

第十一届全国先进气体探测器研讨会

南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



宇宙线缪子成像算法及地质勘探模拟研究

作者：罗思远、季选韬、何列、肖万成、王晓冬*

日期：2023.10.13



目 录

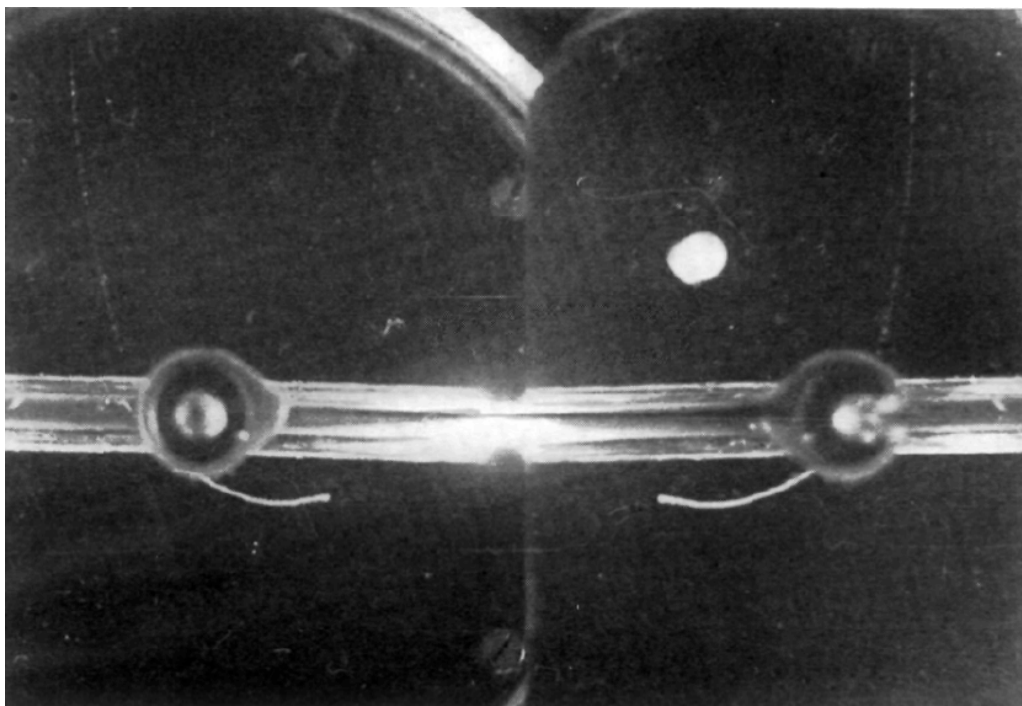
CONTENTS

- 一、 缪子的来源及性质
- 二、 研究背景及意义
- 三、 散射成像算法研究及优化
- 四、 符合径迹密度成像技术模拟研究
- 五、 多模态成像技术模拟研究
- 六、 透射成像在地质勘探的模拟研究
- 七、 总结

一、缪子的来源及性质

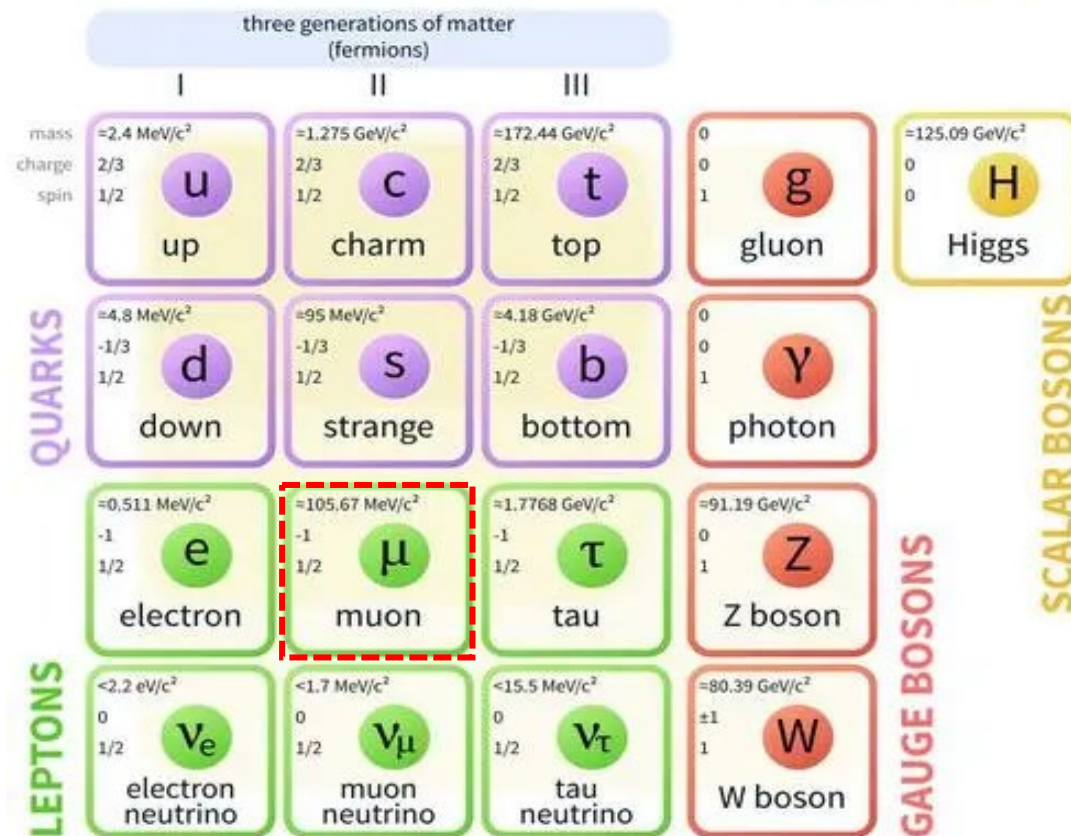
缪子的发现

1936年，C.D. Anderson和S. Neddermeyer在加利福尼亚理工学院的实验室中发现了缪子并命名为“缪介子”，后被划归为轻子，称为缪子。



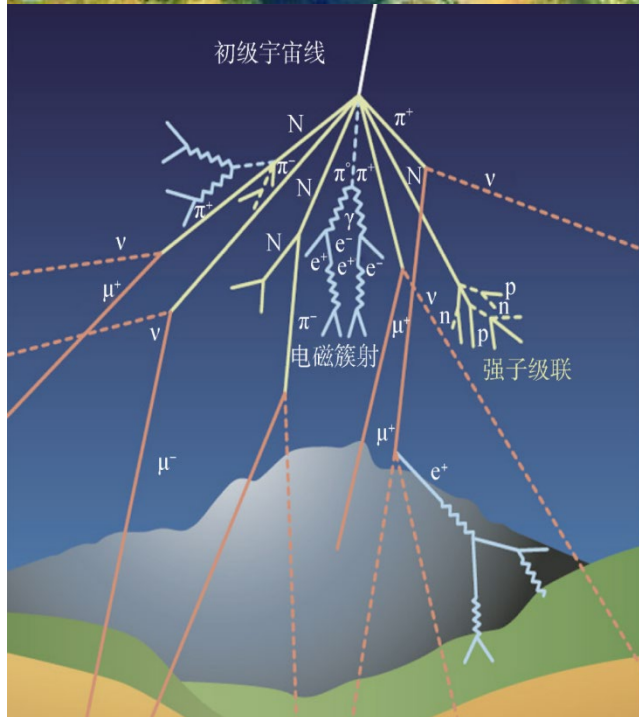
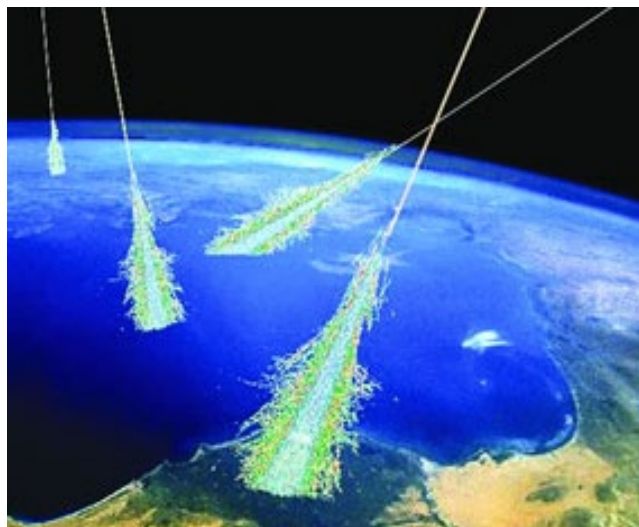
S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, Phys. Rev. 54, 88 (1938)

Standard Model of Elementary Particles

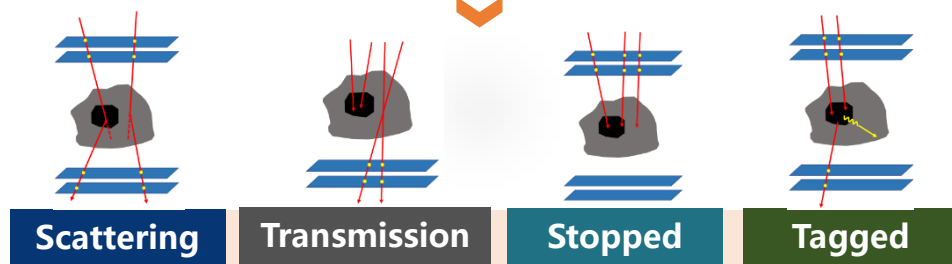


缪子的质量介于质子和电子之间，带一个单位电荷，其半衰期为2.2μs，海平面通量1个/cm²·min。

天然缪子源-本底射线



缪子与物质相互作用



能域宽

穿透能力强

本底射线

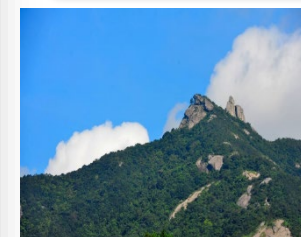
非接触
远距离
无损成像

1 散射成像技术



对象：致密高Z材料

2 透射成像技术



对象：大尺寸物体

3 缪子及其次级粒子成像技术



对象：中低Z材料
特殊核材料

二、研究背景及意义

成像原理	国家	团队	探测器	研究对象
散射成像技术	US	LANL	漂移室	钨盘
	UK	University of Glasgow	塑料闪烁体、气体探测器	核废料桶
	Italy	INFN Padova	Micromegas	水塔
	Canada	Nuclear Laboratories Ltd	塑料闪烁体条	燃料棒/集装箱
	美国/日本	LANL、东芝公司	漂移管	铀材料/福岛反应堆
	中国	中国科学院高能物理研究所	气体探测器	系统研制和算法研究
	中国	中国科学技术大学	Micromegas	系统研制和算法研究
	中国	清华大学	MRPC	系统研制和算法研究
	中国	中国原子能科学研究院	漂移管	系统研制和算法研究
	中国	北京大学	RPC	系统研制和算法研究
	中国	九院、兰大 安徽大学、南华大学等	塑炼条、微结构气体探测器	系统研制和算法研究
缪子及其次级粒子	塞尔维亚	University of Novi Sad	Close Cathode Chamber	Geant4模拟CaO成像
	意大利	Wigner Research Centre for Physics	Close Cathode Chamber	牛股骨、脂肪和水
	中国	火箭军工程大学	模拟研究	特殊核材料
	中国	南华大学	大面积塑料闪烁体	缪子与次级粒子符合成像算法

二、研究背景及意义

成像原理	国家	团队	探测器	测量对象
透射 成像 技术	英国	University of Sheffield	塑料闪烁体	监测地下储存的CO ₂
	意大利	INFN-Napoli	塑料闪烁体	火山
	日本	Tsukuba University	核乳胶	胡夫金字塔
	美国	Univ. of Texas at Austin	塑料闪烁体	考古
	中国	北京师范大学	塑料闪烁体	秦始皇陵
	中国	中国空间技术研究院	塑料闪烁体	五大连池火山、常熟隧道
	中国	南方科技大学	小型塑料闪烁体	隧道
	中国	兰州大学	塑料闪烁体条	西安古城墙
	中国	中国科学技术大学	Micromegas	建筑楼、大蜀山
	中国	中山大学	塑料闪烁体	隧道上方岩石
	加拿大	University of British Columbia	塑料闪烁体	矿物勘探
	日本	东京大学	塑料闪烁体条	地下水位监测
	意大利	University of Naples Federico II	塑料闪烁体	地下未知空腔
	意大利	University of Padua	塑料闪烁体	高炉
	法国	CNRS and Avignon University	液体闪烁体	地下水资源
瑞士	Laboratory for High-Energy Physics	核乳胶	冰川下隐藏的地形	
法国	IRFU, CEA, Universite Paris-Saclay	气体探测器	核反应堆	

二、研究背景及意义

类型	面积	角分辨率	结构	信号读取	价格	适用技术	应用领域
塑料闪烁体:							
方型棒	1-4m ²	> 10mrad	简易	简易	低	AM	A,G,V
三角棒	1-2m ²	< 10mrad	简易	简易	中	AM	A,AT,G,GT,V
闪烁光纤	1-2m ²	~0.1mrad	中等	复杂	高	SM	AT,GT,N
气体探测器:							
正比计数器	1-4m ²	~10mrad	简易	简易	低	AM	A,G,V
多丝室	> 4m ²	< 1mrad	中等	简易	中	SM	AT,GT,N
漂移室	> 4m ²	~0.1mrad	复杂	复杂	高	SM	AT,GT,H,N
平板电离室	> 10m ²	~0.1mrad	简易	中等	低	SM	AT,GT,H,N
Micromegas (M)RPC	< 1m ²	< 10mrad	简易	简易	低	AM SM	AT,GT,N
	< 1m ²	< 10mrad	简易	简易	中	AM SM	AT,GT,N
其它: 核乳胶	< 1m ²	< 10mrad	简易	复杂	低	AM	A,AT,G,GT,M,V

AM=透射成像, SM=散射成像; A=考古学, AT=建筑学, G=地质学, GT=岩土工程, H=国土安全, M=矿业, N=核废料, V=火山学

二、研究背景及意义

□ 散射成像

高Z物质:

核材料、反应堆、
集装箱等

□ 透射成像

大尺寸物质:

金字塔、活火山、
矿脉、隧道等

□ 缪子及其次级粒子符合成像

①特殊核材料（中子）

②中低Z小体积物质（ δ 电子、
gamma）：铁、骨头、水等

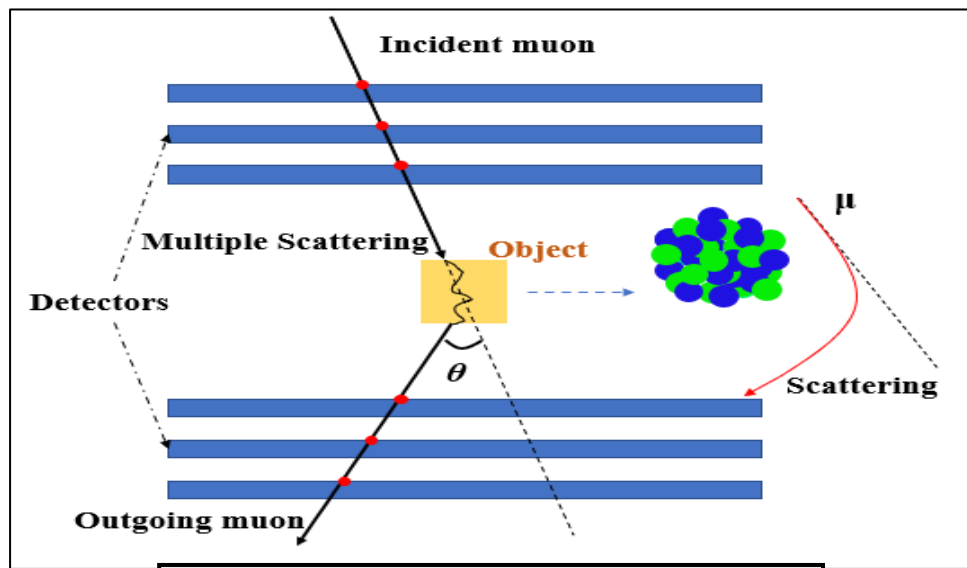
□ 研究意义

- 散射成像目前主要应用于边防安全中的高Z核材料检测，优化散射成像算法可**提高检测速度及精度**
- 散射成像和透射成像主要针对高Z、大尺寸物质，而缪子联合次级粒子信息成像技术针对小尺寸中、低Z物质，可**拓展缪子成像的应用范围**
- 由于散射与缪子及其次级粒子符合成像系统具有较好的**兼容性**，将散射成像与缪子及其次级粒子符合成像技术进行结合，可同时得到高、中、低原子序数材料的**高质量重建图像**

