



中国物理学会高能物理分会第十一届全国委员代表大会暨学术年会

中国散裂中子源探测器研制进展

孙志嘉，周健荣，唐彬，赵豫斌，庄健，陈元柏

**散裂中子源科学中心
中国科学院高能物理研究所**

2022年08月09日

汇报提纲

01 | 中国散裂中子源简介

02 | 探测器研制进展

03 | 二期探测器预研

04 | 结束语

广泛应用的中子科学技术

广泛应用于新材料、新能源、航空航天、国防和工业等众多领域研究

中子的优势：

- I. 电中性，穿透力强，轻元素敏感，同位素分辨，有磁矩，可用于磁性微观分析。
- II. 与X射线技术互补，是研究物质微观结构的重要手段。

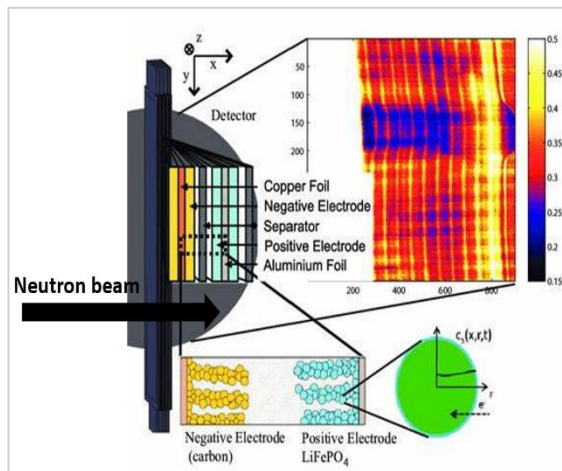
工业皇冠-航空发动机叶片



高铁车轮金属疲劳研究

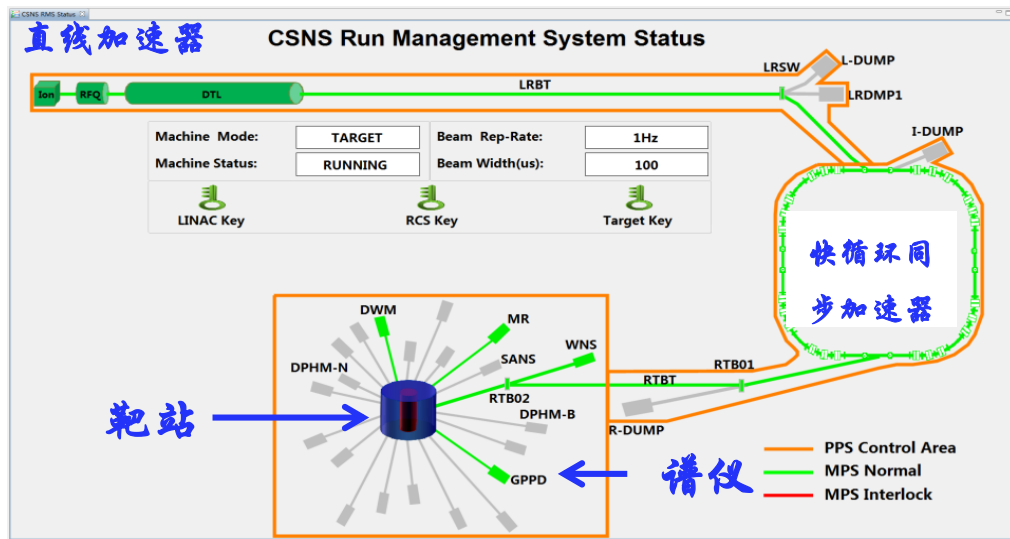


锂电池电极材料研究

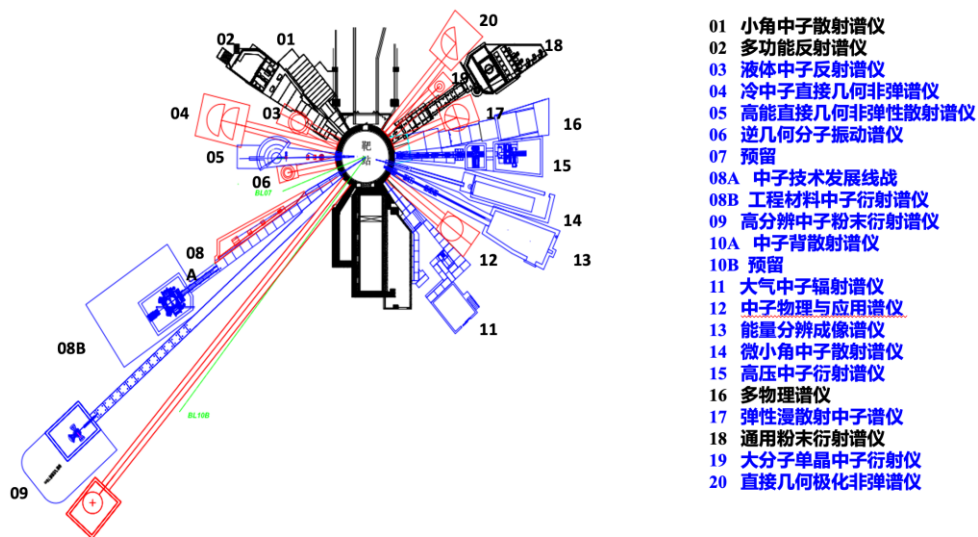


中国散裂中子源简介

十二五期间重点建设的国家重大科技基础设施



CSNS 中子谱仪规划



CSNS一、二期总体技术指标

	一期	二期
打靶质子束功率 (kW)	100	500
脉冲重复频率 (Hz)	25	25
束流平均流强 (μA)	62.5	312.5
束流能量(GeV)	1.6	1.6
RCS注入能量(MeV)	80	300
谱仪数量	3	9

荣获2021年度广东省科技进步特等奖

大湾区国家科创中心核心重大科技基础设施

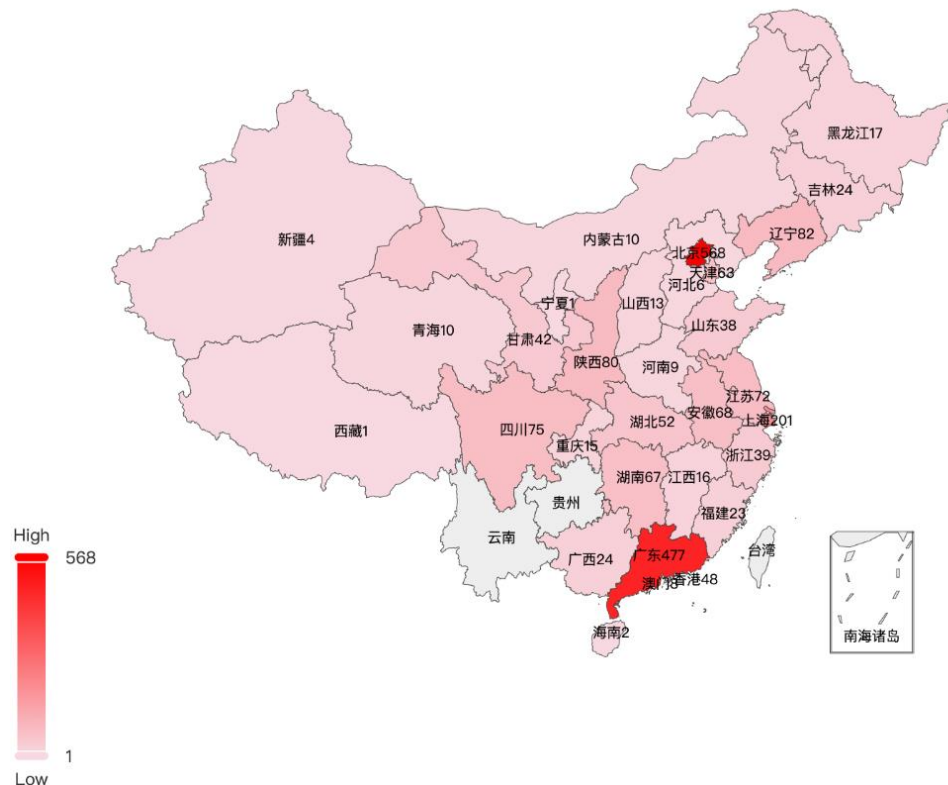


CSNS 开放运行成果

◆ 2018年以来，截止2021年底共完成六轮开放运行，注册用户超过**2600**人（包括港澳56人，国外47人），共完成**584**项课题。

◆ 重点在航空航天、磁性、量子、能源、合金、高分子、信息材料等领域，前三年的科学产出远远超出了同阶段的美国/日本散裂中子源的产出。

◆ 目前已在 Science 、 Nature Communication 、 Advanced Materials, JACS等期刊发表文章120余篇。



国际用户

德国	11	英国	13	美国	5	加拿大	3	瑞典	1	新西兰	2	澳大利亚	4
波兰	1	俄罗斯	2	法国	1	日本	1	新加坡	1	意大利	1		

汇报提纲

01 | 中国散裂中子源简介

02 | 探测器研制进展

03 | 二期探测器预研

04 | 结束语

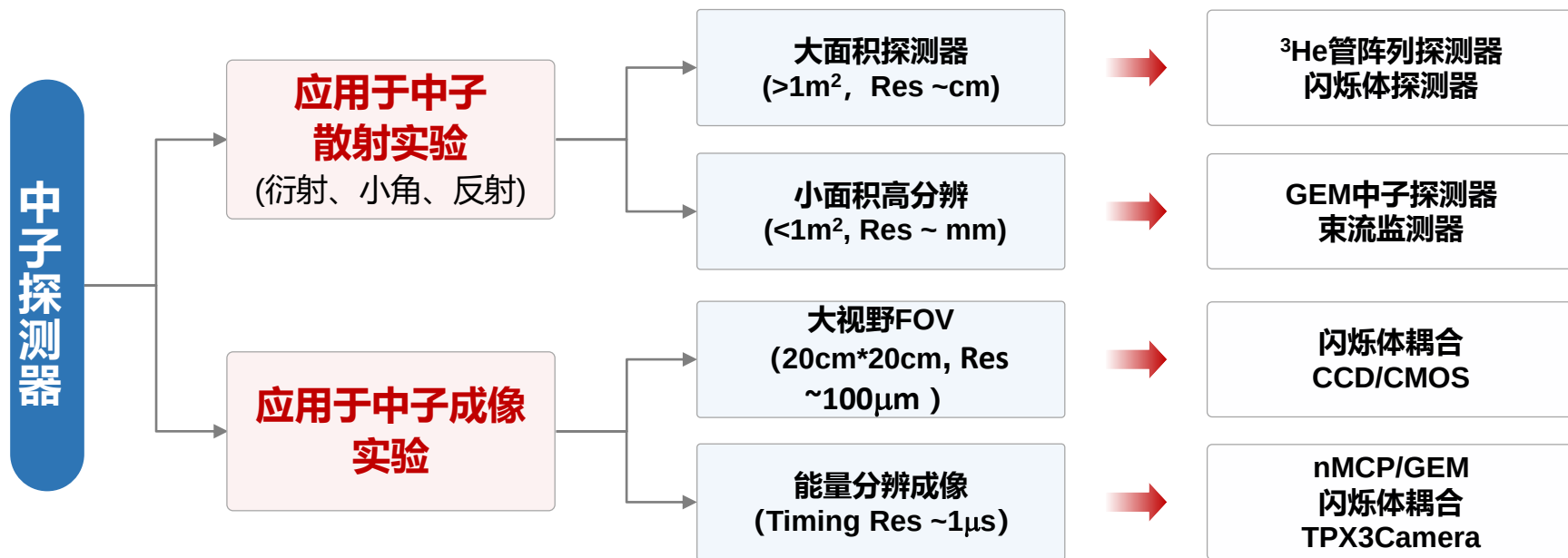
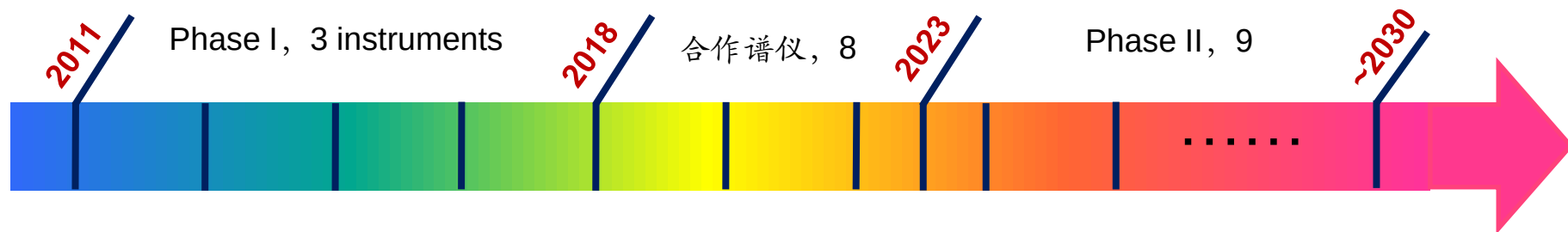
CSNS探测器与电子学团队介绍

