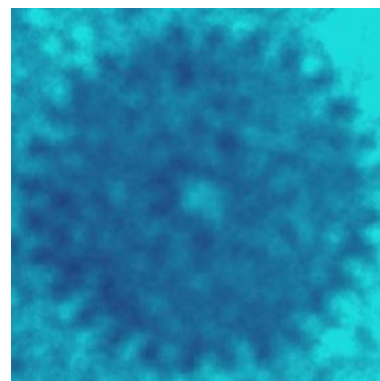
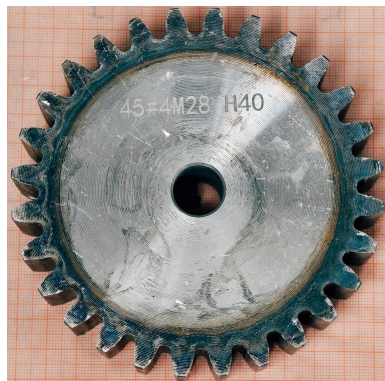




宇宙射线投影偏移粒子流成像技术 ($P_{\mu}MA$)

arXiv:2512.19747

专利公布号: CN121558779A

秦梓博 (代表PKMu合作组)

北京大学 物理学院

2026/7/12 北京

引言-缪子透射成像

缪子透射成像 (MTR)

- 测量穿过物体时缪子通量的衰减
- 多应用于火山、古建筑及大型工业设备的内部探查
- 较少应用于小物体 ($\sim m$ 以下) 成像

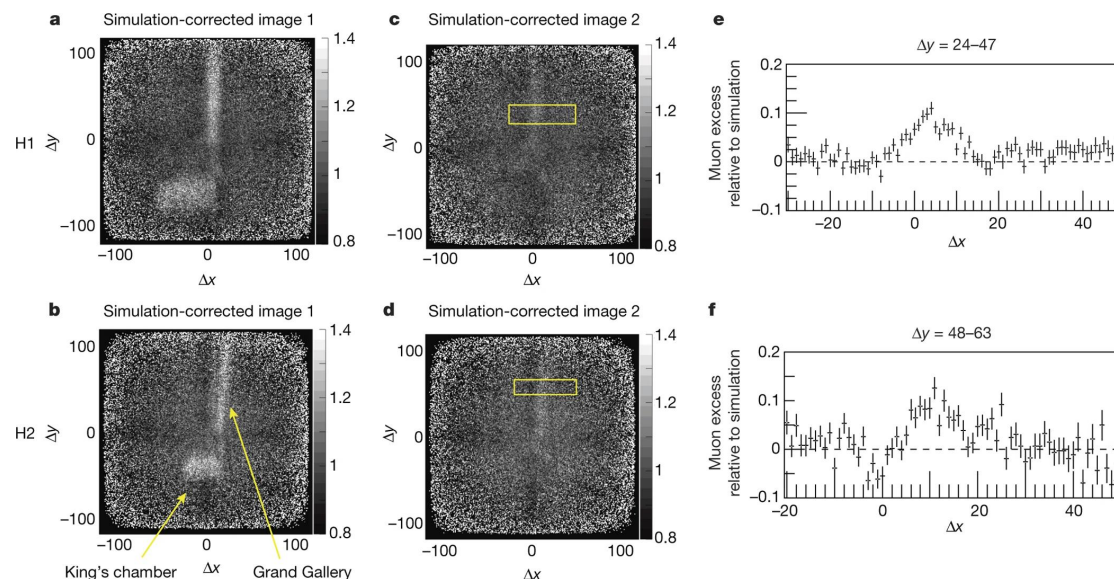


Search for Hidden Chambers in the Pyramids

The structure of the Second Pyramid of Giza
is determined by cosmic-ray absorption.

Luis W. Alvarez, Jared A. Anderson, F. El Bedwei,
James Burkhard, Ahmed Fakhry, Adib Girgis, Amr Goneid,
Fikhry Hassan, Dennis Iverson, Gerald Lynch, Zenab Miligy,
Ali Hilmy Moussa, Mohammed-Sharkawi, Lauren Yazolino

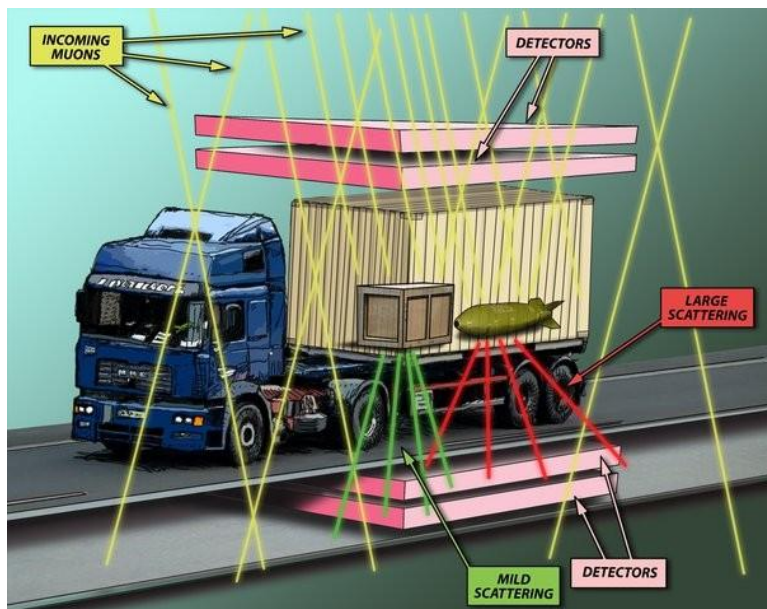
1970, 首次尝试
(Science 167, 832-839)



2017, 胡夫金字塔内部发现未知空室
(Nature 552, 386-390)



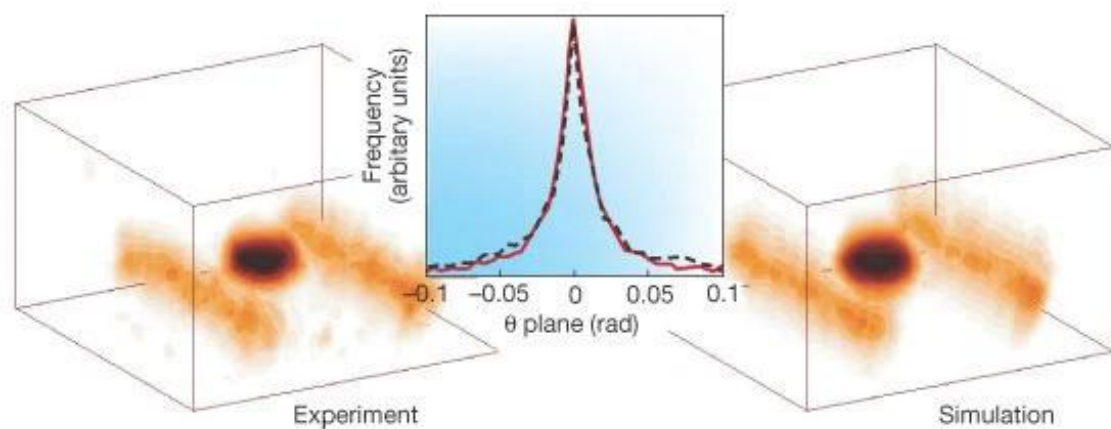
引言-缪子散射成像



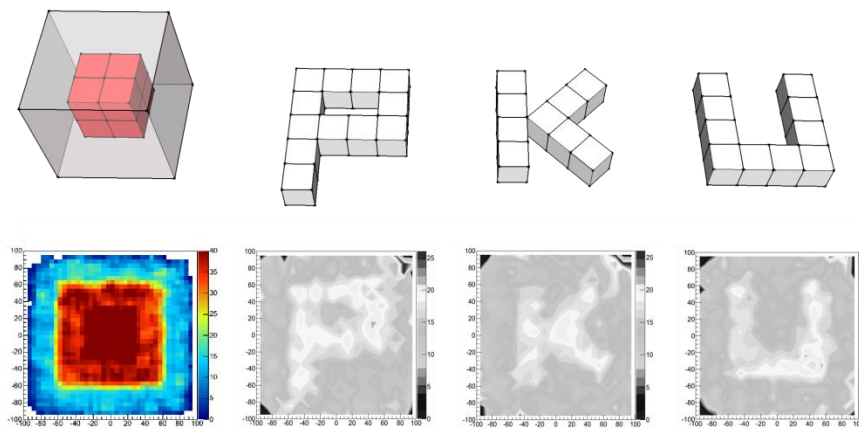
缪子散射成像 (MST)