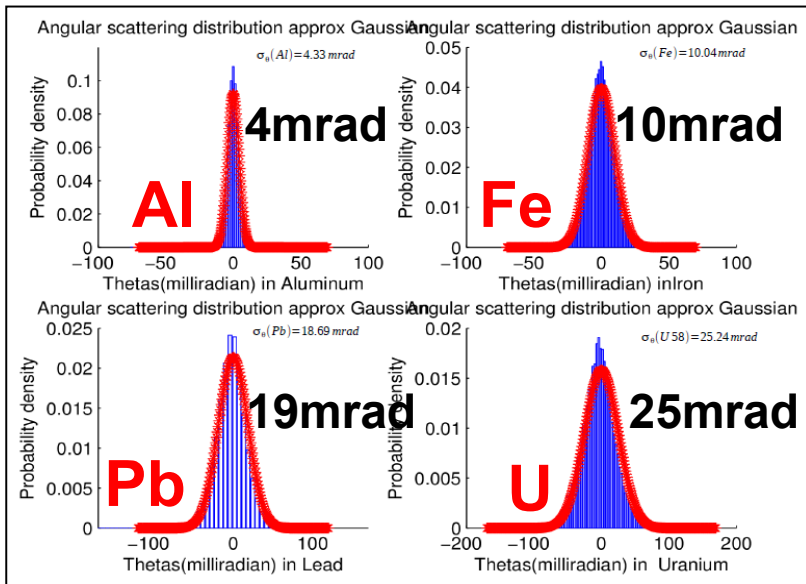
三、 散射成像算法研究及优化

散射成像原理

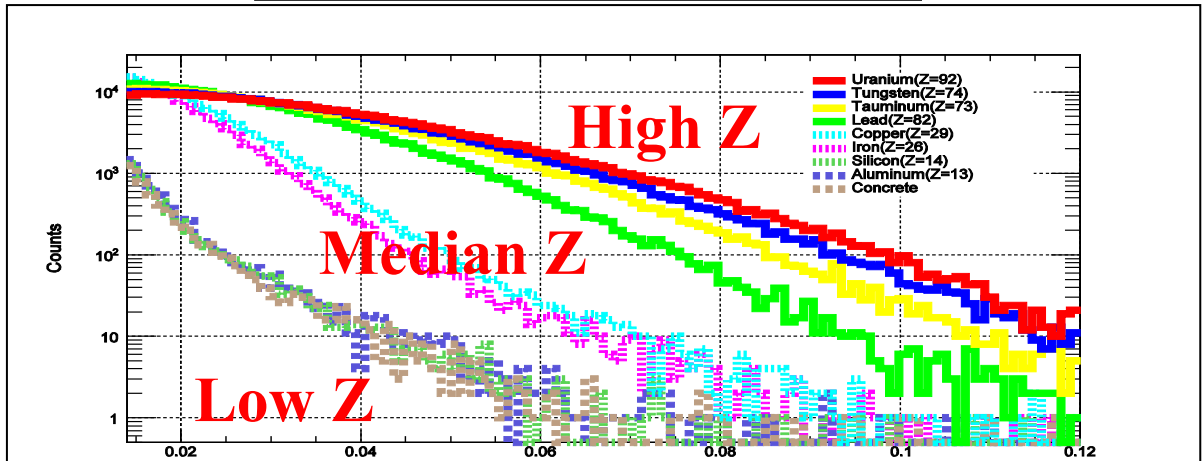
Muon多次
库伦散射
(Muon-
Coulomb-
Scattering)



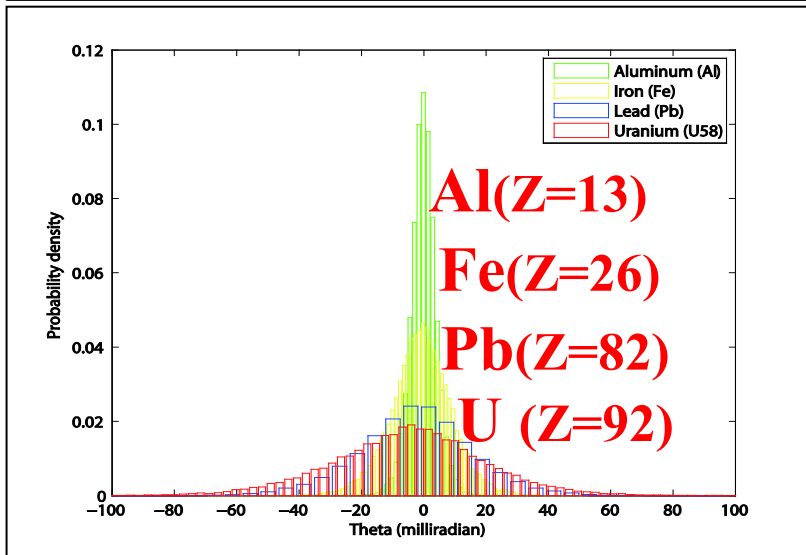
$$\sigma_{\theta} \cong \frac{13.6MeV}{\beta cp} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[1 + 0.038 \left(\frac{L}{X_0} \right) \right]$$



Muon的散射角近似高斯分布

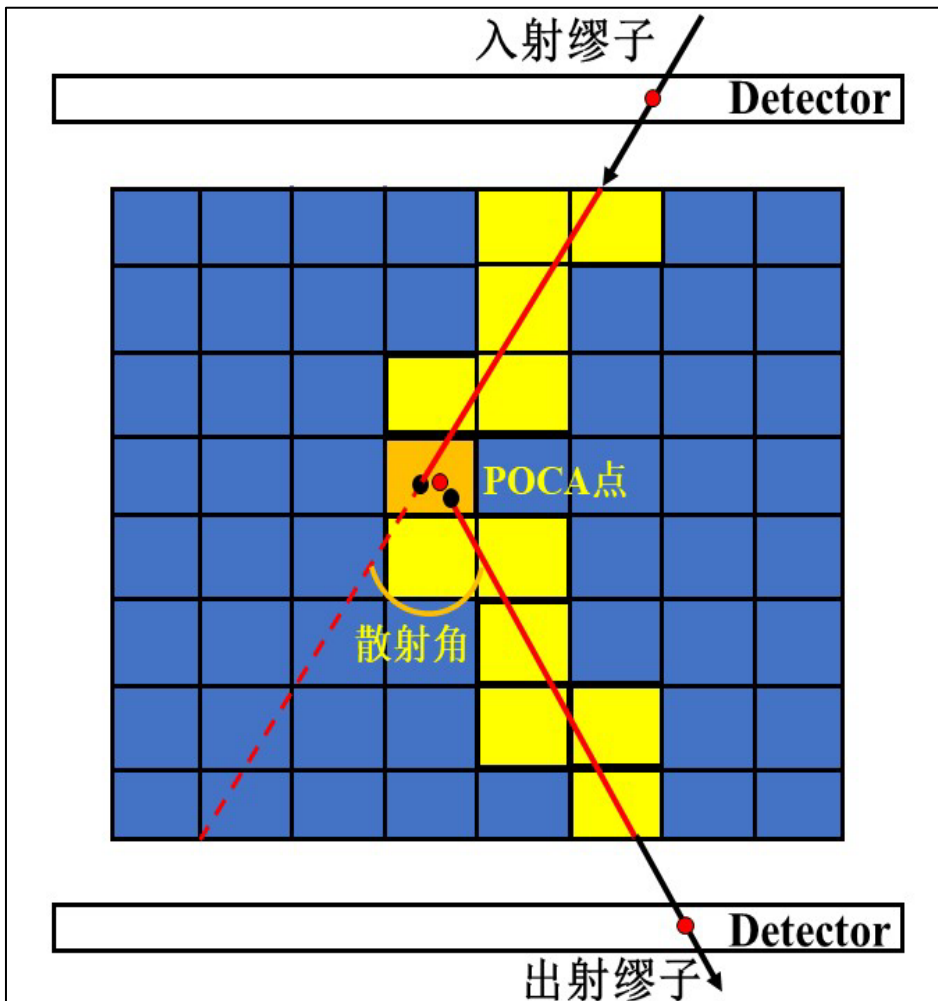


高、中、低Z物质的散射角分布存在明显分界



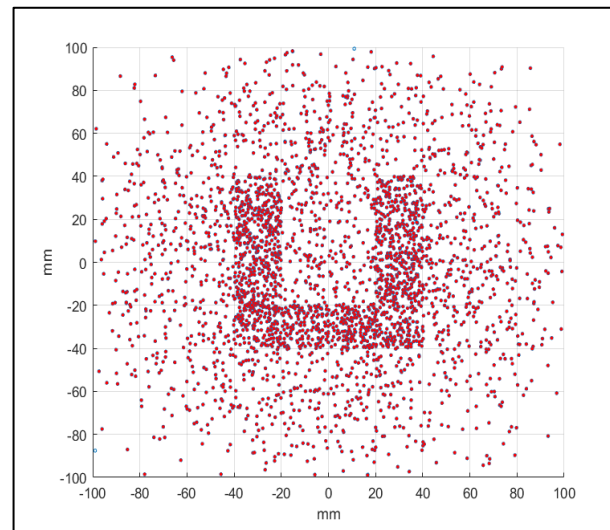
三、散射成像算法研究及优化

POCA算法 Point of Closest Approach



算法原理

PoCA算法将缪子与物质发生作用的多次库伦散射过程假定为单次散射，将入射径迹和出射径迹的最近点作为缪子与物质作用后的散射点，称为“PoCA点”。

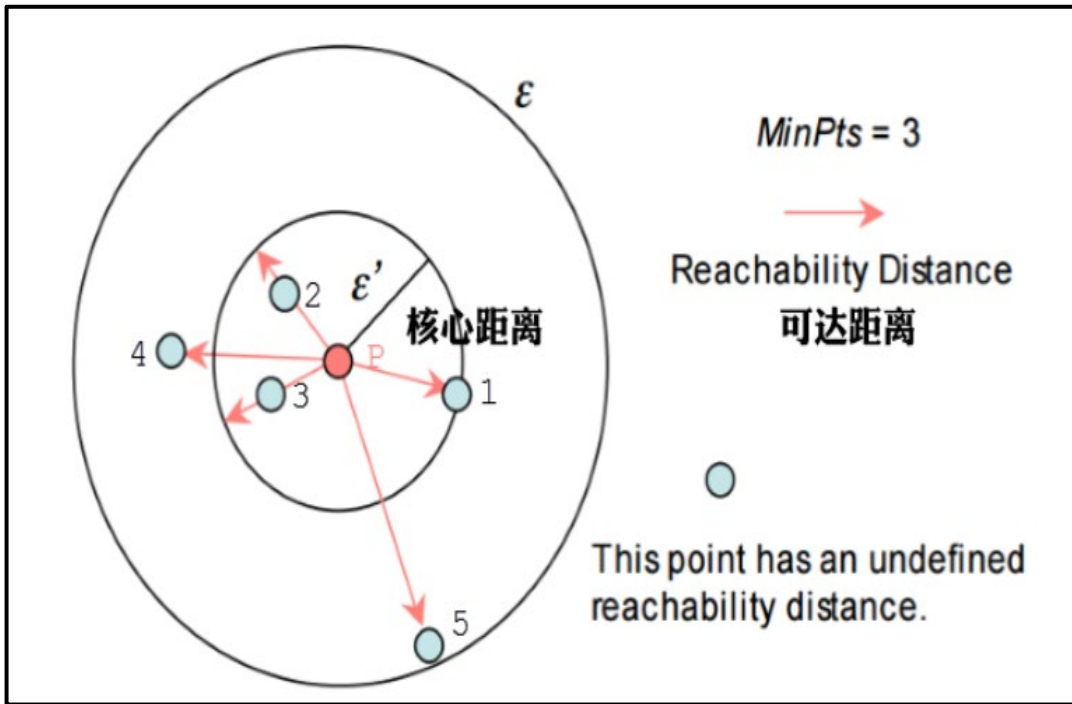


X-Y平面成像结果

三、 散射成像算法研究及优化

DBSCAN+OPTICS联合算法

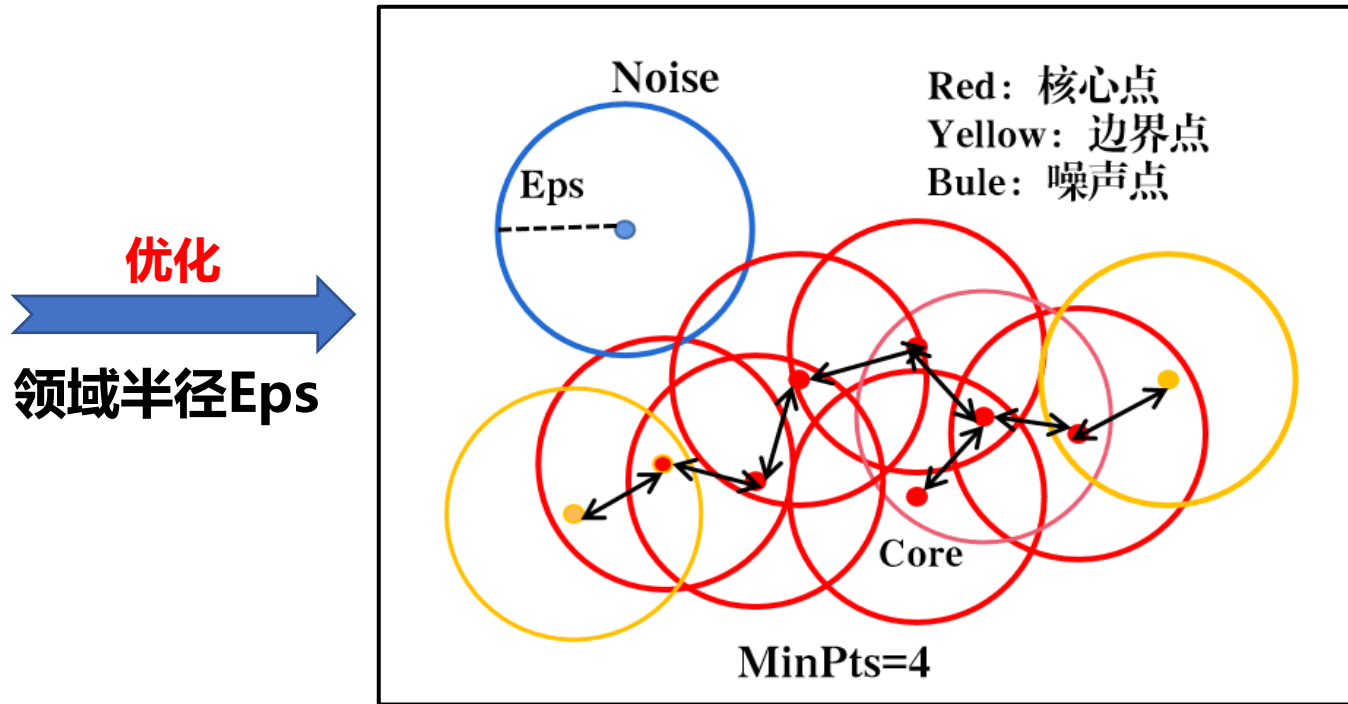
Ordering Points to identify the clustering structure