团队目标：为CSNS及国内中子大科学装置提供自主的中子探测器，解决制约中子科学发展的“卡脖子”问题。

团队组成：研究员4人，副高15人，总人数40+，专业涵盖探测器、电子学、控制、机械及工艺，平均年龄小于38岁



CSNS探测器发展规划



建立工程化技术体系，并不断优化

- CSNS规划总20台谱仪，其中一期1台，合作谱仪5台，二期5台，共计11台谱仪使用 ^3He 管阵列探测器，总 ^3He 管数目近1万支。
- 难点：真空打火、电子学散热、空间狭小、系统噪声与通道一致性等。

模块化、流程化、标准化



技术方案不断升级、避免卡脖子、降低成本

- 进口产品寻求国产化替代。
- 关键器件供应适配多品牌，避免单一来源。
- 设计和工艺流程标准化，培育多家机械制造工厂。
- 硼铝合金材料计划升级到内涂碳化硼铝板，降低加工难度和成本。
- 弱电连接尽量前端化、光纤化，降低噪声。

成功应用到多台中子散射谱仪

- 已建成2台运行，非弹谱仪也将于年底完成，覆盖了大气、高、低真空不同工作环境下的3种主要技术方案。
- 为当前合作谱仪以及未来CSNS II谱仪探测器建设提供了技术参考。

低真空下小角谱仪探测器系统



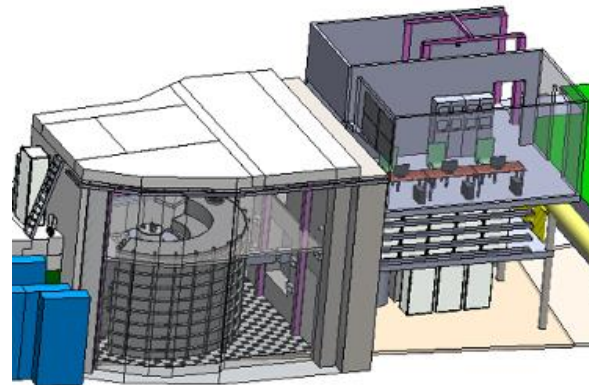
2018年8月验收运行

大气环境下多物理谱仪探测器系统



2021年7月验收运行

高真空下非弹谱仪探测器系统



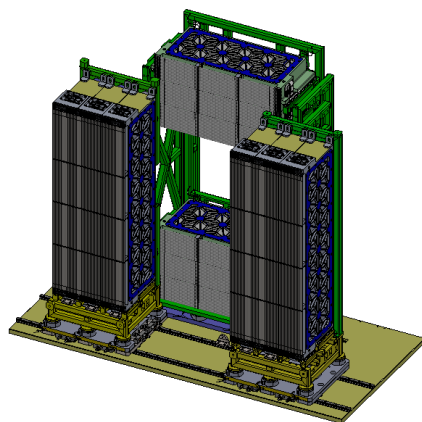
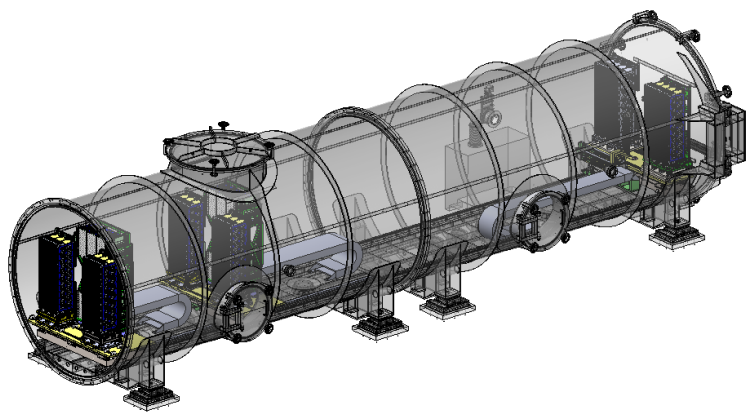
预计2022年12月研制完成

大面积 ^3He 管阵列探测器

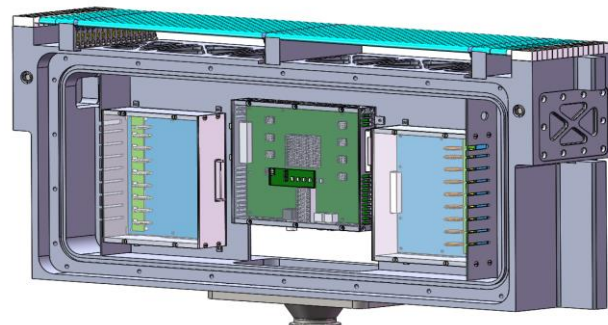
微小角谱仪探测器系统(10Pa)

已完成探测器系统工程设计和制造, 预计2022年底完成

微小角谱仪探测器系统设计



探测器单元模块设计



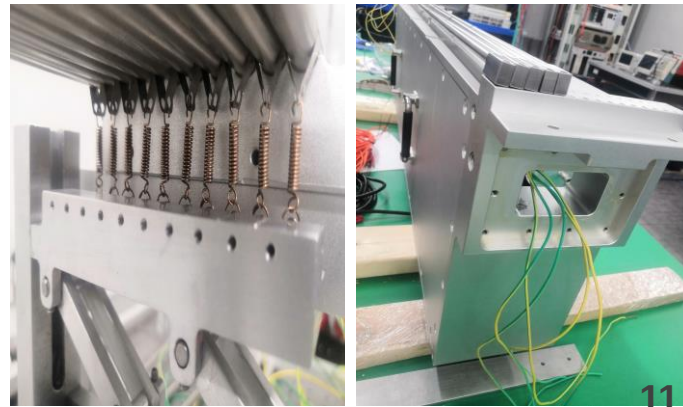
真空下密封单元模块加工



密封检漏



^3He 管固定、引线

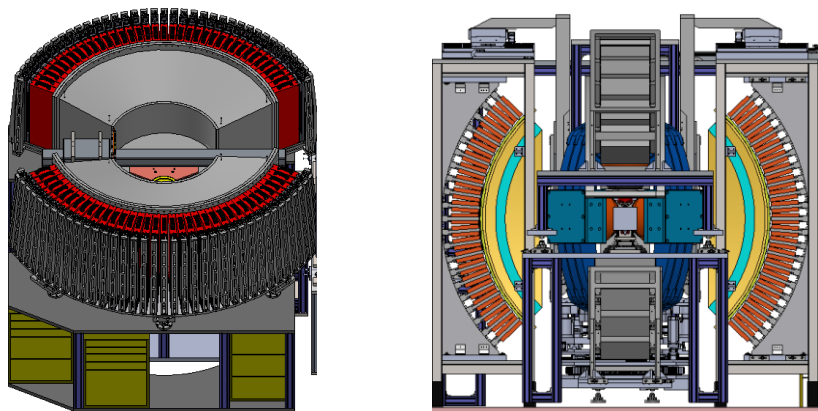


大面积 ^3He 管阵列探测器

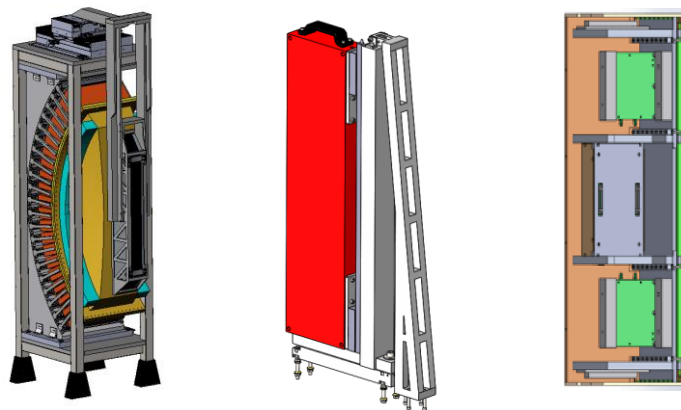
高压谱仪、高分辨谱仪探测器系统(大气环境)

已完成探测器系统工程设计，陆续开始生产制造，预计2023年底完成

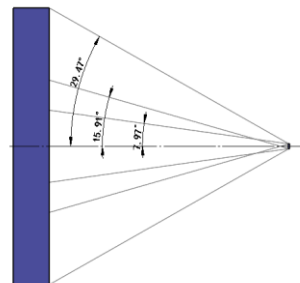
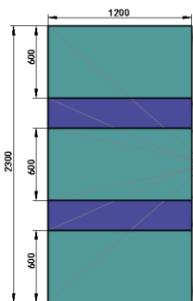
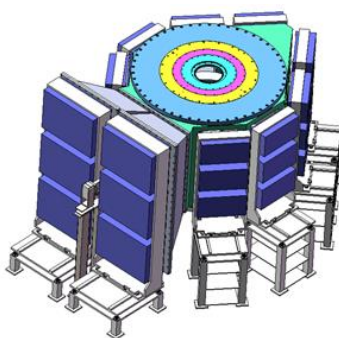
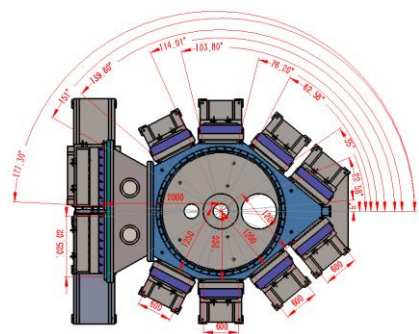
高压谱仪探测器系统设计



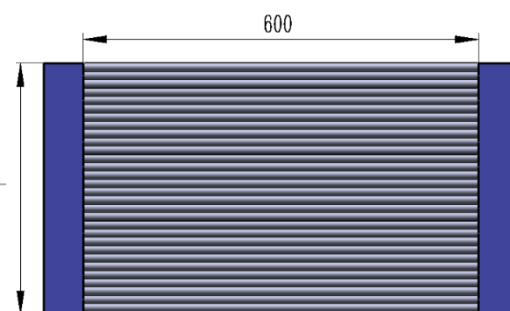
探测器单元模块设计



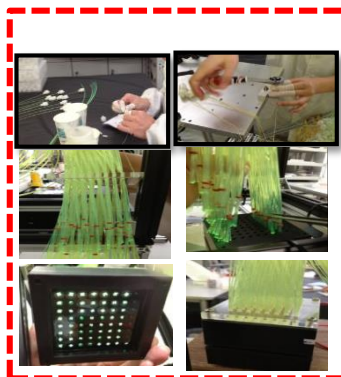
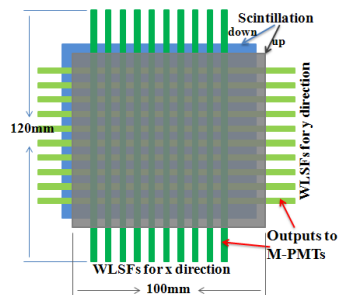
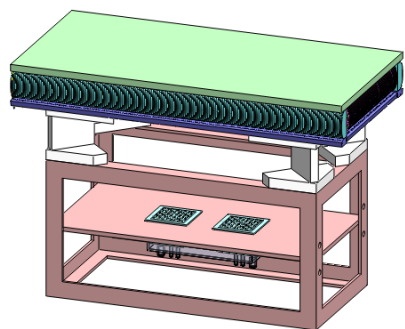
高分辨谱仪探测器系统设计



探测器单元模块设计



大面积闪烁体探测器($^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$)