- 着重于重建缪子的多重库仑散射信息
- 多应用于核安全检查（例如探测被隐匿的核材料），大型货仓安检，以及基建工程的探查等领域
- 更适用于高Z值（原子序数）材料，且成像分辨率受限（~cm量级）

Can we do better?



Nature 422, 277 (2003)
MST的肇始



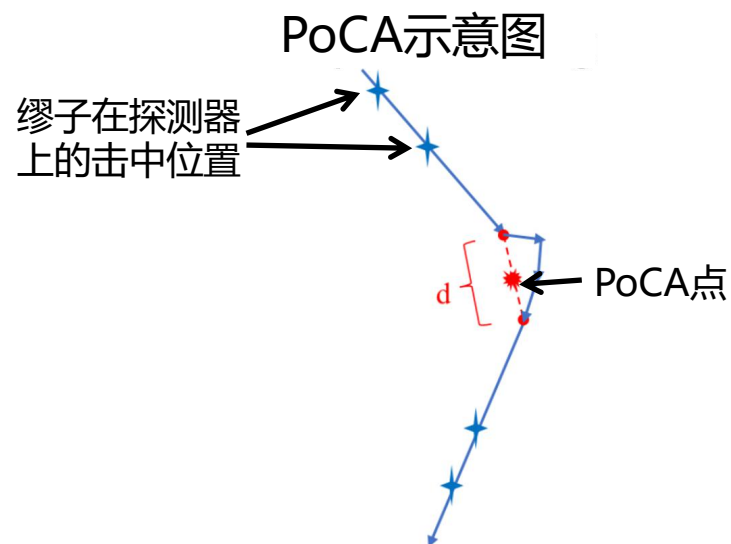
本组先前的MST成像结果
(PoCA算法)



引言-PoCA算法

PoCA算法

MST的基本算法之一是PoCA算法，该算法将多次库仑散射近似为单次散射过程，并根据入射和出射径迹重建散射角度和位置（即所谓PoCA点）。

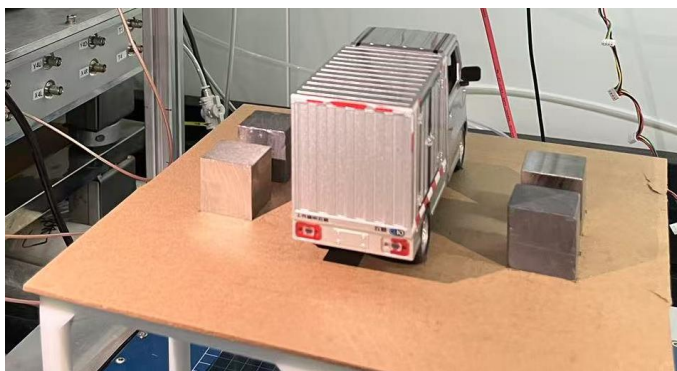


然而，MST无法利用透射（吸收）信息。此外，由于多次散射的复杂性，PoCA点仅是一个近似的散射位置，并不能很准确地对应于缪子与物质发生作用的位置，尤其是在散射角较小的情况下。

P μ MA方法

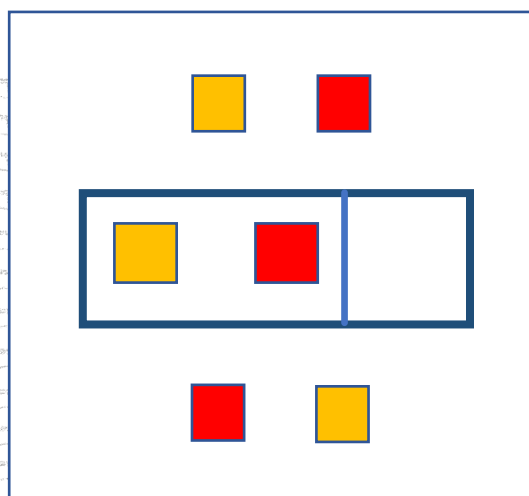
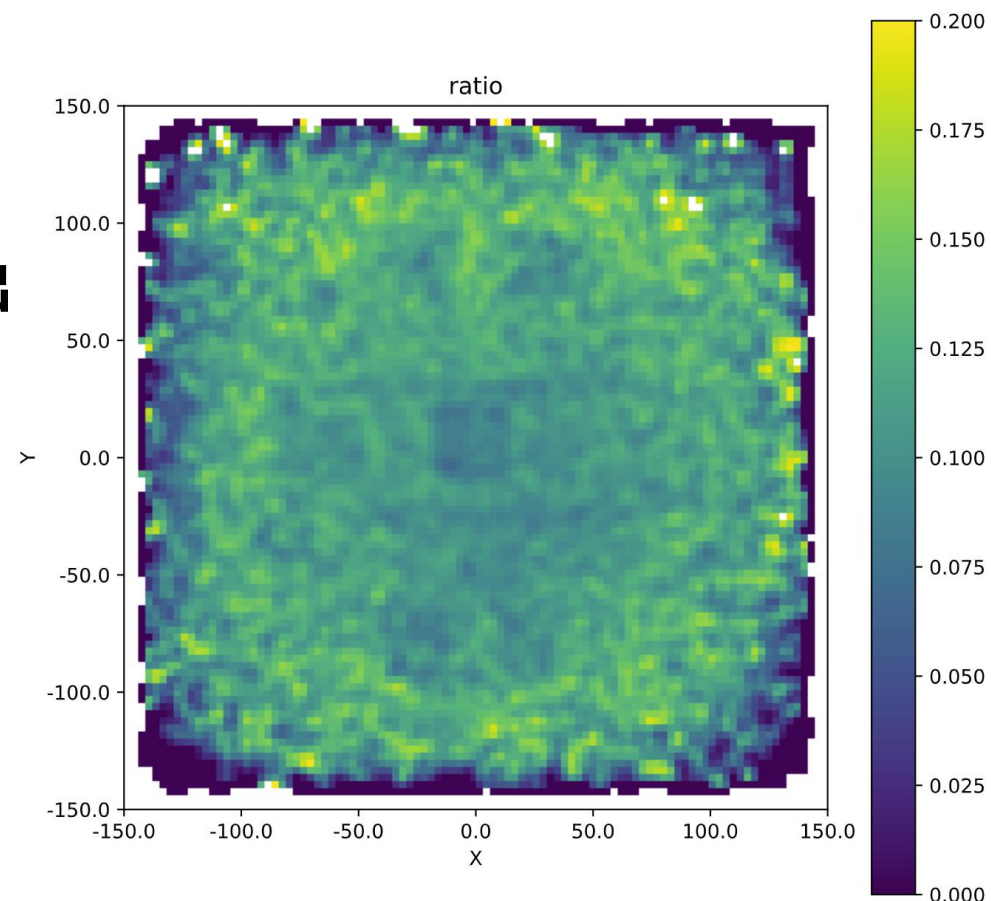
P μ MA方法的“来时路”