OPTICS原理图

OPTICS算法只要确定MinPts的值，改变半径Eps，不会影响聚类结果。

Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise



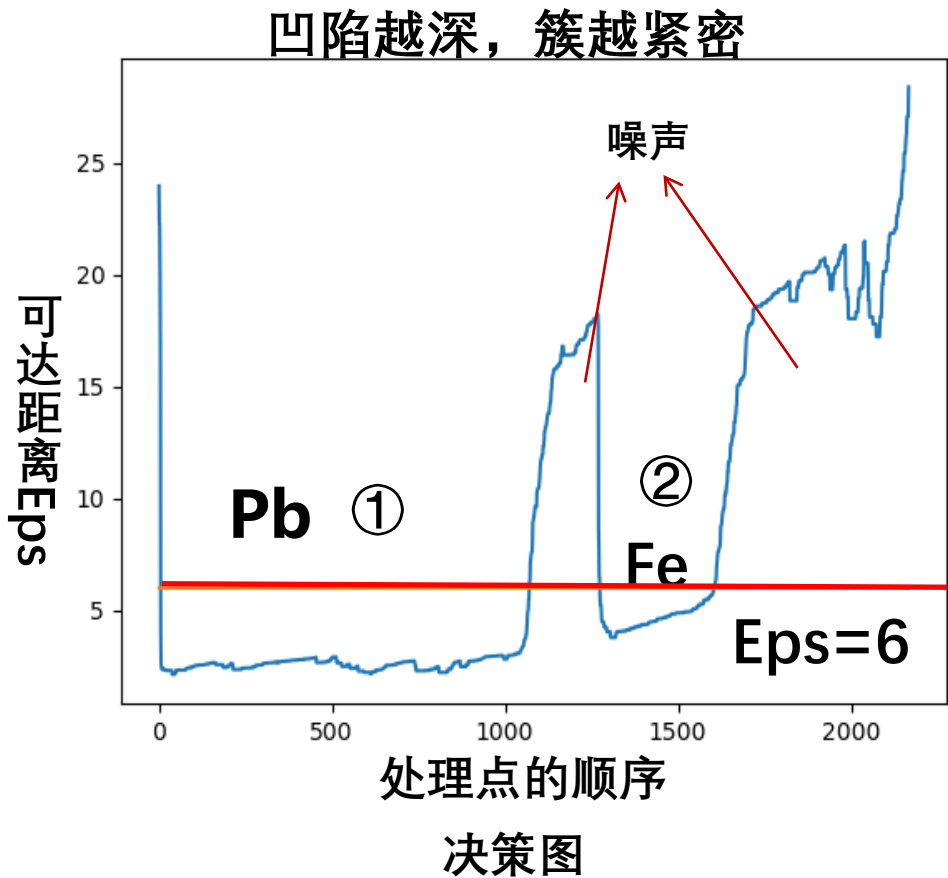
DBSCAN原理图

缺陷：对于输入参数领域半径Eps与最少点MinPts比较敏感，且较难选取

优化
领域半径Eps

三、散射成像算法研究及优化

OPTICS算法



- 可确定合适的领域半径Eps

散射角特征值

$$\sigma_{\theta} \cong \frac{13.6MeV}{\beta cp} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[1 + 0.038 \left(\frac{L}{X_0} \right) \right]$$

$$X_0 = \frac{716.4A}{\rho Z(Z+1) \ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)}$$

+

$$m_{ij} = \frac{\|v_i - v_j\|}{(\theta_i P_{r,i})(\theta_j P_{r,j})}$$

- 可确定领域半径特征值

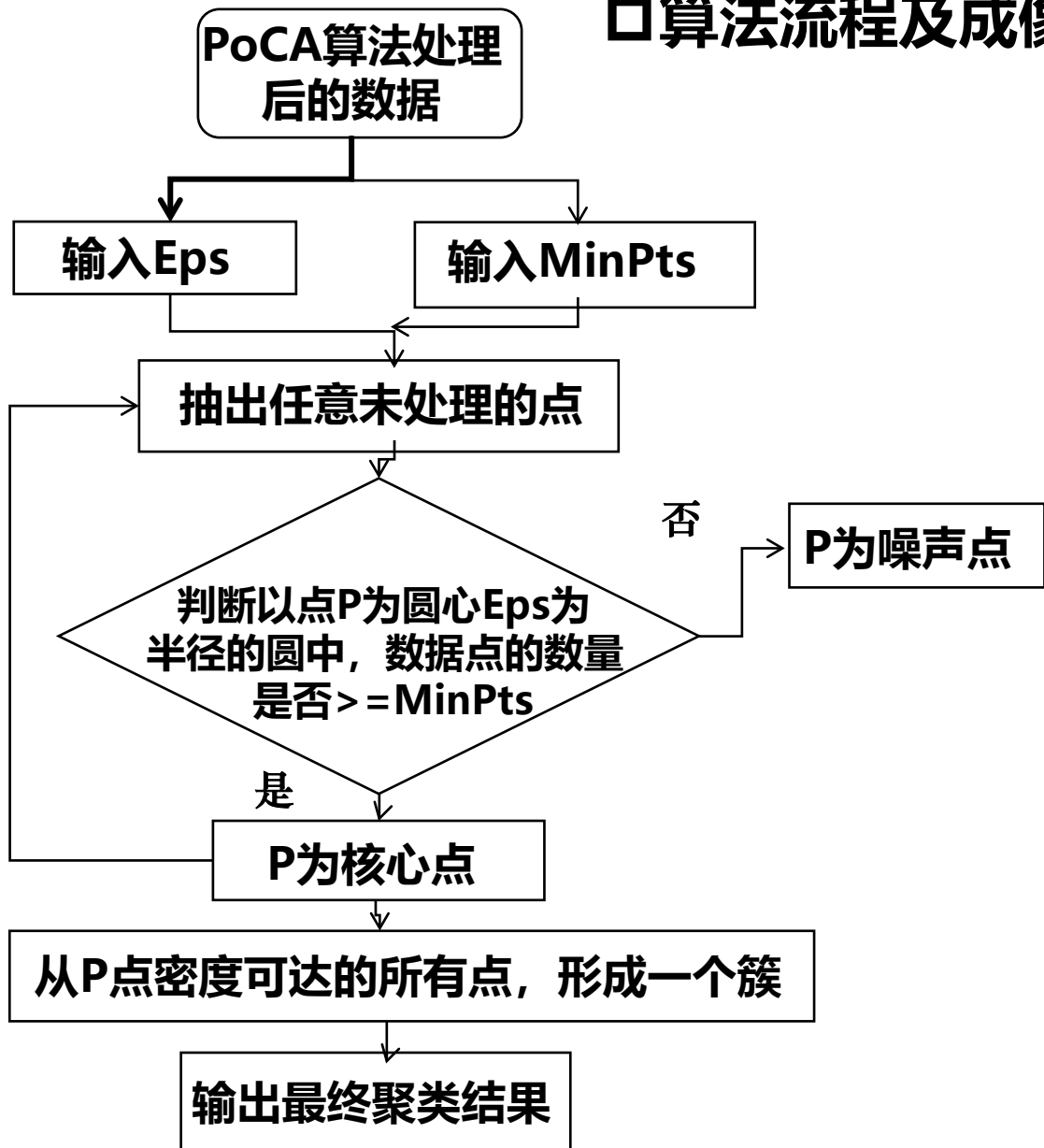
↓

$$m_{ij} \propto \frac{1}{\sigma_{\theta}} \propto \sqrt{X_0} \propto \frac{1}{Z}$$

