

大面积陶瓷GEM中子探测器研究

朱林，周健荣，周晓娟，曾莉欣，谢宇广，孙志嘉，陈元柏

中国科学院高能物理研究所（IHEP）

散裂中子源科学中心（SNSSC）

中国科学院大学（UCAS）

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会

目 录

1. 研究背景

2. 大面积陶瓷GEM中子探测器

3. 中子束流实验

4. 总结与展望

目 录

1. 研究背景

2. 大面积陶瓷GEM中子探测器

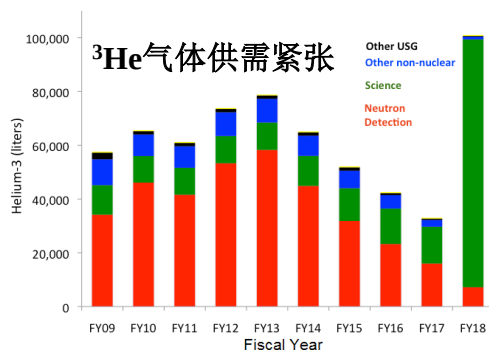
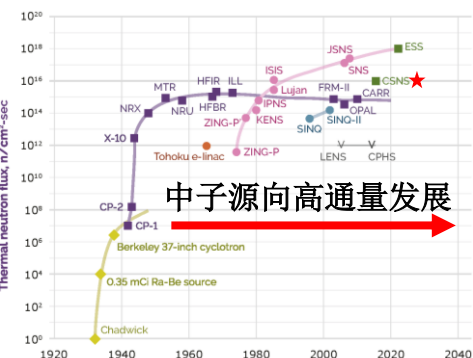
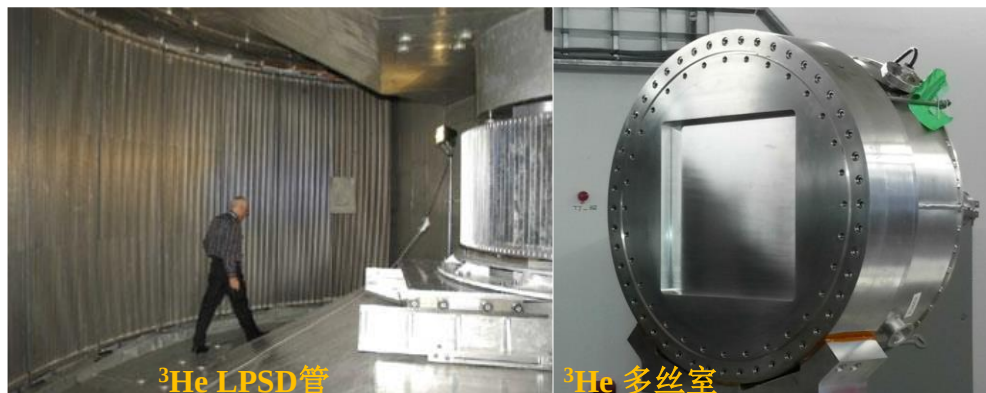
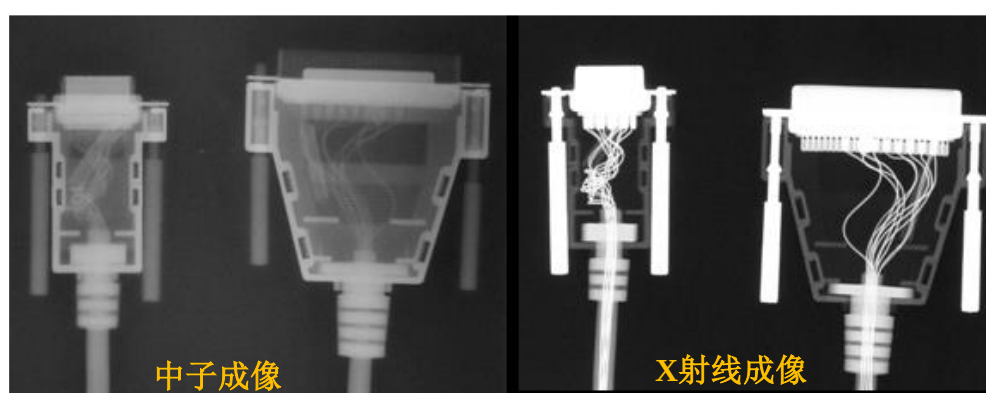
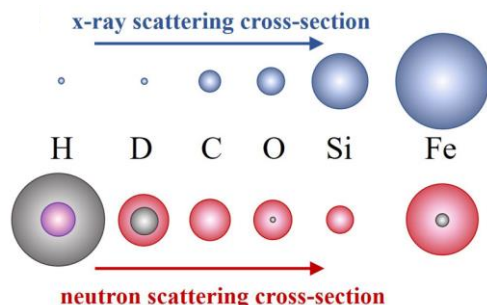
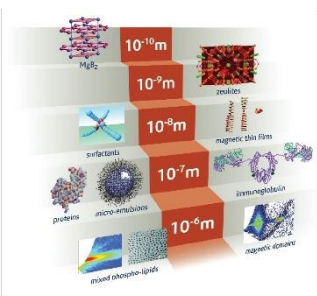
3. 中子束流实验

4. 总结与展望

研究背景

中子特性:

- ◆ 电中性，具有磁矩；
- ◆ 与物质原子核相互作用，强穿透力；
- ◆ 同位素敏感，与X射线技术互补；
- ◆ 热中子波长与物质晶格间距同量级；



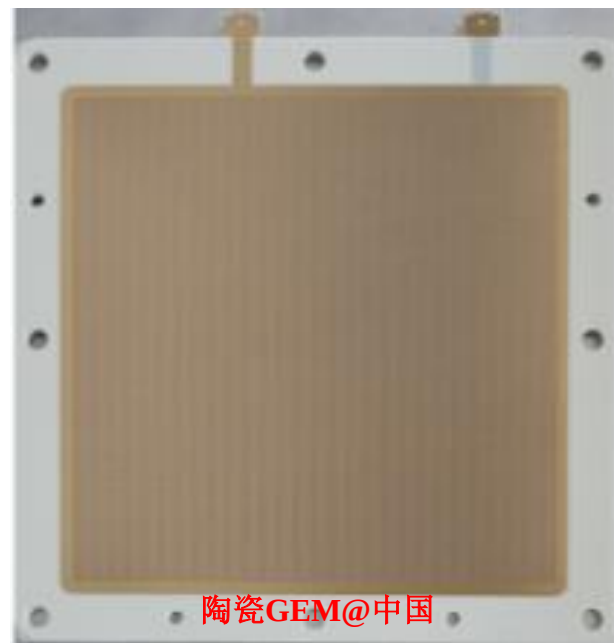
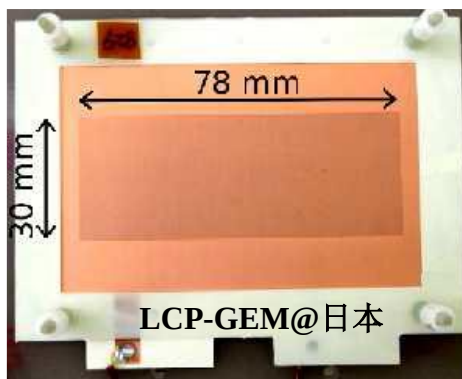
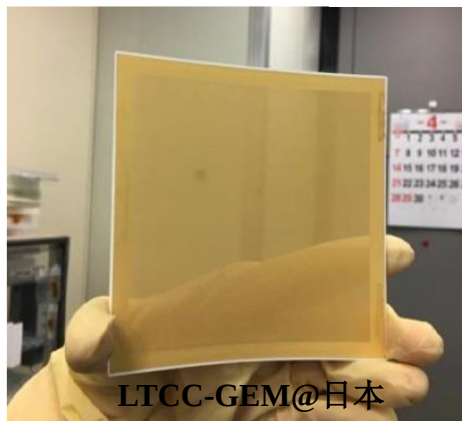
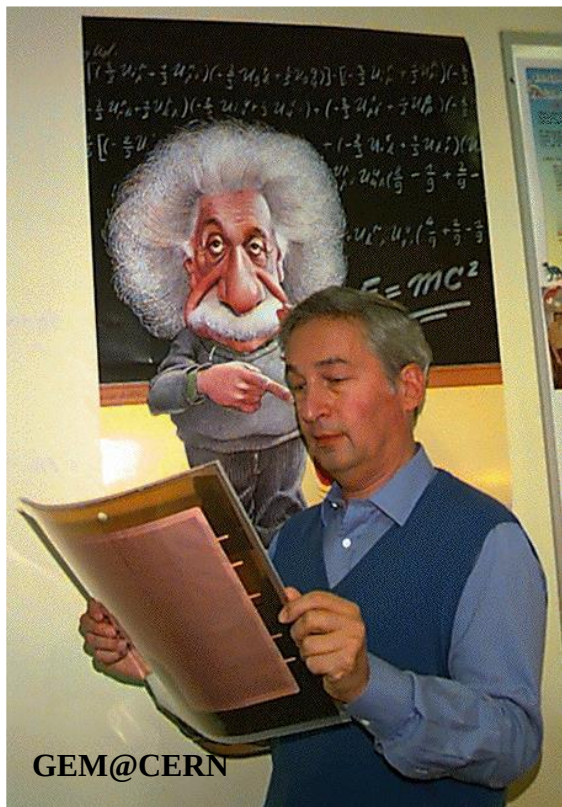
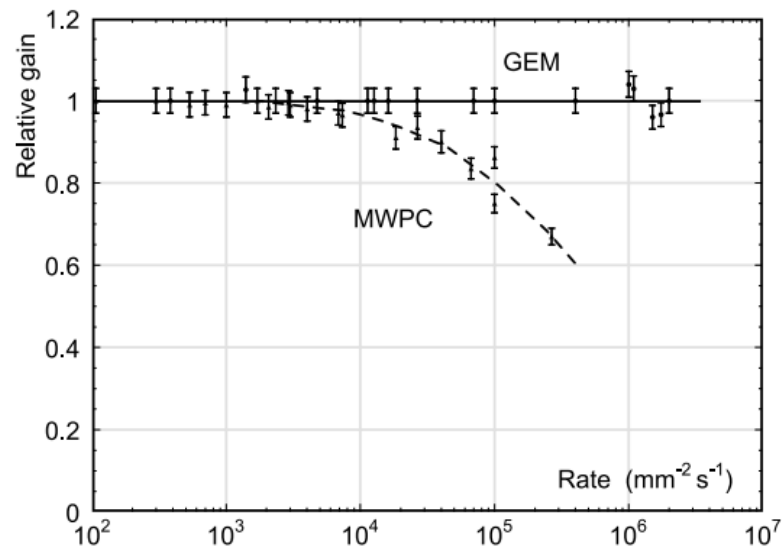
局限和挑战:

- 计数率上限 (<100kHz)，无法适用于高通量测量；
- ³He气体昂贵，供需失衡；
- 研制代替³He的新型中子探测器：大面积，高效率，高计数率和高位置分辨能力；

研究背景

GEM的优势:

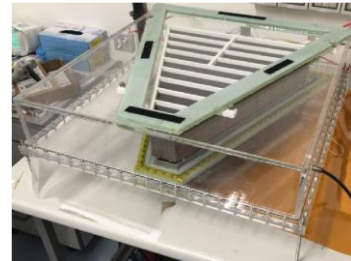
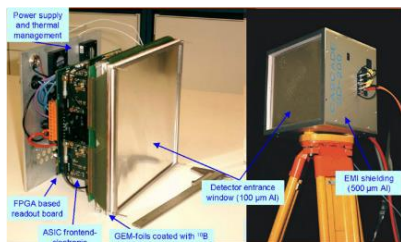
- ◆ 高计数率 (10MHz/mm^2), 耐辐照, n/γ 甄别能力强;
- ◆ 高本征分辨 ($\sigma_{\text{位置}} \sim 0.1\text{mm}$, $\sigma_{\text{时间}} \sim 10\text{ns}$);
- ◆ 定制形状, 如平面型、圆柱型和球型等;
- ◆ 大面积制作 $\sim \text{m}^2$ 量级, 相对廉价;



研究背景

涂硼GEM中子探测器

国外



CASCADE-GEM, 德国

GEM-Monitor, 日本

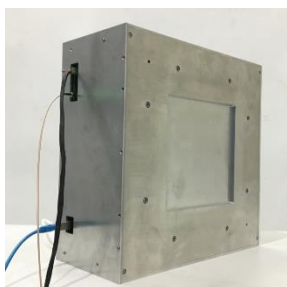
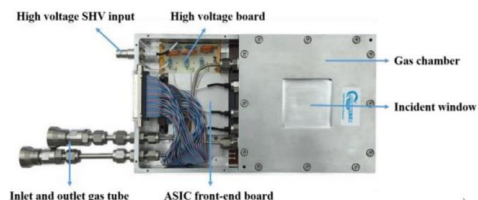
GEM-Monitor, 意大利

BAND-GEM, 意大利

中国

GEM-Monitor

高效率GEM



高分辨GEM

密闭GEM



大面积陶瓷GEM中子探测器优势:

- ◆ 陶瓷基材，中子散射本底低；
- ◆ 可级联，实现高探测效率；
- ◆ 有效面积大，可实现近束测量；
- ◆ 位置灵敏读出，实现二维成像；

中子探测专用陶瓷GEM：几乎不含氢元素，中子散射少，杂散本底低，抗辐照性能好，耐高温烘烤，物理化学性能稳定，未来发展方向是大面积和高探测效率。

目 录

1. 研究背景

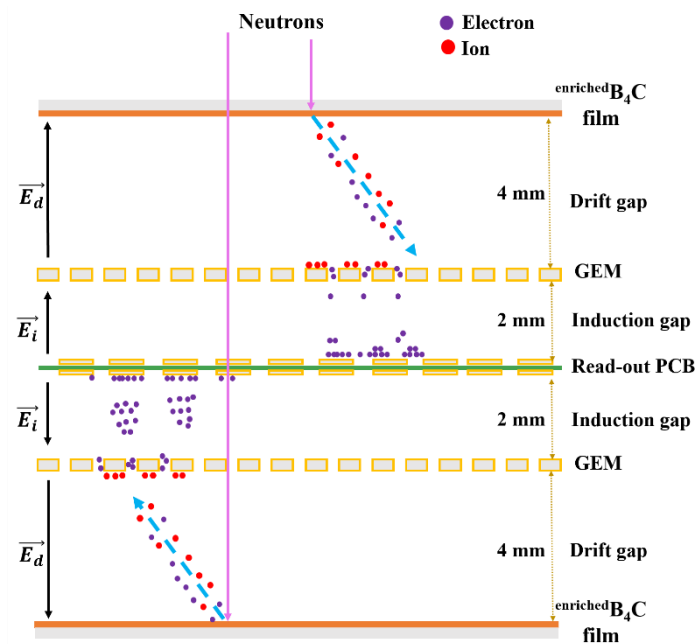
2. 大面积陶瓷GEM中子探测器

3. 中子束流实验

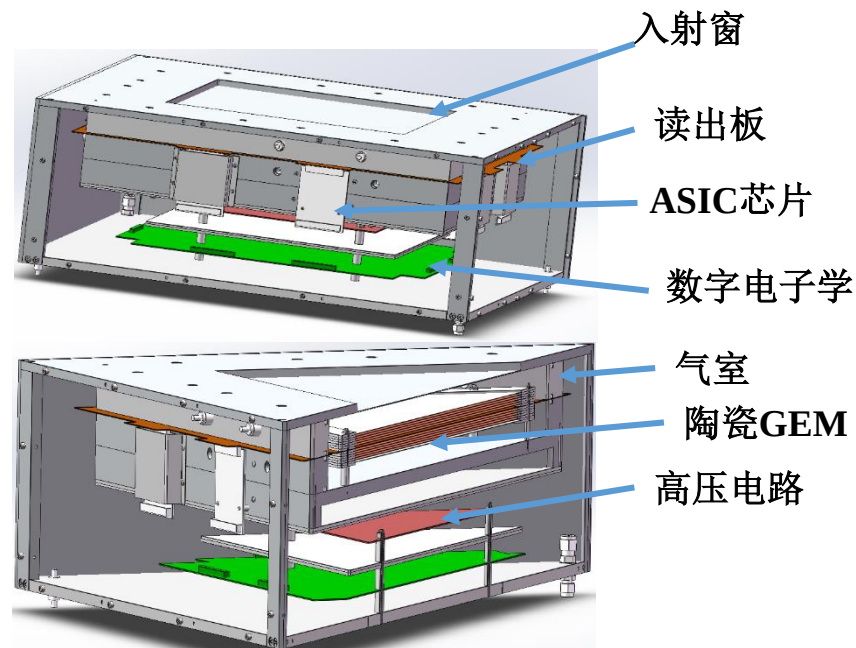
4. 总结与展望

大面积陶瓷GEM中子探测器

探测器原理图



探测器结构



设计需求与指标:

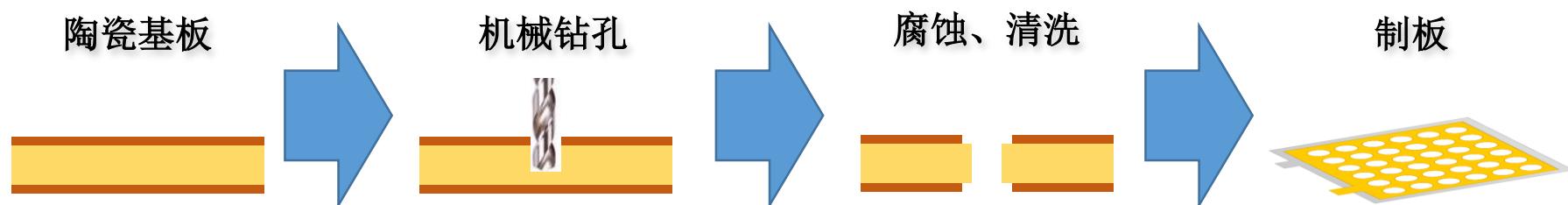
- 二维位置读出;
- 中子灵敏面积 $\geq 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$;
- 系统最高计数率 $\geq 1 \text{ MHz}$;
- 位置分辨 $\leq 3 \text{ mm (FWHM)}$;

探测器设计与结构:

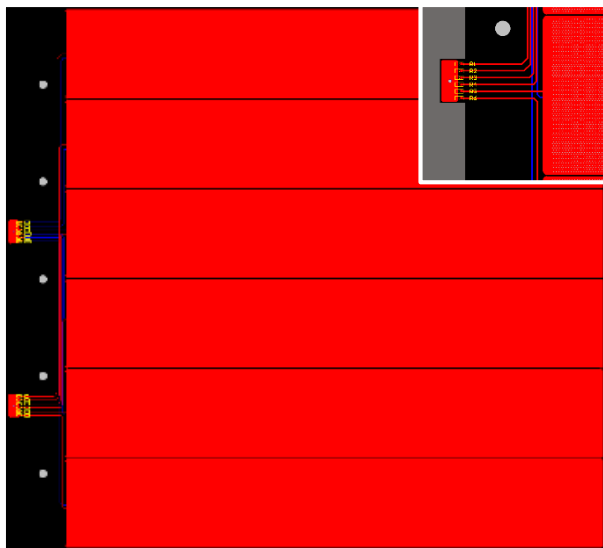
- 双面读出PCB: $256(X)+256(Y)=512$;
- 两层GEM探测器, 浓缩 B_4C 中子转换层, 提高探测效率;
- 前端ASIC读出, 加快信号读出;
- 基于高速FPGA数字电子学, 事例快速重建;

大面积陶瓷GEM中子探测器

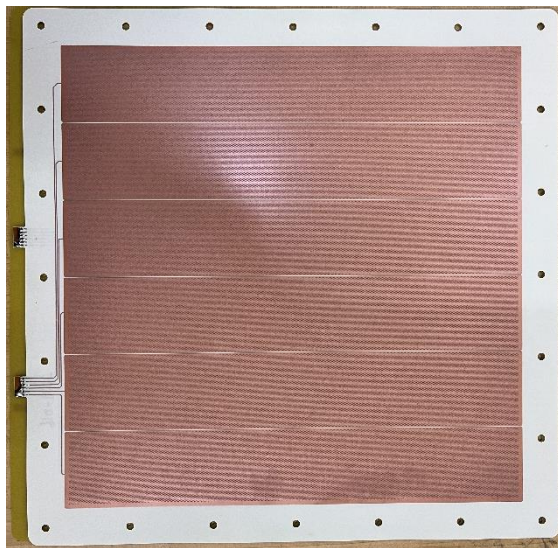
大面积陶瓷GEM研发



PCB设计



GEM成品



GEM参数

有效面积	300mm×300mm
基材厚度	300μm
分区数量	6分区
死区宽度	2mm
孔心间距	600μm
孔直径	200μm

大面积陶瓷GEM中子探测器

大面积涂硼技术研究

硼作为中子转换层的优点：

反应截面大，转换粒子能量高，固体转换层厚度薄
(~1 μ m)，时间分辨高，天然存在易获得，化学稳定。

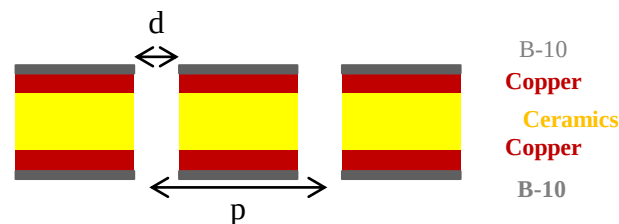
难点：属于非金属介质，熔点高(2076 $^{\circ}$ C)，不易镀膜

镀膜方法：热蒸发($\times$)，电泳($\times$) 以及磁控溅射($\checkmark$)