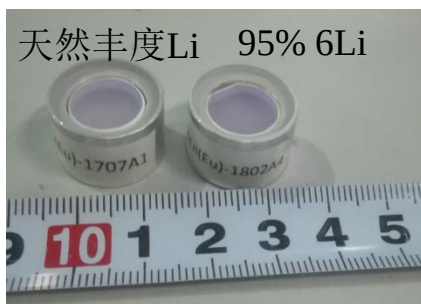
时间	2010年~2018年	2018年~2022年	2018年~2024年
具体研究内容	闪烁体探测器V1 ➢ 实现0-→1的突破; ➢ 替代^3He管, 实现较低成本的大空间立体角覆盖; ➢ 专用ASIC读出电子学, 实现探测器的集成化;	闪烁体探测器V2 原版设计的升级: ➢ SiPM读出, 解决探测效率不均匀问题; ➢ 光纤90度弯折, 解决探测器阵列拼接死区过大问题; ➢ 关键器件国产化: • 透明陶瓷$\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ • 国产$\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$粉屏 • SiPM读出器件	闪烁体探测器V3 超薄全新结构 (国际上无同类型探测器) ➢ 探测器整体厚度$<10\text{cm}$, 简化安装工艺, 降低成本造价; ➢ 斜入射闪烁屏结构, 提高探测效率 ($50\% @ 1\text{\AA}$)
对应工程任务	GPPD主探测器	GPPD主探测器 (升级版) 能量分辨中子成像谱仪 高压谱仪部分探测器	应力谱仪主探测器 (V3.1)
拓展应用	快中子成像探测器 (塑闪阵列+SiPM读出)、 Li玻璃光纤束流监测器 (Li玻璃光纤+SiPM读出)、等		

大面积闪烁体探测器($^6\text{LiF/ZnS(Ag)}$)

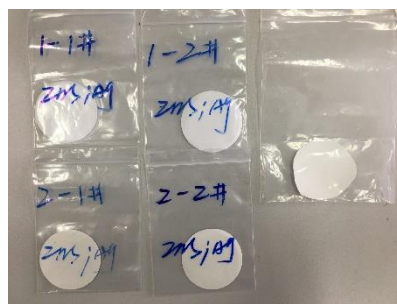
国产中子敏感闪烁体研究



透明 LiF/ZnS(Ag) 陶瓷样品



LiI(Eu) 晶体

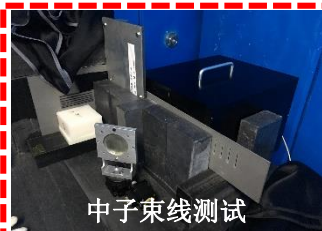
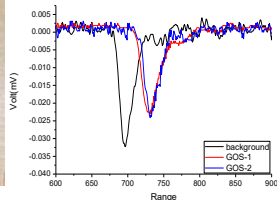


国产 LiF/ZnS(Ag) 样品

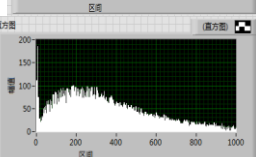
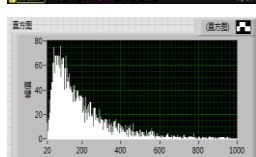
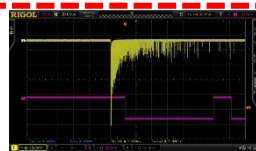
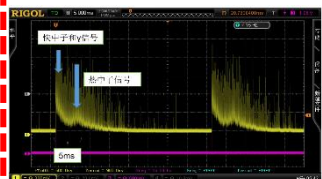
- 核电子学与探测技术国家重点实验室 择优项目，寻找替代进口 LiF/ZnS(Ag) 中子闪烁屏的国产材料，2015年开始滚动支持；
- 硅酸盐所李江项目组---透明 LiF/ZnS 陶瓷闪烁体；
- 硅酸盐所李国峰项目组---- LiI(Eu) 晶体
- 国内科润光电公司----国产化的 LiF/ZnS(Ag) ；



Alpha 源(^{241}Am) 测试



中子束线测试

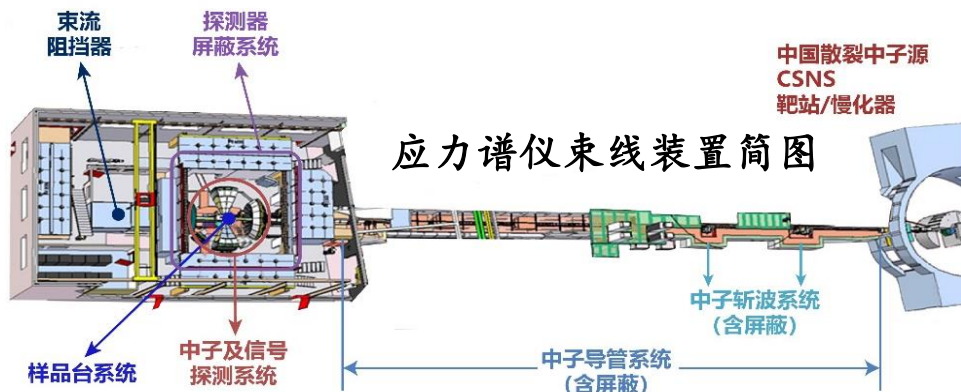


- 测试周期长：测试了陆续有~30个样品，测试结果反馈后，厂家改进方案，再寄新样品测试
- 单次的测试时间长，耗费人力，正在制定标准化测试流程：首先利用Alpha 源 (^{241}Am) 初步测试其性能，然后较好的样品上20号测试束，利用单色后的中子，测试其中子发光和探测效率；
- 结果：陶瓷闪烁屏的信号时间和传统的 LiF/ZnS(Ag) 无差异，但目前光产额较小，未达到实际应用需求；
- LiI(Eu) 晶体光产额够大，探测效率也较高，但晶体易潮解，目前还在尝试大面积平板化后如何封装；
- 科润光电公司的 LiF/ZnS(Ag) ，和进口 LiF/ZnS(Ag) 性能基本相当，仅光产额略小，**有望未来工程应用**

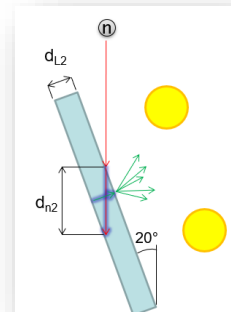
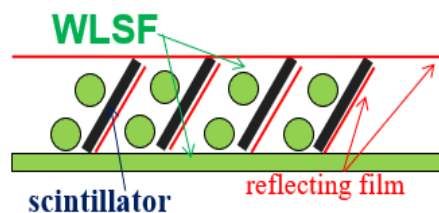
不同样品的出射电荷谱

大面积闪烁体探测器($^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$)

探测器方案: $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{WLSF} + \text{SiPM}$

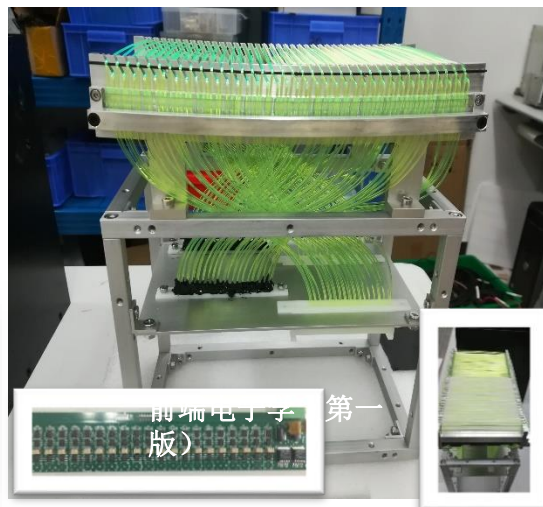
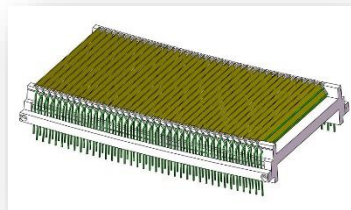
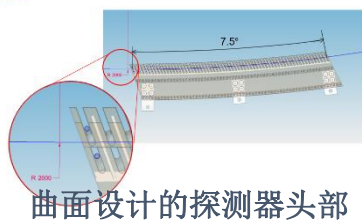


The oblique incidence detector



➤ 结构上斜入射和垂直入射相比, 可以有效提高中子探测效率

斜入射百叶窗结构的闪烁屏 像素 $3\text{mm} \times (50 \sim 100) \text{mm}$



探测器参数指标要求

➤ Detection efficiency:

$>40\% @ 1\text{A}$

➤ Position Resolution:

$3\text{mm}(\text{H}) \times 50\text{mm}(\text{V})$

➤ Time Resolution:

$< 1\mu\text{s}$ (参考GPPD主探测器)

➤ Count Rate:

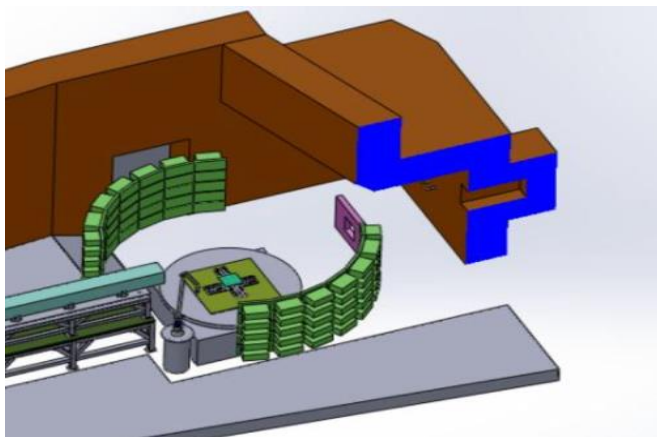
80KHz (参考GPPD主探测器)

➤ Module size:

$200\text{mm} \times (100 \sim 50) \text{mm}$

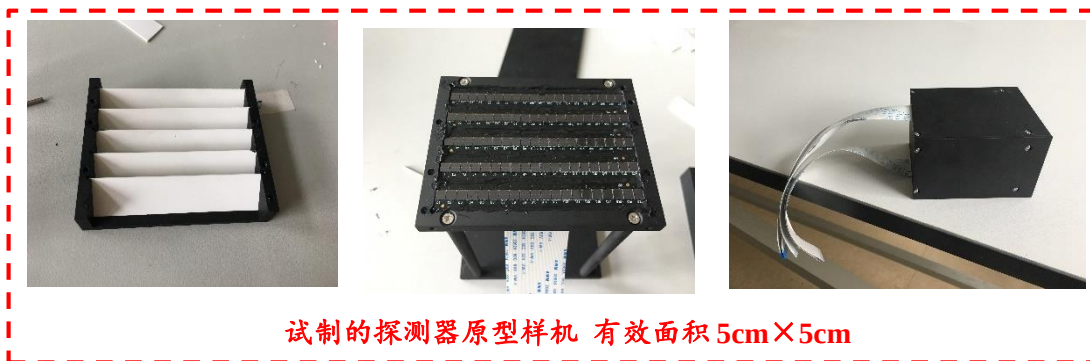
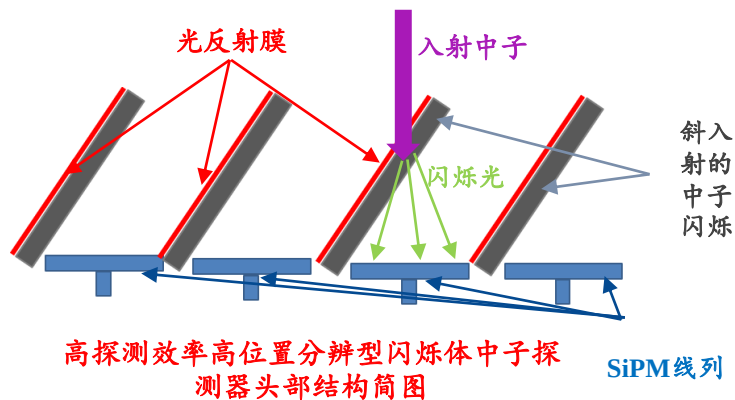
大面积闪烁体探测器($^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$)

ERNI散射室内衍射探测器布局简图

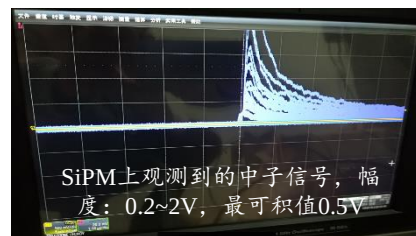
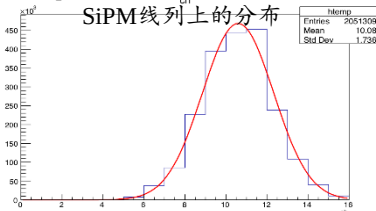


