



华北电力大学
NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

μ 子成像技术对 物质密度的精确测量

庞捷 华北电力大学

第二届国内 μ 子成像技术与应用研讨会 2024.11.08

目录

1

研究简介

2

精确密度测量

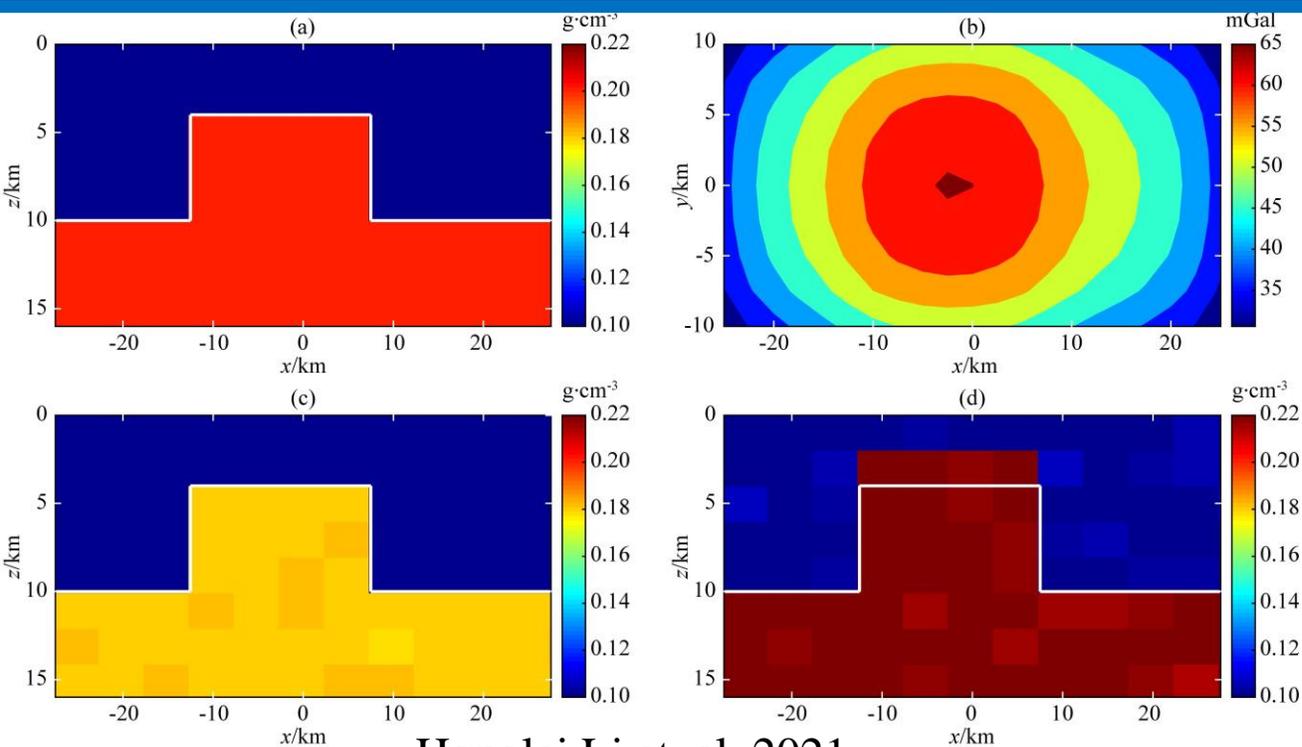
3

机器学习-异常分类

4

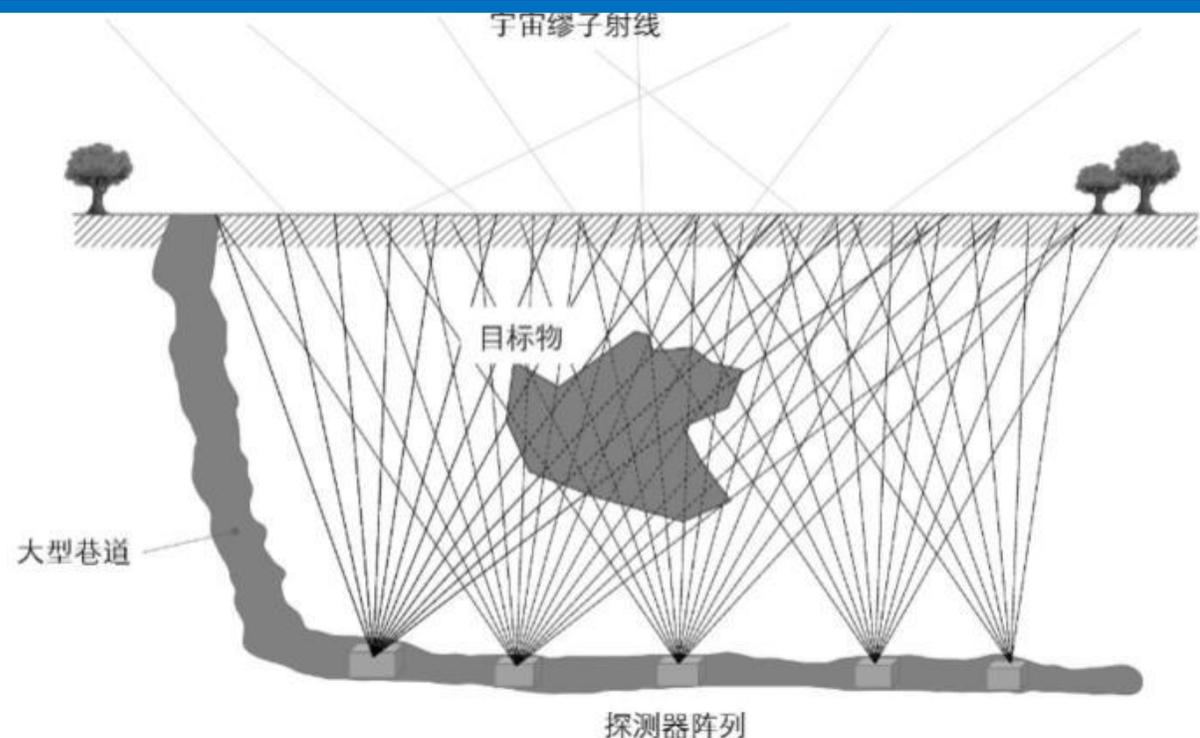
总结

研究目的



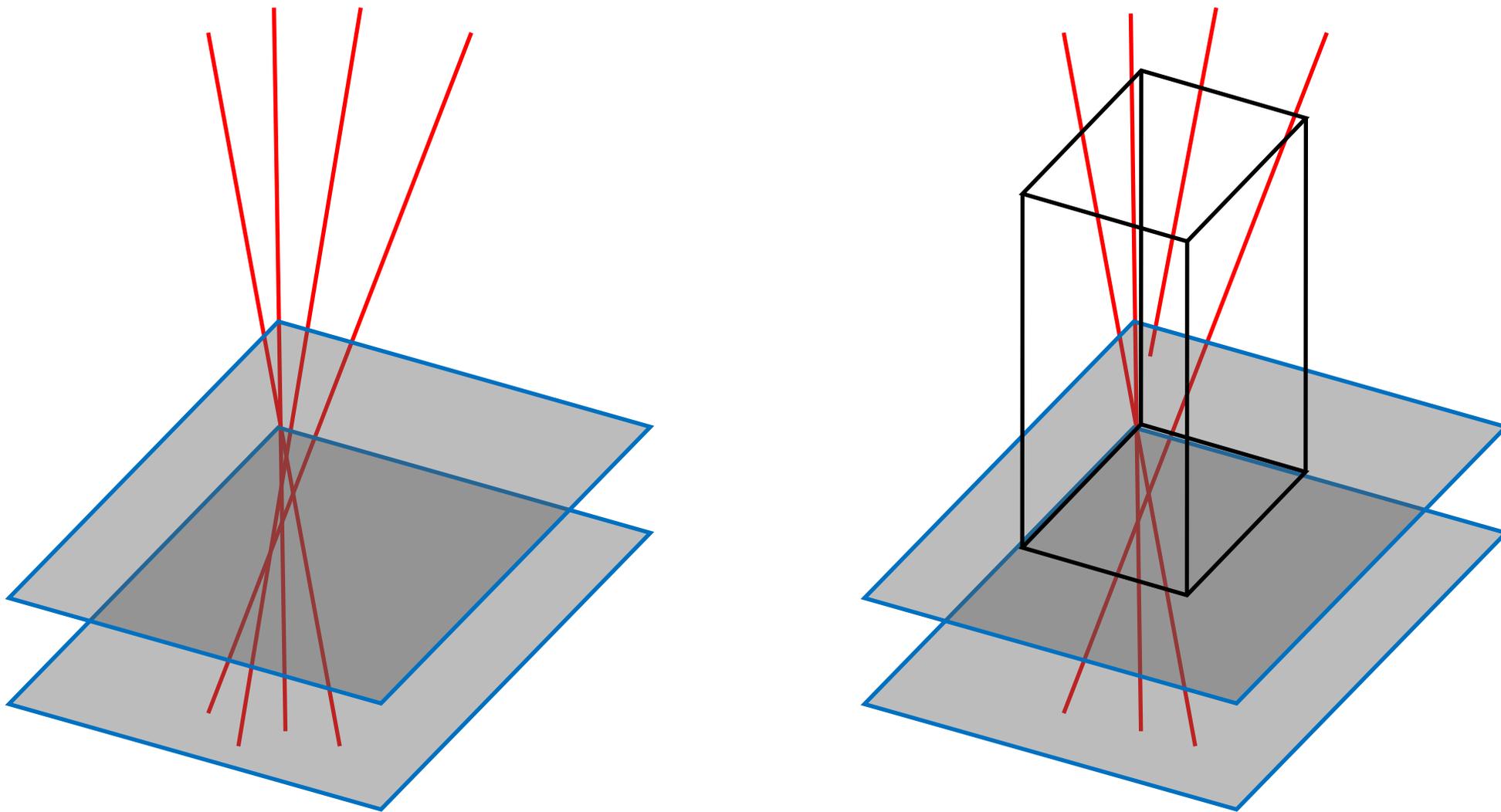
