



# Back-n白光中子源实验及探测器技术

2019/4/22-23 合肥

樊瑞睿 代表Back-n合作组

# 提纲



- Back-n合作组及白光中子源束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 探测器及电子学技术
- 未来探测器发展规划

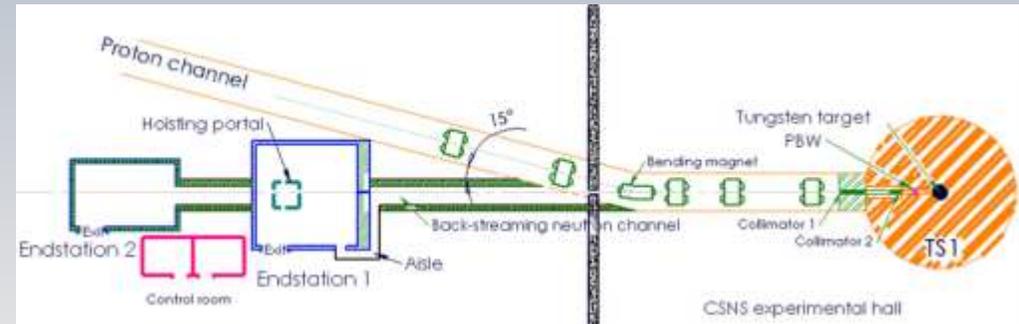
# 白光中子源和科学目标

- **科学需求：**白光中子源是国际上开展中子物理学特别是核数据测量实验研究的最重要实验装置。
  - 先进核能技术、核天体/基础核物理、国防核应用、核医学等。
  - 新时期对核数据测量的精度和广度都提出了更高的要求。
- **发展态势：**
  - 国际上，早期的白光中子源主要是利用强流和中能的电子直线加速器产生的（第一代白光中子源，代表：[OREAL](#)、[RPI](#)、[GELINA](#)、[IREN](#)）
  - 从上世纪80年代后期开始，脉冲白光中子源便朝着基于高功率质子加速器的方向发展（第二代白光中子源，代表：[LANL/LANSCE](#)和[CERN/n-TOF](#)，[J-PARC/ANNRI勉强占边](#)）；
  - 国内几十年来一直在寻求建造白光中子源，以为核数据测量提供必要的平台，CSNS才提供了真正的机会。

# CSNS反角中子束的有利条件



- CSNS: 100/500 kW, 1.6 GeV
  - 打靶可产生非常强的脉冲中子，世界4大散裂中子源之一。
- 沿质子束打靶通道反流的中子束
  - 非常强，对RTBT输运线设备有伤害，需要仔细地考虑中子的屏蔽/准直/捕集（**废物利用**）
  - 很好的能谱结构和时间结构，有可能用于白光中子束线(**世界上首例**)
  - ( $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/s at 50 m)
- **强度高、能谱宽、供束时间充分**



白光中子源设计示意图

# CSNS与国际白光中子源的比较



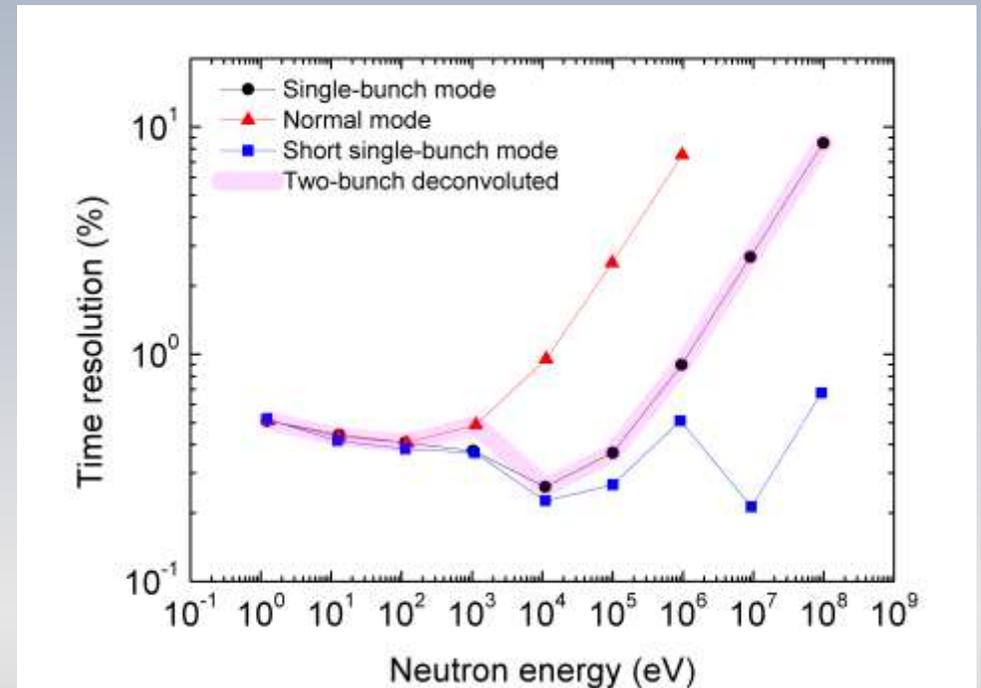
Parameters	United States			Europe		China	
	ORELA	LANSCCE WNR		RPI	GELINA	CERN n_TOF	CSNS-I Back-n
Accelerator	e- linac	p-Synch	p-linac	e- linac	e- linac	p-Synch	p-Synch
Energy (GeV)	0.14	0.8	0.8	>0.06	0.12	24	1.6
Flight (m)	10-200	7-55	7-90	10-250	8-400	185	55, 80
Pulse (ns)	2-30	125	0.15	15	1	7	14 (1.5)
B. Power (kW)	50	48	1.6	>10	11	45	100
Rep. rate (Hz)	1-1000	20	32k	1-500	Max. 900	0.28-0.42	25
Time res. (ns/m)	0.01	3.9		0.06	0.0025	0.034	0.18 (0.02)
n yield (n/s)	$1 \times 10^{14}$	$6.4 \times 10^{13}$	$2.1 \times 10^{12}$	$4 \times 10^{13}$	$3.2 \times 10^{13}$	$8.1 \times 10^{14}$	$2.0 \times 10^{16}$

Back-n: 在靶上的中子注量率最高

# Back-n工作模式



- 兼用模式
  - 对中子散射应用完全没有影响
  - 通常模式: RCS正常设置
  - 短束团模式: RCS特殊设置提供较短的束团
- 白光源专用模式
  - 牺牲部分束流功率: 采用50% or 30%正常束流功率 (Phase-I: 50 kW or 30 kW), 质子束束团长度可从14 ns 降至1.5 ns, 对应快中子时间分辨率提高约10倍
  - 加速器设置: LEPT斩波和RCS高频需要特殊设置



Back-n不同模式下的时间分辨

# CSNS反角白光中子源建设历程



- 反角白光中子源早期研究回顾
  - 2007: 作为CSNS束流扩展应用的方向之一启动, 与原子能院中子物理室/核数据中心紧密合作
  - 2008: 证实反角中子可用于核数据测量
  - 2010: CSNS经理部同意安排该终端 (RTBT布局作调整)
  - 2011: CSNS经理部同意同时建设反角终端的隧道
  - 2013: CSNS经理部同意加速终端设计和建设, 安排少量经费
- 项目建设关键节点
  - 2013年9月成立白光中子源合作组 (高能所、原子能院、九院和西核所), 后来科大加入; 组建由5个单位共同参加的建设队伍;
  - 2013年12月: 中子束线物理设计评审
  - 2014年5月: 物理终端总体方案评审
  - 2014年12月: 白光工作组决定分两阶段建设: 自筹经费; 科工局项目
  - 2015年2月: 探测器方案设计评审
  - 2015年10月: 首批物理实验方案评审
  - 2016年3月: CSNS调概, 反角白光中子束线列入工程建设, 917万
  - 2016年6月: 国家重点研发计划“白光中子源实验技术研究”, 1750万
  - 2017年5月: 白光中子源实验研讨会, 成立用户委员会和研究方向合作小组

# Back-n装置建设过程



- 总体设计和中子束线物理设计：2013年3月-2014年6月
- 中子束线设备技术设计：2014年1月-2015年6月
- 中子束线设备研制：2015年1月-2016年3月
- 中子束线设备的安装和调试：2016年1-12月
- 探测器技术设计：2015年2-12月
- 首批探测器研制：2015年7月-2016年8月
- 探测器离线调试：2016年8月-2017年2月
- 探测器在线安装和调试：2017年3月-2017年8月
- 带束流调试：2017年8-11月（质子束首次打靶：2017年8月28日）
- 白光中子束流特征测量实验：2018年1-3月
- 首批实验：2018年3-7月
- 开放实验：2018年下半年开始

# 合作组成员



- 中国科学院高能所
- 中国原子能科学研究院
- 中国工程物理研究院二所
- 西北核技术研究所
- 中国科学技术大学
- 北京大学
- 北京航空航天大学
- 西安交通大学
- .....

目前Back-n文章作者清单中共81人，来自12家单位



2018年第二届白光中子源用户会议合影

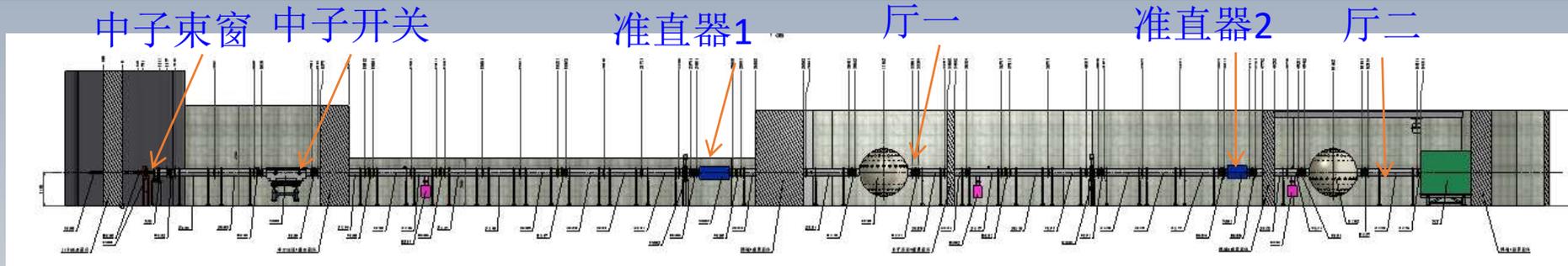
# Back-n的位置



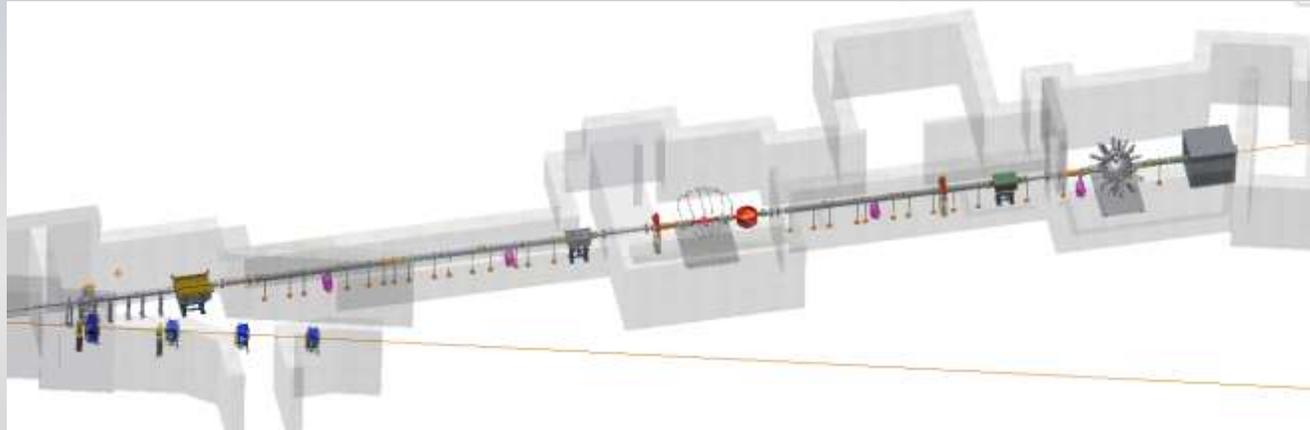
中国散裂中子源鸟瞰



# 反角中子终端3D布局图



Back-n束线剖面



Back-n束线俯视图

Back-n不同准直器模式下的流强

Shutter (mm)	Coll#1 (mm)	Coll#2 (mm)	ES#1 spot (mm)	ES#1 flux (n/cm <sup>2</sup> /s)	ES#2 spot (mm)	ES#2 flux (n/cm <sup>2</sup> /s)
Φ3	Φ15	Φ40	Φ15	1.27E5	Φ20	4.58E4
Φ12	Φ15	Φ40	Φ20	2.20E6	Φ30	7.81E5
Φ50	Φ50	Φ58	Φ50	4.33E7	Φ60	1.36E7
78×62	76×76	90×90	75×50	5.98E7	90×90	2.18E7

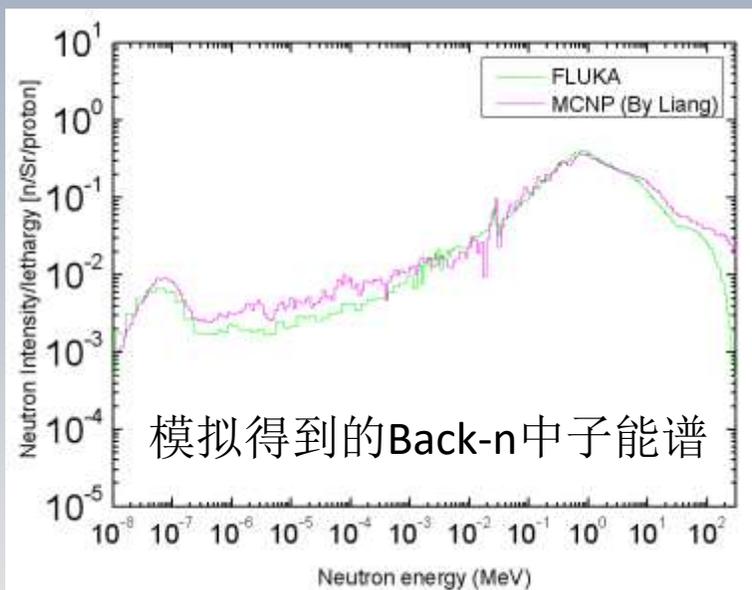
\*对应100kW束流功率下

# 提纲



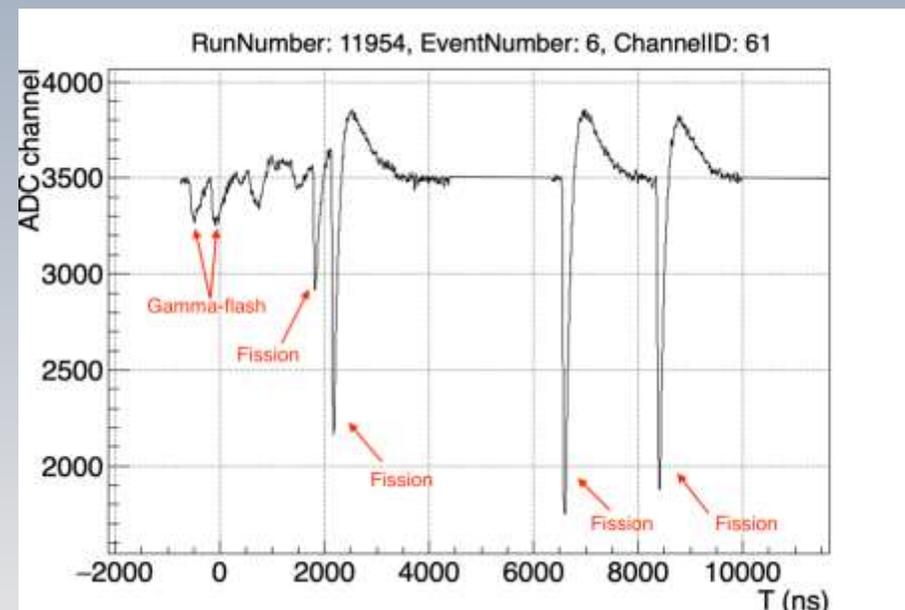
- Back-n合作组及白光中子源束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 探测器及电子学技术
- 未来探测器发展规划

# Back-n中子特征及信号时间结构

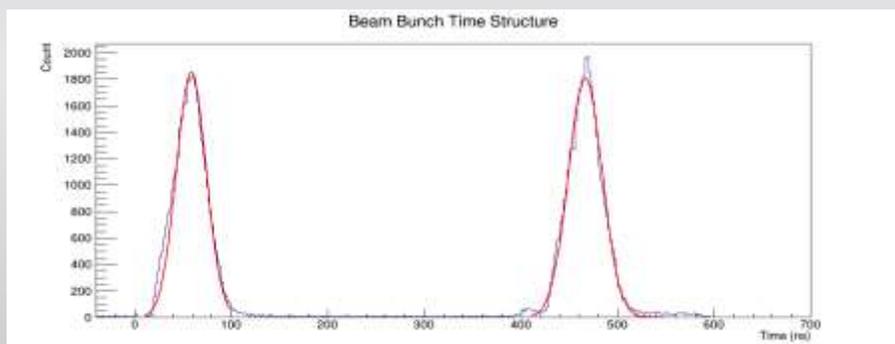


模拟得到的Back-n中子能谱

估算中子产额 $10^{16}$ n/s@100kW,  
中子注量 $10^7$ n/cm<sup>2</sup>/s@50m;



