



# 白光中子多用途时间投影室

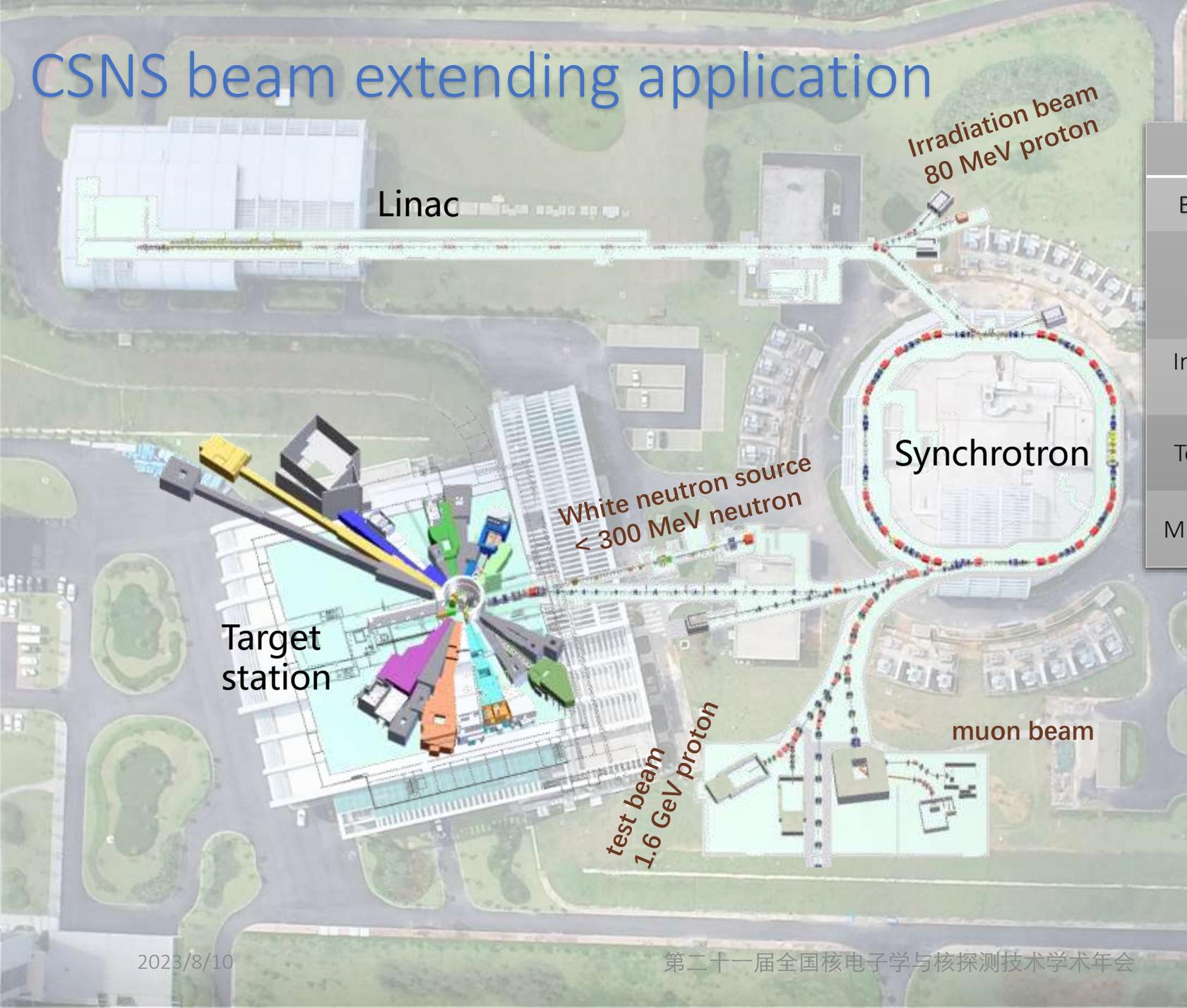
樊瑞睿<sup>1, 2, 3</sup> 代表 MTPC项目组

1. 散裂中子源科学中心
2. 中国科学院高能物理研究所
3. 核探测与核电子学国家重点研发计划

# 设计目标

motivation

# CSNS beam extending application

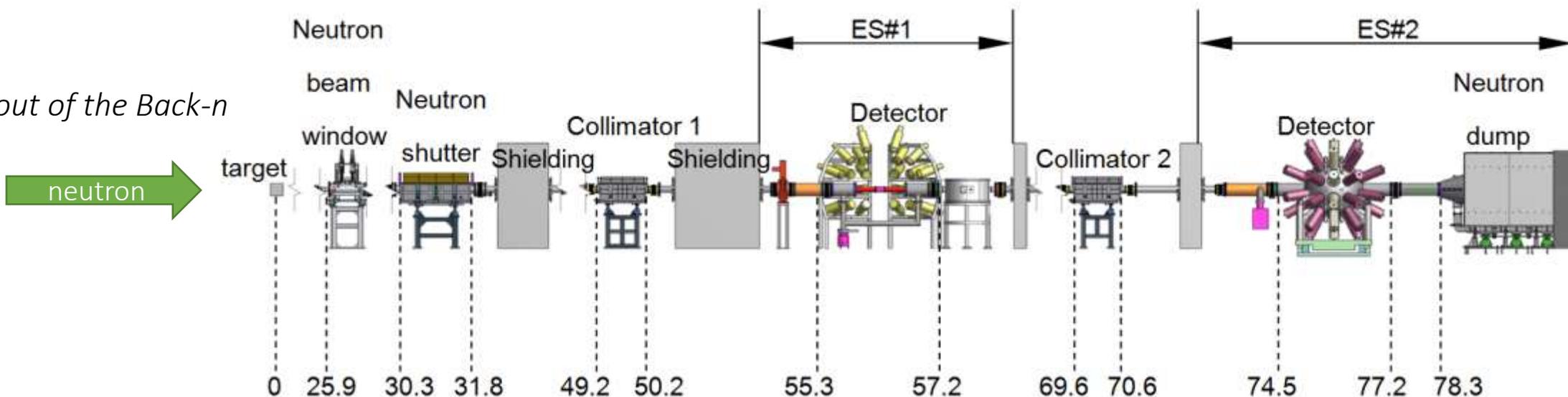


Beam parameters			
Beamline	Particle	Energy	flux
White neutron source	Neutron	thermal-300 MeV	$1E7 \text{ n/cm}^{-2}/\text{s}$
Irradiation beam	Proton	80 MeV	$1E9 \text{ p/s}$
Test beam	Proton	1.6 GeV	$1E3 - 1E8 \text{ p/s}$
Muon beam	Muon	4 MeV	$1E5 \text{ muon/pulse}$

The Back-n is a white neutron beam line that is opposite to the target station direction. It started running in 2018 for nuclear data measurements.

# Back-n

Layout of the Back-n

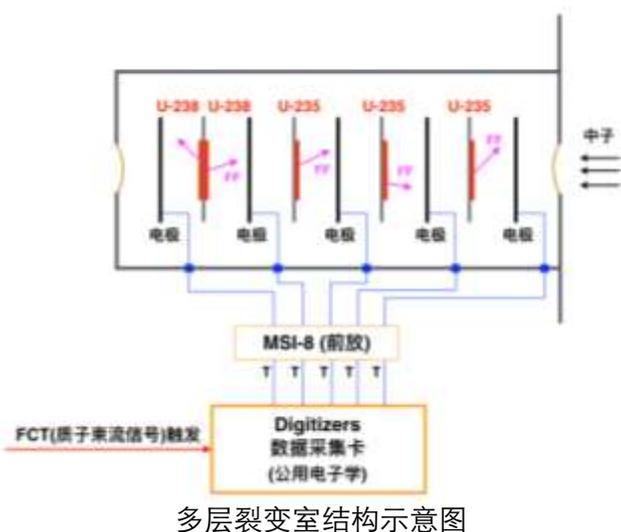


Shutter (mm)	Coll#1 (mm)	Coll#2 (mm)	ES#1 spot (mm)	ES#1 flux (n/cm <sup>2</sup> /s)	ES#2 spot (mm)	ES#2 flux (n/cm <sup>2</sup> /s)
Φ3	Φ15	Φ40	Φ15	1.27E5	Φ20	4.58E4
Φ12	Φ15	Φ40	Φ20	2.20E6	Φ30	7.81E5
Φ50	Φ50	Φ58	Φ50	4.33E7	Φ60	1.36E7
78×62	76×76	90×90	75×50	5.98E7	90×90	2.18E7

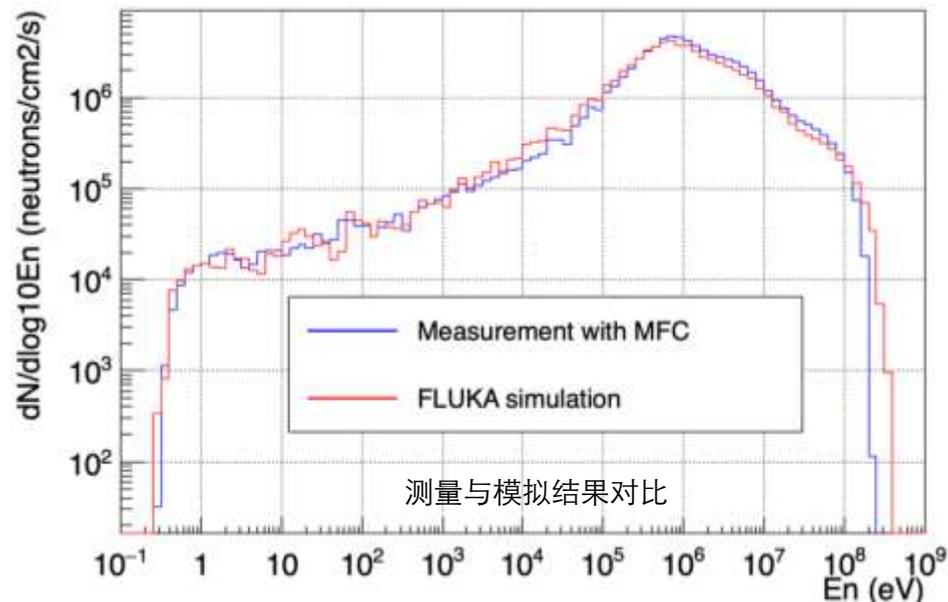
The back-streaming neutrons are leading to the Back-n tunnel, which has a long flight distance for the neutron time-of-flight method. Two end stations ES#1 and ES#2 are constructed for different nuclear data measurements. The ES#1 has a distance of about 55 m, and ES#2 is about 70 m from the target. Different sets of beam spots, collimator apertures and neutron fluxes at Back-n at 100 kW in proton beam power can be found in table.