探测器指标需求

衍射探测器	与样品距离	2 m
	分辨率 $\Delta d/d$	$< \sim 0.6\%$ at 90 degree
	探测器指标需求	闪烁体中子探测器: 90度Bank: pixel size 3mm x 3mm, efficiency 40% @ 1 Å 其它Bank: pixel size 3mm x 50 mm, efficiency 40% @ 1 Å
	探测器覆盖位置	水平覆盖角度: $5 \sim 170^\circ$ 垂直覆盖角度: $\pm 20^\circ$



Alpha源测试得到的闪烁光在SiPM阵列上的分布



- 中子入射到闪烁屏后产生的闪烁光被3~5个SiPM单元收集到, 根据SiPM阵列的光信号强弱分布, 利用几何重心法计算出入射中子的位置信息;
- 难点: 基于ADC的ASIC电子学无可用的成熟产品, 自主研发难度较大; SiPM和电子学通道数较多, 成本较高;

陶瓷GEM中子探测器

发明了中子探测专用陶瓷气体电子倍增器(GEM)

2013年提出研制中子探测专用陶瓷GEM：几乎不含氢，中子散射少，杂散本底低，抗辐照，耐高温烘烤，物理化学性能稳定 (*Chinese Physics C*, 2016, 40(7):076002)

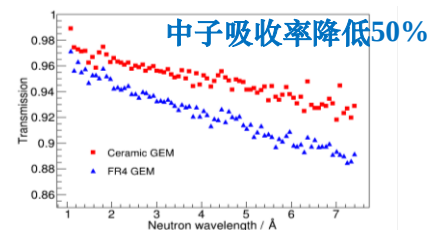
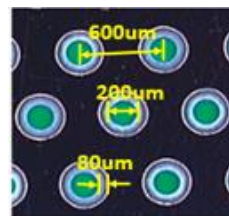
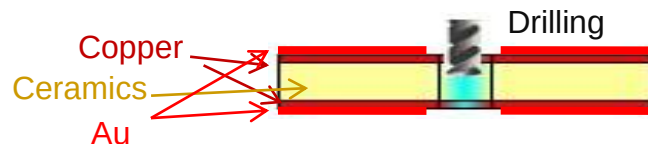
工艺参数：

◆ 基材：复合陶瓷

◆ 加工技术：标准的PCB 机械钻孔

◆ 膜参数：厚度 $200\mu\text{m}$ ，孔直径 $200\mu\text{m}$ ，孔间距 $600\mu\text{m}$ ，孔精度小于 $50\mu\text{m}$ ，Rim $80\mu\text{m}$

◆ 成品率： $>80\%$ (*NET*, 2020, 52(6):1277-1281)

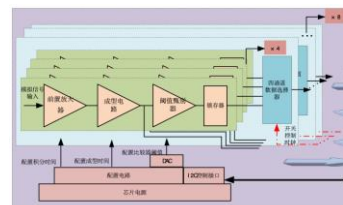
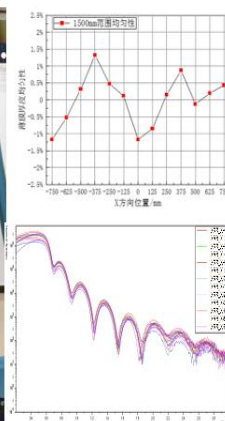
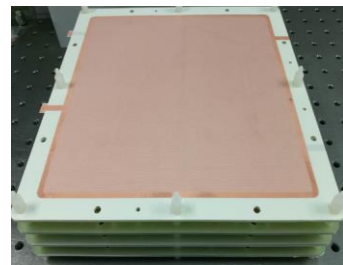


中子转换层硼膜制备

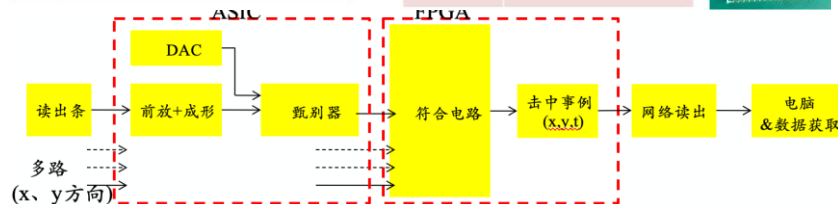
建立了国内首台、国际上双面镀硼面积最大、最快的专用装置

ASIC芯片研发和快电子学研制

惠州金百泽——“厚型气体电子倍增器电路板技术成果转化”科技成果鉴定会

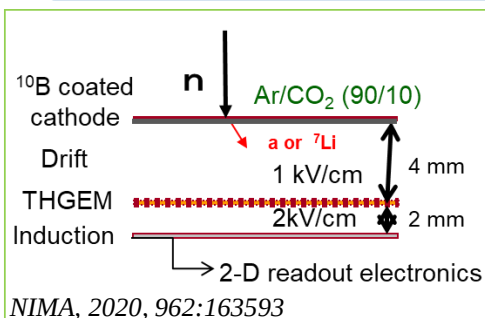


性能参数	设计指标
输入电荷	$\pm 10\text{fC} \sim \pm 400\text{fC}$
单通道计数率	大于 1MHz
通道数	32
输出特性	阈值比较后数字信号 2.5V TTL 外置DAC可调

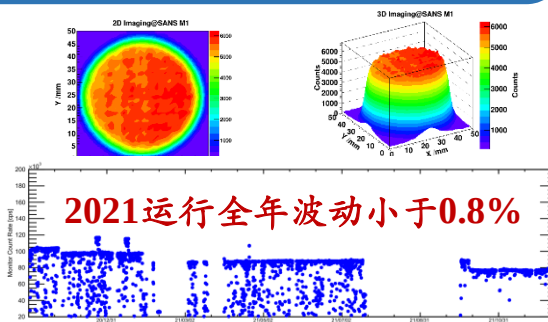


陶瓷GEM中子探测器

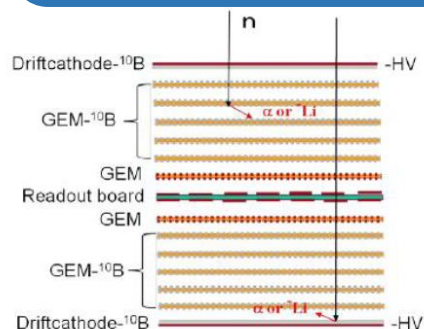
高通量二维位置灵敏中子束流监测器，中子通量可达 $10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，一期安装7台，已稳定运行4年



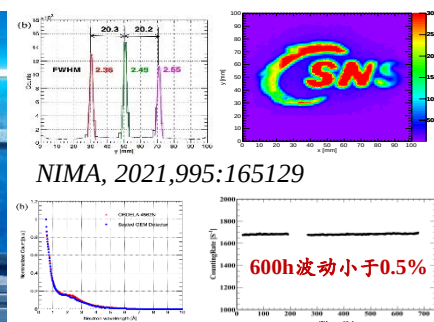
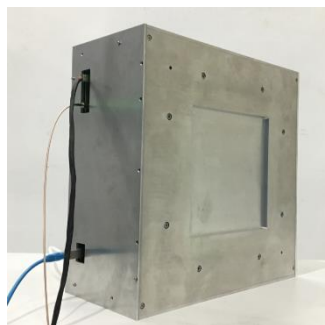
Parameter	Specification
Active Area	50mm*50mm
Max. Neutron Flux	$10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
Pixel size	1.56 mm
Efficiency@1.8Å	0.1 %
Max Counting Rate	1.7 MHz
Working mode	Real-time



最高效率的大面积GEM中子探测器

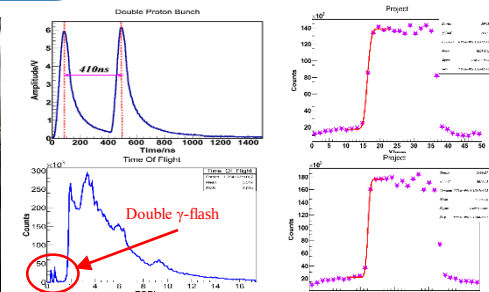
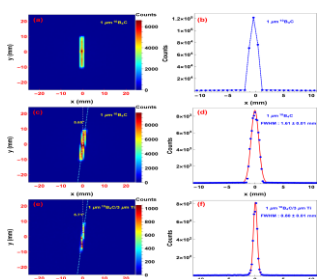
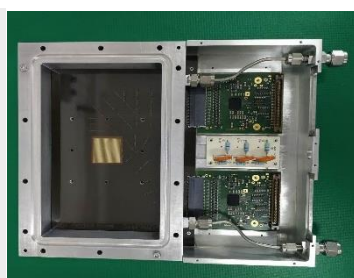
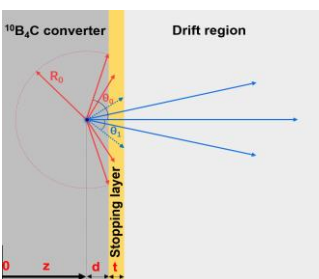


性能参数	设计指标
有效面积	200mm*200mm
探测效率@4.8Å	≥40%
位置分辨率	≤3mm(FWHM)
电子学总计数率	≥1MHz
陶瓷GEM膜 (自研)	Pitch: 600μm, hole: 200μm, thickness: 200μm, 10μm GEM
磁转板层	10B丰度: >96%, 厚度: 1.2 μm
高压电源	1路负高压, 经电阻链分配
读出板	0.8mm kapton 柔性电路
条周期	0.925mm
读出电子学	64路/ASIC × 8块 + FPGA + 网络读出
通道数	256路(X) + 256路(Y) = 512路
工作气体	Ar/CO ₂ 或Ne/ICuH ₁₀