一个周期内探测器的典型波形



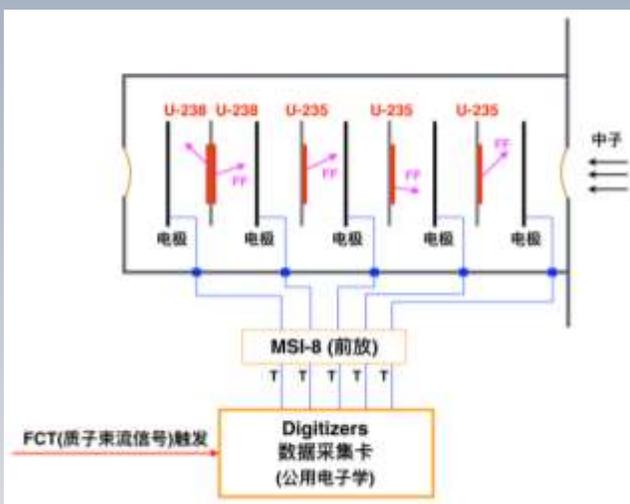
质子打靶的双数团结构

- 束团时间间隔:  $409.0 \pm 2.0$  ns
- 束团半高宽:  $41.6 \pm 2.0$  ns

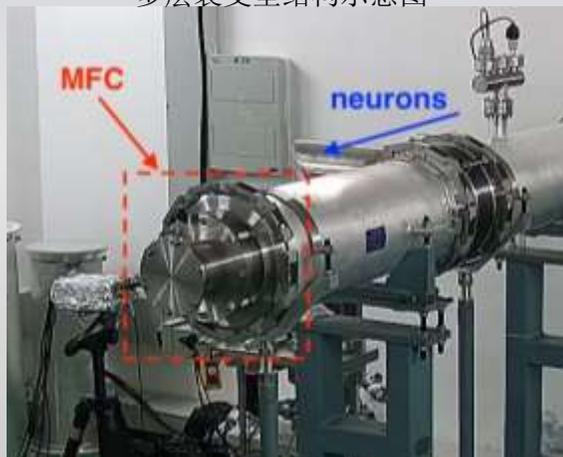
# Back-n 能谱和注量测量实验



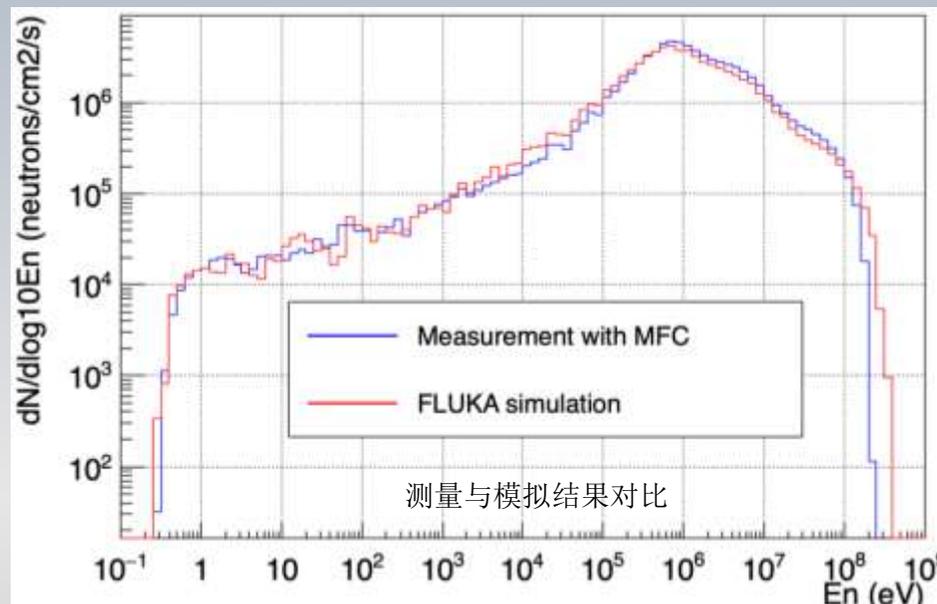
- 使用多层裂变室(multi-layer fission chamber, MFC)测量
- 使用质量精确已知的<sup>235</sup>U薄片样品作为中子转换层



多层裂变室结构示意图



多层裂变室照片

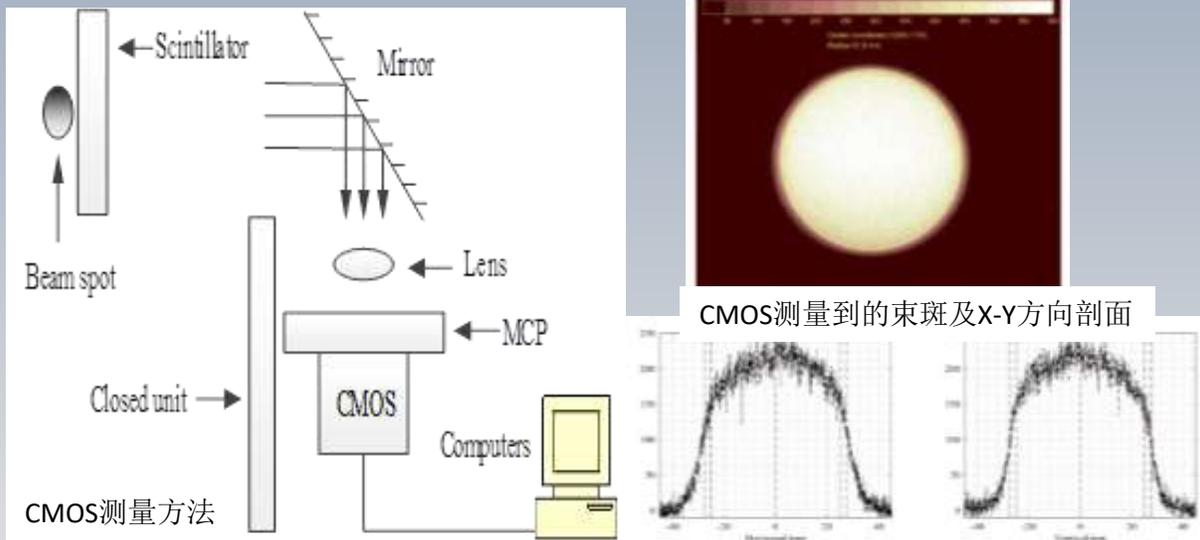


WNS Back-n厅2(#ES2)能谱/注量

- #ES2飞行距离: ~76米
- 结果归一到100 kW打靶功率

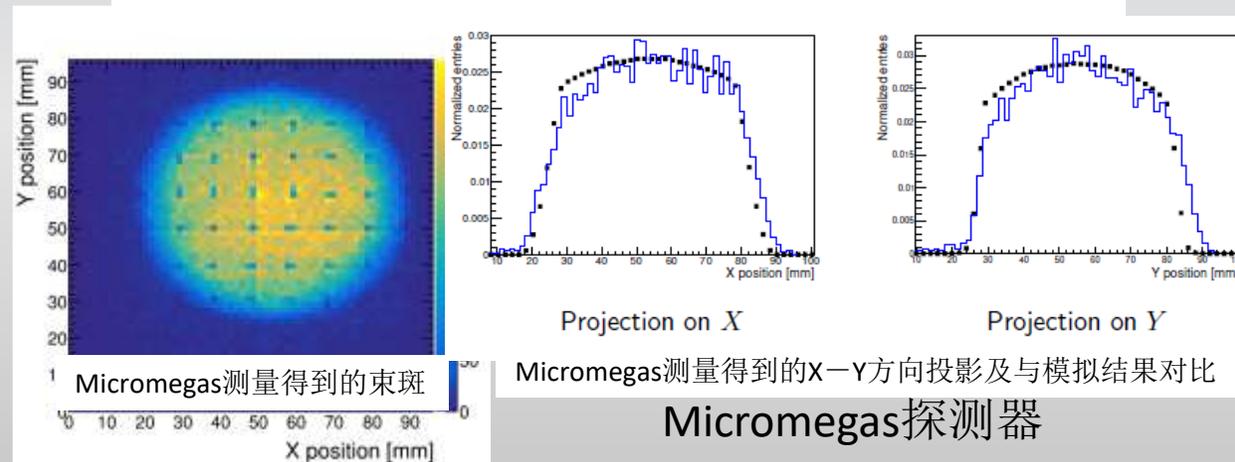
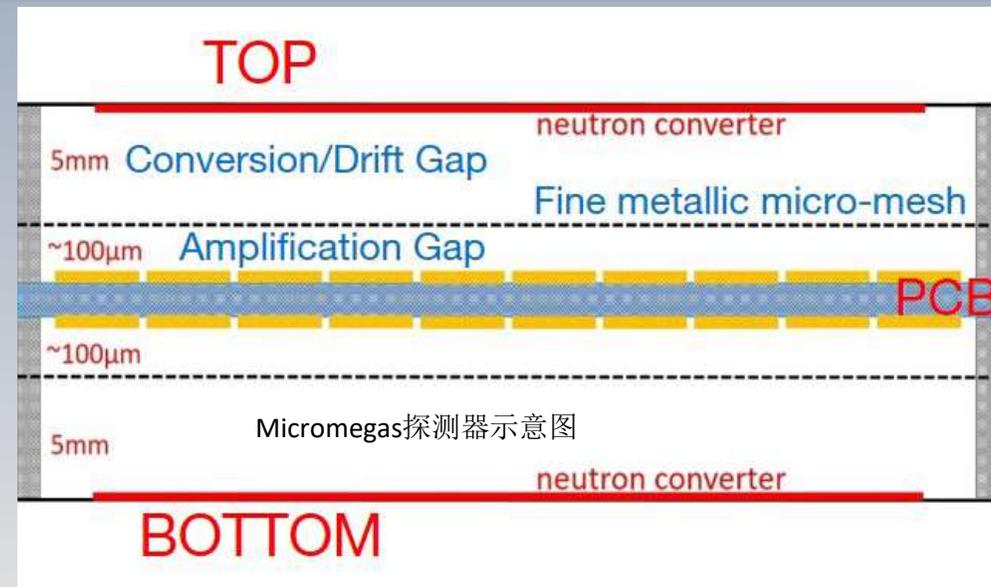
中子能量范围	通量 (neutrons/cm <sup>2</sup> /s)
0.1-1 eV	$4.08 \times 10^3$
1-10 eV	$1.79 \times 10^4$
10-100 eV	$3.01 \times 10^4$
0.1-1 keV	$5.01 \times 10^4$
1-10 keV	$1.23 \times 10^5$
10-100 keV	$4.30 \times 10^5$
0.1-1 MeV	$2.98 \times 10^6$
1-10 MeV	$2.77 \times 10^6$
10-200 MeV	$6.21 \times 10^5$
Total	$7.03 \times 10^6$

# Back-n束斑测量



能量/MeV	计数圈半径/mm				
	5	10	15	20	25
1e-6~1e-3	6.34	6.69	7.11	7.76	8.95
1e-3~0.1	5.77	5.89	6.21	6.81	8.08
0.1~1	6.80	6.79	7.38	8.66	11.77
1~2	6.98	7.09	7.64	8.80	11.64
2~3	7.07	7.13	7.71	8.89	11.78
3~8	5.13	5.21	5.81	7.00	9.99
8~14	6.86	6.84	7.34	8.46	11.28

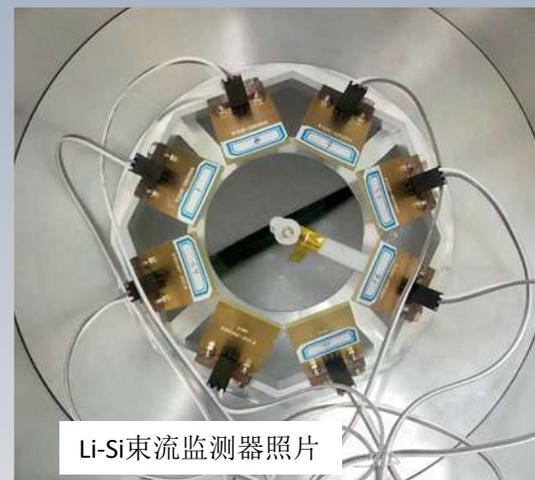
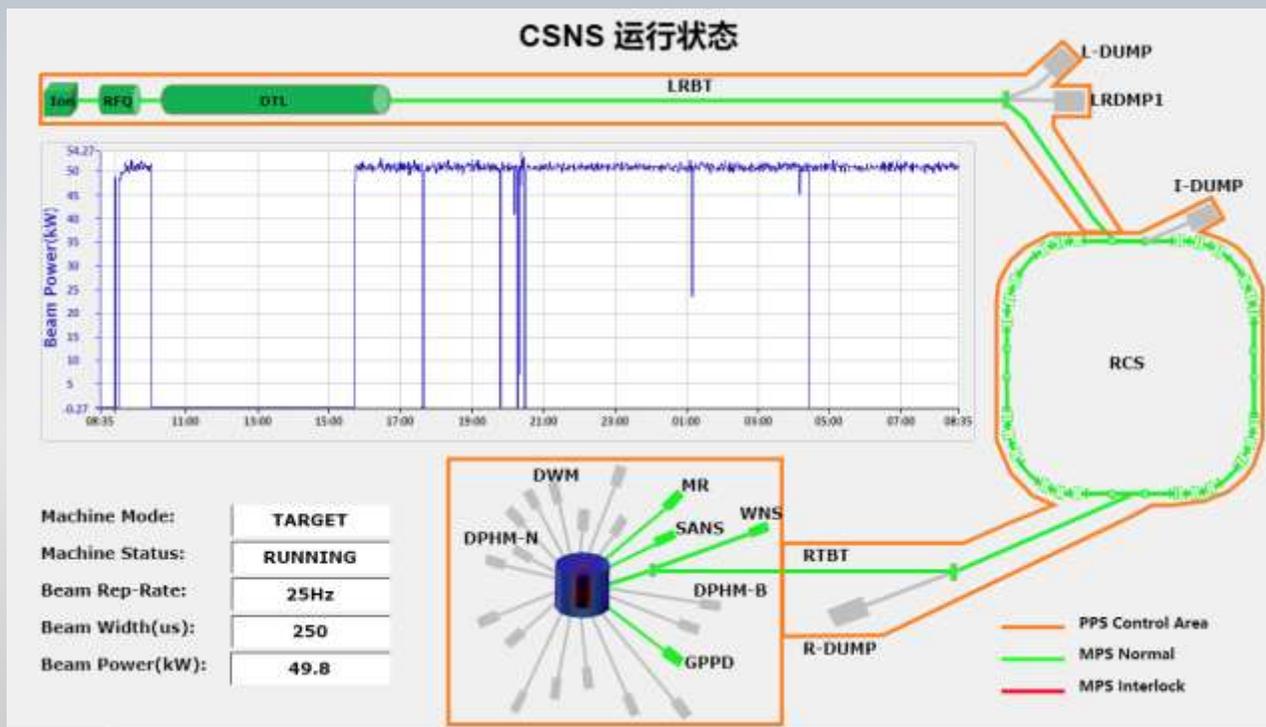
CMOS相机方法



