

多用途时间投影室与中子共振成像研究进展 MTPC & WNRI

汇报人：易晗

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

第十届CSNS反角白光中子实验装置用户研讨会

2026年7月15日@湖南衡阳·南华大学

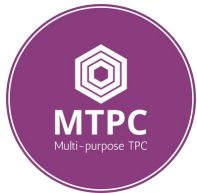


WNRI



报告内容

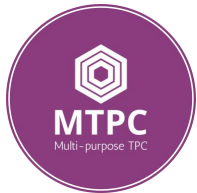
- MTPC研究进展
- WNRI研究进展
- 研究规划



报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

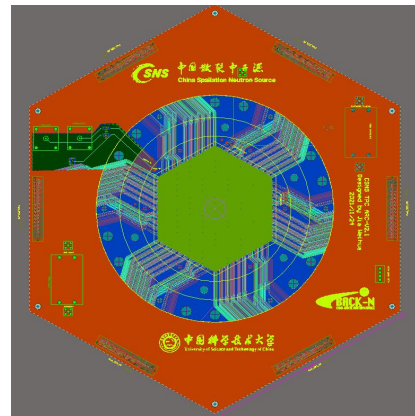
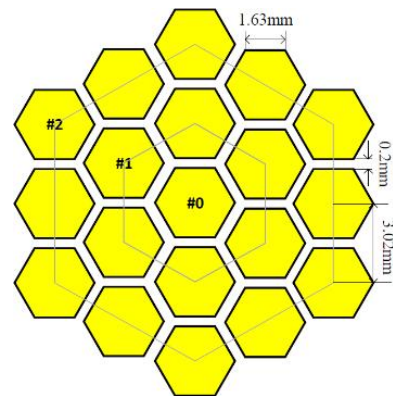
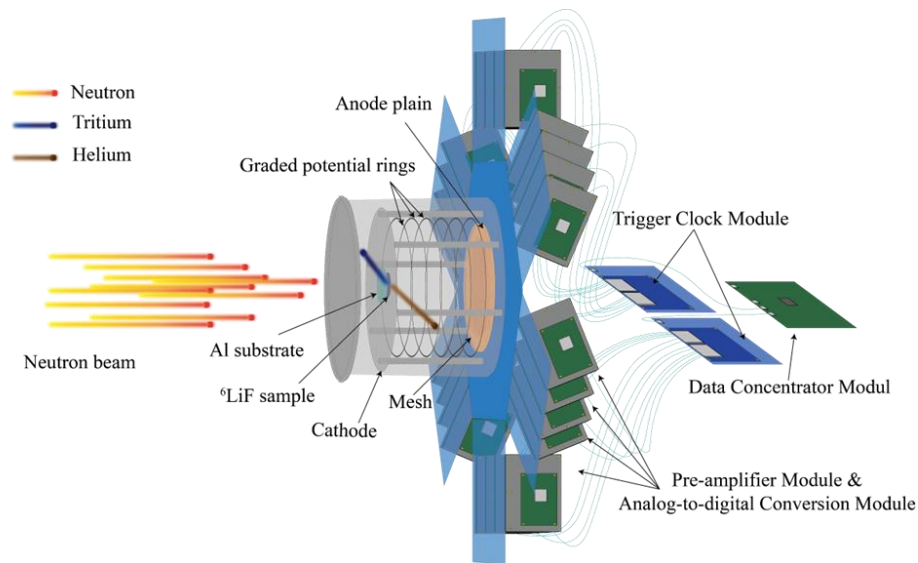


报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

探测器结构

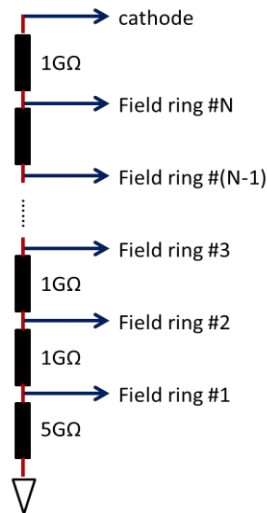
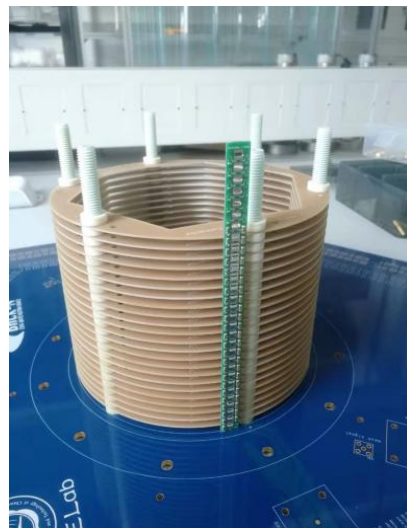
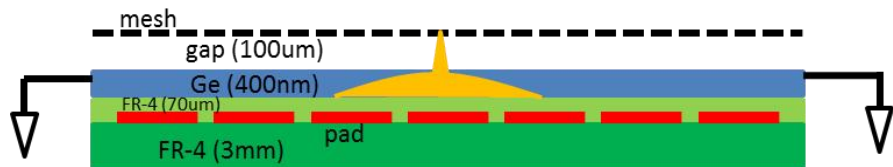


- 场笼结构为圆柱体，兼容单端双端读出模式,单端模式漂移区距离可调，适应不同实验需求
- 读出阵列采用六边形密堆结构,1519个阳极pad，每个pad边长64mil，阳极区边长约68mm

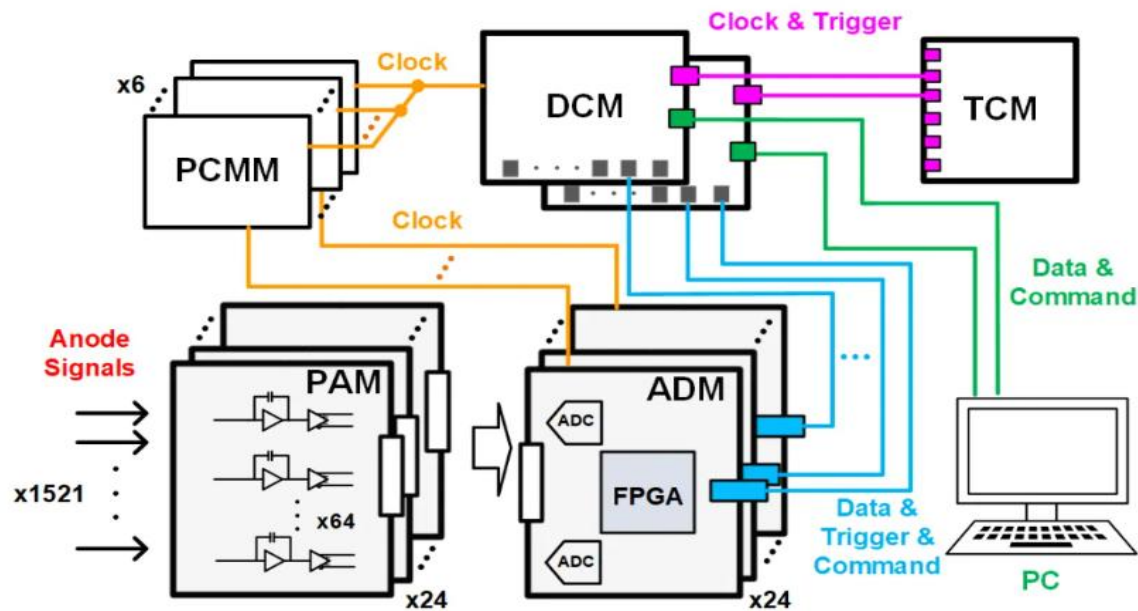
- Weihua Jia, You Lv, Zhiyong Zhang et al. Gap uniformity study of a resistive Micromegas for the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) at Back-n white neutron source. NIMA, 1039, 2022.
- Yang Li, Han Yi et al., Performance study of the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) using a four-component alpha source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1060 (2024) 169045.

探测器结构

- 热压接技术制作Micromegas增益结构@USTC,阳极板表面镀400nm高阻锗层, 增加高压下的稳定性
- mesh参数: 不锈钢丝直径24 μm 、厚度25 μm 、LPI-325,透过率55%、张力30N
- 增益区厚度100 μm , 支撑柱直径1mm, 间隔10mm
- 均压环采用PCB制作, 间隔5mm, 电阻值按照雪崩漂移场强比200配置, 对应最高电子透过率



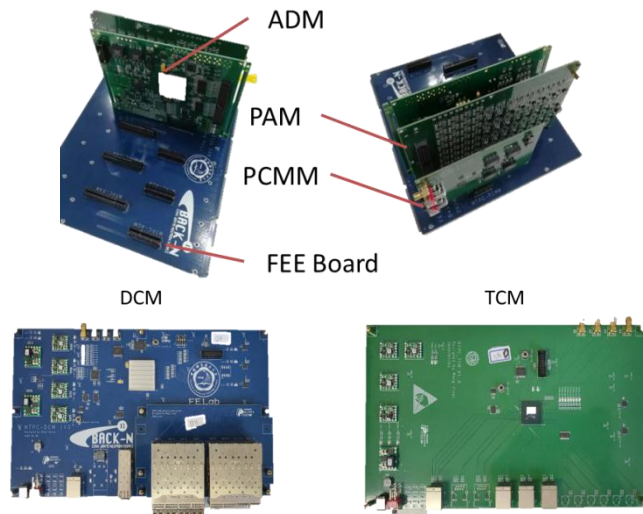
- J. Feng, Z. Zhang, J. Liu, B. Qi, A. Wang, M. Shao, Y. Zhou, A thermal bonding method for manufacturing micromegas detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 989 (2021) 164958.
- J. Feng, Z. Zhang, J. Liu, M. Shao, Y. Zhou, A novel resistive anode using a germanium film for micromegas detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1031 (2022) 166595.



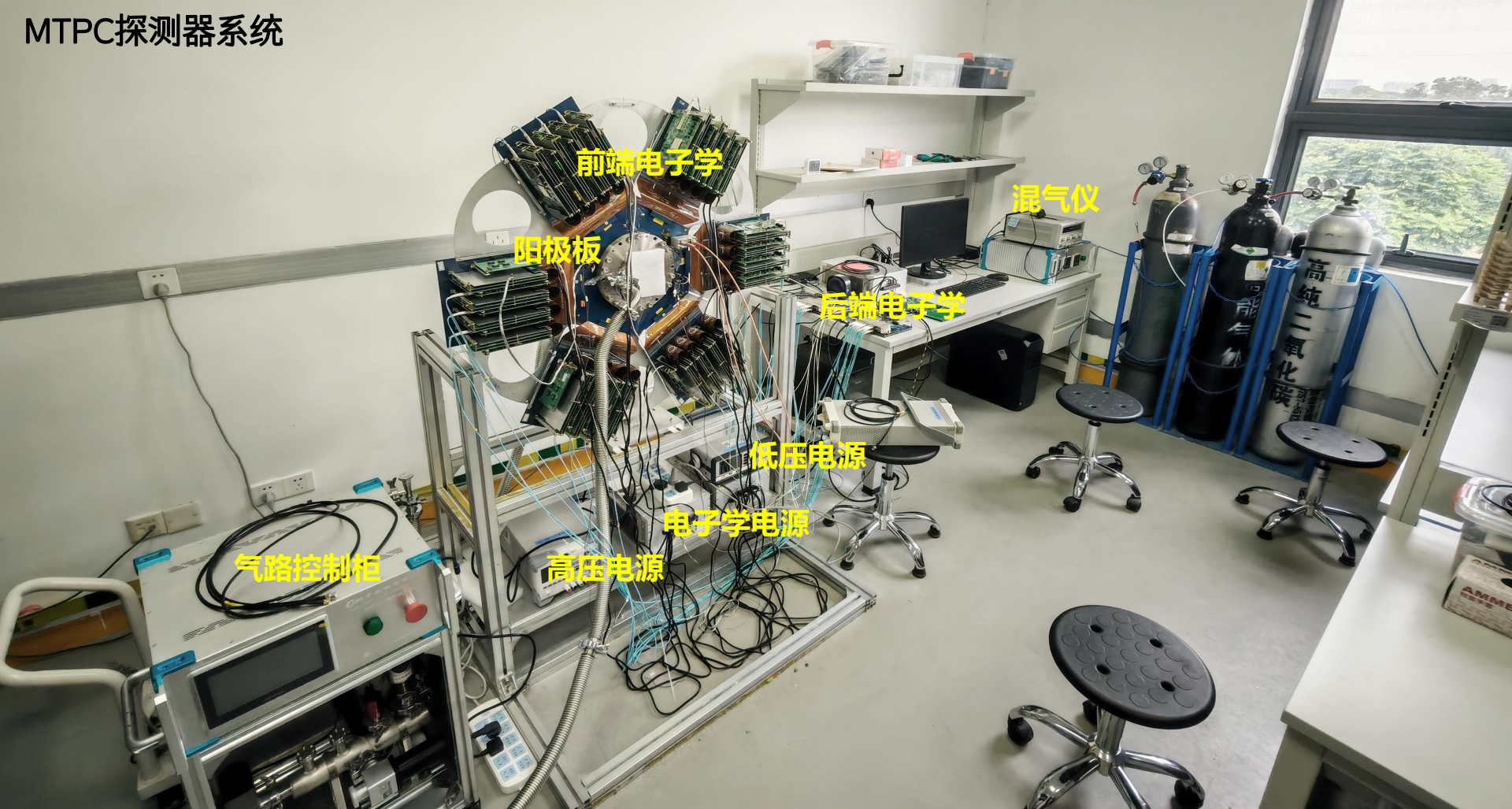
● 电子学系统主要参数：

- 共1536通道（MTPC使用1521通道）
- 波形采样频率：40MHz
- 触发采样窗宽度：1024采样点
- ADC位数：12bit

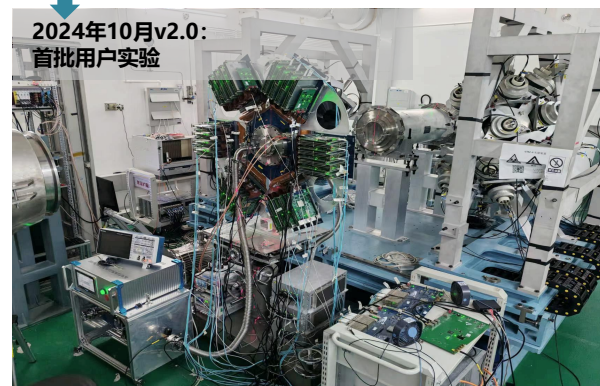
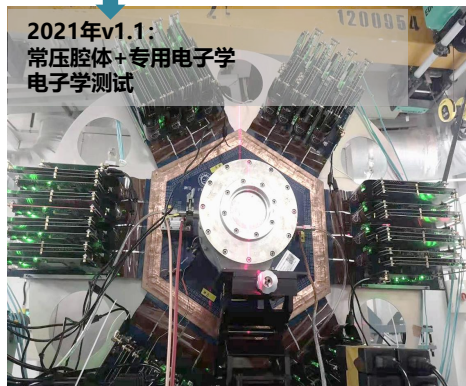
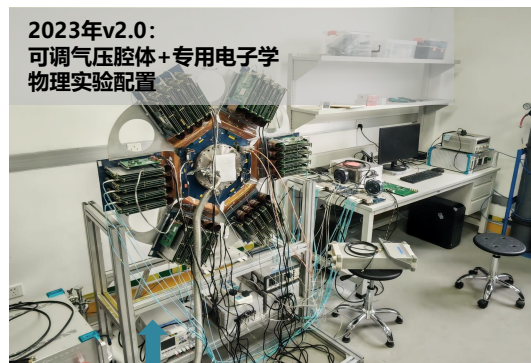
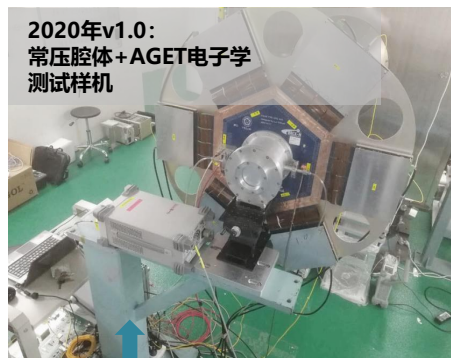
■ Z. Chen et al, Readout system for a prototype multi-purpose time projection chamber at CSNS Back-n, 2022 JINST 17 P05032