1. 2017 JINST 12 P07022
2. Eur. Phys. J. A (2019) 55: 115 第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会

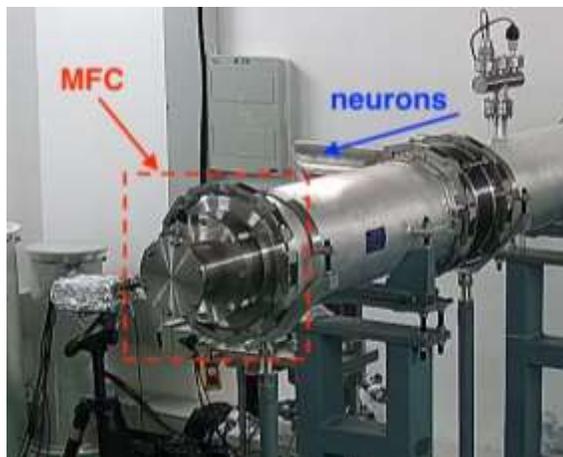
# Back-n 能谱和注量测量实验



- 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



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	$7.03 \times 10^6$

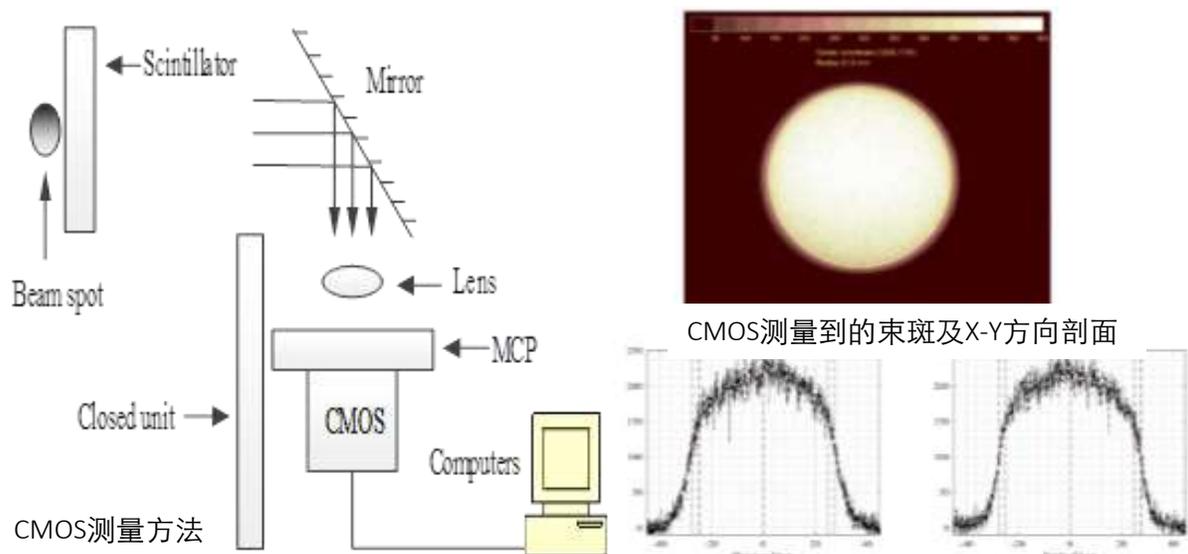


## WNS Back-n厅2(#ES2)能谱/注量

- #ES2飞行距离: ~76米
- 结果归一到100 kW打靶功率

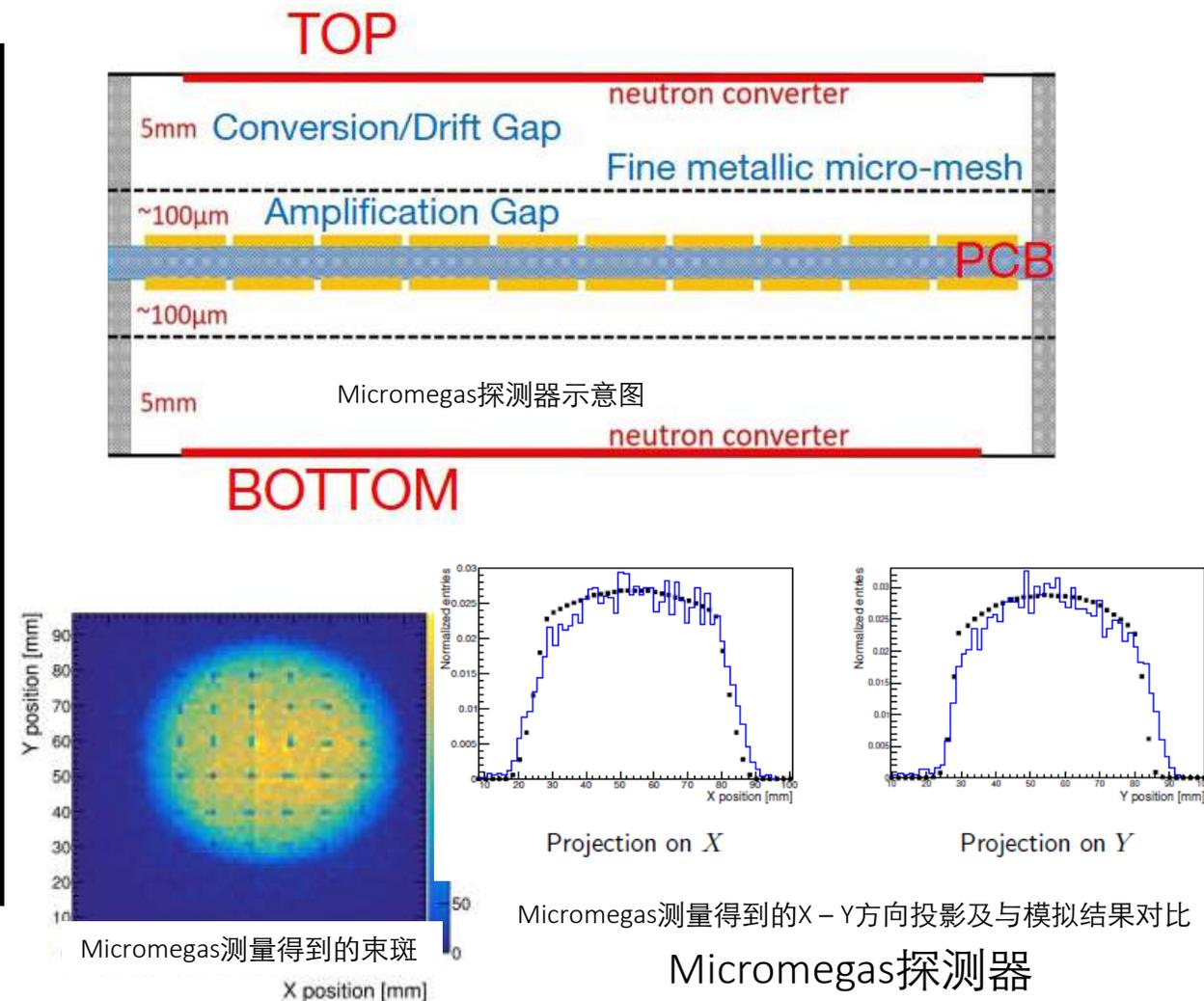
Eur. Phys. J. A (2019) 55: 115

# Back-n束斑测量



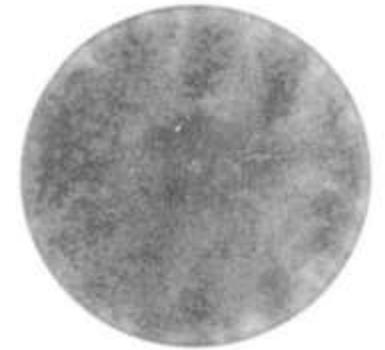
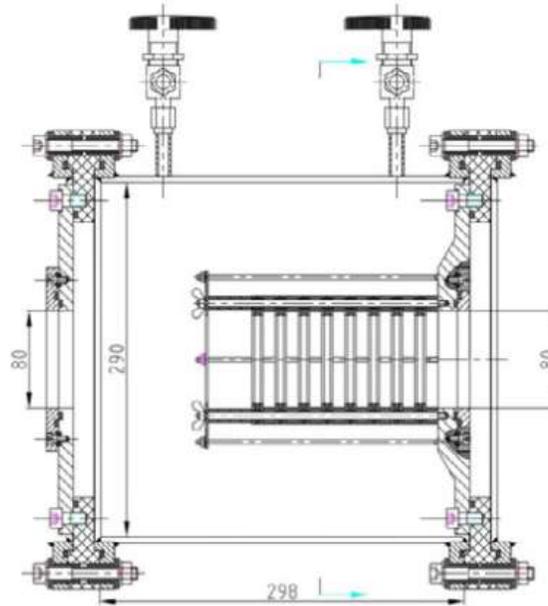
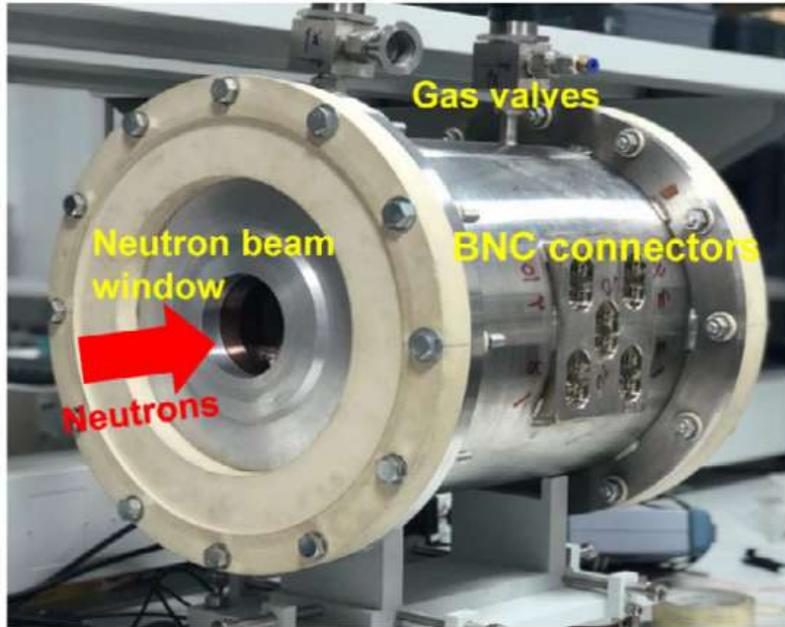
能量/MeV	计数圈半径/mm				
	5	10	15	20	25
1e-6~1e-3	6.34	6.69	7.11	7.76	8.95
1e-3~0.1	5.77	5.89	6.21	6.81	8.08
0.1~1	6.80	6.79	7.38	8.66	11.77
1~2	6.98	7.09	7.64	8.80	11.64
2~3	7.07	7.13	7.71	8.89	11.78
3~8	5.13	5.21	5.81	7.00	9.99
8~14	6.86	6.84	7.34	8.46	11.28

CMOS相机方法



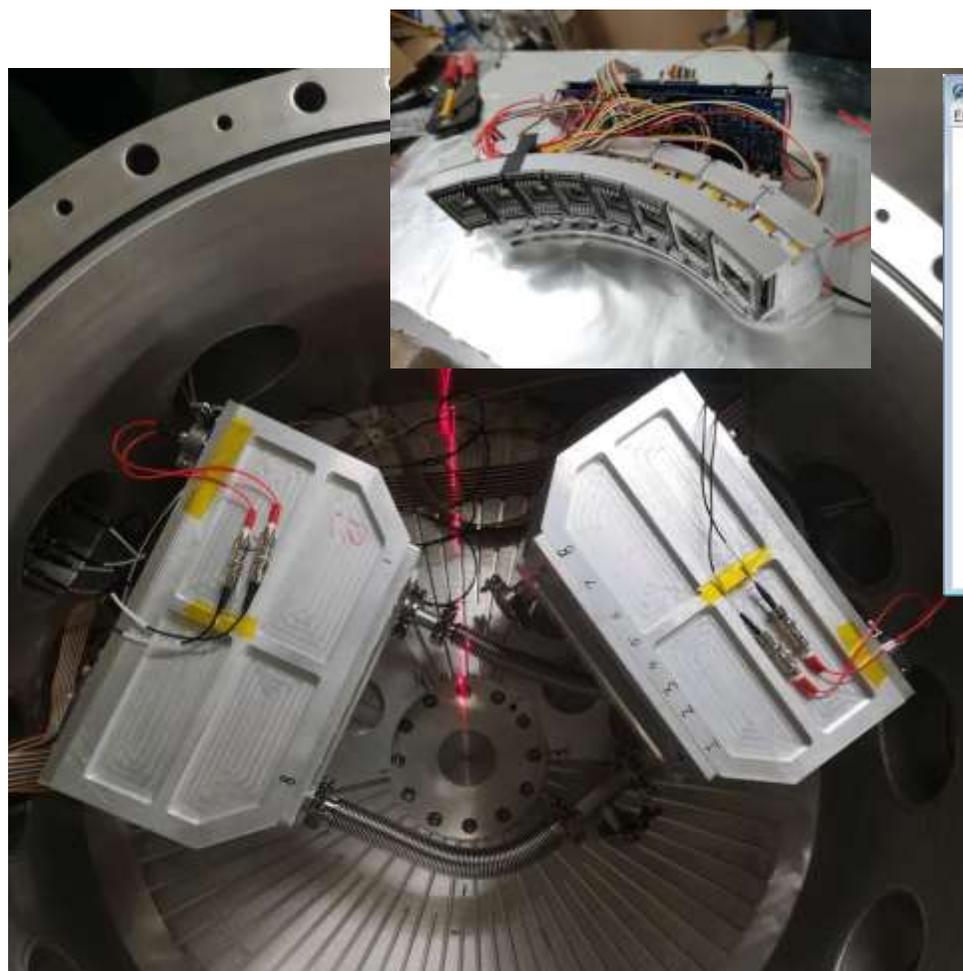
Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 957 (2020) 163407