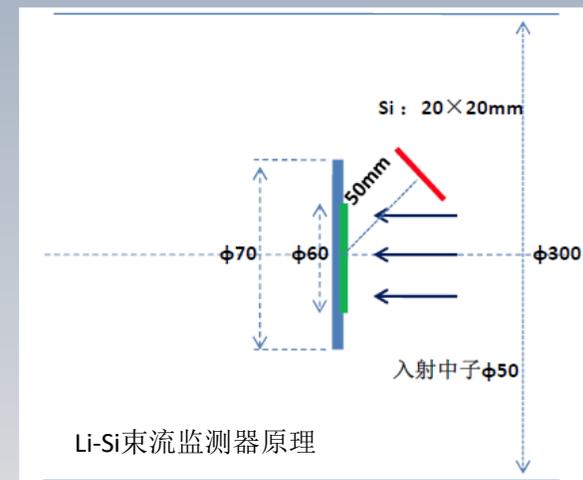
# Back-n的束流监测



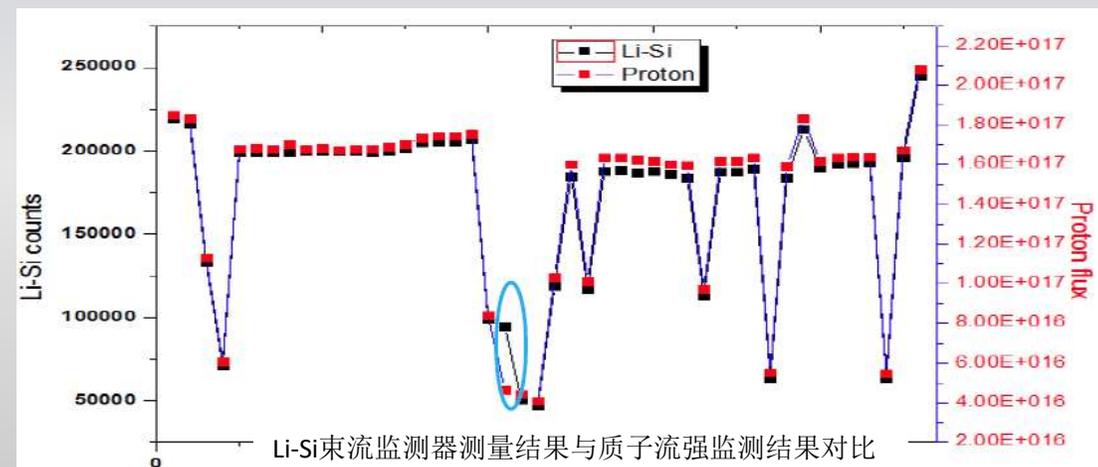
- 使用质子流强监测
- Li-Si束流监测器



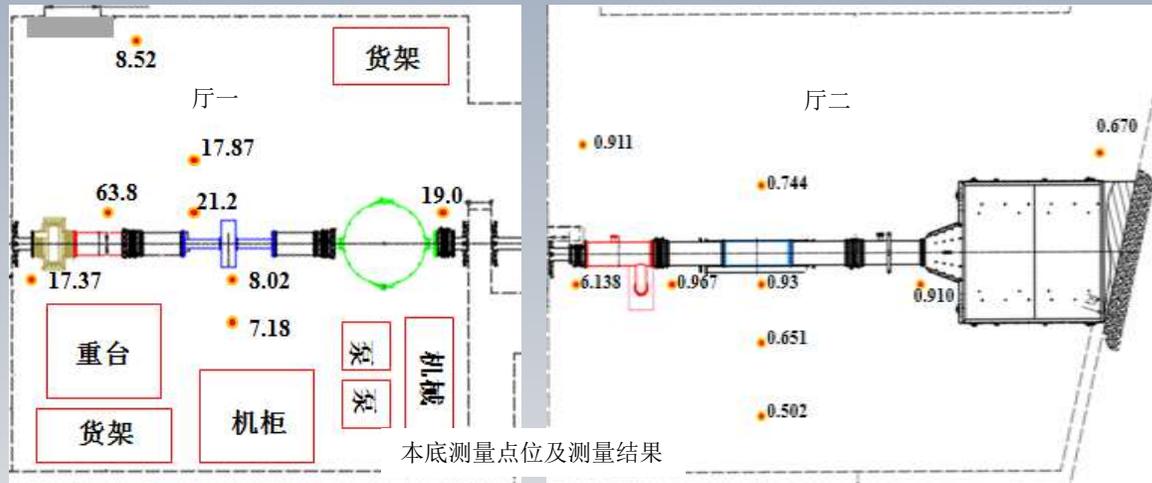
Li-Si束流监测器照片



Li-Si束流监测器原理



# Back-n本底测量



实验厅1和厅2本底控制水平完全满足实验需求；前墙穿墙孔附近还是能看出来有轻微漏中子，影响很小；屏蔽门、捕集器周围没有明显漏中子，屏蔽效果很好

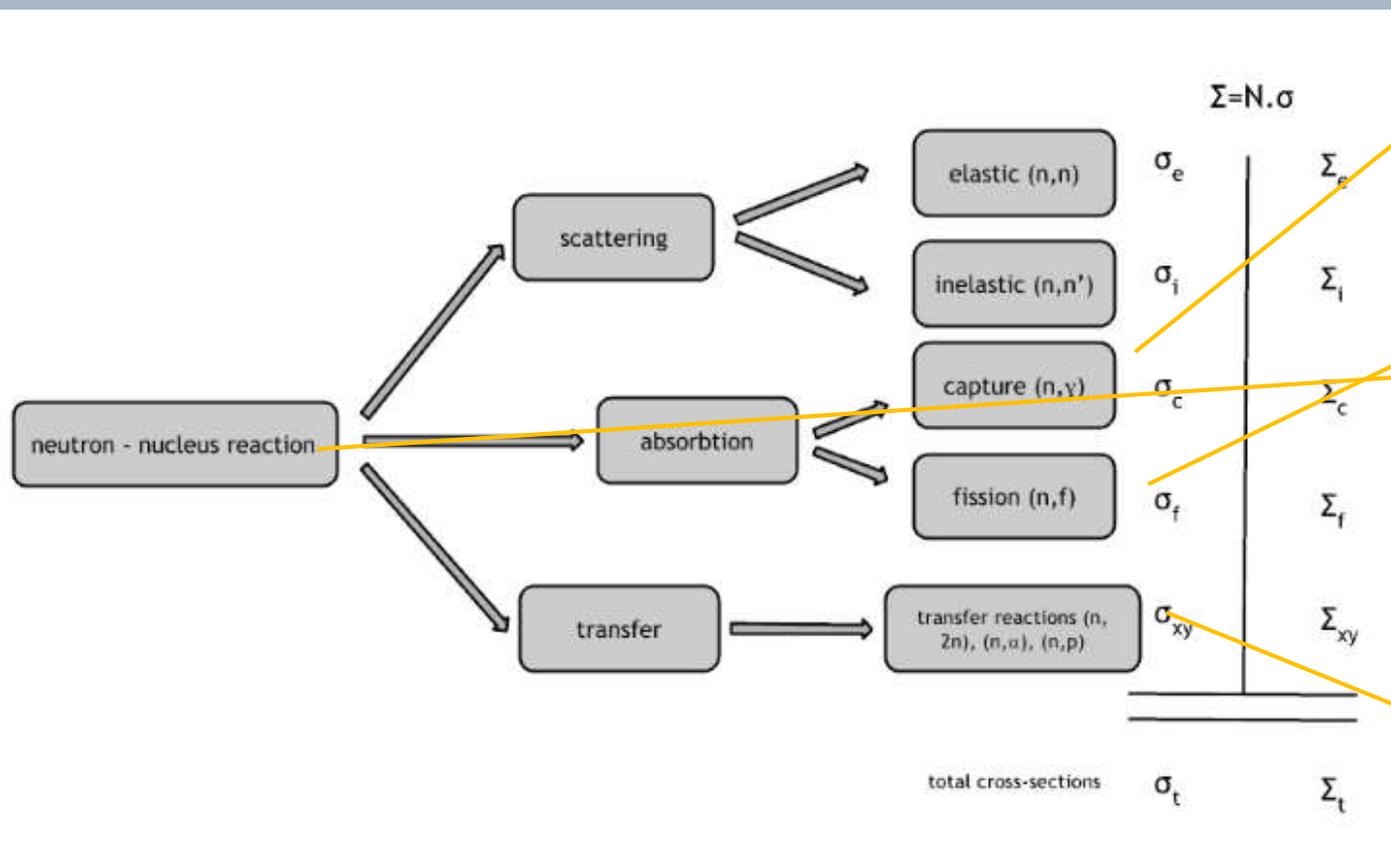


归一至  
n/cm<sup>2</sup>/s/100kw  
注：模拟和测量的位置不严格对应

设计要求	模拟结果*	测量结果*
厅一400~500	44.06	21.2
	31.20	17.81
	42.08	63.8
	35.36	19.0
	26.73	8.02
	26.65	7.18
	30.87	17.37

设计要求	模拟结果*	测量结果*
厅二10~20	1.27	0.67
	1.44	0.93
	0.92	0.651
	0.76	0.502
	2.01	0.967
	0.95	0.744
	0.97	0.911

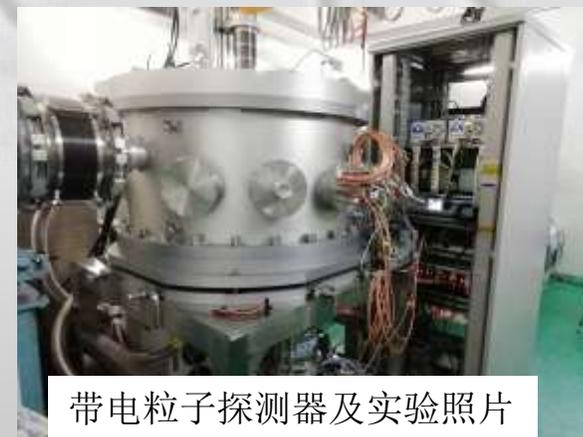
# 核数据测量实验



C6D6探测器及实验照片



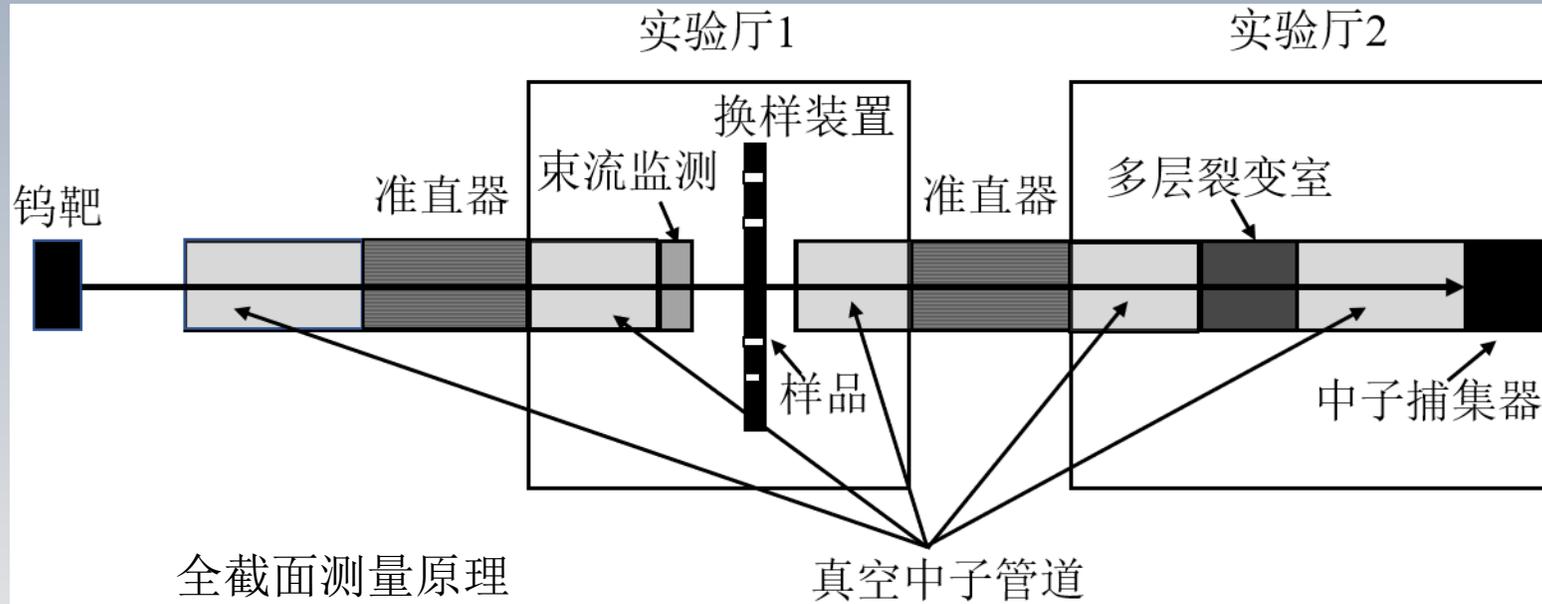
裂变截面、全截面测量探测器及实验照片



带电粒子探测器及实验照片

目前开展的项目包括：俘获截面测量 (n, γ)；裂变截面及全截面测量 (n, f)；带电粒子测量 (n, x)；非弹性散射测量 (n, γ) 等。

# 全截面测量谱仪-NTOX



根据全截面理论公式，用同一探测器，只需要测得有样和无样的中子穿透率之比，就能计算得到全截面。因此测量过程简单，测量精度是所有截面测量中最高的。

$$\sigma_t = \frac{1}{nt} \ln \frac{1}{T}$$

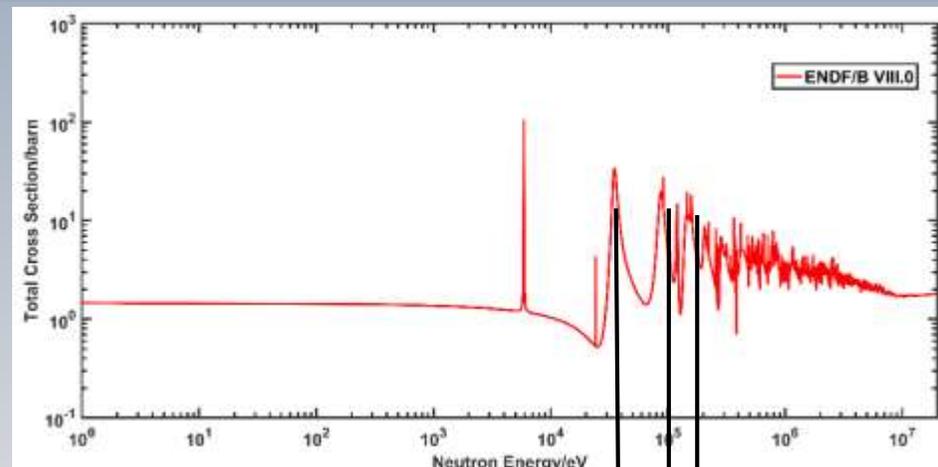
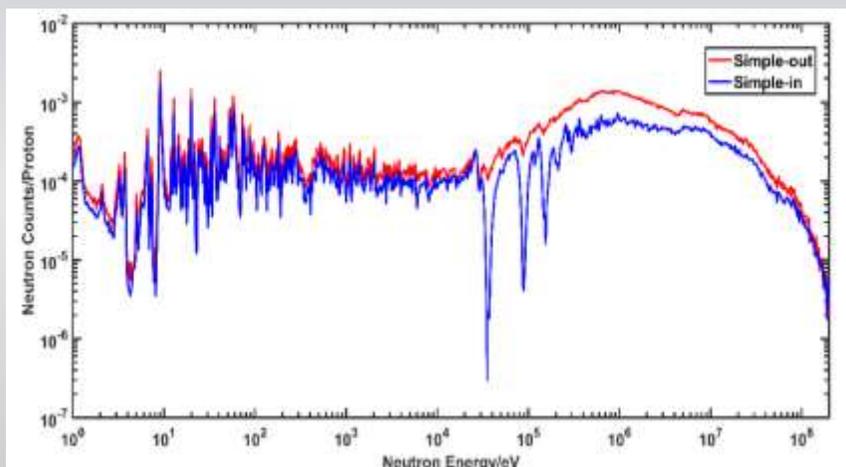
- 样机内装：
- 高纯U235镀片\*3层
  - 高纯U238镀片\*3层
  - 高纯U236镀片\*1层
  - 纯底衬片\*1层

