



第6次用户研讨会

带电粒子出射核反应研究进展与展望

LPDA实验合作组

2022-08-20

提纲



1. 引言
2. 一年来的进展
3. 展望

1. 引言

1.1 中子

物质由原子组成 原子由原子核+核外电子组成

原子核由质子+中子组成

中子占据了普通物质一半以上的质量

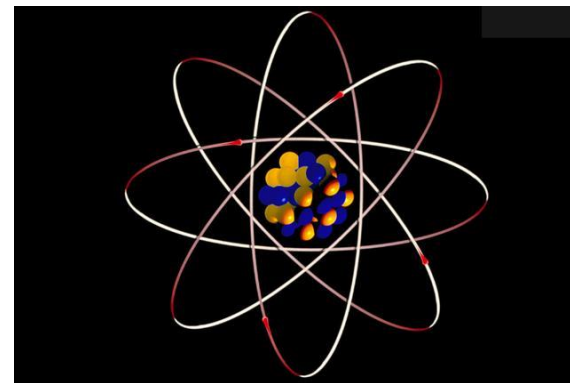
1932年发现中子 1942年第一座反应堆 1945年两颗原子弹投到日本

中子在原子核内, 通过核反应可产生中子

中子源: 同位素中子源 反应堆中子源 加速器中子源

核能的释放途径: 裂变和聚变核反应 核弹/反应堆

裂变、聚变过程都会放出中子 中子: 能区宽 诱发各种核反应



1.2 中子核反应

中子与原子核能发生各种核反应

中子核反应种类(以热堆内的核反应为例):

- 裂变反应 (n, f) : 释放核能 产生中子
- 辐射俘获 (n, γ) : 中子吸收 燃料转换($U \rightarrow Pu, Th \rightarrow U \dots$)
- 中子散射 $(n, n), (n, n')$: 中子慢化
- 轻带电粒子出射 (n, lcp) : 堆控 中子探测
 $p, d, t, {}^3\text{He}, \alpha$

(n, lcp) 反应在热堆内的重要性不太突出
然而, 在快堆、聚变堆、ADS内 ...

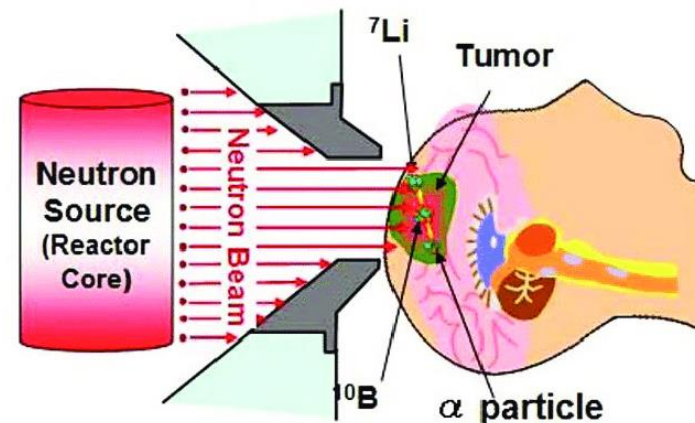


1.3 轻带电粒子出射核反应(n, lcp)



重要性

- **中子核反应国际标准** ${}^6\text{Li}(n,t)$ ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$ n-p散射 ...
- **核工程应用** 造氙 堆控 材料损伤 中子探测&防护
- **核技术** 单粒子效应 半导体掺杂
- **生物医学** 辐射防护 治癌...
- **核天体物理** 核素合成 演化
- **核理论研究** 核反应机制 核结构



- 张国辉, 中子诱发轻带电粒子出射核反应实验研究进展, **中国科学: 物理学 力学 天文学** 50, 052005 (2020)

1.3 轻带电粒子出射核反应(n, lcp)

三要素+两系统

中子源

样品

探测器

电子学与数据
获取系统

数据分析与
模拟预测系统

- 强流宽能谱高能量分辨中子源
- 同位素薄样品
- 高效率、大立体角探测器



- 预测、降低与扣除多种本底干扰
- 在足够长的测量时间内稳定工作

1.4 特点与定位

- **(n,lcp)反应的特点：截面小 干扰多而强 Q值小**
与(n, γ)反应相比: 低能区可测的核反应有限 ${}^6\text{Li}(n,t)$ ${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$ n-p ...
与(n,f)反应相比: 反应Q值小 干扰反应强
- 基于过去的经验和Back-n中子源、LPDA探测器和通用电子学，我们在本研究方向取得了很好的成绩...
- **面临挑战**
LPDA立体角小 (+固体薄样品核数少 只能测量截面足够大的核反应)
Back-n双束团 (MeV能区截面小、本底强、双束团解谱困难)
- **新的机遇**
TPC 硬件、软件都取得了长足进展 在国内和国际上有特色
一方面要参考国际同行的经验，同时要积极创新、引领发展

2. 一年来的进展



- 2.1 发表文章
- 2.2 LPDA进展
- 2.3 TPC进展
- 2.4 用TPC试测 $^{232}\text{Th}(n,f)$
- 2.5 $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 实验结果

2.1 发表文章

n-d 散射微分截面

Eur. Phys. J. A (2021) 57:310
https://doi.org/10.1140/epja/s10050-021-00610-9

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL A



Regular Article - Experimental Physics

Measurement of relative differential cross sections of the neutron-deuteron elastic scattering for neutron energy from 13 to 52 MeV

