

2024

# 宇宙线缪子快速成像研究

文群刚

安徽大学 物理与光电工程学院

2024年01月

第一届安徽省核物理研讨会

合肥

# 目 录

1

缪子成像比率算法

2

比率算法无体素成像

3

结论与展望

01

# 缪子成像比率算法

# 宇宙线缪子成像

1936年，安德森和他的学生尼德美尔在测量宇宙线能损时，通过云雾室发现了宇宙线中缪子。缪子是一种高能带电粒子，它是高能宇宙射线与大气层中的核子碰撞的产物，遍布地球表面，在海平面的通量约为  $10000 \text{ m}^{-2}\text{min}^{-1}$ 。宇宙线缪子的能量分布很广，平均能量可达  $3 \sim 4 \text{ GeV}$ 。

- 1955年，E. P. George 开创性地进行了宇宙线  $\mu$  子透射成像工作。采用盖格计数器探测澳大利亚 Guthega-Munyang 隧道内部的  $\mu$  子通量，通过  $\mu$  子通量的衰减对隧道上方的岩石覆盖层厚度进行了测定。

- 2003年，美国洛斯阿拉莫斯 (LANL) 实验室首先提出了基于缪子散射的 PoCA(Point of Closest Approach) 成像理论，它依据的是缪子通过待测物体后的散射角分布与物质原子序数相关的原理，探测屏蔽层内部的重核物质的分布状态等信息，并结合断层成像的算法，实现了对被厚屏蔽材料包裹的核材料的无损检测。