Honglei Li et. al. 2021

- 在地下工程的施工过程中，通常要知道地层内部的结构信息；
- 传统的方法包括重力、地震波及电磁法等；
- 这些方法求解过程复杂，且具有非唯一解。
- 宇宙线缪子可以穿透地层，为我们带来地层信息；
- 地层的密度与“下游”探测器探测到的缪子数直接相关



我们尝试利用缪子成像技术对地下物质的密度进行精确测量。

成像原理



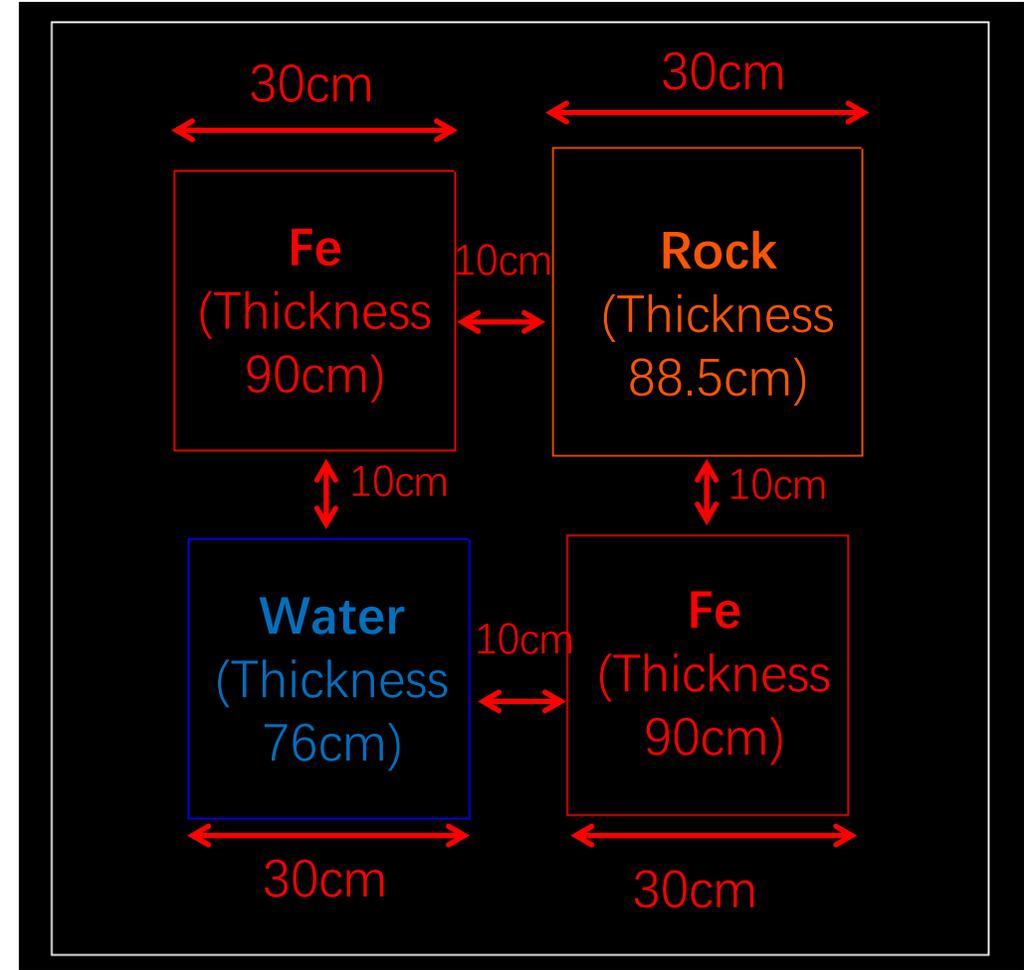
- 透射成像需要测量穿过物质前后缪子通量的变化。
- 通量的变化与缪子穿过的物质的密度长度有关。