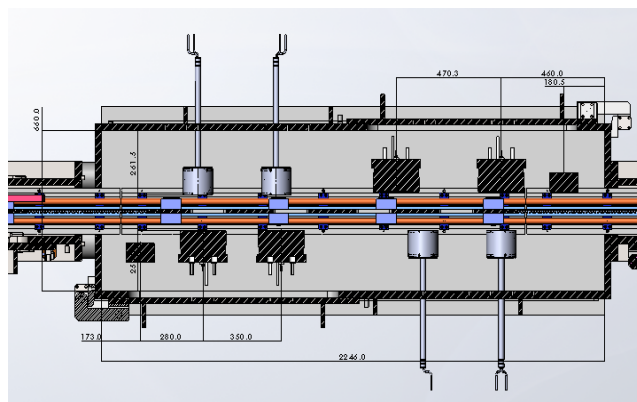
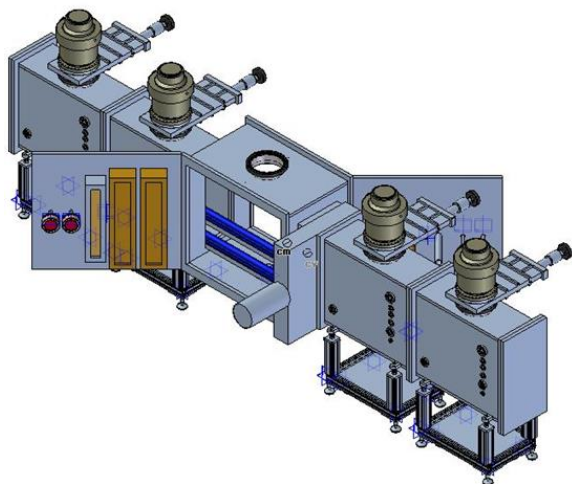
1. 漂移电极镀膜



2. 陶瓷GEM两侧镀膜

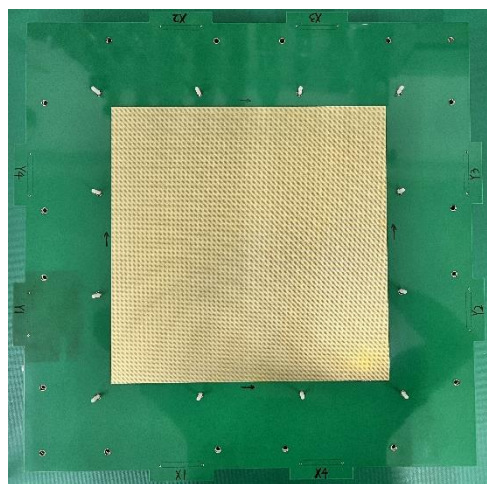
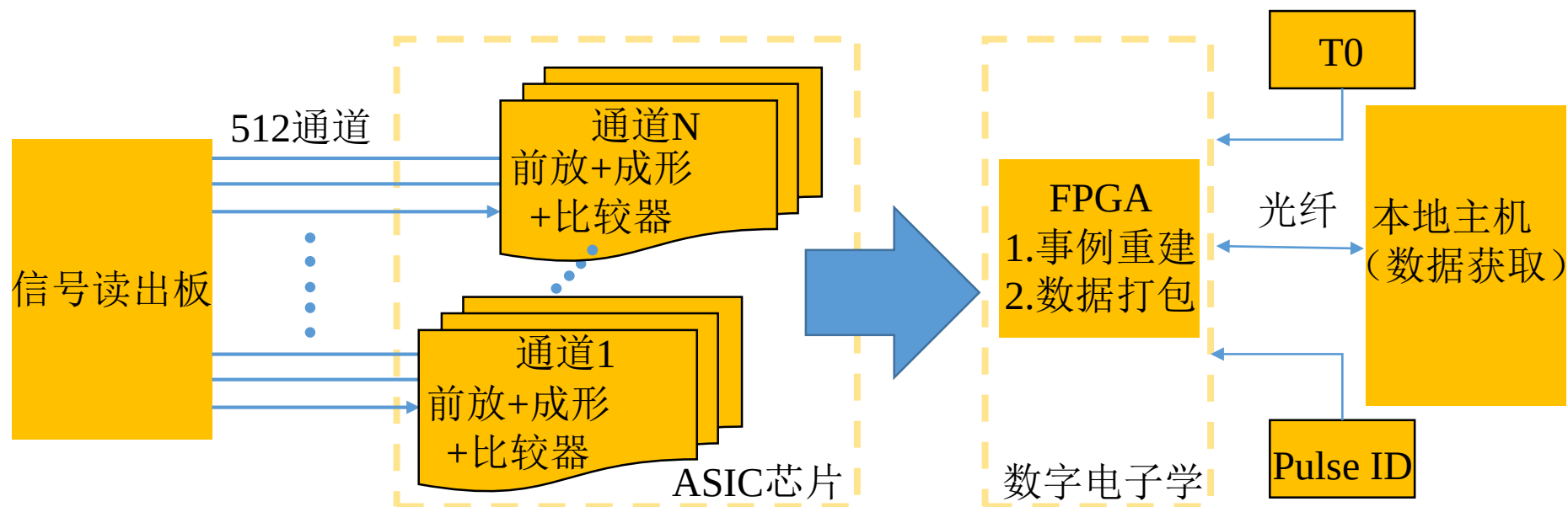