NTOX裂变室

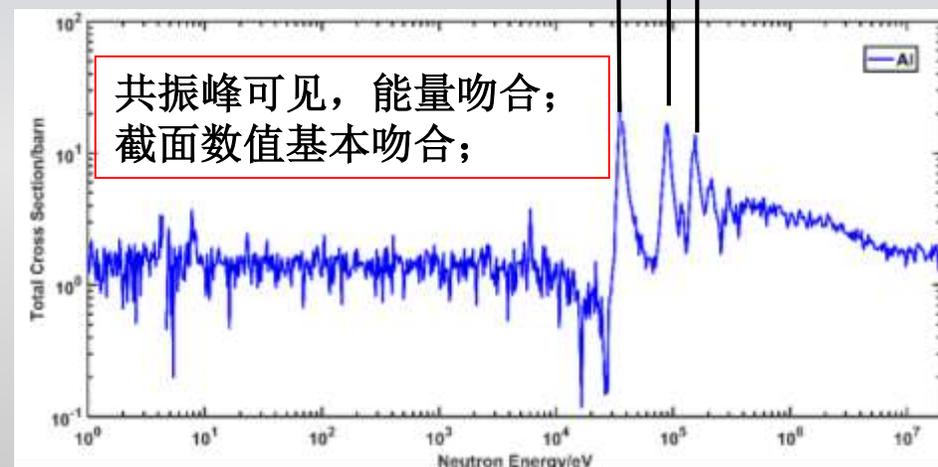
# 40mm铝实验/U235裂变室

- 全截面实验与核数据库对比

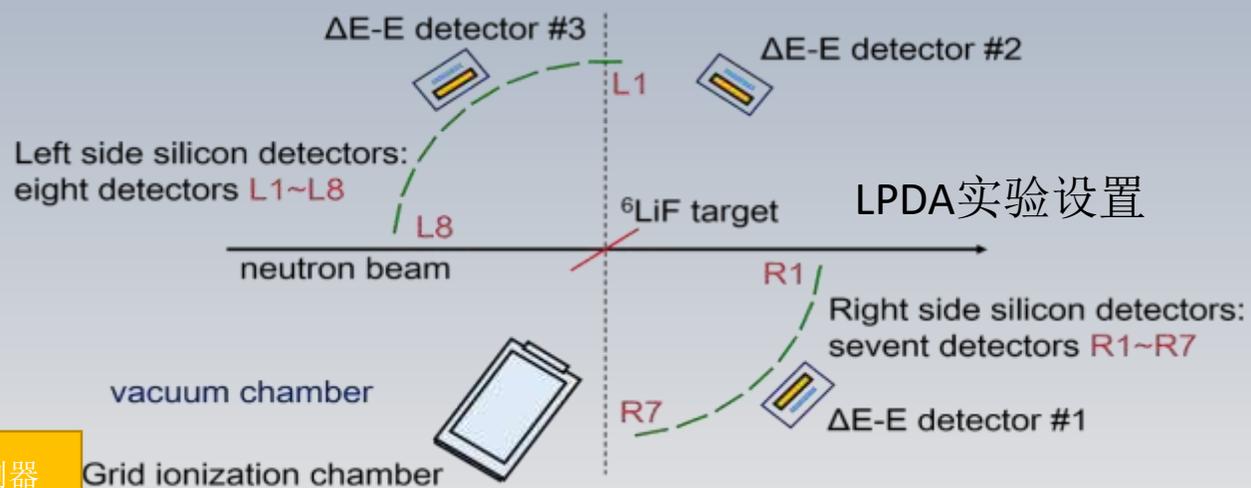
无样品/有样品时U5裂变室中子能谱



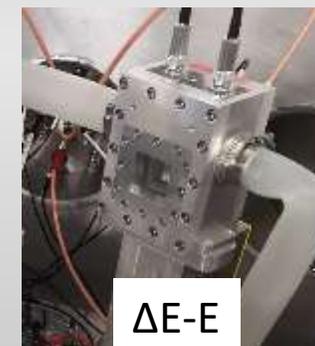
铝全截面实验



# 带电粒子探测器（LPDA）布局



硅阵列

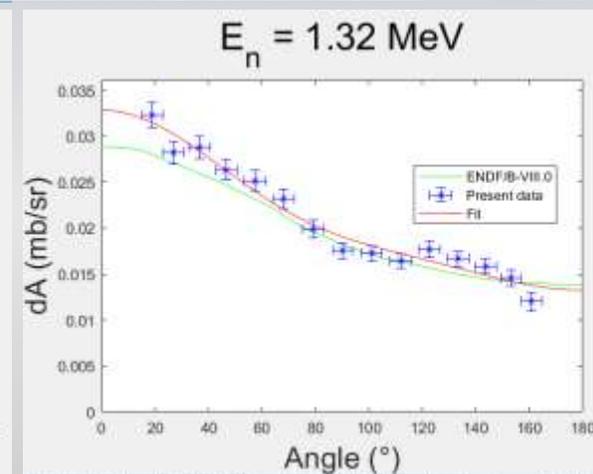
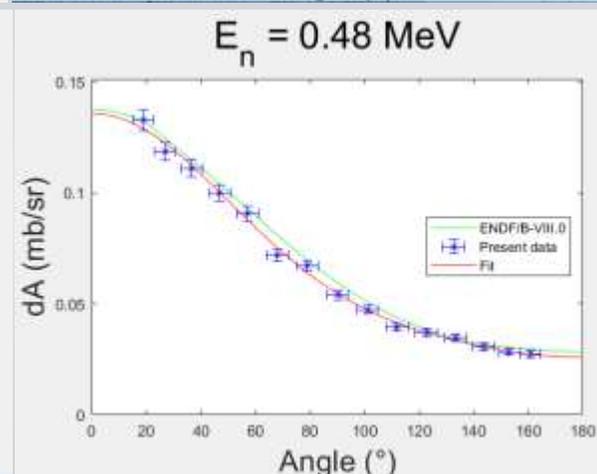
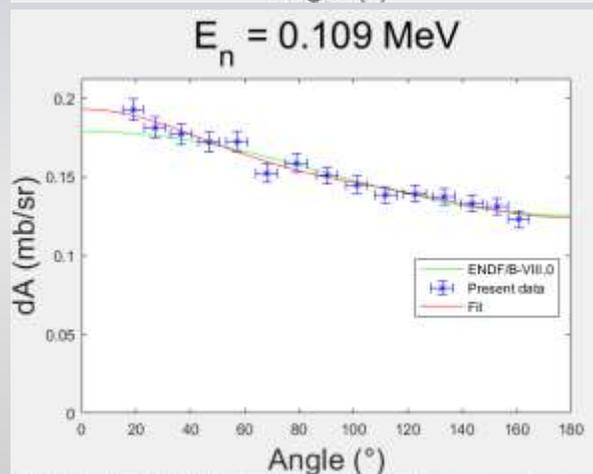
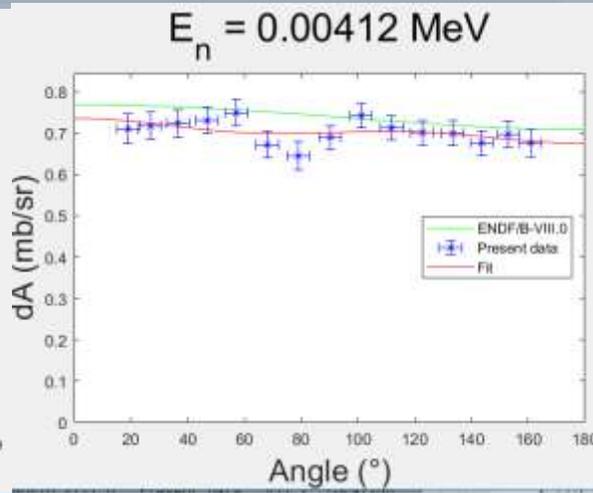
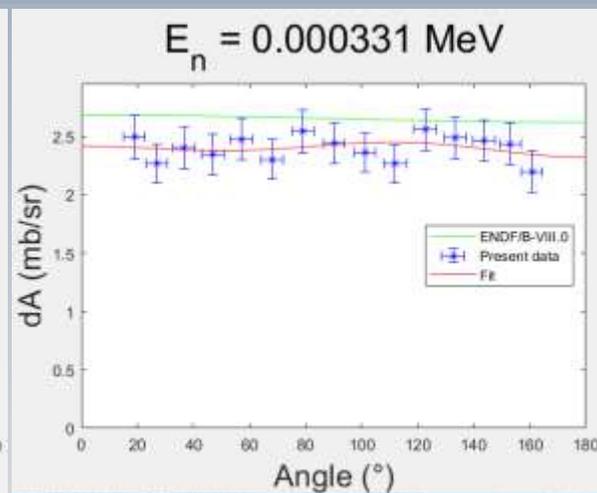
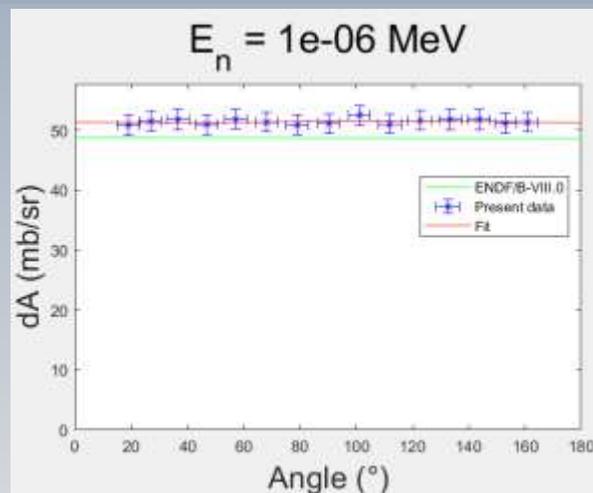
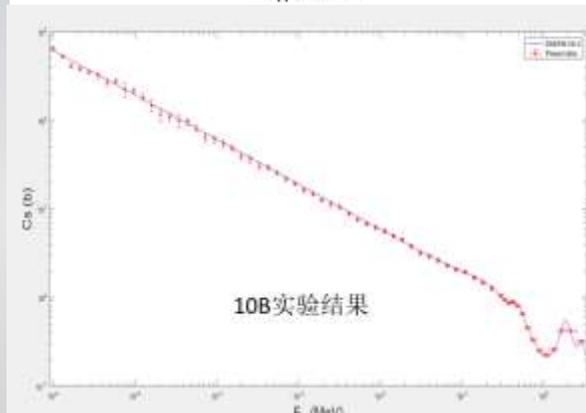
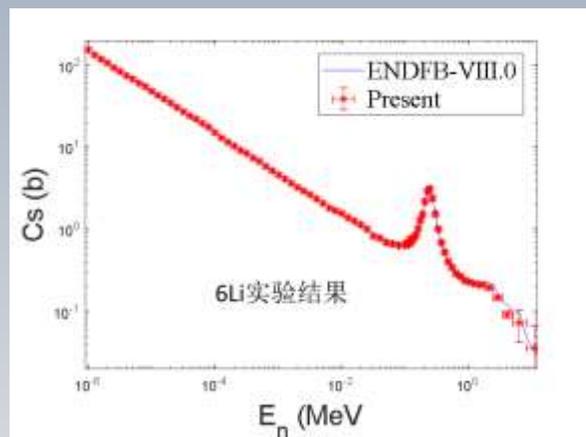


$\Delta E-E$



GIC

# 目前国际最全面的微分截面

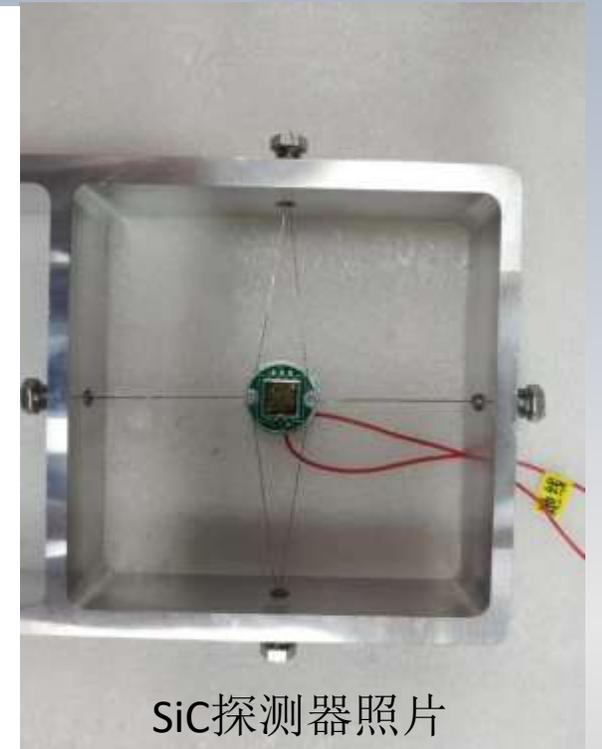
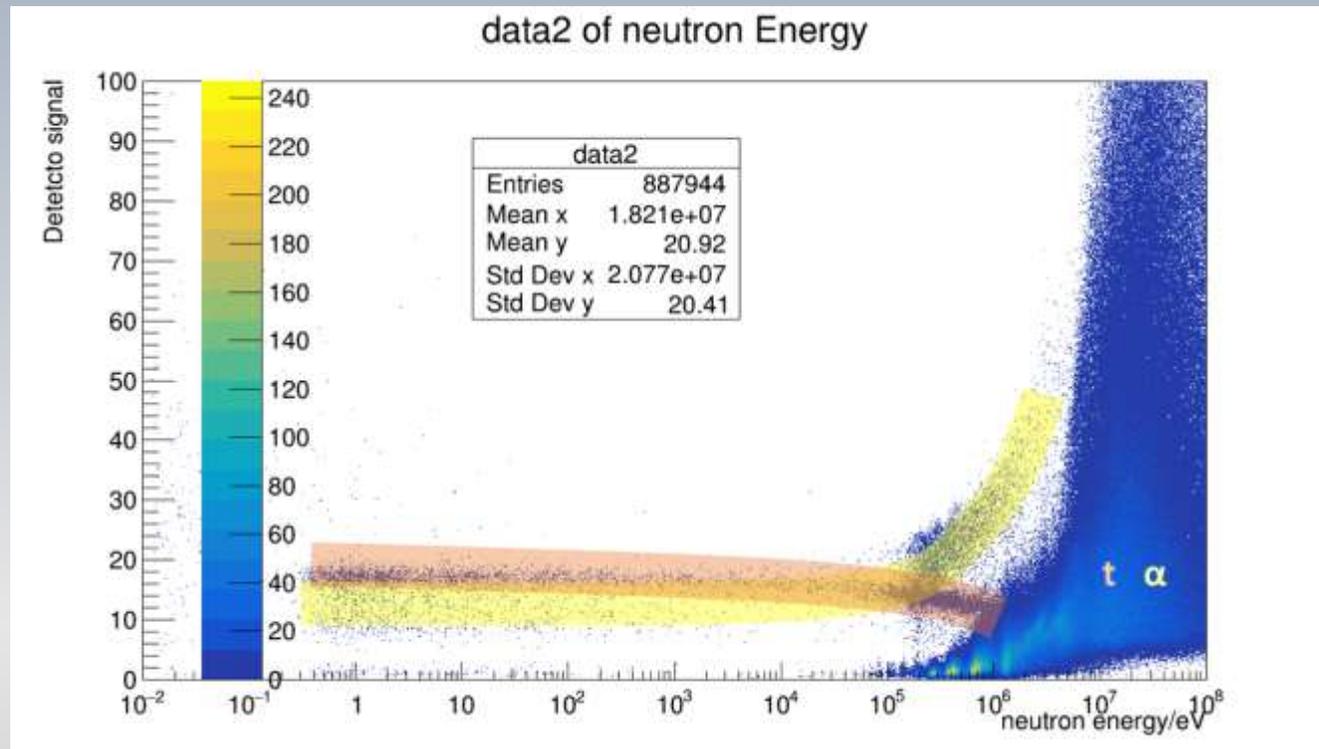


<sup>10</sup>B的双微分截面

# SiC探测器测试

使用SiC探测器在束进行了 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反应产物测量实验，可以看到氚和 $\alpha$ 曲线。

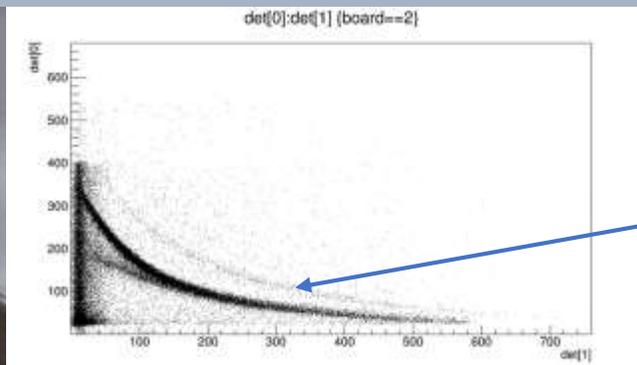
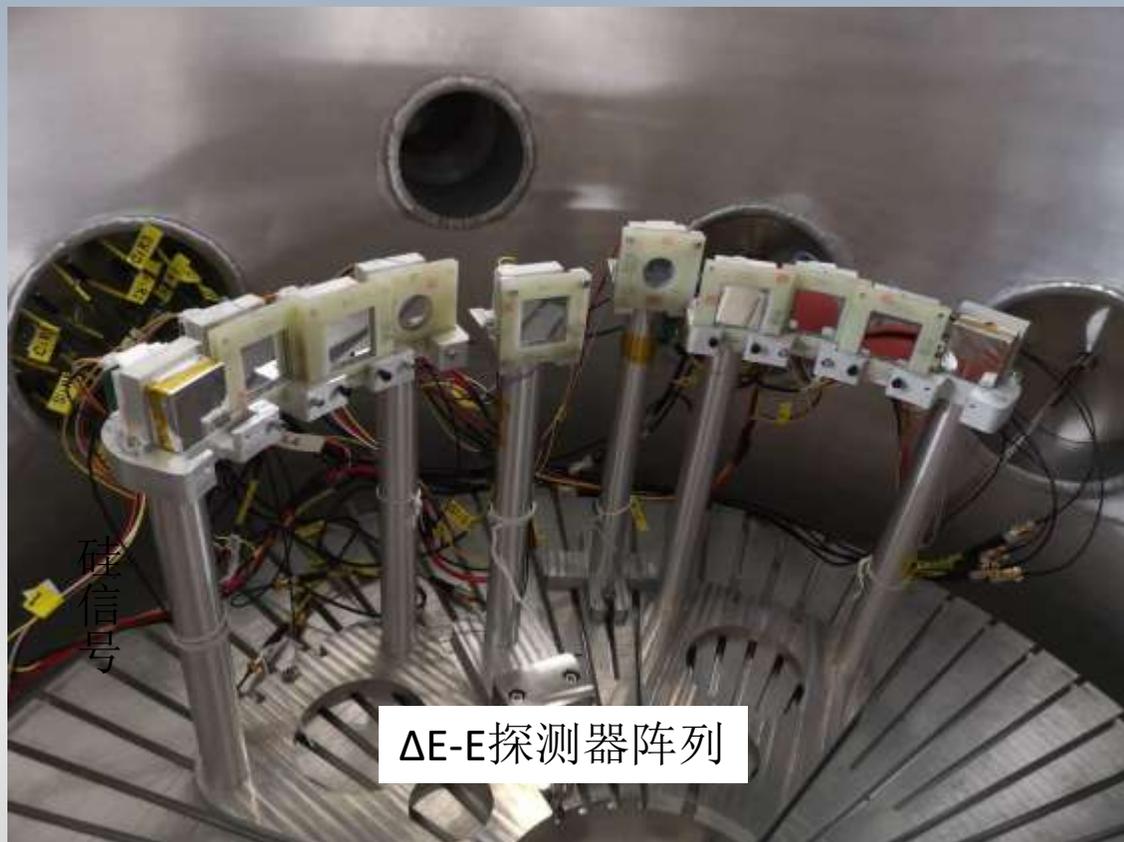
SiC探测器辐照时间约100小时，合计中子注量 $10^{10}$ 以上，未发现明显的性能变化。