Zengqi Cui¹, Haoyu Jiang¹, Wei Jiang^{2,3}, Guohui Zhang^{1,a}, Ruirui Fan^{2,3,4,b}, Danyang Pang⁵, Kang Sun^{2,3,6}, Huaiyong Bai^{1,7}, Yiwei Hu¹, Jie Liu¹, Han Yi^{2,3}, Changjun Ning^{2,3}, Zhijia Sun^{2,3,4}, Jingyu Tang^{2,3,4,6}, Qi An^{4,8}, Jie Bao⁹, Yu Bao^{2,3}, Ping Cao^{4,8}, Haolei Chen^{4,8}, Qiping Chen¹⁰, Yonghao Chen^{2,3}, Yukai Chen^{2,3}, Zhen Chen^{4,8}, Changqing Feng^{4,8}, Keqing Gao^{2,3}, Minhao Gu^{2,4}, Changcai Han¹¹, Zijie Han¹⁰, Guozhu He⁹, Yongcheng He^{2,3}, Yang Hong^{2,3,6}, Hanxiong Huang⁹, Weiling Huang^{2,3}, Xiru Huang^{4,8}, Xiaolu Ji^{2,4}, Xuyang Ji^{4,12}, Zhijie Jiang^{4,8}, Hantao Jing^{2,3}, Ling Kang^{2,3}, Mingtao Kang^{2,3}, Bo Li^{2,3}, Chao Li^{4,8}, Jiawen Li^{4,12}, Lun Li^{2,3}, Qiang Li^{2,3}, Xiao Li^{2,3}, Yang Li^{2,3}, Rong Liu¹⁰, Shubin Liu^{4,8}, Xingyan Liu¹⁰, Guangyuan Luan⁹, Qili Mu^{2,3}, Binbin Qi^{4,8}, Jie Ren⁹, Zhizhou Ren^{8,10}, Xichao Ruan⁹, Zhaohui Song¹¹, Yingpeng Song^{2,3}, Hong Sun^{2,3}, Xiaoyang Sun^{2,3,6}, Zhixin Tan^{2,3}, Hongqing Tang⁹, Xinyi Tang^{4,8}, Binbin Tian^{2,3}, Lijiao Wang^{2,3,6}, Pengcheng Wang^{2,3}, Qi Wang⁹, Taofeng Wang¹³, Zhaohui Wang⁹, Jie Wen¹⁰, Zhongwei Wen¹⁰, Qingbiao Wu^{2,3}, Xiaoguang Wu⁹, Xuan Wu^{2,3}, Likun Xie^{4,12}, Yiwei Yang¹⁰, Li Yu^{2,3}, Tao Yu^{4,8}, Yongji Yu^{2,3}, Linhao Zhang^{2,3,6}, Qiwei Zhang⁹, Xianpeng Zhang¹¹, Yuliang Zhang^{2,3}, Zhiyong Zhang^{4,8}, Yubin Zhao^{2,3}, Luping Zhou^{2,3,6}, Zuying Zhou⁹, Danyang Zhu^{4,8}, Kejun Zhu^{2,4,6}, Peng Zhu^{2,3},
The CSNS Back-n Collaboration

- ¹ State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
² Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China
³ Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China
⁴ State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing, China
⁵ School of Physics and Beijing Key Laboratory of Advanced Nuclear Materials and Physics, Beihang University, Beijing 100191, China
⁶ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
⁷ Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Jianguo 621907, China
⁸ Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
⁹ Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China
¹⁰ Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China
¹¹ Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China
¹² Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
¹³ School of Physics, Beihang University, Beijing 100083, China

Received: 6 August 2021 / Accepted: 9 October 2021

© The Author(s), under exclusive licence to Società Italiana di Fisica and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021
Communicated by Alessia Di Pietro



TPC 首篇 NIM 文章

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1039 (2022) 167157



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



Gap uniformity study of a resistive Micromegas for the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) at Back-n white neutron source

Weihua Jia^{a,b,c,1}, You Lv^{b,c,1}, Zhiyong Zhang^{d,e}, Haolei Chen^{d,e}, Zhen Chen^{d,e}, Jiaqi Wang^{d,e}, Maoyuan Zhao^{d,e}, Changqing Feng^{d,e}, Shubin Liu^{d,e}, Mohan Zhang^b, Minhao Gu^b, Ruirui Fan^{b,c,d}, Yang Li^{b,c}, Yankun Sun^{b,c}, Wei Jiang^{b,c}, Yonghao Chen^{b,c}, Changjun Ning^{b,c}, Haofan Bai^f, Guohui Zhang^f, Qingmin Zhang^{a,*}, Han Yi^{b,c,**}

^a Department of Nuclear Science and Technology, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

^b Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

^c Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China

^d State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, Hefei 230026, China

^e Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

^f State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

ARTICLE INFO

Keywords:

Time projection chamber

Resistive micromegas

Gap uniformity

Gas gain

Charge spreading

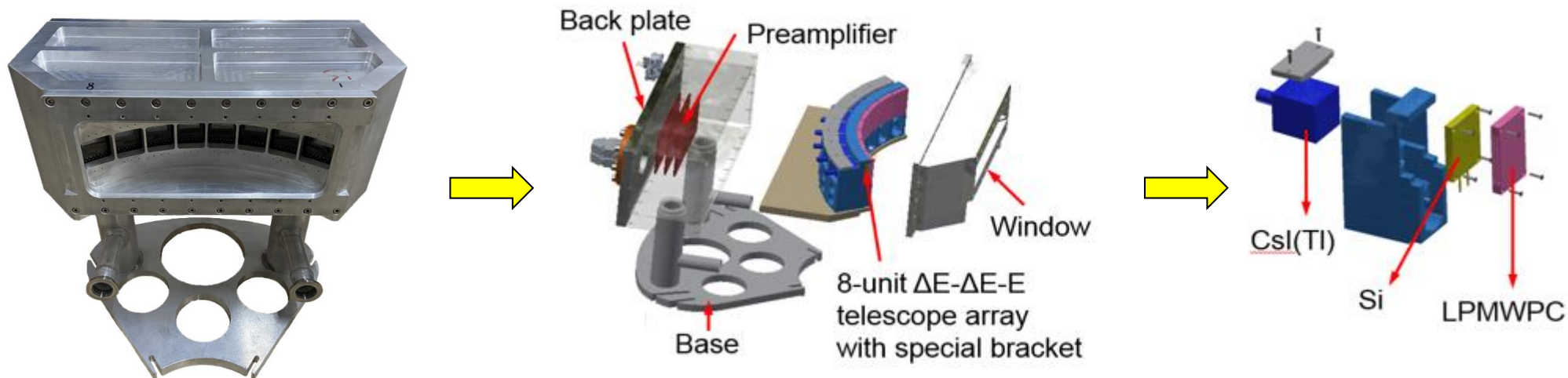
ABSTRACT

A Multi-purpose Time Projection Chamber prototype based on a resistive Micromegas technique has been proposed, designed and fabricated at China Spallation Neutron Source to measure the cross sections of neutron-induced light-charged particle emission reactions and fission reactions at the Back-n white neutron source. For the requirements of working stability with high voltage and high granularity of readout, the prototype is fabricated by applying a resistive Micromegas with high-density pixelated anode plane. In order to fully understand the process of charge spreading and signal induction on the anode plane covered by a resistive layer, a simulation method is developed and the energy correction function is then obtained, which can be used in the further energy correction in the experimental data analysis. Measured with a ⁵⁵Fe X-ray source, the uniformity of gain and avalanche gap are specially analyzed by combining the simulated gas avalanche parameters with fitting of experimental data in which the parallel plate avalanche model is adopted.

2.2 LPDA进展

LPDA为16单元 ΔE - ΔE -E望远镜探测器:

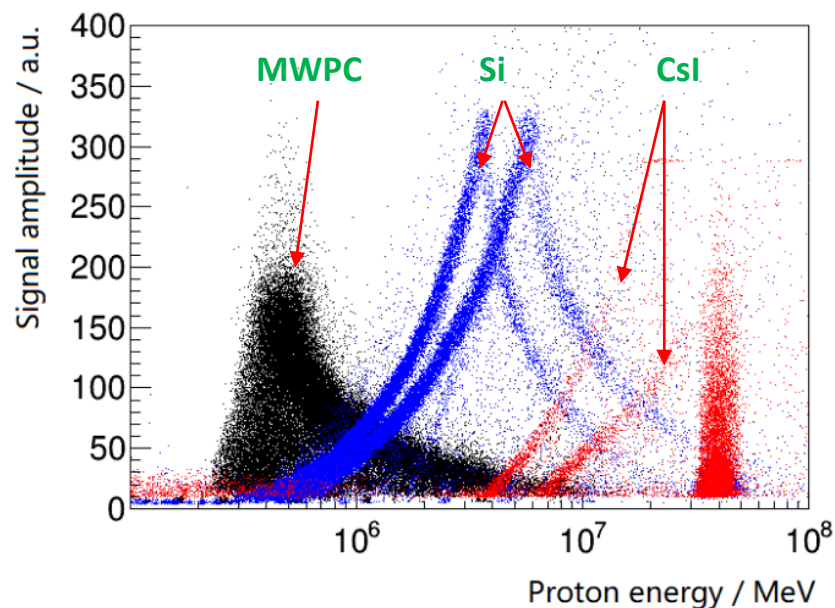
- 探测器覆盖16 个出射角度
- 由两个模块组成
- 每8组望远镜组装为一个模块
- 三级探测器采用LPMWPC、Si(PIN)、CsI(Tl)
- 探测 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^3He 、 ^4He 等轻带电粒子
- 质子探测能区为0.5~100 MeV



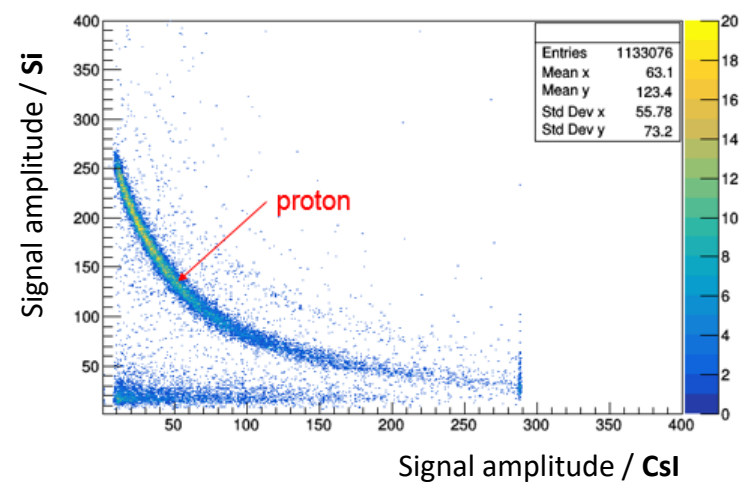
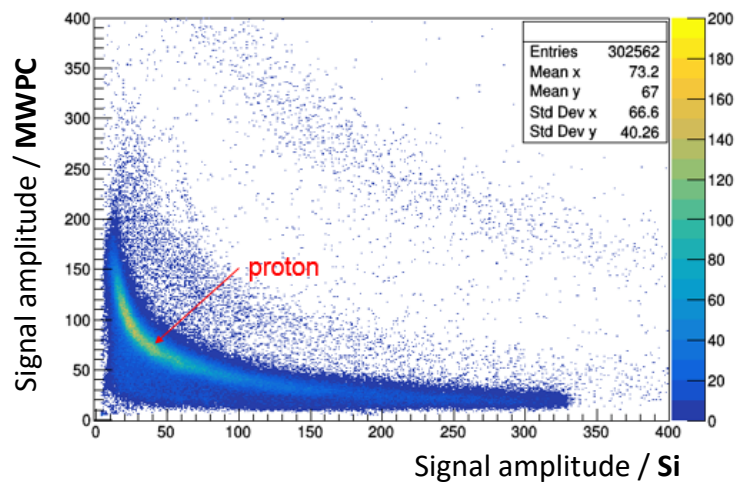
实验测量