成像实验

实验平台



顶视图示意



- 在四层探测器面板中间放置了三种不同种类的物质，通过缪子透射成像技术对三种物质的密度进行精确测量。

目录

1

研究简介

2

精确密度测量

3

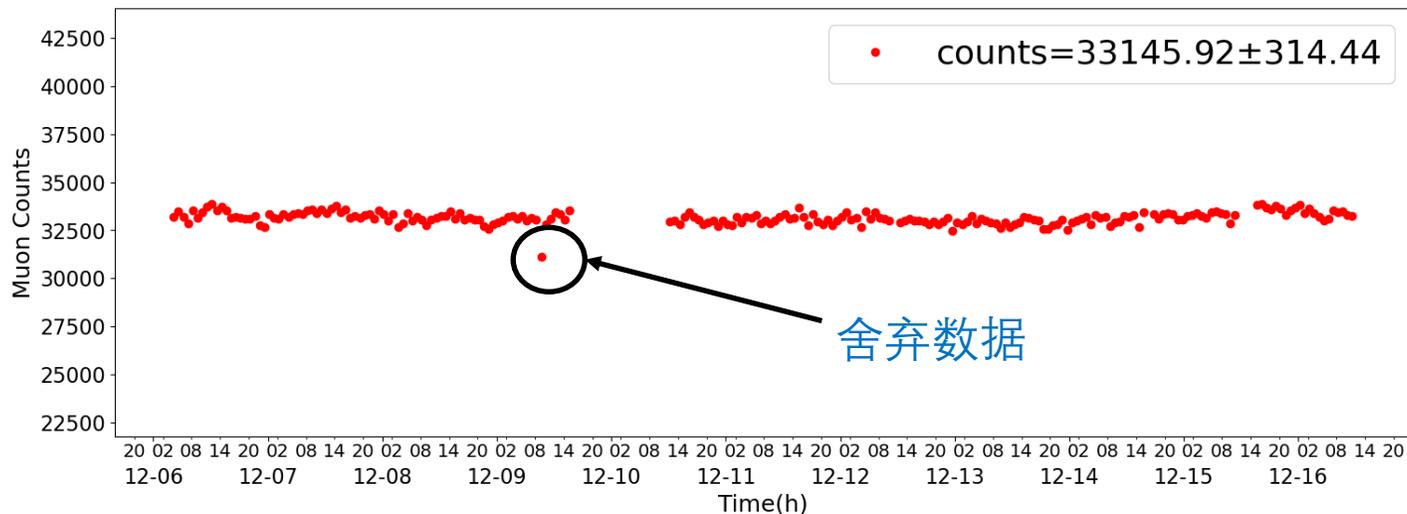
机器学习-异常分类

4

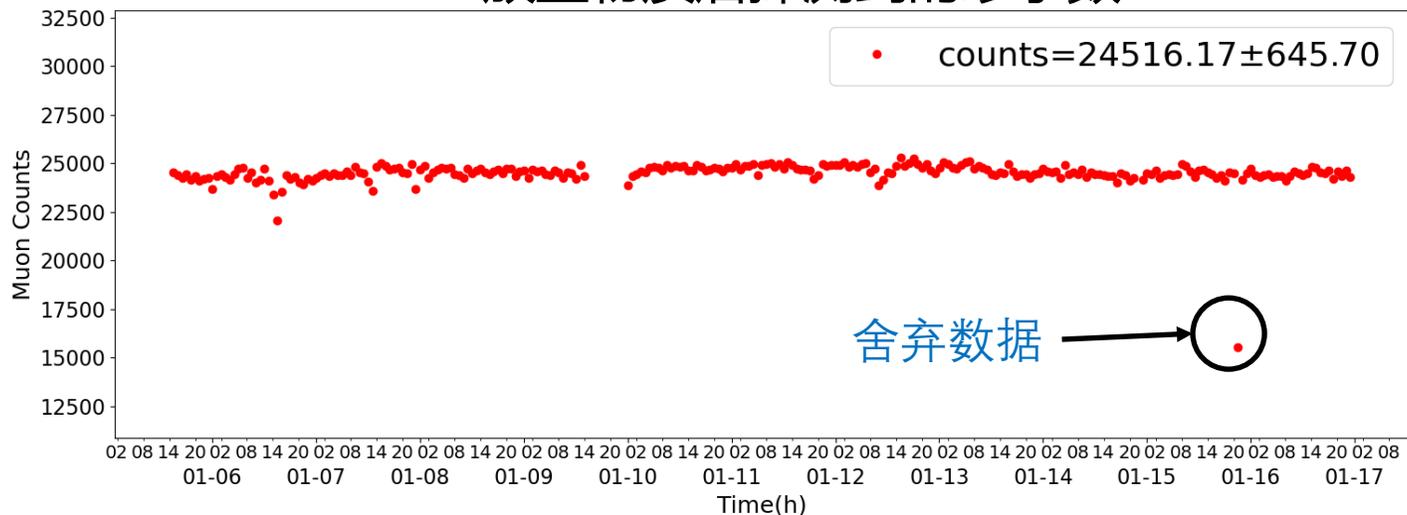
总结

缪子数据采集