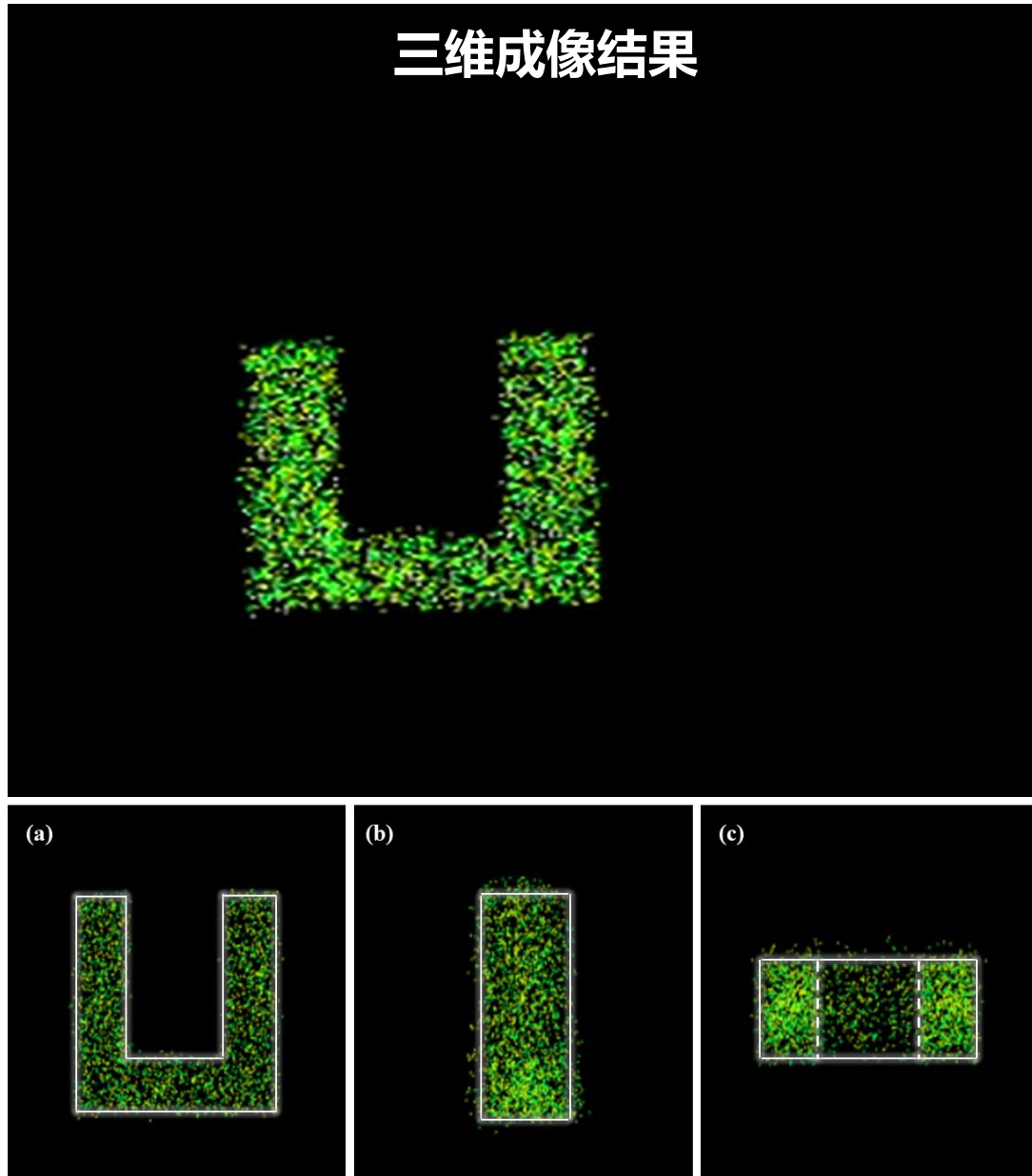
聚类值越小，两个散射点越近，散射角越大，检测为高Z材料的概率越大。

三、 散射成像算法研究及优化

□ 算法流程及成像结果

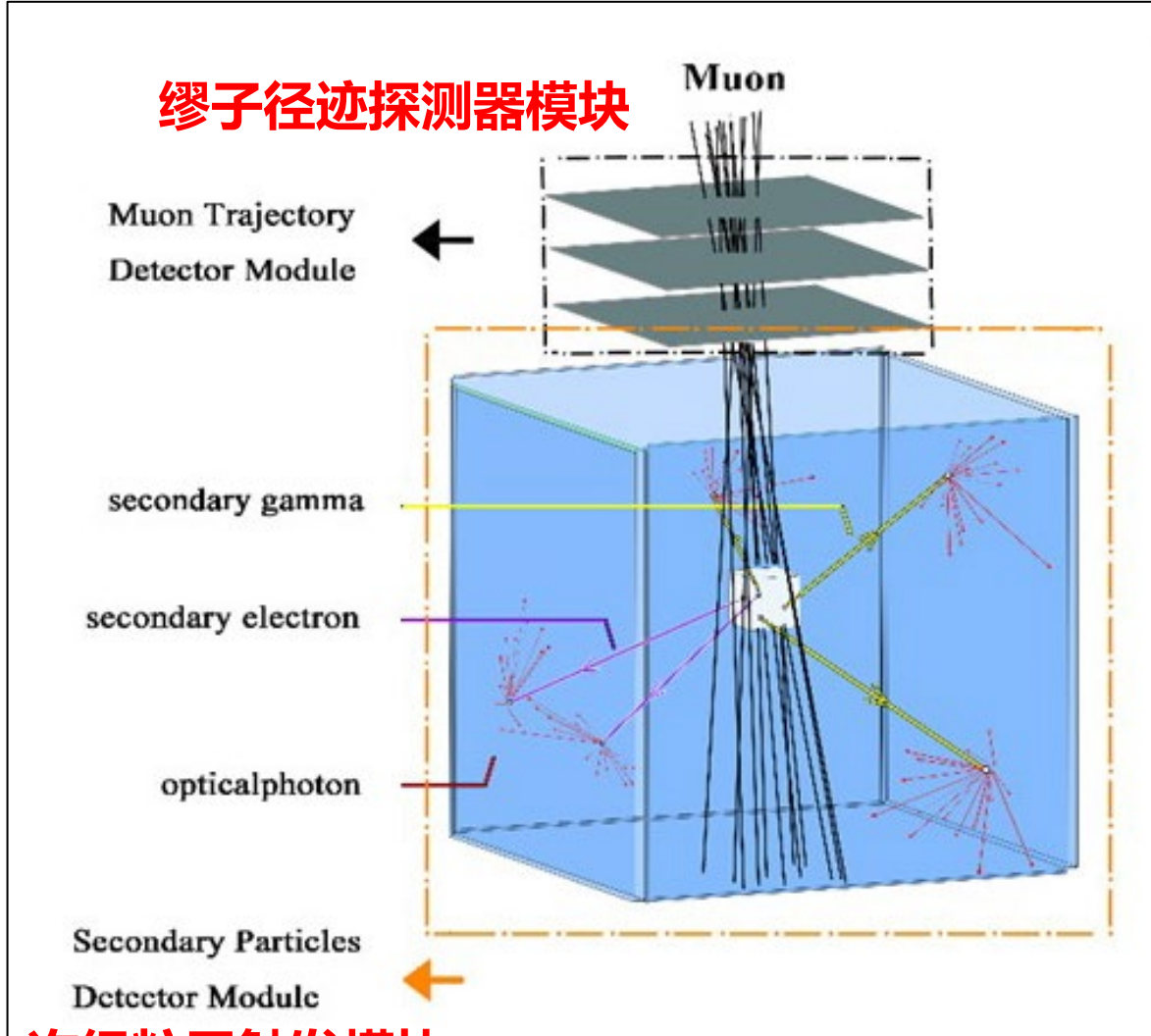


三维成像结果



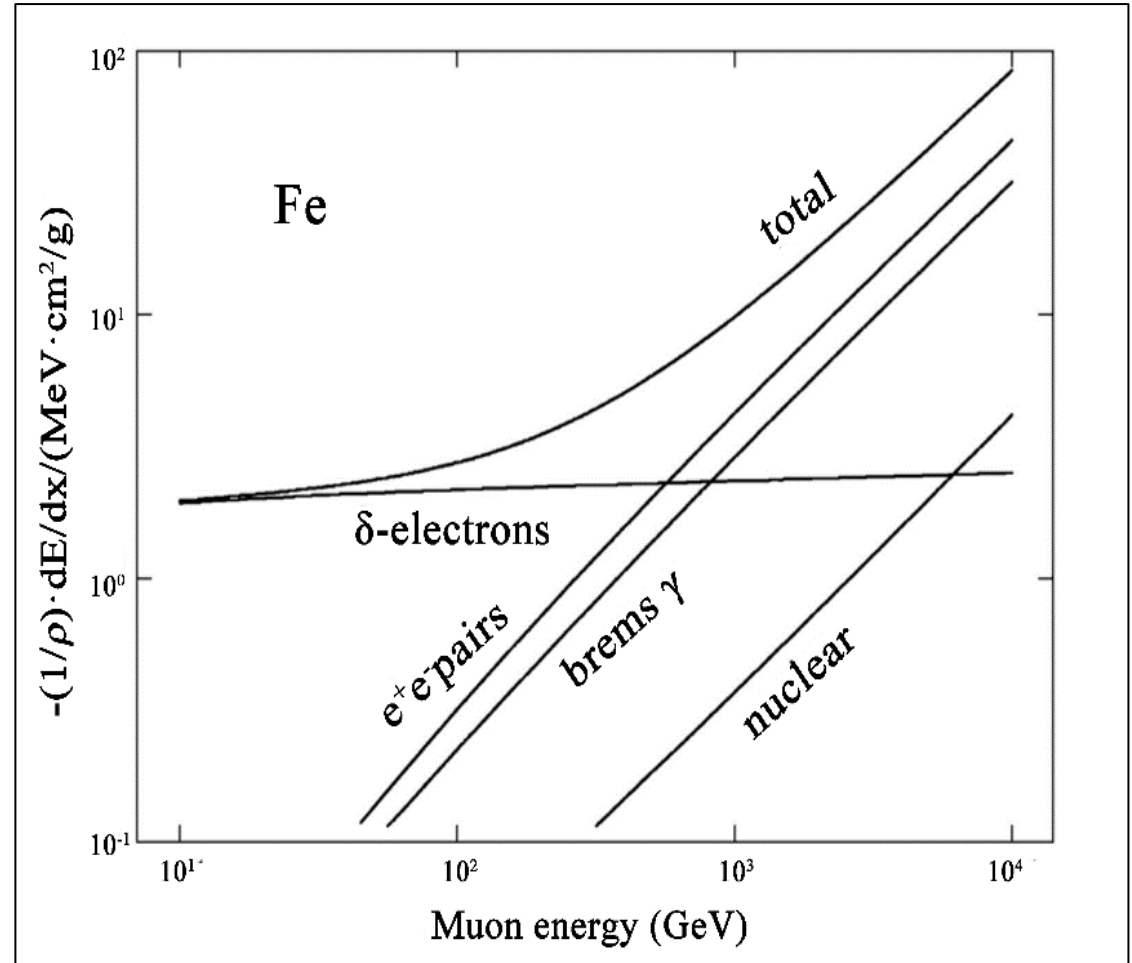
四、符合径迹密度成像技术模拟研究

Geant4几何建模



次级粒子触发模块

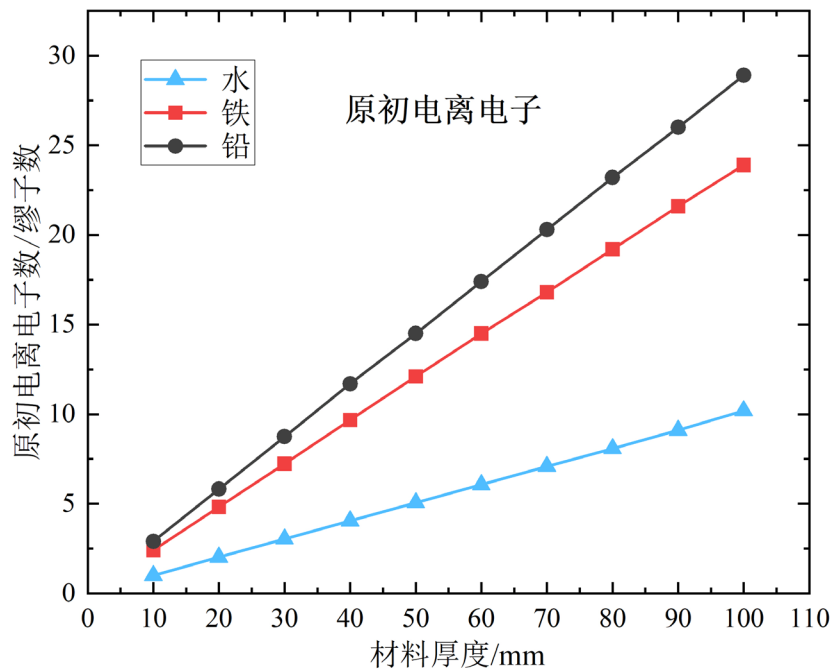
缪致次级粒子的组成



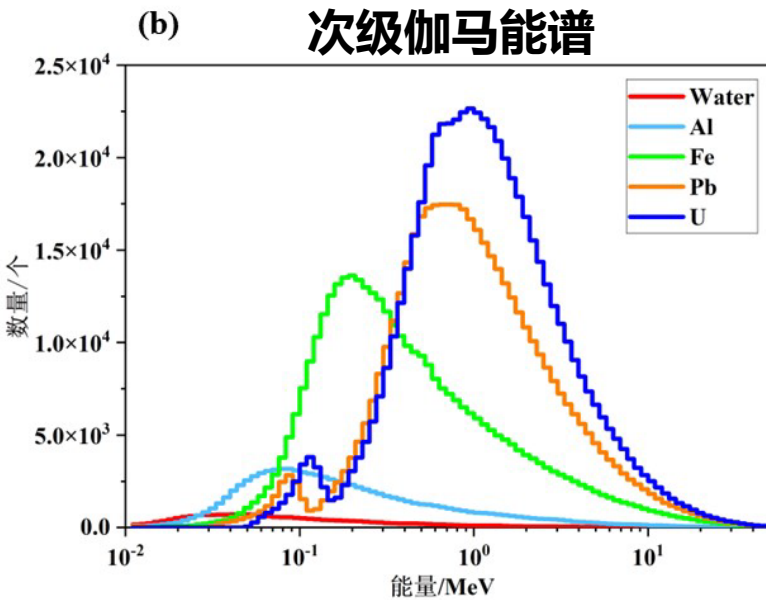
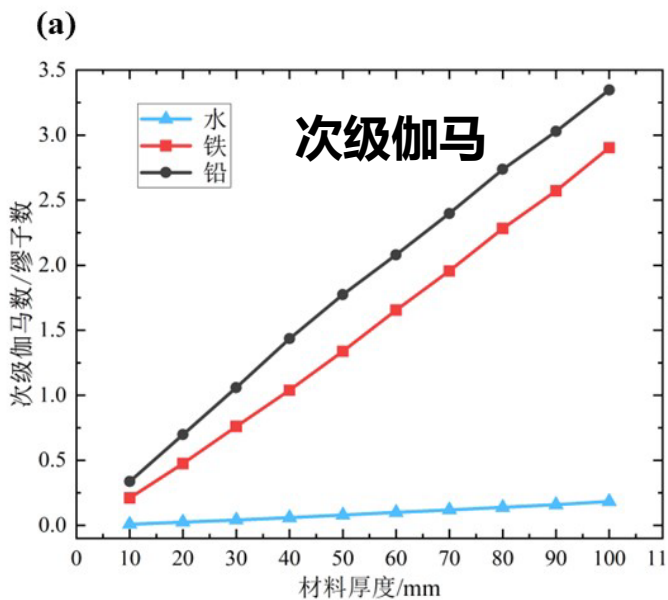
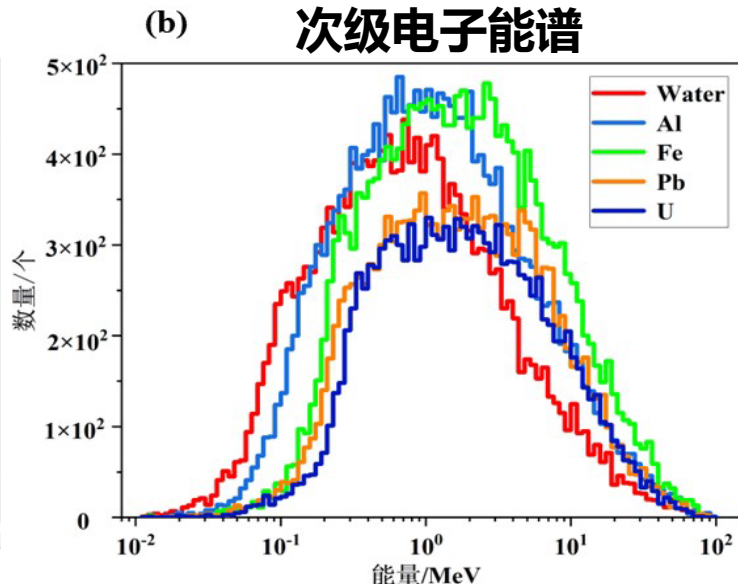
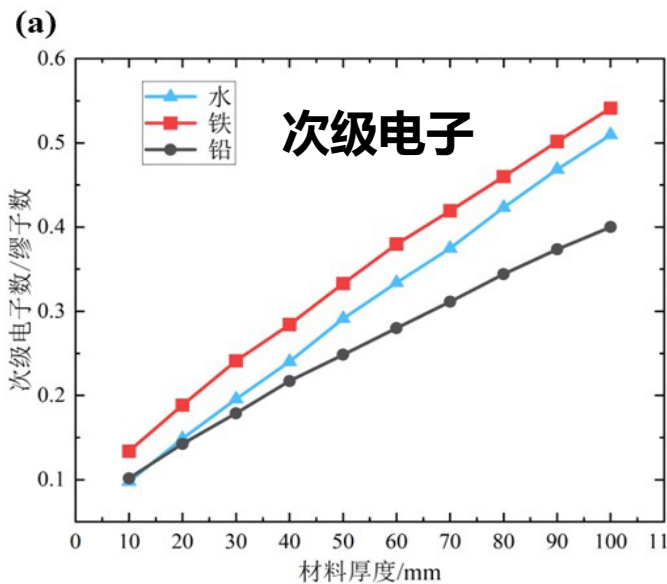
次级粒子由次级电子与次级伽马组成