SiC测量 ${}^6\text{Li}$ 靶 $0^\circ$ 角出射产物

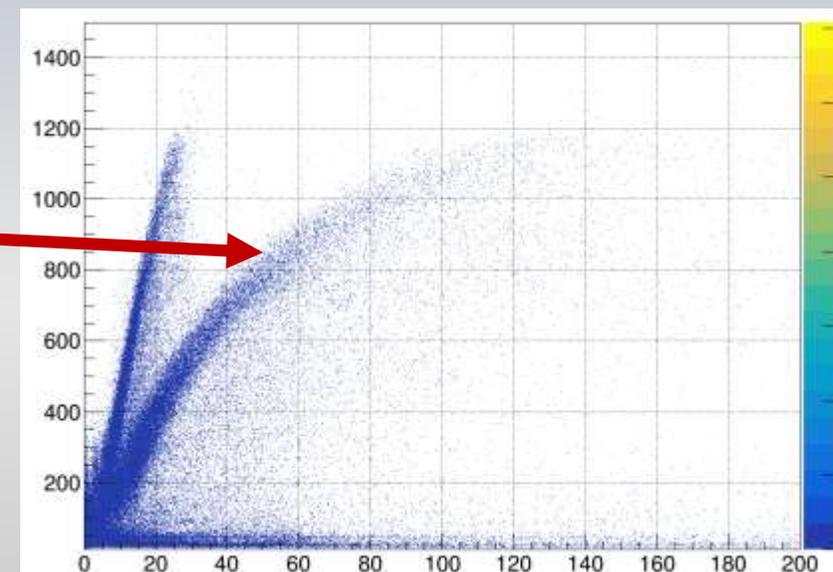
# 从中子到质子

目前正在积极准备的NP散射实验并完成了前期测试



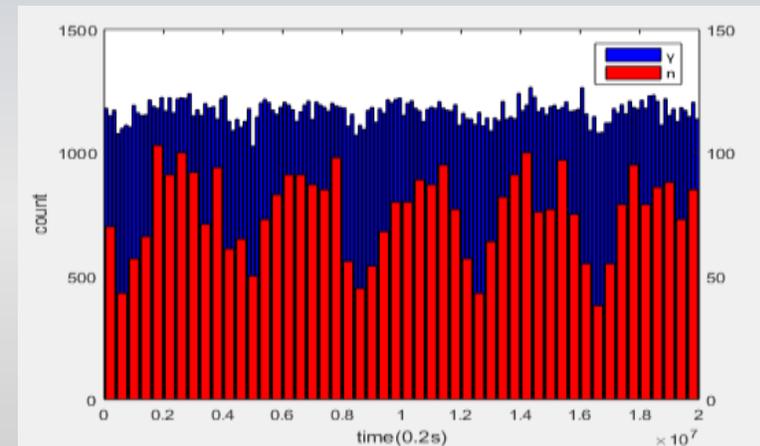
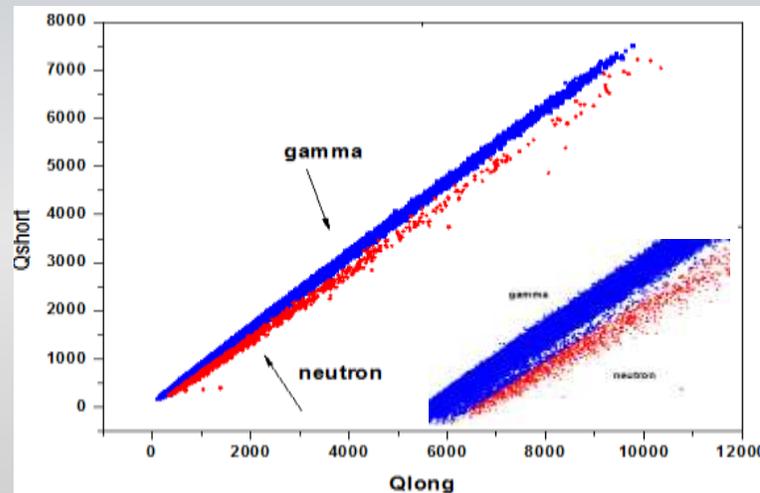
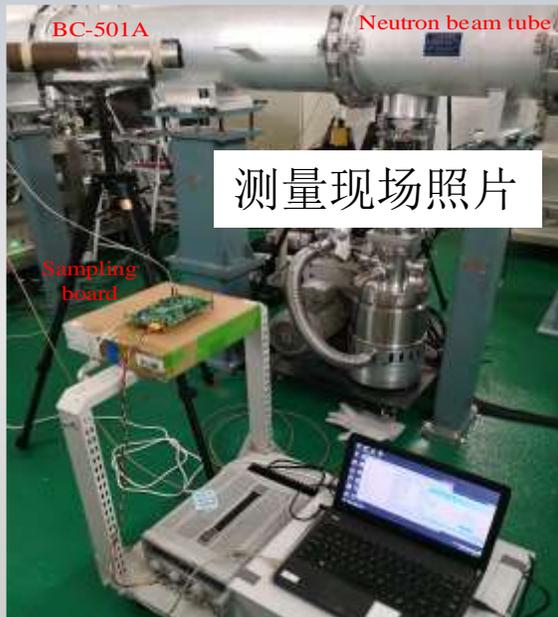
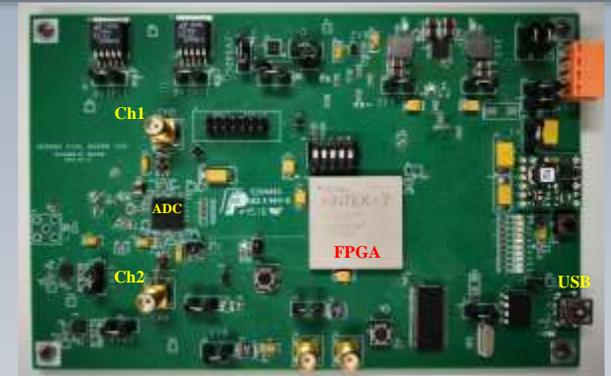
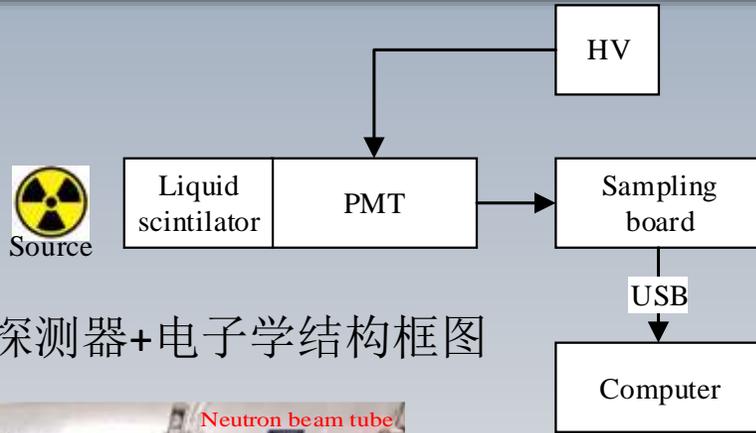
通过硅和CsI闪烁体进行的粒子分辨横轴是CsI信号幅度，纵轴是硅信号幅度

CsI测量得到的质子响应曲线，横轴是换算质子能量，纵轴是CsI信号幅度



可以通过 $\Delta E-E$ 谱得到质子事件，通过中子飞行时间换算相应反冲质子能量。测试结果显示，探测器测量的质子能区覆盖100MeV。显示白光中子源可以进行探测器对不同能量质子响应标定。

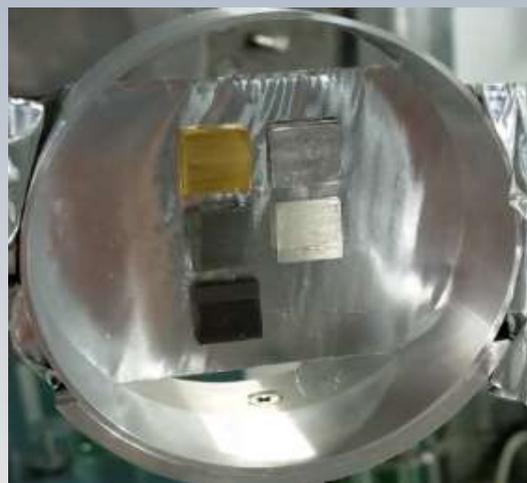
# 脉冲甄别方法测试



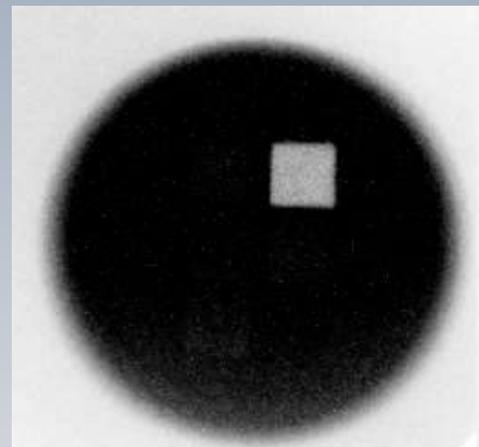
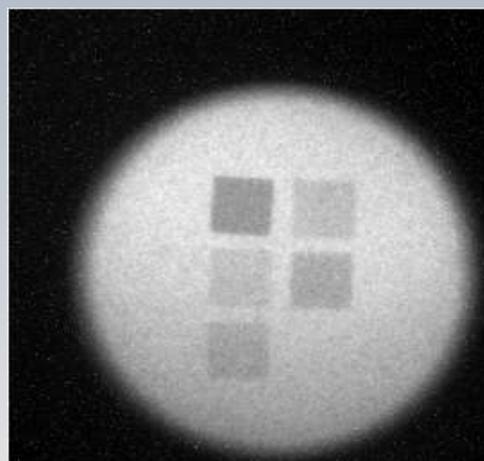
# 中子共振照相技术

样品实物:

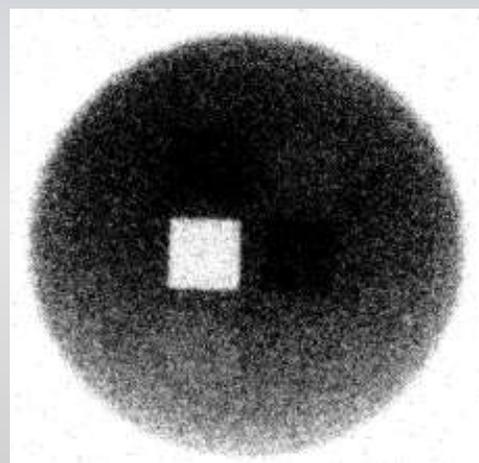
Au、Ag、W、Ta、In



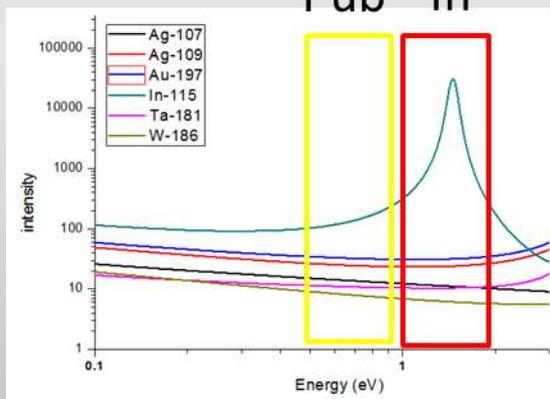
普通透射照相



共振核素检出: In



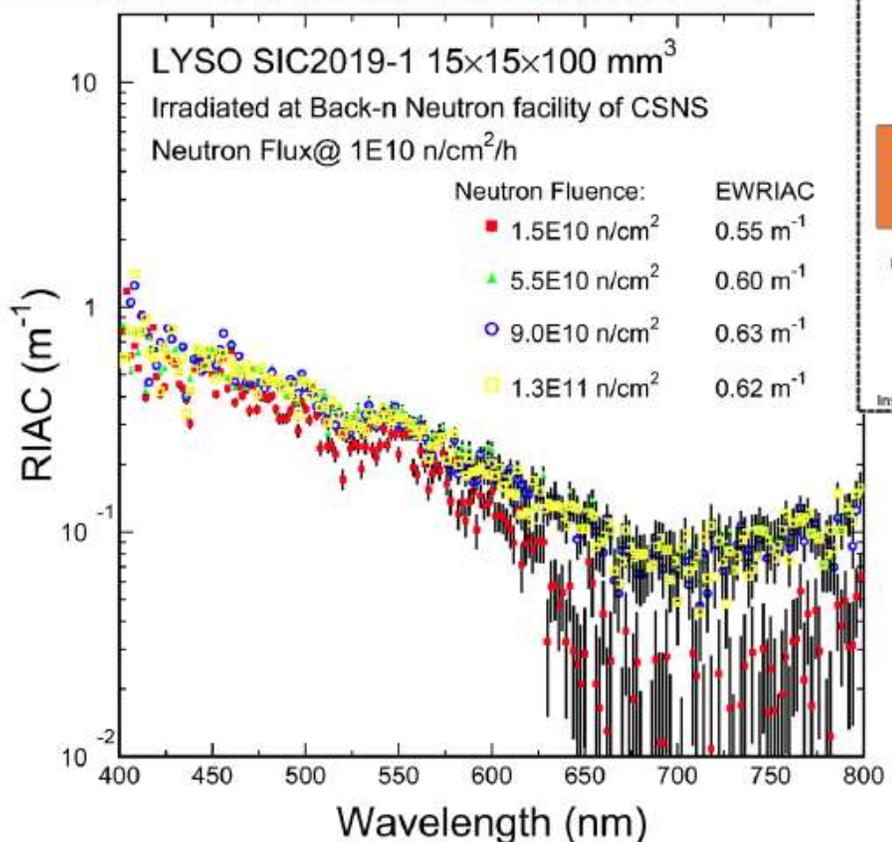
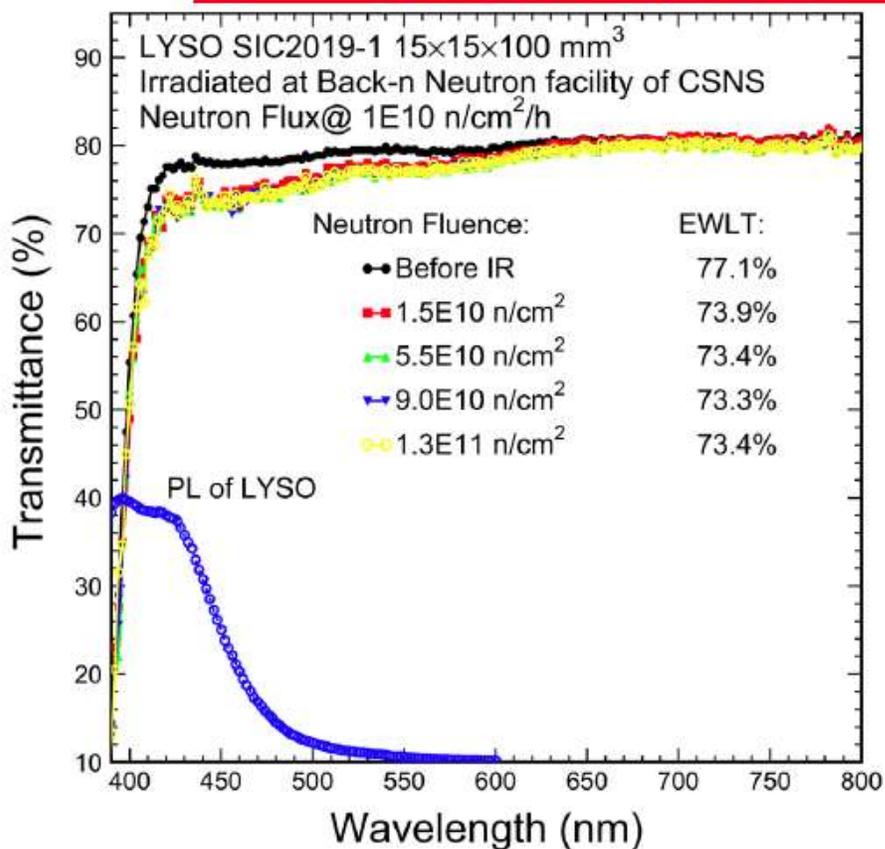
共振核素检出: W



