

Muon tomography based on Micromegas

范宇晗¹, 王雅迪¹, 王翔¹, 文群刚²

¹华北电力大学 核工程与和技术学院

²安徽大学 物理与光电工程学院

缪缪论坛 2026/7/13

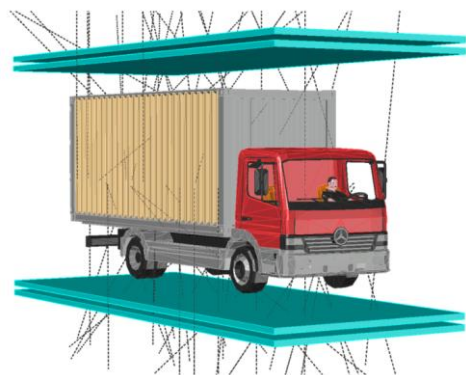
目录

- 研究背景
- 实验数据的散射角分布
- BW算法思想
- 实验数据成像检验
- 小结与展望

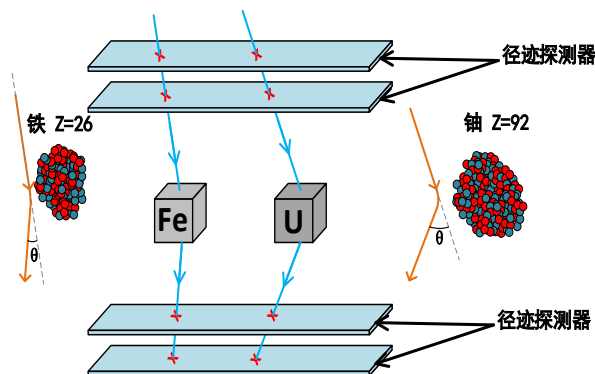
研究背景--国内外研究现状

宇宙射线缪子成像是一种近些年快速发展的绿色安全、抗干扰能力强、高精度的三维无损核成像技术。它被广泛应用于文物保护、矿藏勘探、地质结构监测、自然灾害预警、核走私监控、核设施监测等等，应用前景广泛。

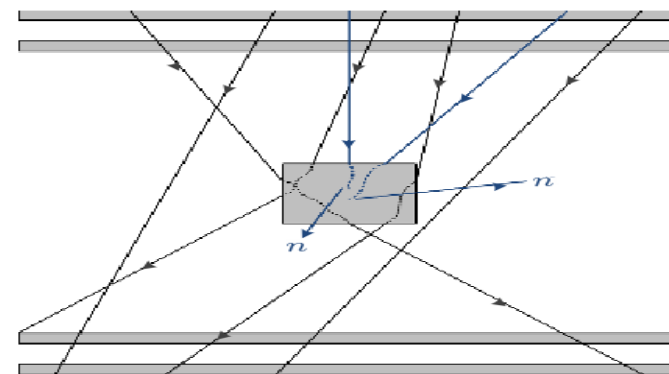
缪子透射成像



缪子散射成像



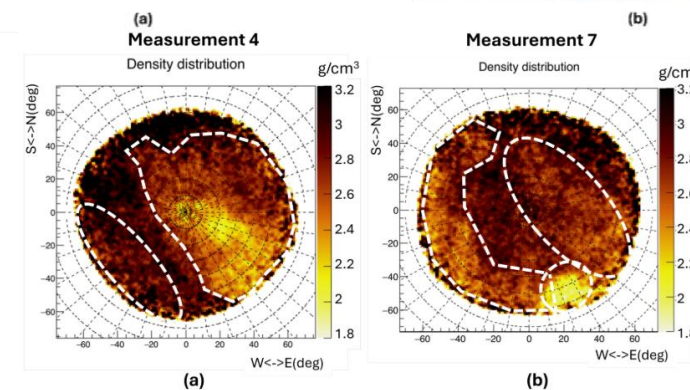
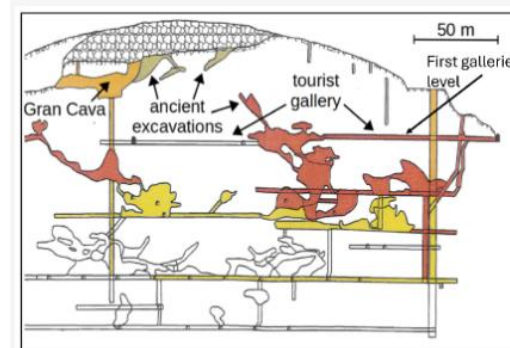
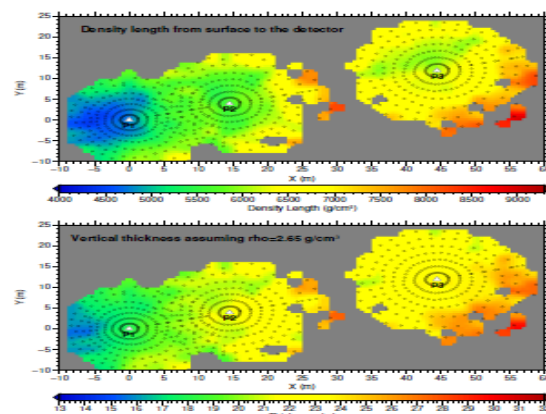
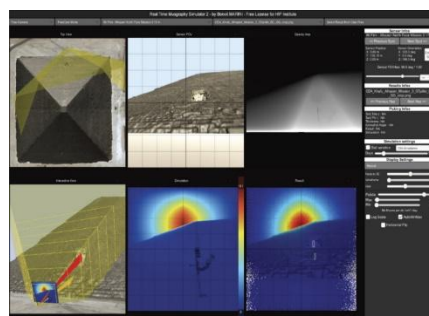
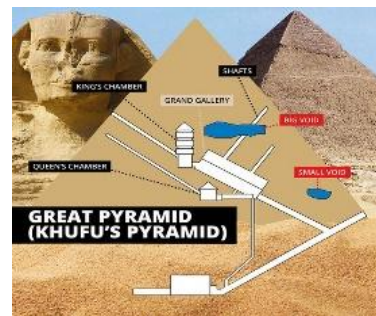
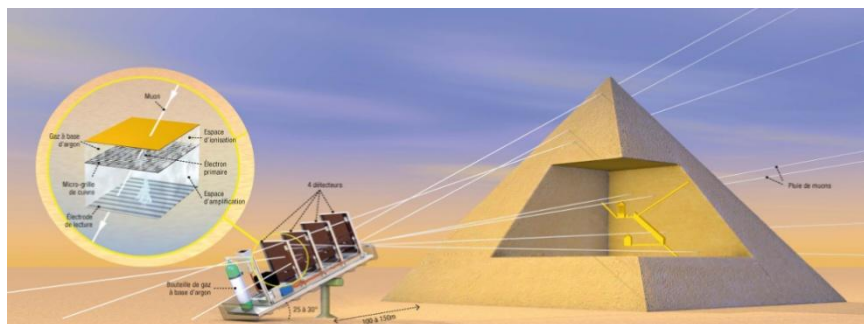
次级粒子成像



$$-\frac{dE}{dx} \propto \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(K \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) + \text{corrections} \right]$$

$$\sigma(\Delta\theta) = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0 \beta^2} \right]$$
$$\frac{1}{X_0} \propto \frac{Z(Z+1)}{A} \ln \left(\frac{287}{\sqrt{Z}} \right)$$