IEEE TNS, 2021, 99:1-1

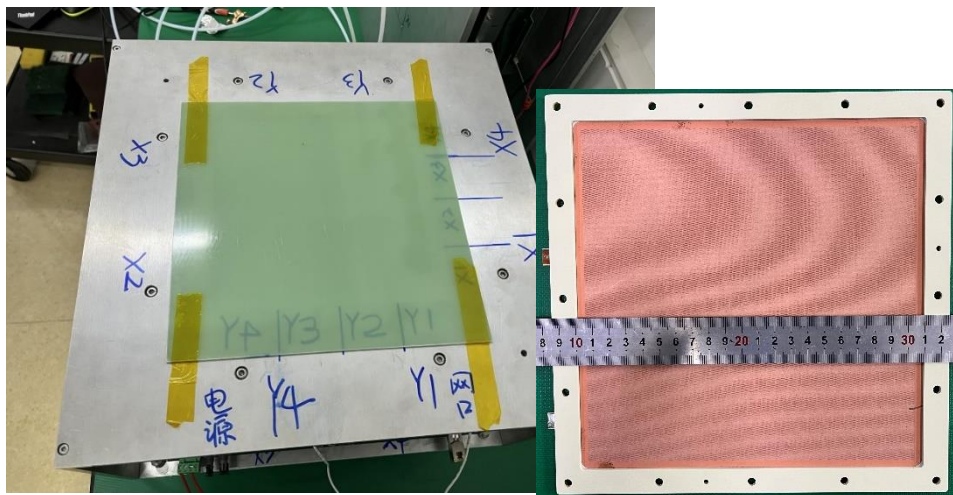
提出阻止层概念，突破探测器分辨率极限，实现热中子0.8mm，快中子2.1mm



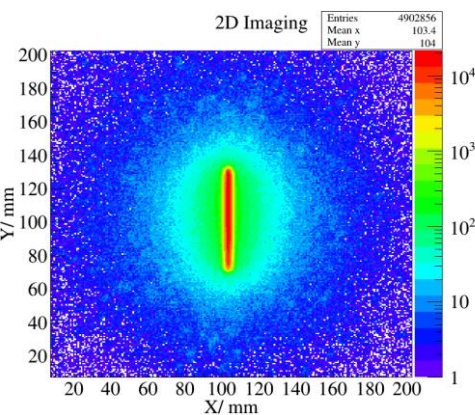
用于成像谱仪成像探测器和微小角谱仪中心探测器

大面积高分辨GEM探测器：

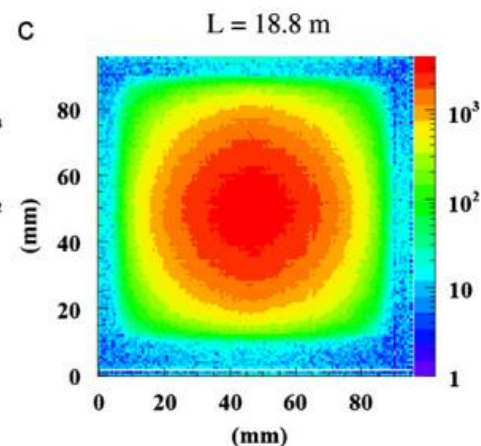
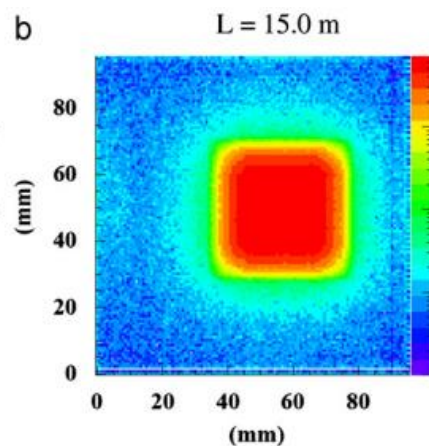
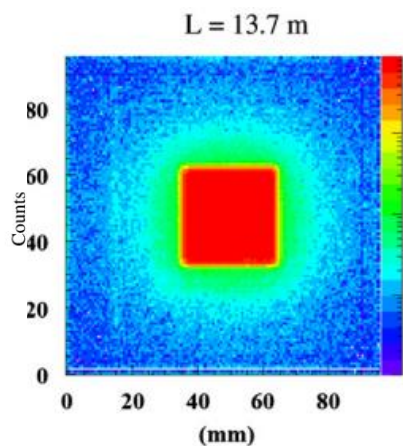
- 读出通道：256+256=512
- 像素尺寸：0.8 mm
- 探测器布局：双层GEM，双面读出
- 转换层： $1.0 \mu\text{m}$ enriched B_4C
- 工作气体：Ar/CO₂ (90/10)
- 读出PCB类型：三角形像素，厚度0.8mm



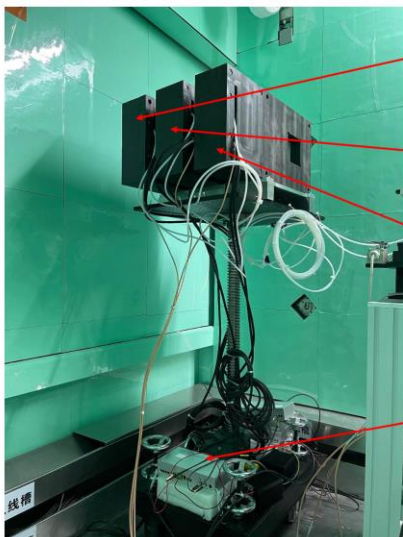
位置分辨测试



BL20号线靶的小孔中子成像实验室



完成了大气中子辐照谱仪3台GEM探测器研制

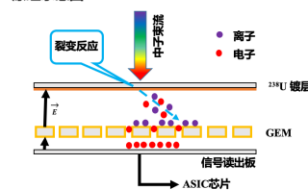


1. ^{238}U -GEM 快中子探测器
飞行距离：19915 mm
2. C_2H_4 -GEM快中子探测器
飞行距离：20095 mm
3. natB_4C -GEM 热中子探测器
飞行距离：20275 mm

读出电子学

1. ^{238}U -GEM 快中子探测器

原理示意图



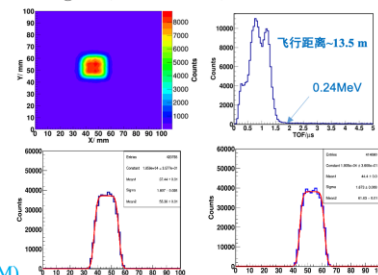
探测器外观



主要技术指标

- >有效面积：100mm×100mm
- >读出通道数：64(X)+64(Y) = 128
- >像素尺寸：1.56mm×1.56mm
- >转换层材料：~1 mg/cm² ^{238}U 镀层
- >位置分辨：5 mm (FWHM), HV= -300V
- >响应能区：0.1MeV以上, 探测效率~10⁻⁵

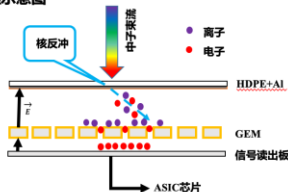
实验测试@BL20, 20mm方孔限束, 时间: 2021.11.15-21



束斑轮廓清晰, 位置分辨约4.3 mm (FWHM)

2. C_2H_4 -GEM快中子探测器

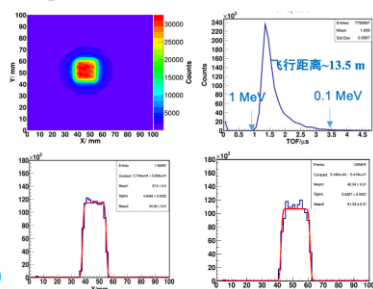
原理示意图



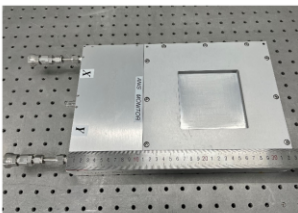
主要技术指标

- >有效面积：100mm×100mm
- >读出通道数：64(X)+64(Y) = 128
- >像素尺寸：1.56mm×1.56mm
- >转换层材料：2 mm C_2H_4 +0.2mm Al (阻止层)
- >位置分辨：3 mm, HV= -1500V
- >响应能区：0.1MeV 以上, 探测效率~10⁻⁴

实验测试@BL20, 20mm方孔限束, 时间: 2021.11.15-21



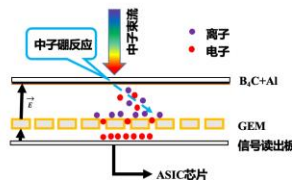
探测器外观



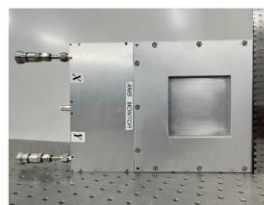
束斑轮廓清晰, 位置分辨约2.1 mm (FWHM)

3. natB_4C -GEM 热中子探测器

原理示意图



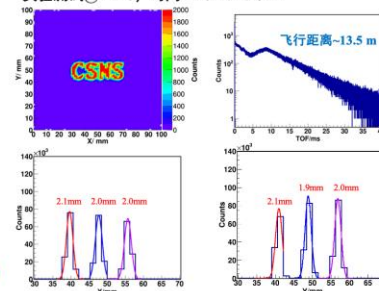
探测器外观



主要技术指标

- >有效面积：100mm×100mm
- >读出通道数：64(X)+64(Y) = 128
- >像素尺寸：1.56mm×1.56mm
- >转换层材料：0.1 $\mu\text{m}^{239}\text{B}_4\text{C}$ + 2 μm Al (阻止层)
- >位置分辨：3 mm, HV= -1600V
- >响应能区：~meV- keV, 探测效率~10⁻⁴

实验测试@BL20, 时间: 2021.11.15-21



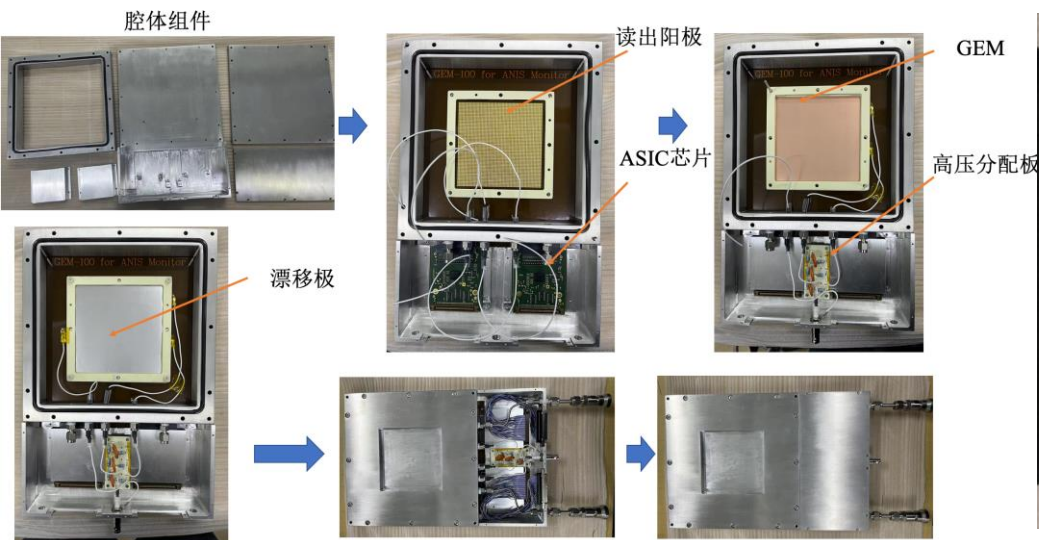
成像清晰, 位置分辨约2.0 mm(FWHM)

陶瓷GEM中子探测器

高通量二维位敏中子束流监测器

完成GEM50 和GEM100 各10台设计、加工、组装和调试。

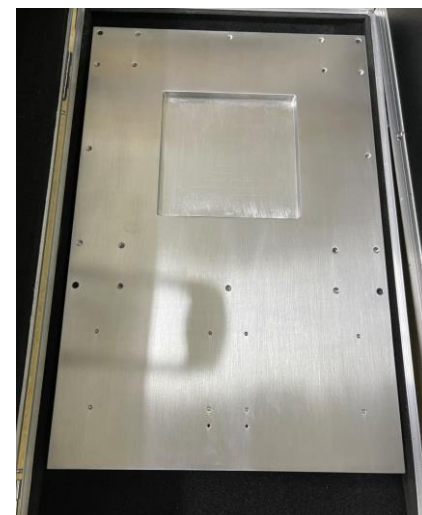
监测器实验室组装、调试



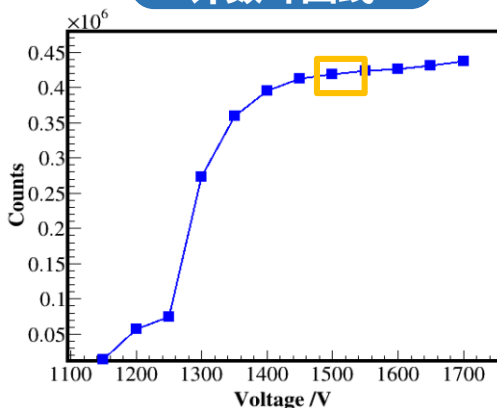
GEM50, 10台



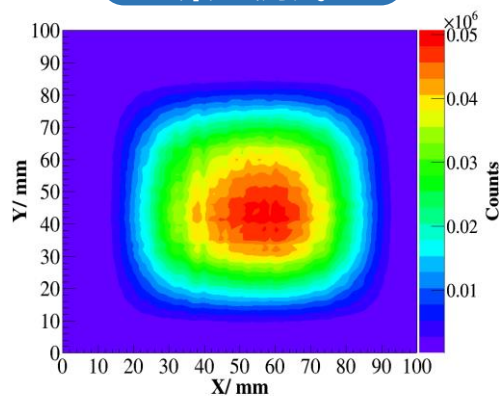
GEM100, 10台



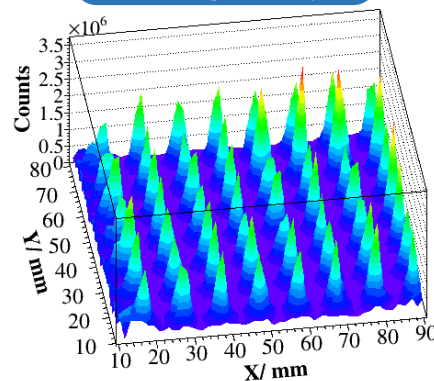
计数坪曲线



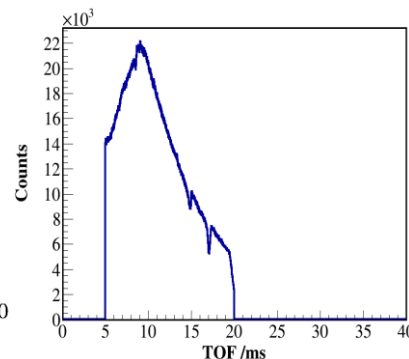
束斑测试



均匀性测试



TOF谱形测试



陶瓷GEM中子探测器

研制了多种探测器，成功应用到国内、外多个大科学装置和实验

英国散裂中子源ISIS VESUVIO谱仪
GEM探测器JINST(2021)