无物质情况下探测到的缪子数



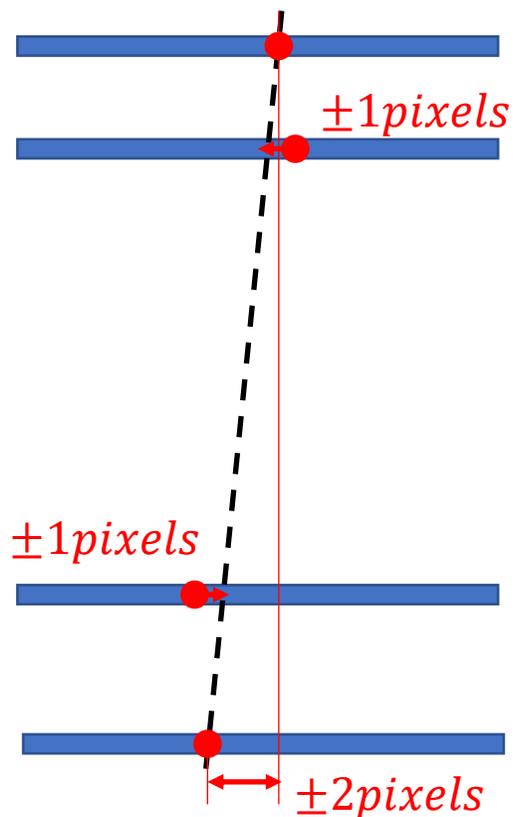
放置物质后探测到的缪子数



- 对物质进行了220 h的探测
- 探测器效率约为87%
- 舍弃误差超过 3σ 范围的数据

- 获得数据后需要进一步筛选事例用于还原物质密度

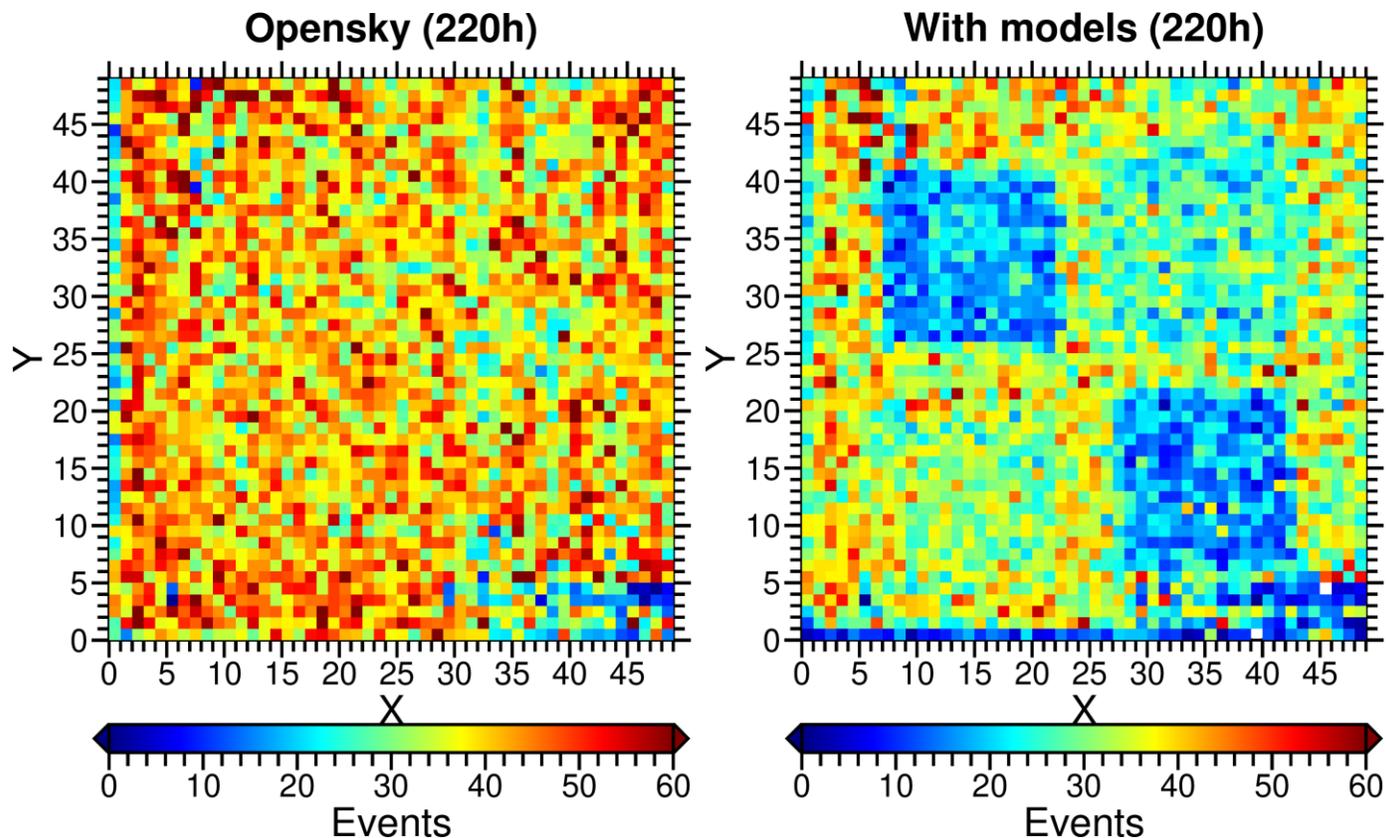
筛选缪子事例



事例筛选:

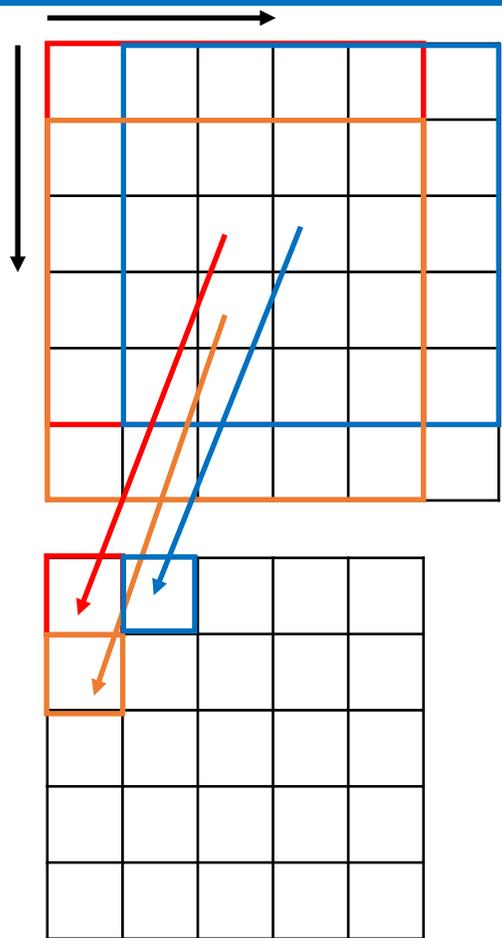
- 四层探测器时间符合
- 四层探测器直线拟合
- 挑选近垂直缪子事例

二维事例分布

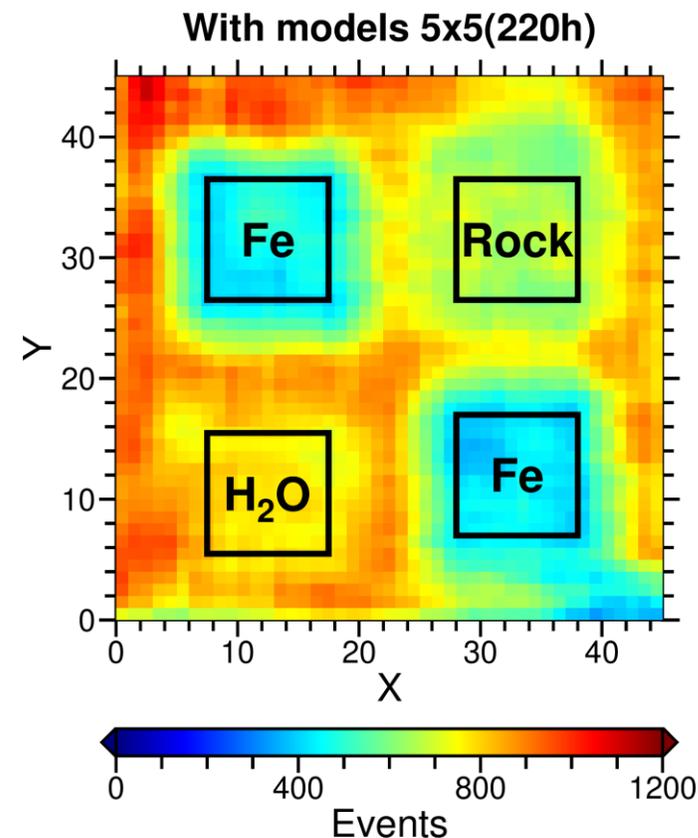
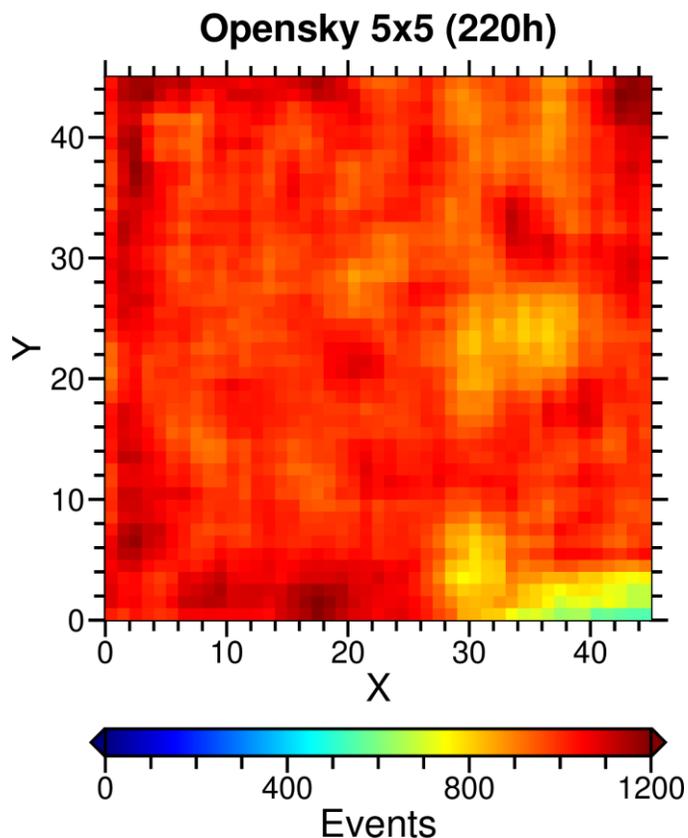


- 探测器单个像素经挑选后事例数较少，对精确还原密度产生影响

盒滤波处理



盒滤波处理后的二维缪子事例分布



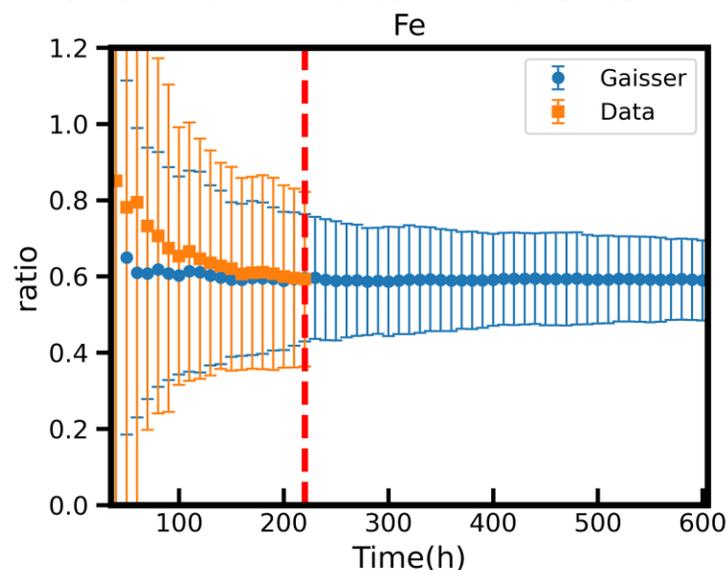
- 利用 5×5 卷积核处理探测器像素中的事例
- 通过牺牲部分空间分辨率减小统计误差