四、符合径迹密度成像技术模拟研究

缪致次级粒子特性



- 次级粒子的数量随缪子穿过厚度的增加而近似线性增加



四、符合径迹密度成像技术模拟研究

符合径迹密度成像算法

第一步：

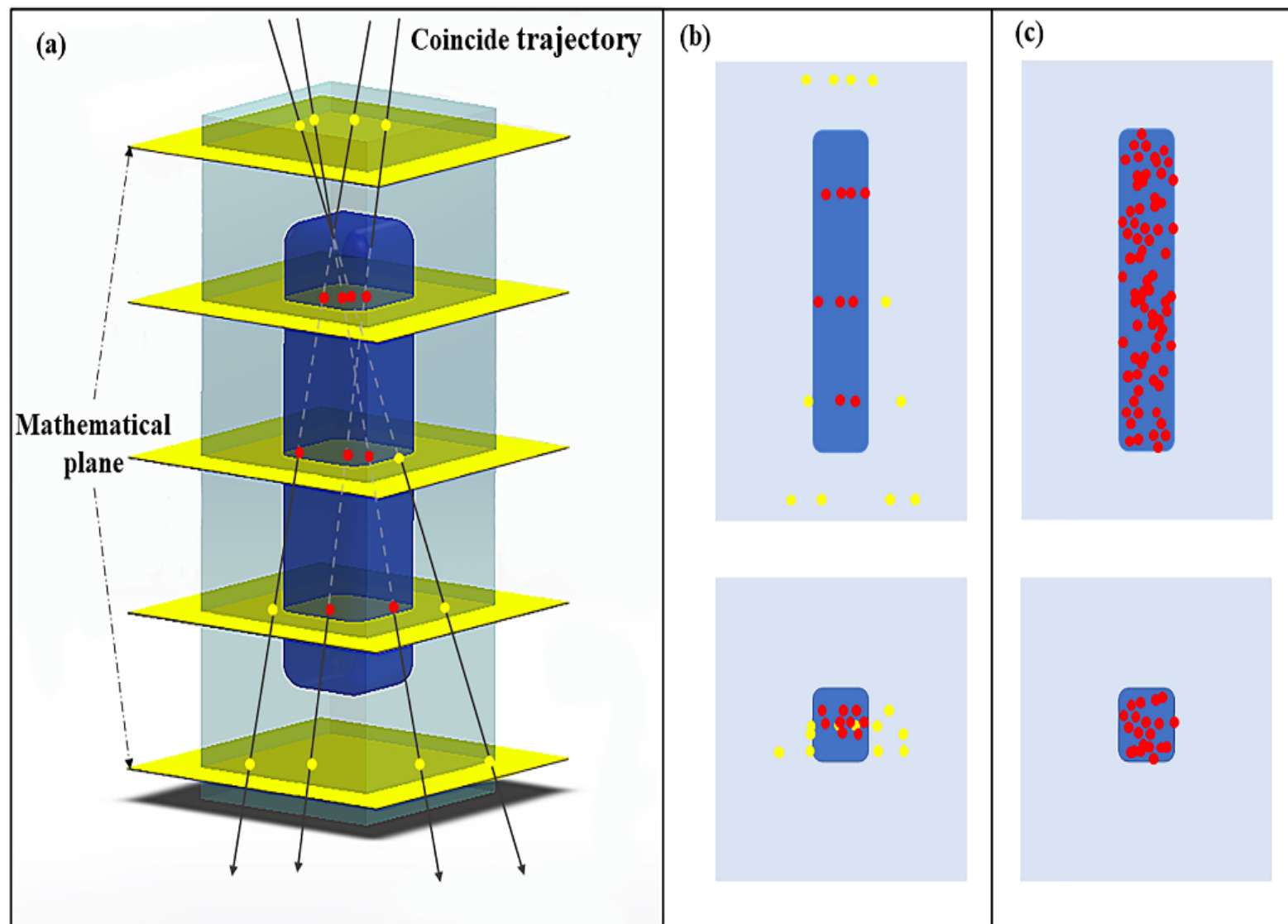
每一个符合缪子径迹与每一个数学平面产生一个交点

第二步：

通过设定阈值，挑选交点最密集的区域

第三步：

将区域内的交点数量转换为体素的赋值，重建待测物体图像

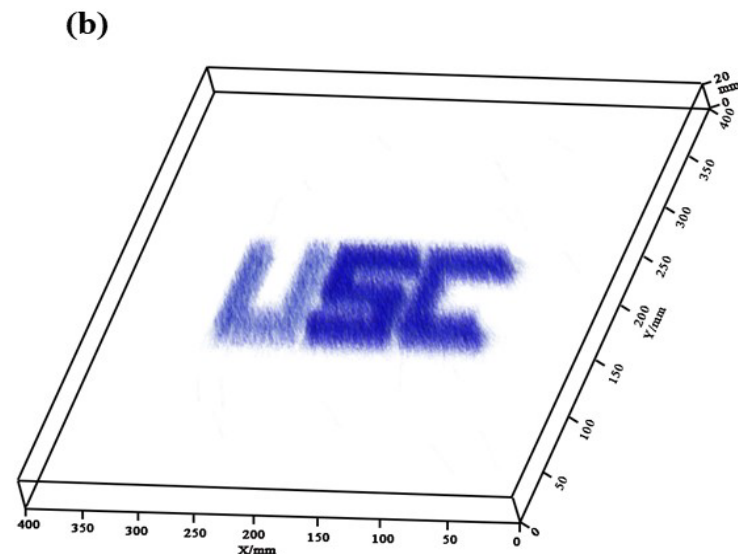
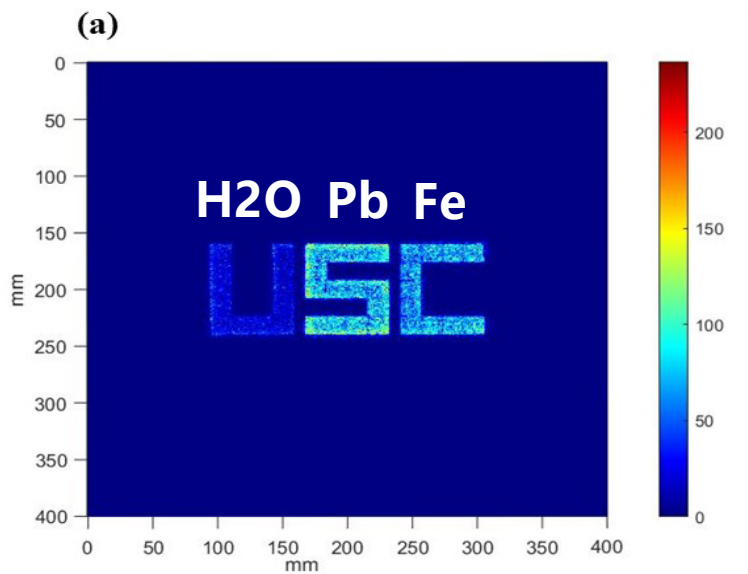


四、符合径迹密度成像技术模拟研究

不同材料的成像质量

高Z材料重建图像由于自吸收效应

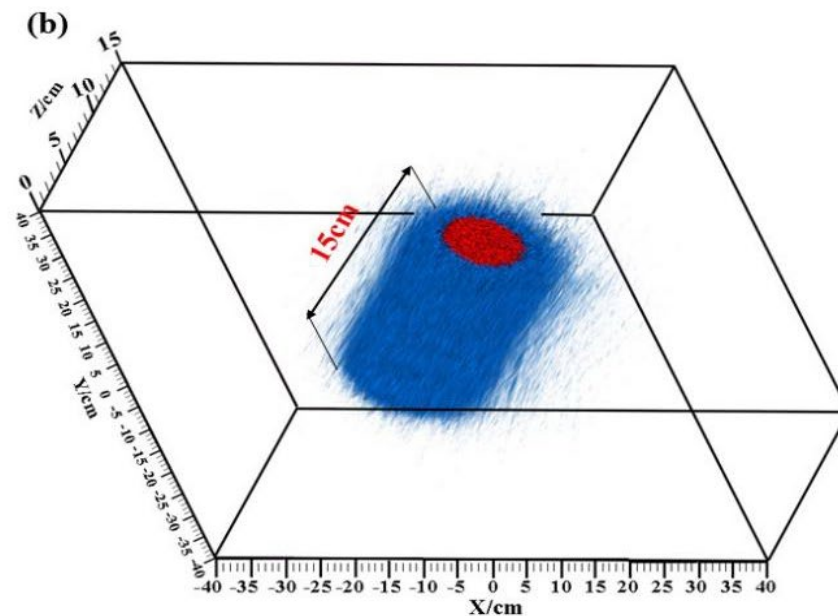
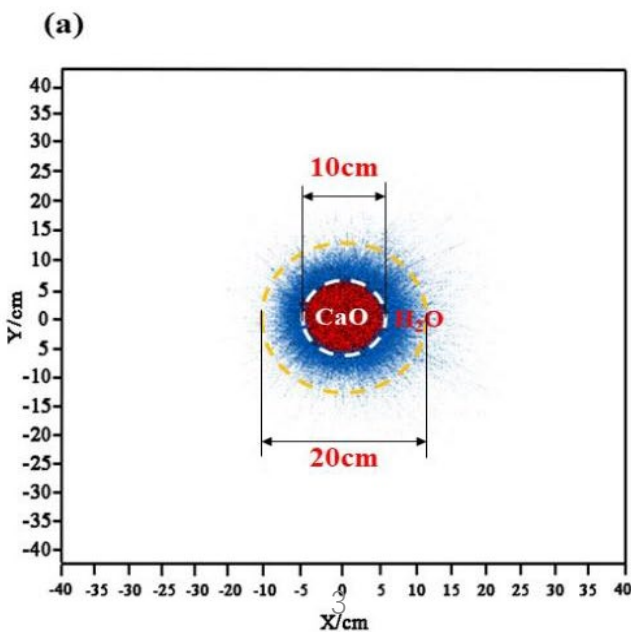
存在中空现象



骨头模型的三维成像效果

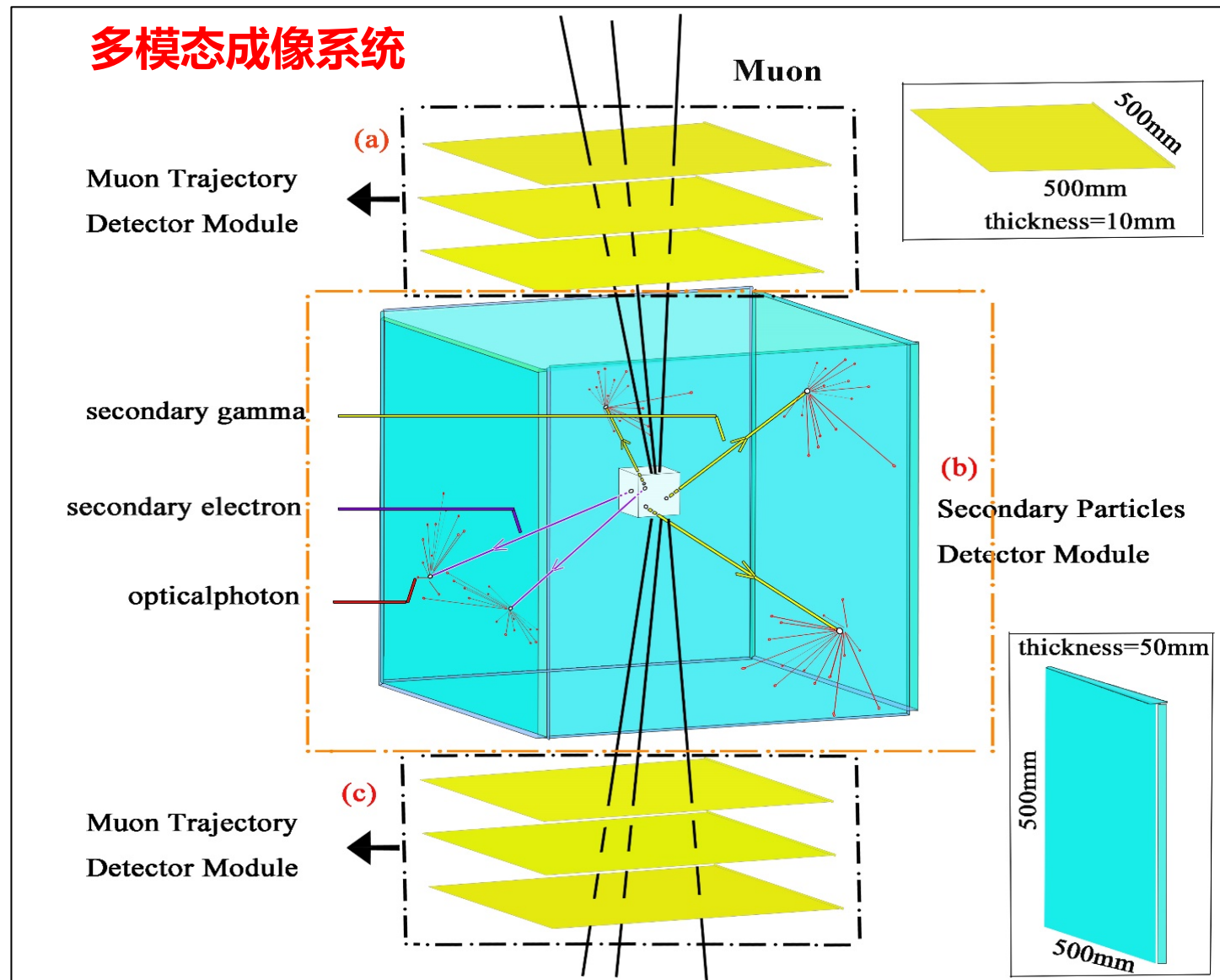
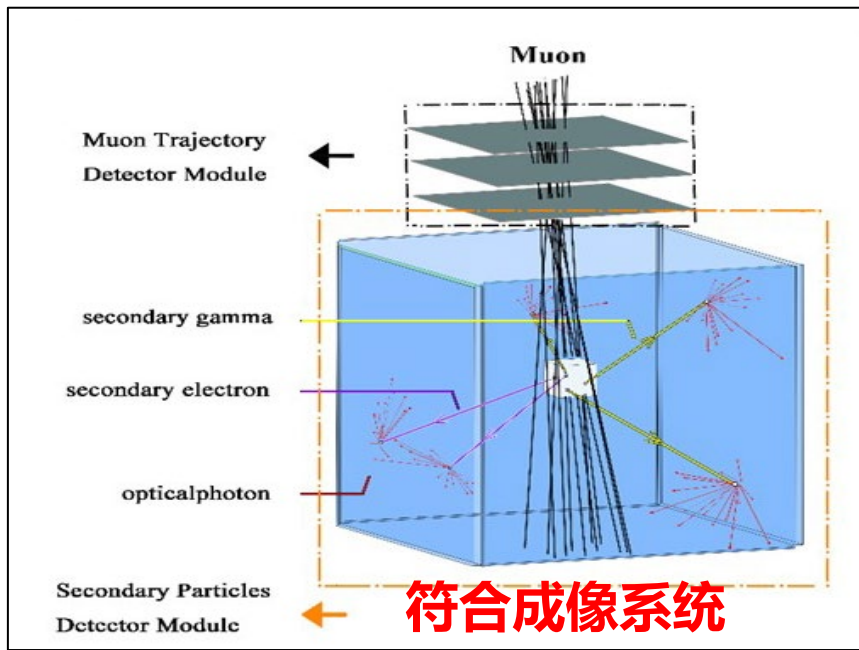
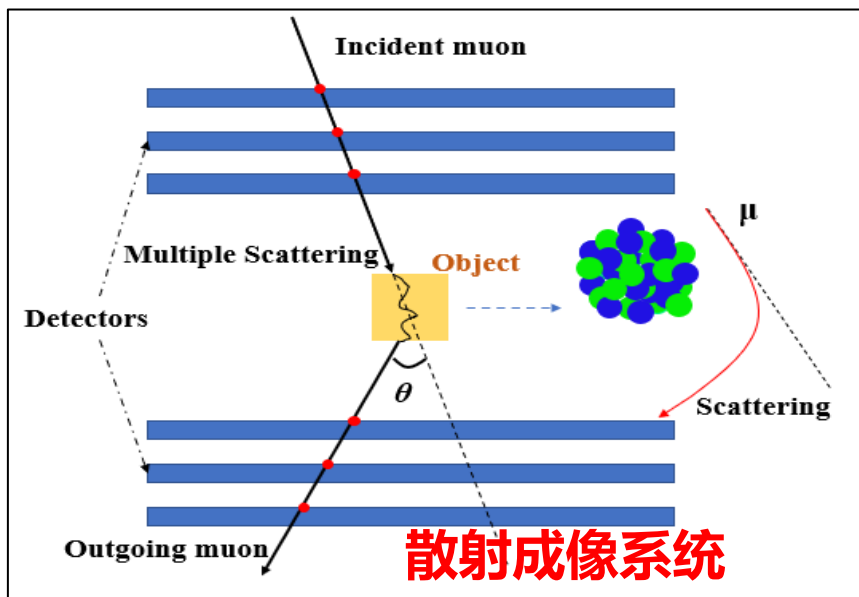
验证了缪子成像技术在医用成像