根据镀膜工艺特点，设计和建立专用大面积镀膜机，镀膜面积1500mm $\times$ 500mm

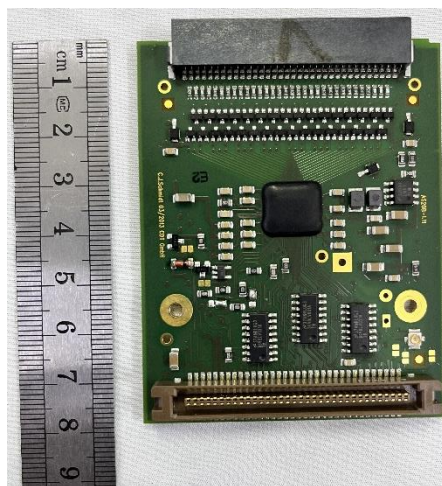


大面积陶瓷GEM中子探测器

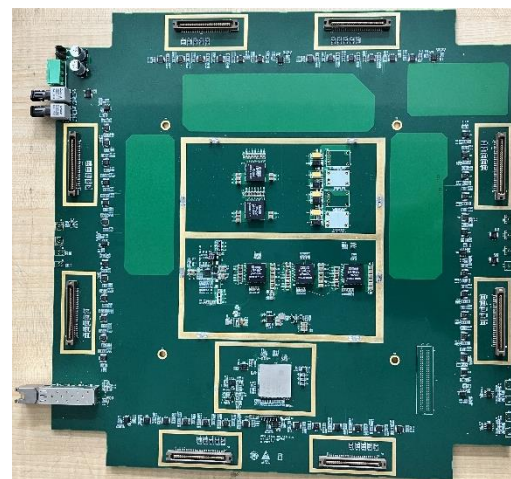
快速读出电子学



512通道读出板



AS-20 ASIC芯片

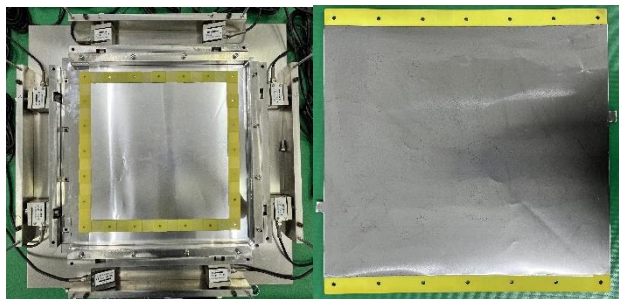


自研数字电子学

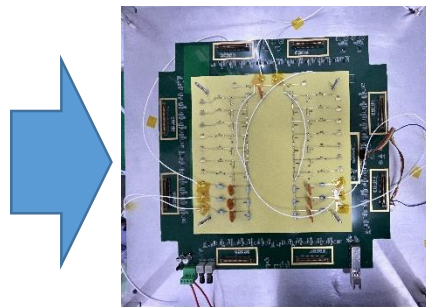
大面积陶瓷GEM中子探测器

探测器组装

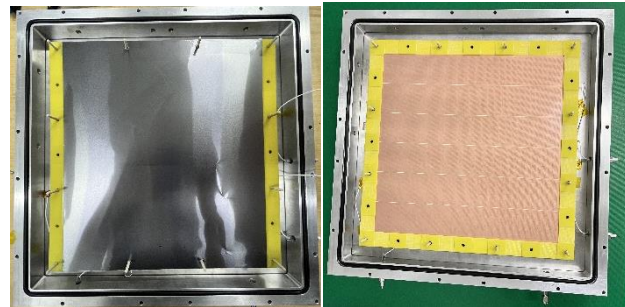
涂硼阴极制作



数字板与高压板安装



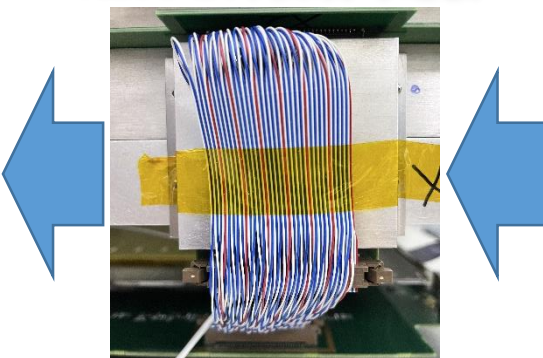
下层GEM探测器安装



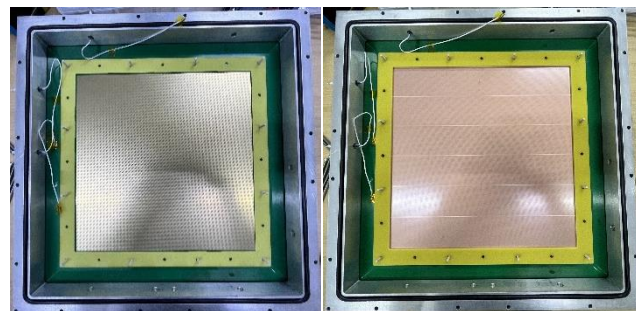
大面积陶瓷GEM中子探测器



ASIC芯片安装与连接



下层GEM探测器安装



目 录

1. 研究背景

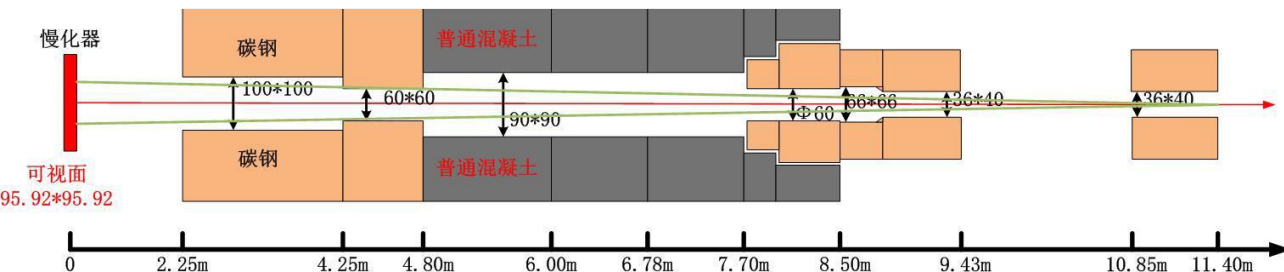
2. 大面积陶瓷GEM中子探测器

3. 中子束流实验

4. 总结与展望

中子束流实验

CSNS #20中子测试束线



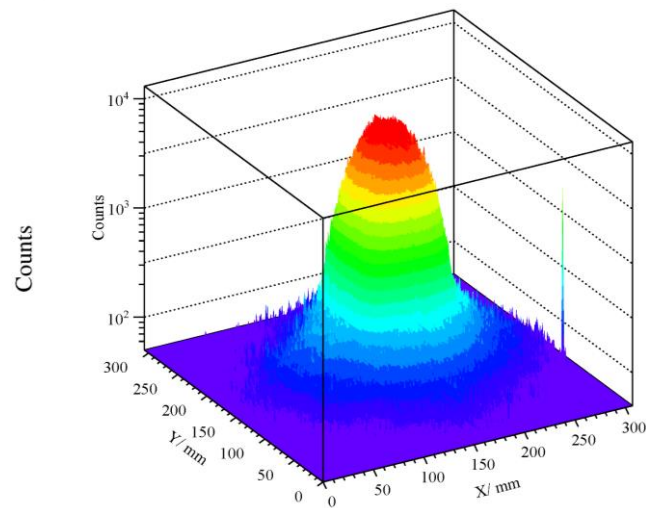
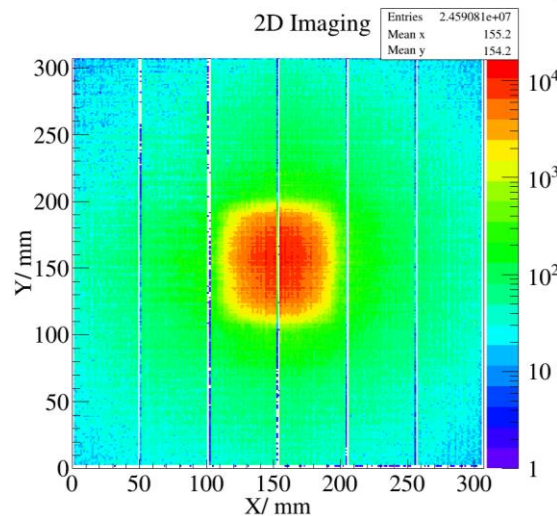
束线参数