- 考虑到缪子的散射影响，选取黑框中的像素用于密度还原

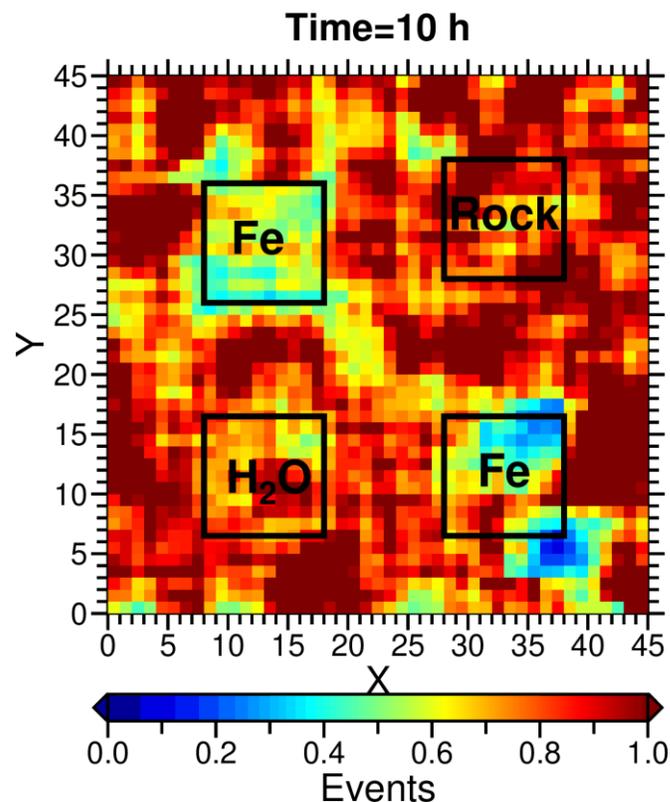
探测精度随探测时间的变化

$$ratio = \frac{N_{with\ model}}{N_{Opensky}}$$

随探测时长变化的缪子存活率



随时间变化的各物质缪子存活率



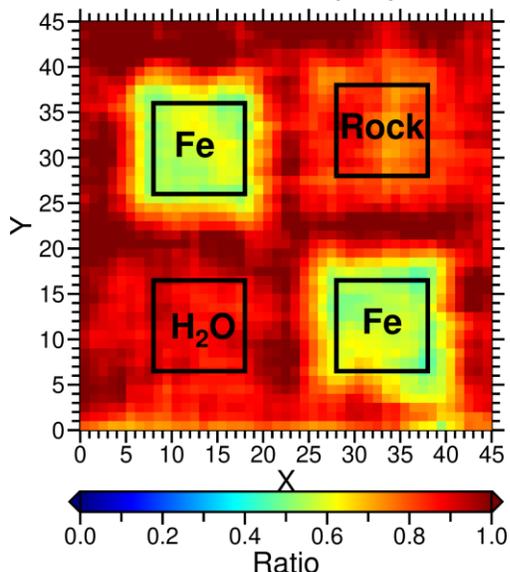
基于穿过物质后的缪子存活率对物质的密度进行还原

- 依据有无物质的探测结果得到缪子穿过物质后的存活率
- 随探测时间的增加，探测到穿过各物质的缪子存活率误差逐渐减小
- 模拟结果显示进行超过200 h的探测后结果趋于稳定

密度还原

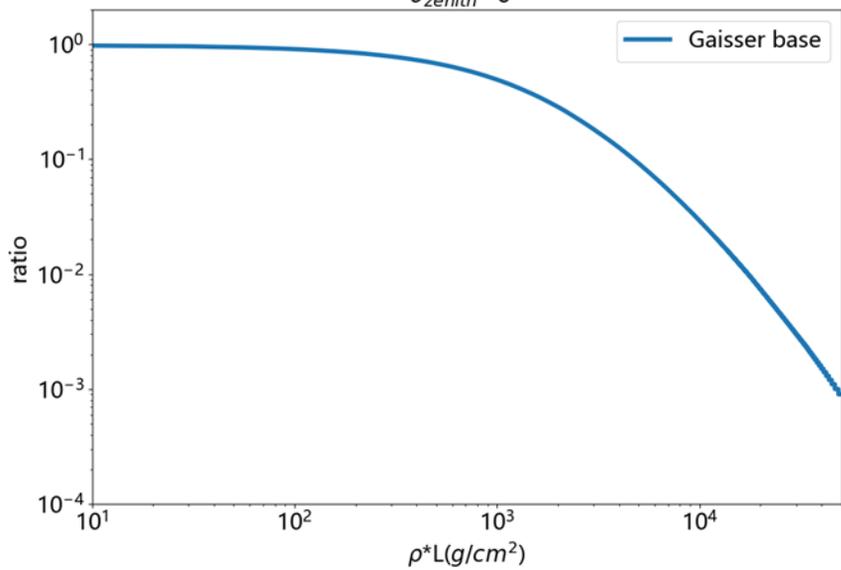
二维缪子存活率分布

Time=220h (5x5)



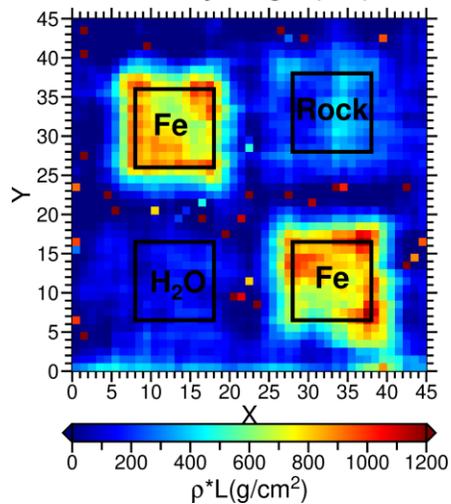
存活率与密度长度的关系

$\theta_{zenith}=0^\circ$



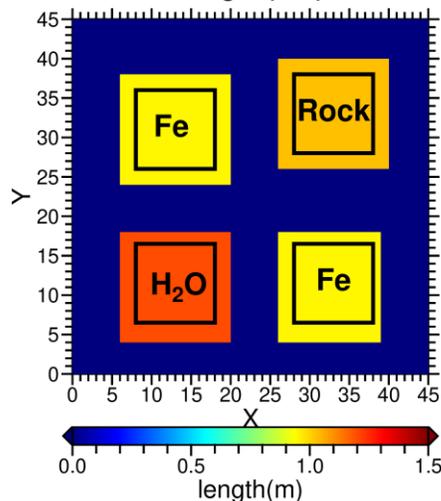
二维密度长度分布

Density Length (5x5)



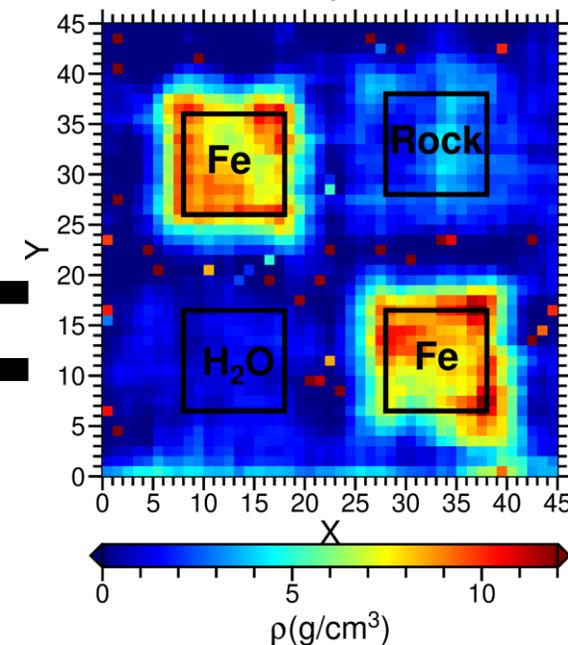
已知的物质厚度

Length (5x5)