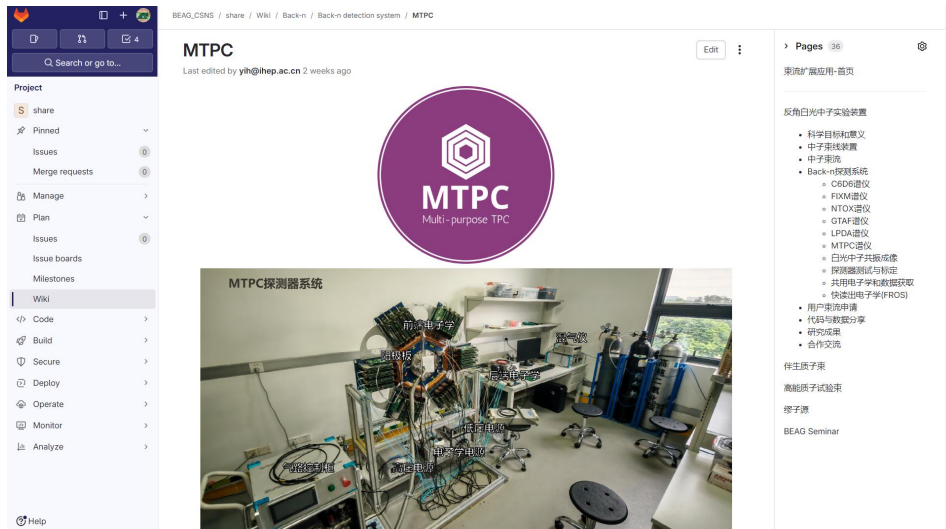
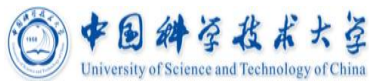
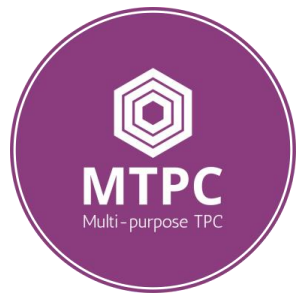
MTPC探测器系统

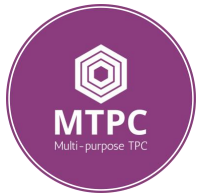


项目概况



MTPC研究团队





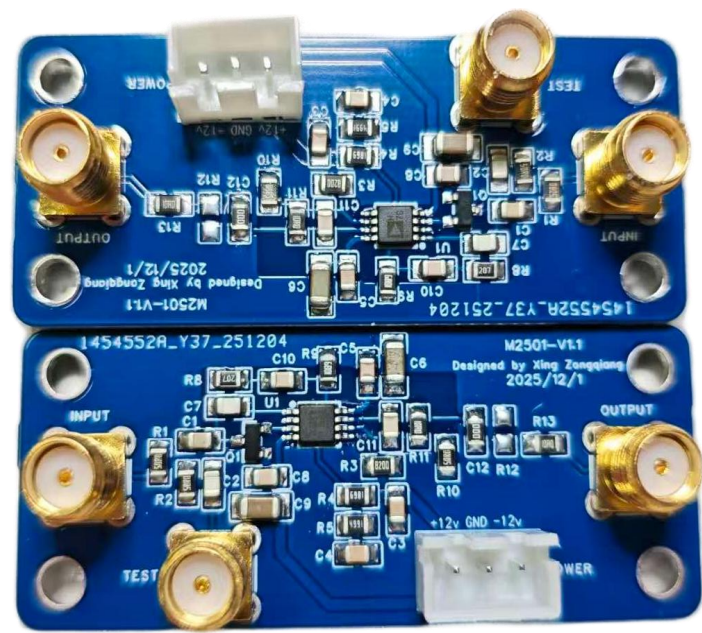
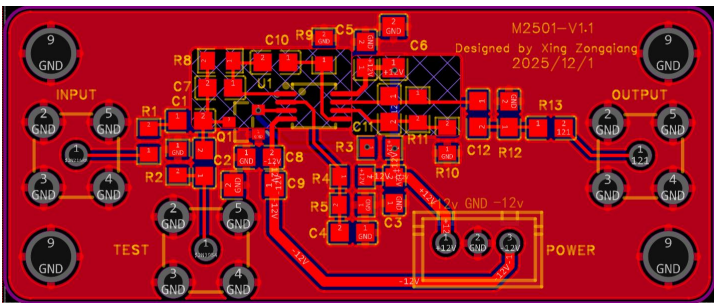
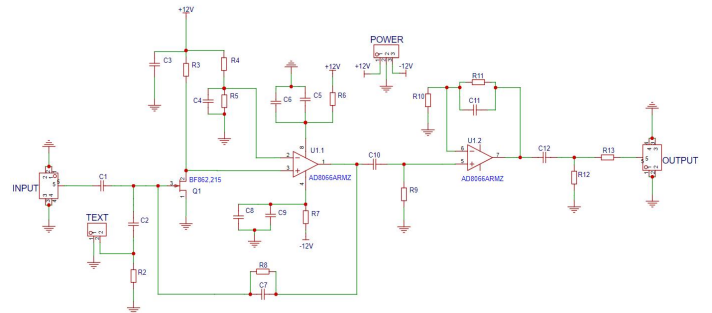
报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

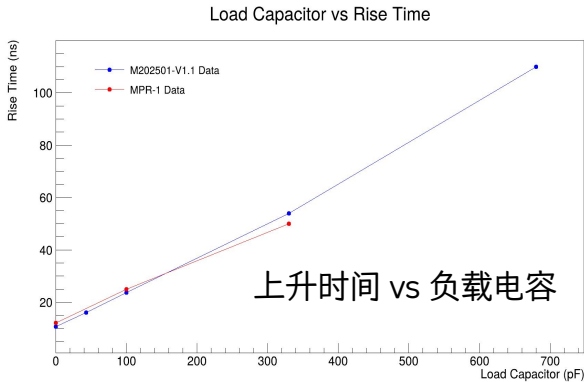
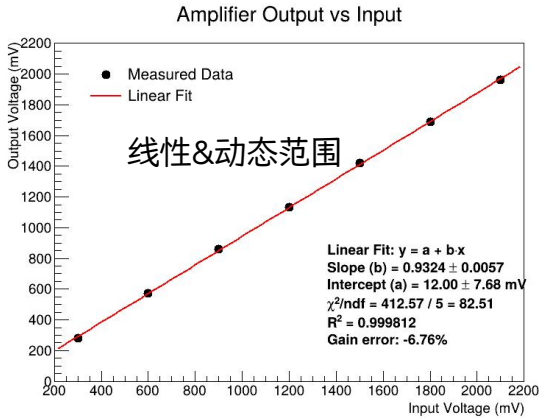
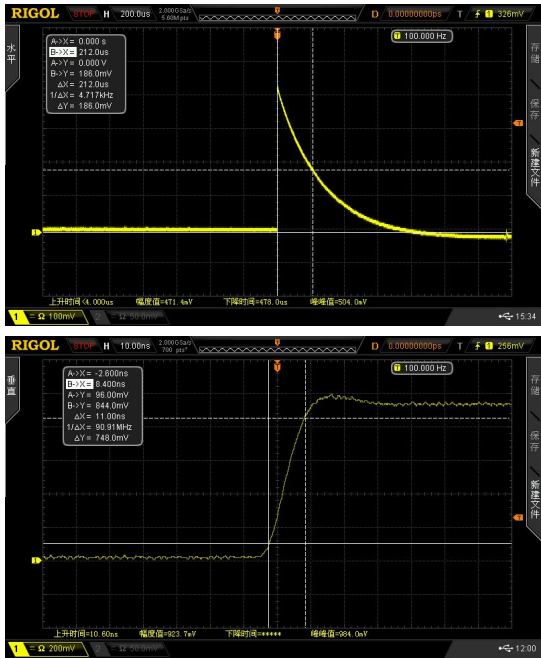
阴极前放升级

- 阴极前放功能：阴极信号预放大、信号反相
- 前期阴极前放：分立场效应管与三极管放大电路，增益低信噪比低
- 升级前放：提升信噪比、提升阴极定时精度



阴极前放升级

- 前放性能参数：
- 积分电容/积分时间：1pF/100μs
- 上升时间~10ns、噪声水平~0.6mV

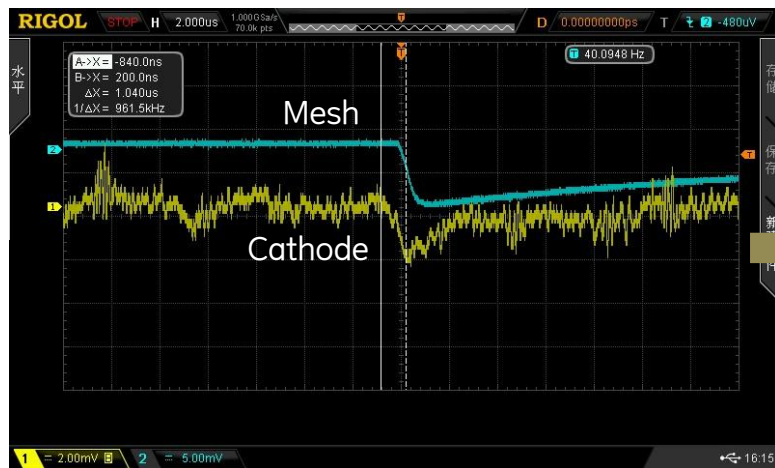


负载电容 (pF)	0	43	100	330	680
噪声水平 (mV)	0.6	0.7	0.8	1.3	1.5

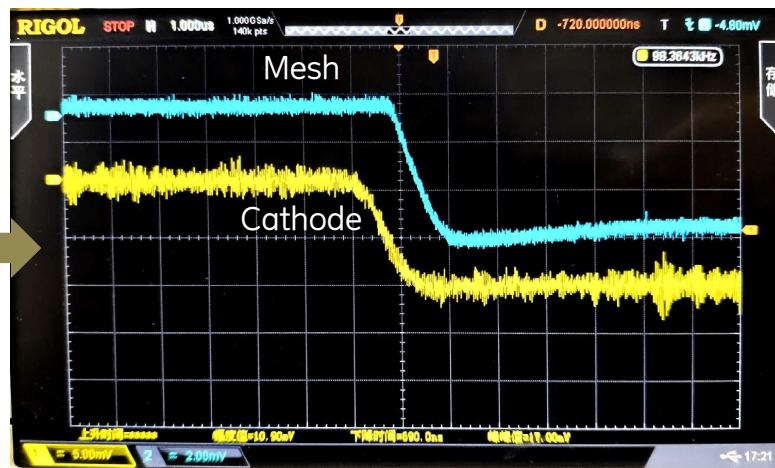
阴极前放升级

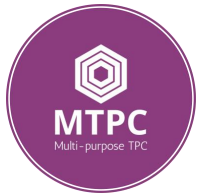
- 探测器测试波形
- 阴极基线串扰噪声降低
- 可提高阴极信号定时精度

升级前



升级后





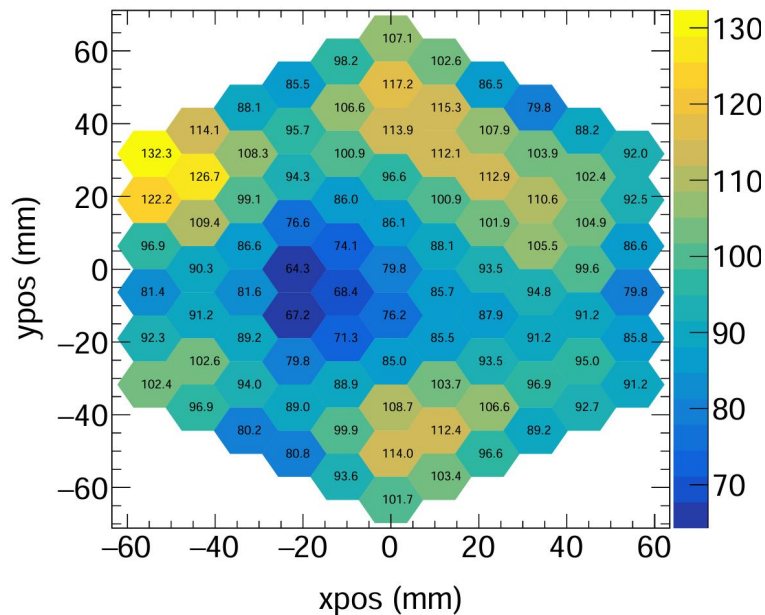
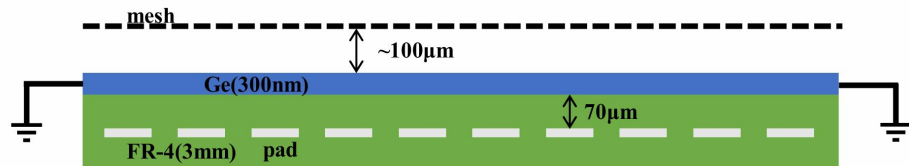
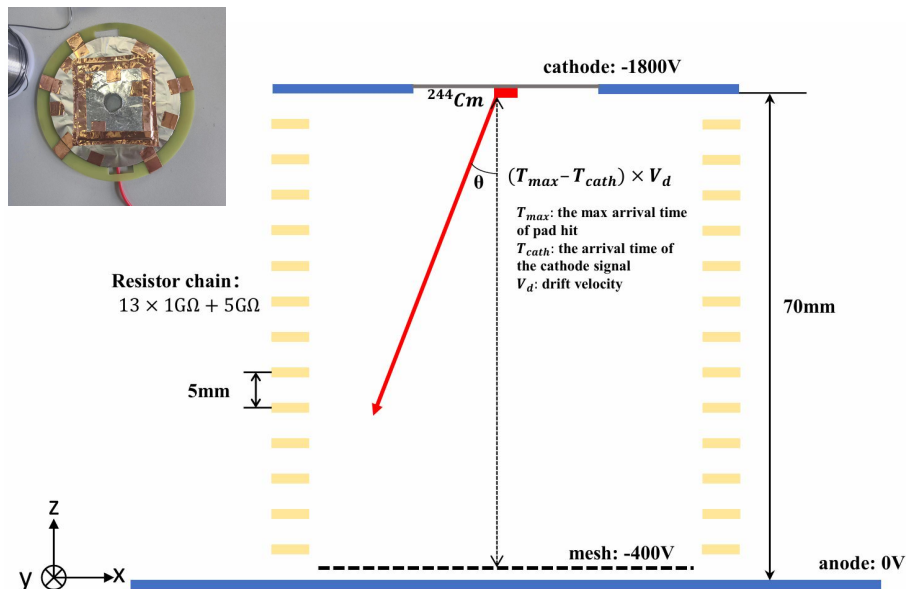
报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