研究背景--缪子透射成像国内外研究现状



2017年，日本KEK和法国CEA对胡夫金字塔进行成像，发现了未知密室。

[K. Morishima](#), et al., Nature. 552, 387-401(2017)

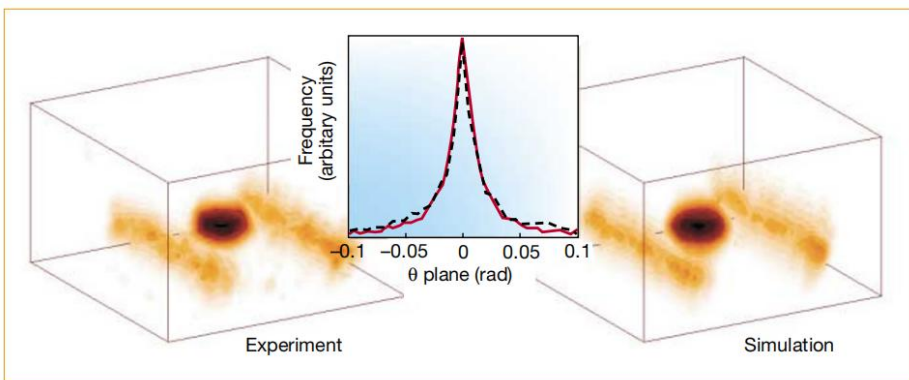
中国空间技术研究院团队对常熟地下隧道进行了成像。

Han R. Journal of Instrumentation, 2020, 15(P06019): 1-14

意大利多家机构对Temperino矿旅游通道进行了测量，寻找低密度异常体，定位潜在的氦气释放通道，为旅游路线安全评估提供依据

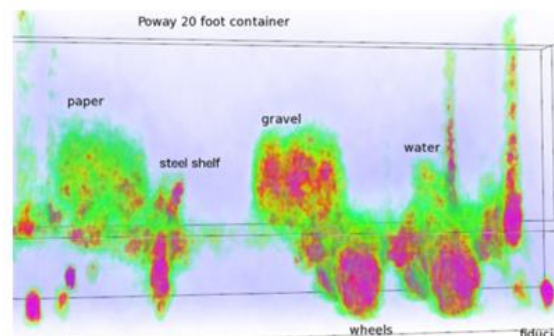
D. Borselli, et al. Particles 2025, 8, 3

研究背景--缪子散射成像国内外研究现状



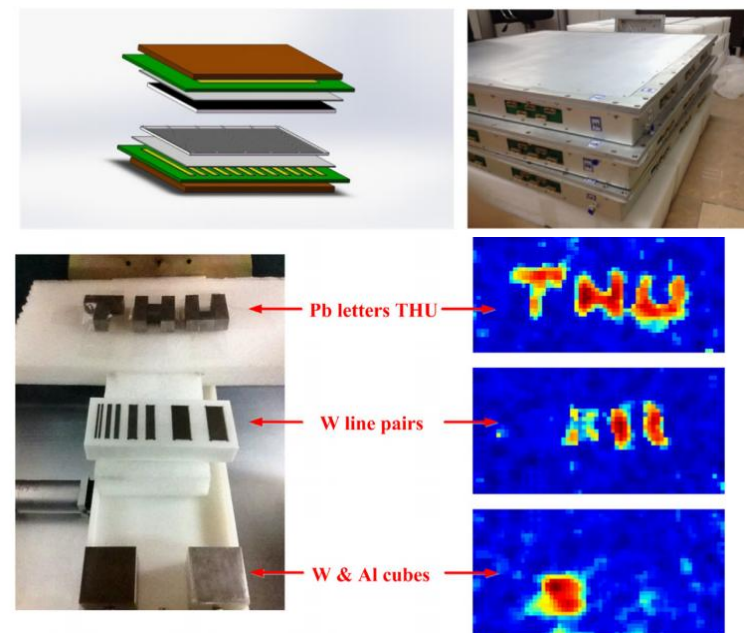
2003 年, LANL 基于缪子多重散射的原理, 搭建了缪子探测器成像系统, 并成功的对一个钨质物体及其钢制支架进行了图像重建

K. N. Borozdin, et al., Nature. 422, 277(2003)



Decision Sciences公司对20英尺集装箱进行成像测试。

G. Blanpied, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 784, 352–358(2015)



清华大学基于MRPC探测器与MAP重建算法, 成功研制了宇宙射线 μ 子散射成像实验装置TUMUTY, 并对多种测试件的结构进行了成像

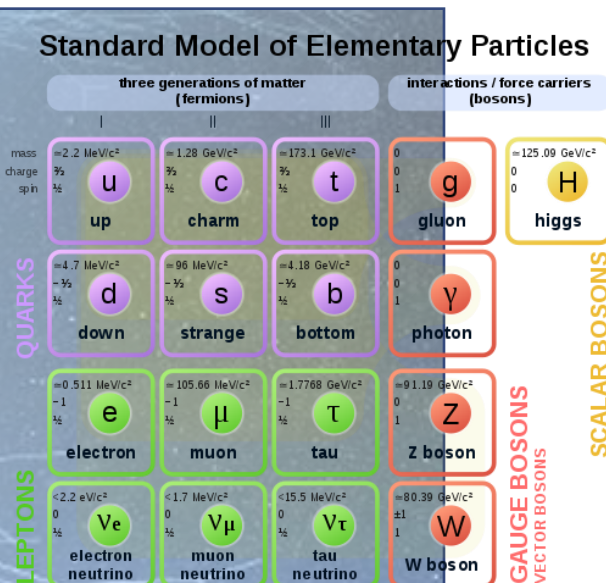
X. W. Wang, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 784, 390–393(2015)

研究背景--宇宙射线缪子

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

- 宇宙线缪子来自空间中的原初宇宙射线，99%是质子和氦核，与大气相互作用
- 10000宇宙射线/(分钟 m^2)击中地面（每分钟600个穿过我们的身体）
- 海平面处平均缪子能量约为4 GeV，通量约为1 cm^2/min
- 通量在天顶(垂直)处最大， $\cos^n\theta$ ， $n \approx 2$ ，与太阳活动周期、温度、气压、海拔、纬度等因素都有关联



[1] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Muon>.

[2] Griffiths D. Introduction to elementary particles [M]. John Wiley & Sons, 2020.