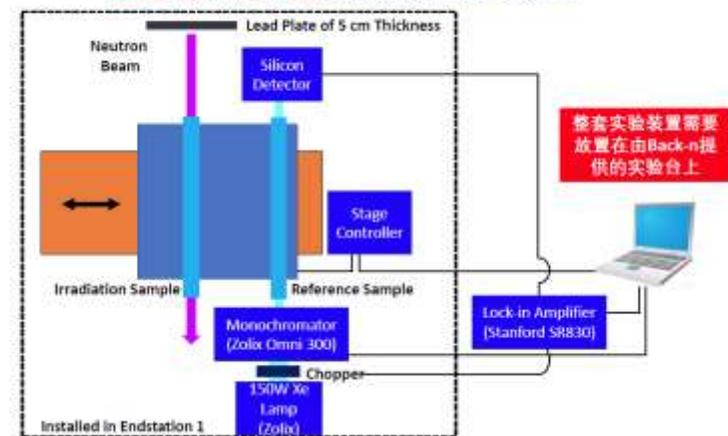
In核素共振峰检出: [Pub] - [In]

# 闪烁晶体辐照损伤实验

对LYSO 晶体辐照中子剂量达到 $1.5E10 \text{ n/cm}^2$  观察到明显的辐照损伤



在线辐照实验测试装置示意图



南开大学准备4种类型，共8块样品晶体。包括 CsI、BaF、BGO、LYSO

# 提纲



- Back-n合作组及白光中子源束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 探测器及电子学技术
- 未来探测器发展规划

# 探测器及电子学技术



- 探测器

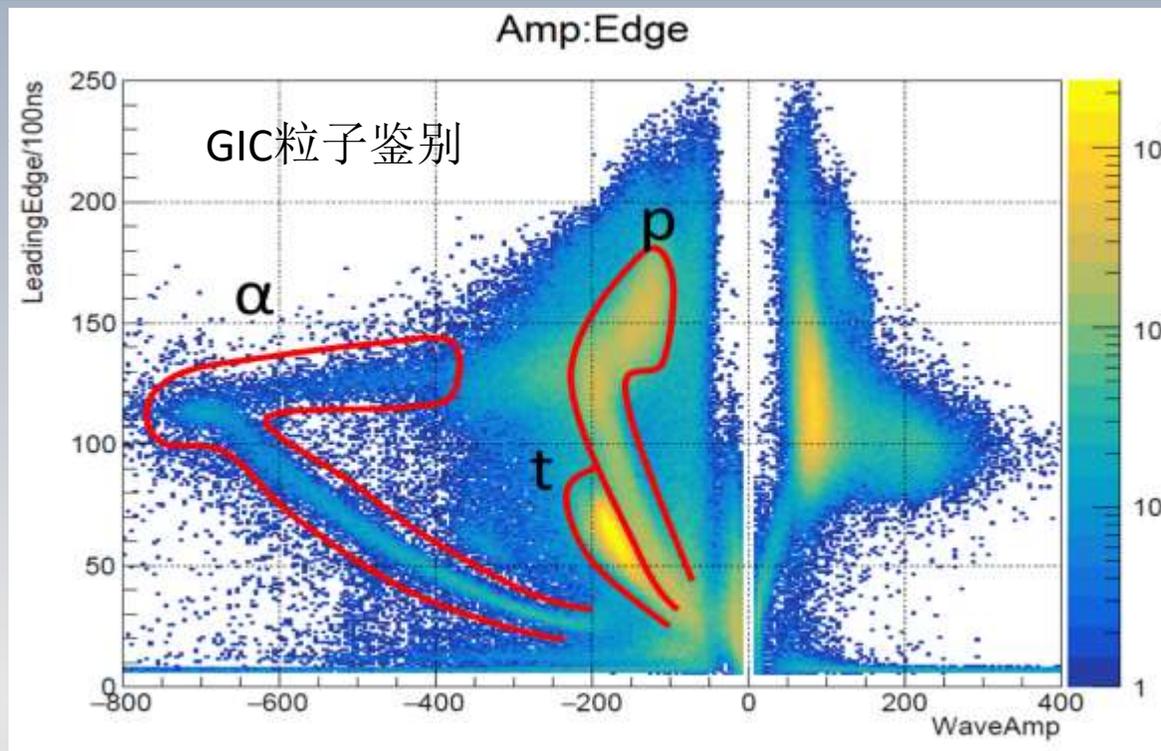
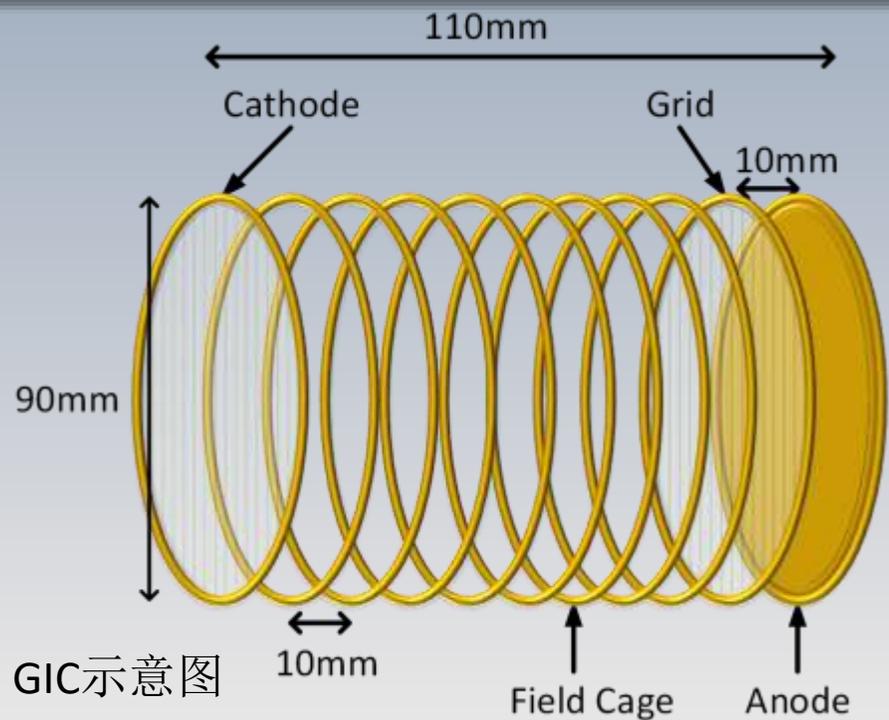
- 裂变电离室
- $\Delta E$ -E望远镜
- 屏栅电离室
- Micromegas束流监测器
- 闪烁阵列探测器

- 电子学

- 共用电子学系统
- Micromegas束流监测器电子学
- 闪烁阵列探测器电子学

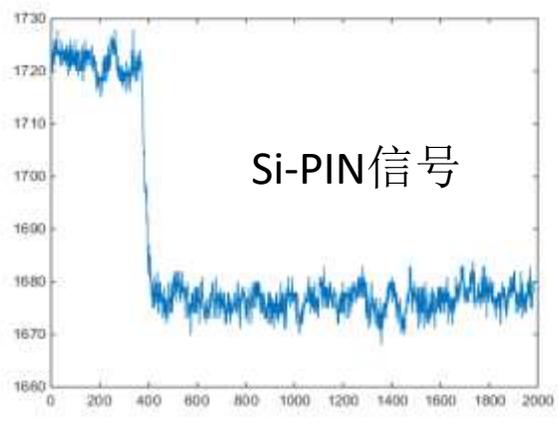
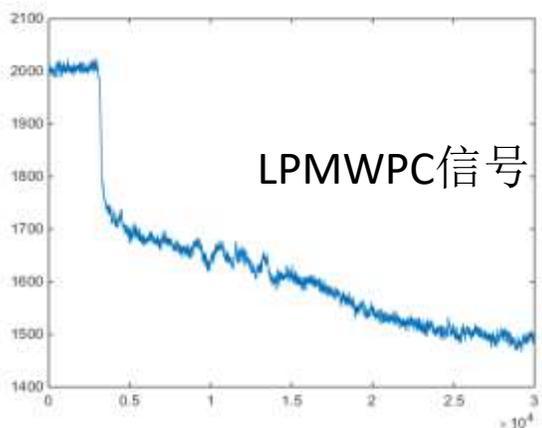
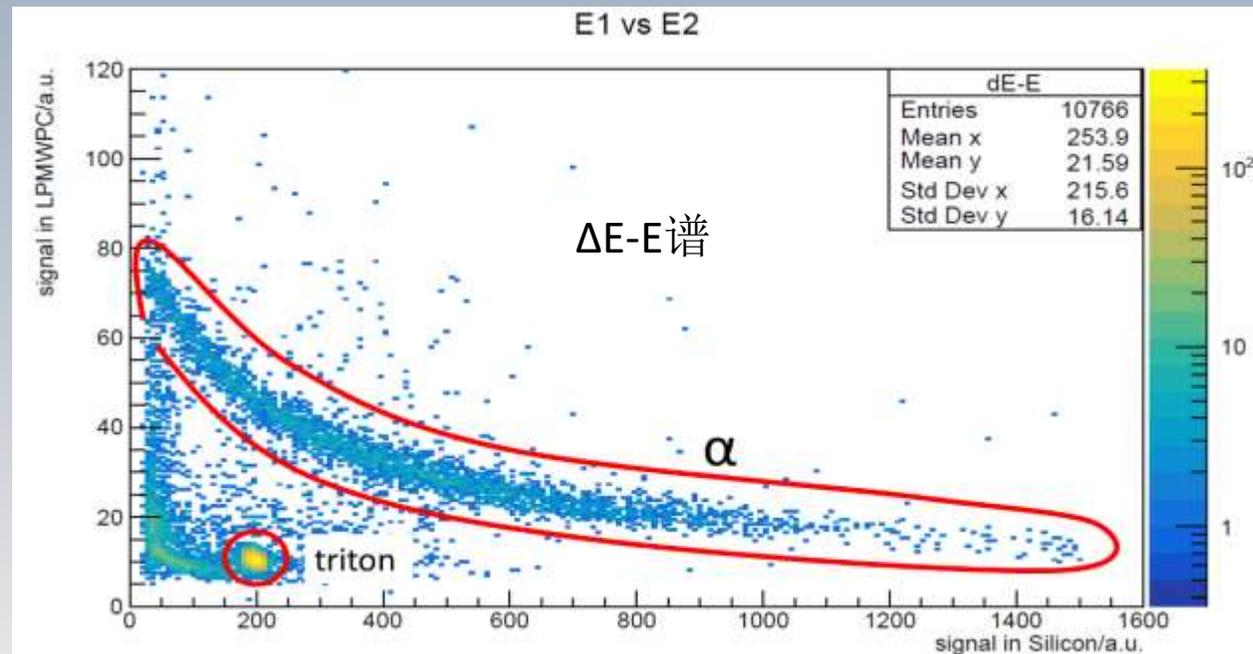
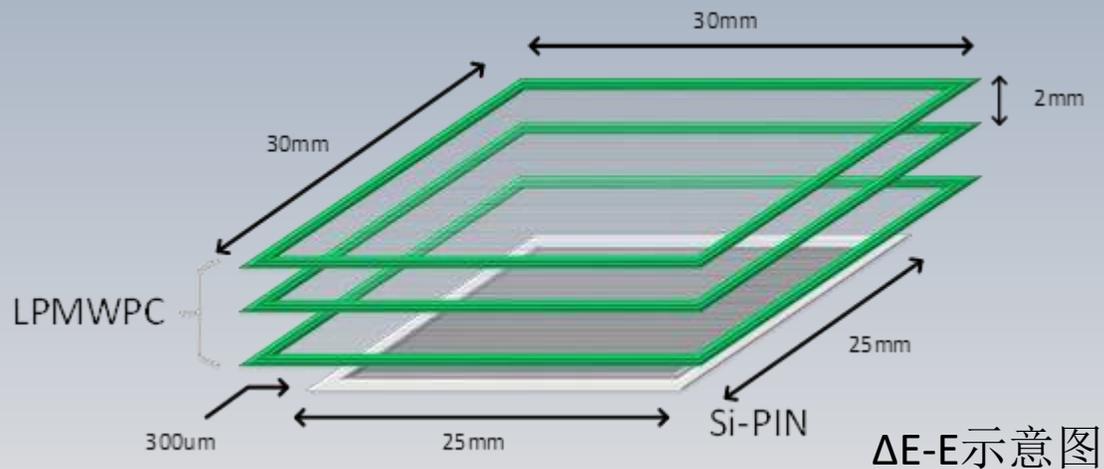


# 屏栅电离室 (GIC)



通过阴极和阳极的信号上升时间及幅度来鉴别粒子

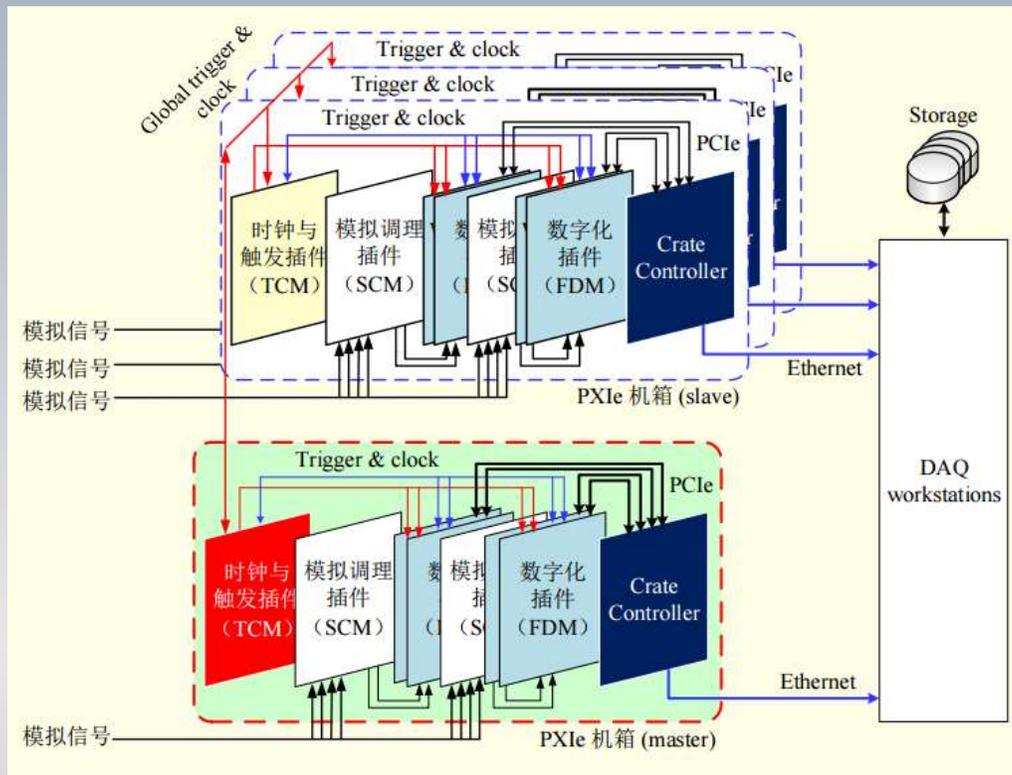
# $\Delta E$ -E探测器 (LPMWPC+Si)