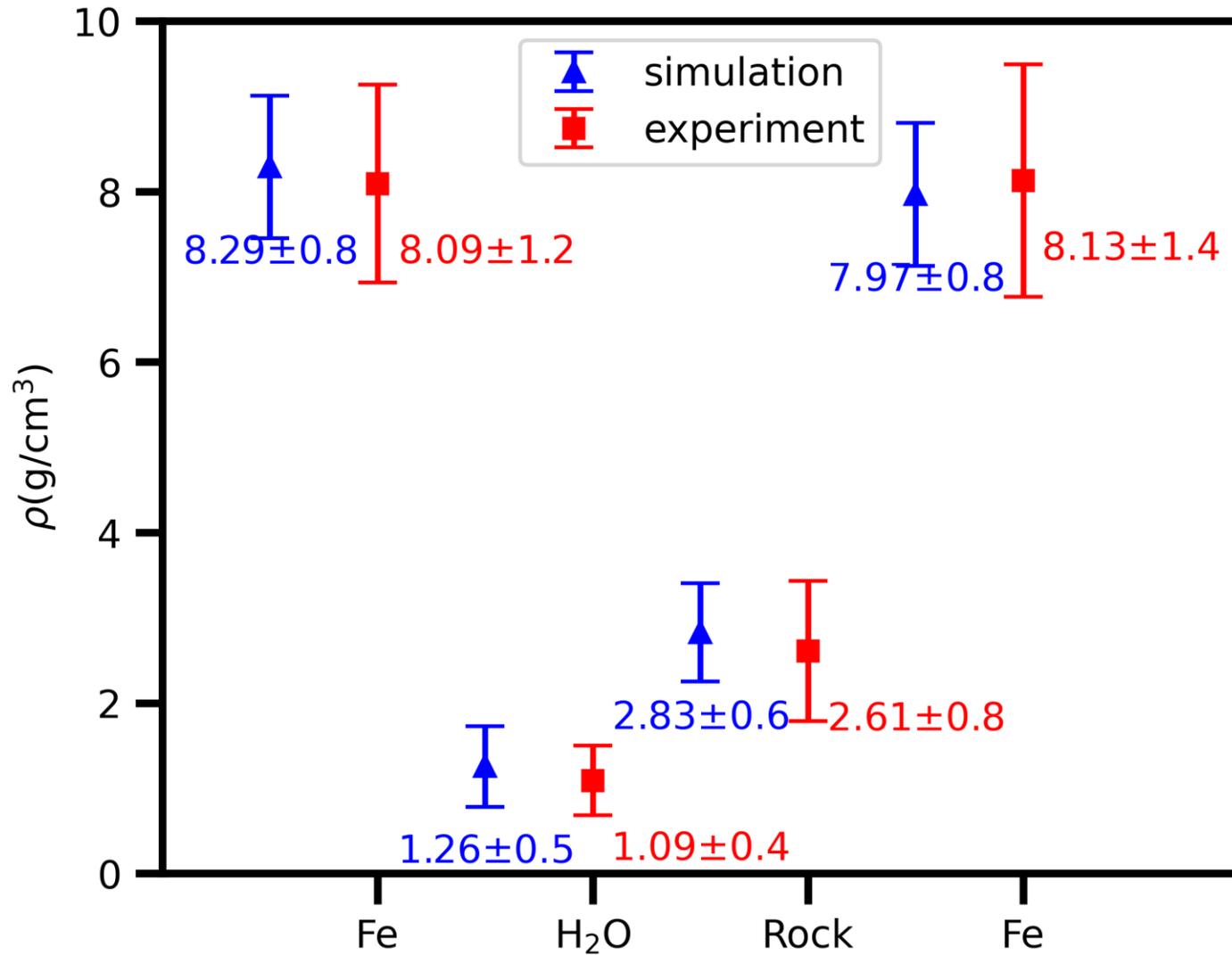


二维密度分布

Density (5x5)



密度还原结果



- 利用缪子透射成像对物质密度进行了精确测量，测量误差在2.5~9%之间

目录

1

研究简介

2

精确密度测量

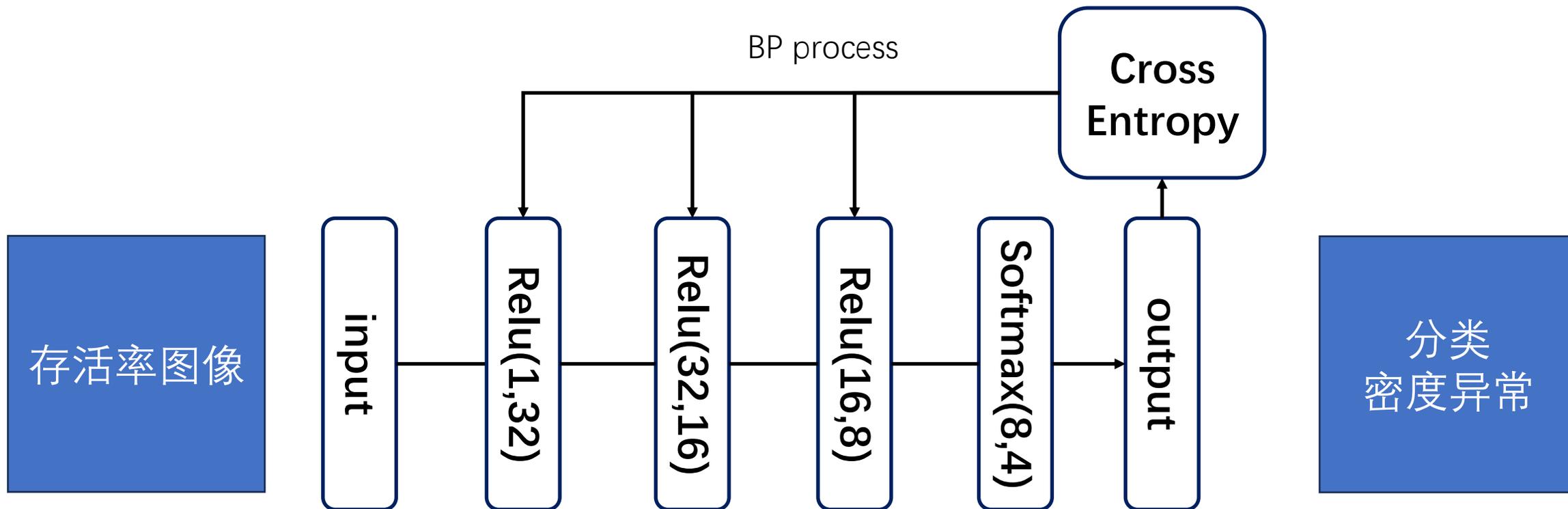
3

机器学习-异常分类

4

总结

神经网络结构



- 透射成像对密度的精确测量需要较长的探测时间
- 实际的工程应用中对密度的精确数值并不敏感，更关注物质分类
- 尝试通过输入图像特征，实现对图像中不同物质种类的分类