使用该望远镜，于2021年10月开展了1.5~15 MeV能区n-p散射微分截面实验测量

以24.5°处的望远镜为例，其3个探测器中的脉冲幅度-质子能量二维谱结果，如右图所示

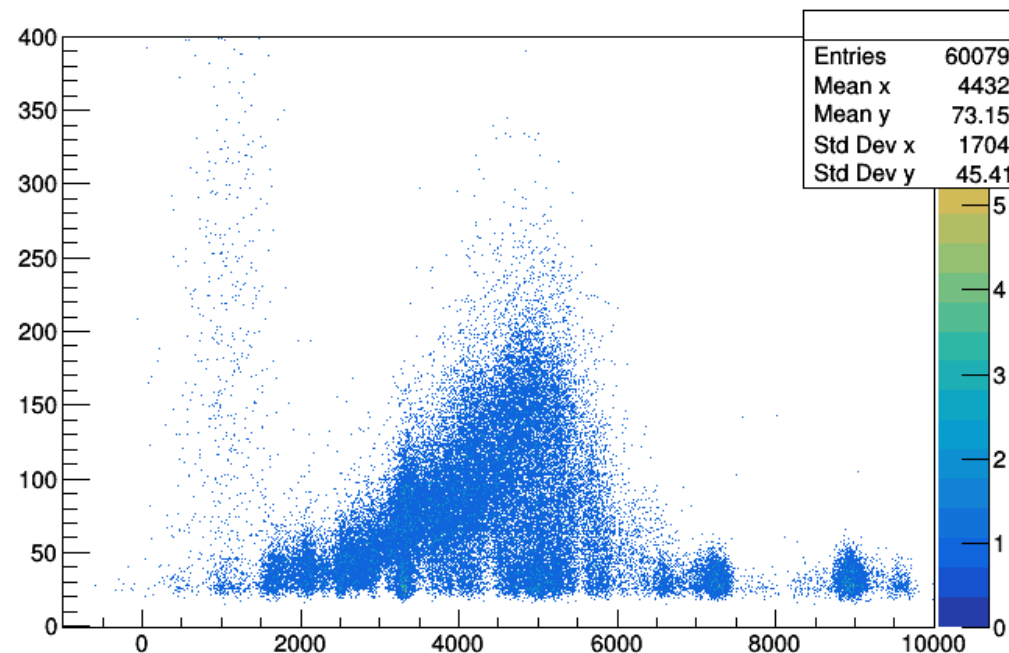


右图分别为MWPC+Si、Si +CsI两组 ΔE -E二维谱结果
可以看到清晰的质子事件带



实验中遇到的问题:

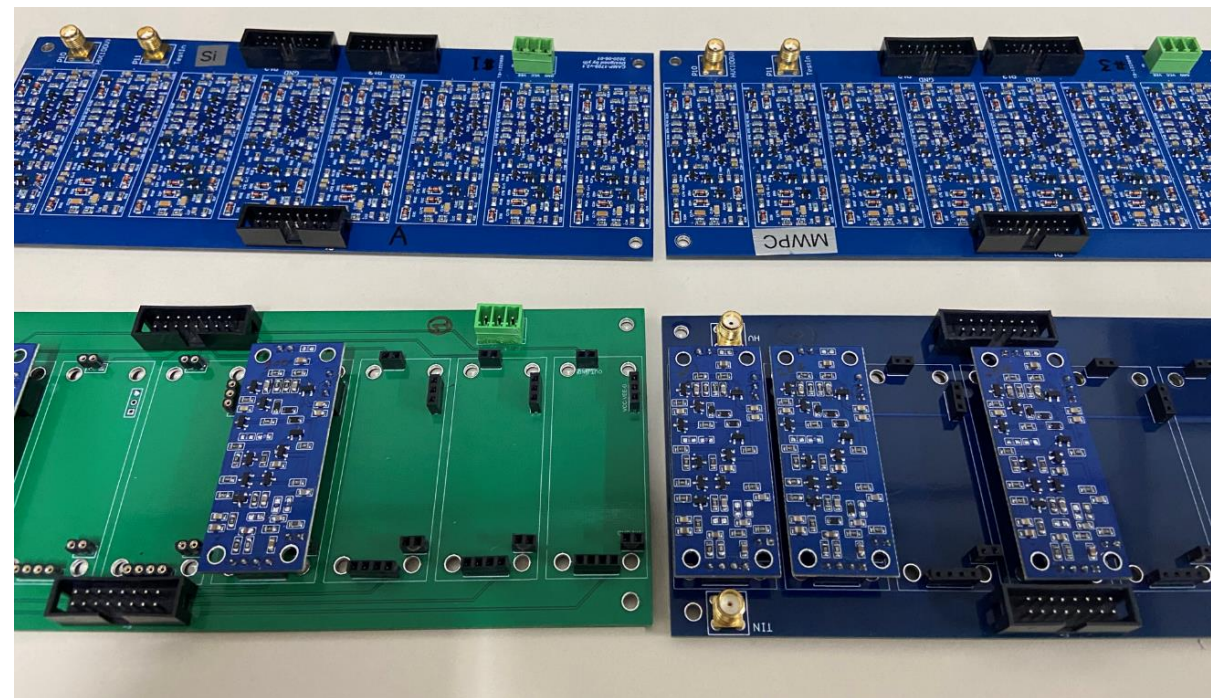
- **MWPC高压容易打火。**提高电压可以增加MWPC的信号增益，但因打火没办法加到很高。
- **部分通道受噪声影响较大，**信号的时间分布受到了较大的影响。(右图为38.5°处MWPC的信号-TOF二维谱)
- **前放增益倍数受温度影响-模块内散热性能不好。**在束实验时部分通道采不到正常增益倍数的信号(信号太小)。