# 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小角度库仑散射，会产生一个累积散射角，该散射角的分布近似满足均值为零的高斯分布

$$\frac{dN}{d\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right)$$

角分布的标准误差为

$$\sigma_\theta \approx \frac{19.2\text{MeV}}{\beta cp} \sqrt{\frac{L}{L_0}}$$

# 缪子散射成像理论基础

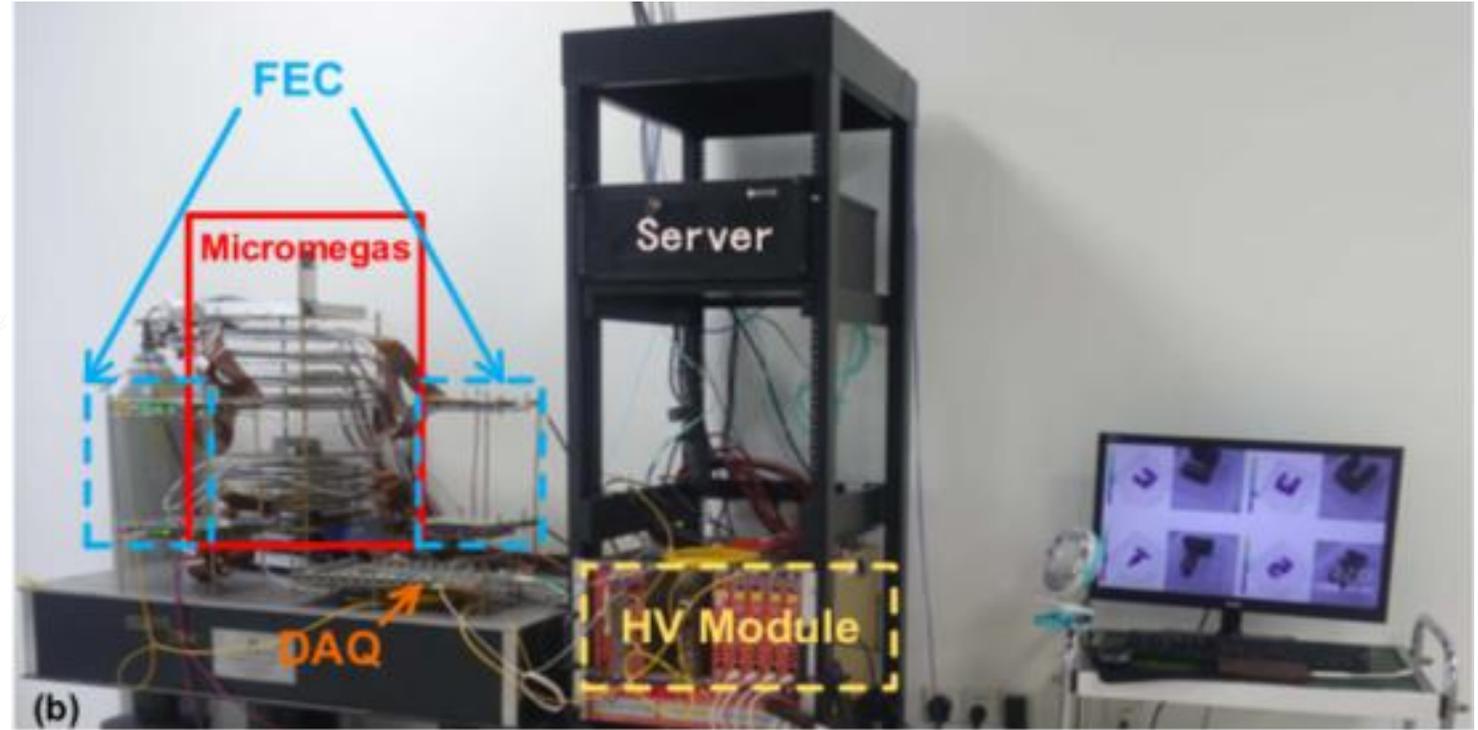
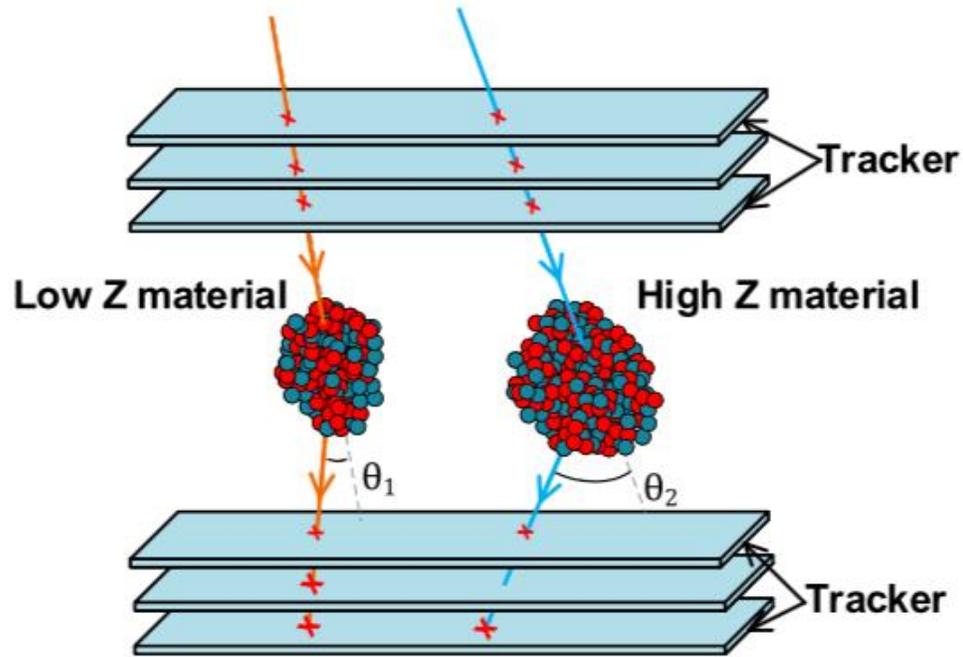
对于宇宙线缪子，其动量大小并非单值而是有一定分布的，理论上可得到

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \theta_j^2 = \left( \frac{19.2 \text{ MeV}}{\beta c p'} \right)^2 \cdot \frac{L}{L_0}$$

其中 $p'$  称为等效动量

$$\left( \frac{1}{p'} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N} \cdot \frac{1}{p_i^2}$$