研究背景--缪子散射成像理论基础

- 缪子穿透物体时，会与物体的原子核发生多次库仑散射事件，其中小角度散射事件占主导地位。这些相互作用会产生一个累积散射角 θ ，该散射角的分布近似满足均值为零的高斯分布

$$f(\theta) = \frac{dN}{d\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2})}$$

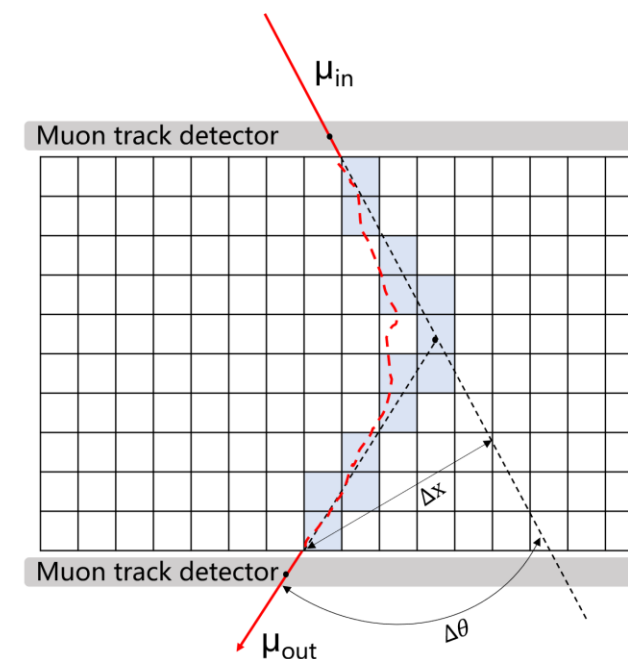
- 角分布的标准误差为

$$\sigma = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{L_{\text{rad}}}} [1 + 0.038 \ln(\frac{L}{L_{\text{rad}}})]$$

p 为动量。 L 为 μ 子穿过材料的轨迹长度， L_{rad} 为材料辐射长度， βc 为 μ 子的速度。

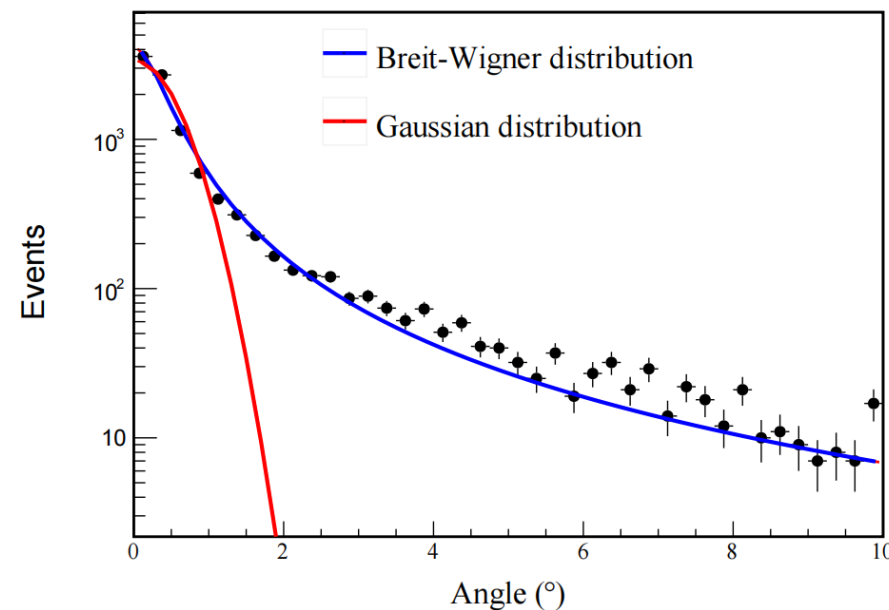
$$L_{\text{rad}} = \frac{716.4A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

角分布的标准误差与物质的原子序数成正比。



实验数据的散射角分布分析

由于**莫里哀理论**描述，对于小角度散射，散射角分布在平均值0附近，可用高斯分布描述，但由于带电粒子与核碰撞而产生的大角度散射类似于卢瑟福散射，其分布具有较高的尾部（与高斯分布相比）。



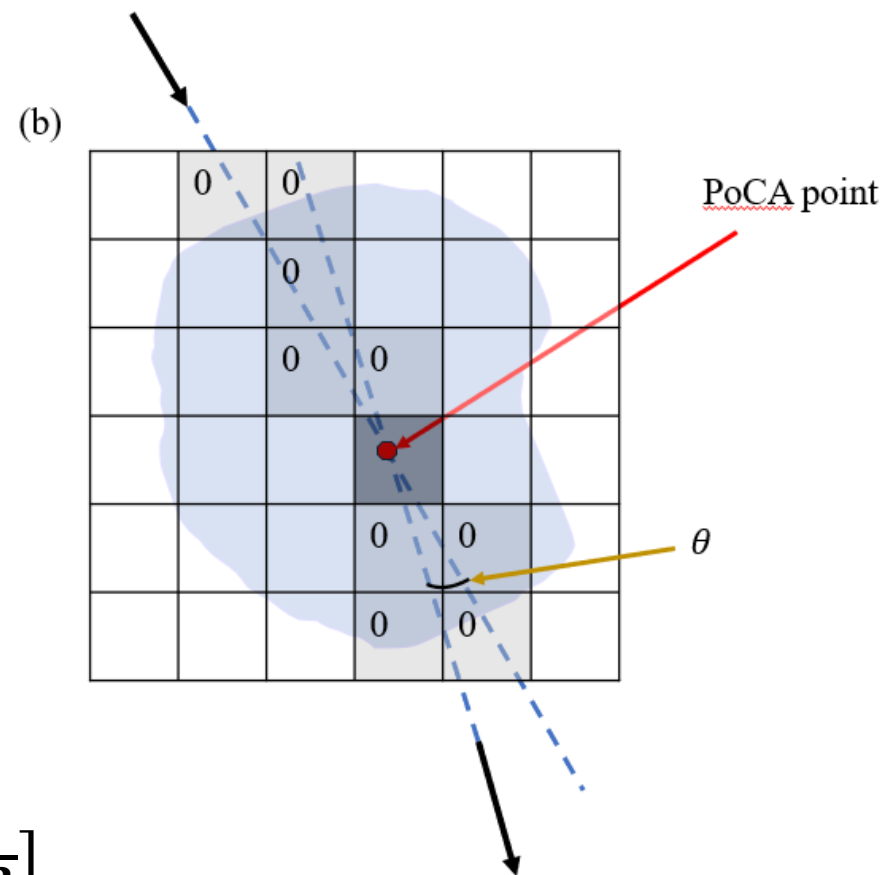
Experimental data based on
Micromegas detector at USTC.