望远镜A2的MWPC的信号-TOF二维谱 (38.5°)

解决方案:

- 研究改善MWPC高压在真空腔体外侧接口处的工艺, 解决MWPC高压打火问题
- 提升MWPC高压以增加其增益倍数, 增加信号幅值以提升信噪比
- 实验时做好降噪, 并尝试不同的数据分析逻辑来解决MWPC信号噪声大和TOF谱受到的影响
- 进行前放散热性能测试, 寻找合适的散热方法, 优化前放设计, 减小温度对其增益性能的影响



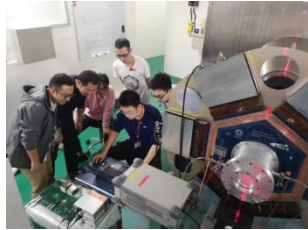
$\Delta E-\Delta E-E$ 望远镜中使用的自制前放

2.3 TPC进展

TPC研制进程



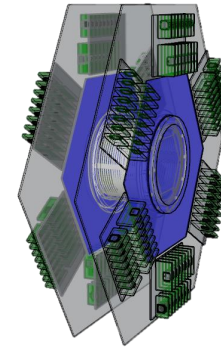
2019年8月：
开始探测器设计和加工



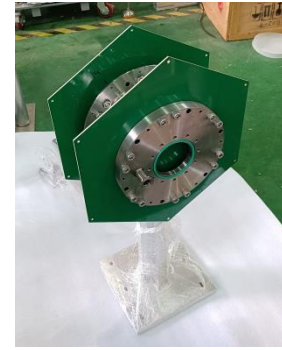
2020年1月：
开展首次束流实验



2021年1月：
完成专用电子学系统研制和测试



2021年8月：
开始v2版本探测器设计和加工



2022年4月：
完成v2版本读出板转接板和气压腔体加工



2019年12月：
完成v1版本探测器研制及DAQ开发

2020年3月：
开始专用电子学系统研制

2021年2月：
开展专用电子学和探测器联合束流测试

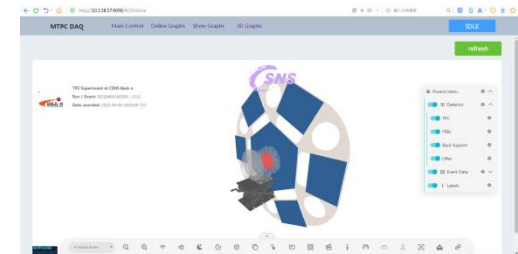
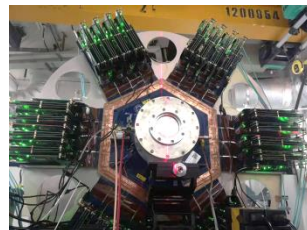
2021年5月：
在北大开展中子束流实验