慢化器	退耦合液氢
飞行距离	11.4m-16.4m
束斑尺寸	36mm×40mm
斩波器带宽	4.5Å

测试现场



直通束测量



束斑成像轮廓清晰;

由于束流发散, 束斑尺寸偏大;

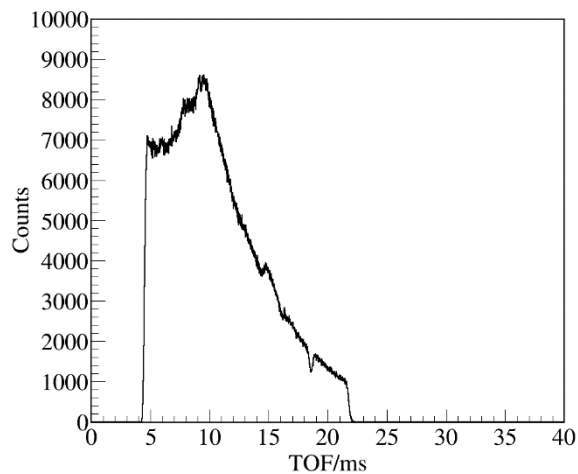
探测器存在死区, 由GEM分区引起;

中子束流实验

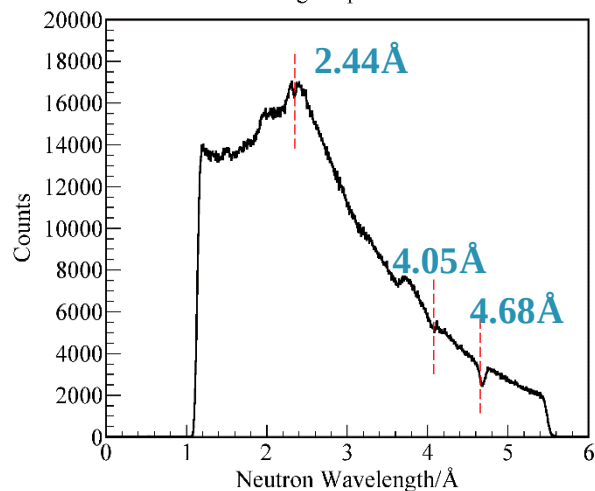
具备中子能量选择成像能力

波长测量与能量选择成像

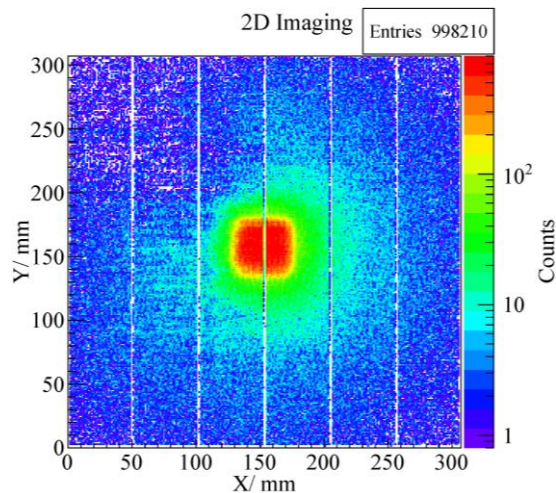
TOF Spectrum



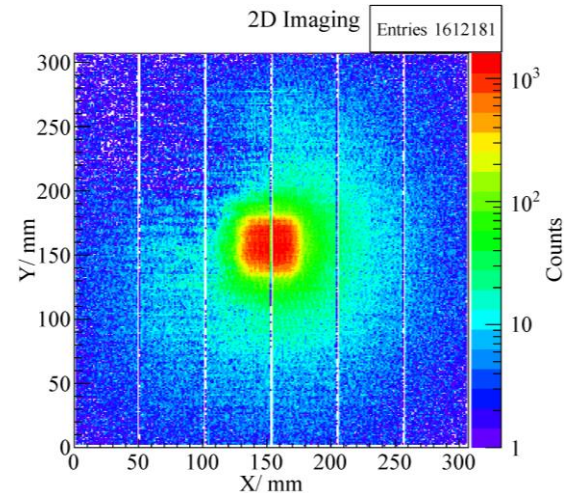
Wavelength Spectrum



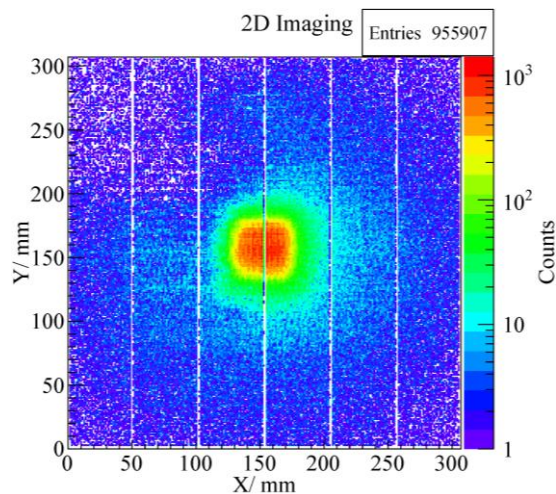
1.0 Å-1.5 Å



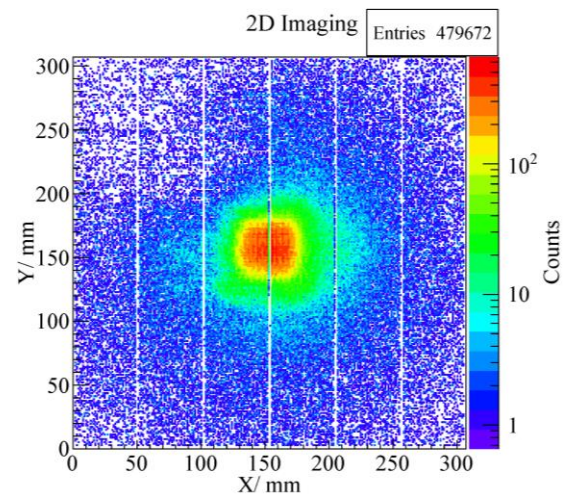
2.0 Å-2.5 Å



3.0 Å-3.5 Å