采用均值固定为0的Breit-Wigner函数和正态高斯函数分别拟合同一组数据，如右图所示。实验数据在较大的散射角处呈现出明显的尾部，符合莫里哀理论描述。

- PoCA算法寻找散射点(PoCA point)
- 体素内散射角分为两种情况寻找，一种为直线轨迹，穿过体素顶部和底部的被记录下来；另一种为散射轨迹，如果散射点位于体素内部则被记录。
- 将体素内散射角按照下面的公式进行拟合，得到的表征物质密度参数 Γ

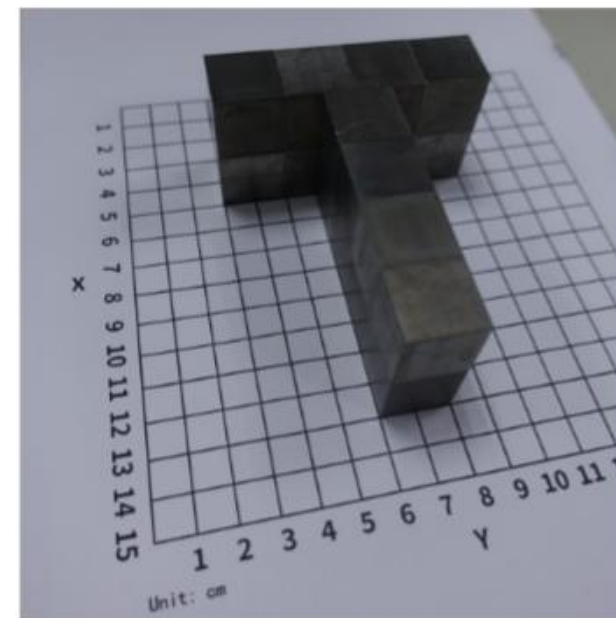
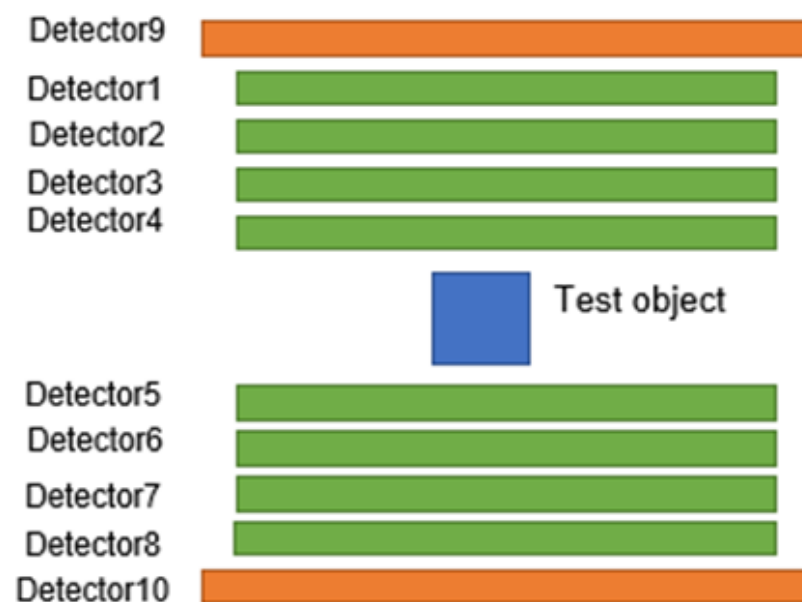
$$f(\theta, \Gamma) = \frac{1}{\pi\Gamma[1 + (\frac{\theta}{\Gamma})^2]} = \frac{1}{\pi} [\frac{\Gamma}{\theta^2 + \Gamma^2}]$$

θ 是散射角。 Γ 是半高宽，假设其与与散射角的标准偏差成正比。



实验数据成像检验--缪子散射成像测量基础

Detector 1~8 为灵敏面积为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 的Micromegas探测器，Detector 9、10为两层闪烁体用于触发数据采集系统



Experimental data based on
Micromegas detector at USTC.