20h 实验

220h 实验

Fe

Water

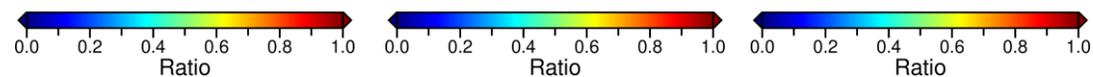
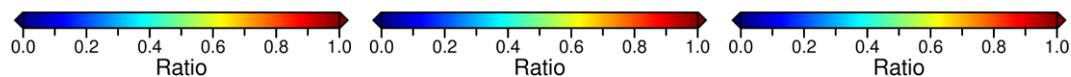
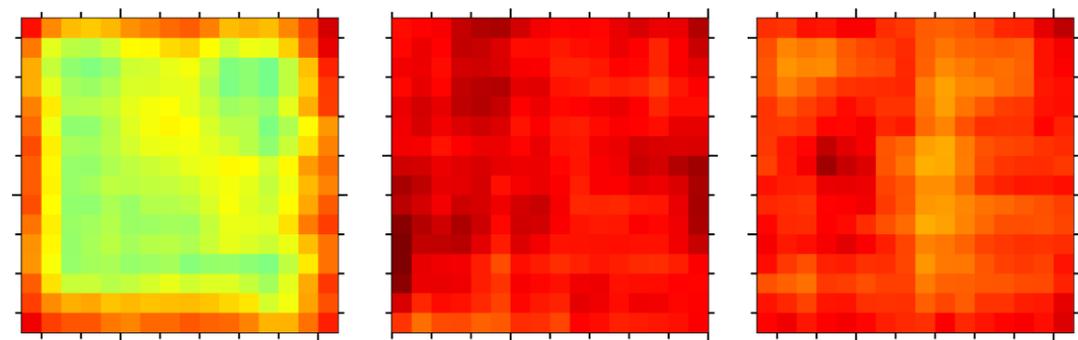
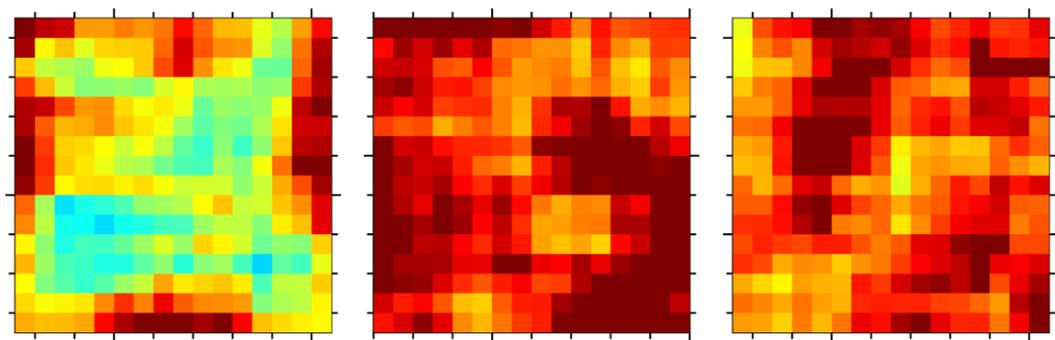
Rock

Fe

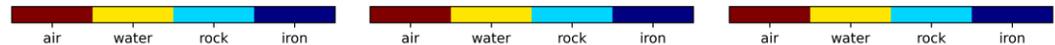
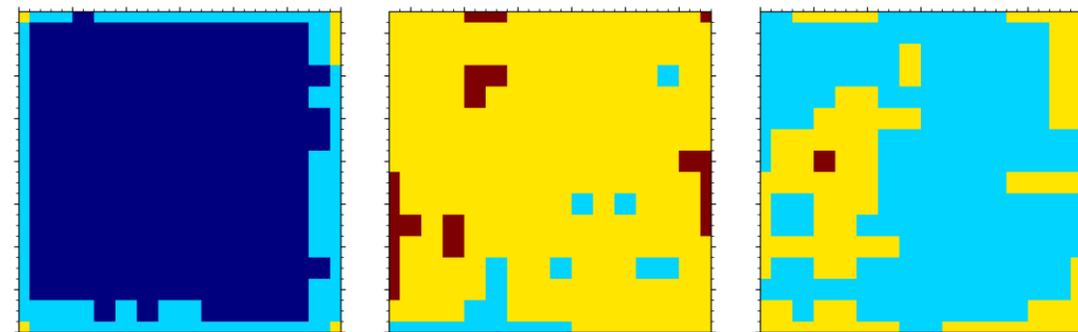
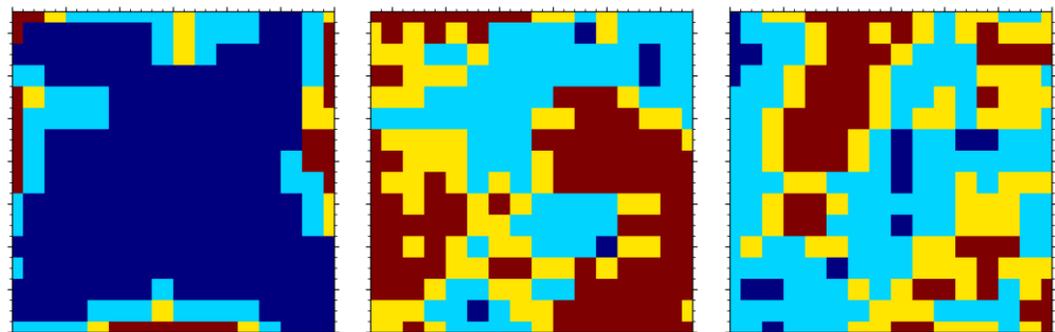
Water

Rock

特征图像



分类结果



训练模型可以快速分辨高密度物质，但对低密度物质的分辨仍需要更长的探测时间。

目录

1

研究简介

2

精确密度测量

3

机器学习-异常分类

4

总结

总结

- 研究了缪子透射成像技术对物质密度精确测量的可行性，在进行较长时间的观测并对探测缪子事例进行处理后获得了较为精确的结果；
- 利用机器学习的方法尝试基于缪子存活率对不同物质进行分类，对高密度物质能实现快速的识别，对密度物质仍需要更高的探测时间；
- 下一步，尝试对机器学习的方法进行更多的研究，加入更多的学习特征。