领域的可行性



五、多模态成像技术模拟研究

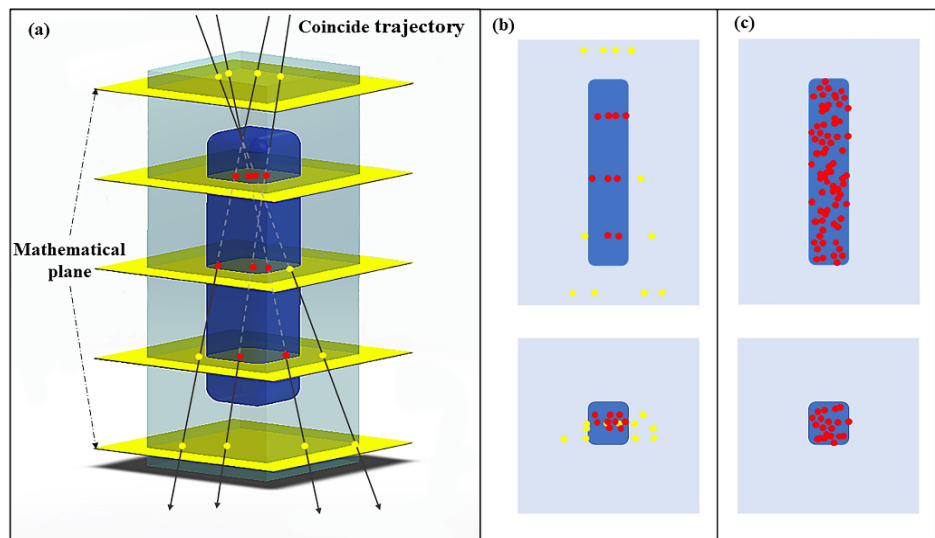
多模态成像系统几何建模



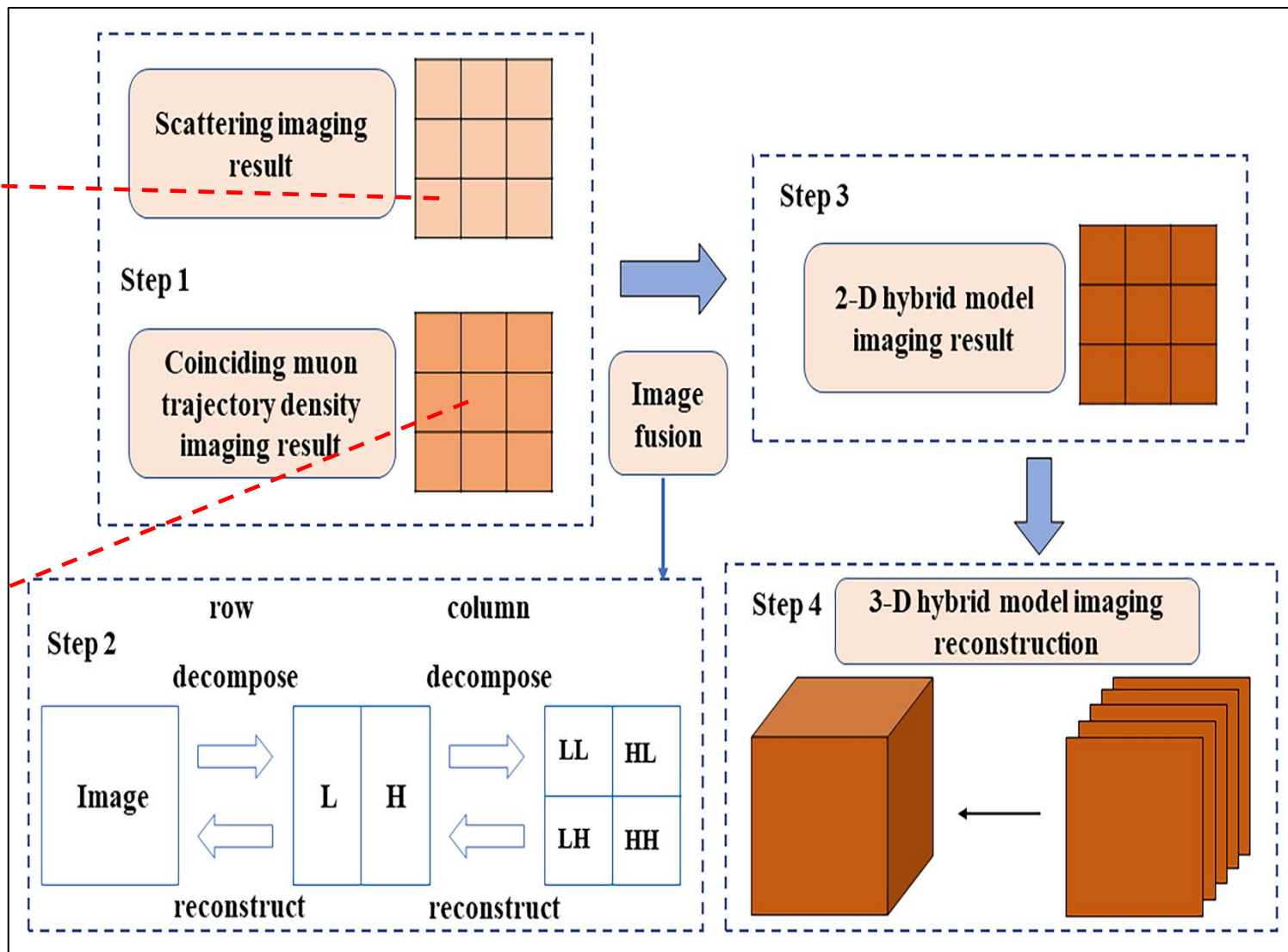
五、多模态成像技术模拟研究

多模态成像算法

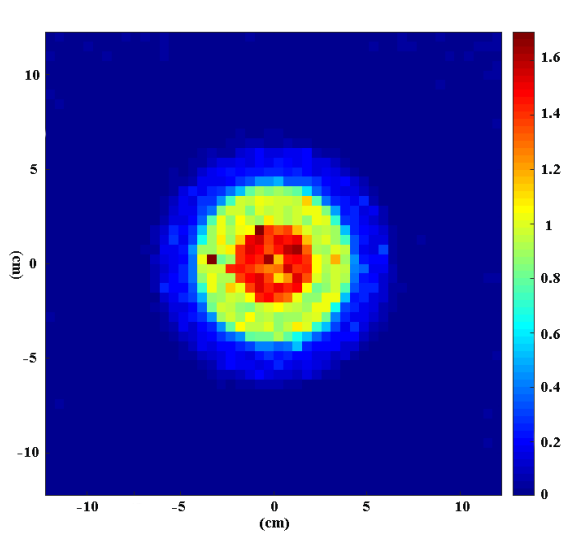
**DBSCAN+OPTICS联合
散射成像算法**



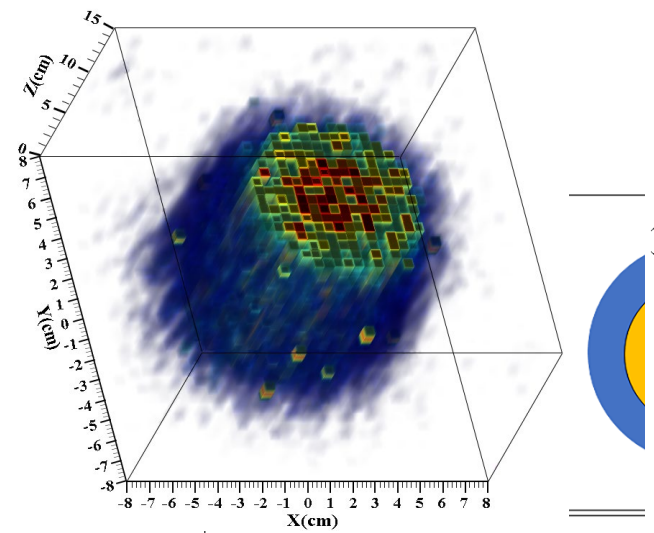
符合径迹密度成像算法



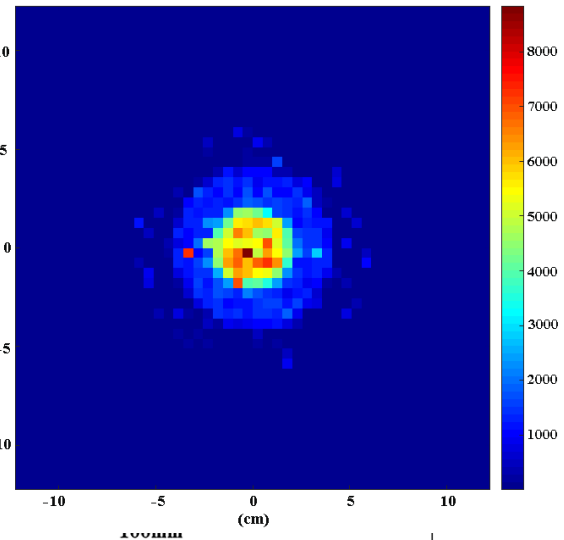
五、多模态成像技术模拟研究



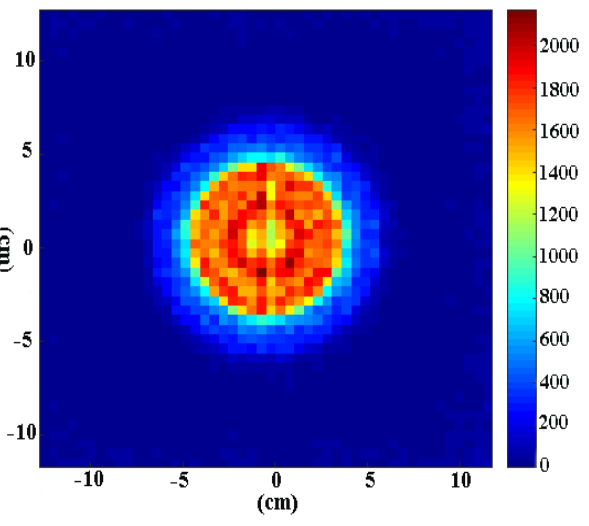
多模态成像技术



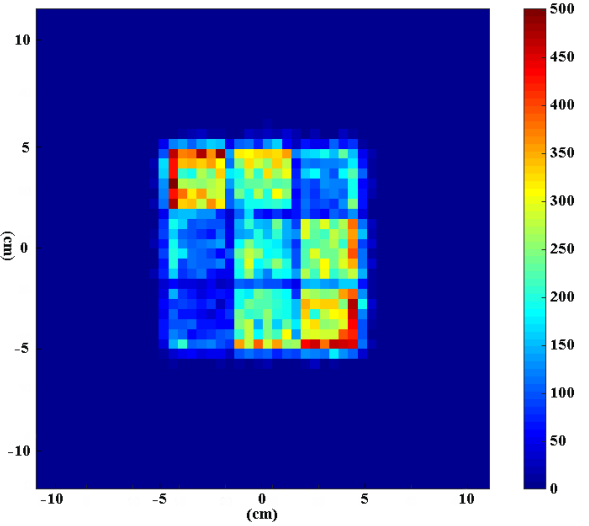
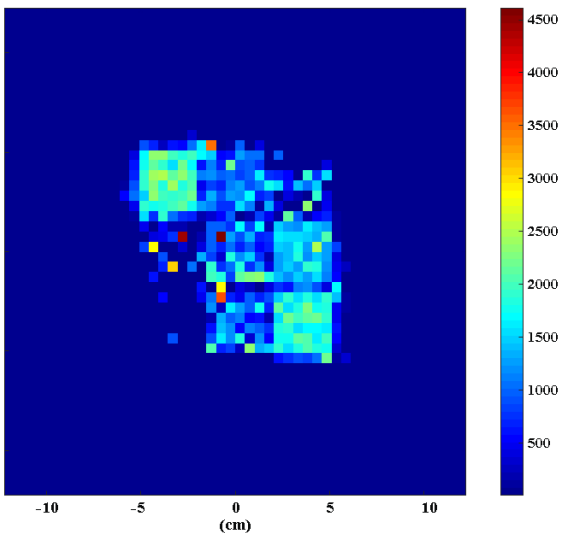
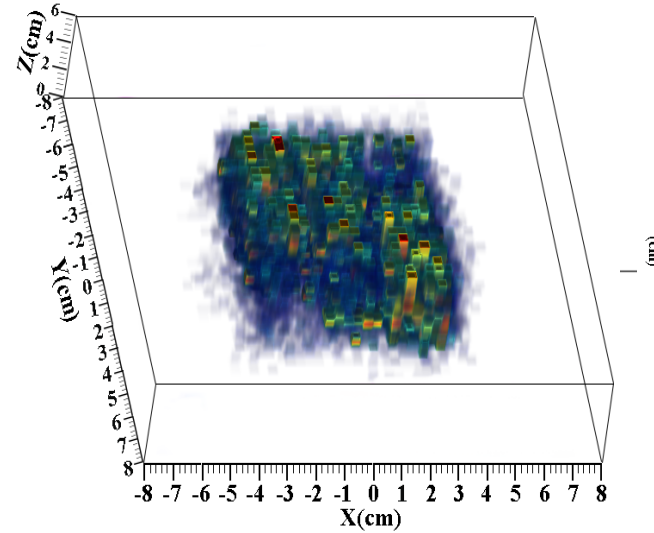
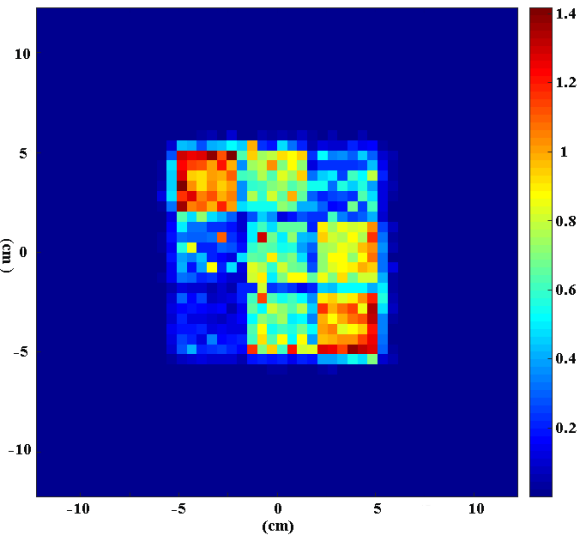
多模态三维成像结果



散射成像技术

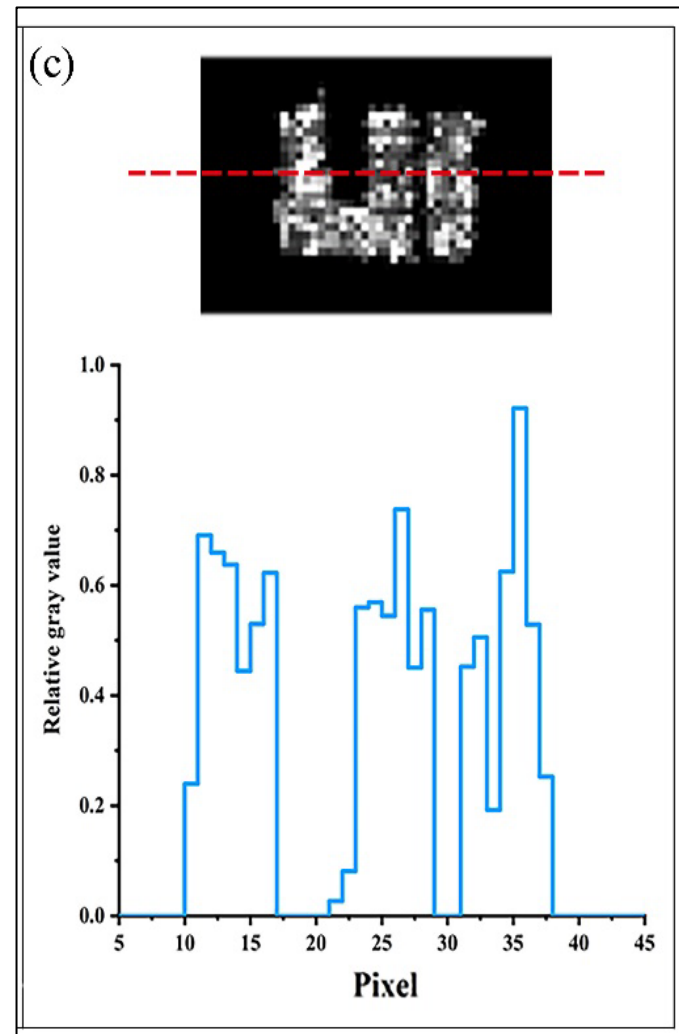
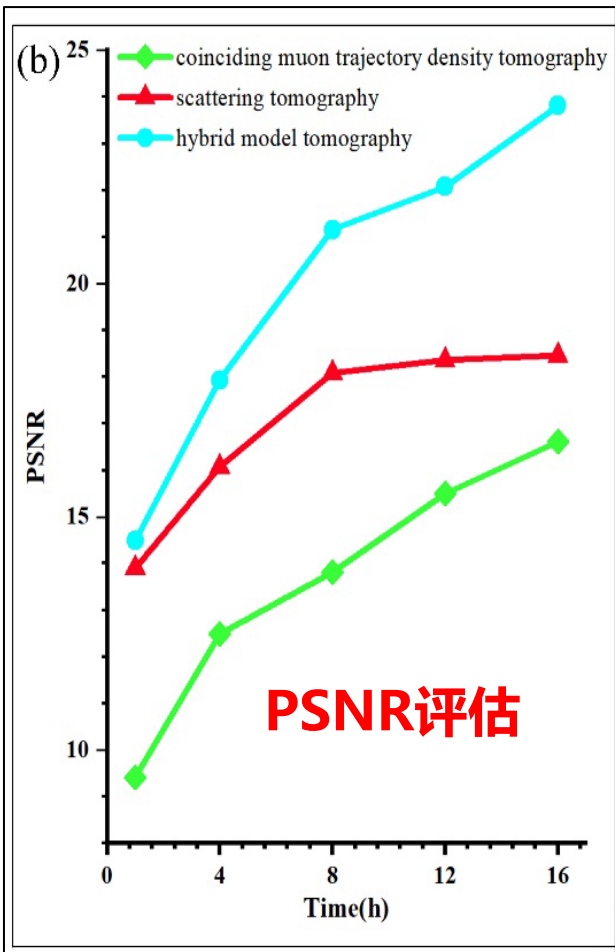
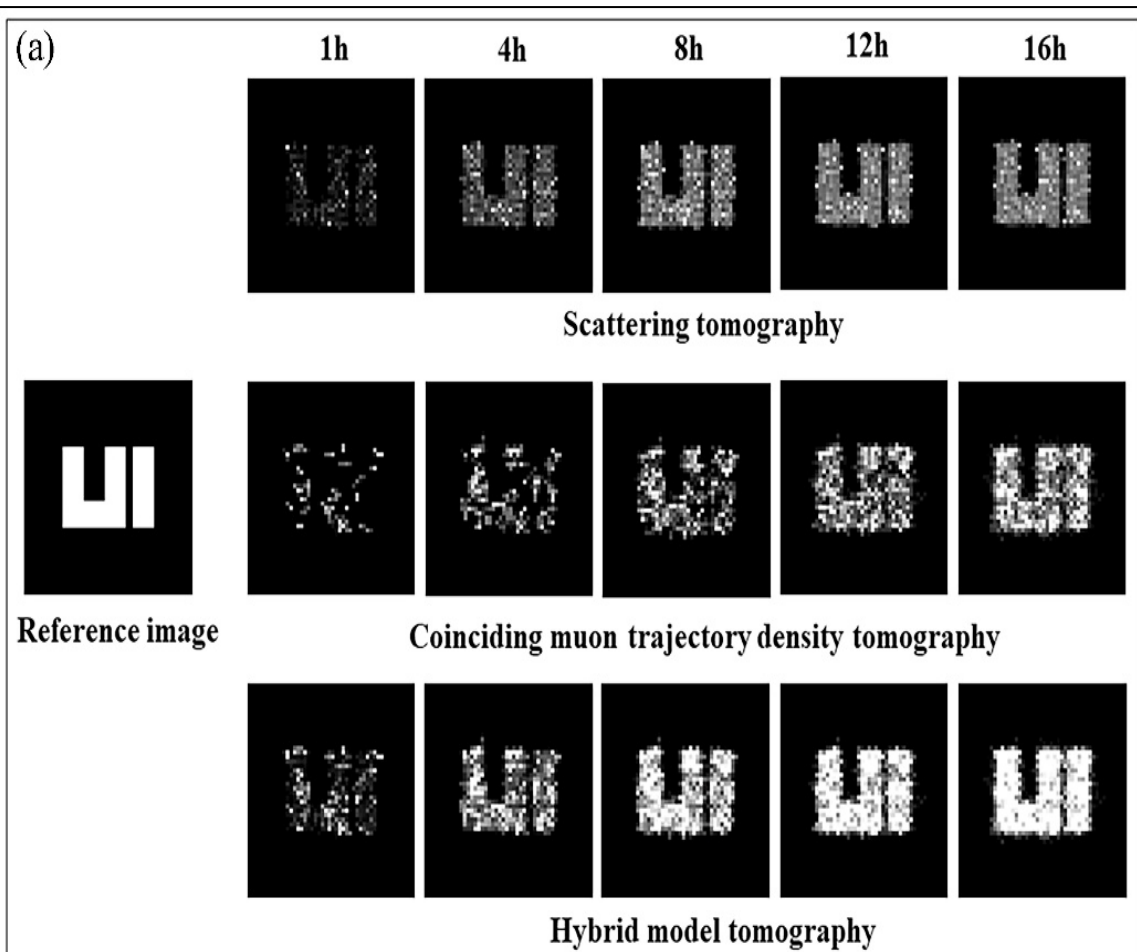