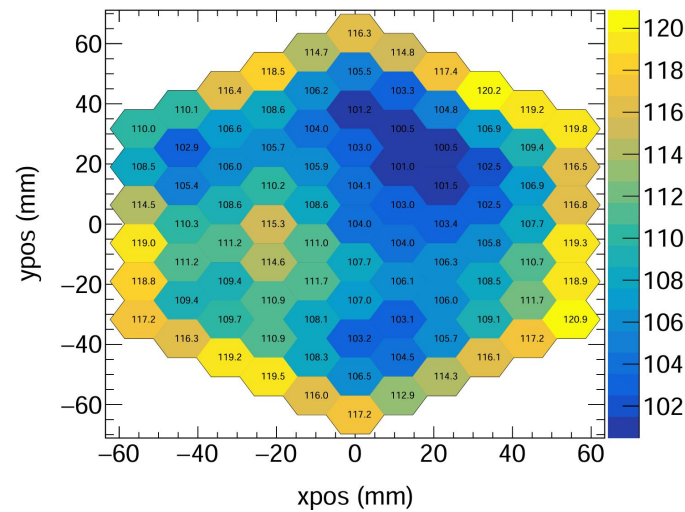
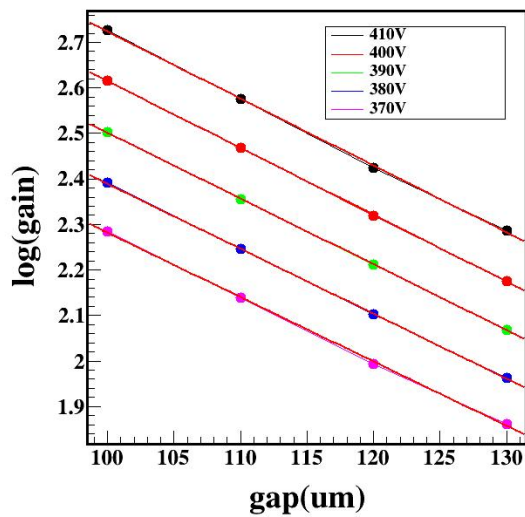
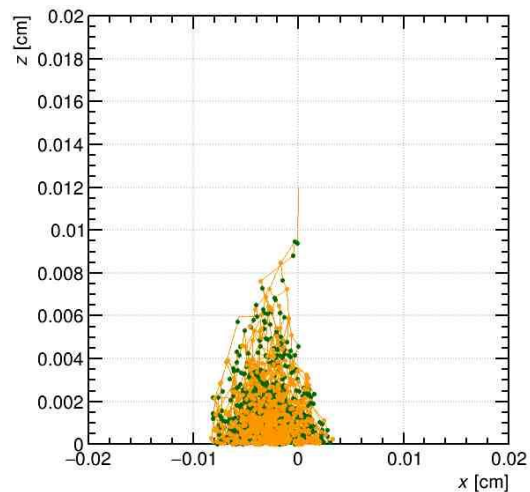
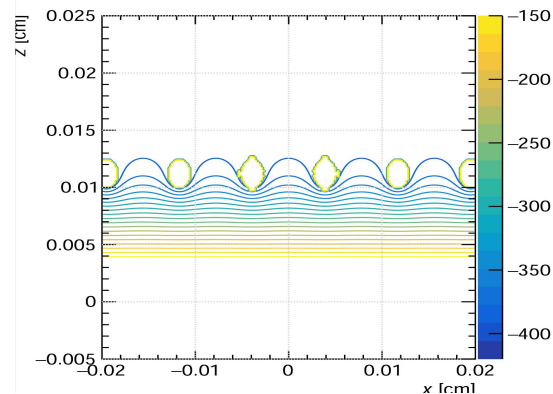
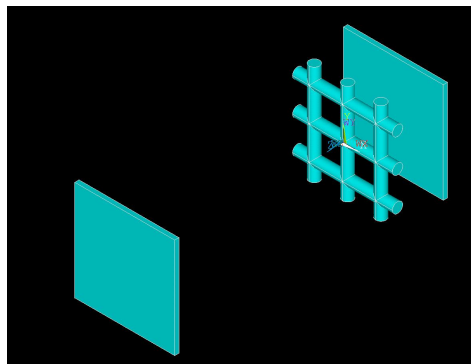
阳极板增益刻度

- ^{244}Cm 放射源, α 粒子能量5.8MeV
- 工作气体75%Ar+25%CH₄, 气压0.64bar, α 射程覆盖阳极板
- 雪崩区电压范围360V-410V
- 整个阳极板气隙不均导致增益不均匀



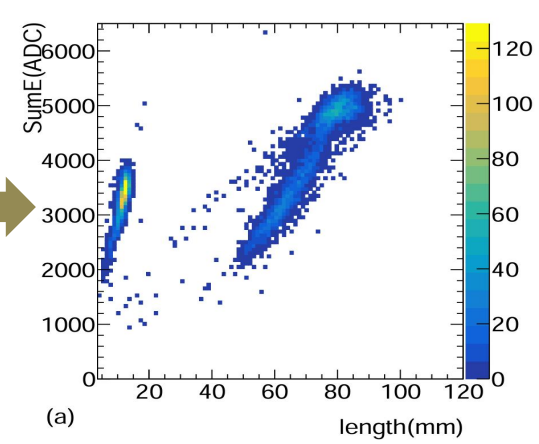
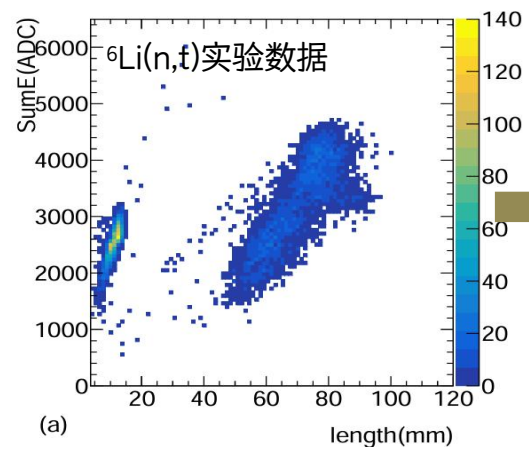
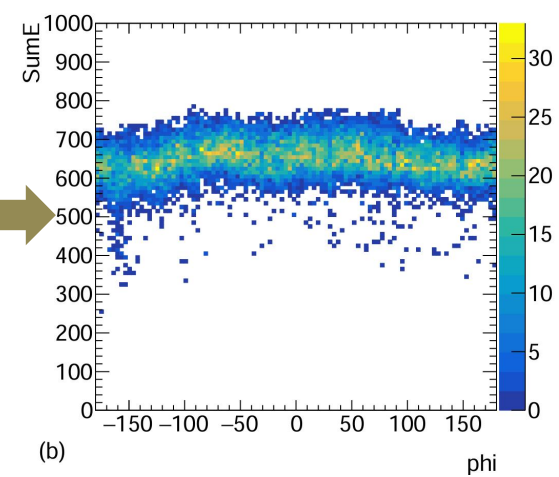
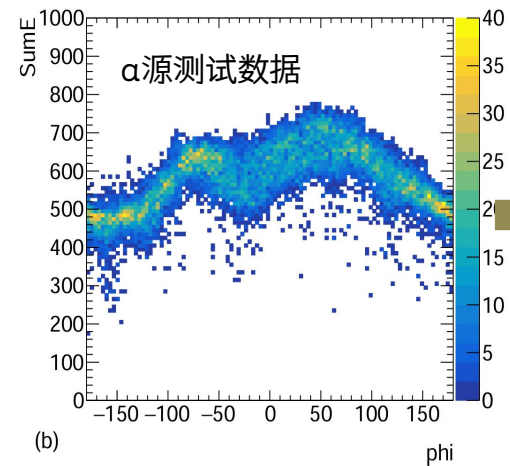
阳极板增益刻度

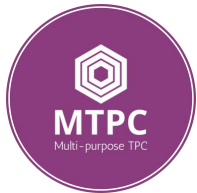
- Garfield++电子雪崩增益模拟
- Ansys仿真雪崩电场分布
- 模拟电子雪崩过程
- 得到雪崩增益随电压与气隙关系
- 求得阳极区雪崩气隙分布
- 根据气隙分布得到实验条件增益分布



阳极板增益刻度

- 采用不同实验数据进行刻度验证
- α 源测试数据、 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 实验数据
- 通过气隙刻度与增益修正可有效提高能量分辨





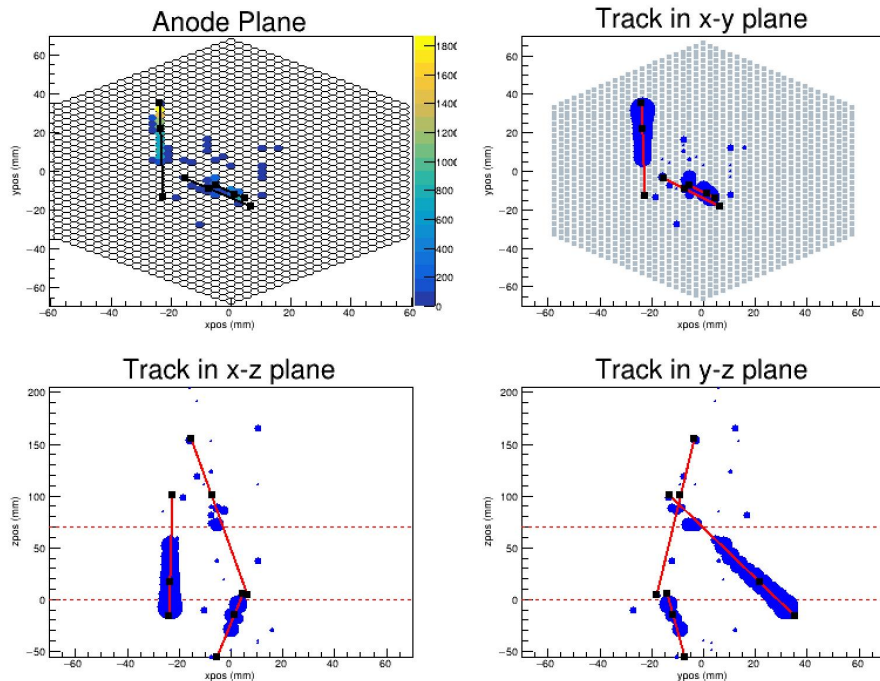
报告内容

● MTPC研究进展

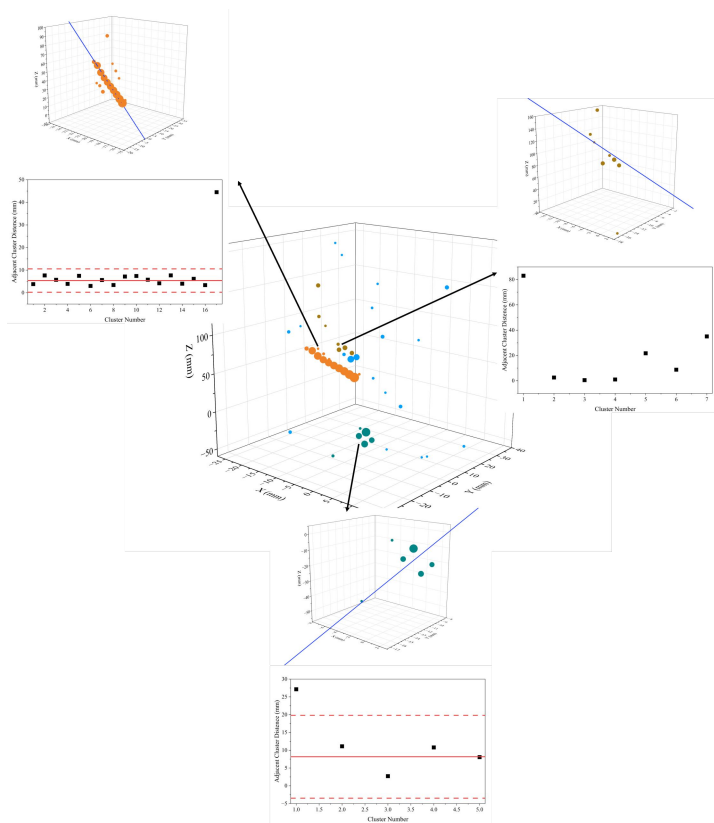
- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

径迹重建方法

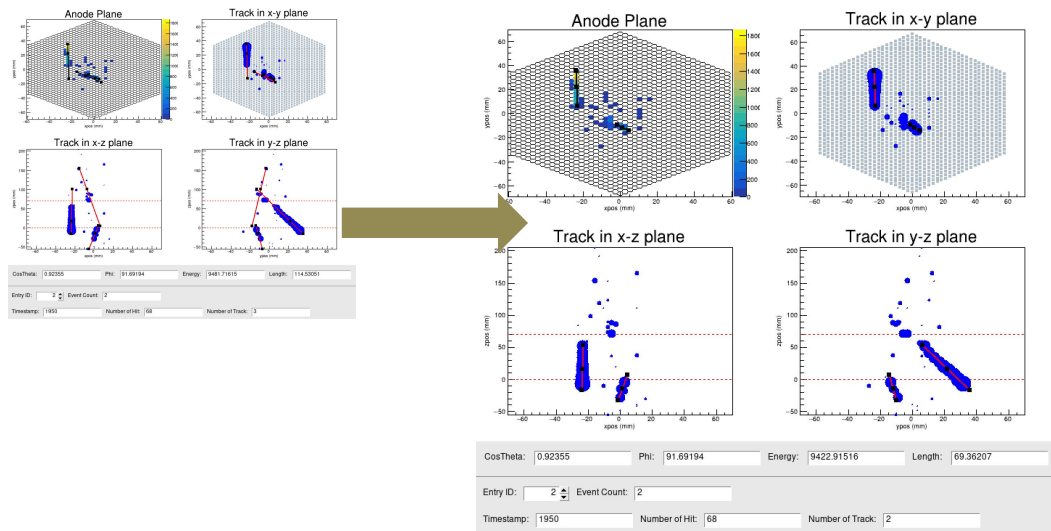
- 高能区中子通量高且有 γ flash影响，hit点数较多，
- 前期的径迹查找算法，未判断hit点的连续性
- 无关hit点误重建为同一径迹，造成高能区事例重建的误差



径迹重建方法：Hough变换+孤立点剔除

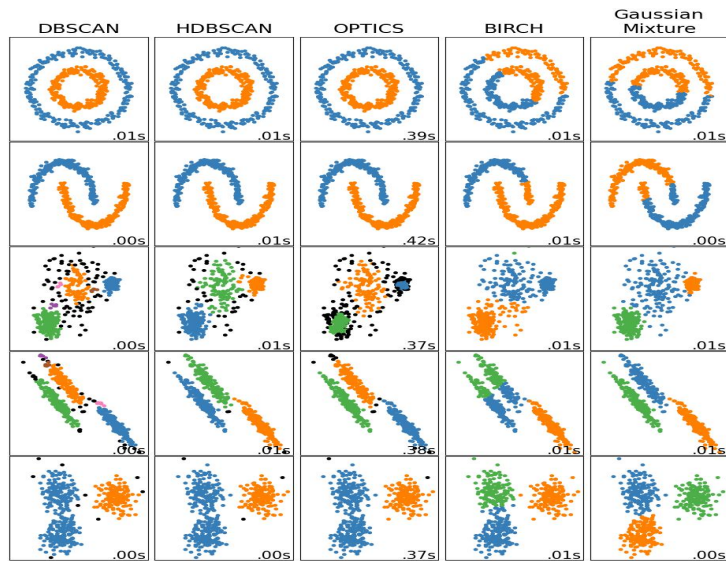


- 通过Hough变换选中可能的hit点
- hit点按映射到直线z轴位置排序
- 判断相邻pad的距离是否存在统计偏离
- 提高径迹重建准确率

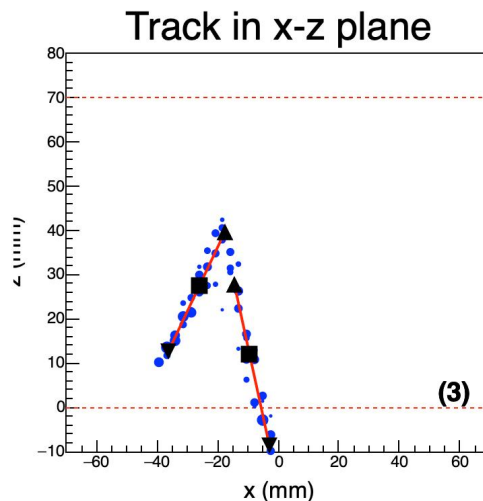


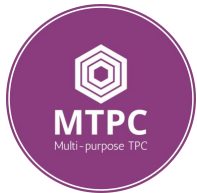
径迹重建方法：聚类算法+直线查找

- DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)
 - ▣ 基于密度的聚类，根据密度对点进行分组，识别任意形状的簇并隔离噪声点
 - ▣ 重新随机选取Nums个点，重复第1~2步的操作，直到找到最多的内点