# The fission chamber

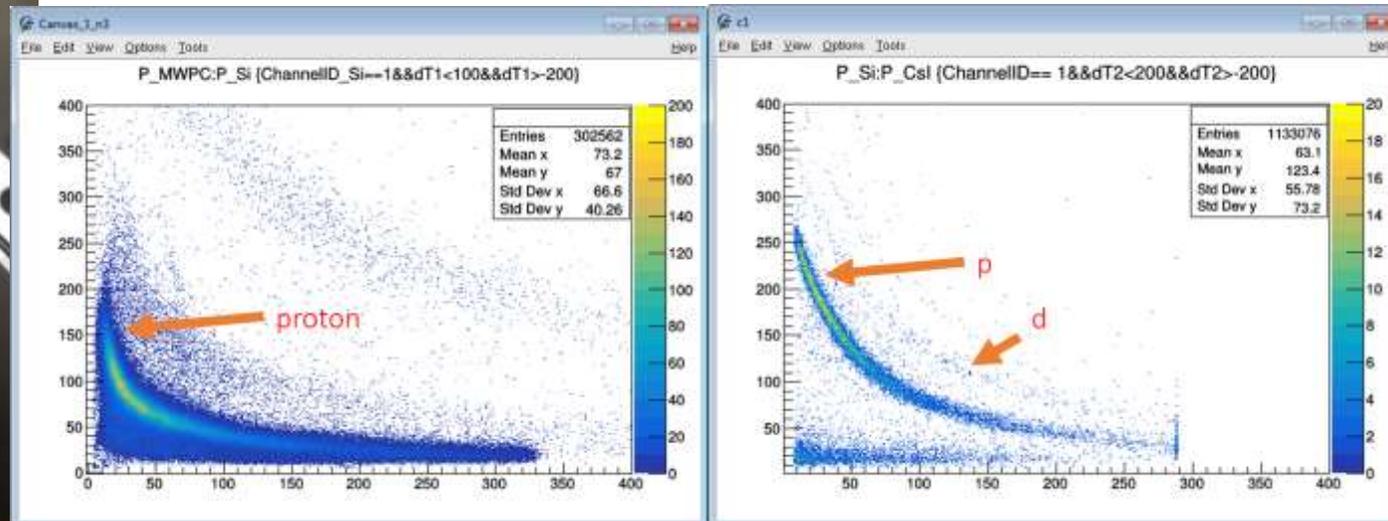


The fission ionization chamber detector measures the fission fragments generated through the reaction between the fission material ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) and neutrons, and records the energy of the neutrons by measuring their flight time.

# $\Delta E$ - $E$ detector array (LPDA)



The photo of LPDA



The LPMWPC ( $\Delta E$ ) vs Si-PIN ( $E$ ) spectrum and Si-PIN ( $\Delta E$ ) vs CsI(Tl) ( $E$ ) spectrum

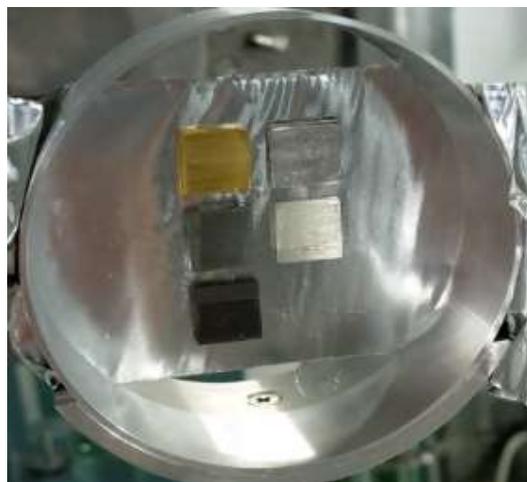
The LPDA is divided into two modules, each covering an angle of 23.5-90 degrees. It includes 8 sets of LPMWPC+Si+CsI detector telescopes, with a total of 48 channels. It was completed in June 2020 and has undergone preliminary testing.

Kang Sun *et al* 2023 *JINST* **18** P04004

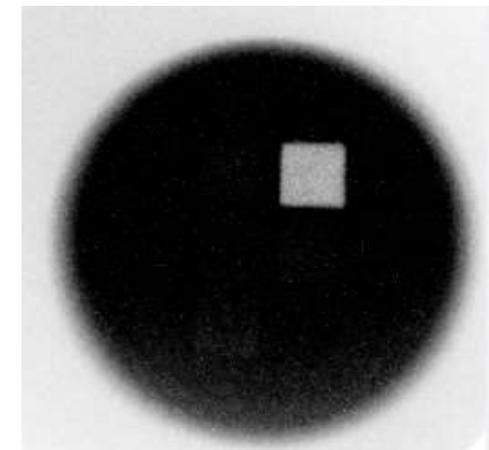
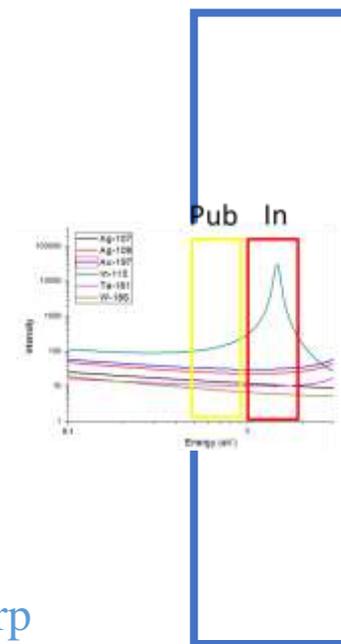
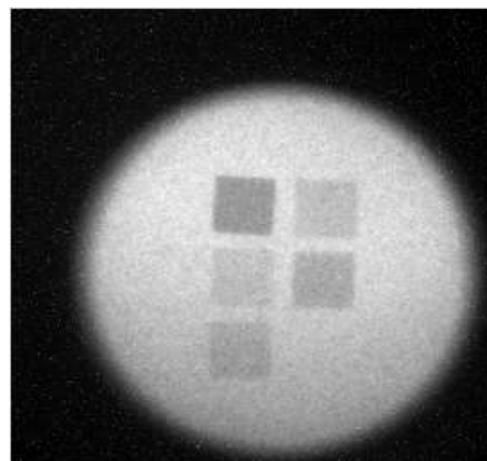
# Nuclide identification radiography (NIR)

sample:

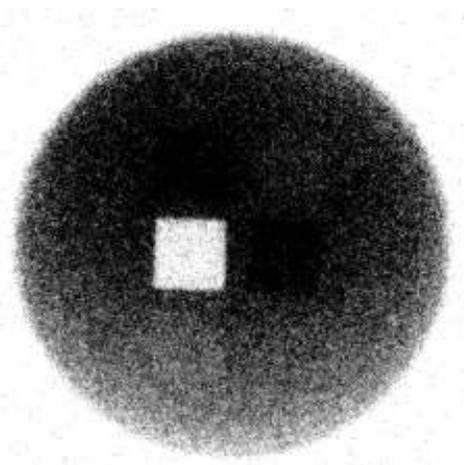
Au、Ag、W、Ta、In



Transmission image



Indium

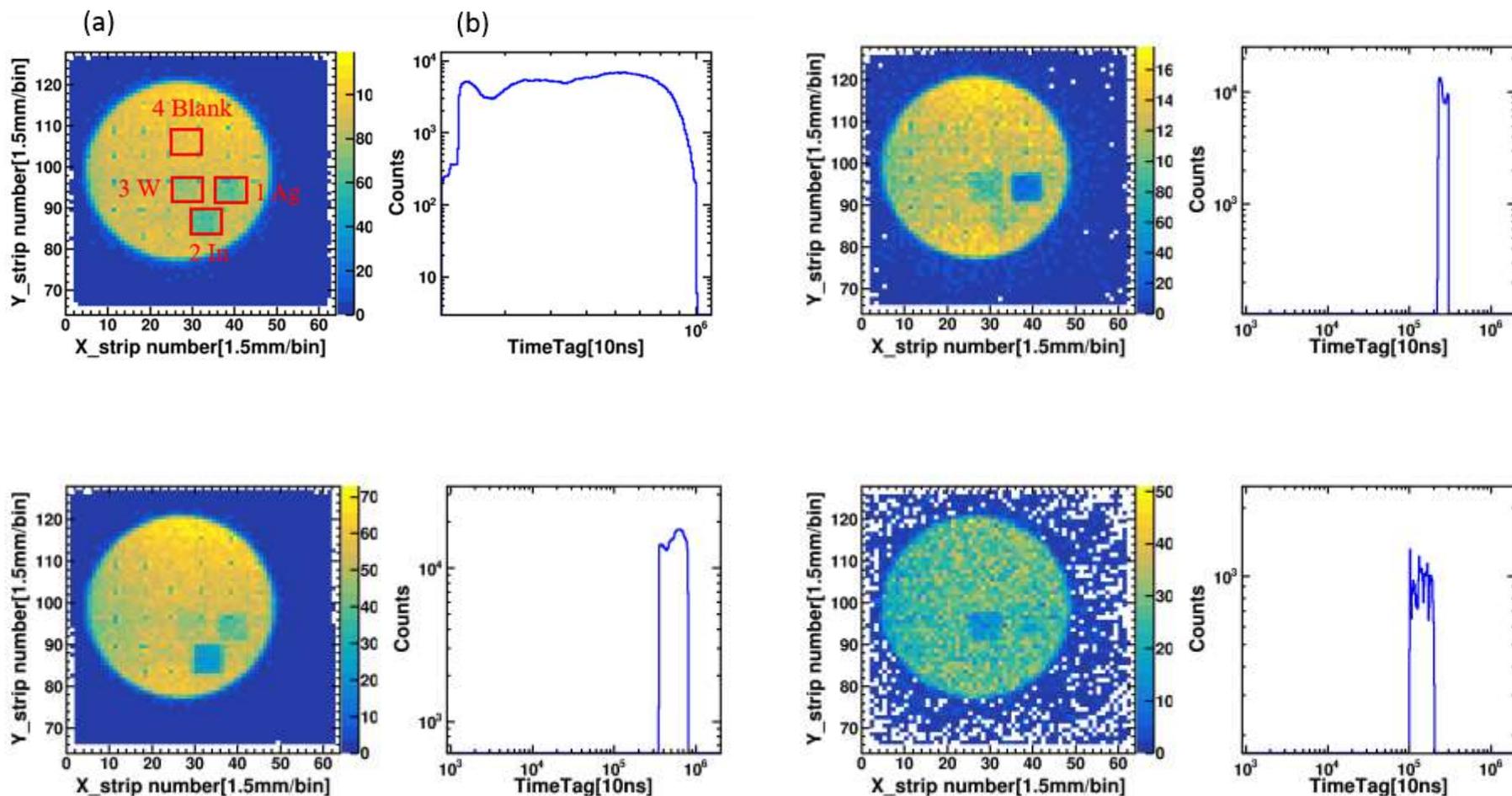


Tungsten

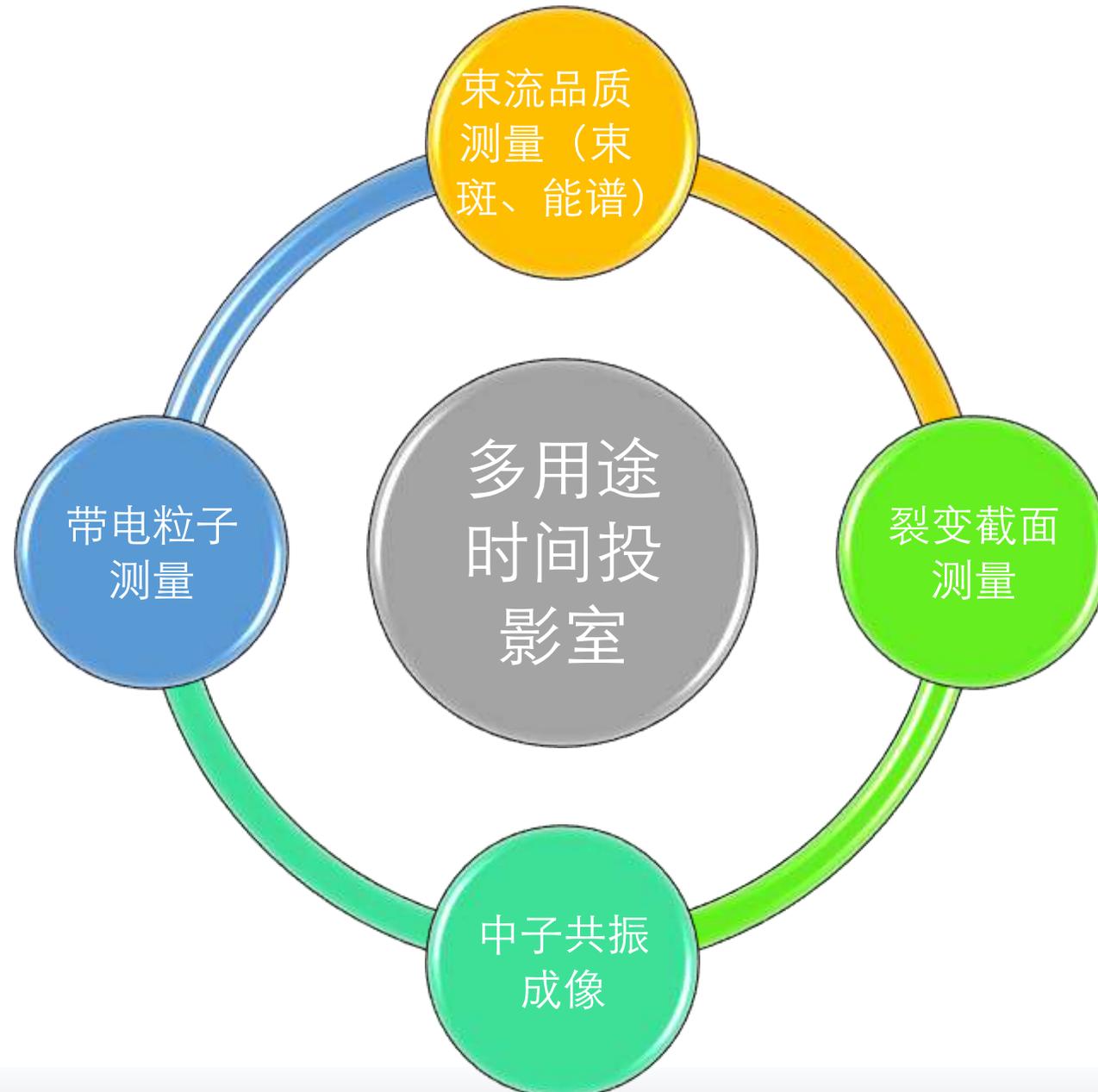
For the inspected sample containing nuclides that exhibit sharp cross-section resonances, the nuclides' distributions can be identified by analyzing the time-resolved transmission images of the neutrons through the sample. \*

\*NIMA 1048, 2023, 167892

# Micromegas共振成像



使用B转换膜进行共振中子成像可以看到对不同元素的成像结果。



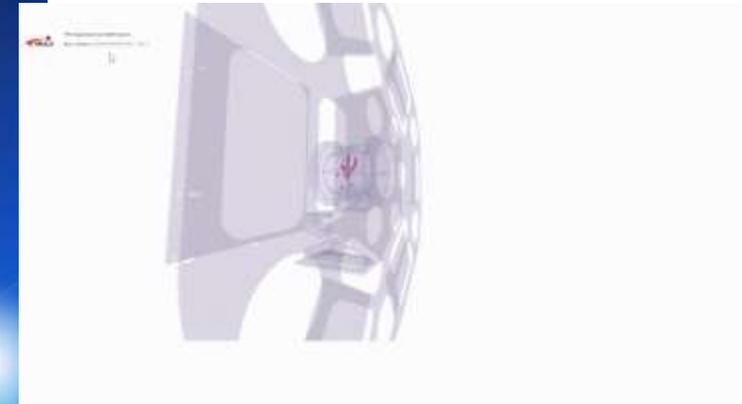
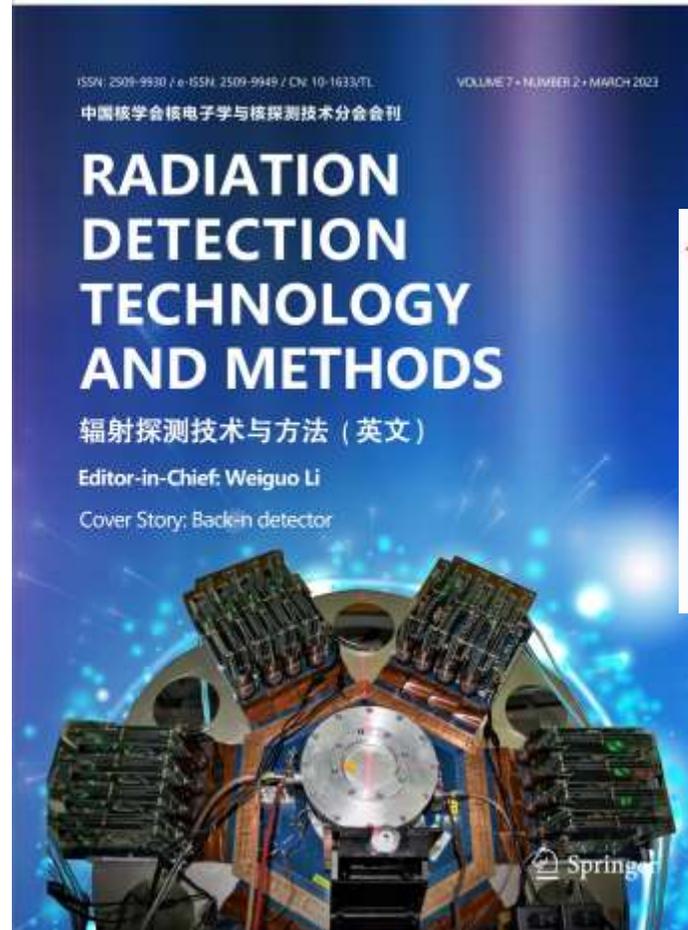
# 多用途时间投影室

Multi-purpose TPC

# Back-n multipurpose TPC

白光中子多用途TPC (MTPC) 探测器投入巨大, 制作复杂, 数据分析工作繁琐需要多家单位联合进行。合作组包括:

- 东莞研究部 (物理设计、测试、数据分析)
- 中科大 (电子学、Micromegas工艺)
- 实验中心 (DAQ)
- 北大 (物理设计)
- 九院二所.....



# 白光中子多用途TPC发展历程

2019

探测器：使用屏栅电离室  
探测器原有构架加入  
Micromegas结构

电子学：使用PandaX的基  
于AGET电子学系统

软件：基于ROOT的简单  
分析程序

2021

电子学：研制了专用的分  
立器件读出电子学

软件：BLUET框架建立

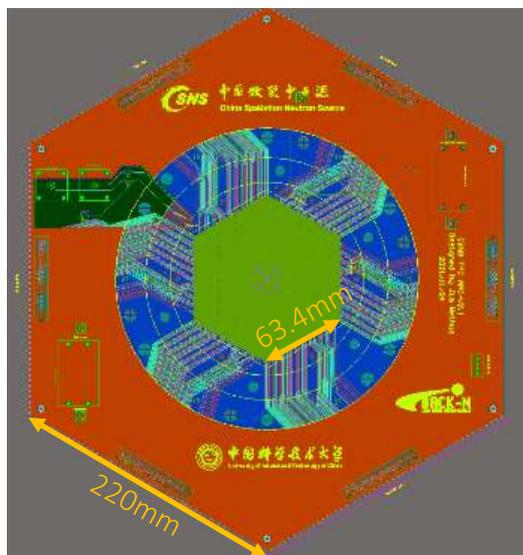
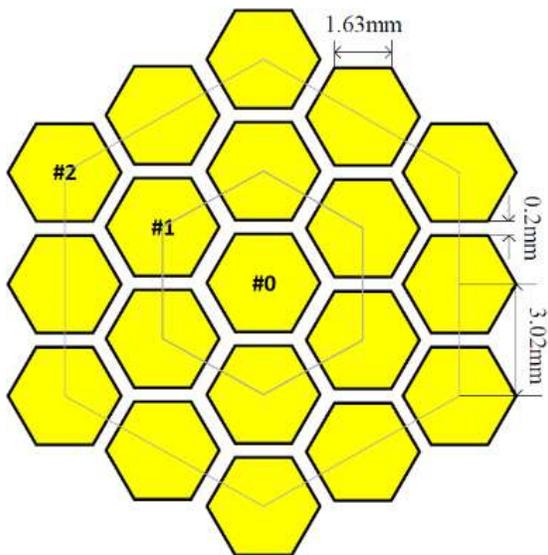
2022