符合径迹成像技术



五、多模态成像技术模拟研究

□ 图像质量评估



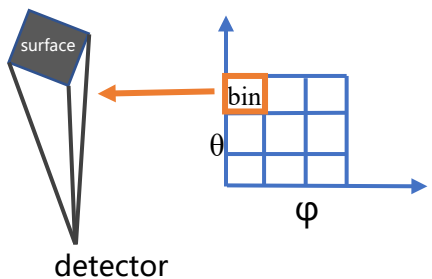
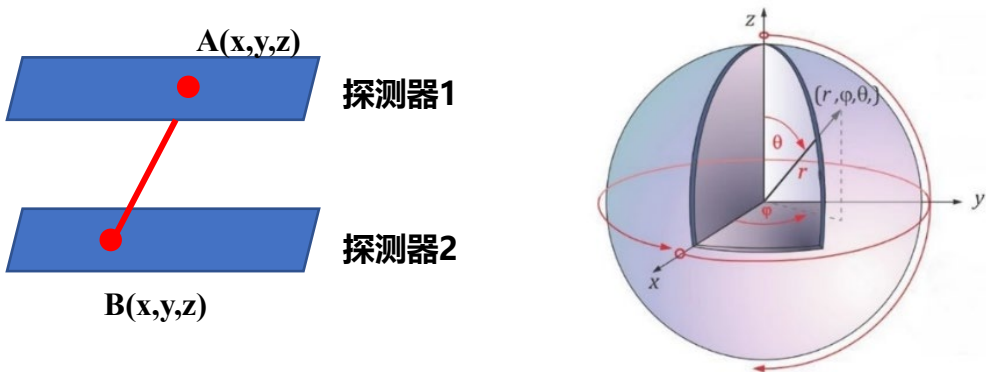
多模态成像技术所重建图像质量**明显优于**两种单个方法

可区分**10mm**裂隙

六、透射成像在地质勘探的模拟研究

01 研究内容一：反演算法

缪子透射成像技术是一种基于**密度差**的新型成像技术，计算比较缪子穿过物质前后的通量，且在**密度差大于5%**时能够对不同的地质结构进行有效的区分。

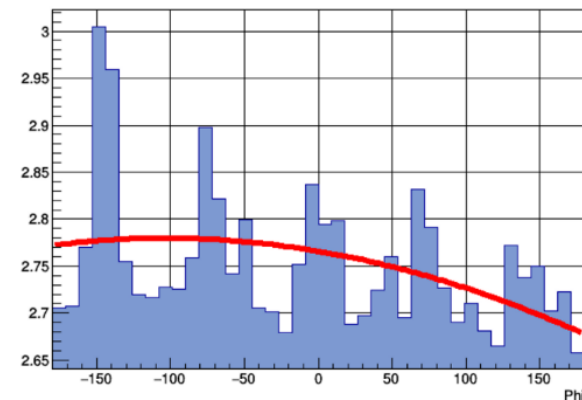
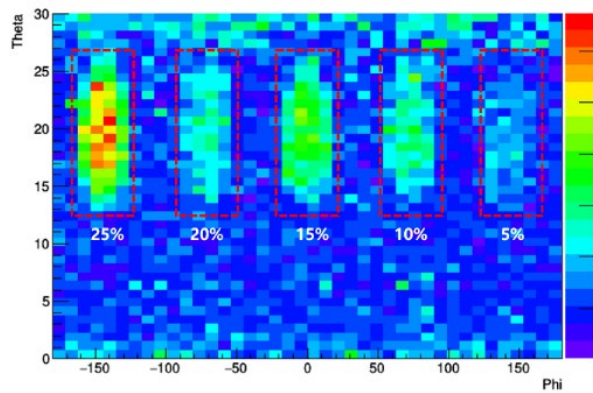
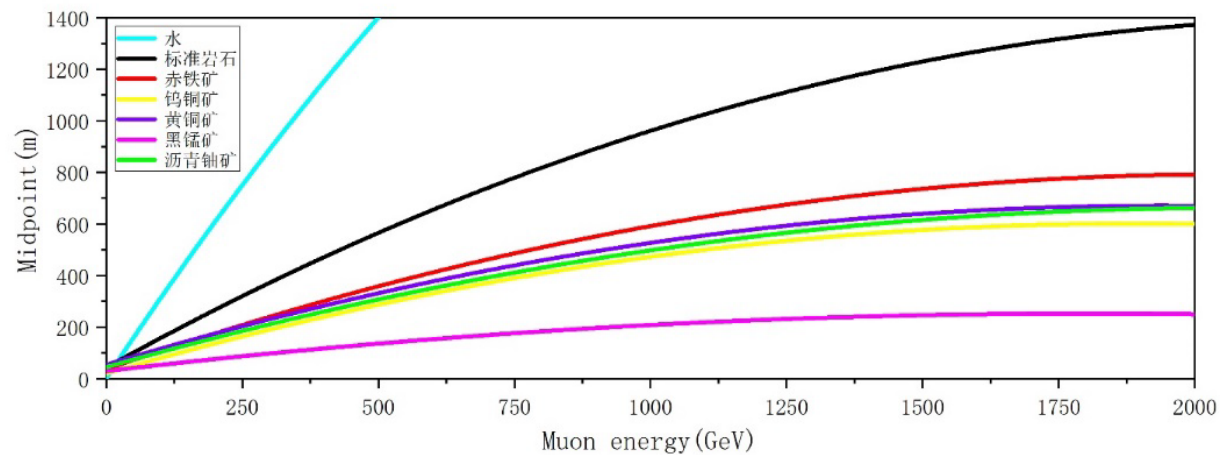
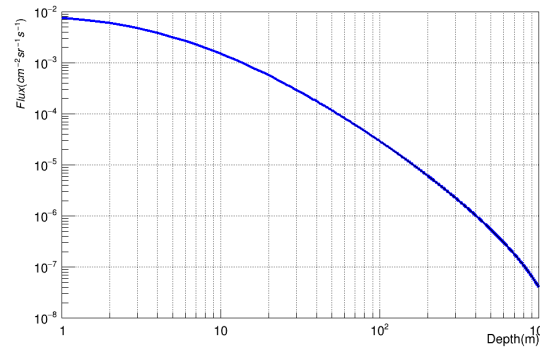
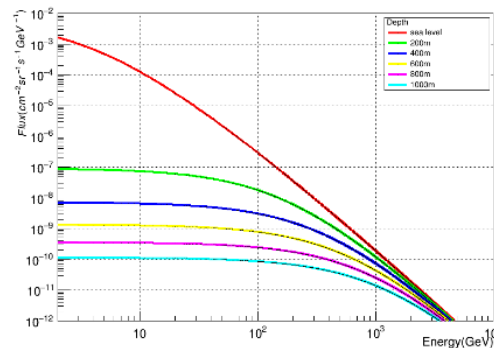


$$T = \frac{N_{\mu,obj}(\theta,\phi)}{N_{\mu,sky}(\theta,\phi)} = \frac{\int_{E_{min}}^{\infty} \Phi(E_0,\theta) dE_0}{\int_0^{\infty} \Phi(E_0,\theta) dE_0} \quad (\text{透射率})$$

$$E_{min} = \frac{a}{b} (e^{bx} - 1) \quad (\text{最小穿过能量})$$

$$x = \int_L \rho(\xi) d(\xi) \quad (\text{不透明度})$$

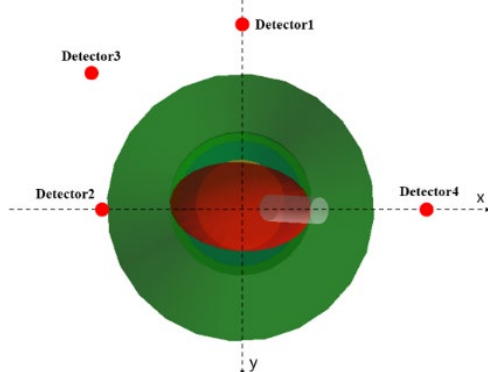
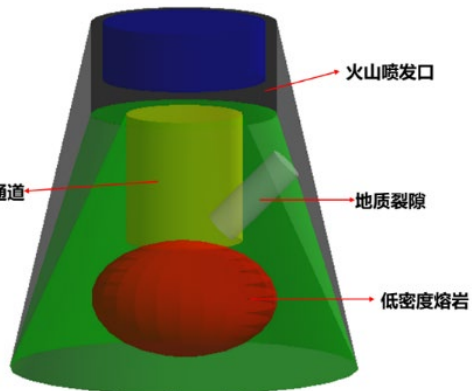
$$X = G\rho \quad (\text{密度})$$



