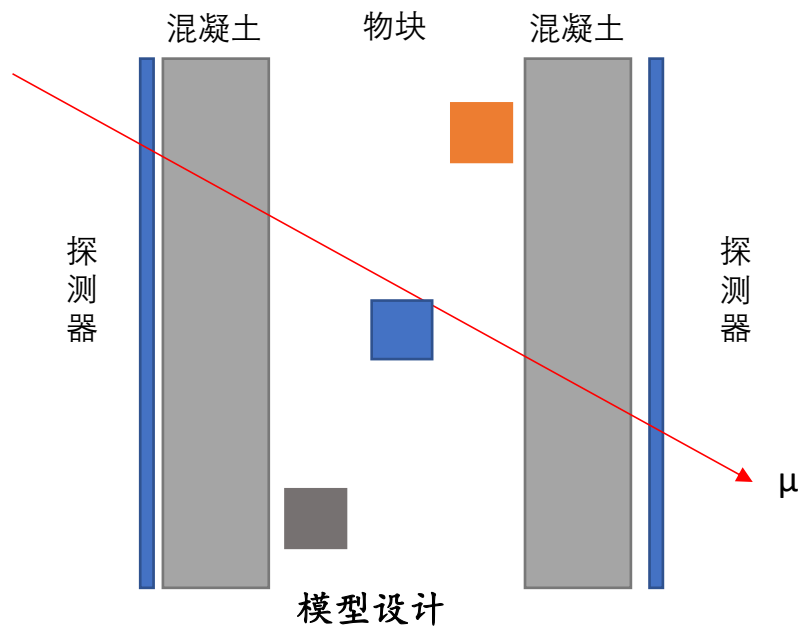


算法框图



# 反应堆模型重建测试

- 空气层尺寸50cm
- 混凝土厚度75cm
- 成像空间尺寸40cm×40cm×200cm
- Fe, U, Pb尺寸5cm×5cm×5cm
- 结果：①沿缪子方向伪影较重。②在有外物阻挡的情况下，铀材料存在区分极限。