- RANSAC (Random Sample Consensus)
 - ▣ 假定模型（如直线方程），并随机抽取Nums个（以2个为例）样本点，对模型进行拟合
 - ▣ 假设容差范围为 σ ，找出距离拟合曲线容差范围内的点，并统计点的个数
 - ▣ 重新随机选取Nums个点，重复第1~2步的操作，直到找到最多的内点





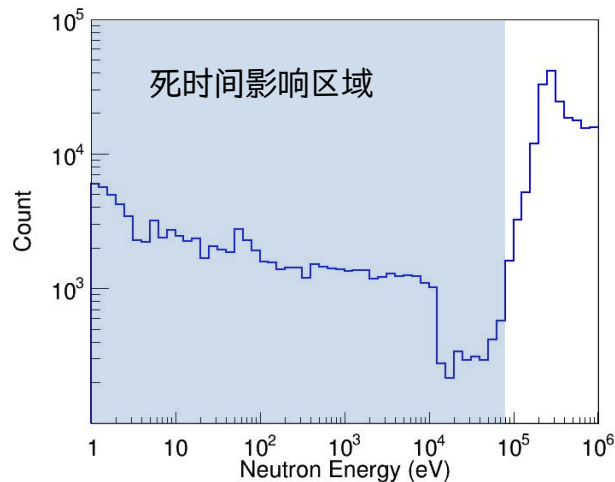
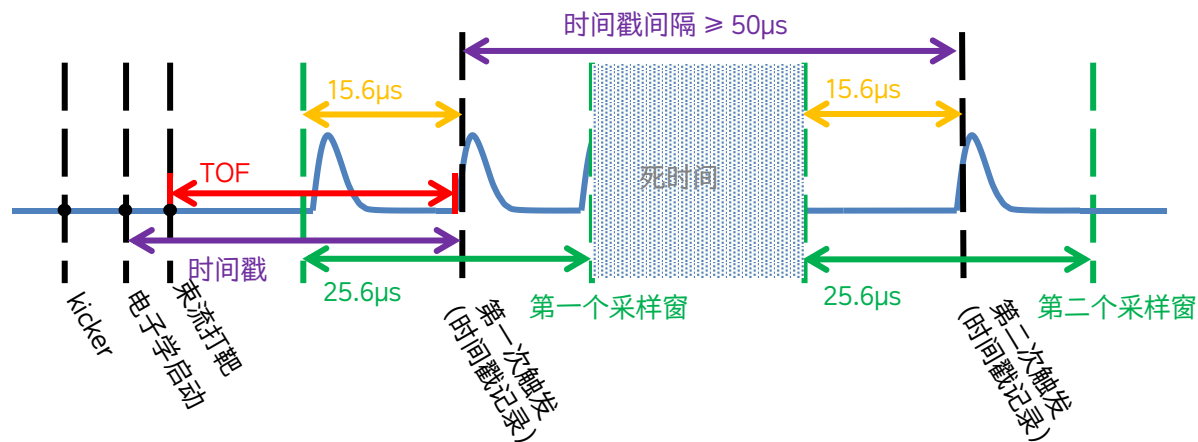
报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

死时间修正算法

- 电子学连续触发的最小时间间隔带来了数据获取的死时间
- 死时间导致了实验在低能区的计数损失



死时间修正算法

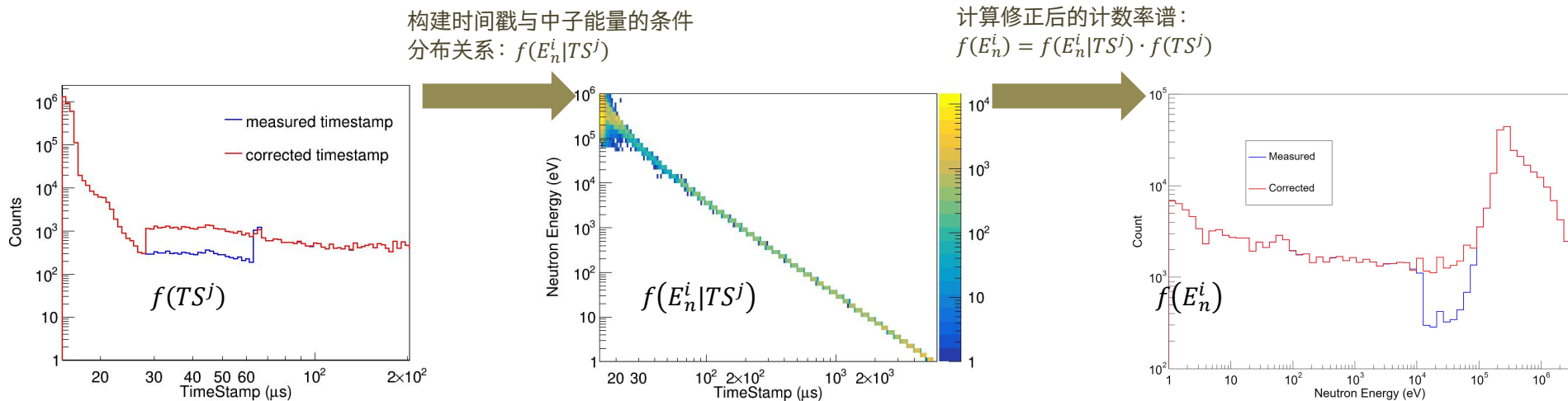
- 测量谱 $N_o[n]$ 和实际谱 $f(TS^j) = N_c[m]$ （时间戳谱）存在关系
- 通过 $N_o[n]$ 重建出 $N_c[m]$

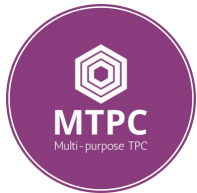
$$N_c[i] = \begin{cases} -\ln\left(1 - \frac{N_o[i]}{N_b - \sum_{j=1}^{i-1} N_o[j]}\right) & , 25\mu s < i < 60\mu s \\ -\ln\left(1 - \frac{N_o[i] - \frac{N_o[i-n_1]}{N_b} \sum_{j=i-n_2}^{i-1} (N_c[j] - N_o[j])}{N_b - \sum_{j=i-n_1}^{i-1} N_o[j]}\right) & , i > 60\mu s \end{cases}$$

参数	参数含义
N_b	束流总脉冲次数
$N_o[i]$	第 i 个 Bin 的测量计数
$N_c[i]$	第 i 个 Bin 的修正后总计数
n_1	死时间窗口远端 Bin
n_2	堆积窗口远端 Bin

死时间修正算法

- 通过中子能量和时间戳的关联性，将时间戳的修正 $f(TS^j)$ 转化成计数率谱的修正 $f(E_n^i)$
- 构建这一联系的关键在于二者的条件分布概率 $f(E_n^i|TS^j)$
- 修正得到 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 实验数据能谱





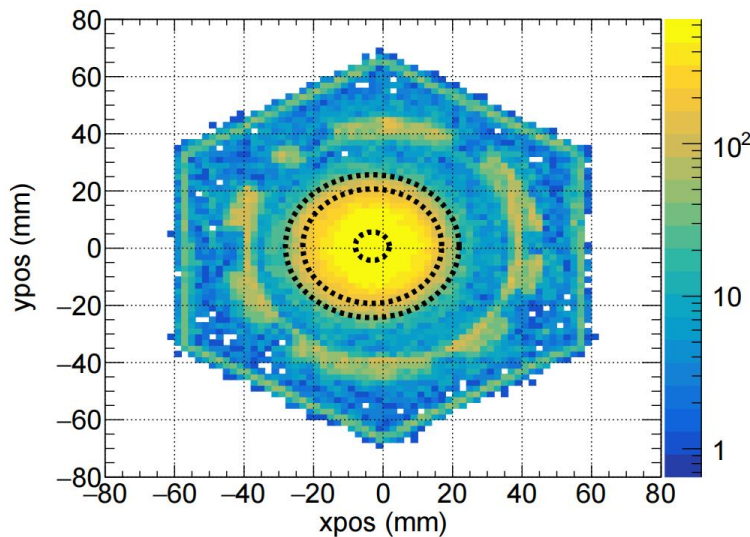
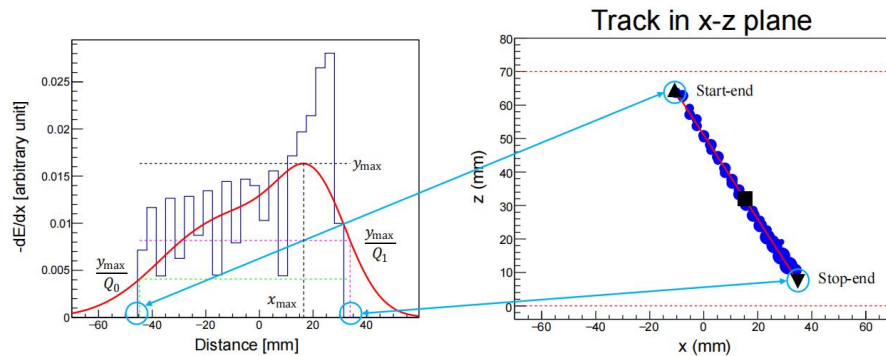
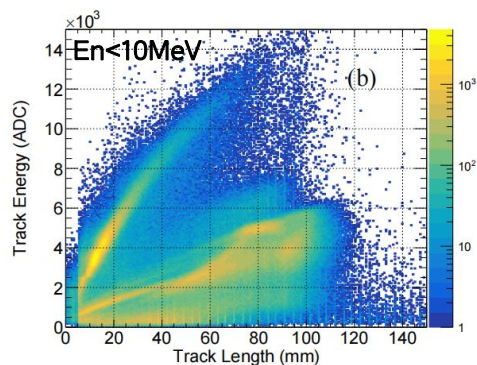
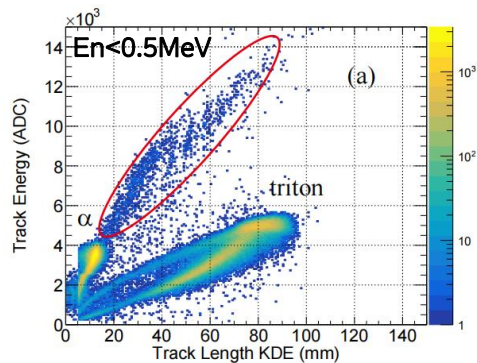
报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

中子束班分析

- ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应实验数据
- 动态调整端点参数，提高端点重建精度
- 选取低能区 α 事例重建束班参数



中子束斑分析

- 三种方法拟合束斑参数：
- 二维拟合、xy切片投影拟合、R方向拟合
- 三种方法束斑参数相互符合

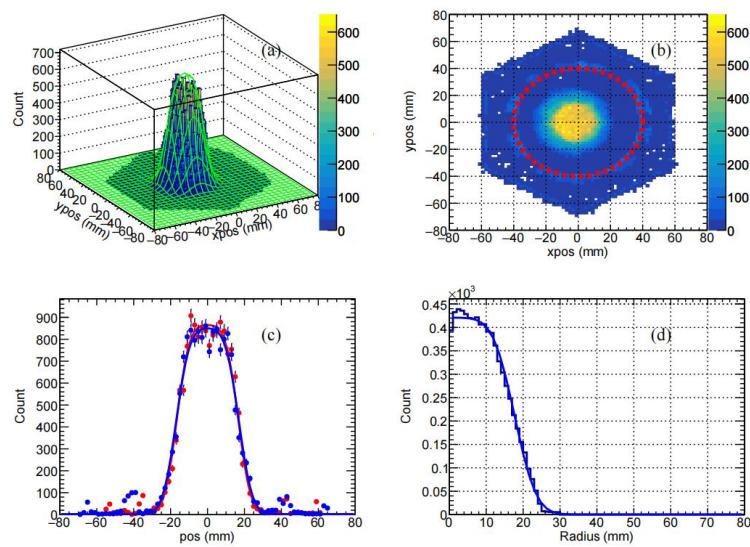
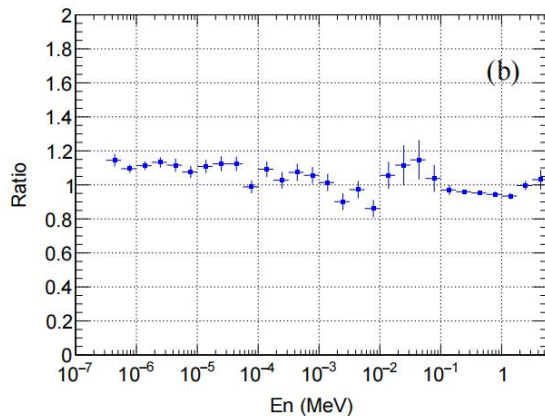
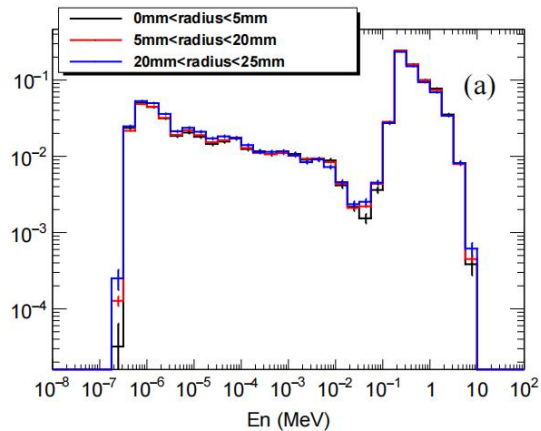
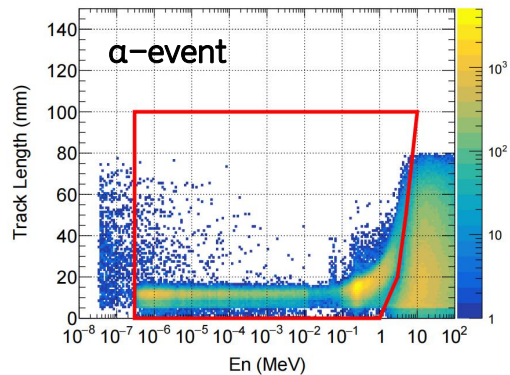
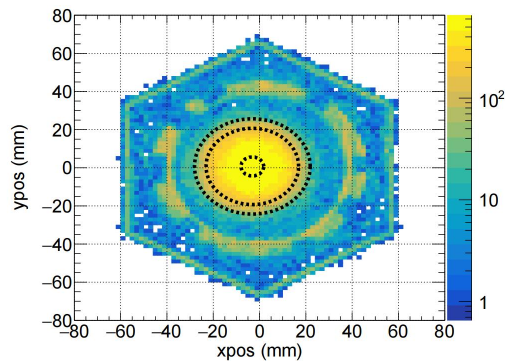


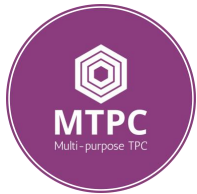
Table 4: The beam profile parameters of two-dimensional distribution, one-dimensional distributions and *r*-distribution.