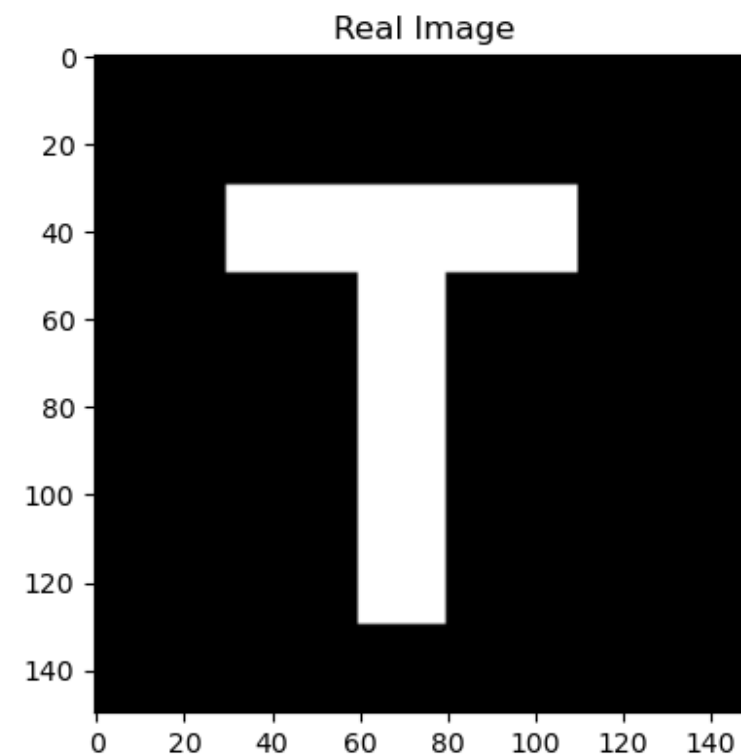
实验数据成像检验--缪子散射成像质量评价

➤ 有参考的图像质量评估，参考图像为T形钨块区域为1，背景为0

➤ MSE值

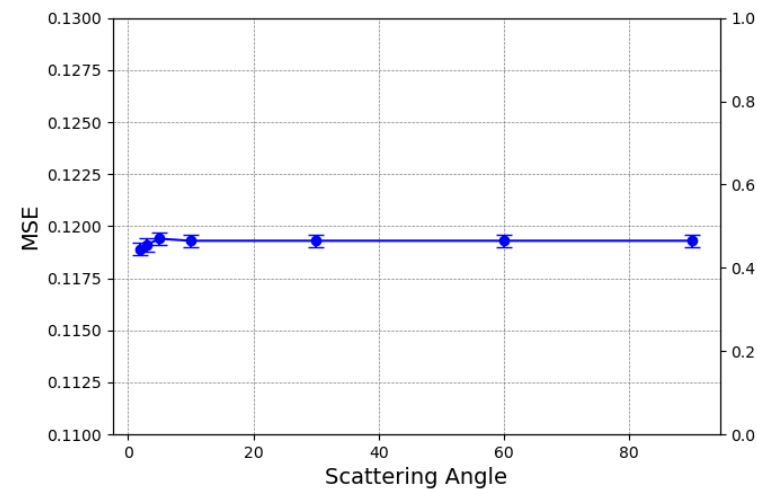
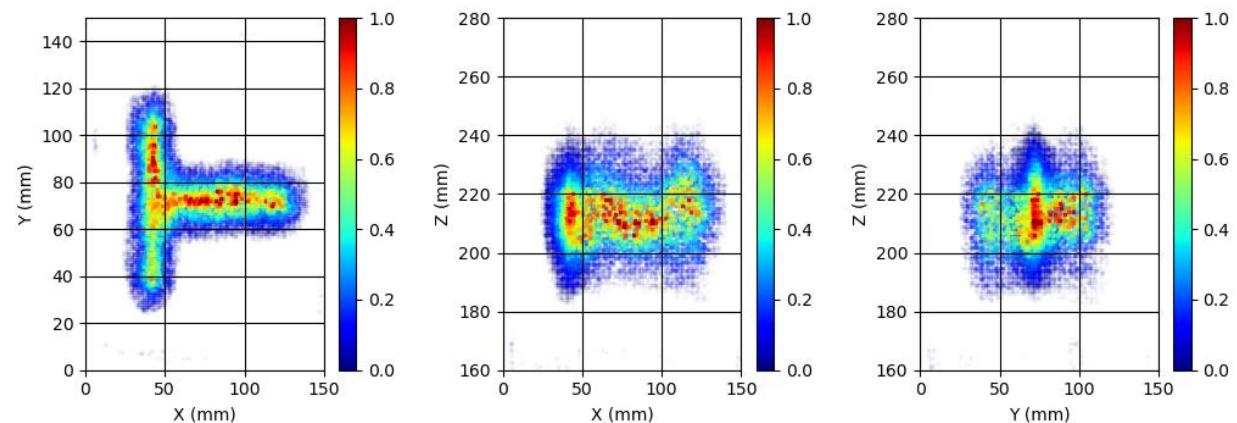
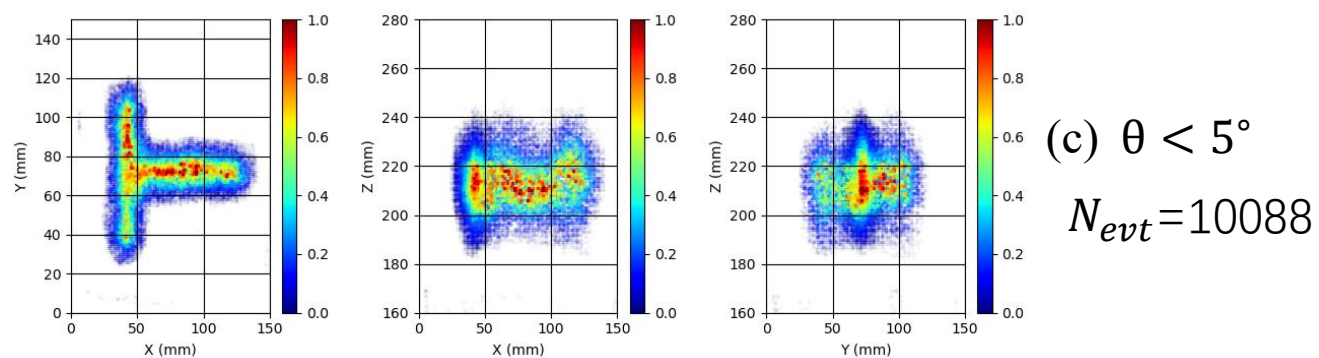
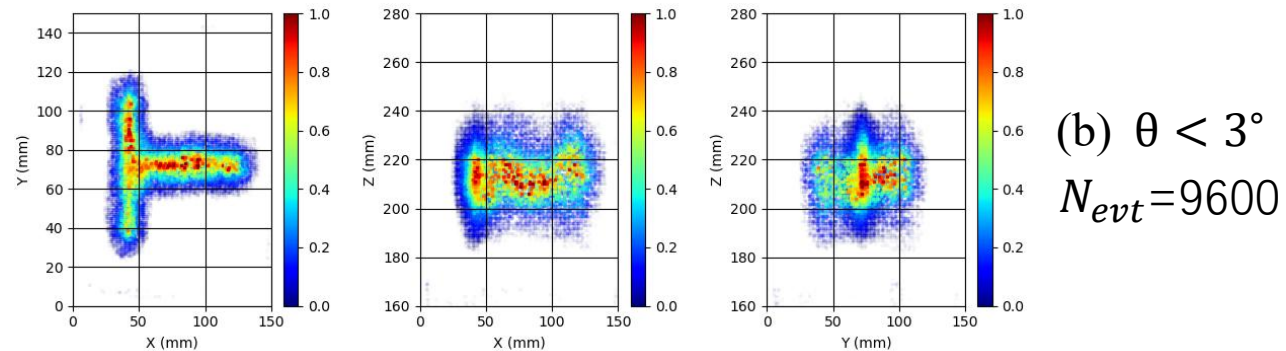
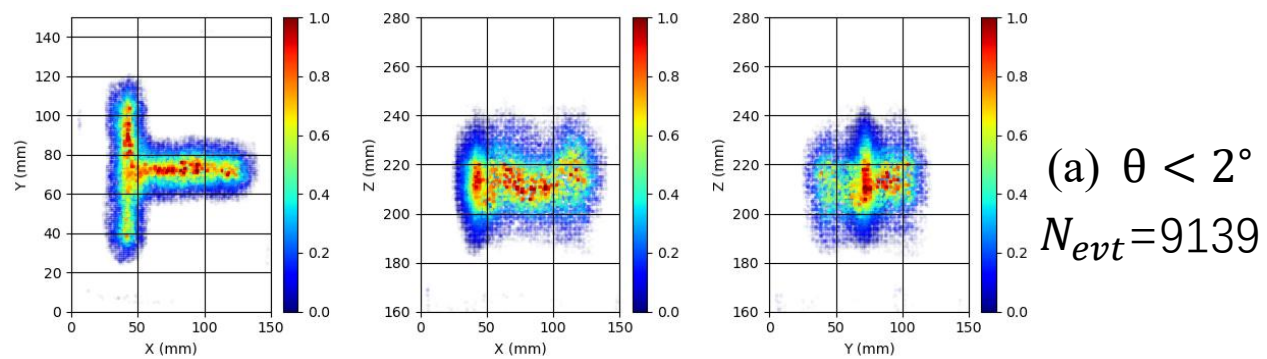
$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - K(i,j)]^2$$