# 缪子散射成像测量系统



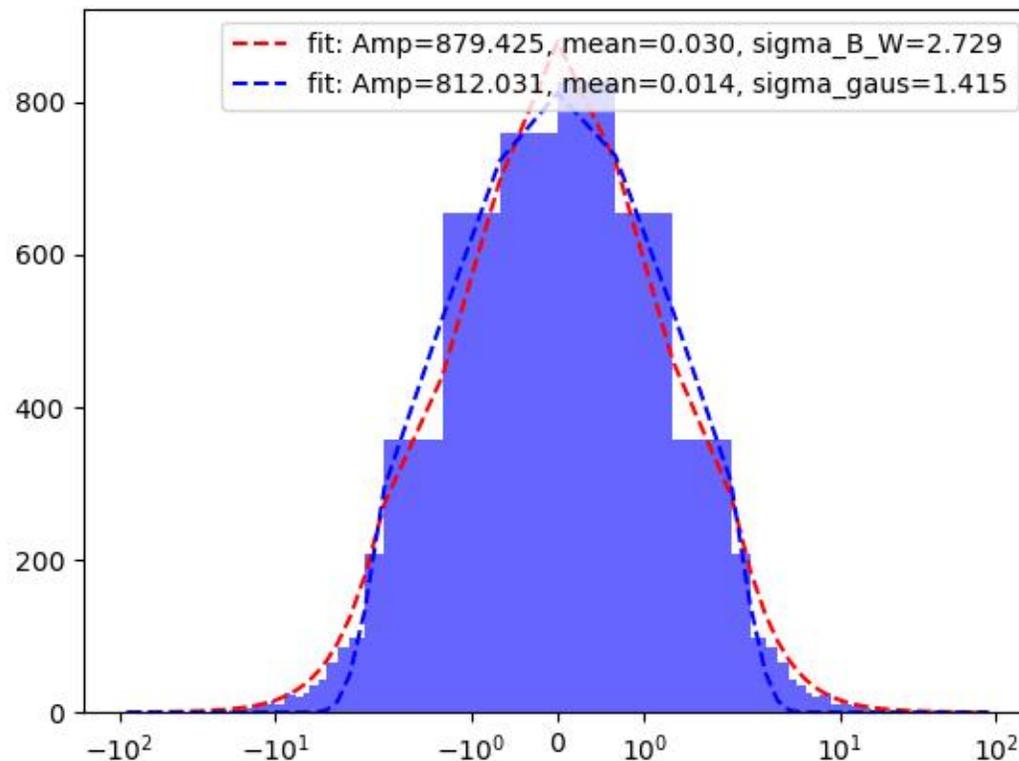
IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 69, NO. 1,  
JANUARY 2022



# 实验数据的散射角分布

根据缪子散射成像理论，通过对实验测量到的散射角度的标准误差进行可视化，就可以实现成像。但是，实验测量到的散射角分布在大角度处与高斯分布比较有较高的拖尾，这符合莫里哀理论描述。

散射角度的标准误差计算是散射角度方均根值，则大角度的事件对于散射角度标准误差计算结果影响非常大，而实验测量到的大角度事件数量较少。因此使得计算的散射角标准误差有较大的不确定度，进而使得最终成像困难。





# 比率算法思想

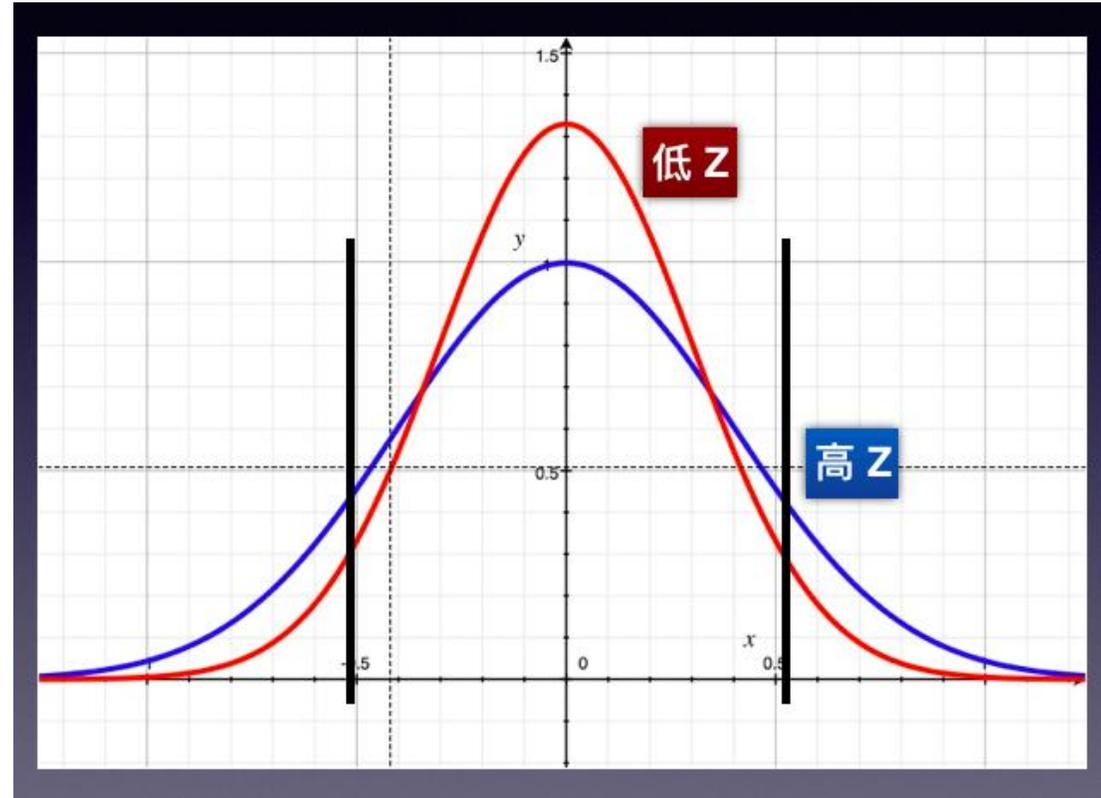
所谓比率算法就是将测量到的缪子事件数记为 $N$ ，在某个角度范围内的事件数计为 $N_c$ ，使用比率值