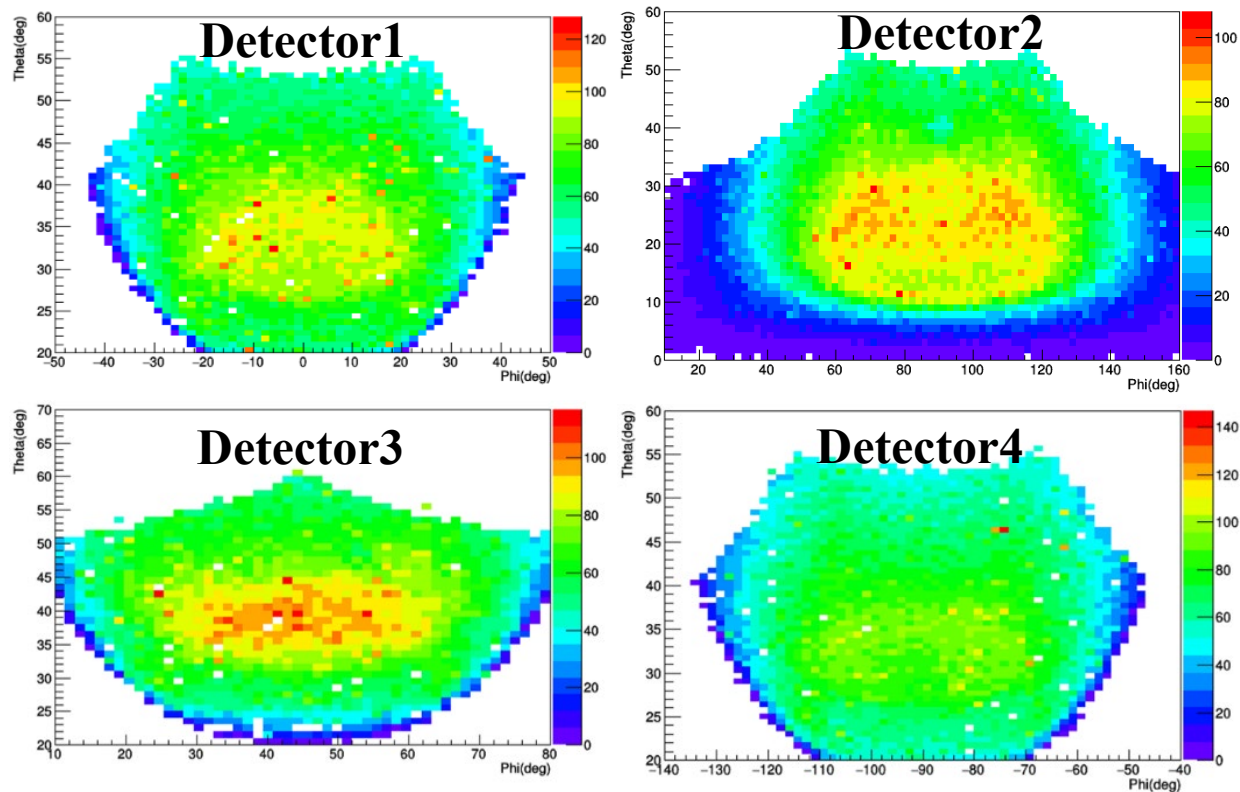
六、透射成像在地质勘探的模拟研究

02 研究内容二: 火山成像

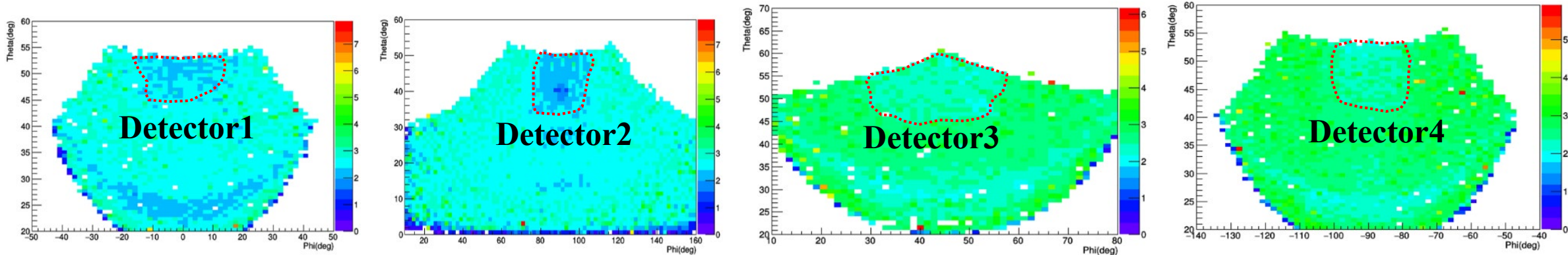
天顶角 50° 出现的低密度区域为模型中的低密度熔岩



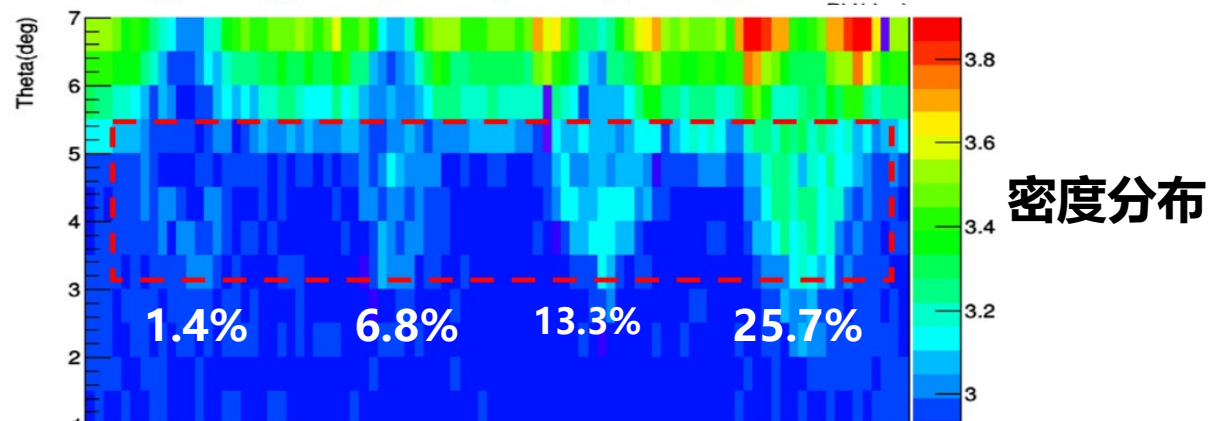
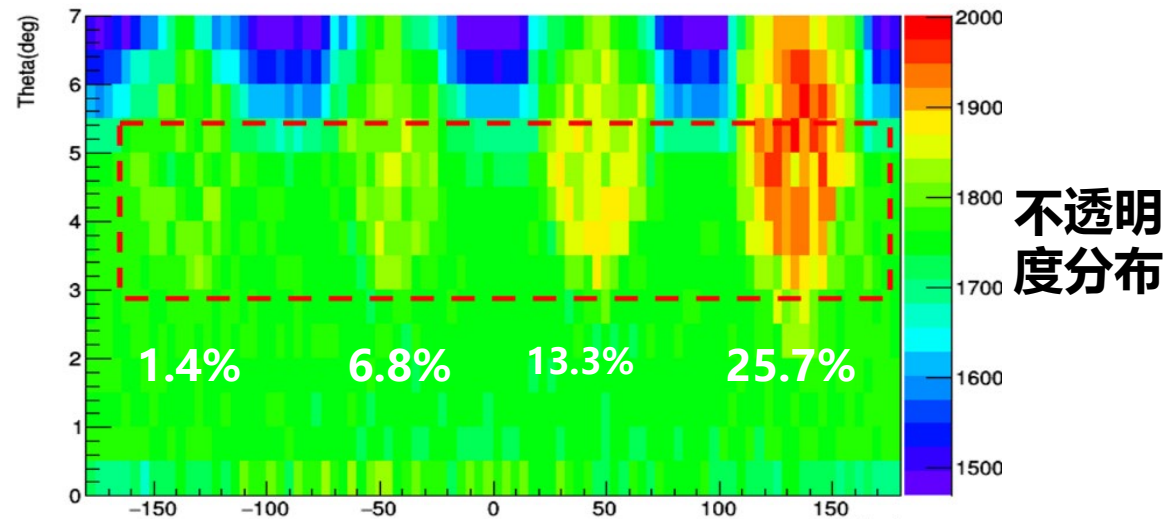
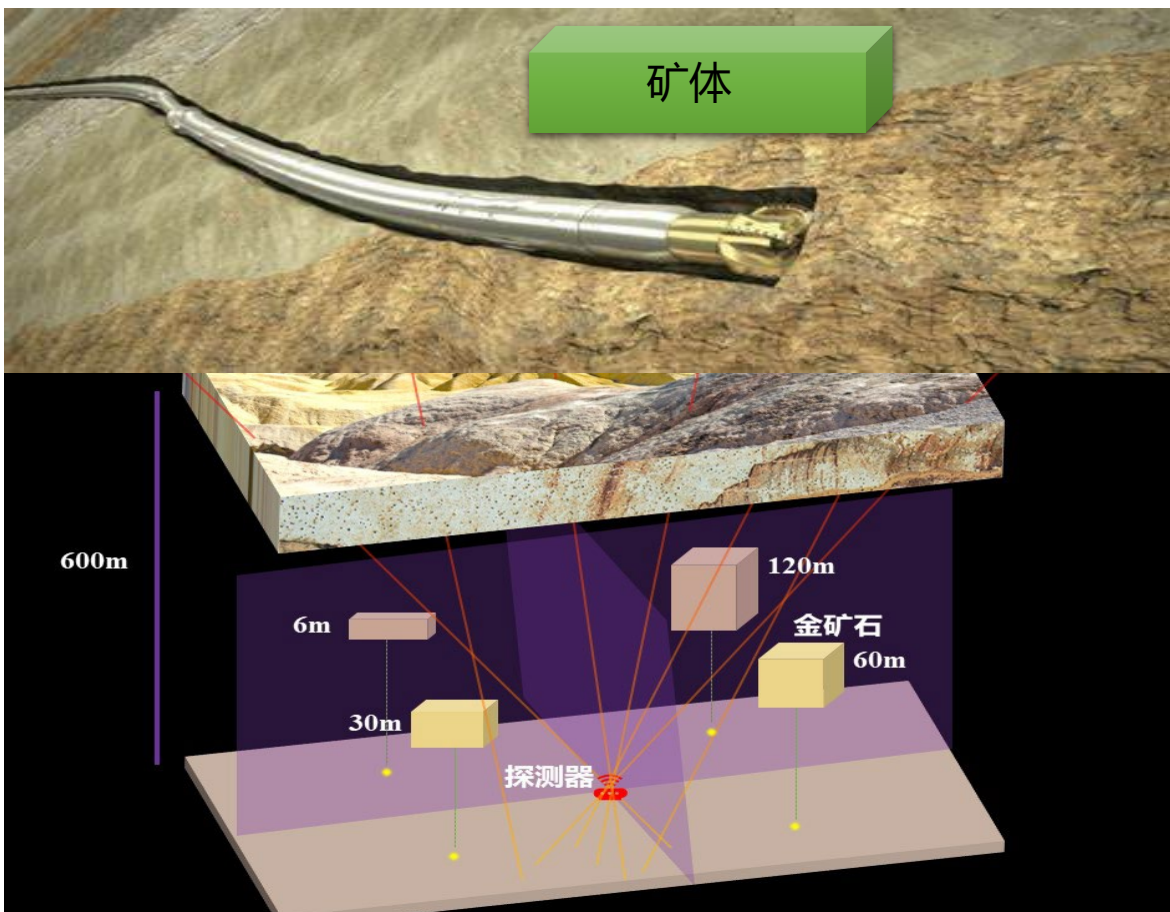
不透明度分布



密度分布



六、透射成像在地质勘探的模拟研究



以金矿为例，我国金矿的探矿深度80%在500m内，平均探矿深度在300m左右，缪子成像技术可以作为向深地探矿的有力手段。

湖南省核地质与核技术应用中心
湖南省核地质调查所

七、总结

- 在传统的POCA成像算法引入机器学习中的聚类算法，能较好的排除噪声的干扰，得到**高质量重建结果**，且能根据聚类结果对原子序数相近密度差异较大的高Z材料进行辨别，根据簇的凹陷程度对**高Z和中Z物质进行区分**
- 针对低、中Z材料，提出了一种利用缪子及其次级粒子的符合径迹密度成像方法，完成了对不同厘米级物体的**三维成像**以及缪子成像技术在**医学成像**上初步验证。
- 针对两种成像方法的不足，提出了一种结合散射成像和符合径迹密度成像的缪子多模态成像技术，构建了一种可拆卸式的成像系统，可在同一时间**对高、中、低Z材料成像及辨别**。
- 对透射成像算法进行了系统的研究并分析了该成像算法的适用范围，使用该算法对地面火山与深地600米金矿进行了成像研究，成功反演了火山和金矿内部的**平均密度分布**，表明缪子成像技术在地面与深地勘探都有很好的应用前景。

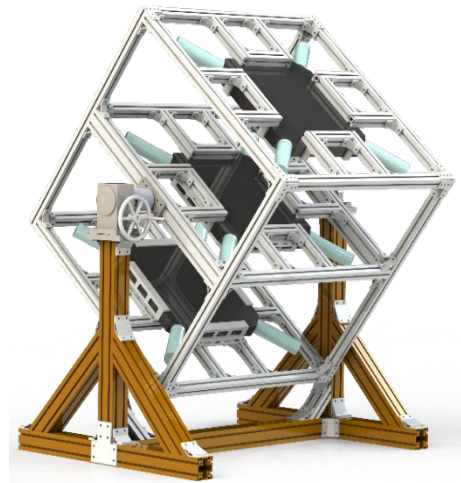
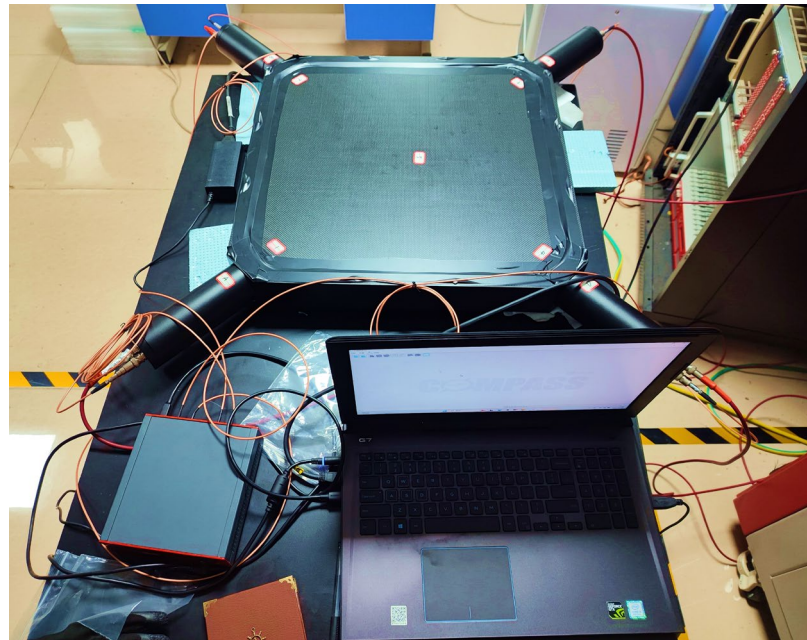
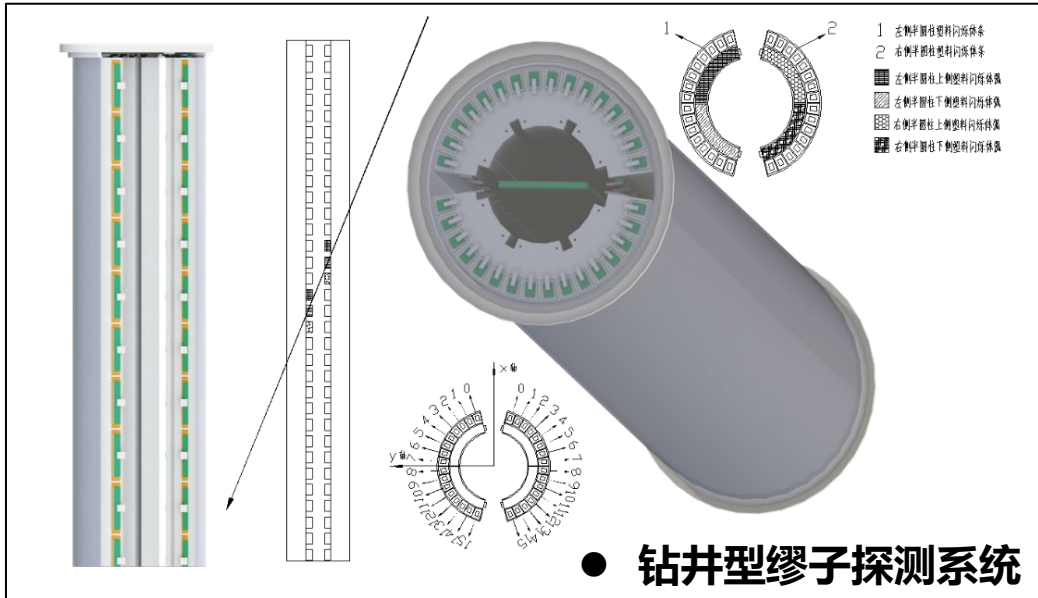
阶段性成果

发表论文:

- [1] Si-Yuan Luo, Yu-He Huang, Xiao-Dong Wang* et al. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(07):3-15.
- [2] Xuan-Tao Ji, Si-Yuan Luo, Xiao-Dong Wang* et al. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(01):15-25.
- [3] 季选韬, 罗思远, 朱坤, 彭肖宇, 祝锦, 肖敏, 罗凤娇, 王晓冬*. 缪子对小尺寸中低原子序数物质三维成像技术的模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(10):2214-2222.
- [4] 罗思远, 魏鑫, 季选韬, 朱坤, 彭肖宇, 祝锦, 王晓冬*. PoCA-DBSCAN算法 μ 子成像图像重建[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(2):217-224.
- [5] 魏鑫, 王晓冬*, 程凯, 刁伟卓, 陈国祥, 贺三军, 李婷婷, 赵越, 柳正. 新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究[J]. 原子核物理评论, 2019, 36(01):85-90.

发明专利:

- [1] 王晓冬、季选韬、魏鑫, 一种缪子成像方法, 专利号ZL 2021 1 0019425.7, 2022.07.19
- [2] 王晓冬、季选韬、魏鑫, 一种用于中低原子序数物质的 μ 子成像方法, 专利号ZL 2021 1 0880685.3, 2023.06.27
- [3] 王晓冬、罗思远、何列、张海峰, 一种缪子定位方法及成像方法, 已公开, 进入实质审查阶段, 202310753420.6



- 大面积塑闪四角耦合光电倍增管型缪子探测系统



感谢国家自然科学基金委的资助

感谢核探测与核电子学国家重点实验室的支持

感谢各位专家的指导及会务组的周到安排和辛勤付出



南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



谢谢大家！ 恳请各位老师批评指正！