尝试小尺寸物体成像时，简单地用直线径迹进行透射成像，“意外”看到了毫米尺度的玩具车壳。



为什么会这样？

正是对此的思考一点点构建出了P μ MA的方法与理论框架



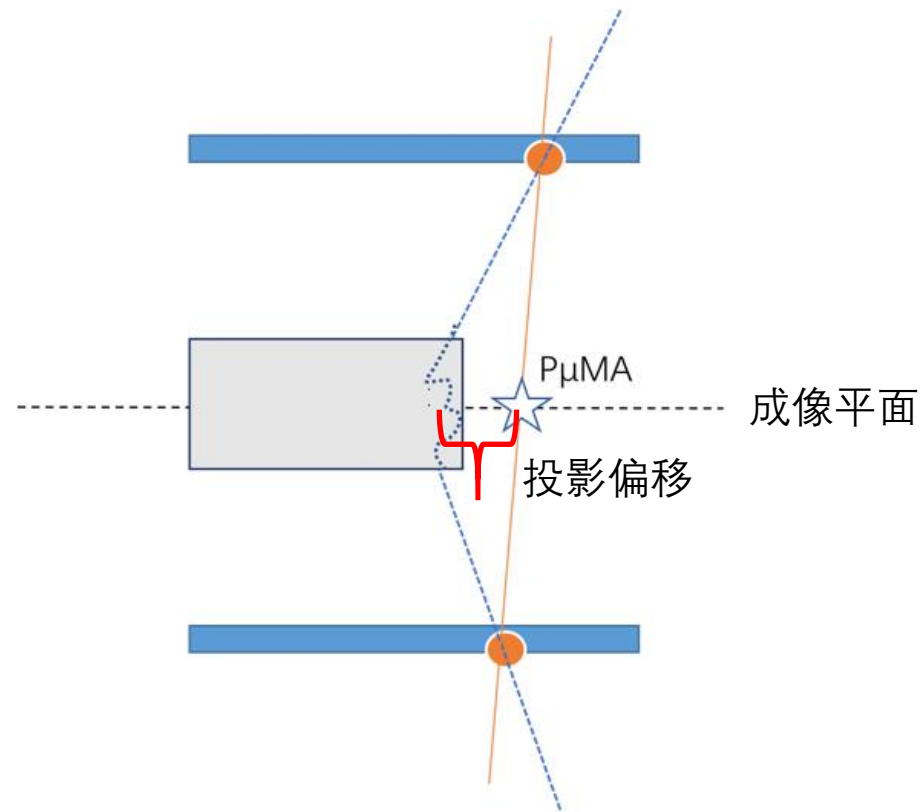
锌皮卡车模型，内装3*3*3cm
铅、铁块各一，四周摆放同样
形制的铅块和铁块。除右侧外，
均为铅块在车头方向

P μ MA方法

投影偏移缪子透射成像 (P μ MA) 方法

与传统方法的不同之处:

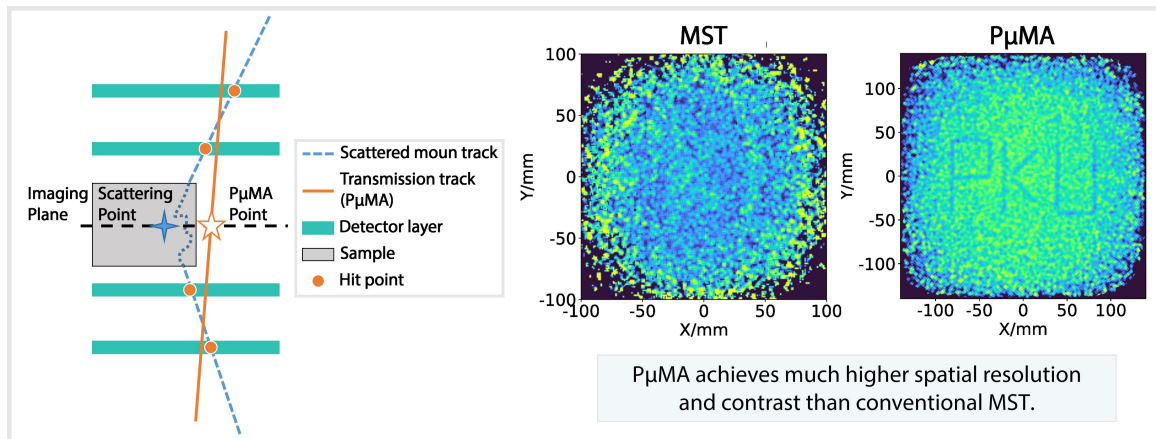
- 以透射率为基础
(通过粒子透射比率来区分不同材料区域)
- 线性拟合/连线构建透射“径迹”
(对于小角度/无散射更精确, 仅2层探测器可成像)
- 兼顾散射信息
(散射强度主导的投影偏移)
- 需要背景计数
(用于消除探测器本身以及几何设置带来的不均匀性)



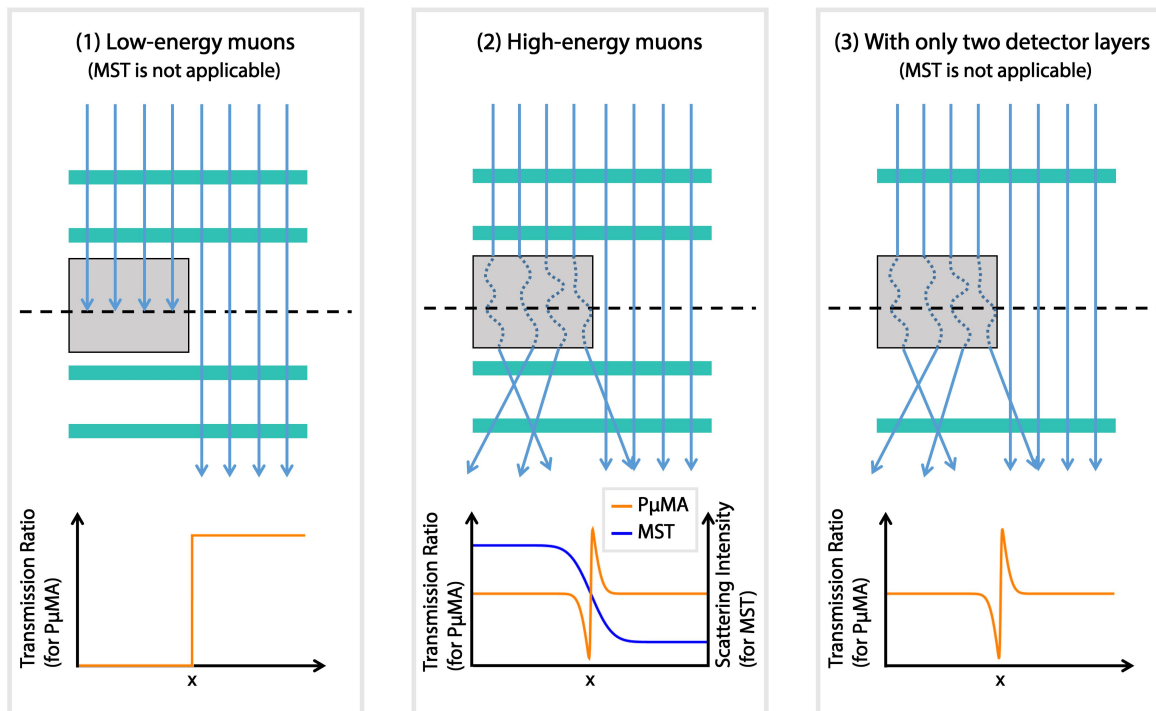
*成像平面是在样品大致高度处设置的一个平面, P μ MA方法需要确定透射径迹与该平面的交点。