Two-dimensional distribution	(x_0, y_0) (mm)	r_0 (mm)	σ (mm)	e	
	$(-3.10 \pm 0.03, 0.68 \pm 0.03)$	16.33 ± 0.06	5.86 ± 0.04	0.971 ± 0.003	
One-dimensional distributions	r_x (mm)	σ_x (mm)	r_y (mm)	σ_y (mm)	e
	16.67 ± 0.15	5.32 ± 0.12	16.98 ± 0.16	5.76 ± 0.13	0.981
<i>r</i> -distribution	r_0 (mm)	10% radius (mm)	σ (mm)		
	17.70 ± 0.14	23.68	4.66 ± 0.13		

中子束班分析

- 束班不同区域能谱分析
- 束核区域想较束晕区域偏能谱软





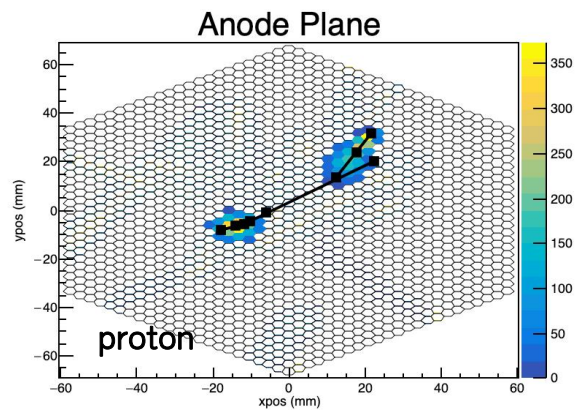
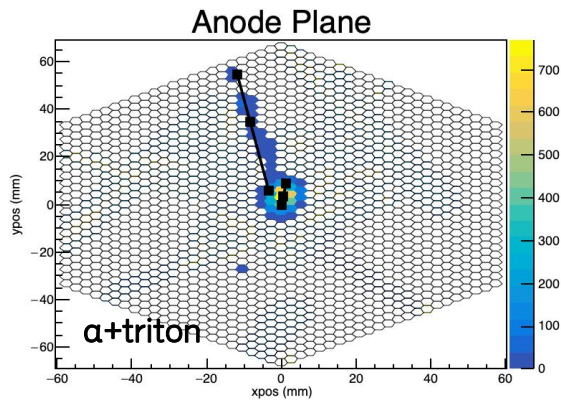
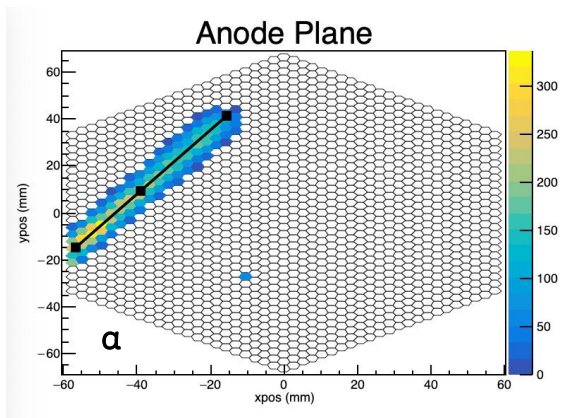
报告内容

● MTPC研究进展

- MTPC概况
- 阴极前放升级
- 阳极板增益刻度
- 径迹重建算法
- 死时间修正算法
- 中子束斑分析
- np散射截面测量

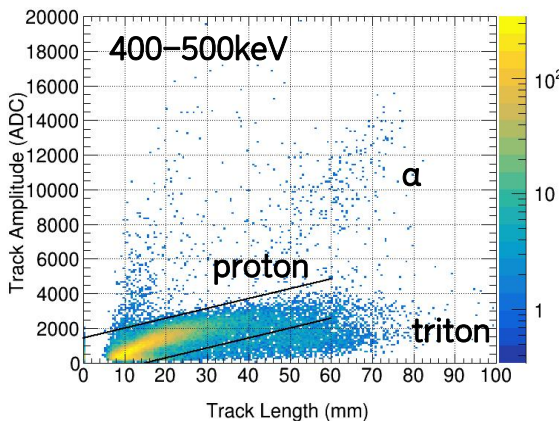
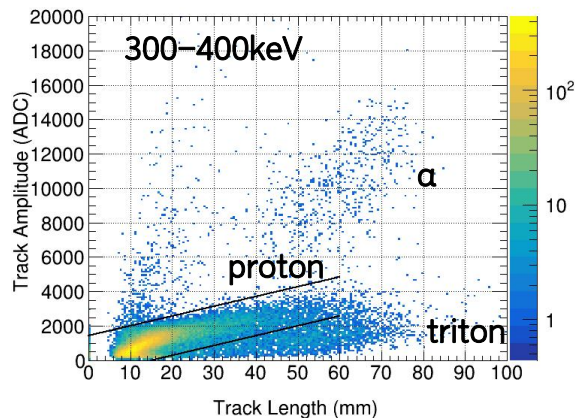
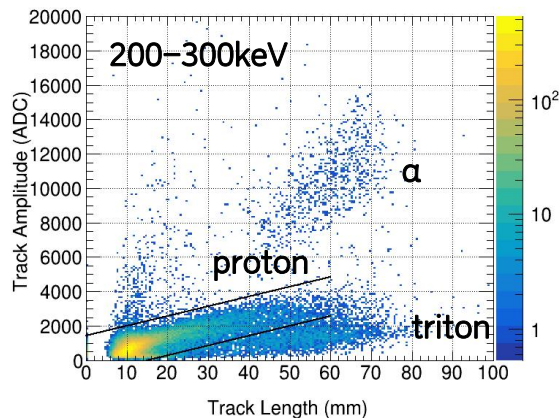
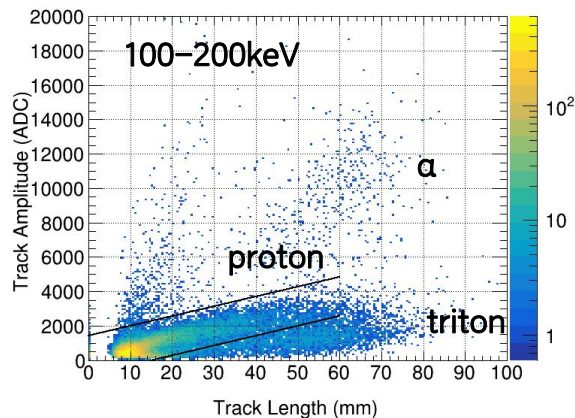
np散射截面测量

- DBSCAN聚类+RANSAC直线查找：筛选质子事例



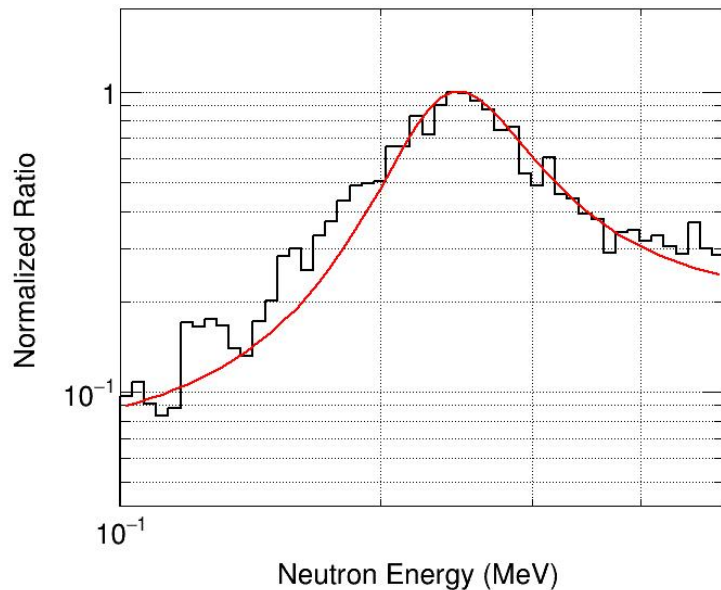
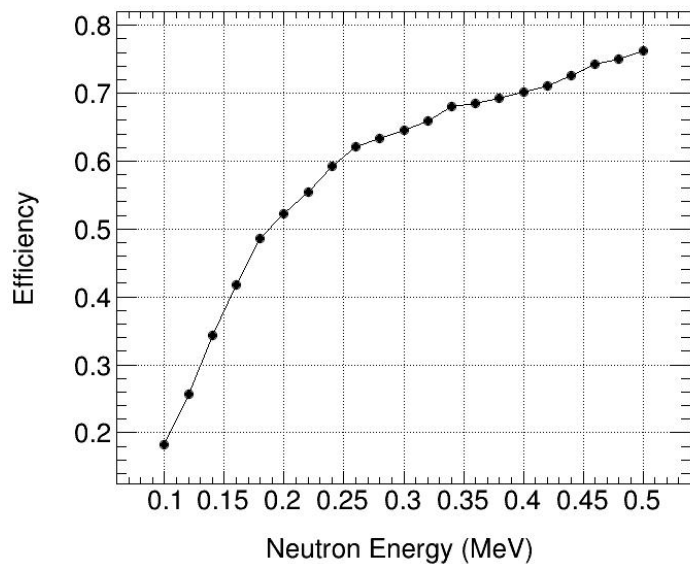
np散射截面测量

- 不同能区PID分布：高能区质子与氚鉴别效率降低



np散射截面测量

- 测量效率=探测器效率*电子学效率*数据分析效率
- 测量效率随能量升高而升高
- 通过效率修正初步得到np散射与 ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应截面比值



报告内容

- WNRI研究进展

- WNRI概况
- 中子束流实验
- 数据分析算法
- 性能参数分析
- 共振成像分析

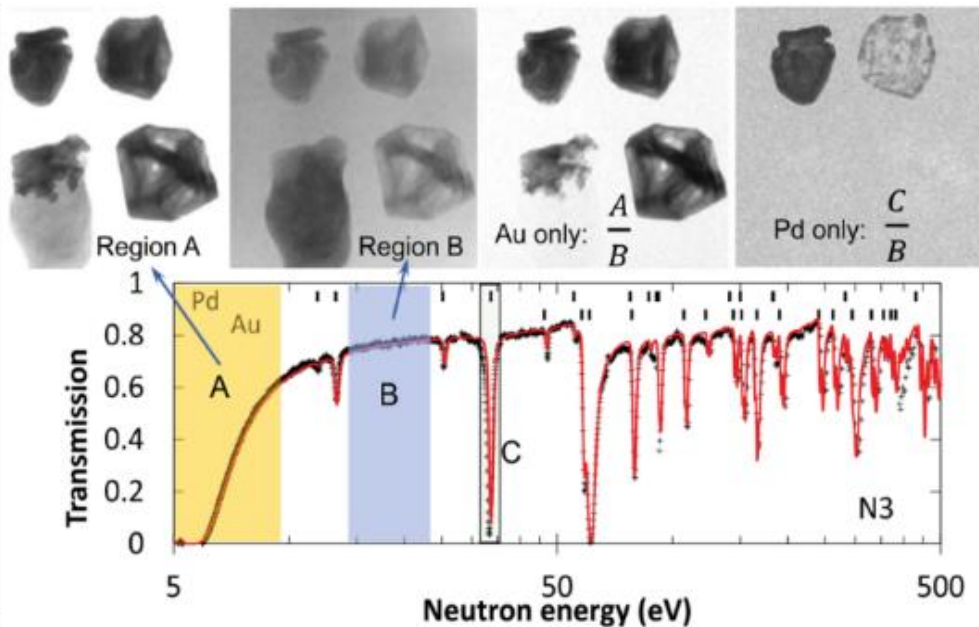
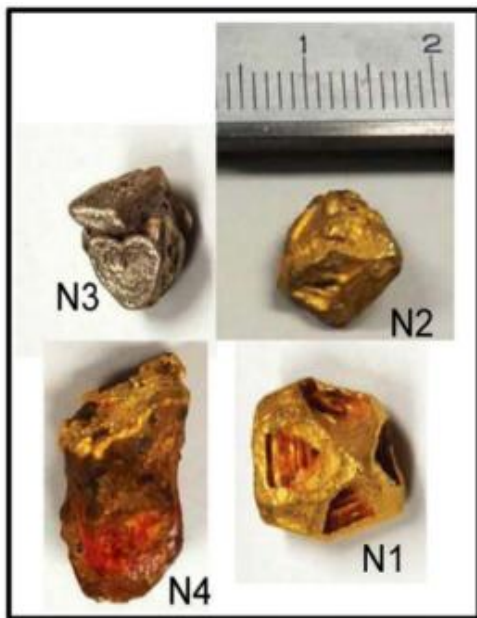
报告内容

- WNRI研究进展

- WNRI概况
- 中子束流实验
- 数据分析算法
- 性能参数分析
- 共振成像分析

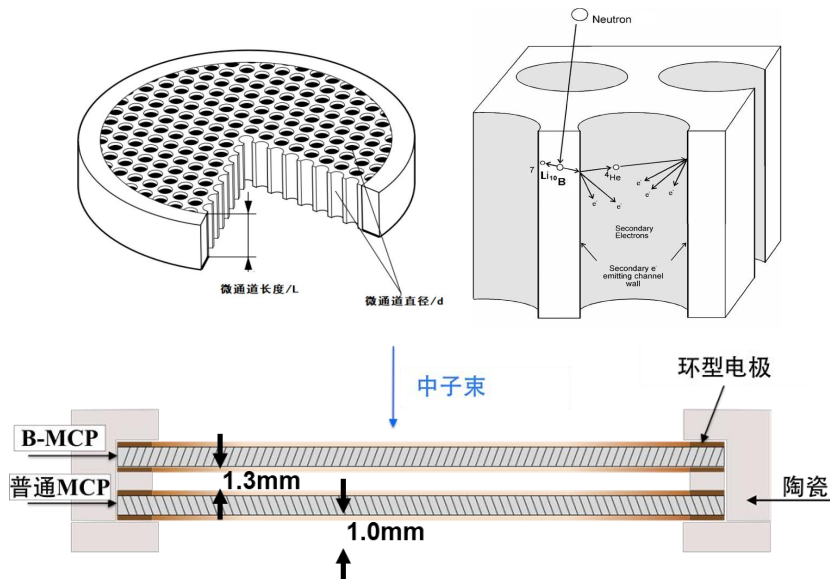
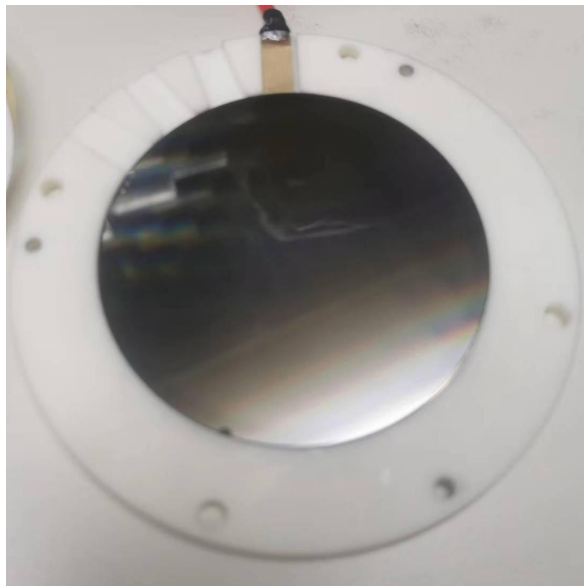
WNRI概况

- 白光中子共振成像：White Neutron Resonance Imaging (WNRI)
- 利用核反应截面共振结构进行成像
- 增强图像对比度
- 核素成像与定量分析



WNRI概况

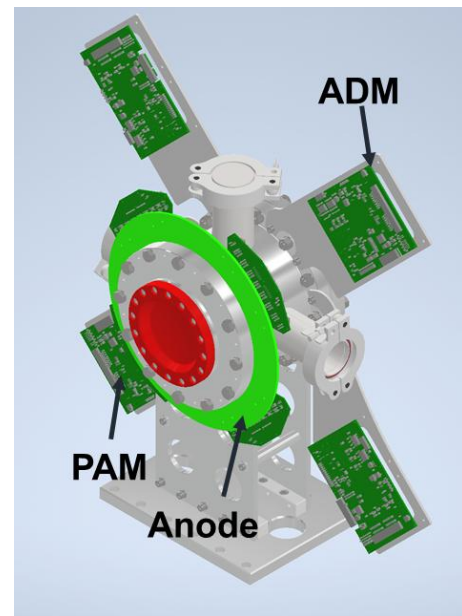
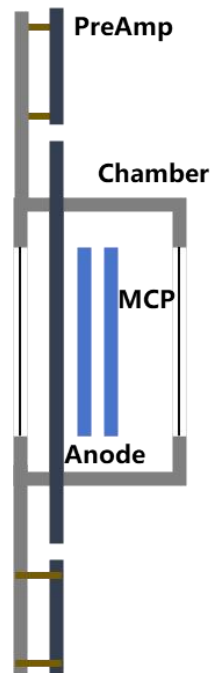
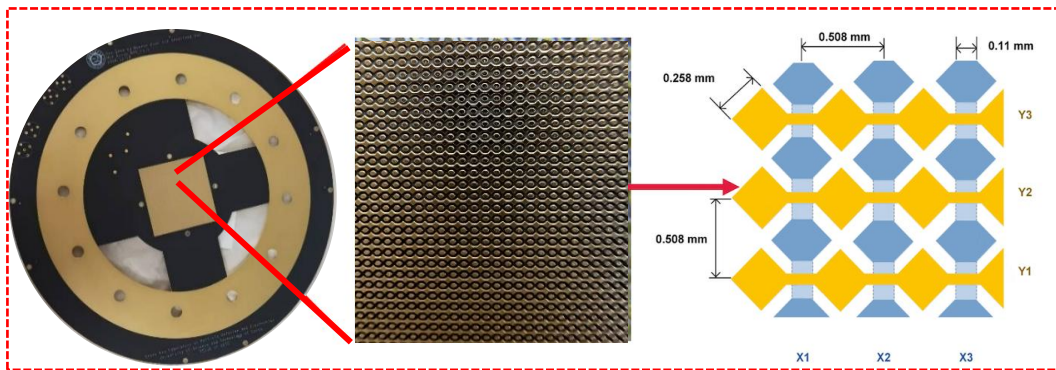
- 掺硼微通道板探测器：B-MCP
- 空间分辨：10~100 μm
- 时间分辨：~ns
- 高中子探测效率：~17%@0.1eV