探测器：高低气压系统及  
探测器优化设计

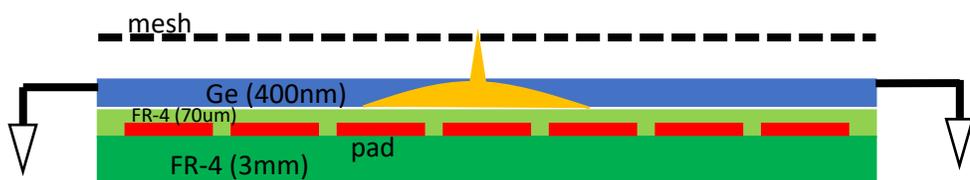
电子学：基于服务器集群  
结合在线显示功能的DAQ  
系统

软件：具备基本功能的  
BLUET框架建立

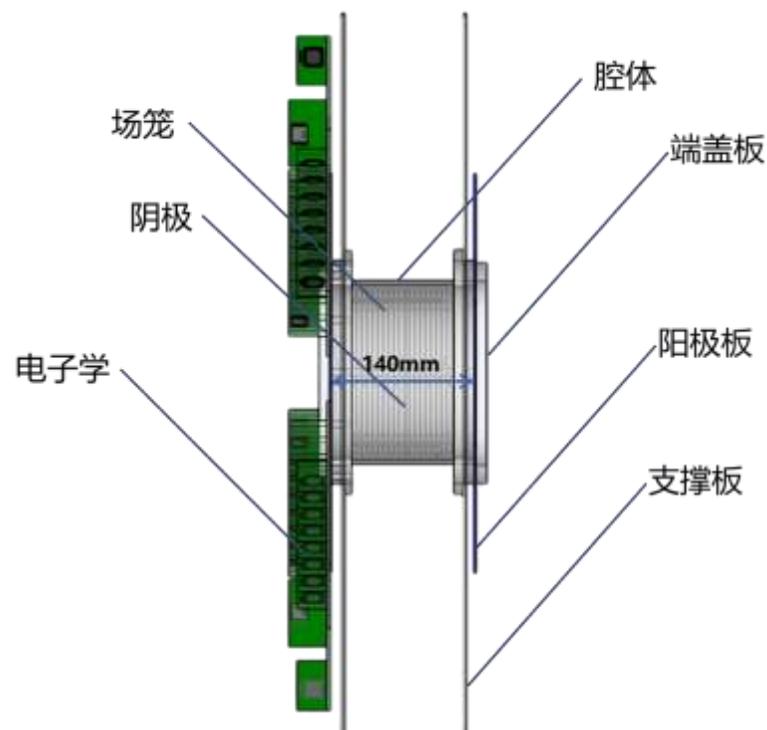
# 读出设计及机械结构



阳极读出区域为六边形pad密堆结构，共1519个pad



Micromegas作为探测器的雪崩放大结构

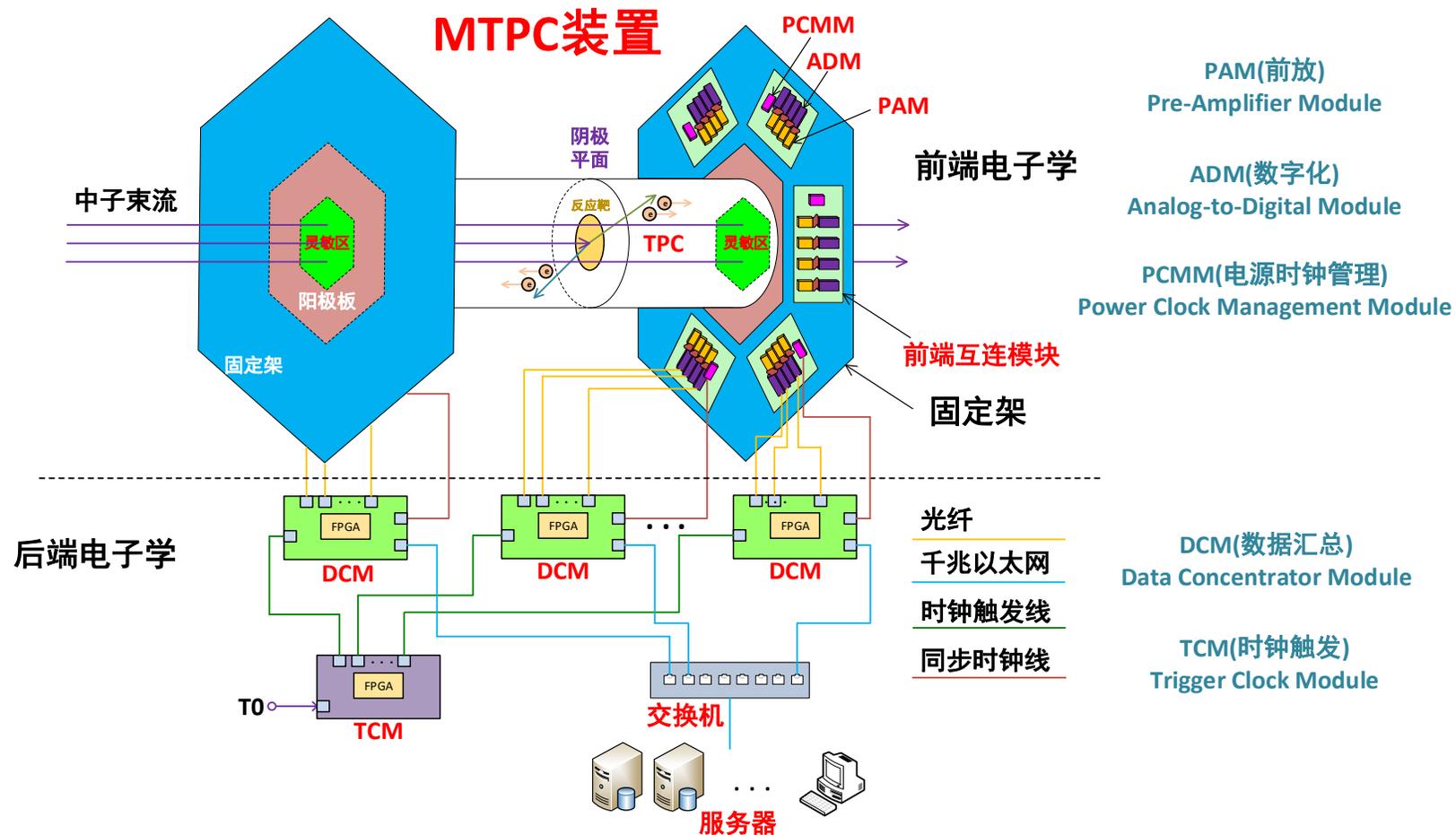


- 场笼均压环采用PCB制作，间隔5mm，设计分压电阻焊接PCB，用于均压环之间连接
- 腔体承受气压范围0~5bar，主体为钛合金结构，入射窗为100um钛合金窗

# 读出电子学

## ◆主要参数:

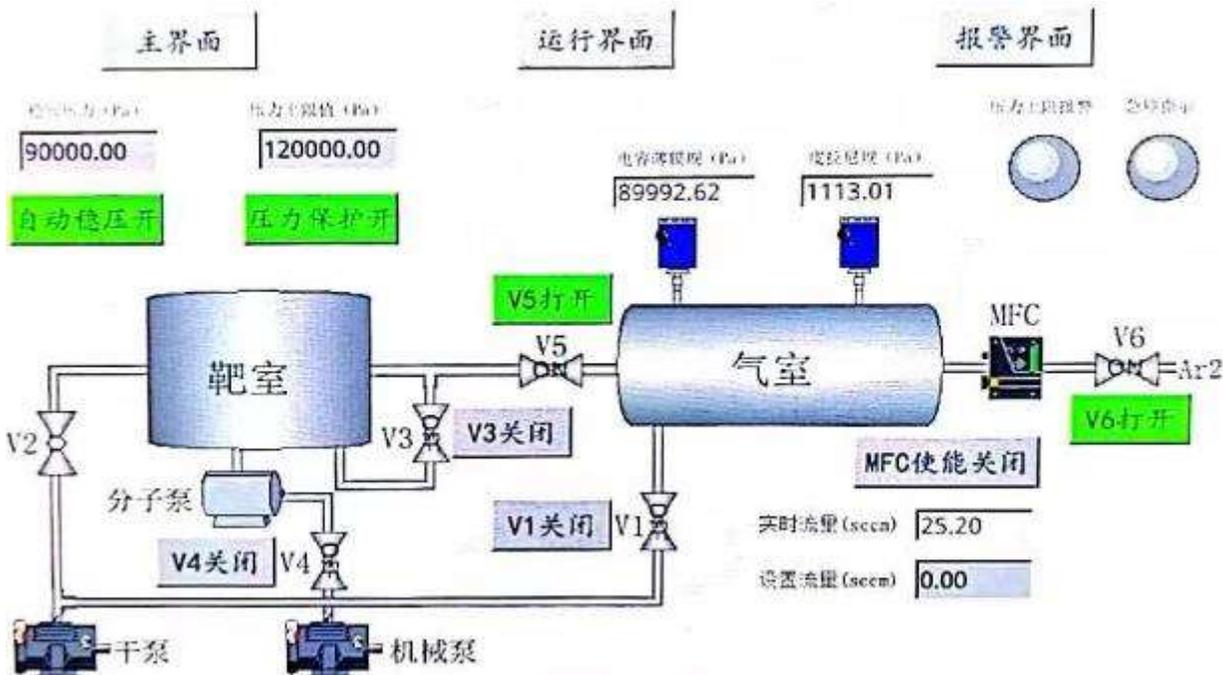
- 共1536通道 (TPC使用1521通道)
- 波形采样频率: 40MHz
- 触发采样窗宽度: 1024采样点
- ADC位数: 12bit



Z. Chen *et al* 2022 *JINST* **17** P05032  
 详见本次会议封常青老师报告

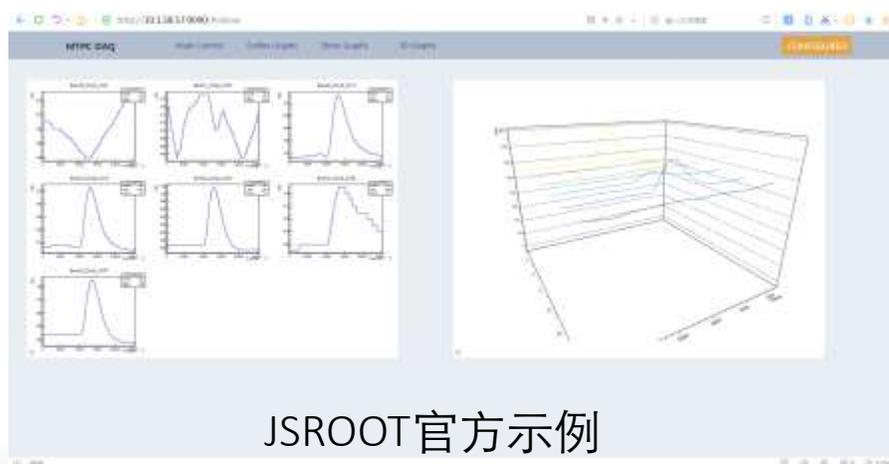
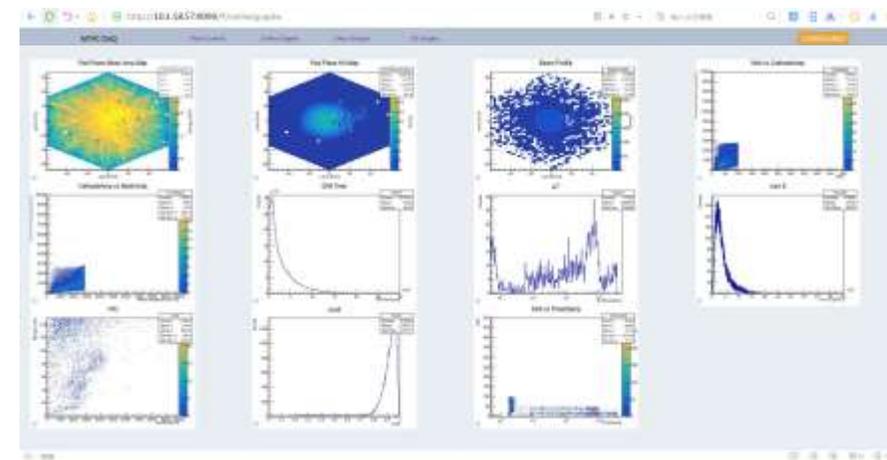
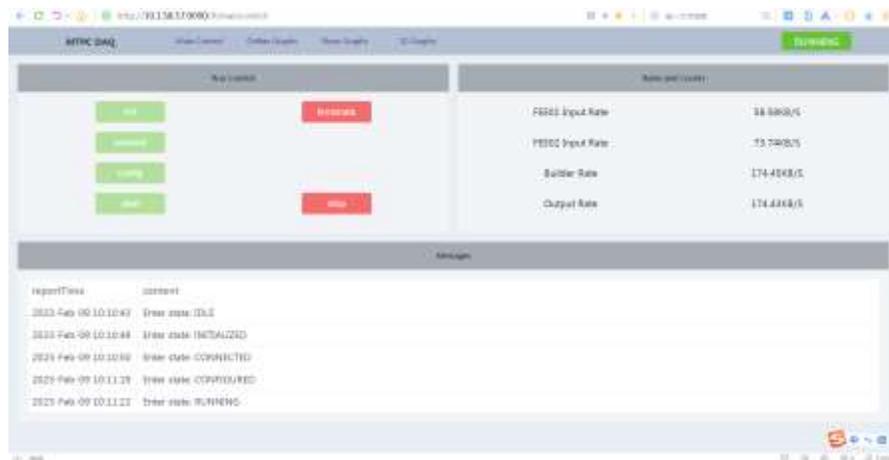
# 气路控制系统

- 可设定气压值，通过针阀和流量计自动稳压
- 混气仪可根据流量控制配比不同组分的工作气体
- 探测器气体流量通过针阀进行调节
- 控制机柜接入白光束线控制系统，可远程进行压力调节