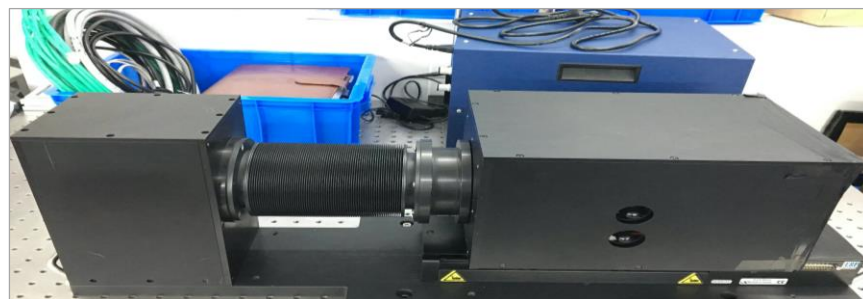
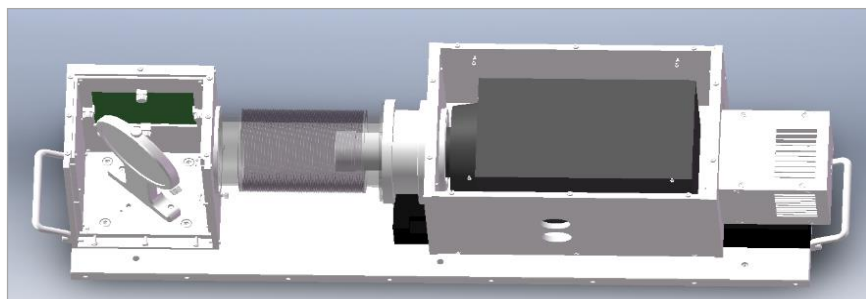


2021年入选国家“十三五”科技创新成就展

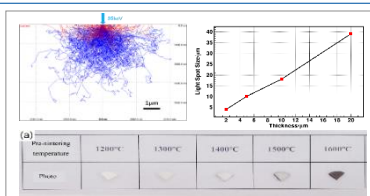


瞄准中子成像前沿实验需求，发展多种高空间分辨和时间分辨成像探测器

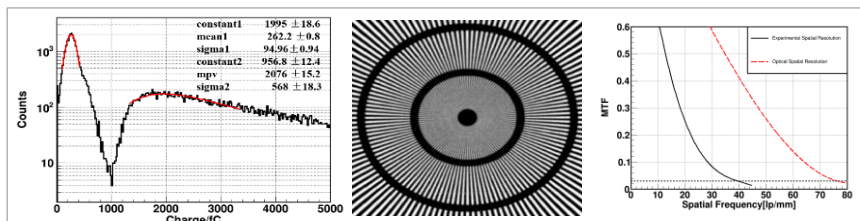
通用型中子成像探测器，视野和分辨率可调



微米级超高分辨中子成像探测器，发明了微米级GOS:Tb透明陶瓷闪烁体，光输出相较PSI高出23%

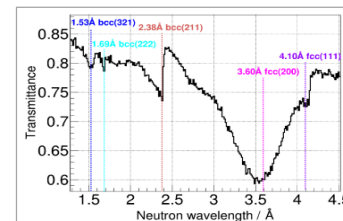
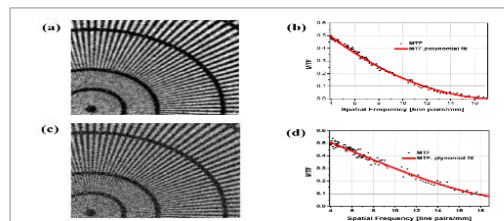
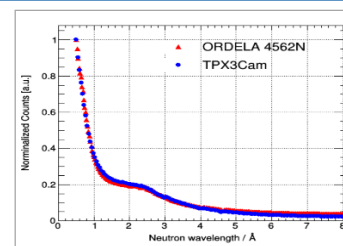
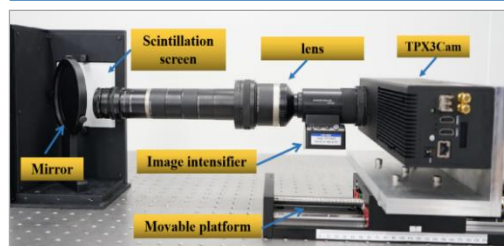


GOS闪烁体模拟和设计



中子束流测试结果 13 μm @38 lp/mm

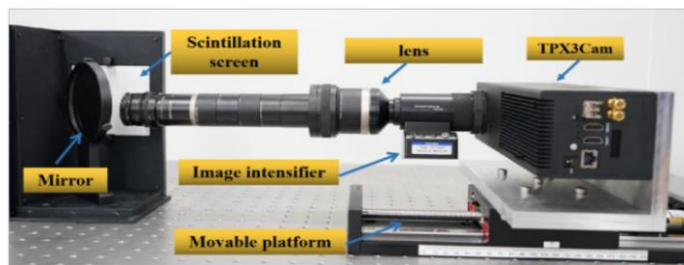
能量分辨中子成像探测器，可实现微妙级高时间分辨和微米级高空间分辨率，波长分辨约1%



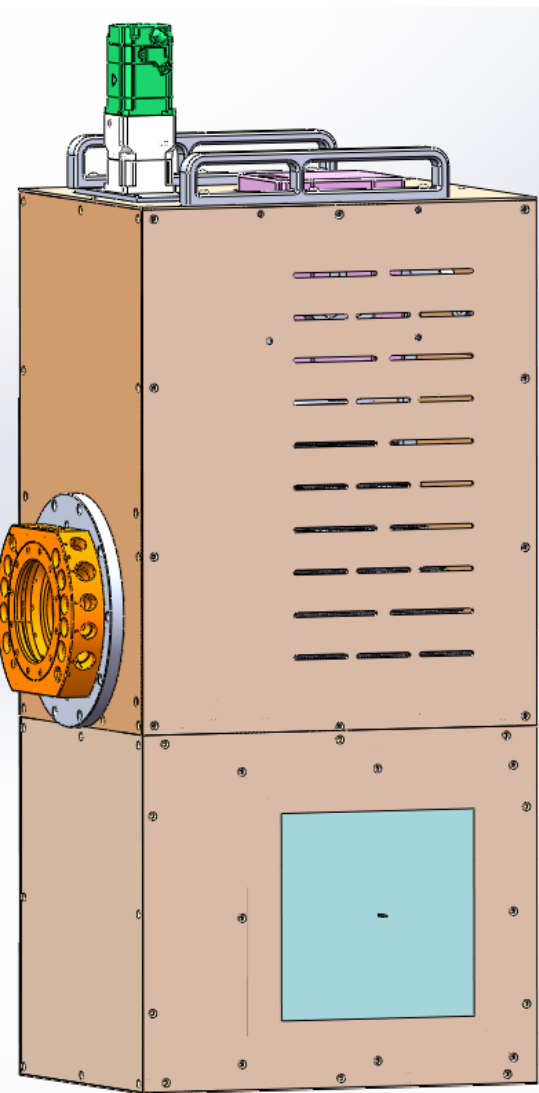
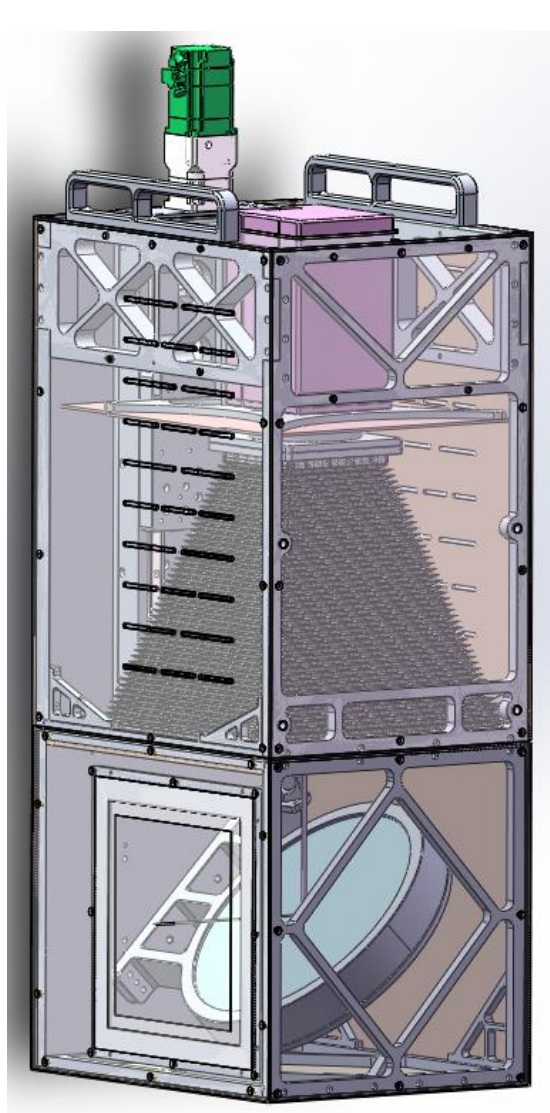
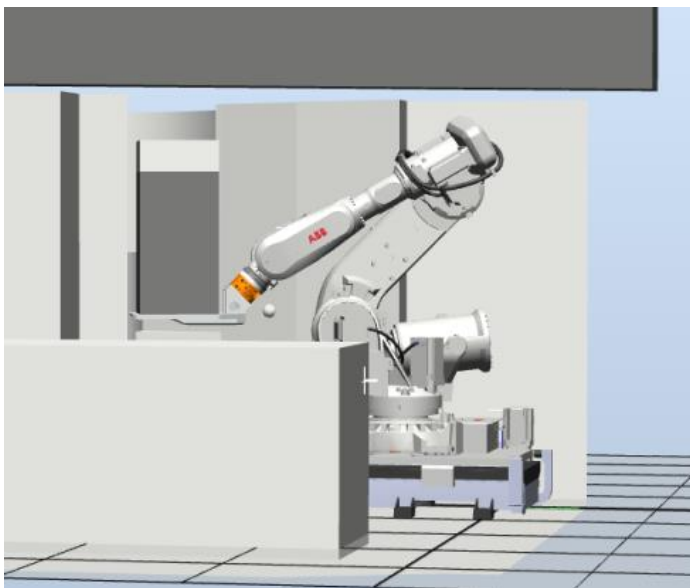
最新结果：20 μm (25 lp/mm)，时间分辨 $\sim 1 \mu\text{s}$

中子成像探测器

闪烁屏耦合高速相机，实现时间分辨/能量分辨，用于中子成像谱仪

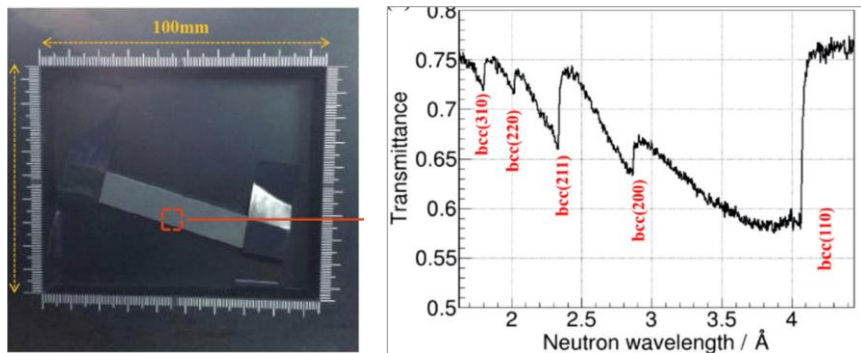


镜头放大倍数	视野	拍摄距离	空间分辨	时间分辨
0.14	100mmX100mm	470mm	400 μm	$\sim 1 \mu\text{s}$
0.28	50mmX50mm	242mm	200 μm	$\sim 1 \mu\text{s}$
0.5	28mmX28mm	423mm	110 μm	$\sim 1 \mu\text{s}$
1	14 mmX14 mm	343mm	55 μm	$\sim 1 \mu\text{s}$