n是图像的总像素数(MN)，M (N) 是X (Y) 轴上的像素数；I(i, j) (K(i, j)) 是原始（重建）图像在位置 (I, j) 处的像素值



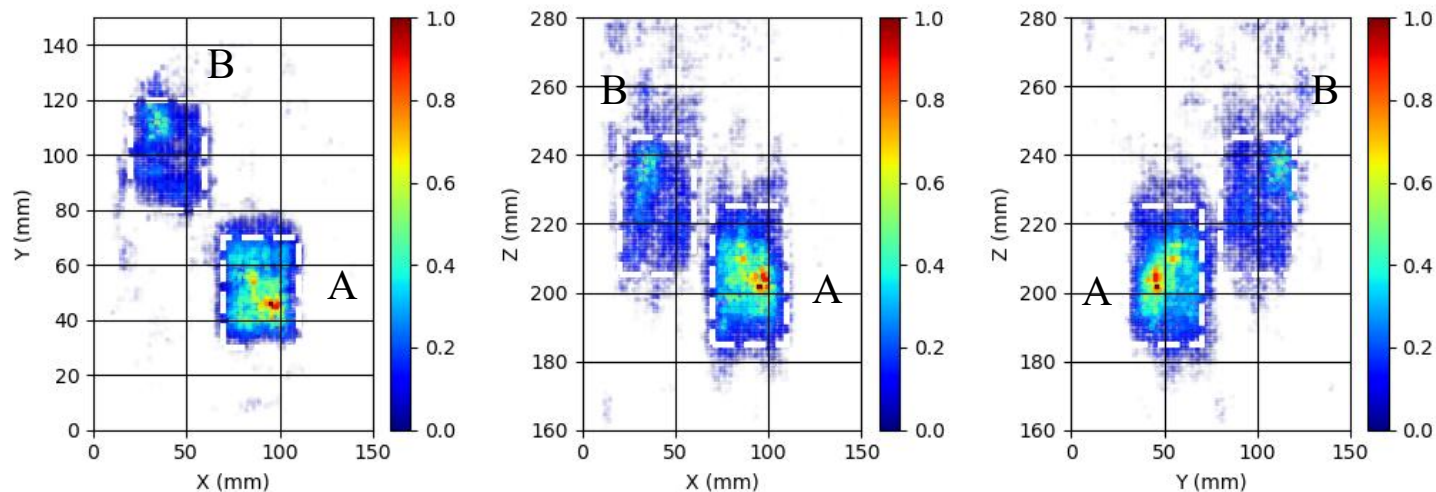
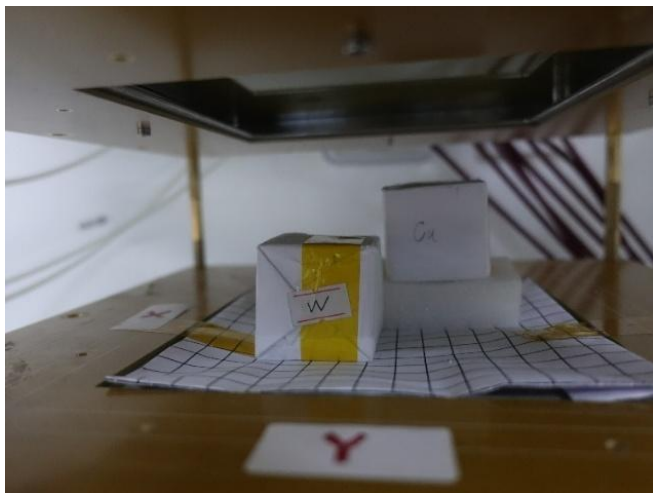
值越小代表图像质量越好

实验数据成像检验--BW模型成像



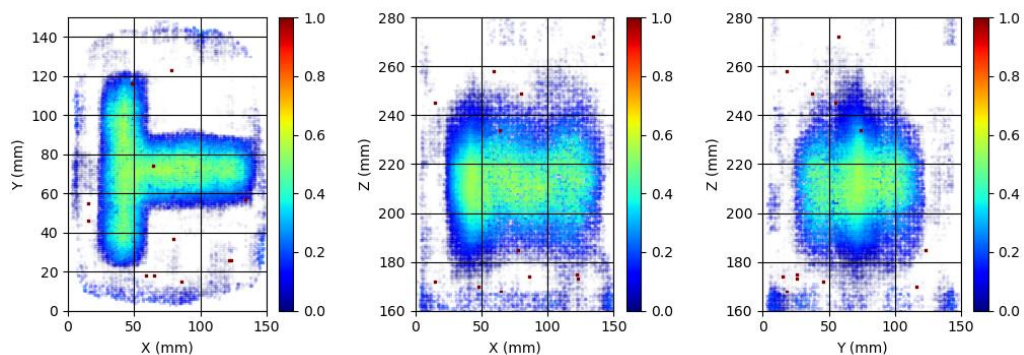
实验数据成像检验--材料分辨

选择中、高原子序数材料的实验样品，其分别为4cm × 4cm × 4cm的钨块和铜块。将两个样品放置在不同高度，并在宇宙射线中暴露24小时。图像中的亮度值与原子序数相关，亮度值越高表示材料在探测区域内的原子序数越高。