$$R = \frac{N_c}{N}$$

代替散射角标准误差进行数据可视化，从而实现成像。

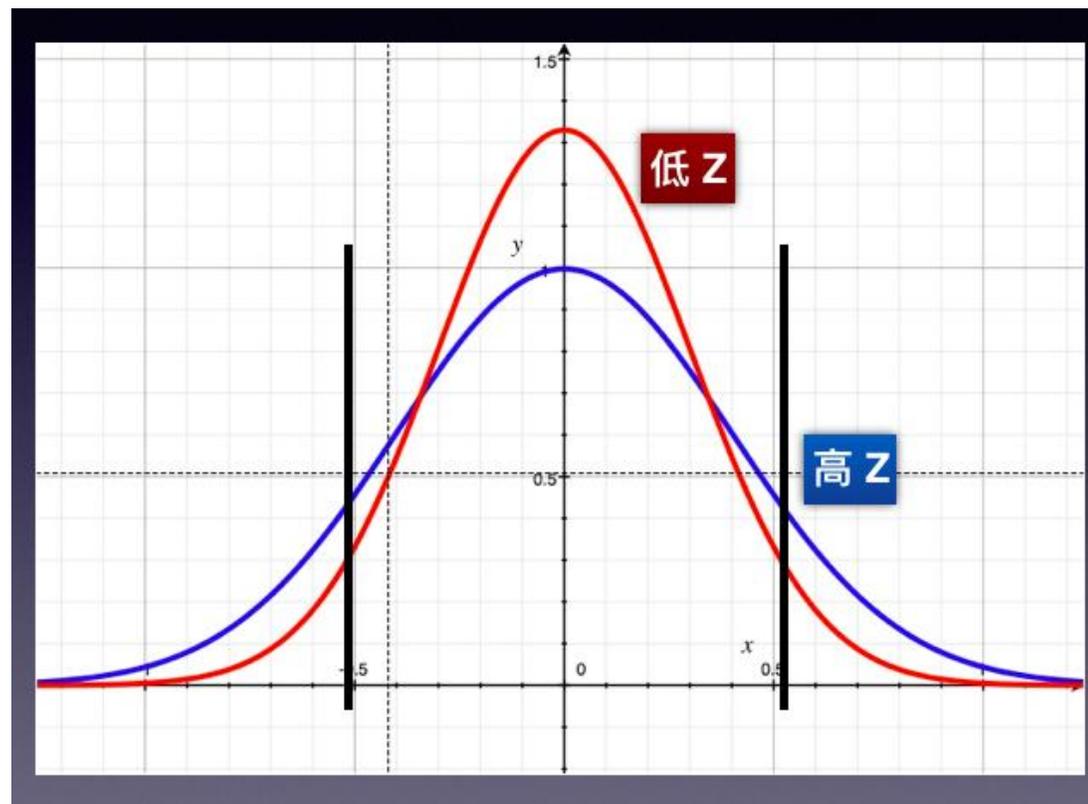
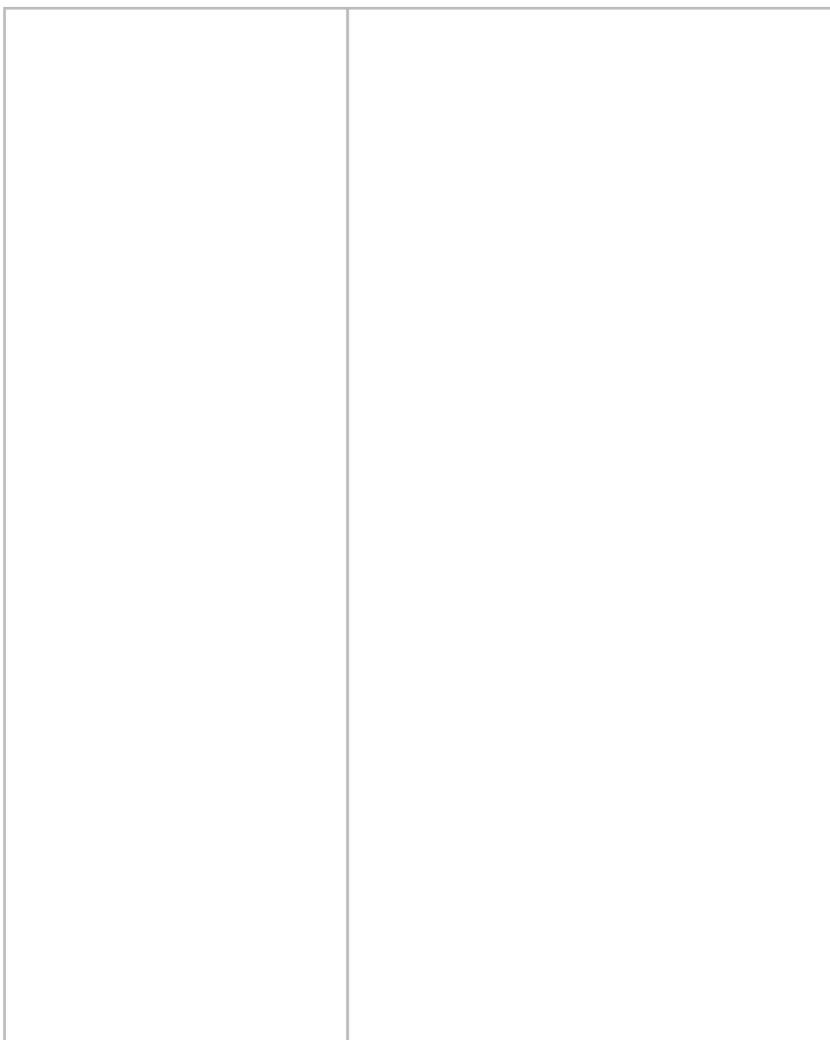
由于该算法对所有散射角都是平等对待，因而能很好地避免大角度对成像结果的破坏作用，从而对实验数据实现较好成像。