2022年3月：
完成v2版本DAQ及在线显示开发

2022年11月：
计划开展首个物理实验



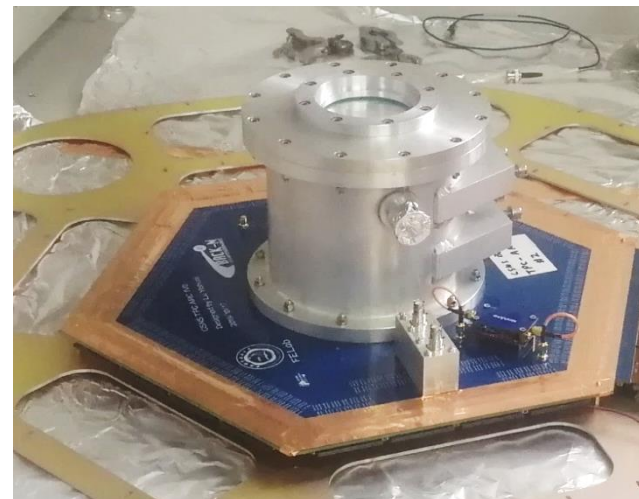
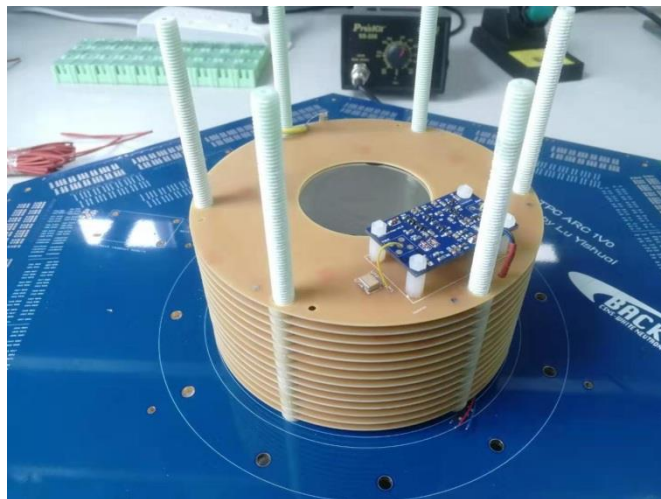
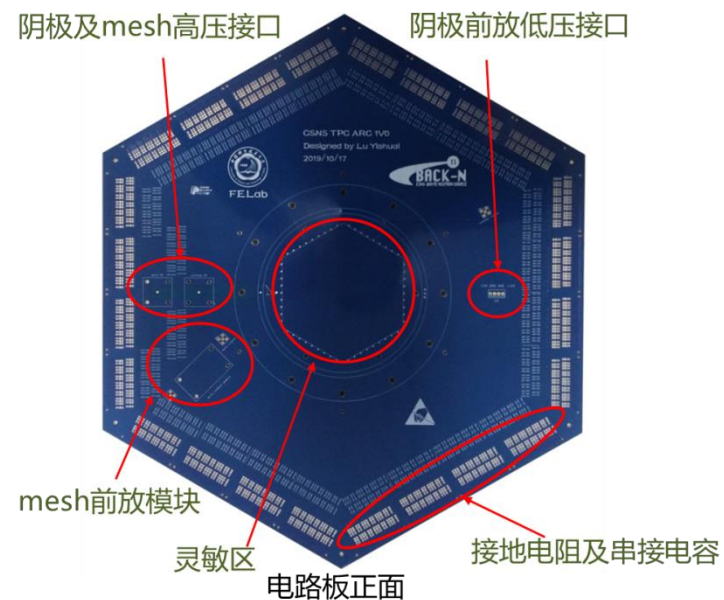
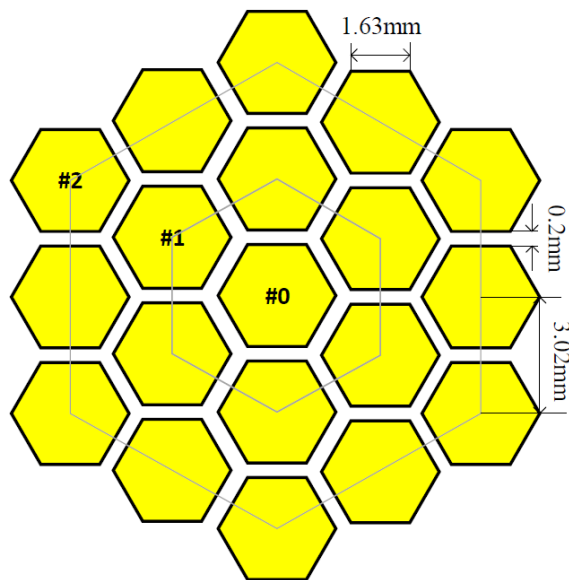
(详见易晗的报告)