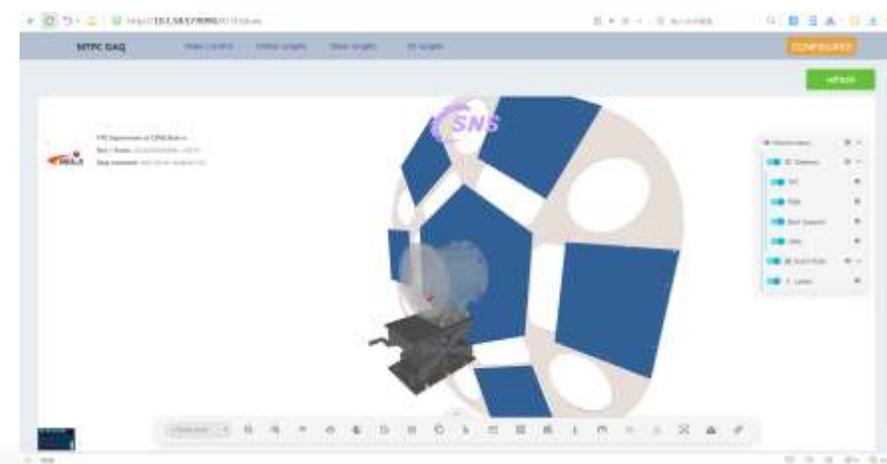


# 数据获取系统

- ◆ 数据处理软件：负责承载与数据流相关的工作（接收、组装、存储和处理）
- ◆ 在线交互软件：向上提供用户服务（执行、反馈），向下与数据流子系统信息传递



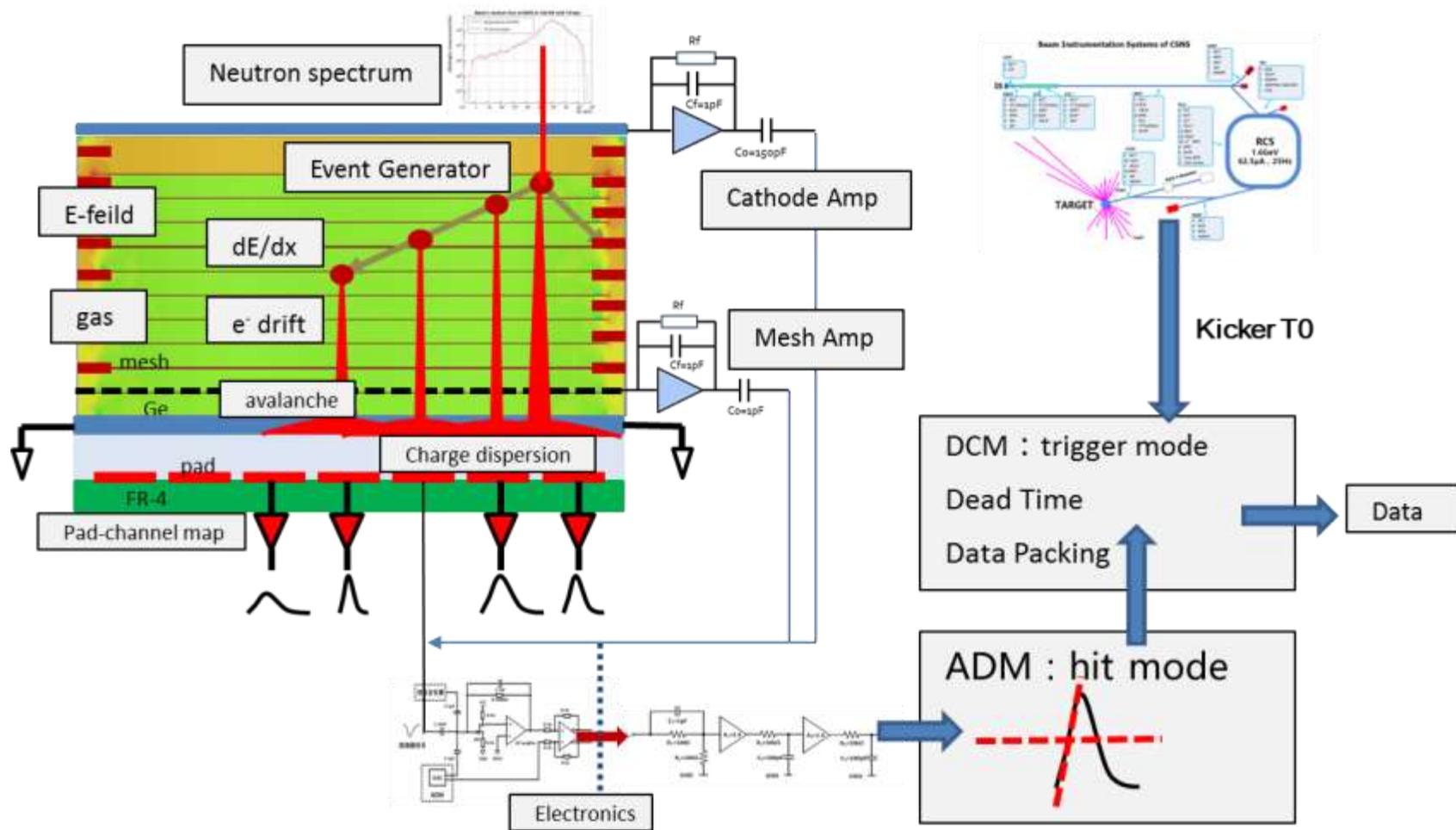
JSROOT官方示例



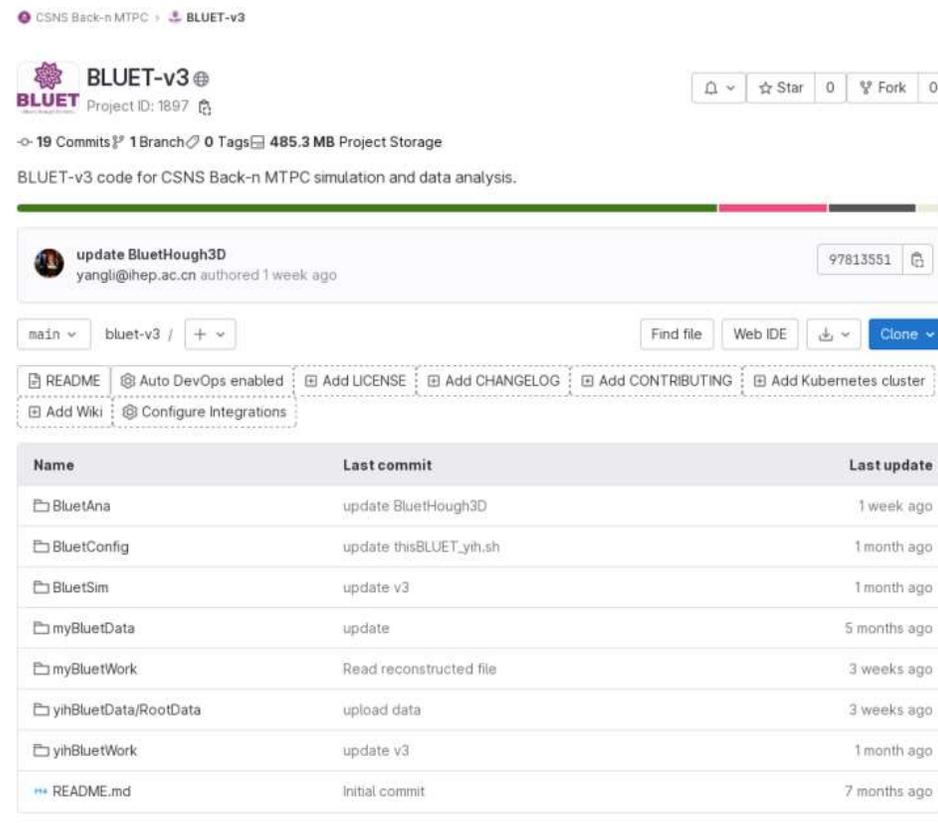
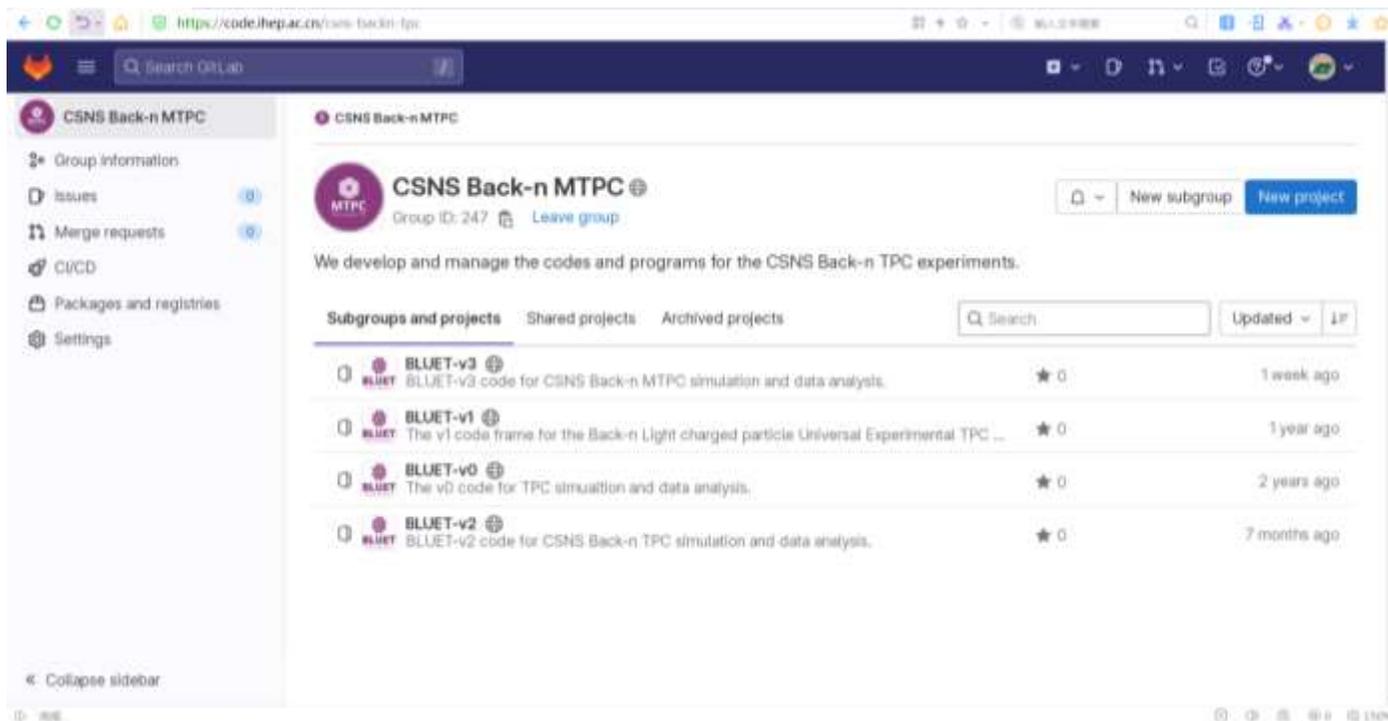
# 模拟软件框架

- 模拟程序框架包含所有的物理和电荷过程

- ✓ 气体参数
- ✓ 中子能谱
- ✓ 事例产生器
- ✓ 电离过程
- ✓ 电子漂移
- ✓ 电子雪崩
- ✓ 电荷扩散
- ✓ 电子学模型
- ✓ 阴极和mesh波形
- ✓ Hit与Trigger



# 数据分析程序



BLUET包含TPC模拟程序 and 数据分析程序

已发布至v3，正在开发v4

模拟：核反应过程、探测器过程、电子学过程全模拟

分析：解码、波形分析、径迹分析、事例分析

# X射线测试

## ◆ 实验设置

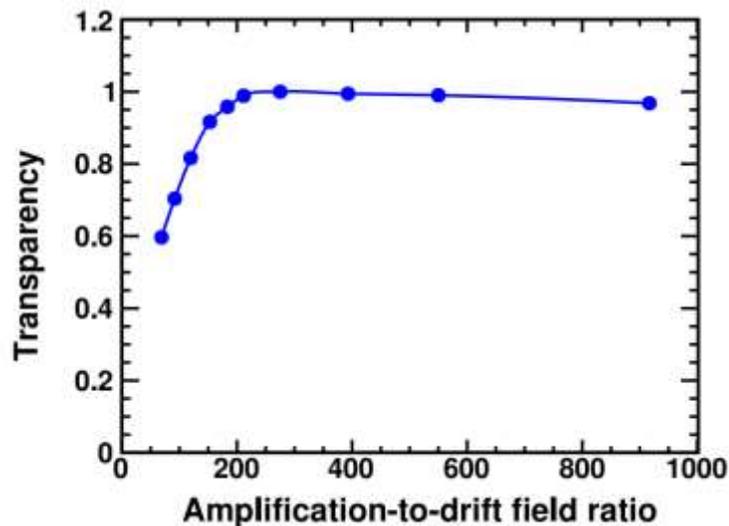
- 工作气体: Ar/CO<sub>2</sub>(93/7), Ar/CH<sub>4</sub>(90/10)
- 漂移区气隙: 5mm
- 放射源: <sup>55</sup>Fe @5.5keV X-ray

## ◆ 实验结果

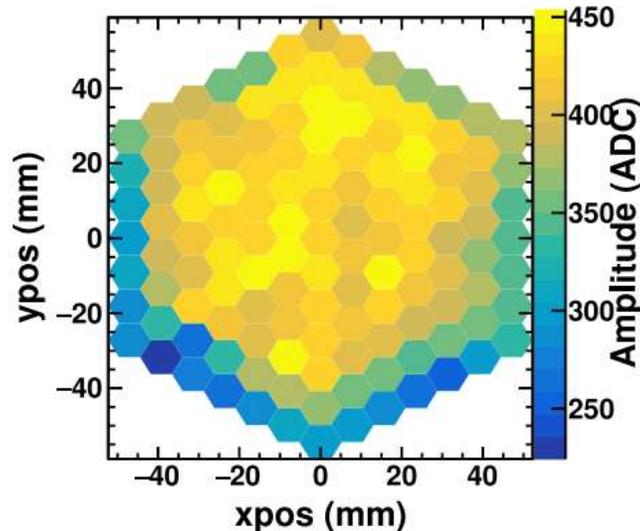
- 能量分辨率: 31% @5.9keV
- 增益均匀性: ~13%
- 放大气隙厚度及均匀性: 95 μm@2.8%(RMS/Mean)