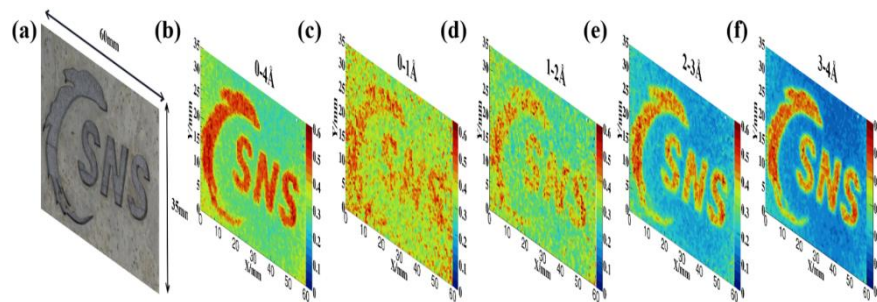


- 成功开展了多项工业和国防领域应用，打破了国外技术封锁，提供了国际先进的技术方案，解决了能量分辨中子成像谱仪“卡脖子”问题。

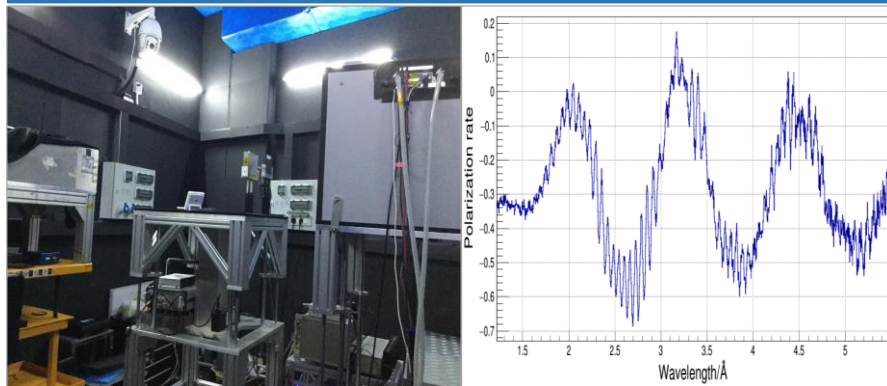
布拉格边中子成像实验(陈洁)



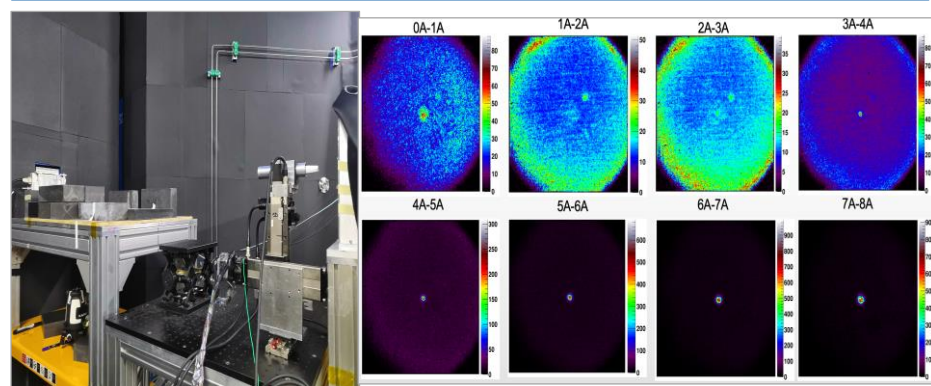
能量选择中子成像



中子极化成像(王天昊)



聚焦毛细透镜(易天成)



汇报提纲

01 | 中国散裂中子源简介

02 | 探测器研制进展

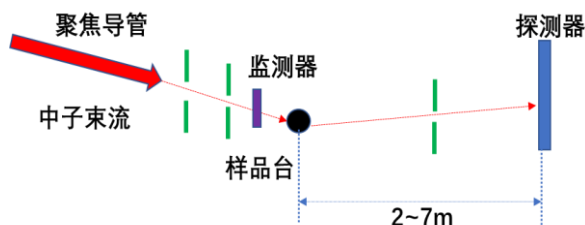
03 | 二期探测器预研

04 | 结束语

二期探测器预研

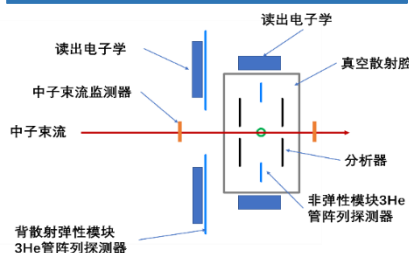
二期预计有6台谱仪使用 ^3He 类中子探测器

液体中子反射仪



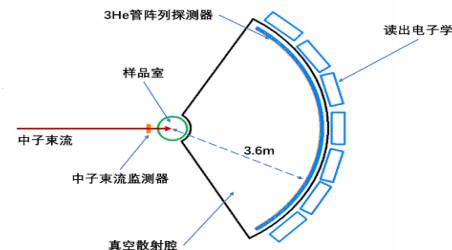
^3He -GEM探测器:
400mm×400mm, ^3He 气体8atm
难度大, 需专门研制

逆几何化学振动谱仪



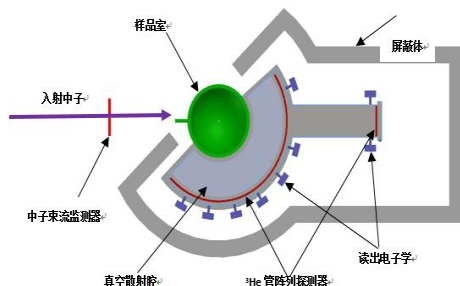
^3He 管探测器:
非弹(方管): 0.84平米, 2.5mm×10mm, 长度0.3米, 共280只(**难度大, 需专门研制**)
弹性: 0.3平米, 直径8mm, 长度0.45米, 共80只

冷中子直接几何非弹性谱仪



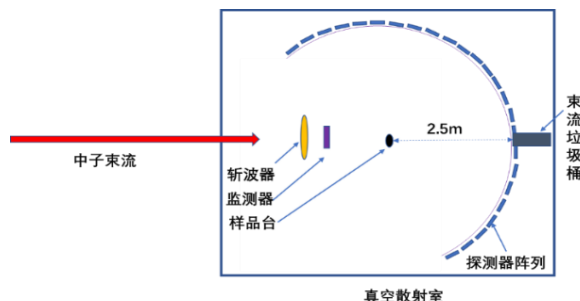
^3He 管探测器:
21平米, 直径1英寸, 长度3米, 共280只

直接几何极化非弹性谱仪



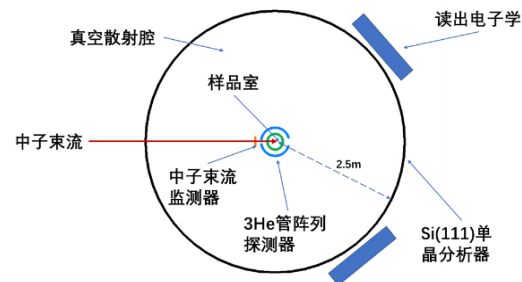
^3He 管探测器:
13平米, 直径1英寸, 长度2米, 共264只

弹性漫散射中子谱仪



^3He 管探测器:
7平米, 直径1/2英寸, 长度1米, 共552只

中子背散射谱仪

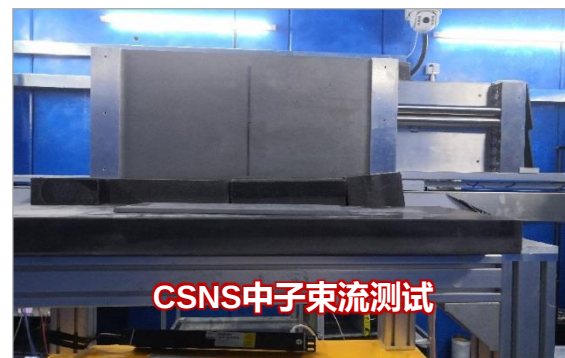
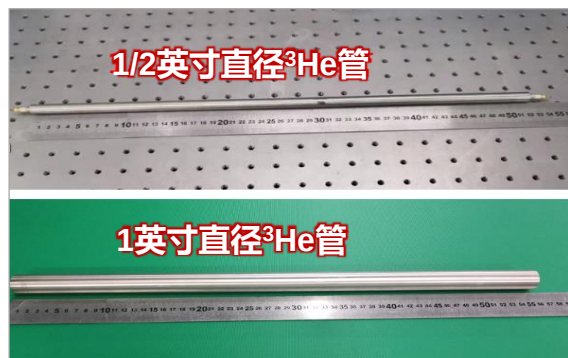


^3He 管探测器:
0.44平米, 直径1/2英寸, 长度0.15米, 共240只

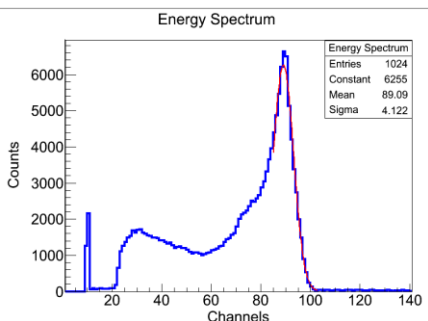
二期探测器预研

开展位置灵敏 ^3He 管国产化研究 (Plan B)

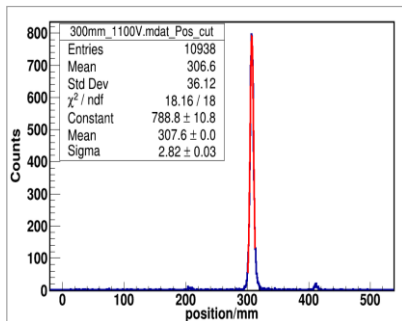
应对美国禁运风险，确保CSNS II顺利建设和已建成谱仪稳定运行。



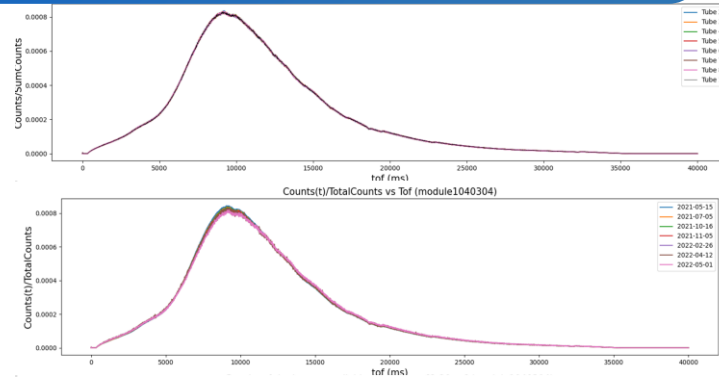
能量分辨率 10.9%



位置分辨率6.7mm



多物理谱仪安装1个模块(0403), TOF谱与进口管子一致



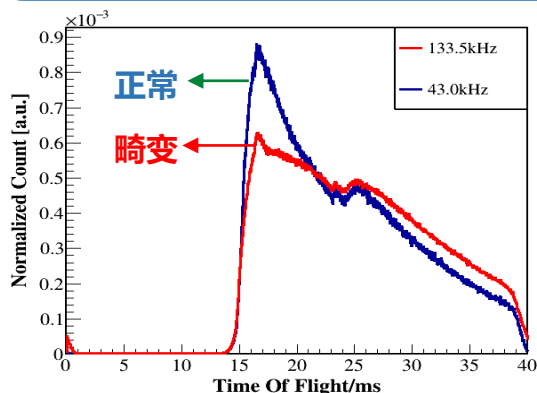
成功研制了常用的3种规格 ^3He 管，经中子束流测试，结果表明和国际上同规格指标相当
一旦美国禁运，可迅速启动Plan B，实现国内批量生产 ^3He 管，打破国际封锁。

二期探测器预研

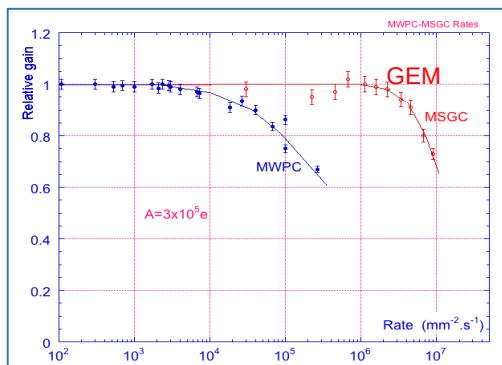
研发高计数率、高效率GEM中子探测器，满足液体反射谱仪需求。

面对CSNS二期中子谱仪通量的大幅提升，基于丝室的传统探测器已经达到极限，急需寻找新型高计数率探测器，将 ^3He 和GEM结合起来，实现高效率同时计数率将提高2个数量级扩展中子通量测量的动态范围，满足液体反射谱仪需求。