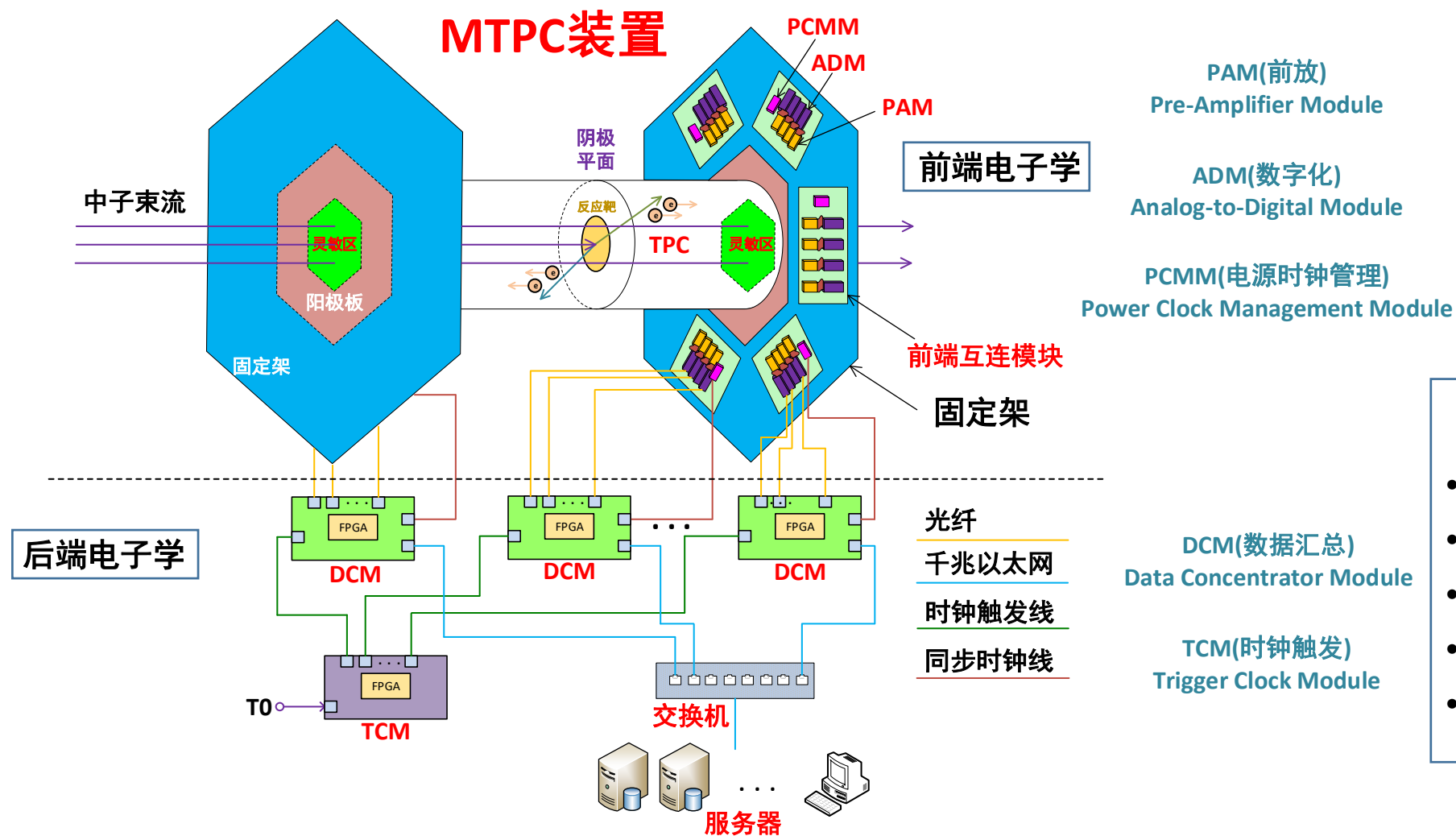
探测器研制

主要内容:

- Pad阵列设计
- 阳极板加工
- Micromegas加工
- 场笼制作
- 气室组装



电子学系统研制



- PAM(前放)
Pre-Amplifier Module
- ADM(数字化)
Analog-to-Digital Module
- PCMM(电源时钟管理)
Power Clock Management Module

电子学系统参数:

- 共1536通道 (TPC含1521pad)
- 波形采样频率: 40MHz
- 触发采样窗宽度: 1024采样点
- ADC位数: 12bit
- 当前触发逻辑死时间: ~40us