a Principle of P μ MA



b Why PuMA localizes edges sharply



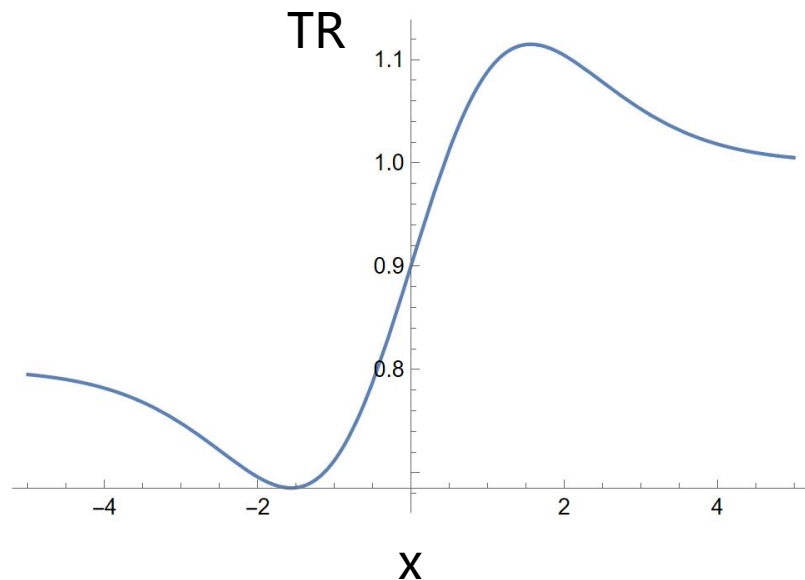
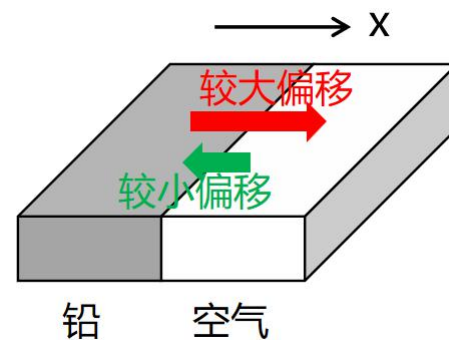
P μ MA方法

投影偏移&边缘扩展函数 (ESF)

我们将成像平面上重建透射点相对实际透射点的偏移称为投影偏移。

由于不同材料区域散射强度不同，垂直于两种材料边界方向（记为x轴）透射比率（TR）会出现特征性的下冲-过冲形态（见下图）。

TR(x) 可视为一种边缘扩展函数（ESF），即理想阶跃变化（如刃边）的模糊图像。

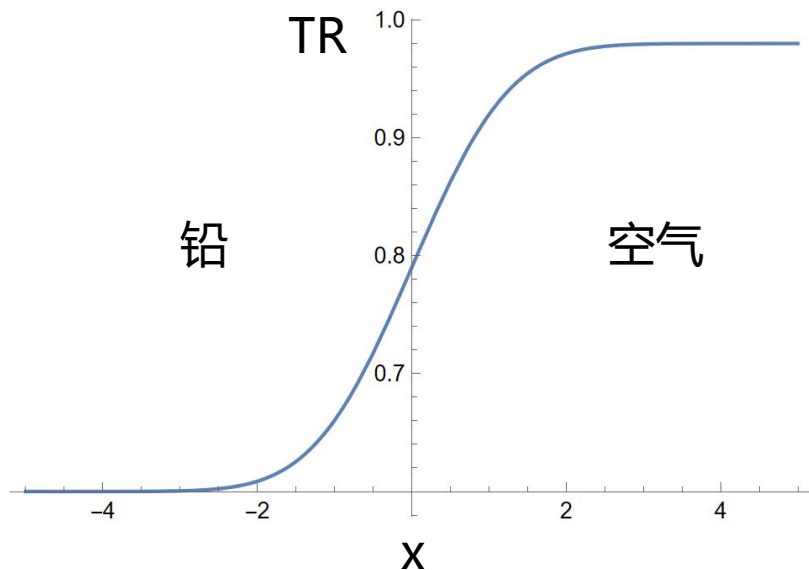


P μ MA方法

P μ MAC——变种P μ MA方法

P μ MA的一种变体称为P μ MAC，它引入了散射角重建，并设置了一个散射角阈值；超过该阈值的事件在透射比率计算中被视为非透射事件。

从边缘扩展函数（ESF）的角度来看，这一约束使不同区域的投影偏移分布的展宽（与散射强度相关）趋近于同一水平，ESF失去下冲-过冲形态，但不同材料区域TR的差异更加显著。



P μ MA方法

从单粒子散射重建到粒子流思想

为什么将P μ MA称为粒子流成像方法？

P μ MA不试图定位单个散射事件，而是记录整束缪子通量被物质扰动后，在样品附近虚拟成像平面上的投影偏移统计。密度边界附近，高密度区向低密度区的P μ MA透射点重分布多于反向，于是透射比率TR分布自然出现标志性的下冲-过冲轮廓，边缘自锐化。

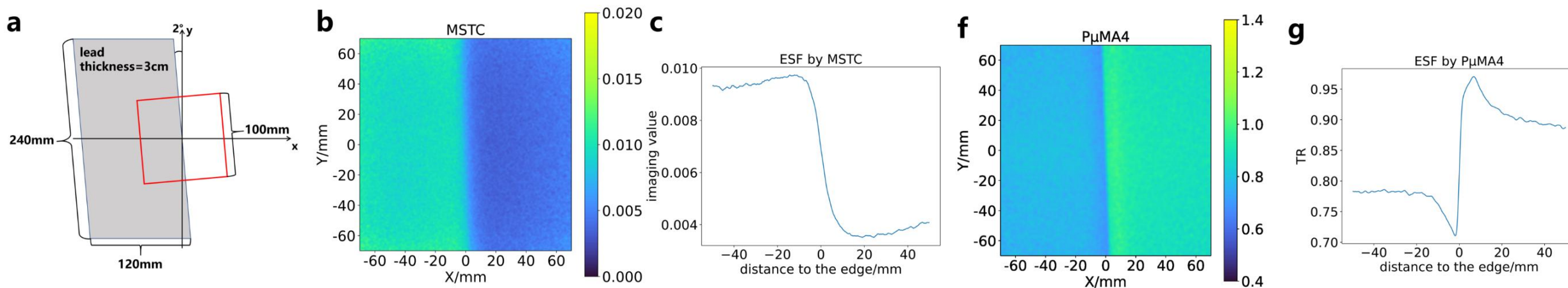
即使散射位置无法确定，透射粒子流的统计再分布本身就能涌现出有用的空间信息。多重库仑散射在这套框架下被转化为可测量的投影偏移分布，并在物质边界处自然增强边缘定位。可以说，信息载体从"单个粒子的轨迹"换成了"整束粒子流穿过物质后的统计响应"，这是粒子流思想的要义。



模拟结果与评价

铅-空气边界模拟

宇宙射线成像模拟采用GEANT4中的CRY包实现，共约5000万个事件。样品为一块厚3厘米的平行四边形铅块，斜边长度为240毫米，边长为120毫米。



*P μ MAX 意味着成像使用的RPC层数为X

*MSTC 是一种优化的MST成像算法，参见 NIMA 1069, 169932 (2024).