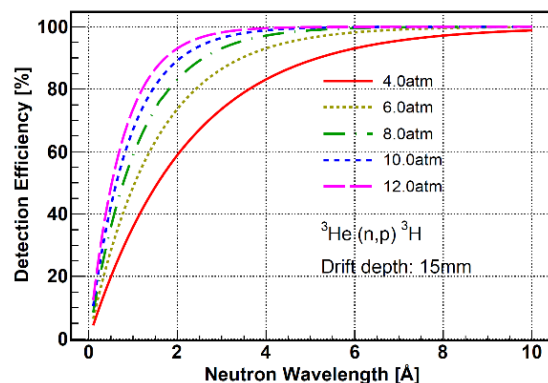
反射谱仪部分实验已经超100kHz



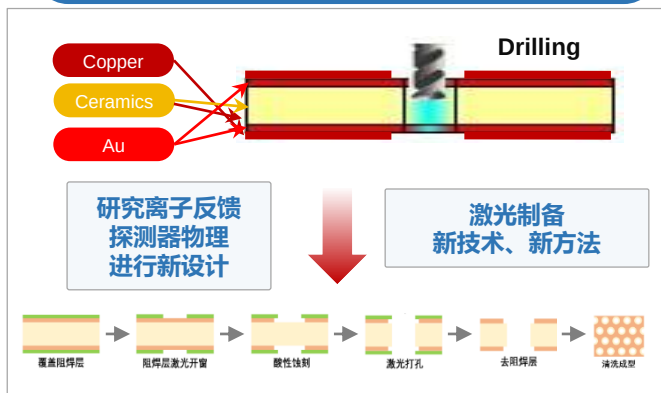
GEM计数率10 MHz



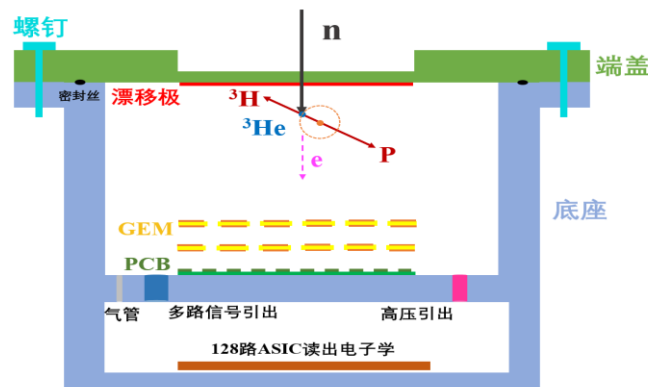
^3He 气体优势



激光代替机械钻孔制备陶瓷GEM



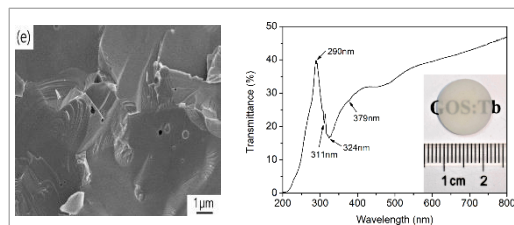
基于 ^3He 的GEM中子探测器



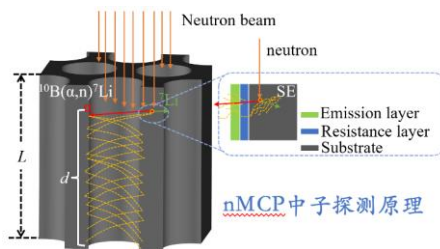
二期探测器预研

发展微秒级时间分辨，及微米、亚微米级空间分辨成像探测器

自主研发透明陶瓷闪烁体、掺硼MCP、中子像增强器以及TimePix4相机



超薄GOS透明陶瓷闪烁体

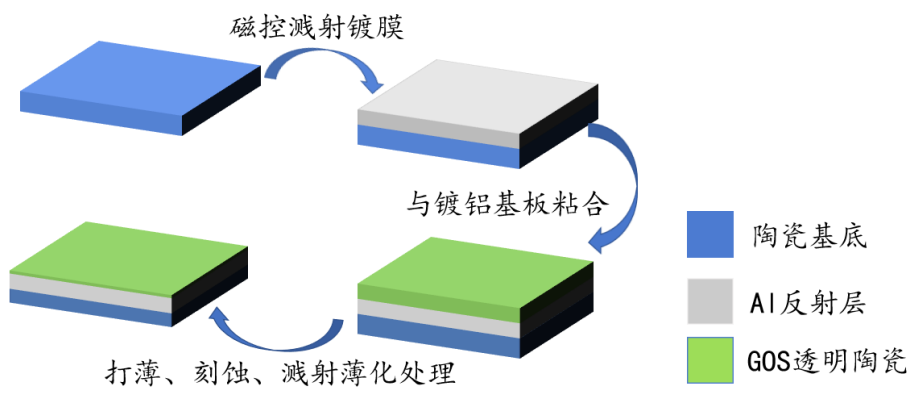


掺硼MCP，提升硼浓度，降低铅含量

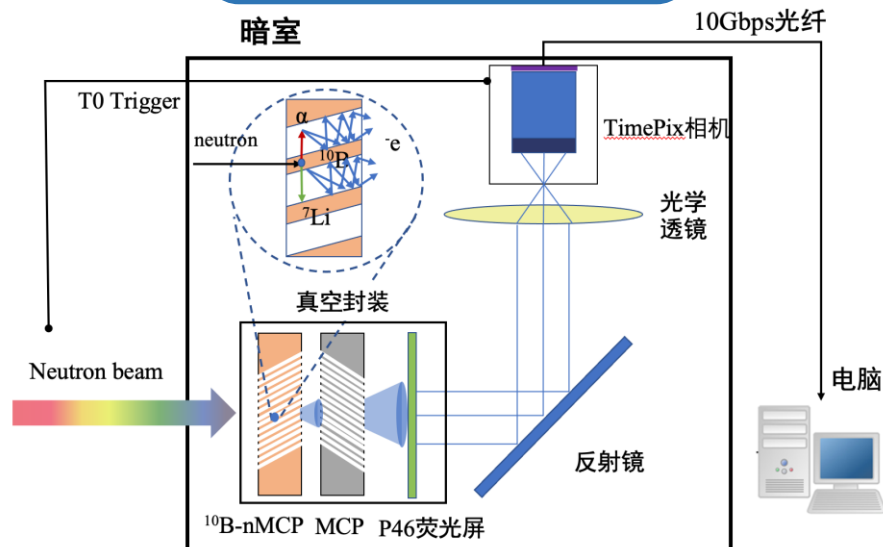


中子像增强器(P46)

方案一：超薄透明陶瓷

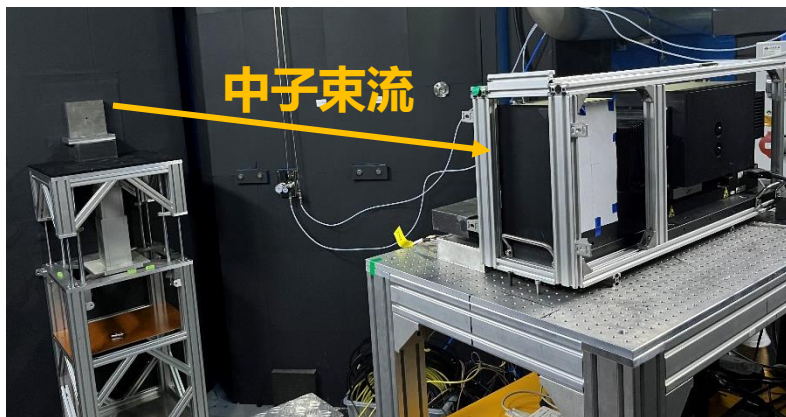


方案二：中子像增强器

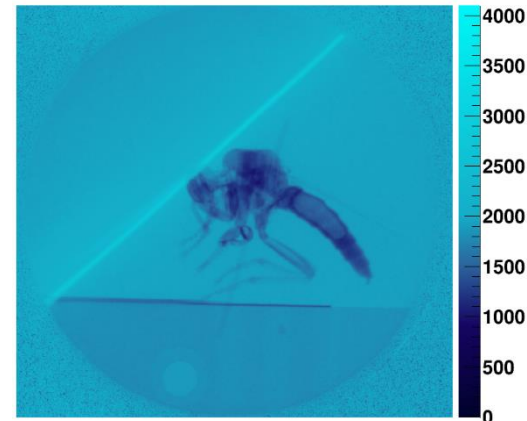


二期探测器预研

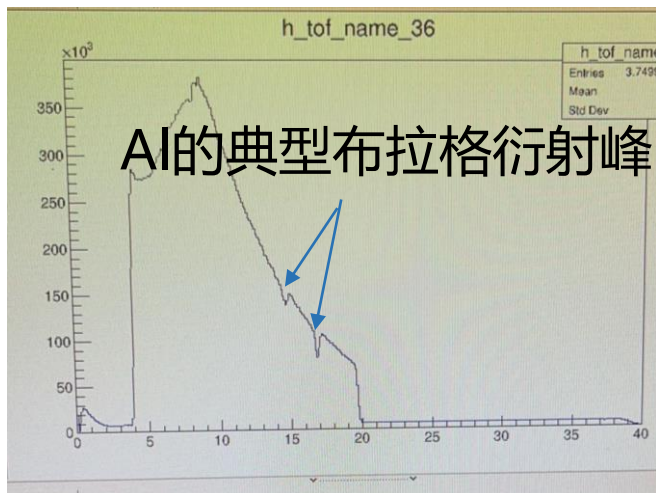
基于中子像增强器的成像探测器



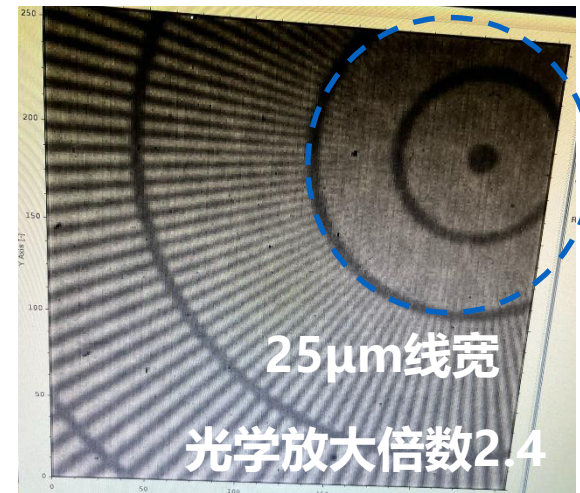
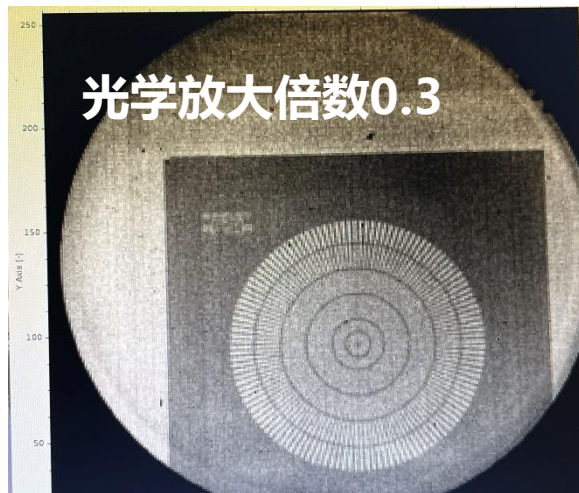
样品成像(果蝇)



TOF谱



空间分辨~25 μ m



汇报提纲

01 | 中国散裂中子源简介

02 | 探测器研制进展

03 | 二期探测器预研

04 | 结束语

- **圆满完成CSNS 多台谱仪探测器工程建设任务，达到了预期目标，为接下来新建谱仪探测器设计和建造奠定了坚实的技术基础，部分解决了探测器“卡脖子”问题。**
- **瞄准国际前沿科学发展需求，开展了多种新型探测器研究工作，满足CSNS未来发展需求。**
- **锻炼出一支年轻化、充满活力的中子探测器研发队伍，积累了丰富的工程经验，已成为国内规模最大的中子探测器研发团队。**

谢谢各位专家， 敬请批评指正！