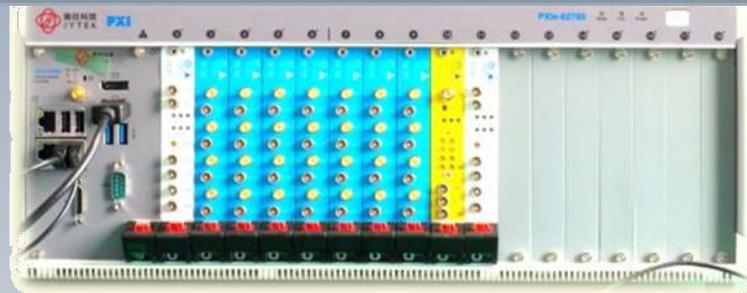
后续还加入了CsI探测器作为第三级，可以测量100MeV的质子事件

LPMWPC气压可以在300-1E5Pa之间调整

# 共用电子学系统



共用电子学系统总体架构



共用读出平台及电子学插件

共用电子学：Back-n合作组中科大电子学组开发，由模拟调理插件(SCM)、触发时钟插件(TCM)、波形数字化插件(FDM)组成。

- 采样精度:12 Bit
- 采样率: 1G Hz
- 接口: PXIe

目前可以同时测量26路输入信号，计划在2019年底扩展至40路。

# 数据获取系统



数据获取系统：Back-n合作组开发，  
2.0G Hz×56核数据处理能力；多线程并行处理；图形化。

可视化部分：

- 数据获取操作界面
- 数据在线显示界面

从2017年7月开始使用，应用到30个物理实验及探测器测试中。经过数轮优化，目前性能稳定。



数据获取操作界面

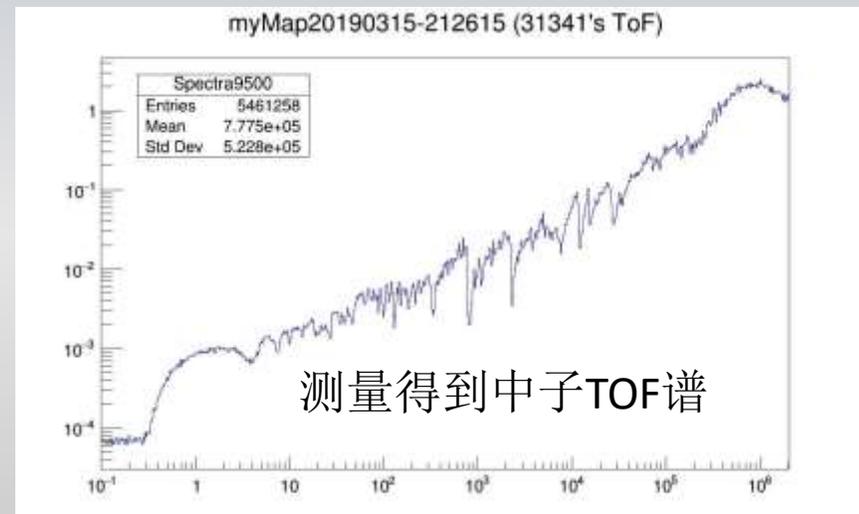
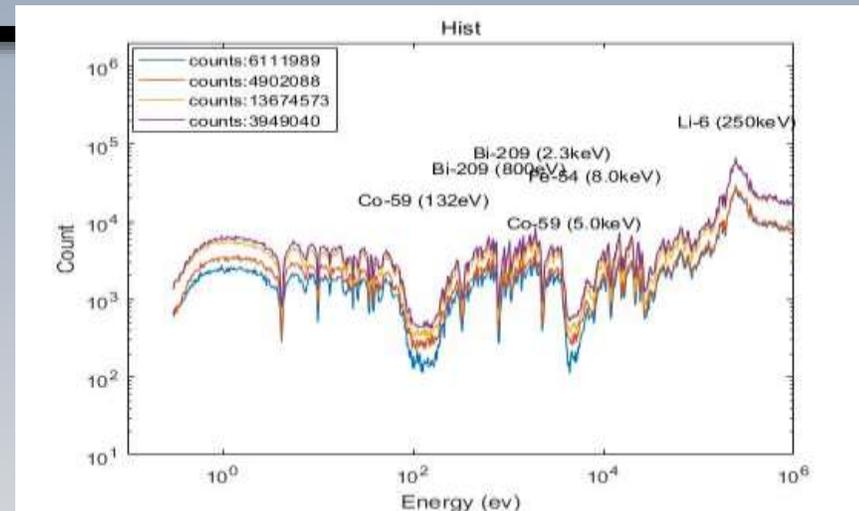
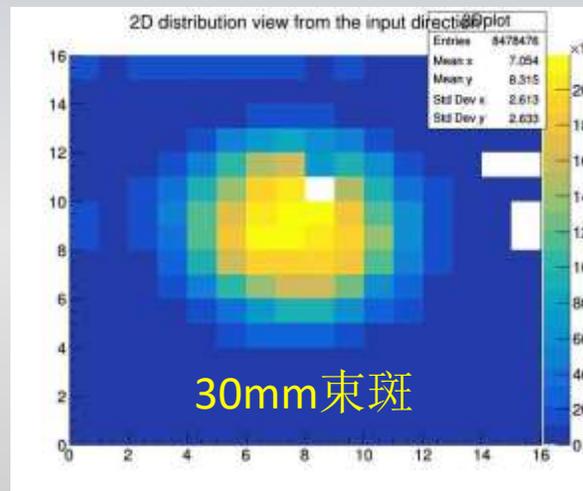
获取系统在线显示界面

# 闪烁阵列探测器

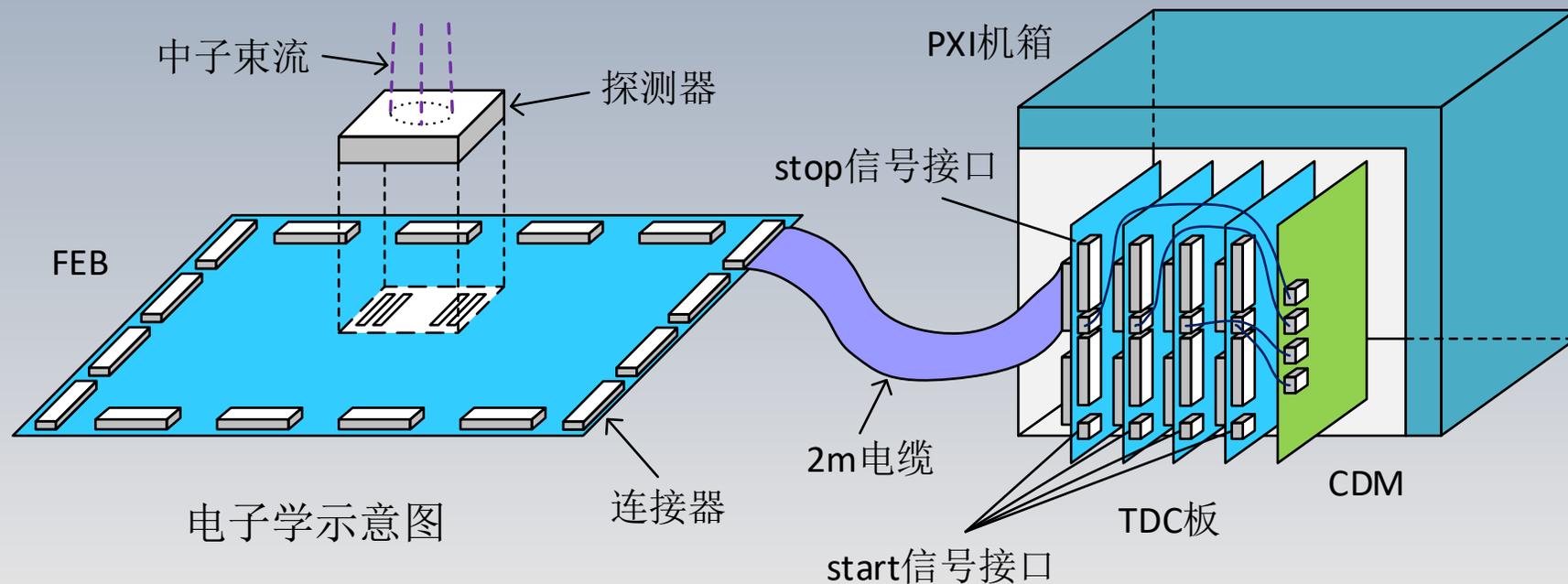


探测器实验现场

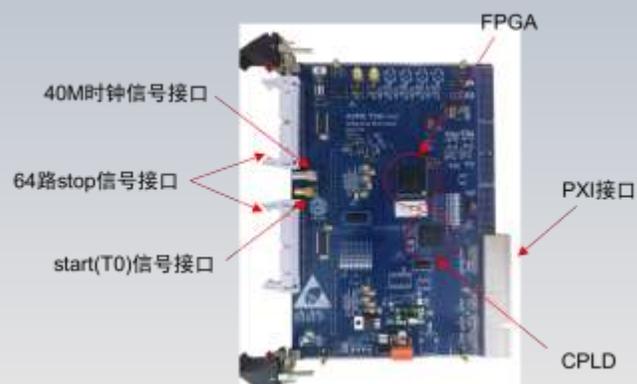
闪烁阵列探测器基于滨松H9500多阳极光电倍增管，使用一整块锂玻璃作为中子转换屏。



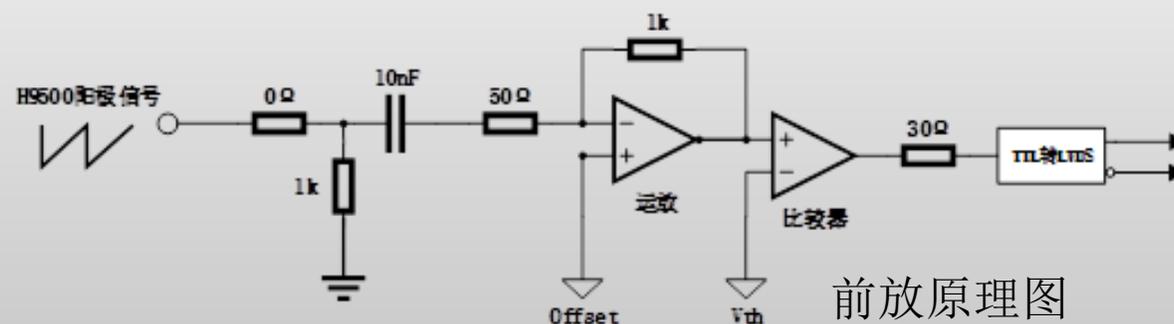
# 飞行时间电子学系统



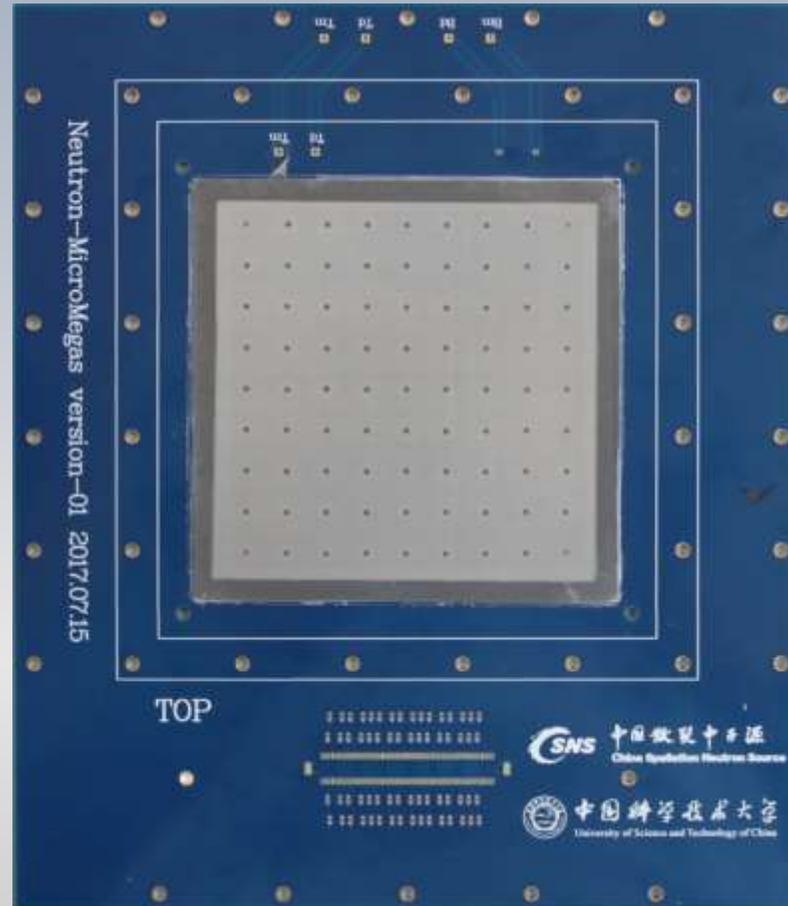
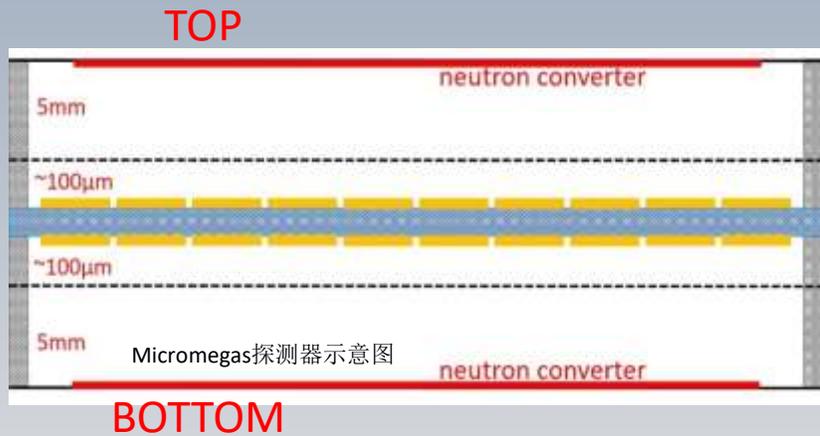
TDC板照片及说明



- 由FEB、TDC板、时钟模块、数据采集软件、阈值配置软件等组成
- 基于6U PXI机箱框架和LabWindows虚拟仪器技术
- 时间分辨 (RMS) <math>< 3.5\text{ns}</math>、动态范围>10ms

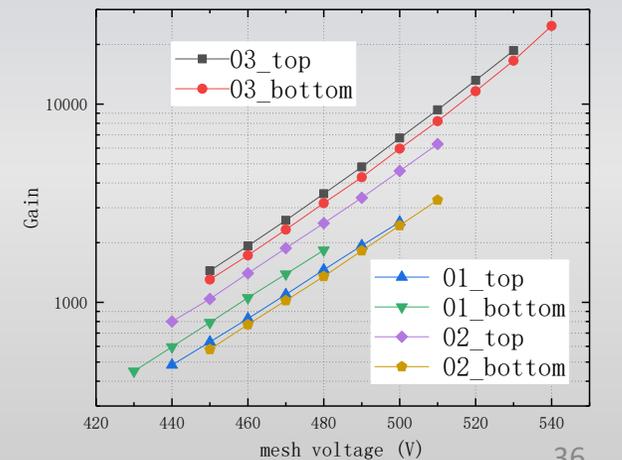
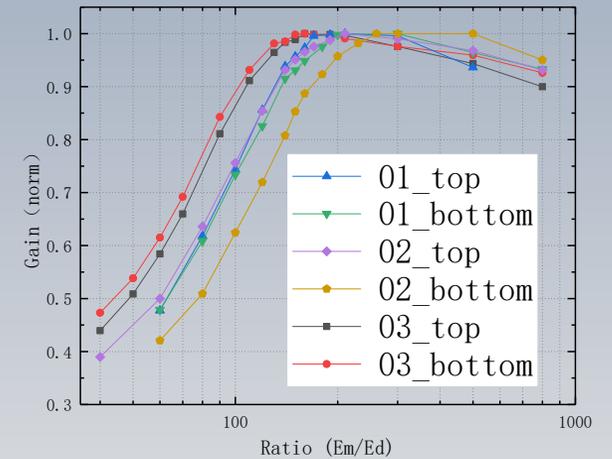


# Micromegas探测器



- ◆ 金属阳极（无阻挡层）探测器
- ◆ 天然B/<sup>6</sup>Li中子转换体，1µm/0.1µm
- ◆ 电压：Vm=-380V，Vd=-450V
- ◆ 束斑直径φ=20，30或60cm