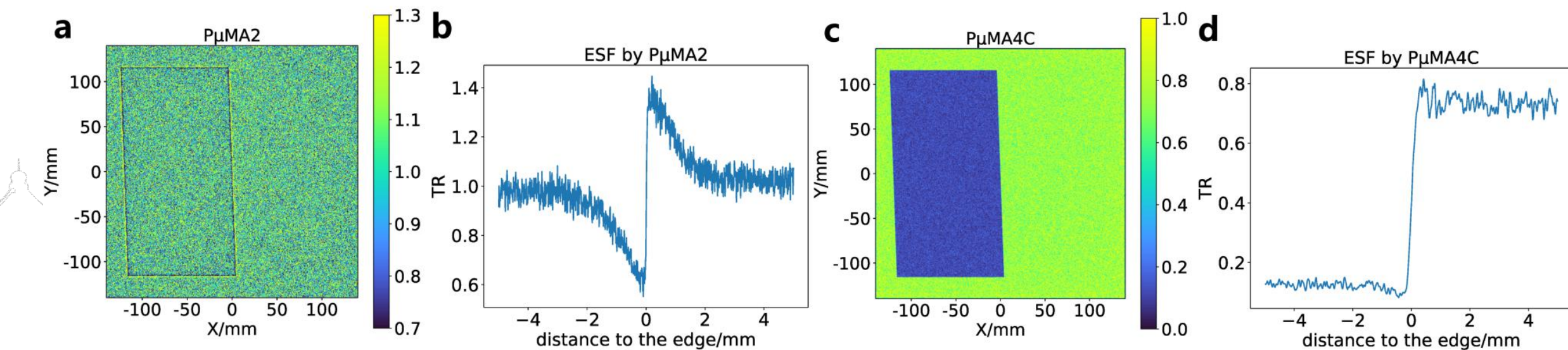


模拟结果与评价

铅-空气边界模拟

理想条件下的模拟：一束能量为4 GeV的单能准直缪子束，未考虑探测器位置分辨率的影响。

P μ MA4的事件数约为1000万，P μ MA2的事件数约为5000万。

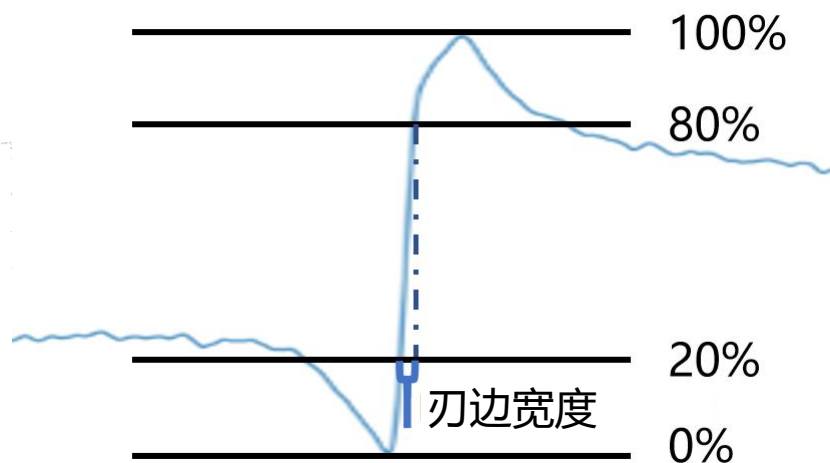


模拟结果与评价

刃边宽度

受电子信号中上升时间概念的启发，将边缘扩展函数（ESF）“上升”过程中20%与80%点之间的宽度定义为ESF的刃边宽度。

下表列出了在空气-铅边界模拟成像中，P μ MA方法测得的部分刃边宽度数据。P μ MA方法的优势显而易见。



方法	刃边宽度/mm
MSTC	7.242 ± 0.112
P μ MA2	2.128 ± 0.108
P μ MA4	1.732 ± 0.028

单能准直缪子束模拟：
P μ MA2 55 μ m
P μ MA4 166 μ m



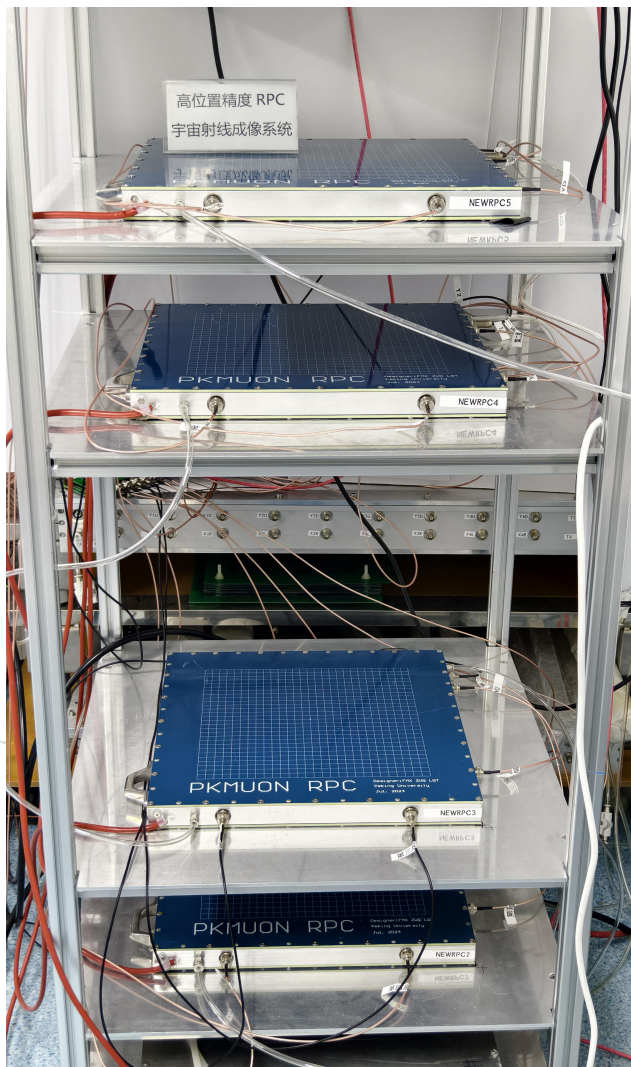
实验成像结果

实验设置

我们使用自主研发的阻性板室（RPC）作为缪子探测器。

每个RPC的有效面积为 $28\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ ，最优位置分辨率为 $0.5\text{--}0.7\text{ mm}$ (σ)，探测效率超过80%。