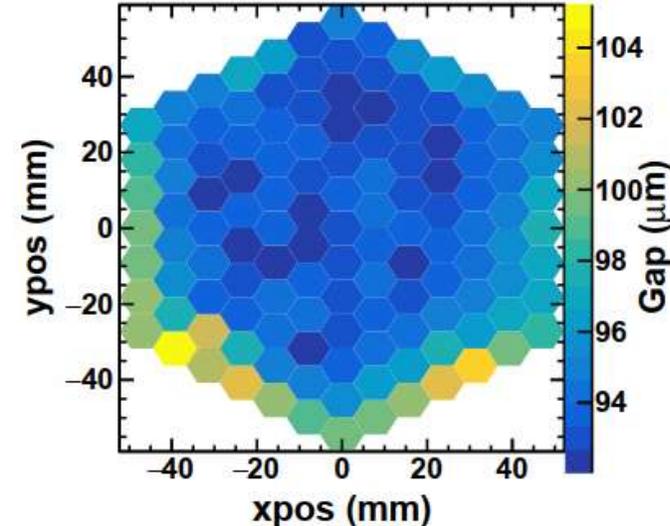
电子透过率



增益均匀性



雪崩放大气隙均匀性



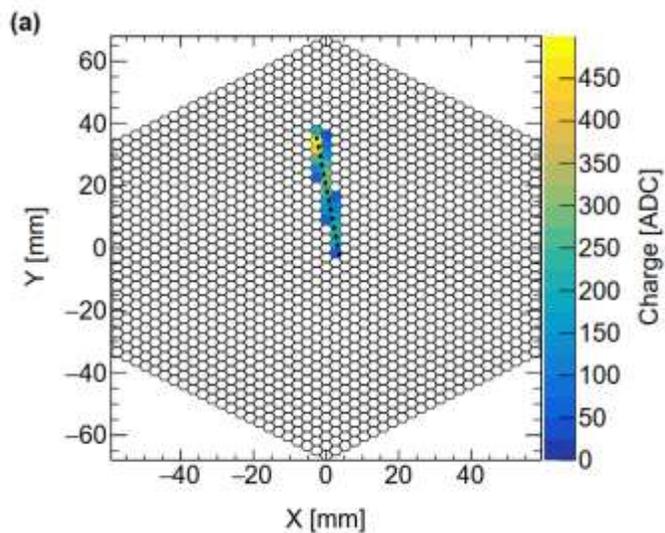
# $\alpha$ 源测试

## ◆ 实验设置

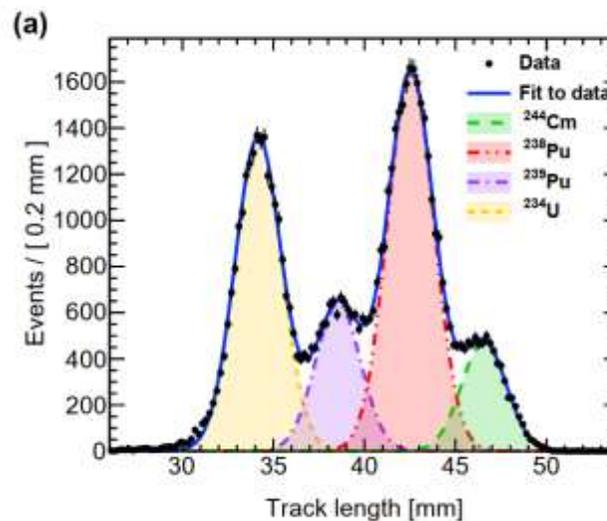
- 工作气体: Ar/CO<sub>2</sub>(93/7)
- 漂移区气隙: 70mm
- 放射源: 四组分 $\alpha$ 源(4775、5157、5499、5805 keV)

## ◆ 实验结果

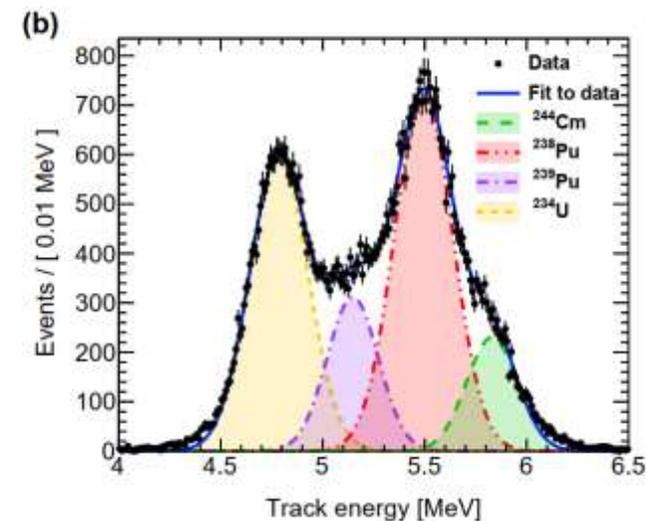
- 漂移速度: 15.5163 mm/ $\mu$ s
- 能量分辨: 2%-3% @四组分 $\alpha$ 源



典型 $\alpha$ 事例径迹



径迹长度分布



粒子能量分布

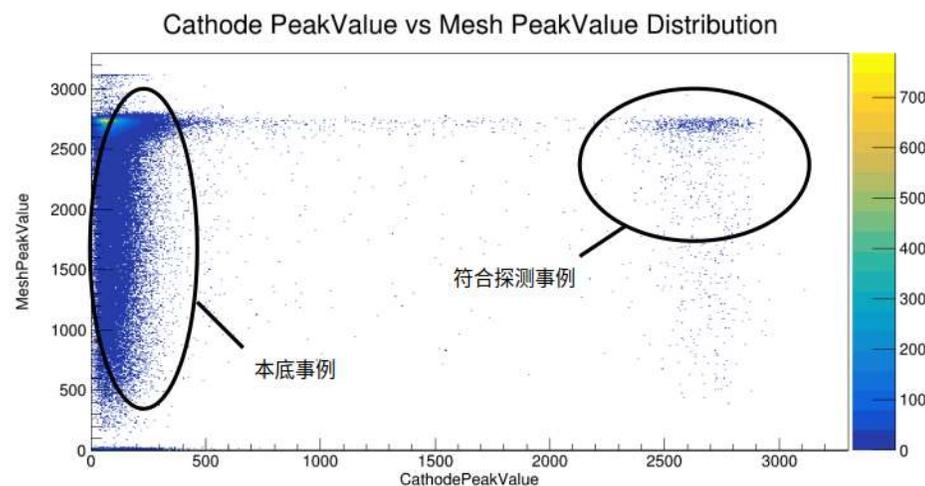
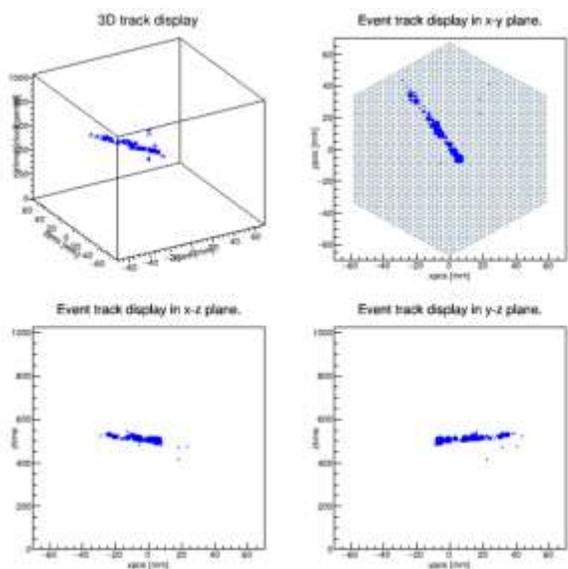
# 宇宙线测试

## ◆ 实验设置

- 工作气体: Ar/CO<sub>2</sub>(93/7) @70mm气隙
- TPC侧面放置方形塑闪探测器(SiPM 读出)
- 挑选塑闪信号与TPC径迹符合的事例选出宇宙线事例
- 塑闪信号作为电子漂移的时间起点