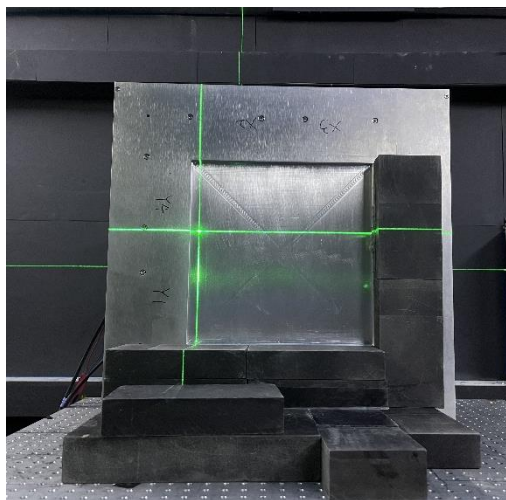


4.0 Å-4.5 Å

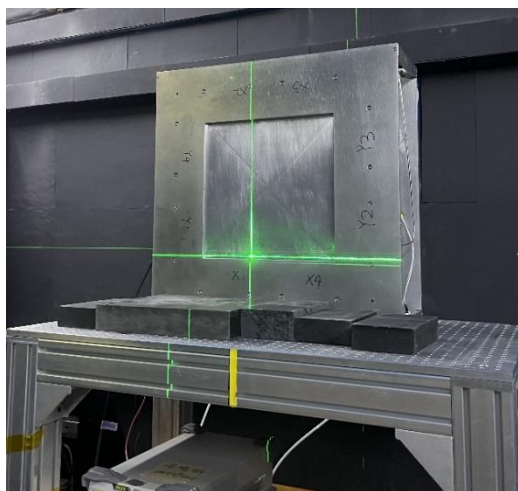
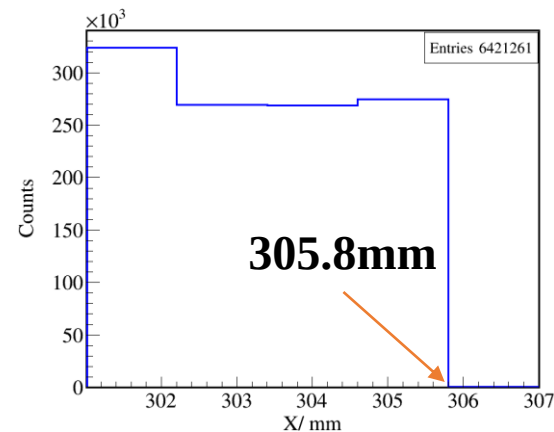
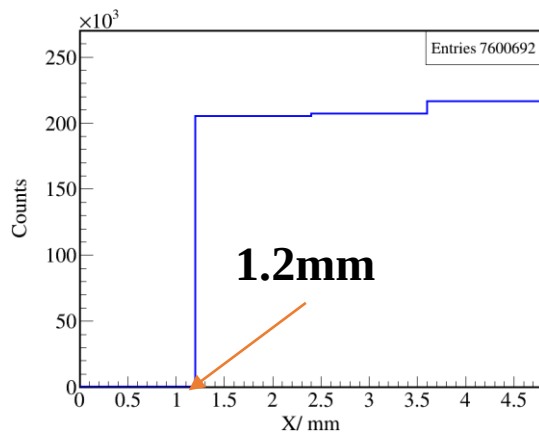


中子束流实验

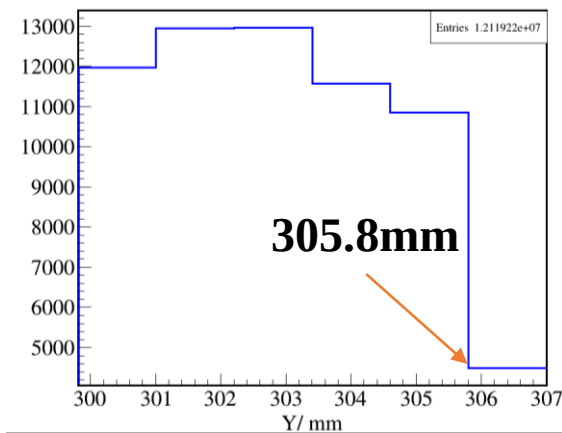
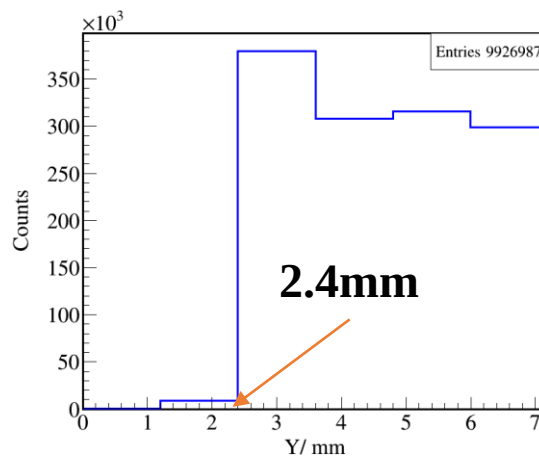
有效面积测量



X方向: $305.8\text{mm} - 1.2\text{mm} = 304.6\text{mm}$



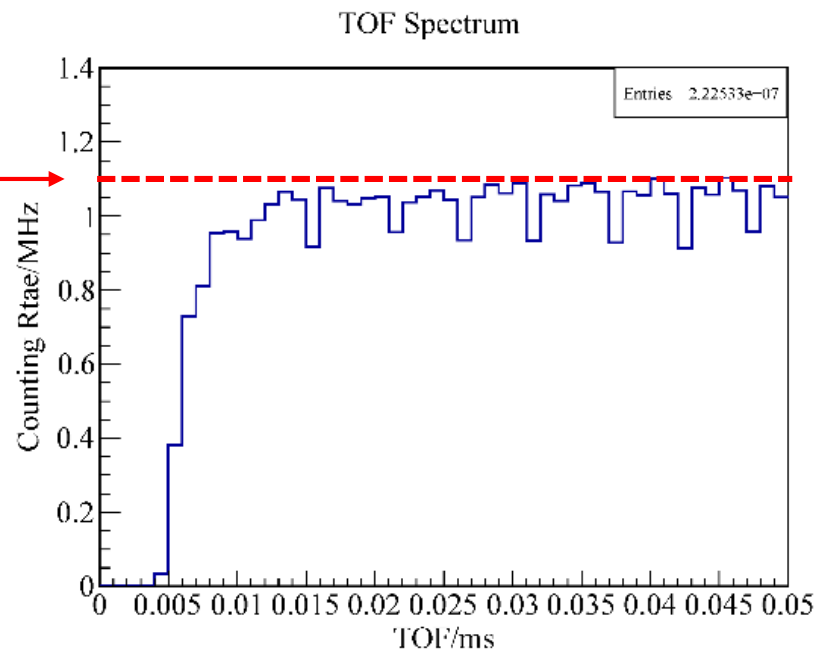
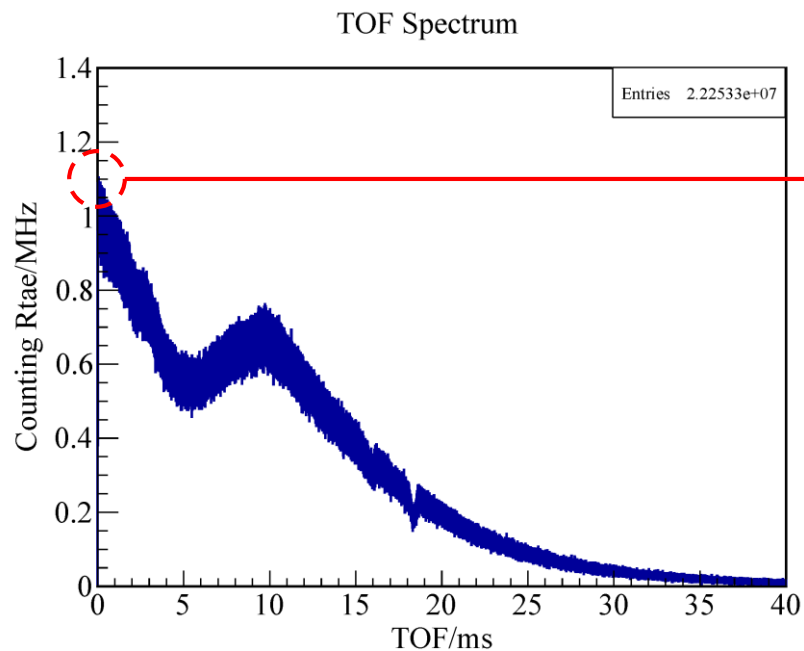
Y方向: $305.8\text{mm} - 2.4\text{mm} = 303.4\text{mm}$