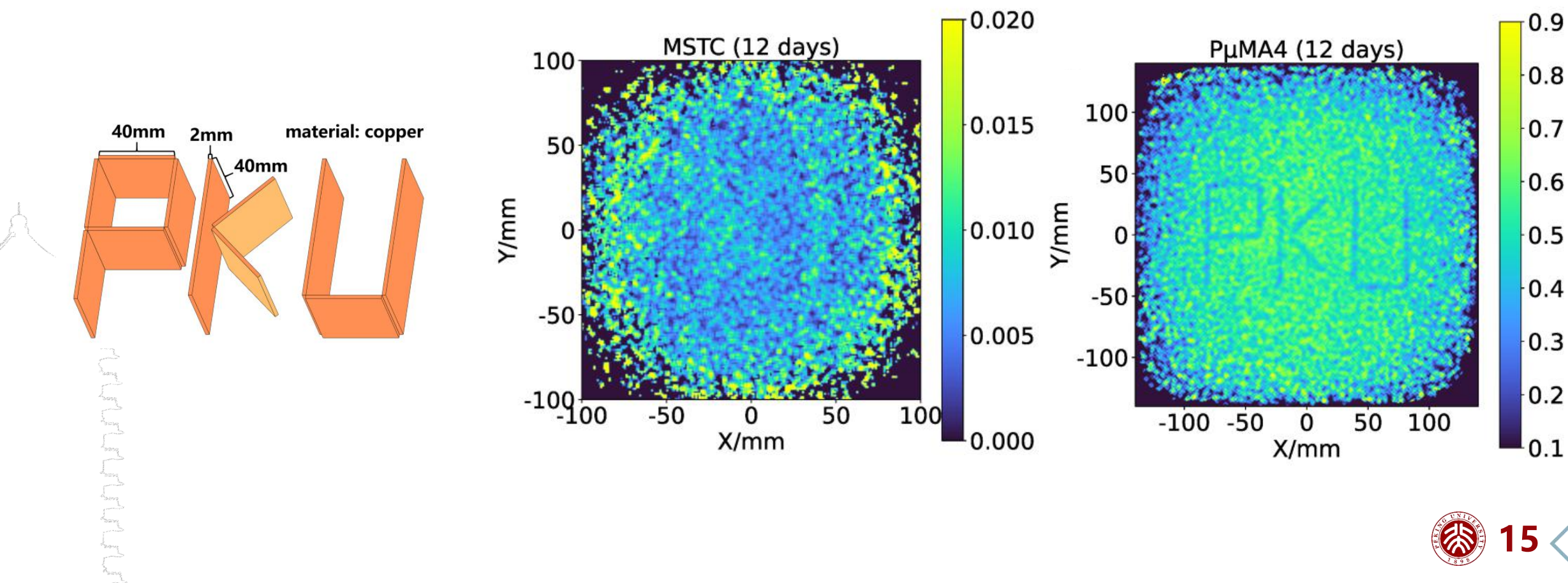
左侧图中展示了一个典型的四层RPC宇宙射线缪子探测系统，其层间距从上到下分别约为20 cm、50 cm和20 cm。该系统已用于缪子成像实验以及潜在的亲缪子暗物质探测实验（Phys. Rev. Lett. 136, 151001, 2026年发表）。



4RPC探测系统实拍图

实验成像结果

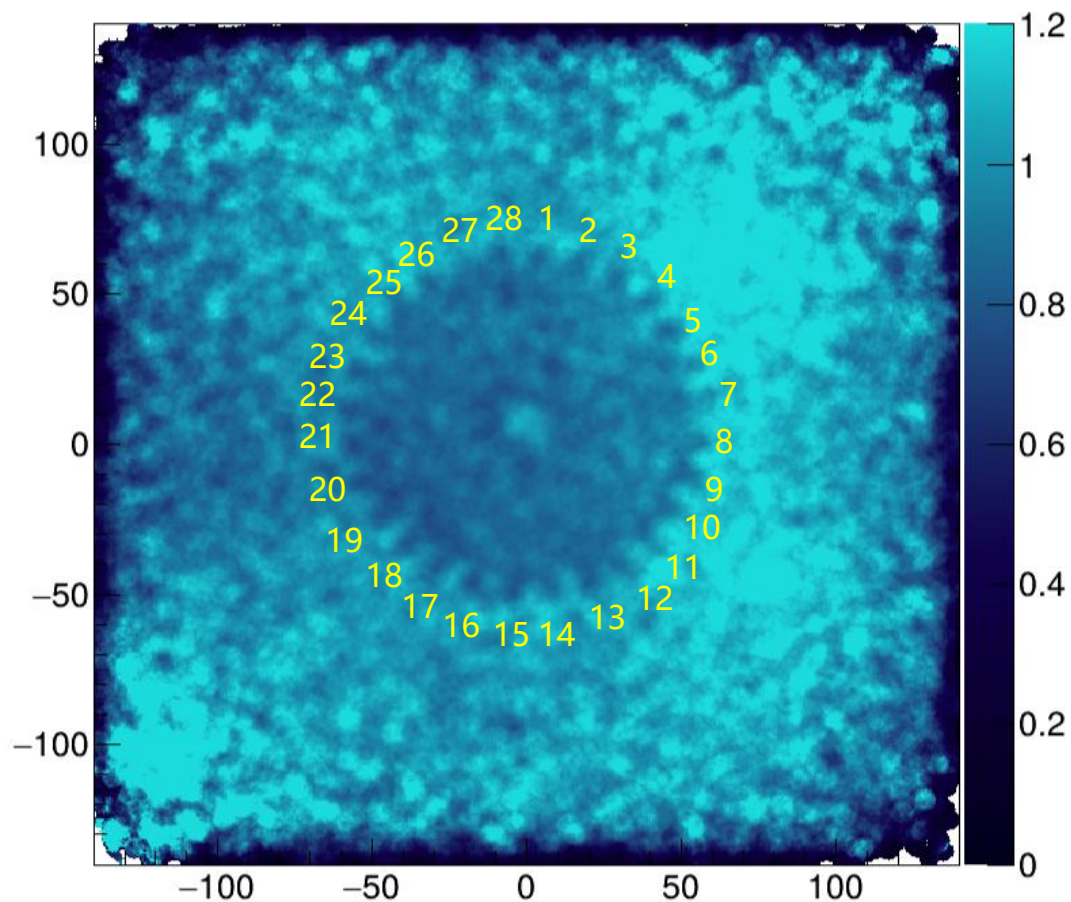
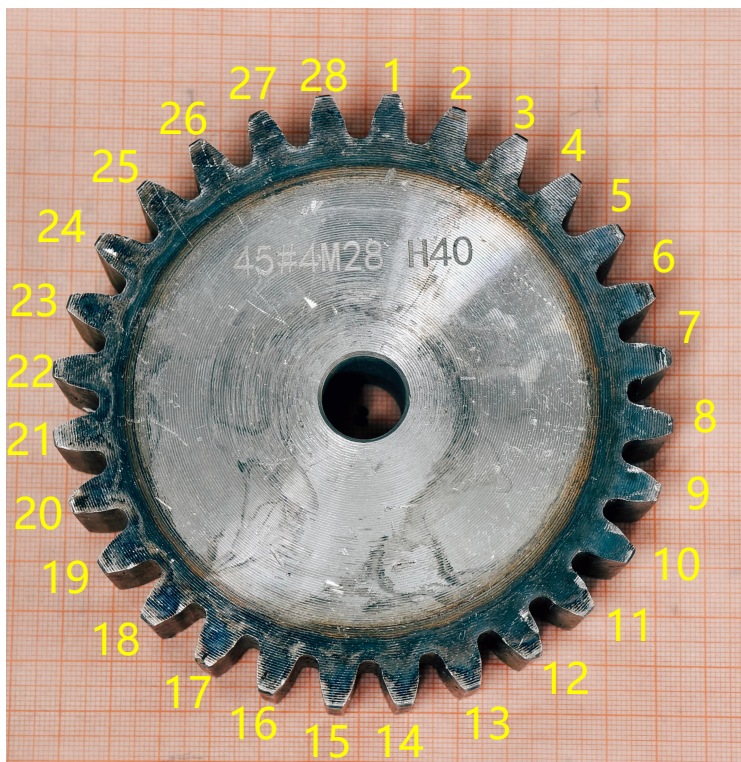
实验成像结果1：铜片字母“PKU”