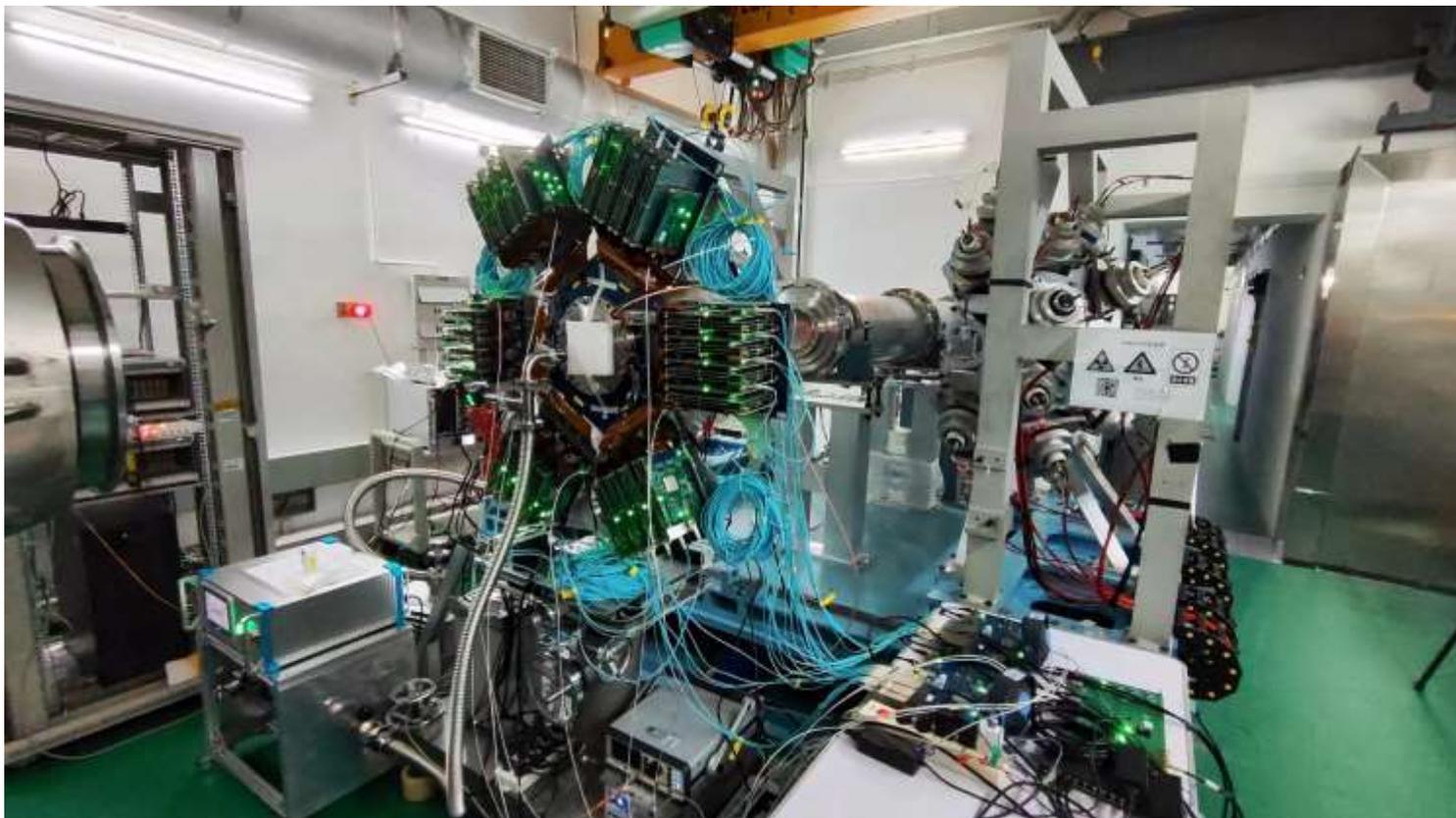
## ◆ 实验结果

- 漂移区电场均匀性, 等待分析

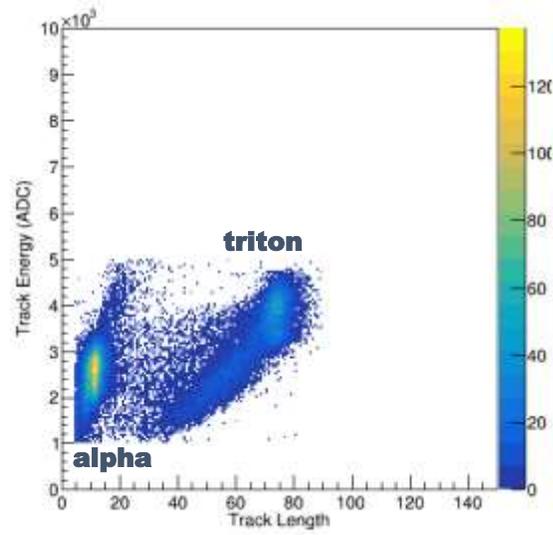
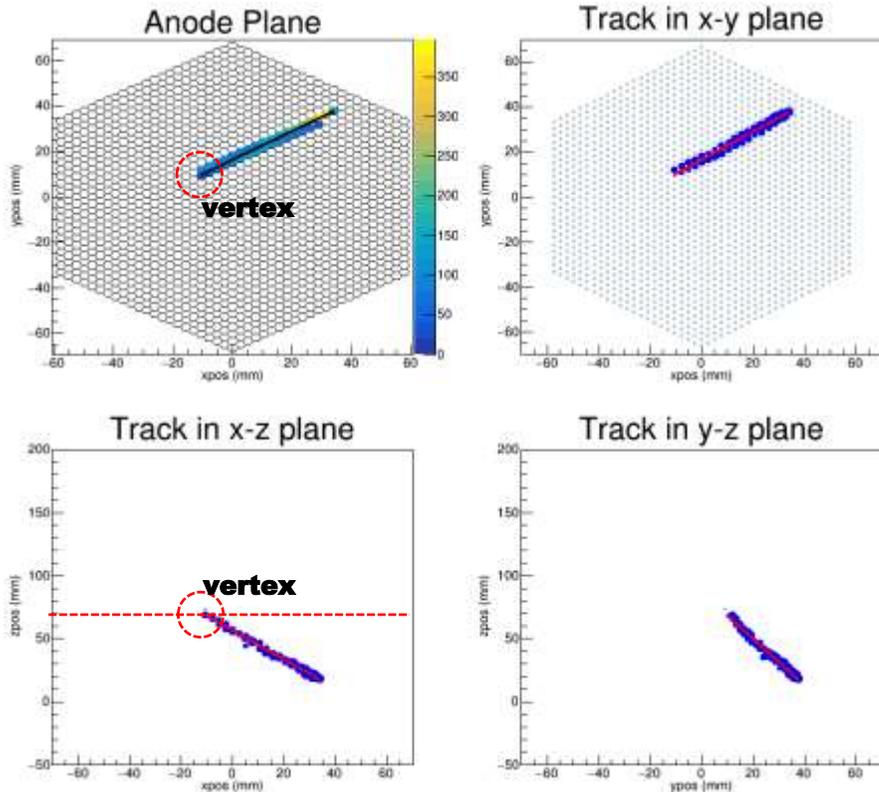


# 白光中子束线上的探测器系统

- TPC位于厅二，阳极板距离散裂靶中心77m
- 主要测量目标反应 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 、束斑测量
- 束斑：1mmGd-6cmPb- $\phi$ 12- $\phi$ 15- $\phi$ 40组合（加铅砖 $\phi$ 30）
  - 0.9bar气压：针对氚粒子进行测量（133h）
  - 0.5bar气压：针对 $\alpha$ 粒子进行测量（143h）
- 束斑：1mmGd- $\phi$ 12- $\phi$ 15- $\phi$ 40组合（标准 $\phi$ 30）
  - 0.9bar气压：标准束斑测量（11h）
- 束斑：1mmGd-6cmPb- $\phi$ 3- $\phi$ X- $\phi$ X组合（ $\phi$ 3组合）
  - 0.9bar气压： $\phi$ 3- $\phi$ 12- $\phi$ 40（0.5h）
  - 0.9bar气压： $\phi$ 3- $\phi$ 12- $\phi$ 58（0.5h）
  - 0.9bar气压： $\phi$ 3- $\phi$ 50- $\phi$ 58（0.5h）

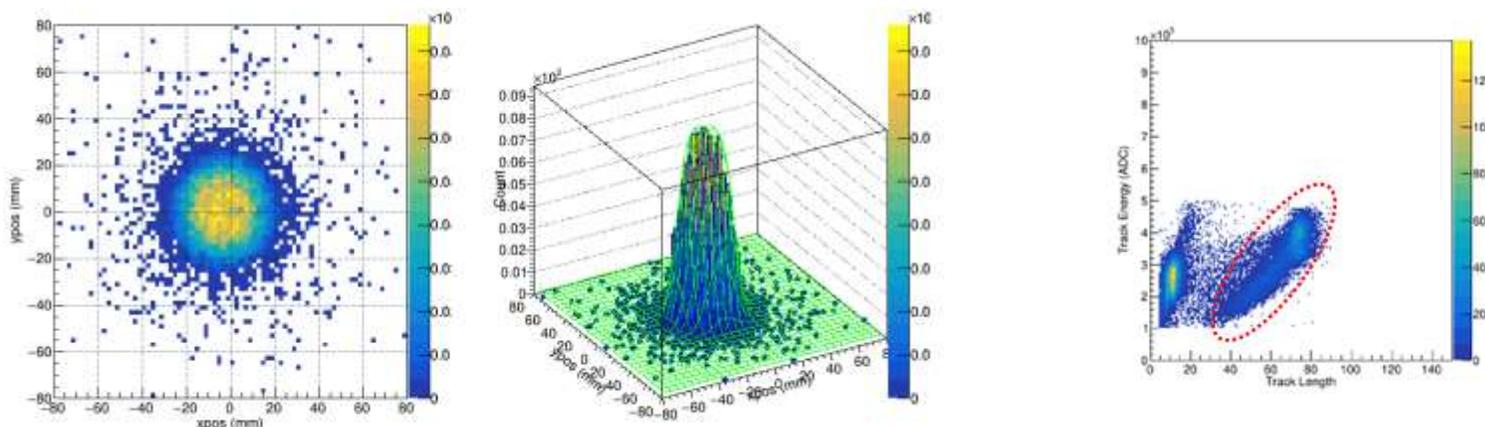


# 径迹和顶点重建



- 通过3维Hough变换进行径迹查找
- 通过3维主值分析得到径迹参数
- 重建之后得到径迹方向、能量、长度
- 通过将径迹参数外推至z值最大点，得到顶点xy坐标
- 根据径迹能量和长度，可进行粒子鉴别

# 白光中子束斑



$$f(x, y) = B + \frac{A}{2} \left[ \text{Erf} \left( \frac{r(x, y) - r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left( \frac{r(x, y) + r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right], r(x, y) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

- 拟合结果:
- 中心 $(x_0, y_0)$ :  $(-3.1\text{mm}, 0.6\text{mm})$
- $r_0$ :  $17.7 \pm 0.1\text{mm}$
- $\sigma$ :  $6\text{mm}$
- 中心位置x方向偏心, 可能因为准直激光线偏心

- 选择triton事例分析束斑
- 通过二维函数拟合束斑中心和半径
- **Erf**: 误差函数
- $r_0$ : 幅度50%处半径
- $\sigma$ : 边缘分布方差

	X-方向	Y-方向
50%半径	$16.6 \pm 0.4\text{mm}$	$17.6 \pm 0.4\text{mm}$
10%半径	$24.7\text{mm}$	$25.2\text{mm}$

# 未来计划

## Future

# 中子核反应标准截面测量

- 中子标准截面对应的核反应中，有6个反应为轻带电粒子出射反应
- 在10MeV以下能区，适合使用TPC进行测量
- 可提高测量的精度和更为全面的核反应信息
- 标准截面数据是核数据研究的基础，自主开展成体系的标准截面实验测量及数据评价，在基础研究和应用方面有重要意义

TABLE I. Cross section standards and reference data, release 2017.

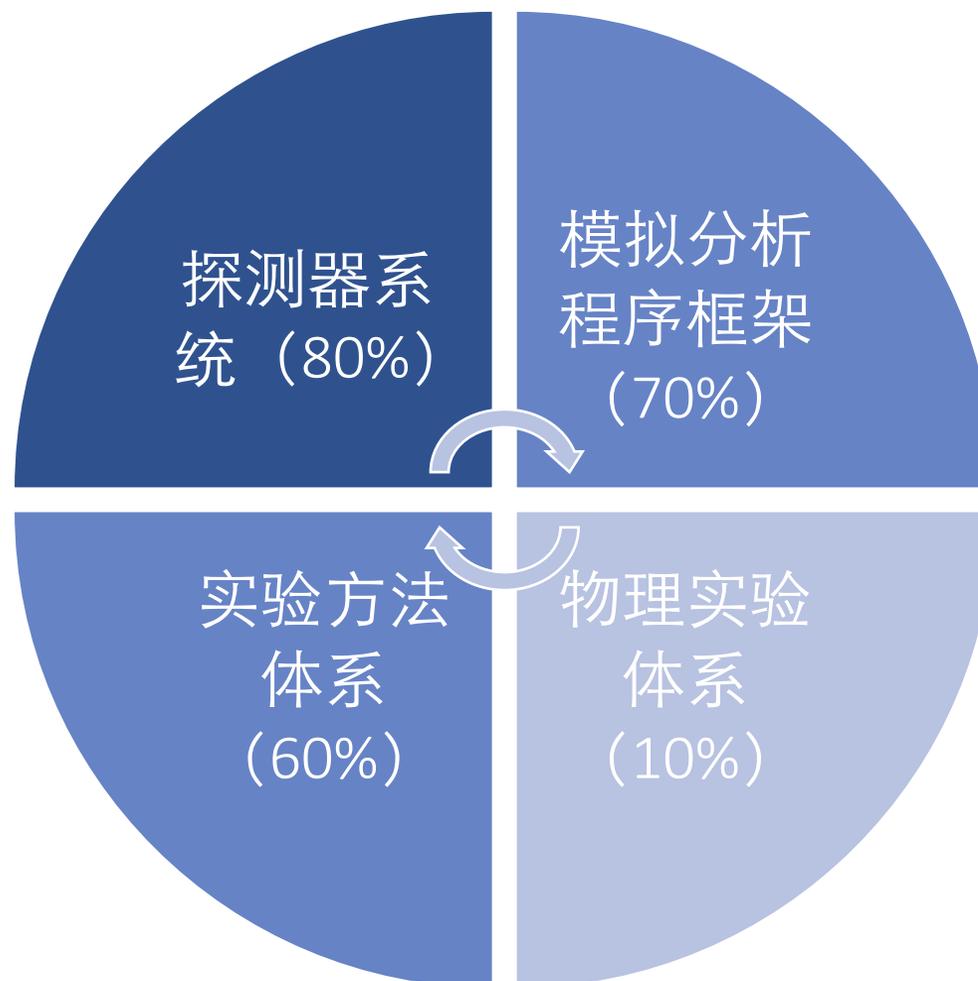
Neutron cross section standards	
Reaction	Standards incident neutron energy range
H(n,n)	1 keV to 20 MeV
<sup>3</sup> He(n,p)	0.0253 eV to 50 keV
<sup>6</sup> Li(n,t)	0.0253 eV to 1 MeV
<sup>10</sup> B(n,α)	0.0253 eV to 1 MeV
<sup>10</sup> B(n,α <sub>1</sub> γ)	0.0253 eV to 1 MeV
C(n,n)	10 eV to 1.8 MeV
Au(n,γ)	0.0253 eV, 0.2 to 2.5 MeV, 30 keV MACS
<sup>235</sup> U(n,f)	0.0253 eV, 7.8-11 eV, 0.15 MeV to 200 MeV
<sup>238</sup> U(n,f)	2 MeV to 200 MeV

反应	研究情况	技术难度
<sup>6</sup> Li(n,t)	已开展实验 (2023.2)	★★★
<sup>10</sup> B(n,a)	实验构想	★★★
H(n,n)	基金课题	★★★★
C(n,n)	/	★★★★
<sup>3</sup> He(n,t)	/	★★★★★

# 未来发展

- 阳极读出板
- 电场笼、气室腔体
- 气路系统
- 读出电子学
- 数据获取

- 数据分析方法
  - 波形分析
  - 径迹重建
- 探测器测试方法
  - x射线
  - $\alpha$ 源
  - 宇宙线



- 模拟程序框架
- 模拟程序物理模型
- 分析程序框架
- 数据分析流程

- 中子核反应标准截面
  - ${}^6\text{Li}(n,t)$
  - ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$
- 核物理相关重要截面
  - ${}^{16}\text{O}(n,\alpha)$ 、 ${}^{19}\text{F}(n,\alpha)$
  - ${}^{12}\text{C}(n,3\alpha)$
- 国家重大需求相关截面

礼  
Thanks

Mailto: [fanrr@ihep.ac.cn](mailto:fanrr@ihep.ac.cn)