Parameters	B-MCP	Ordinary MCP
Diameter (mm)	56	56
Thickness (μm)	480	480
Pore diameter (μm)	8.8	8.8
Pore area ratio (%)	~65	~65
Gain	69(@800V)	75830(@1000V)
^{10}B (mol%)	15	-

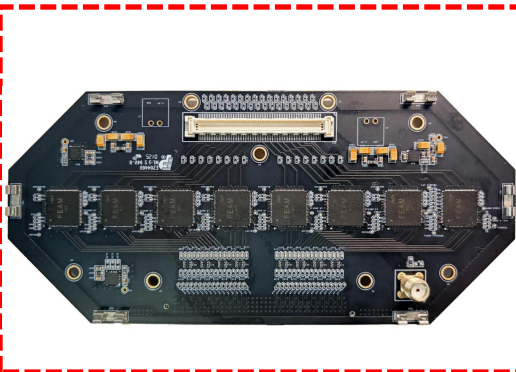
WNRI概况

- 探测器结构
- XY交叉读出阳极条：条宽~0.5mm，XY方向各128读出条
- 灵敏区面积：64*64mm²



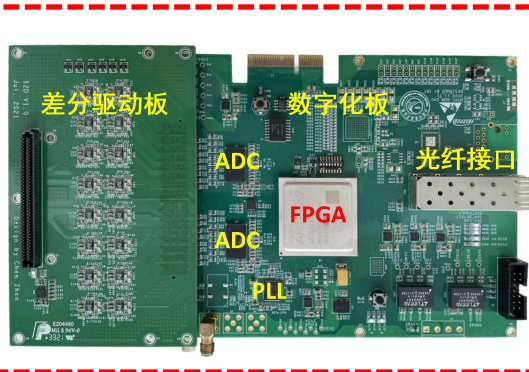
WNRI概况

- 读出电子学:256通道
- 前端：FEAM芯片+波形采样ADC
- 后端：数据汇总模块



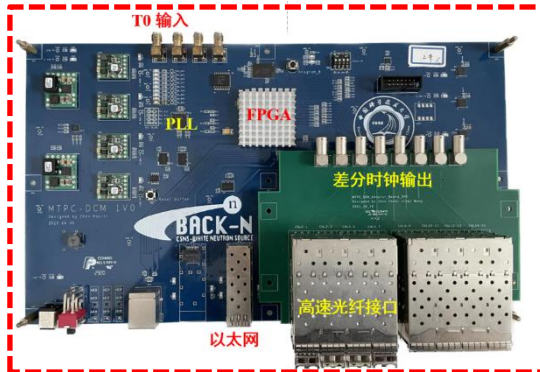
PAM*4

- ❑ 输出达峰时间 80 ns
- ❑ 动态范围 1000 fC



ADM*8

- ❑ 采样率: 80 MSPS
- ❑ 采样分辨: 12 bit

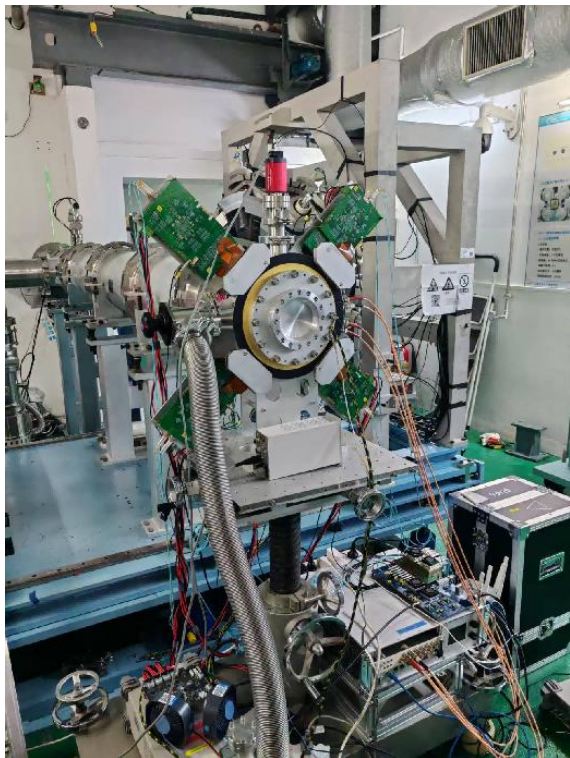


DCM*1

- ❑ 数据汇总、缓存
- ❑ 触发判选+时钟分发

探测器系统

- WNRI探测器系统



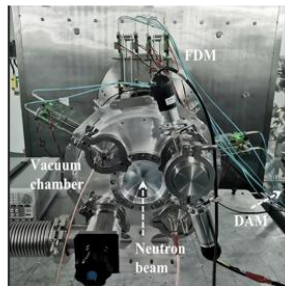
WNRI概况

● 研究历程



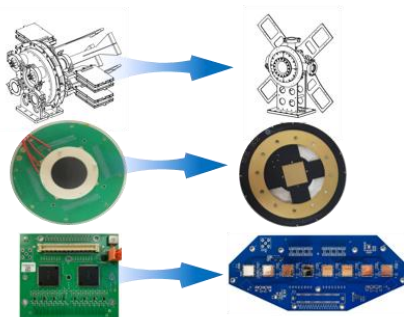
2022

- 腔体加工完成
- 电子学制作完成
- 第一次WNRI实验

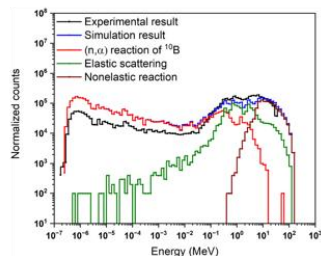


2024-2025

- 探测腔体升级
- 电路板升级
- 前放升级

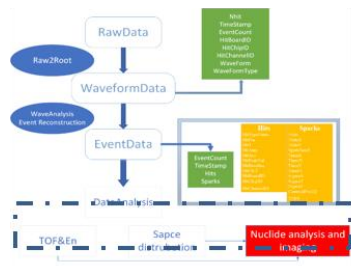


2021



□ 单阳极MCP测试

2023



□ 引入Bluet数据处理框架

2025.10



□ 铜镜样品实验



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



中国兵器工业集团 北方夜视科技研究院集团有限公司
NORTH NIGHT VISION SCIENCE & TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE GROUP CO., LTD.
北方夜视科技(南京)研究院有限公司
NORTH NIGHT VISION SCIENCE & TECHNOLOGY NANJING RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.



西安交通大学
XIAN JIAOTONG UNIVERSITY



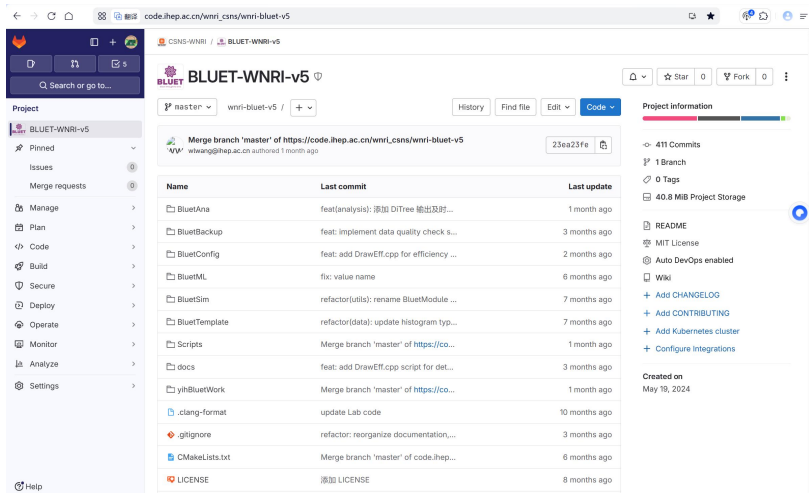
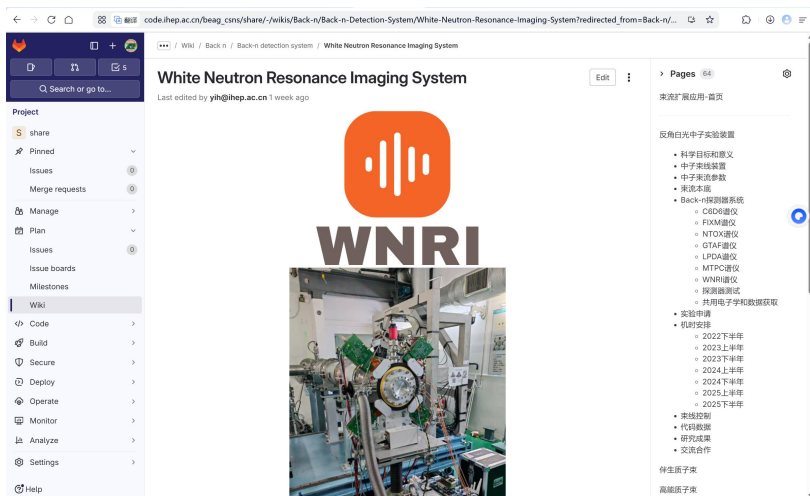
东华理工大学
EAST CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



报告内容

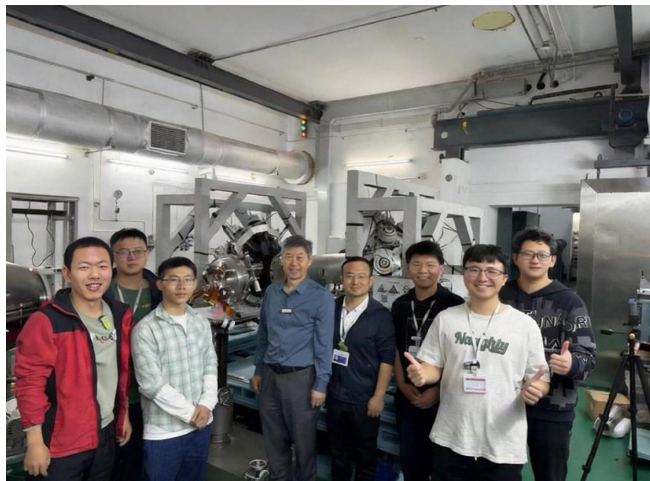
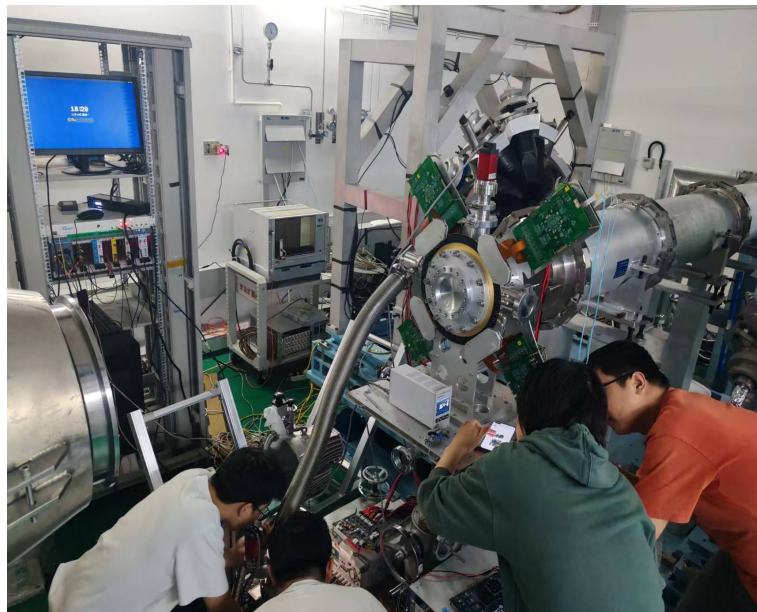
● WNRI研究进展

- WNRI概况
- 中子束流实验
- 波形分析算法
- 事例重建算法
- 性能参数分析
- 共振成像分析

中子束流实验

● 2025年11月~12月，开展白光中子束流实验

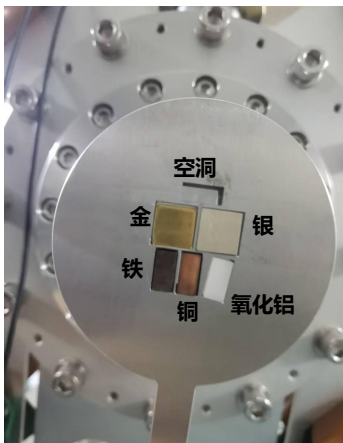
- ▣ T0时间窗：0~12ms、阈值：X-30ADC、Y-40ADC
- ▣ 高压：1500V-1075V-975V-50V、真空：2.0E-4Pa
- ▣ 束斑：60-30-30、加速器功率：160kW



中子束流实验

- 测量内容：束班测量、标准样品、铜镜样品、铁钱样品、空速管

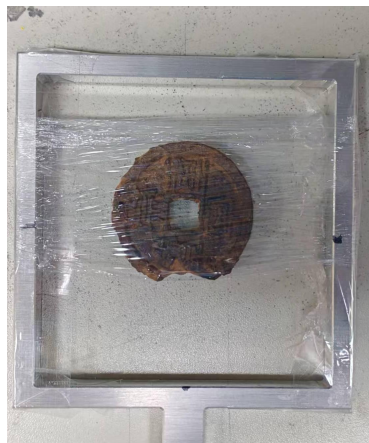
标准样品



铜镜样品



铁钱文物样品



空速管



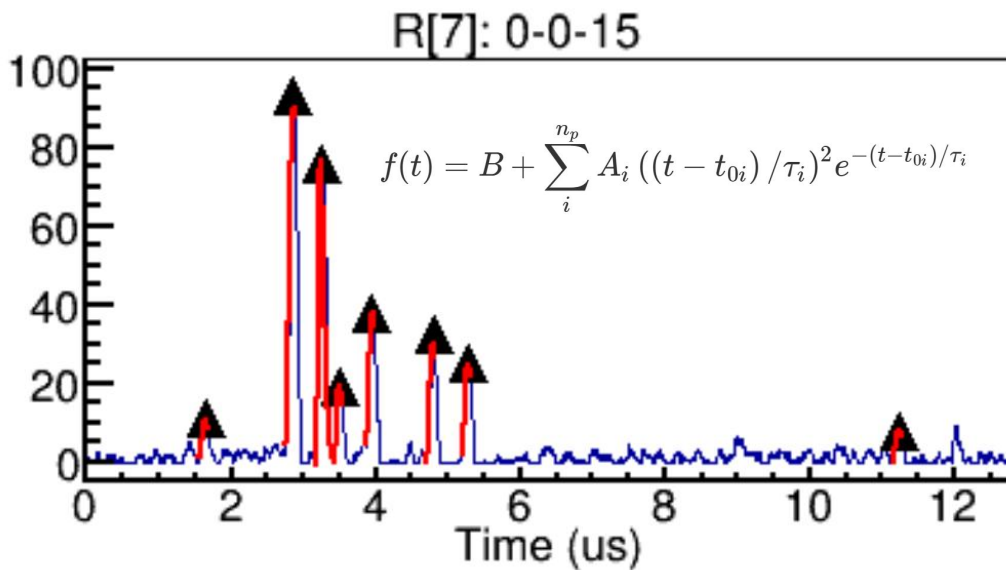
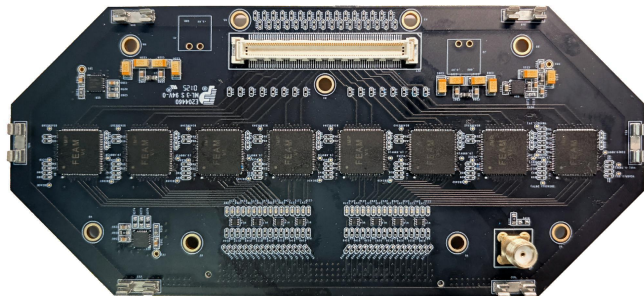
报告内容