有效面积: $304.6\text{mm} \times 303.4\text{mm}$

中子束流实验

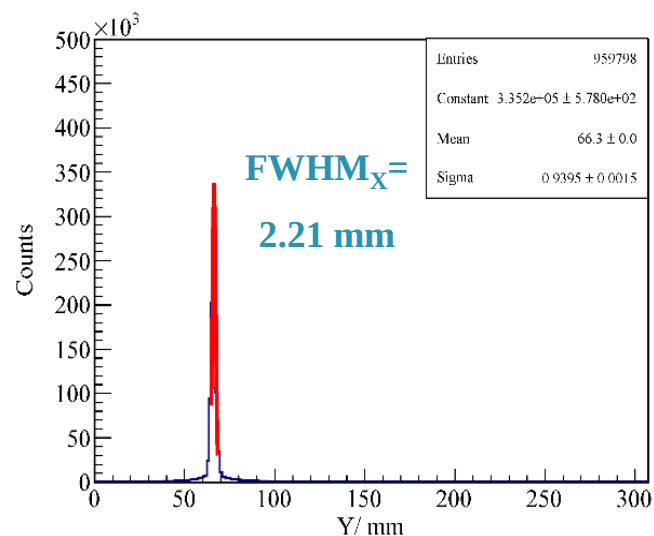
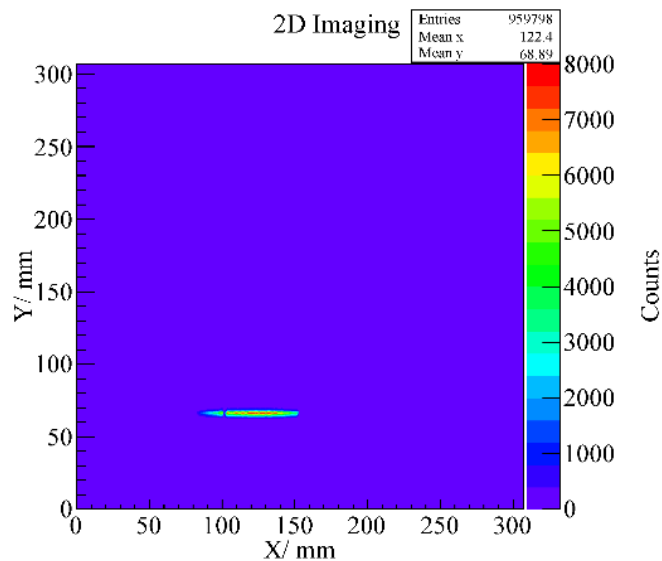
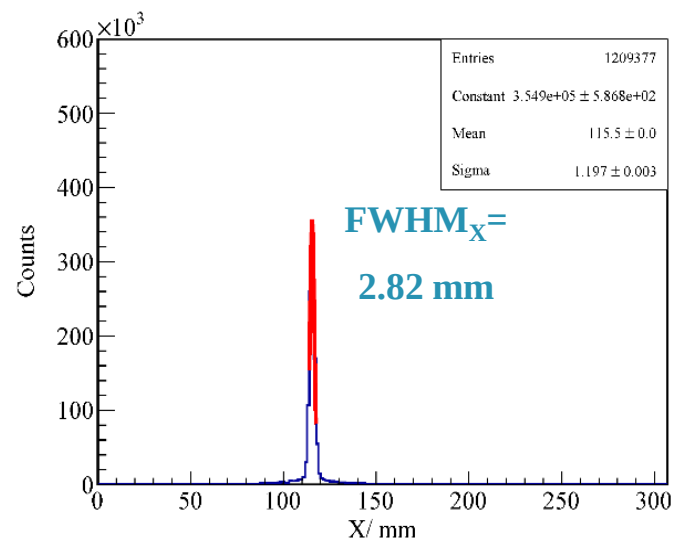
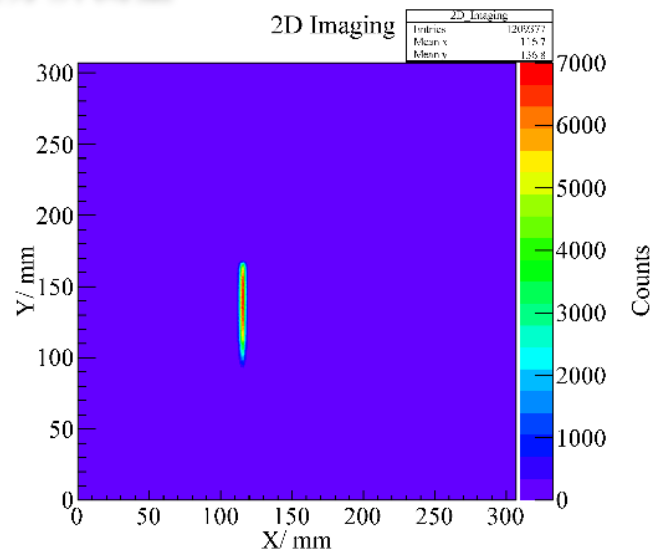
系统最高计数率测量



系统最高计数率大于**1.1MHz**

中子束流实验

位置分辨测量



XY方向的位置分辨均好于3mm

目 录

1. 研究背景

2. 大面积陶瓷GEM中子探测器

3. 中子束流实验

4. 总结与展望

总结与展望

总结：

- 成功研制了有效面积为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的大面积陶瓷GEM；
- 完成了探测器样机的研制，利用中子束流测试了探测器的关键指标，实现了大于 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 有效面积，好于 3mm (FWHM)的位置分辨，超过 1MHz 的系统计数率以及中子波长选择成像能力；
- 满足未来高计数率下中子散射测量，可用于近束中子测量（如CSNS多功能反射谱仪MR，微小角散射谱仪VSANS和能量选择中子成像谱仪ERNI）；

展望：

- 优化大面积陶瓷GEM生产工艺，减小探测器死区；
- 进一步扩大探测面积，提高探测效率；
- 优化读出方式，提高探测器性能；

THANKS