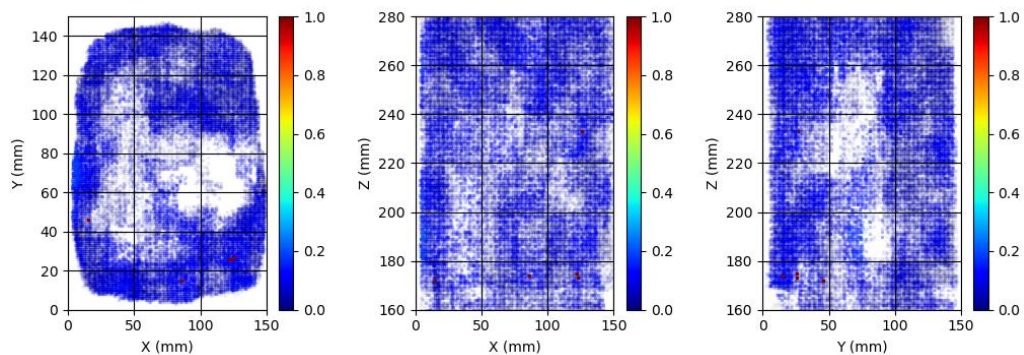


"A"代表钨（高原子序数材料），"B"代表铜（中等原子序数材料）。（测试物体的位置由白色虚线标出）

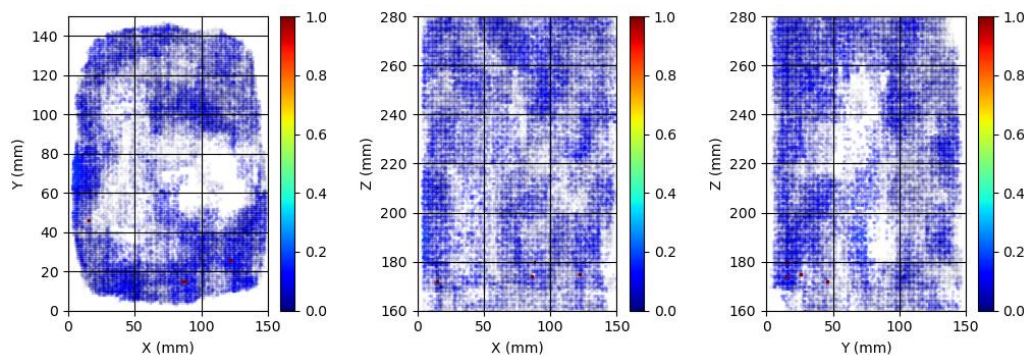
实验数据成像检验--Gaussian模型成像



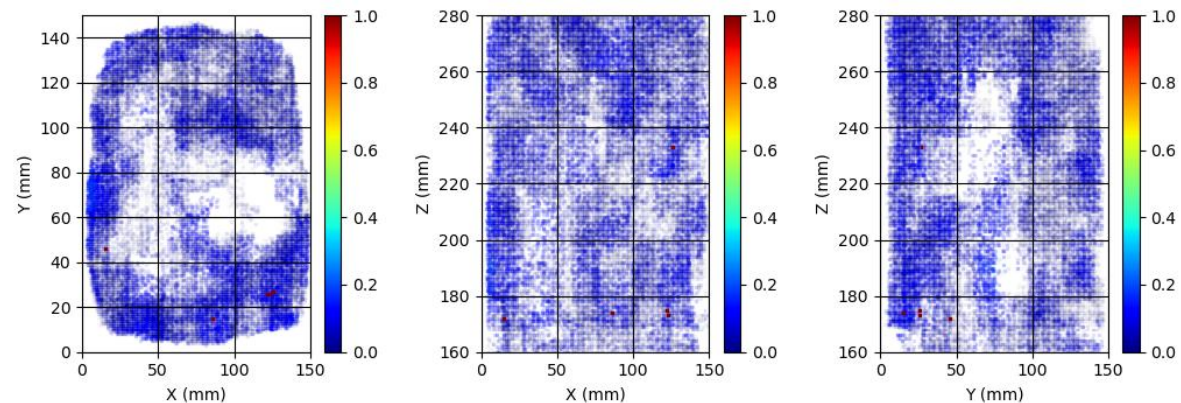
(a) $\theta < 2^\circ$
 $N_{evt}=9139$



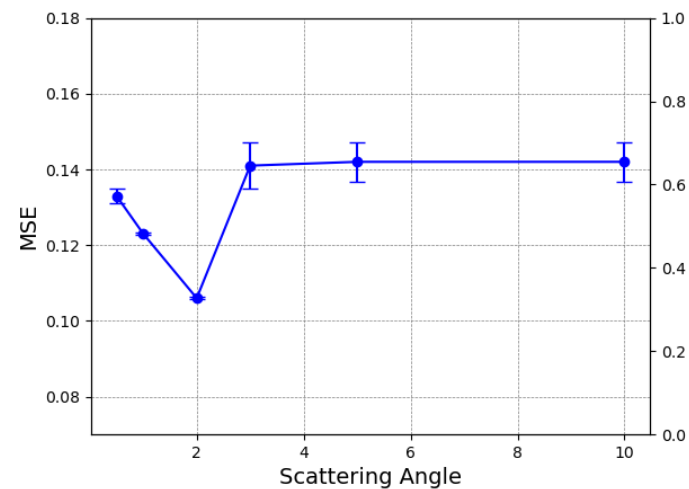
(b) $\theta < 3^\circ$
 $N_{evt}=9600$



(c) $\theta < 5^\circ$
 $N_{evt}=10088$



(d) no angular restriction.
 $N_{evt}=10749$



- 宇宙射线缪子作为一种天然放射源在成像领域已有相当的发展
- BW模型显著降低大角度事件对成像结果的破坏作用，展现出良好的成像效果。
- 在材料分辨上BW模型可以比较清晰的区分中Z和高Z的物质，对于原子序数相近物质的区分能力有待进一步提高。
- 在简单情况下的缪子成像应用中， BW算法展现出了良好的成像效果，但是对于复杂情况的应用还需要进行检验。
- 下一步，拟在物质鉴别上可以加入不同的参数，如动量 p ， $\frac{L}{L_{\text{rad}}}$ 等参数加强物质区分的结果。



PAPER

Exploration of large angle scattering events for muon tomography

Yadi Wang*, Yuhan Fan, Xiang Wang and Qungang Wen*

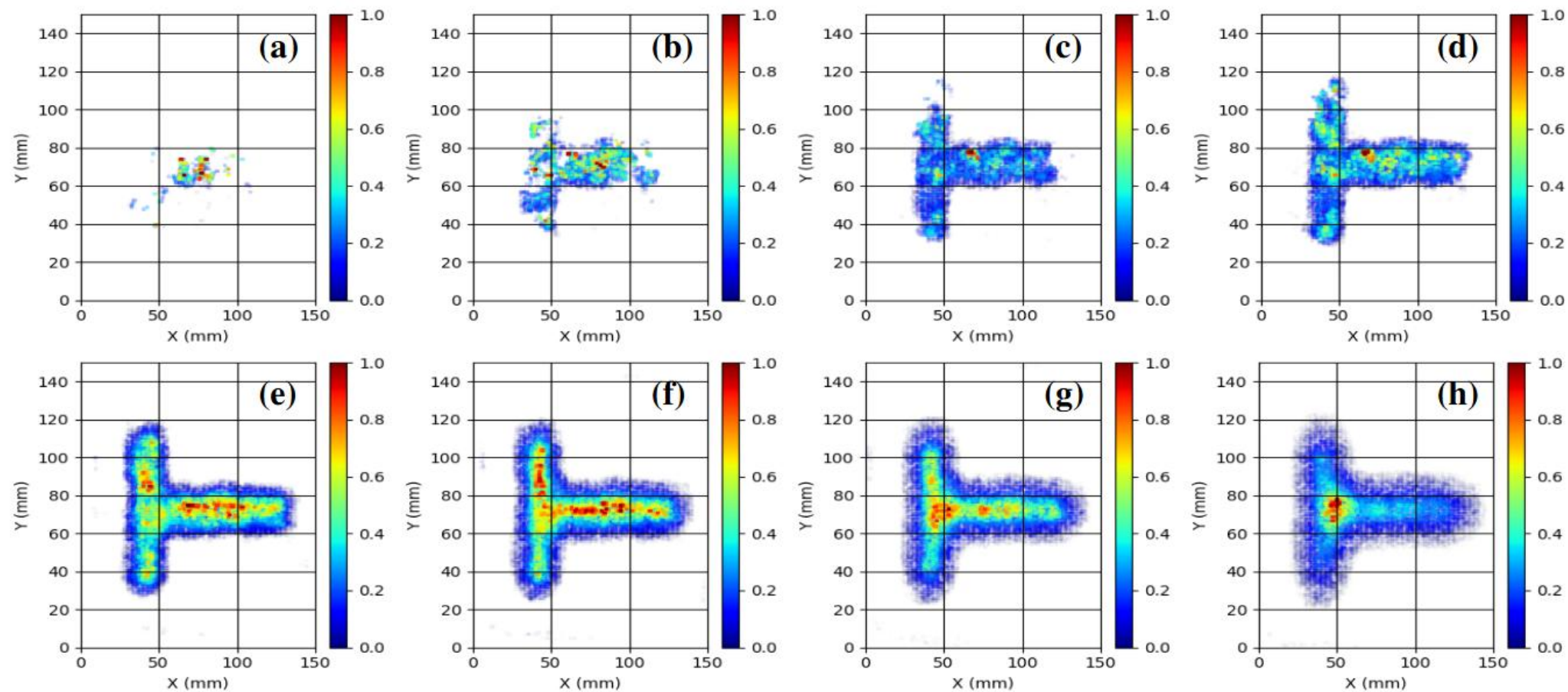
Published 24 December 2025 • © 2025 IOP Publishing Ltd. All rights, including for text and data mining, AI training, and similar technologies, are reserved.