- WNRI研究进展

- WNRI概况
- 中子束流实验
- 数据分析算法
- 性能参数分析
- 共振成像分析

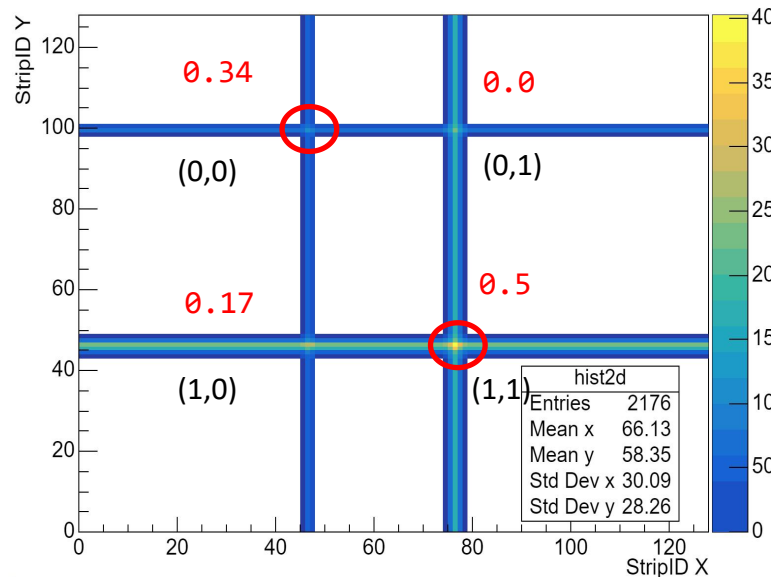
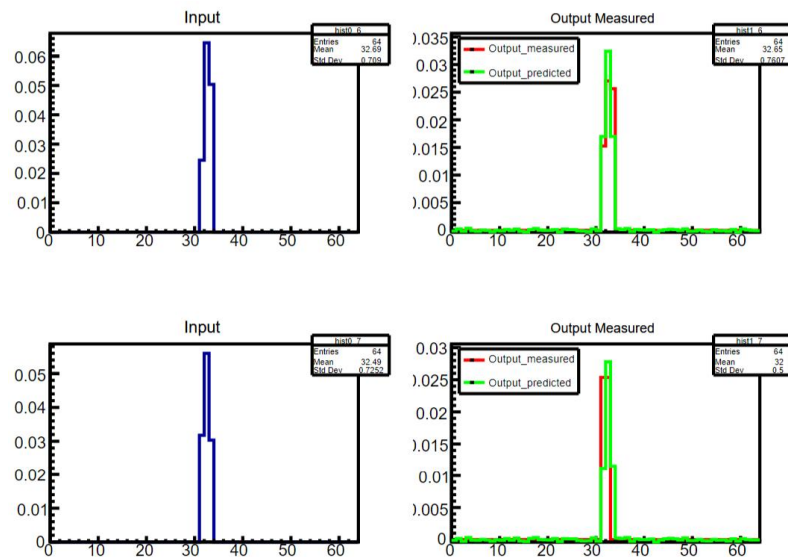
数据分析算法：波形分析

- FEAM前放：信号快脉冲窄（上升沿80ns、脉宽200ns）
- 高能区波形叠加概率降低，提高高能区测量效率和准确性
- 针对叠加波形开发了多脉冲叠加拟合算法，提高了叠加波形的鉴别能力和效率



数据分析算法：事例重建

- 基于TensorFlow/Keras神经网络模型构建函数，引入注意力机制，用于处理稀疏分布
- 自定义加权高斯负对数似然损失函数，用于训练神经网络预测Hit分布
- 神经网络通过Y分布预测X分布，给出每一个分布的预测概率



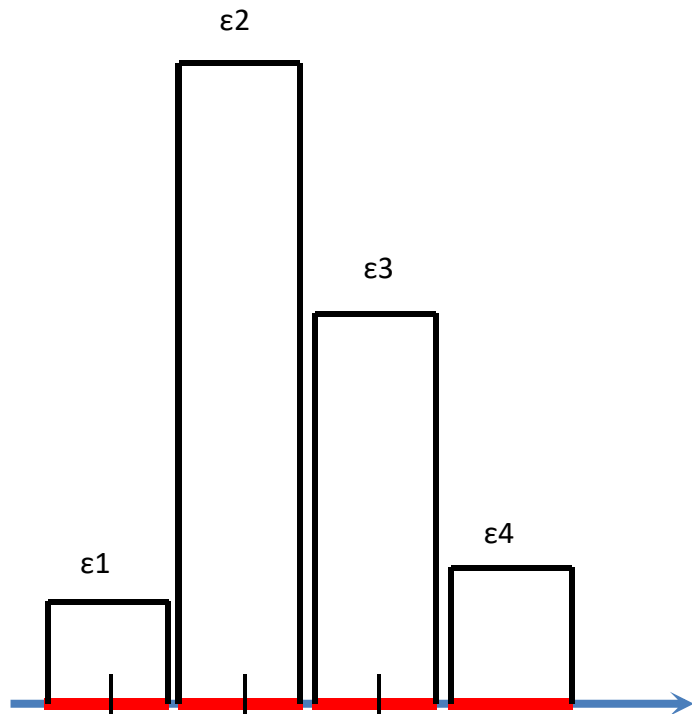
报告内容

- WNRI研究进展

- WNRI概况
- 中子束流实验
- 数据分析算法
- 性能参数分析
- 共振成像分析

性能参数分析：时间分辨

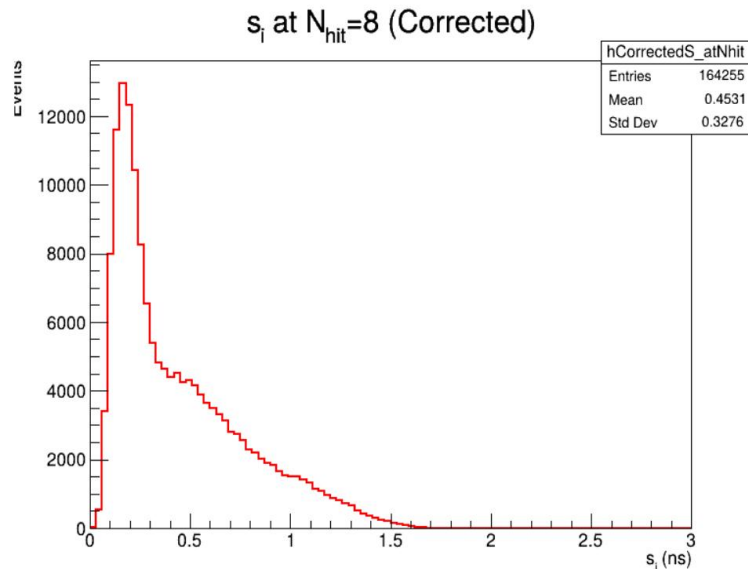
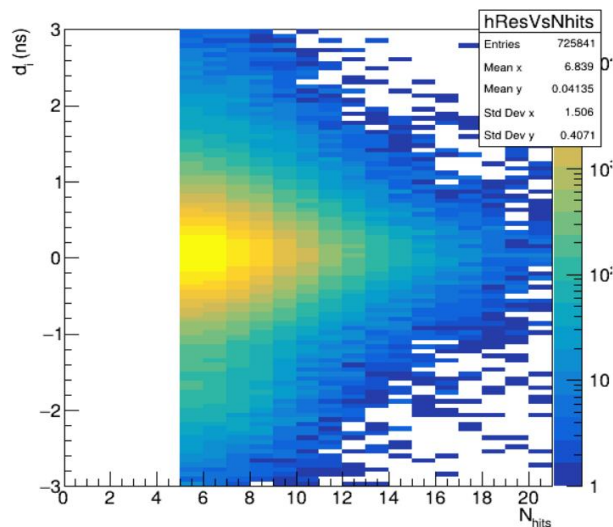
- 选取低能区单中子事例
- 以单中子事例各Hit的时间偏差 (d_i) 分布标准差 (σ) 求真实各Hit时间分布标准差 (Σ_T)



$$\begin{aligned}
 d_i &= \varepsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varepsilon_j \\
 \sum_{i=1}^N d_i^2 &= \sum_{i=1}^N \left(\varepsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right)^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N \left(\varepsilon_i^2 - \frac{2}{N} \varepsilon_i \sum_{j=1}^N \varepsilon_j + \frac{1}{N^2} \left(\sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right)^2 \right) \\
 &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \sum_{j=1}^N \varepsilon_j + \frac{N}{N^2} \left(\sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right)^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{2}{N} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 + \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 \\
 \Sigma_T^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{1}{N^2} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 \\
 E[\varepsilon_i] &= 0, \quad E[\varepsilon_i^2] = \sigma^2, \quad E\left[\left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i\right)^2\right] = N\sigma^2 \\
 E[\Sigma_T^2] &= \frac{1}{N} \cdot N\sigma^2 - \frac{1}{N^2} \cdot N\sigma^2 = \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} = \sigma^2 \left(1 - \frac{1}{N}\right) \\
 E[\Sigma_T] &\approx \sigma \sqrt{1 - \frac{1}{N}}
 \end{aligned}$$

性能参数分析：时间分辨

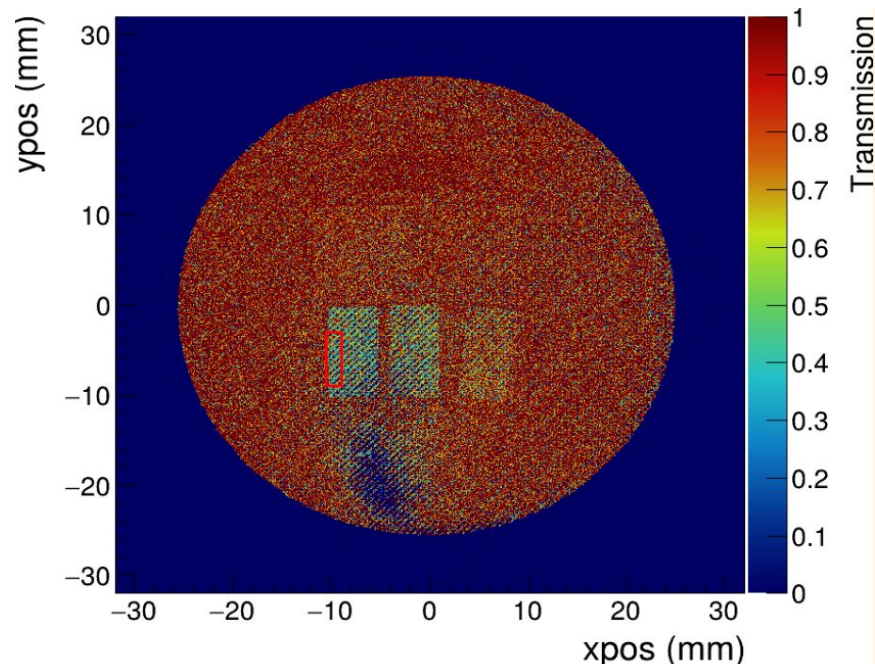
- 选取特定 $N_{hit}=8$ 事件分析时间分辨
- 得到探测器时间分辨560ps



=====
Resolution at $N_{hit}=8$ =====
Raw: 0.55934 ns (164255 events)
After cut: 0.55934 ns (164255 events)

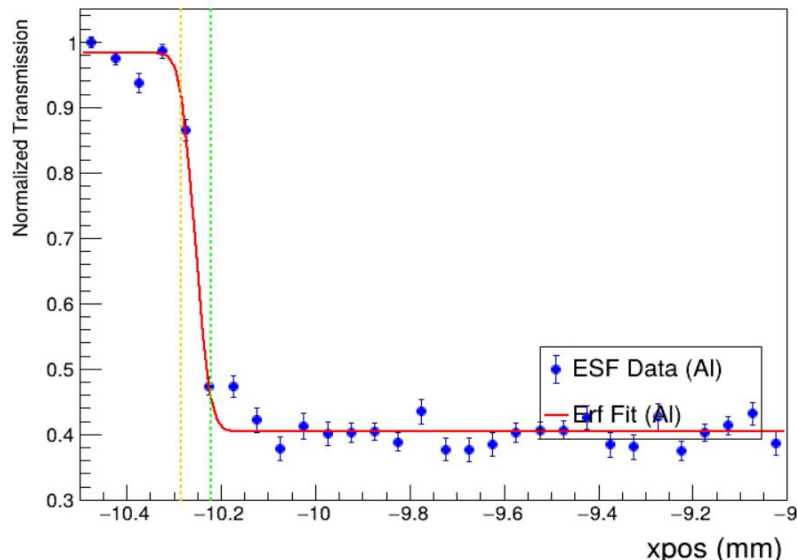
性能参数分析：空间分辨

- 选取样品边缘透射率曲线拟合得到空间分辨率
- 探测器分辨率63 μm



```
===== 拟合结果 =====  
基线值: 0.693178 | 幅度: -0.289285  
最大透射率T_max: 0.982463 | 最小透射率T_min: 0.403894  
边缘中心: -10.2538 mm | 标准差: 0.0246291 mm  
 $\chi^2/\text{ndf}$ : 2.27903  
=====
```

```
10%透射率值: 0.461751 | 对应位置: -10.2223 mm  
90%透射率值: 0.924606 | 对应位置: -10.2854 mm  
10%-90%空间分辨率: 63.127  $\mu\text{m}$   
=====
```