Radiat Detect Technol Methods 4, 263-268 (2020)

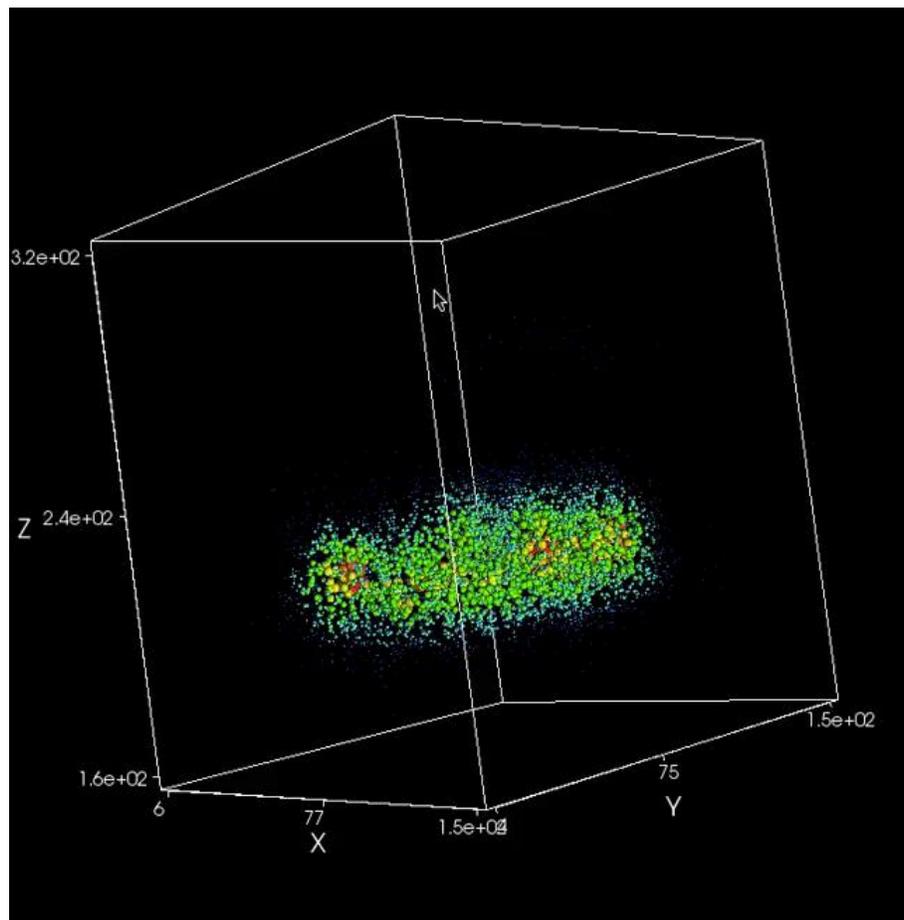




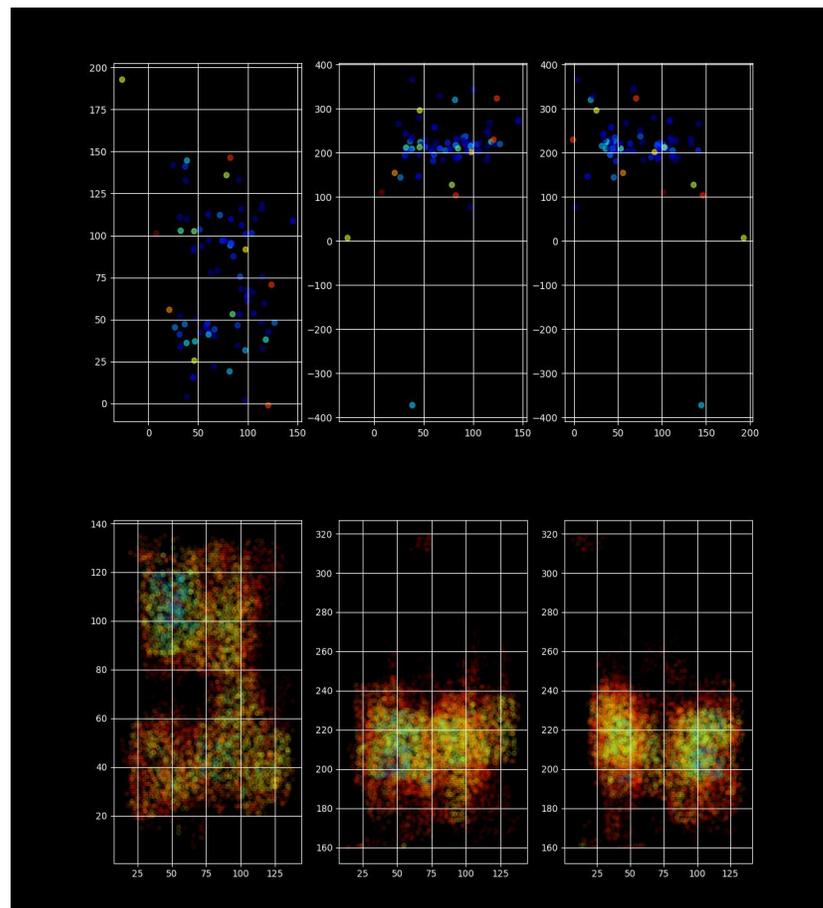
# 比率算法思想



# 比率算法成像



24小时实验数据



半小时实验数据

02

## 比率算法无体素成像



# 体素成像

体素成像一般取一定体积的立方体（或者一定体积的其他几何体），将在此体积内的实验数据通过某算法得到此立方体的一个对应值（比如比率算法得到个比率值），成像算法将遍历测试区域内所有位置并一一对应一个数值，然后将这样的重构数据可视化就实现了成像。

1

## 数据低利用

只有体素内实验数据被利用。