实验成像结果

实验成像结果2：齿轮

我们的方法在宇宙线条件下可以清晰辨识齿轮的齿结构



约6.5天



总结

- 我们提出了P μ MA方法，该方法综合利用了缪子的透射和散射信息，最简单的配置仅需两层探测器。更重要的是，P μ MA超越了一般的缪子散射范式，体现了更高层次的粒子流思想，也可以取得更高分辨率的图像。
- 在空气-铅边界的模拟成像中，P μ MA生成了边缘锐利的清晰透射图像。从边缘宽度指标来看，P μ MA相较于基于PoCA的方法具有明显优势。单能准直束的模拟结果表明P μ MA方法具有更高的分辨潜力。
- 利用本实验室的RPC装置，我们成功实现了对刻有字母"PKU"的2毫米宽铜片样品以及一个具有28个毫米级齿的齿轮的清晰成像。

详见：arXiv:2512.19747，以及已公开的专利申请CN121558779A



参考文献

- [1] Bonomi, G., Checchia, P., D'Errico, M., Pagano, D. & Saracino, G. Applications of cosmic-ray muons. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 112, 103768 (2020).
- [2] Morishima, K. et al. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature* 552, 386–390 (2017).
- [3] Alvarez, L. W. et al. Search for Hidden Chambers in the Pyramids. *Science* 167, 832–839 (1970).
- [4] Borozdin, K. et al. Cosmic ray radiography of the damaged cores of the Fukushima reactors. *Phys. Rev. Lett.* 109, 152501 (2012).
- [5] Borozdin, K. N. et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons. *Nature* 422, 277 (2003).
- [6] Yu, P. et al. A new efficient imaging reconstruction method for muon scattering tomography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 1069, 169932 (2024).
- [7] Settles, G.S. Basic Concepts. In *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. 25–38 (Springer Berlin Heidelberg, 2001).
- [8] Yu, X. et al. Proposed Peking University muon experiment for muon tomography and dark matter search. *Phys. Rev. D* 110, 016017 (2024).
- [9] Liu, C. et al. Probing cosmic ray composition and muonphilic dark matter via muon tomography. *Phys. Rev. Lett.* 136, 151001 (2026).
- [10] Li, Q. et al. Study of spatial resolution properties of a glass RPC. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 663, 22–25 (2012).
- [11] Li, Q. T. et al. A sub-millimeter spatial resolution achieved by a large sized glass RPC. *Chin. Phys. C* 37, 016002 (2013).
- [12] Hagmann, C., Lange, D. & Wright, D. Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes. 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 1143–1146 (IEEE, 2007).
- [13] Bethe, H. A. Molière's Theory of Multiple Scattering. *Phys. Rev.* 89, 1256–1266 (1953).
- [14] Paulter, N. G., Larson, D. R. & Blair, J. J. The IEEE Standard on Transitions, Pulses, and Related Waveforms, Std-181-2003. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 53, 1209–1217 (2004).
- [15] Maître, H. Image Quality. In *From Photon to Pixel*(ed. Maître, H.) 205–255 (Wiley, 2017).
- [16] Xu, Y. et al. Feasibility study of the GeV-energy muon source based on the High Intensity Heavy-Ion Accelerator Facility. *Phys. Rev. Accel. Beams* 28, 053401 (2025).
- [17] Zhang, F. et al. Proof-of-principle demonstration of muon production with an ultrashort high-intensity laser. *Nat. Phys.* 21, 1050–1056 (2025).





北京大学
PEKING UNIVERSITY



中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences



中国工程物理研究院

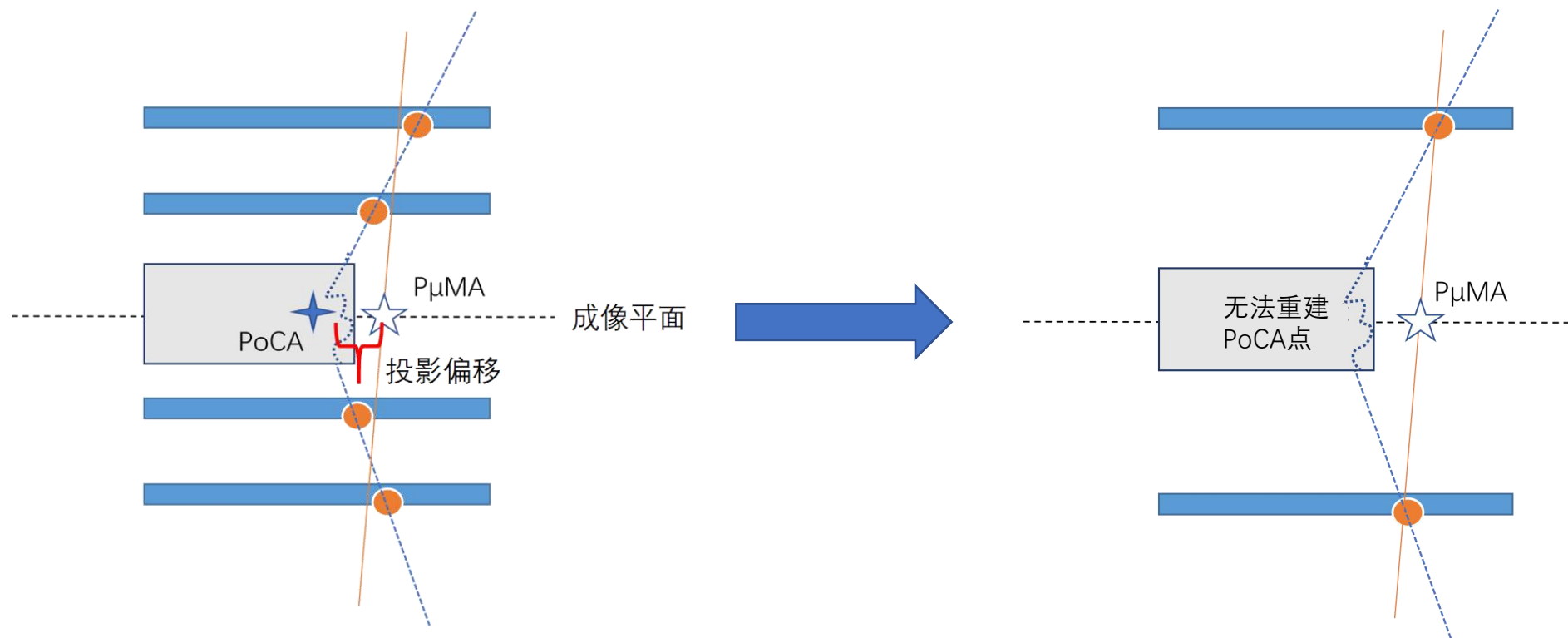
感谢大家的倾听!