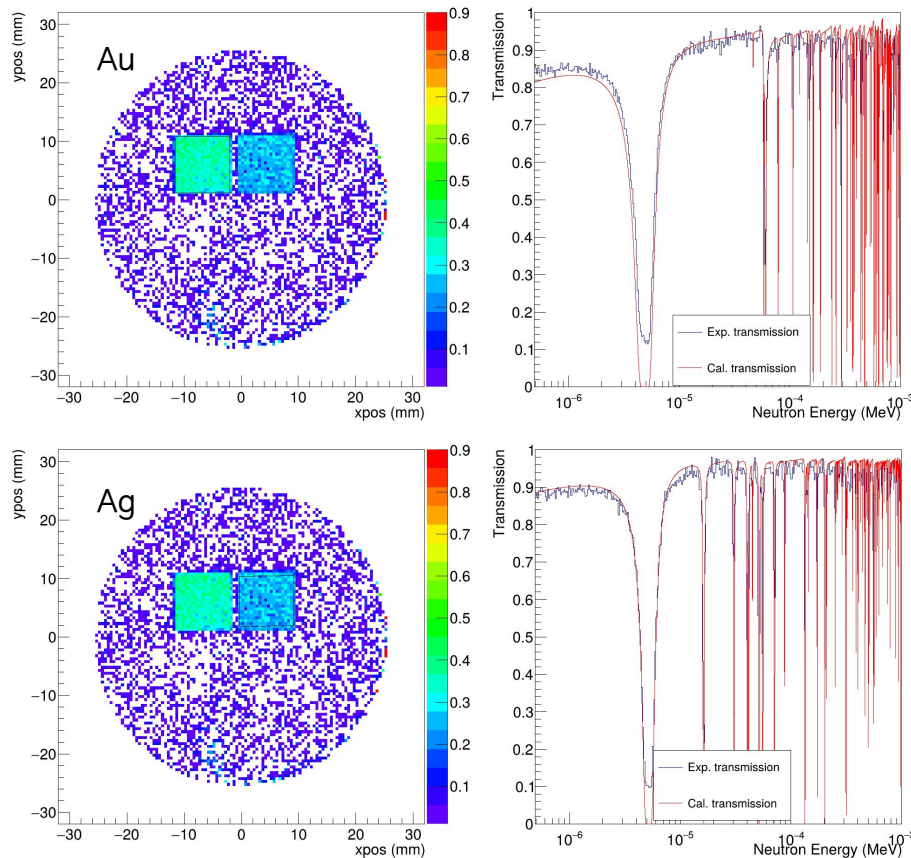
报告内容

- WNRI研究进展

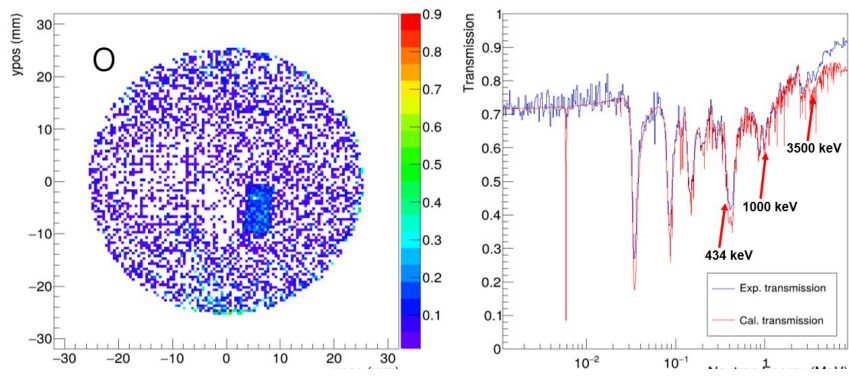
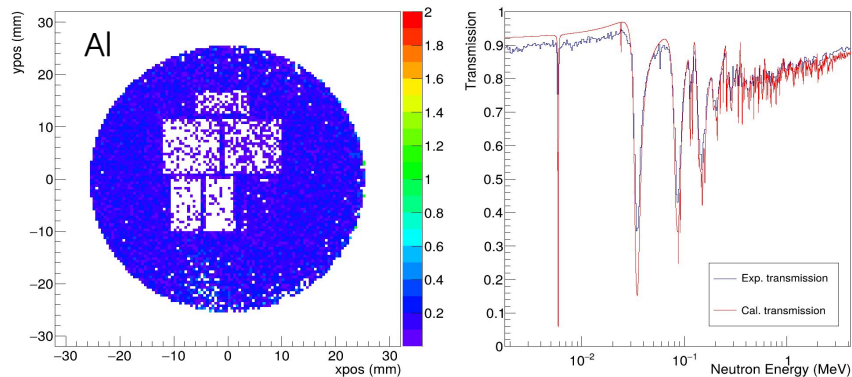
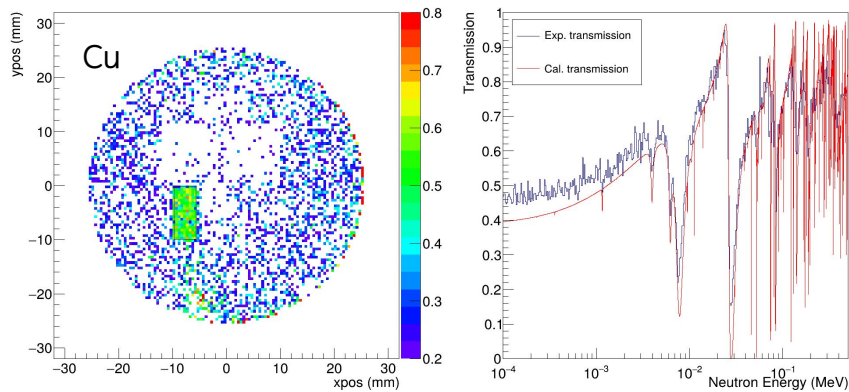
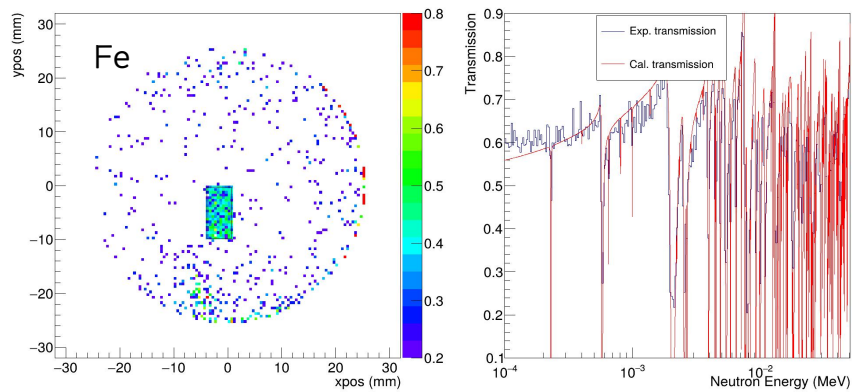
- WNRI概况
- 中子束流实验
- 数据分析算法
- 性能参数分析
- 共振成像分析

共振成像分析

- 采用共振区增强对比方法，对特定元素进行成像



- 采用共振区增强对比方法，对特定元素进行成像
- 最高共振成像区间至MeV能区（O元素）



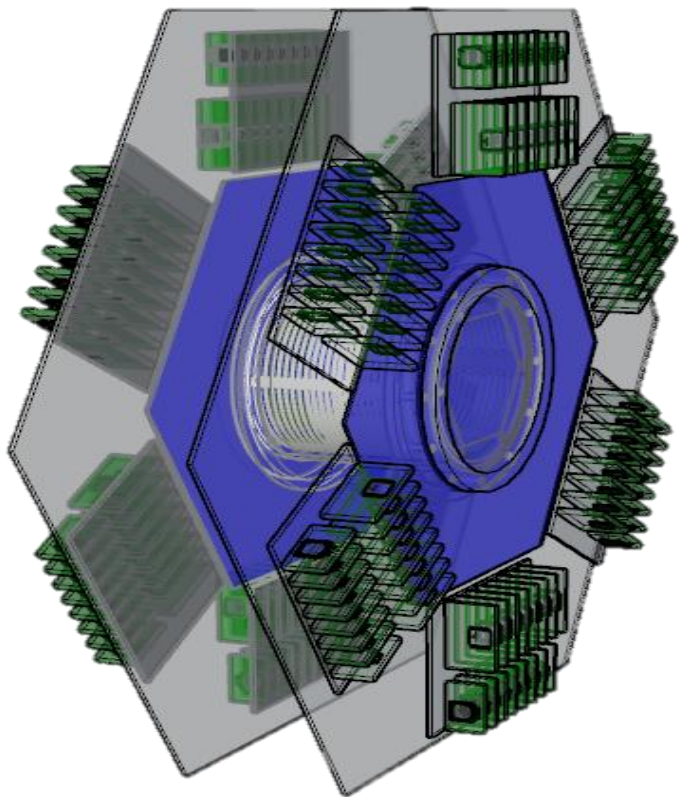


报告内容

- MTPC研究进展
- WNRI研究进展
- 研究规划

MTPC规划

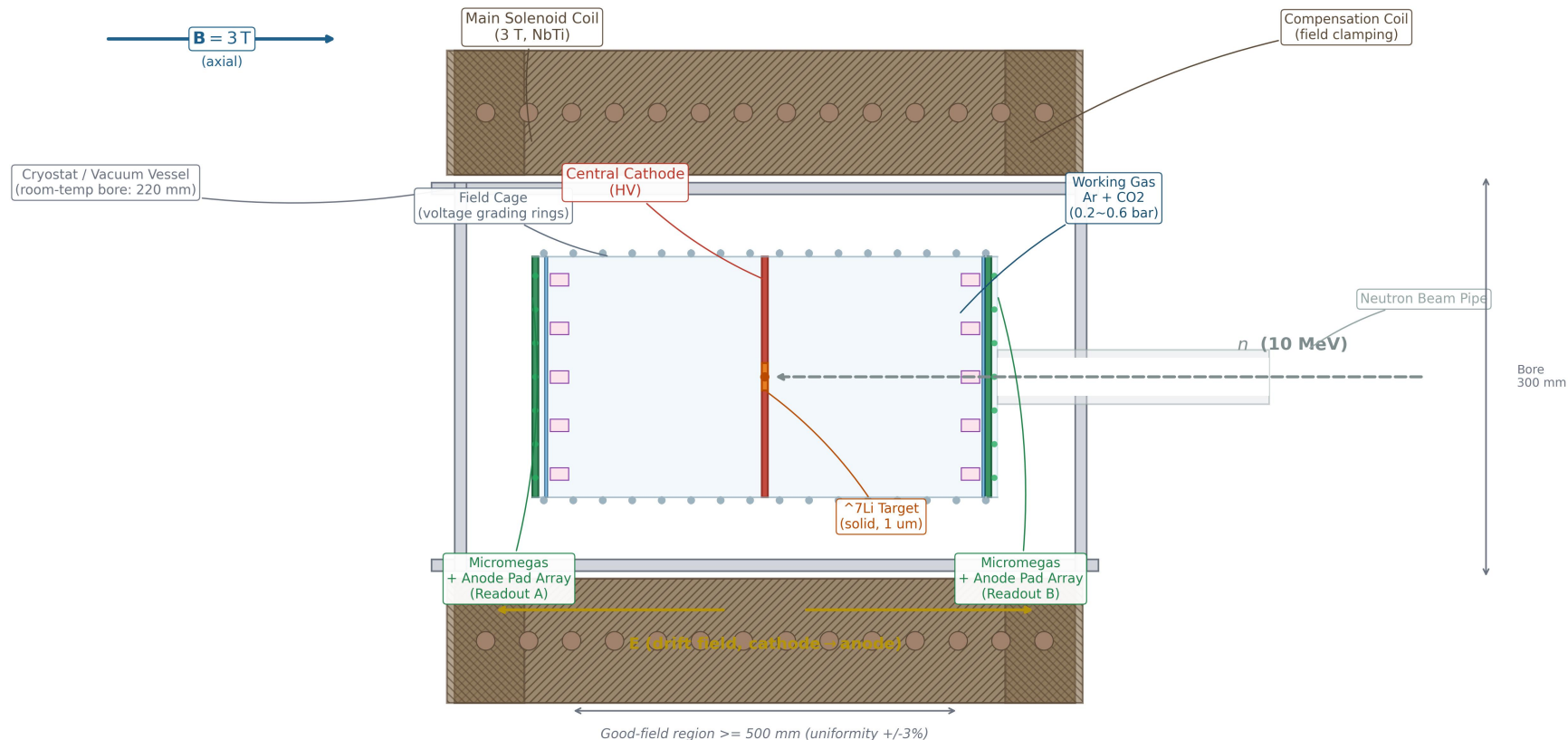
- 可调气压腔体+双端读出
- 复杂反应道实验测量



MTPC规划

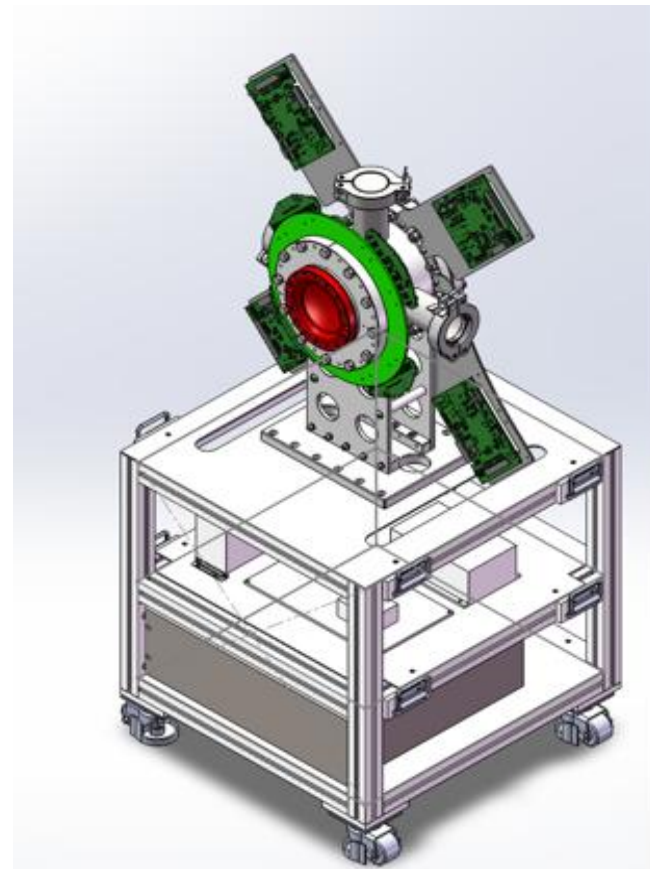
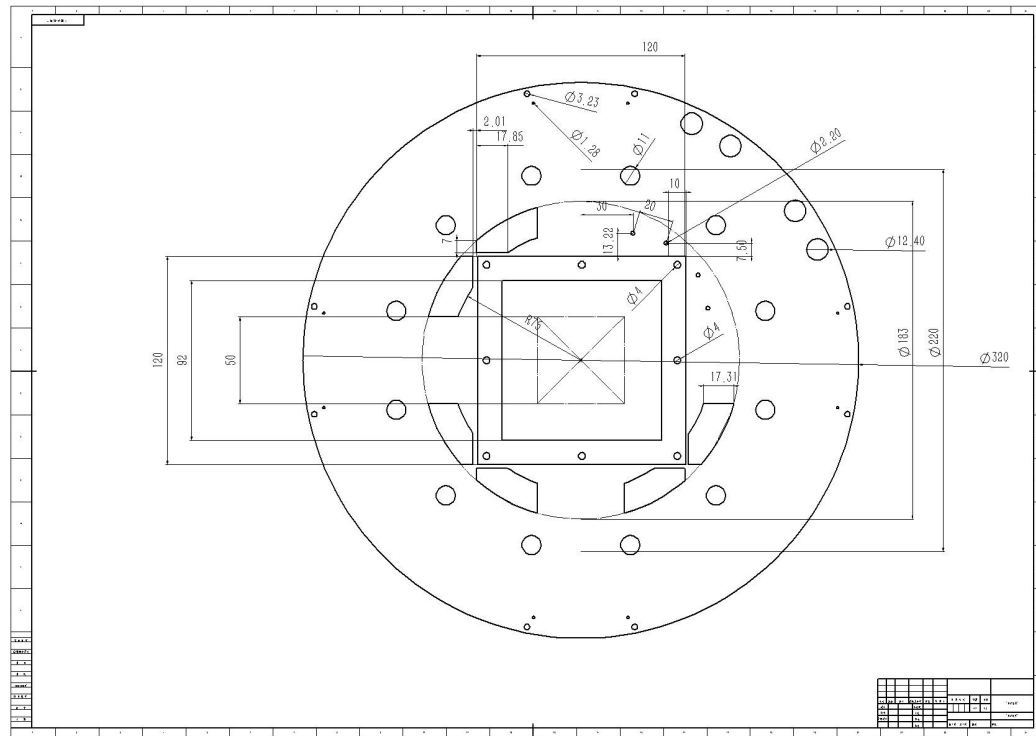
- 超导螺线管磁铁+双端读出
- 提高粒子动量重建精度

Solenoidal TPC with Back-to-Back Double-ended Readout



WNRI规划

- 开发大面积B-MCP
- 提高系统集成化水平



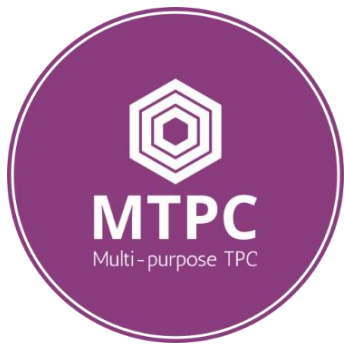


WNRI

感谢各位专家同行的支持！
期待更多成员加入MTPC与WNRI研究团队！

谢谢！

多用途时间投影室与中子共振成像研究进展 MTPC & WNRI



报告人：易晗

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

第十届CSNS反角白光中子实验装置用户研讨会

2026年7月15日@湖南衡阳·南华大学