2

## 需大数据量

可视化的物理量一般是一个统计量，如果体素内的数据量太少，统计涨落误差太大影响成像结果。

3

## 多次散射情况

缪子经过物质时散射是多次库仑散射的结果，重构时是简化成一个PoCA散射点。体素内不同位置散射角度分配比较困难。

4

## 其他问题

.....

# 比率算法无体素成像

为了最大化的利用实验数据，并且针对比率算法关注小角度事件的特点，我们提出比率算法无体素成像方式。

01

每个重构数据点使用所有实验数据计算出一个比率值。

02

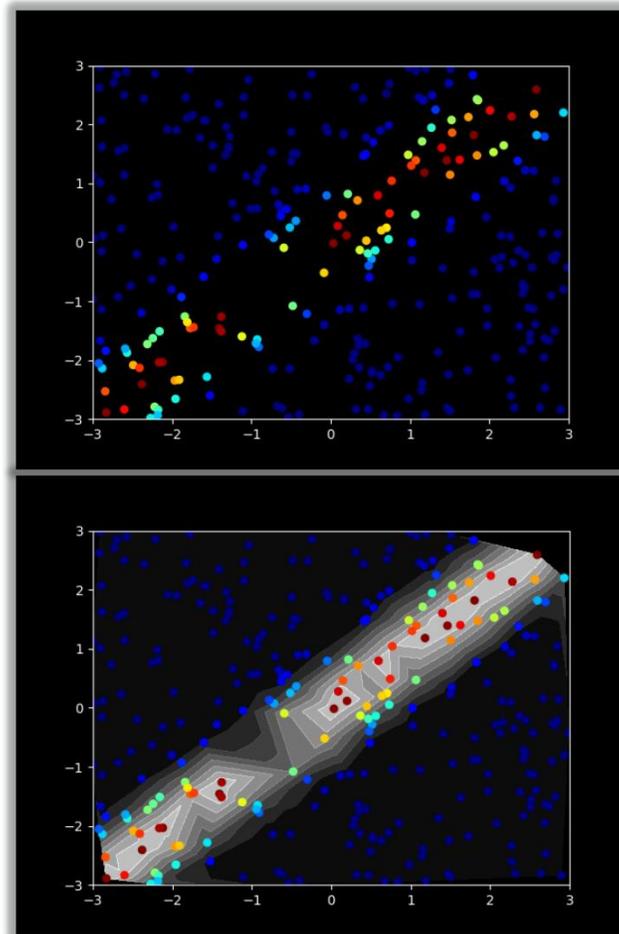
一个PoCA点在重构点处有一个重构散射角，其大小用一个从实验PoCA点到重构点间距离衰减的函数折算。