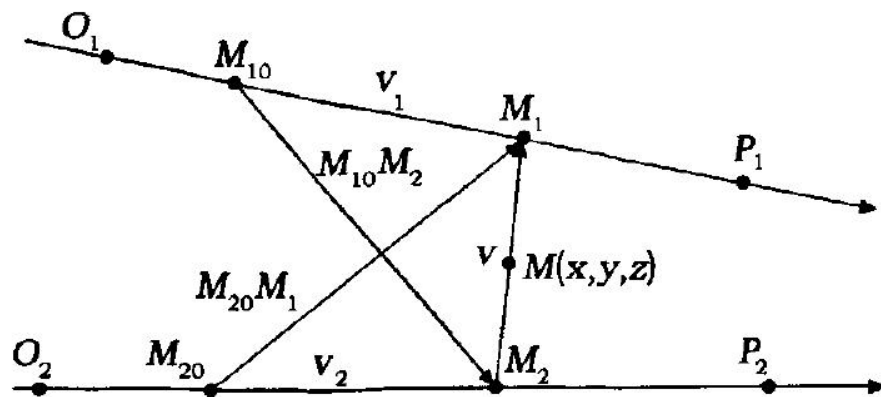
# 重建优化

## ■ PoCA算法优化-Z向伪影校正

之前异面直线求交点：投影到XZ和YZ平面后，在两个平面内各自求交点后，再求平均



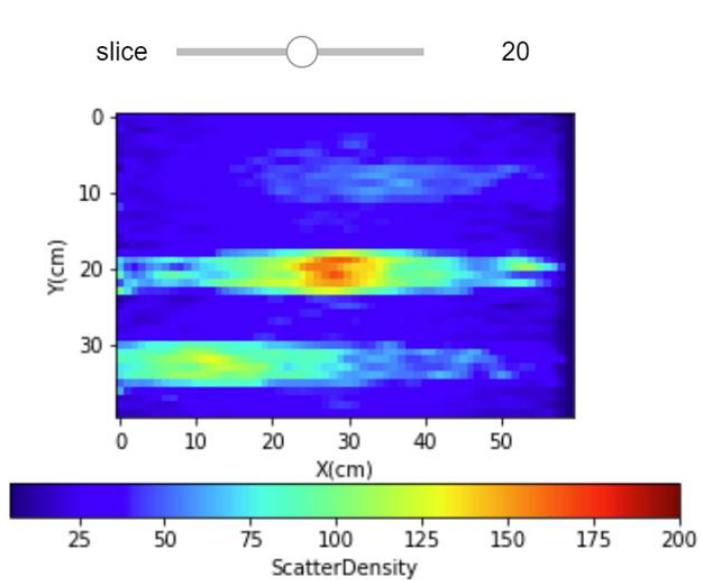
优化计算：求公垂线的中点  
预期目标：优化Z向伪影



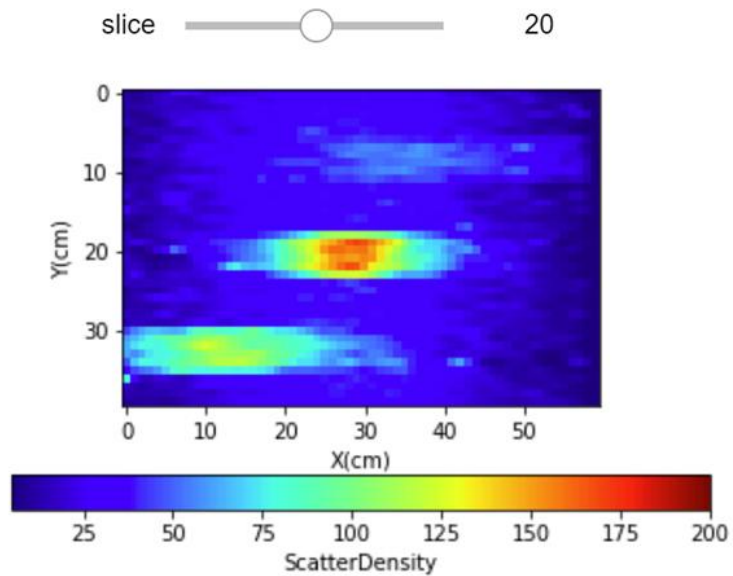
PoCA点优化

# 反应堆模型重建测试

## ■ PoCA算法优化对比



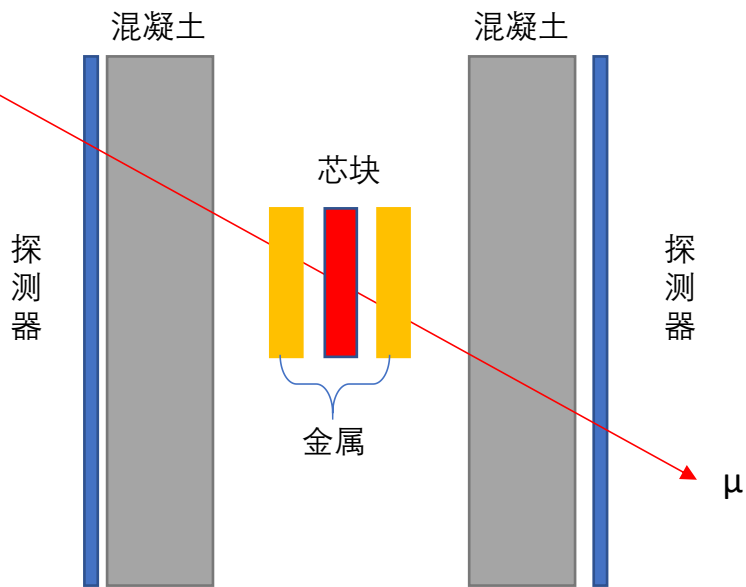
优化前



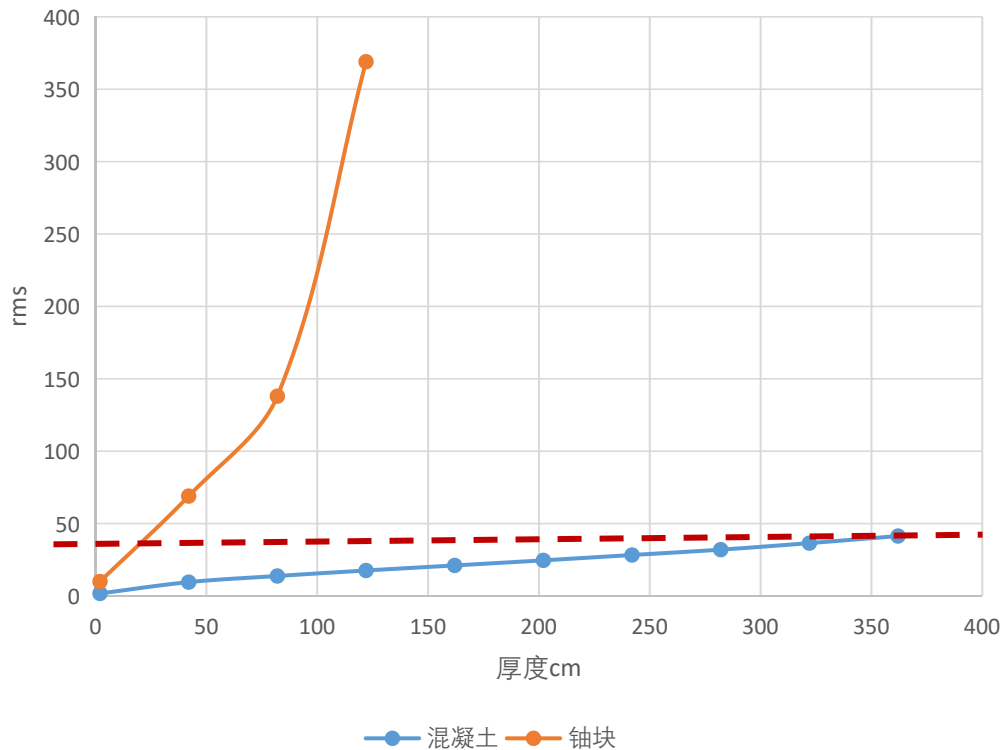
优化后

# 反应堆系统简化

## ■ 计算铀材料的成像极限



缪子在不同材料中的散射角均方根(rms)分布



# 目录

- 一 研究背景
- 二 自研闪烁光纤系统介绍
- 三 核反应堆重建及优化
- 四 总结与展望

# 总结与展望

## ■ 总结

- 基于塑料闪烁体完成亚毫米级位置分辨的缪子散射探测器设计
- 完成了基于光纤的宇宙线缪子散射成像系统初步实验测试
- 完成了缪子PoCA算法Z向伪影初步校正

## ■ 展望

- 完成基于当前闪烁光纤系统的成像能力分析
- 不同材料阻挡时在当前探测器指标下铀材料的最小分辨能力



中国科学院高能物理研究所  
*Institute of High Energy Physics*  
*Chinese Academy of Sciences*

请各位老师批评指正