[Physica Scripta](#), [Volume 100](#), [Number 12](#)

Citation Yadi Wang *et al* 2025 *Phys. Scr.* **100** 125022

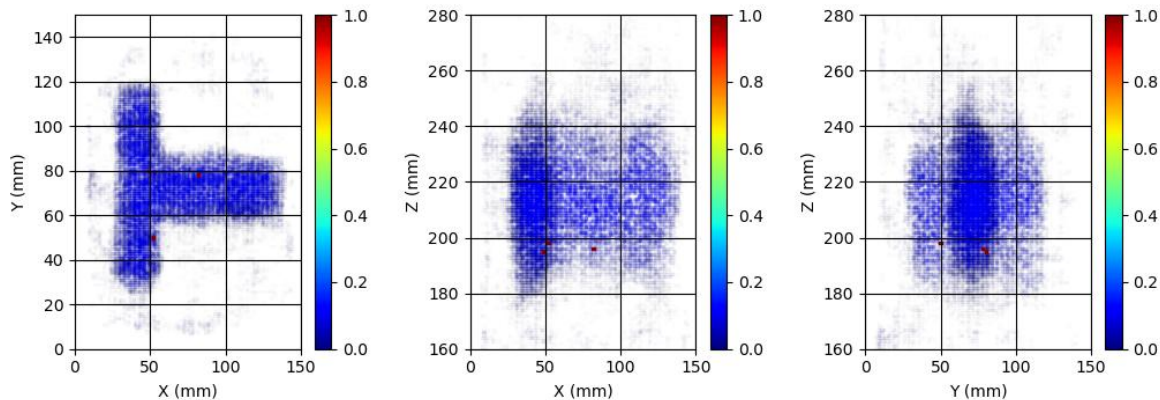
DOI 10.1088/1402-4896/ae2abe

谢谢各位专家聆听！

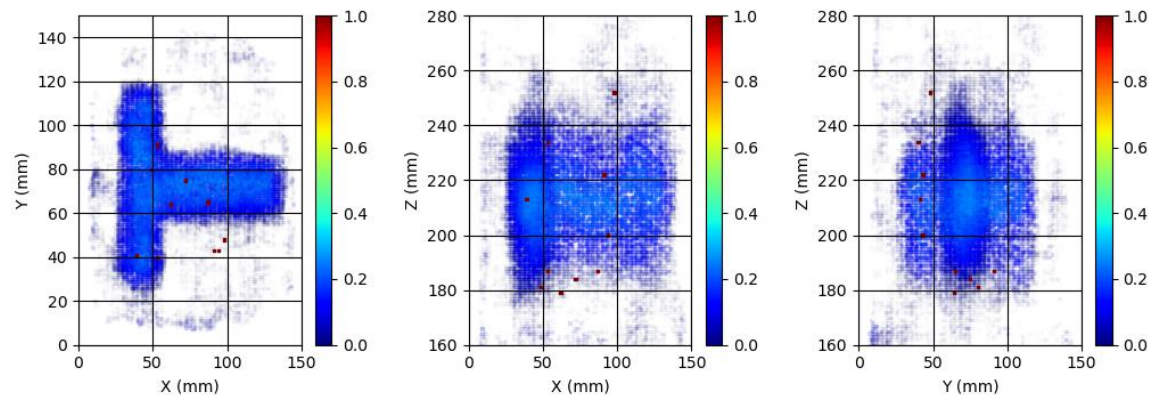


实验数据成像检验 (GS 模型)

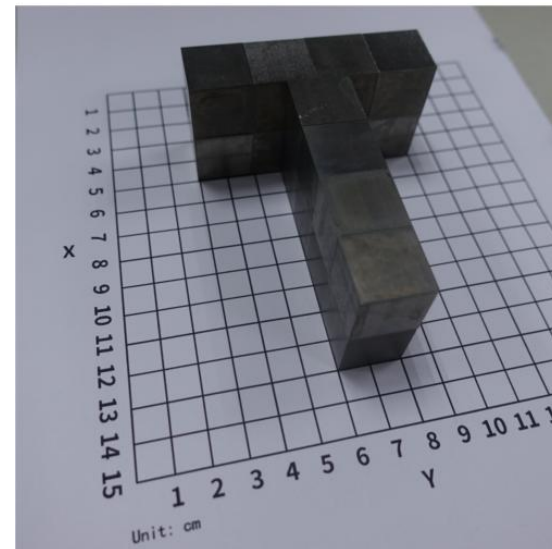
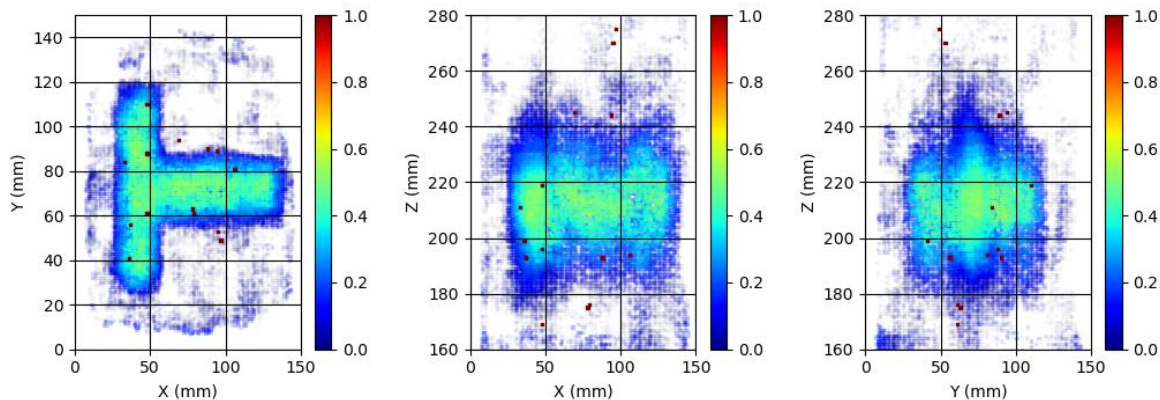
$\theta < 0.5^\circ$



$\theta < 1^\circ$



$\theta < 2^\circ$



No limit