向本工作的参与者（李奇特，张荣峰，喻佩，刘承恩，陈良文，张锋，赵志政，杨喆，李强等）致谢！



P μ MA方法

P μ MA2——轻量化、快速的成像方式



模拟结果与评价

铅-空气边界模拟

透射比率TR满足 $TR(x) = \beta + \int_0^{+\infty} [\alpha f - \beta g](x - x') dx'$

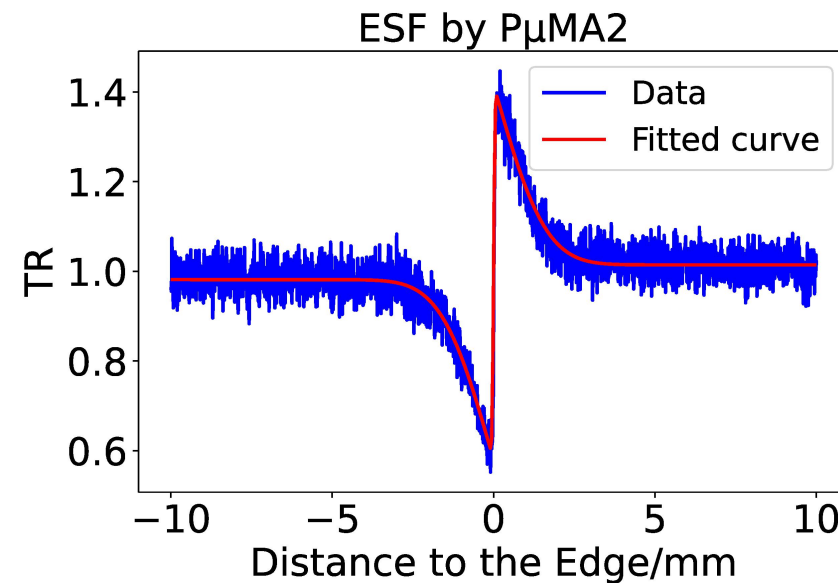
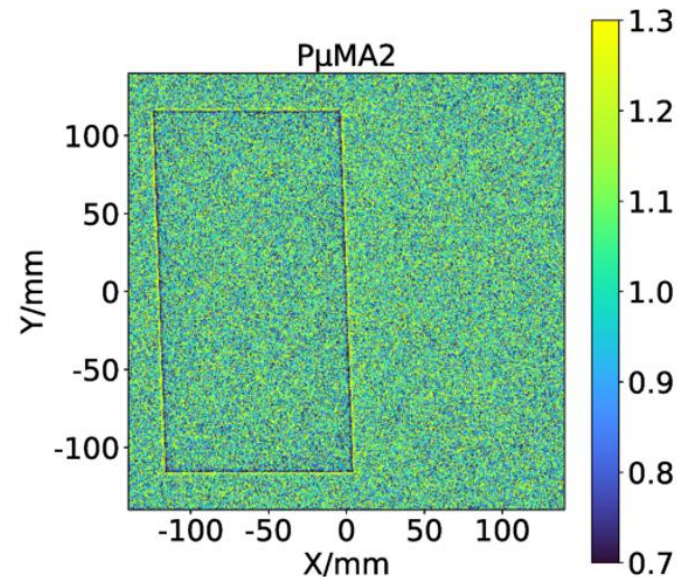
单能准直束的投影偏移分布近乎完美的高斯分布，于是TR
可以用下面的拟合模型描述

$$TR(x) = A * \operatorname{erf}(k_1 x) + B * \operatorname{erf}(k_2 x) + C$$

其中erf为误差函数，定义为

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^x e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

用此模型拟合模拟数据的ESF，拟合效果较好，验证了投影
偏移模型的解释力。



P μ MA方法

投影偏移统计

我们将散射引起的成像平面上的投影偏移记为 D ，表示成像平面上重建透射点与实际透射点之间的偏差。

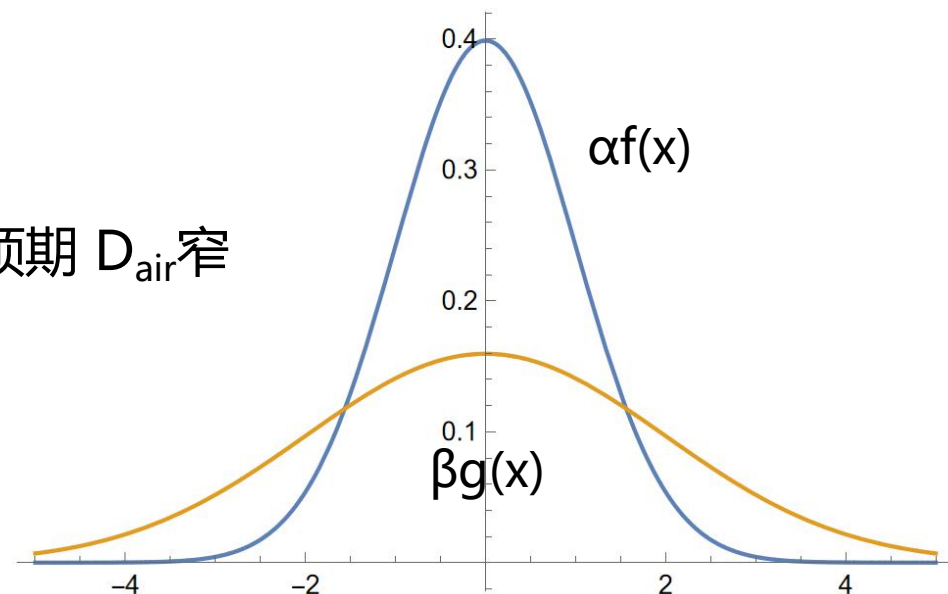
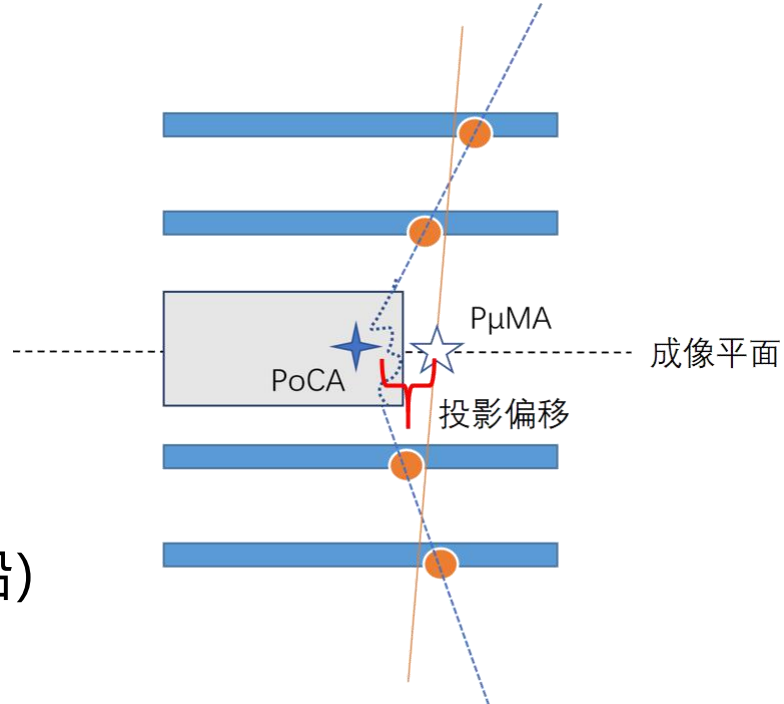
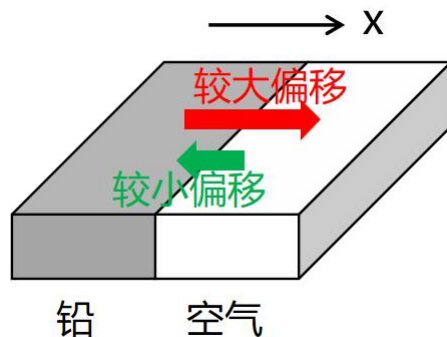
考虑一维情况（无限长直边界），两种不同材料区域（例如空气和铅）内的投影偏移分布 $D(x)$ 可分别表示为：

$$D_{air}(x) = \alpha \cdot f(x), D_{lead}(x) = \beta \cdot g(x)$$

其中 α 和 β 为透射率， $f(x)$ 和 $g(x)$ 为归一化的偶函数。我们预期 D_{air} 窄而陡，而 D_{lead} 宽而平。

MCS 散射角分布:

$$\sigma_{\theta} = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right) \right]$$



两种材料区域
 $D(x)$ 分布示意