Micromegas探测器照片

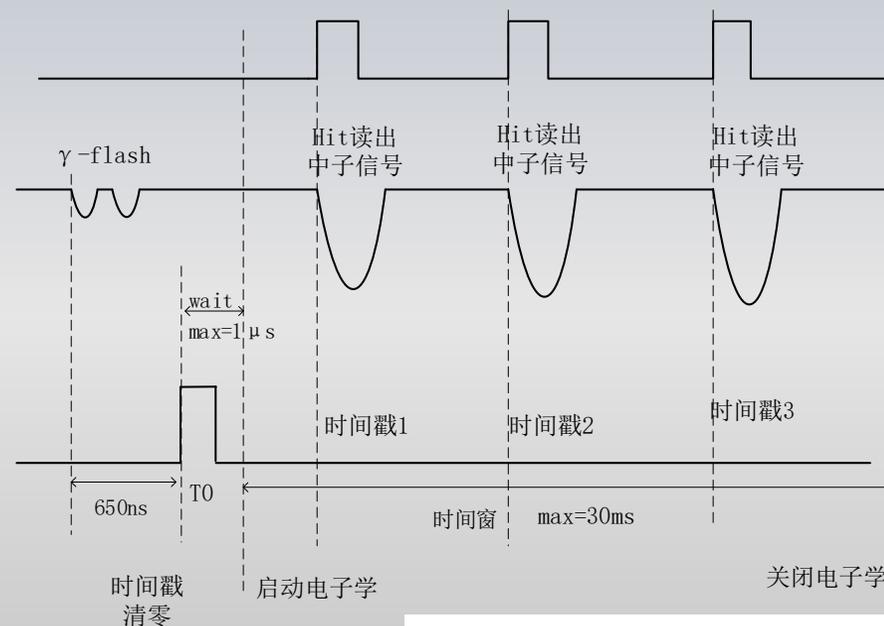
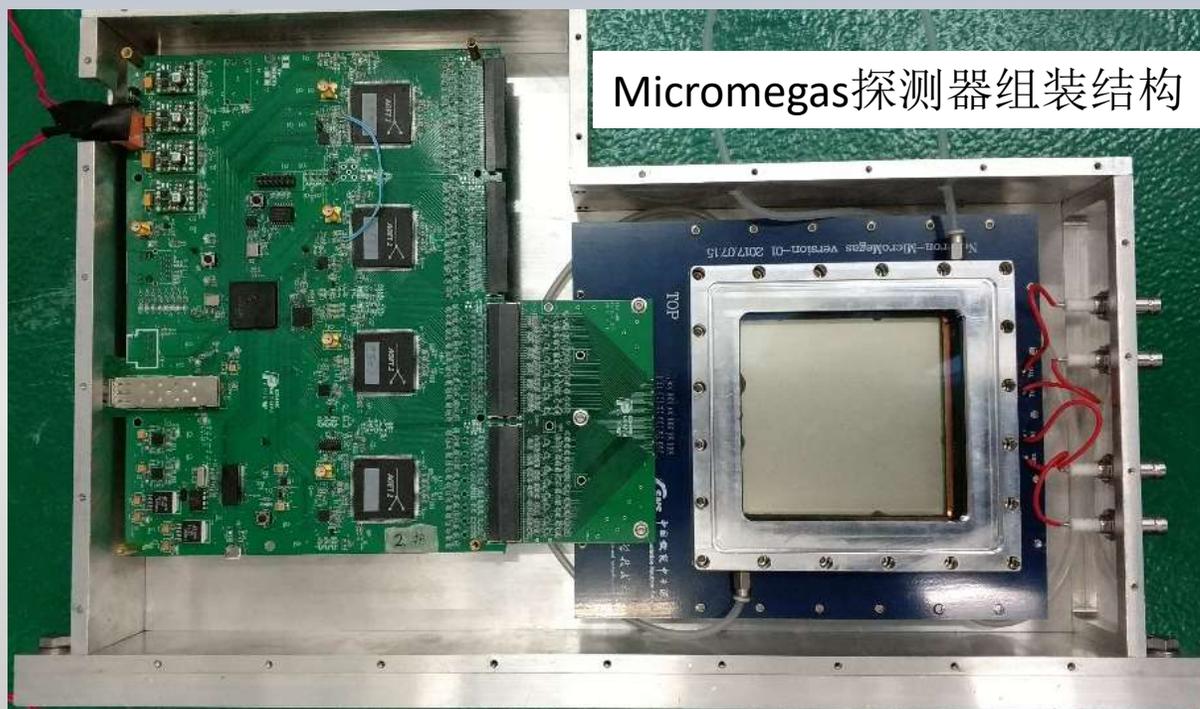


# Micromegas电子学1



科大研发，与PANDAX-III电子学基本一致  
共256通道AGET芯片的读出电子学  
波形采样、每芯片4块AGET

- ❑ 由法国Saclay实验室设计的通用TPC读出芯片
- ❑ 通道数: 64 (每通道512个采样电容)
- ❑ 动态范围: 120fC, 240fC, 1pC, 10pC
- ❑ 达峰时间: 50ns - 1 $\mu$ s (16 values)
- ❑ 采样率: 1MHz - 100MHz可配置



根据Back-n需求对电子学逻辑的改进

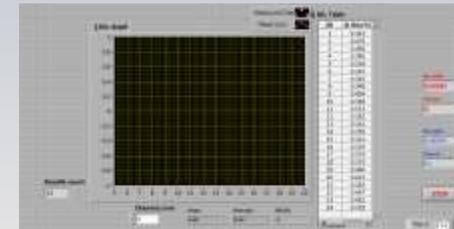
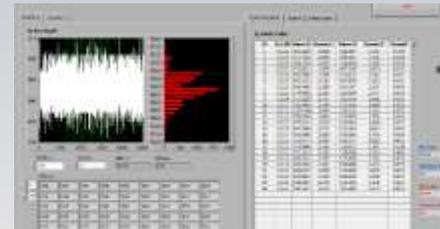
# Micromegas电子学2



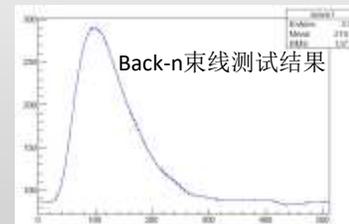
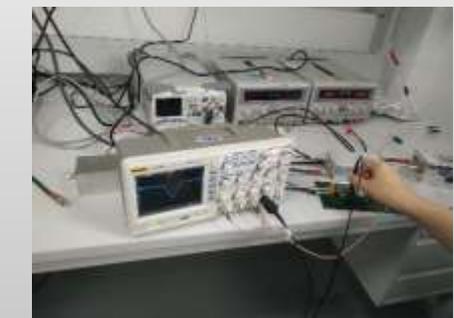
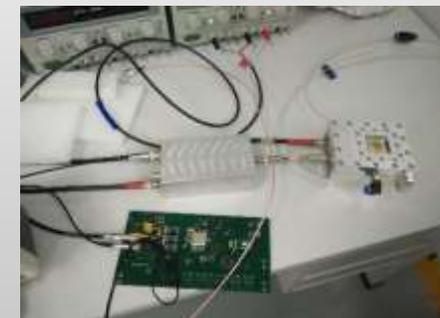
- 由高能所研制，基于高压3HE多丝正比室电子学
- 样机研制：完成前放板、触发板、控制板样机的研制，其中前放板和触发板采用堆叠结构
- 性能测试：平均电荷分辨率为0.5fc；平均电荷积分非线性为0.48%；平均时间分辨为8~12ns
- 联调测试：探测到信号，本底噪声较低



样机图



性能测试结果图



联调测试

# 提纲

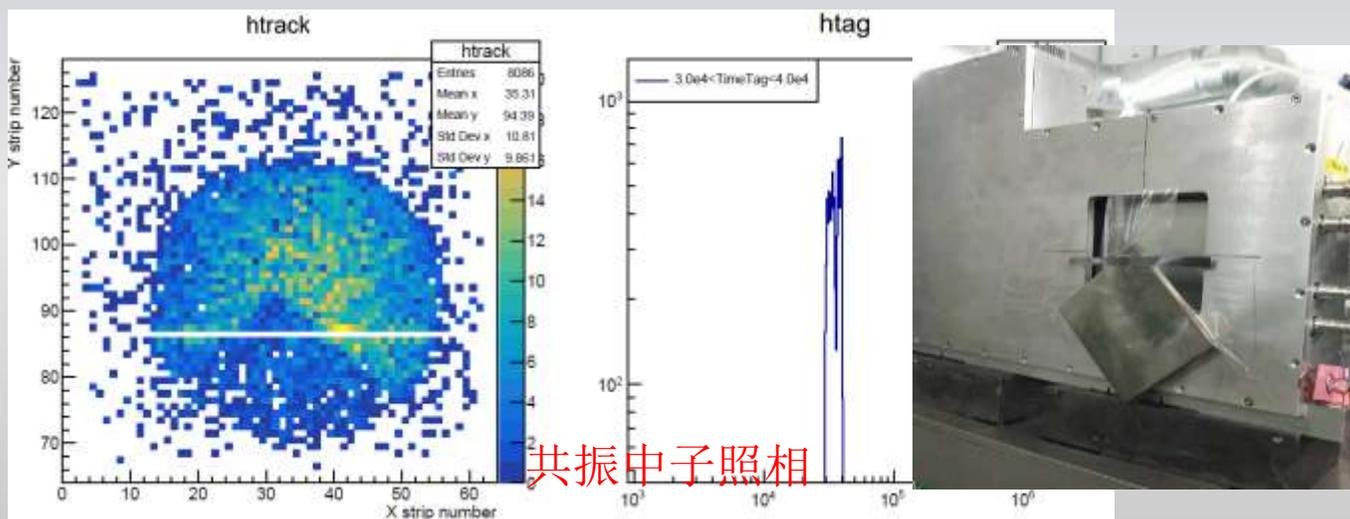
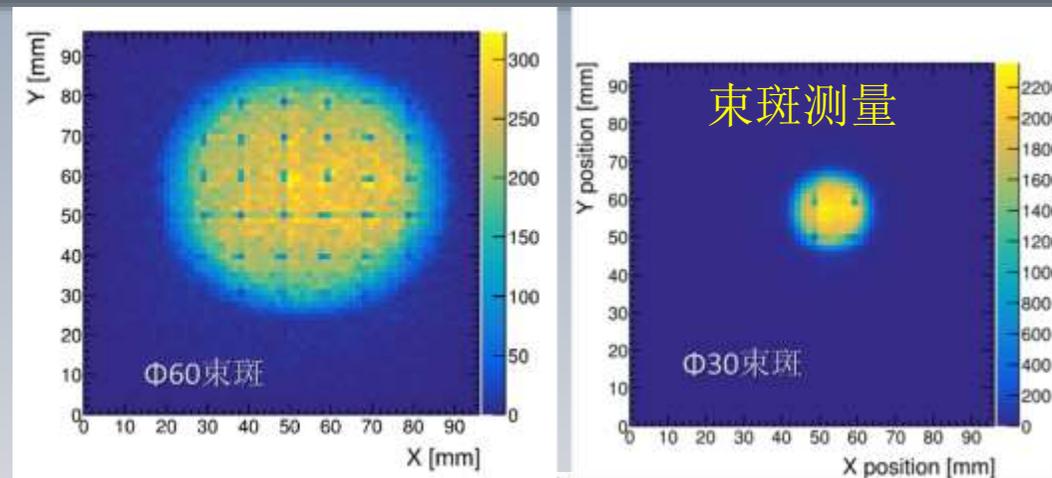


- Back-n合作组及白光中子源束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 探测器及电子学技术
- 未来探测器发展规划

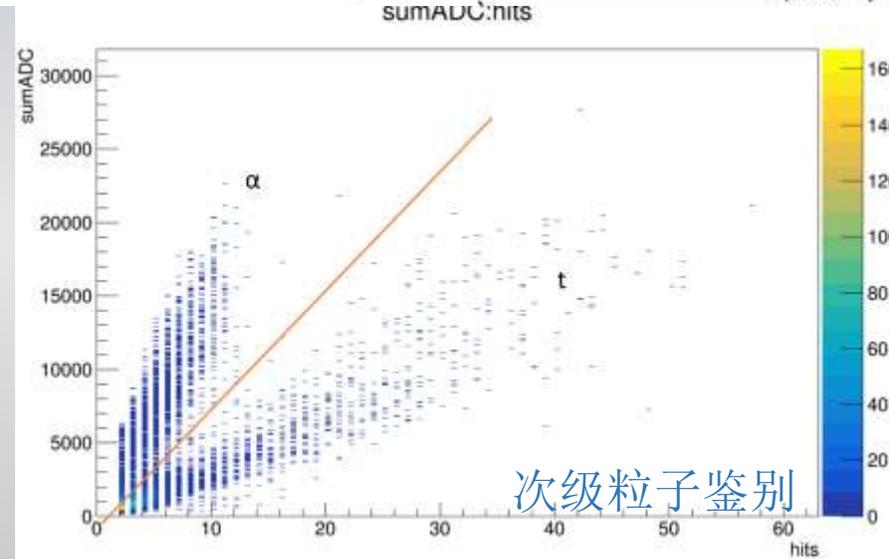
# 未来探测器发展规划



- Back-n目前的困难：空间、时间
- 发展多用途型探测器：TPC
  - 束流品质测量：束斑、能谱
  - 核数据测量：带电粒子、裂变碎片
  - 其他相关研究：中子共振照相



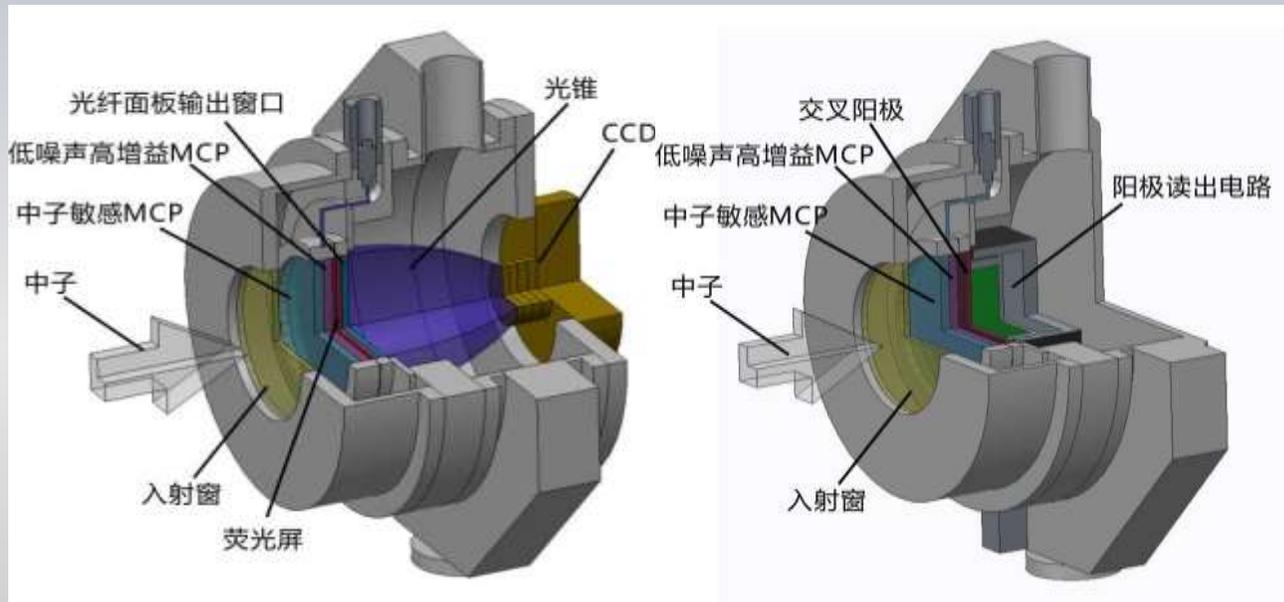
共振中子照相



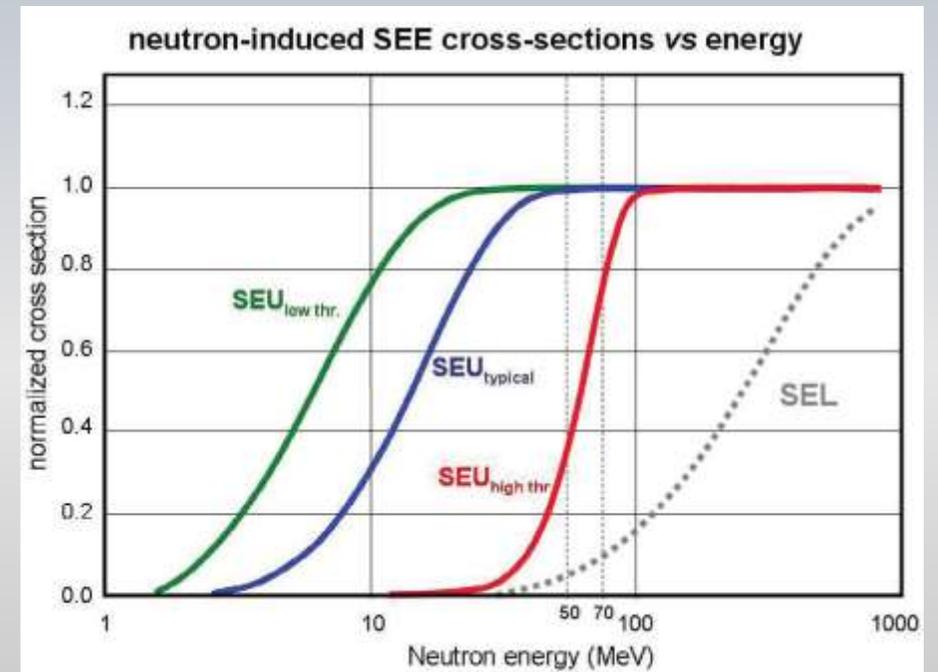
次级粒子鉴别

# 未来探测器发展规划

- Back-n的最大优势：亮度高、较好的时间分辨
- 中子共振照相技术：CMOS相机、MCP、MAPMT
- 单粒子效应技术：SEE截面测量、中子能谱反演



共振中子照相方案设计



# 核探测与核电子学国家重点实验室



- 项目组内
  - 2016-2017白光中子源探测器预研
  - 2017液闪光纤阵列中子探测器研究
  - 2018小型多用途TPC的研制
  - 2019硅探测器的数字化脉冲形状甄别研究
- 项目组外相关的研究
  - 平面结碳化硅耐高温抗辐射探测器及多路读出电子学研究
  - PIN 结碳化硅 3x3 像素探测器及中子探测应用
  - 微结构气体探测器的通用、可扩展读出电子学研究

**感谢重点实验室的大力支持！**



参与散裂中子源首次打靶实验的Back-n合作组全体成员

谢谢各位的聆听！