03

用所有PoCA点在重构点处对应的重构散射角计算比率值，得到一个重构点对应一个比率值。

04

重构数据遍历实验测试区域，并对重构数据比率值数据可视化实现成像。



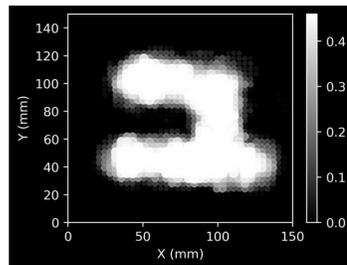


# 快速成像

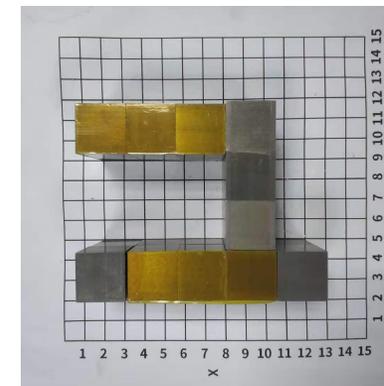
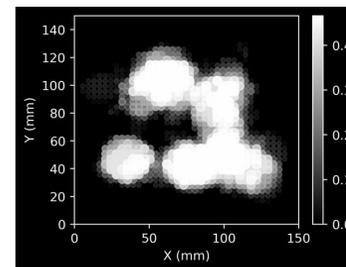
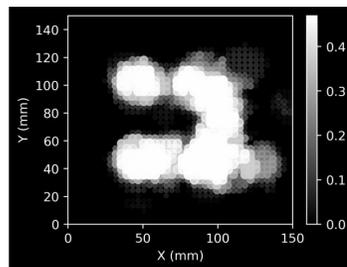
由小型钨立方体组成字母“μ”的测试物体，每个立方体的尺寸为2 cm × 2 cm × 2 cm。在垂直方向上，样品的厚度为4 cm。在线测量过程中，系统每10分钟记录测量结果到一个文件中。每个文件通常包含约100个有效事件。

探测系统每分钟的探测通量约为 $0.044 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ，明显低于大约 $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 的自然宇宙线μ子通量。

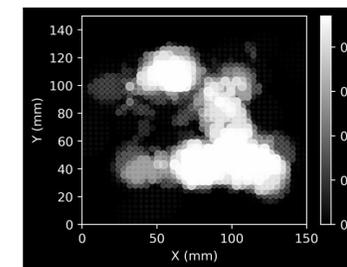
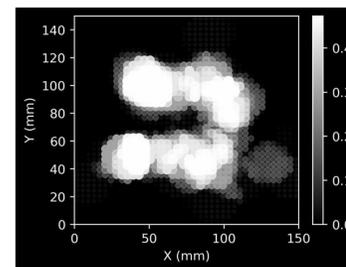
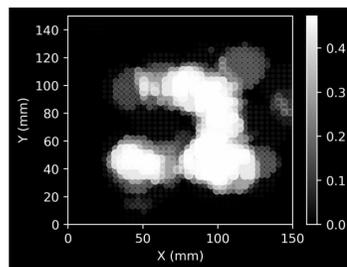
60 minutes  
(~ 600 events)



30 minutes  
(~ 300 events)



20 minutes  
(~ 200 events)



Scientific Reports 13, 19718 (2023)  
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-47023-w>

03

## 结论与展望



# 宇宙线缪子快速成像能否实现？

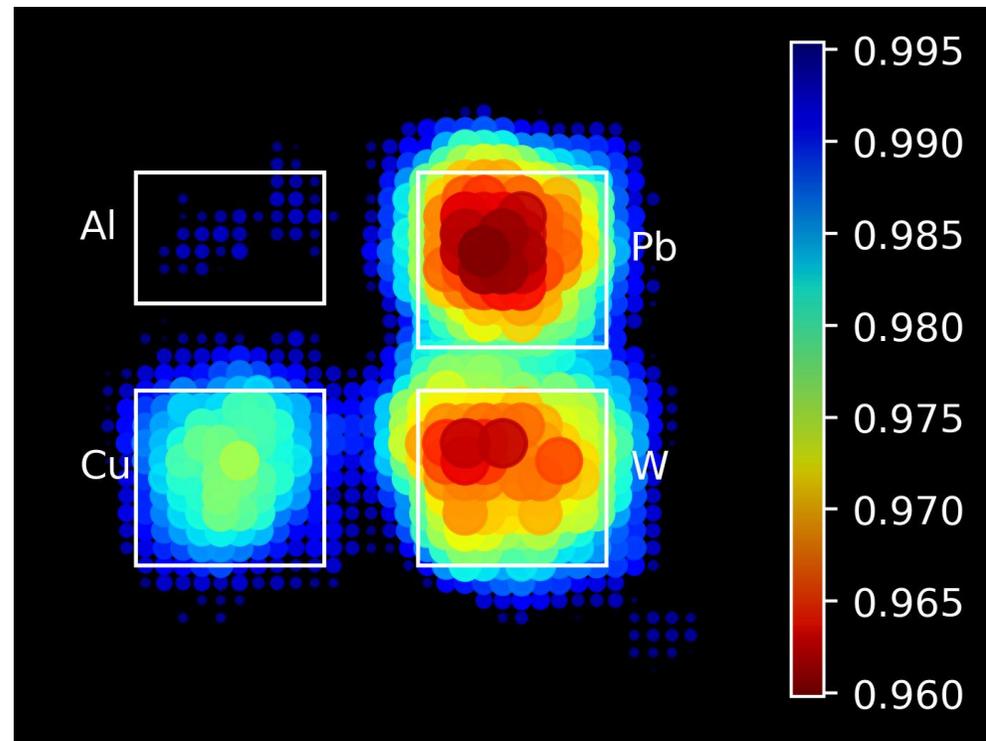
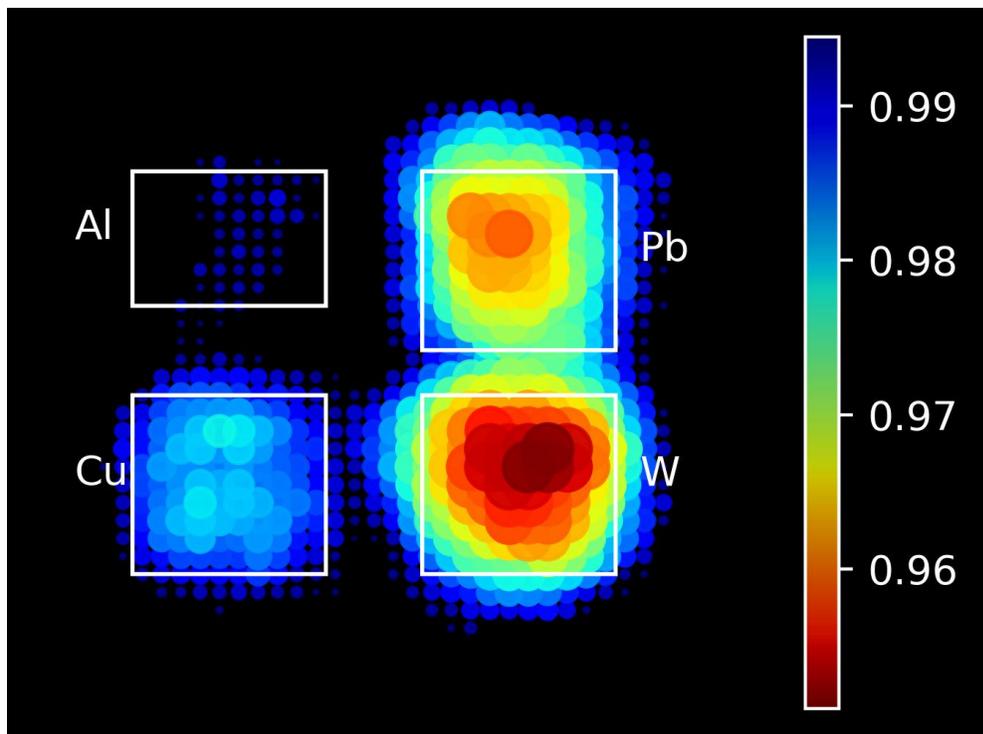


曾经的想法



现在的观点

# 宇宙线缪子等效动量变化对成像结果的影响



仰觀宇宙之大俯  
察品類之盛所以遊  
目騁懷足以極視  
聽之娛信可樂也

少序剛節錄





THANK YOU