- DCM(数据汇总)
Data Concentrator Module
- TCM(时钟触发)
Trigger Clock Module



电子学系统

数据获取系统与控制软件



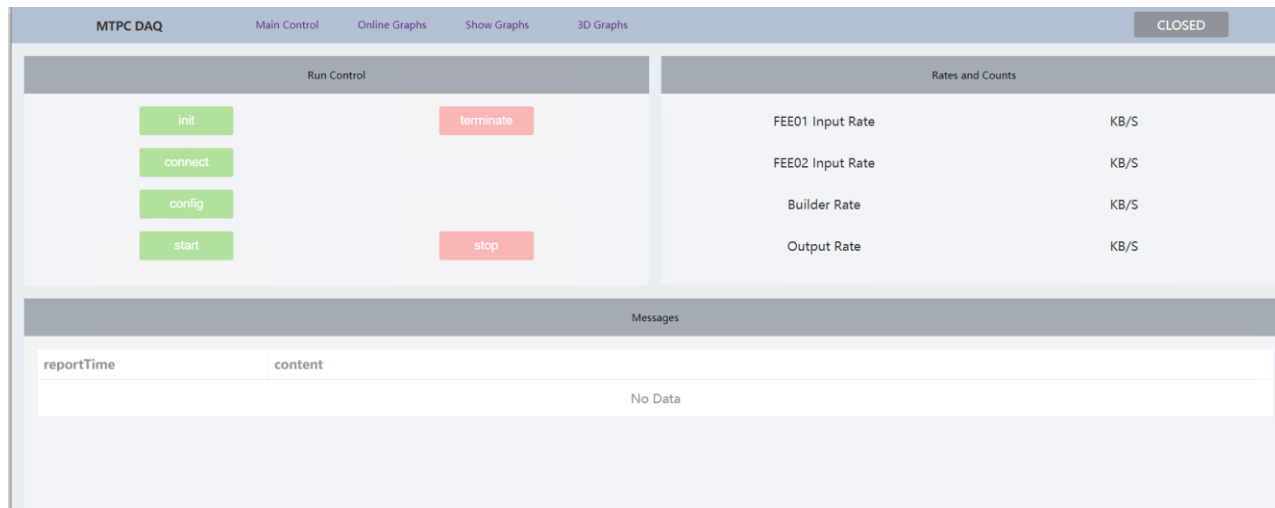
简约的操作界面

整个界面只有相应的控制按钮，简洁美观



有条件的控制按钮

对应状态机的不同阶段，可选用的控制命令也不相同，实现了数据流处理软件的全生命周期管理。



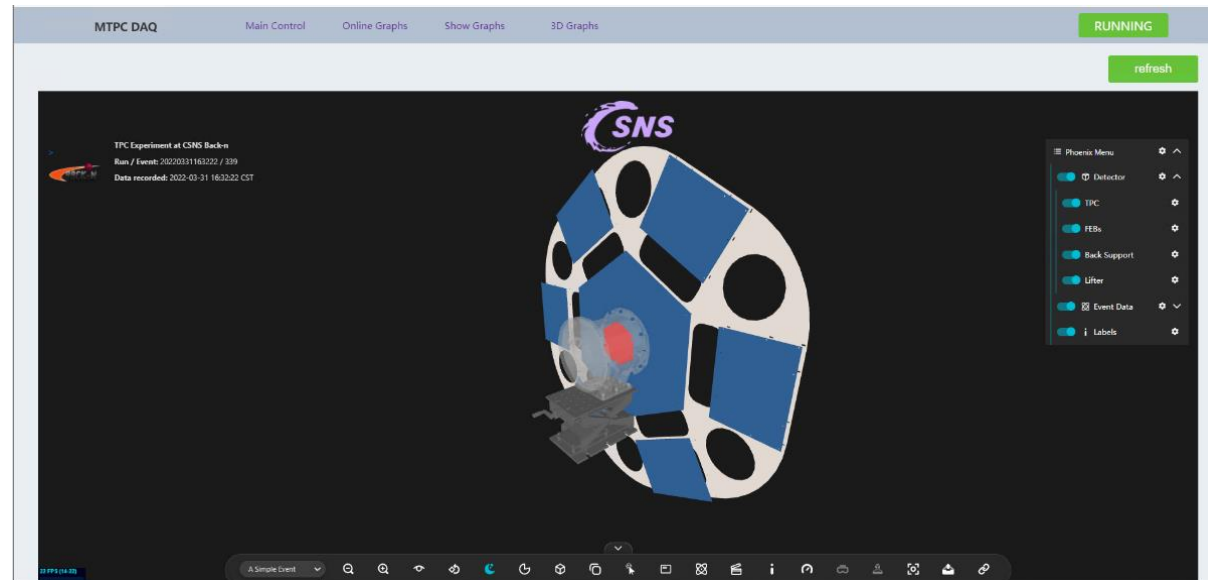
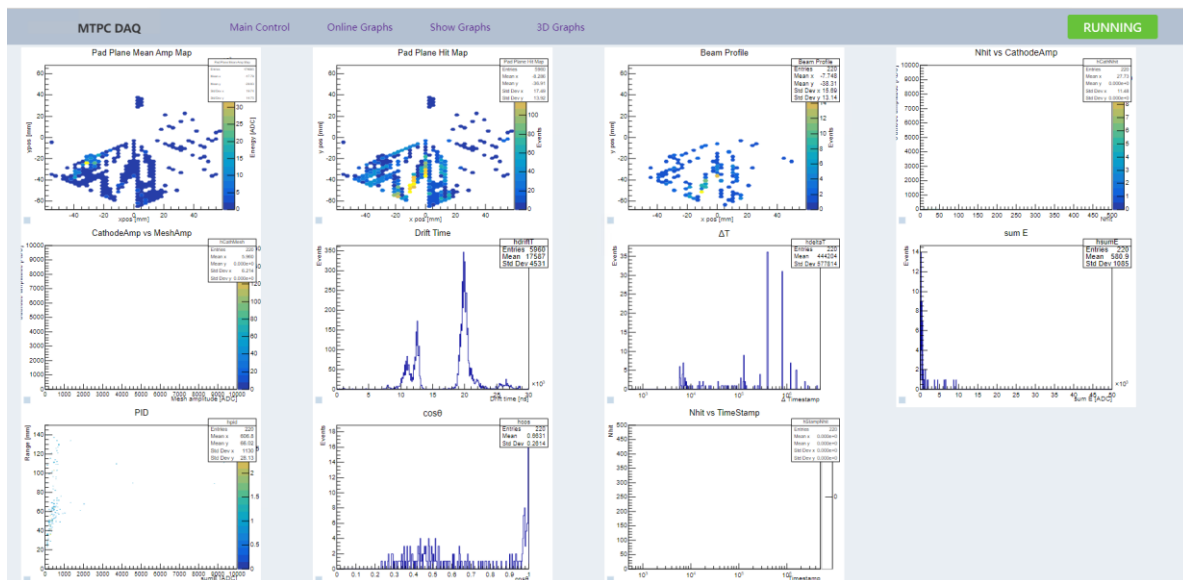
实验的文字信息显示

包括实验的运行状态、处理数据率以及运行日志



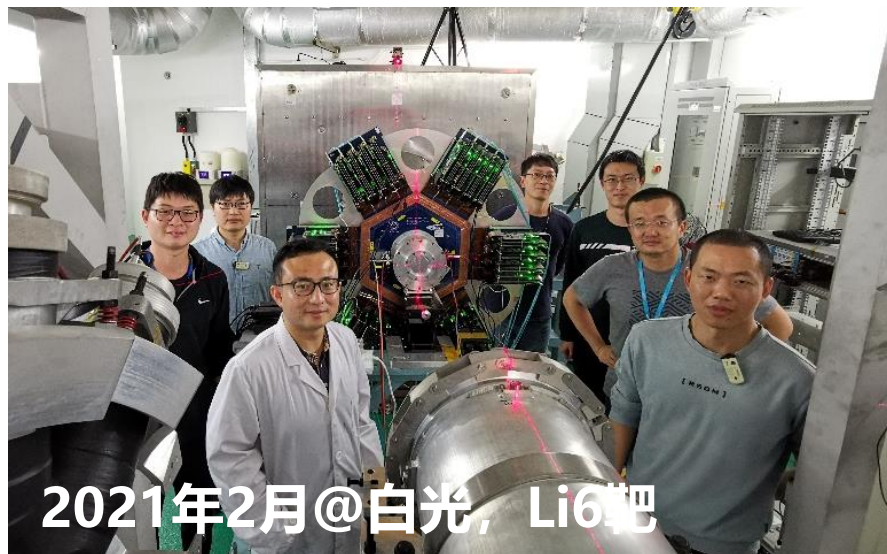
实验的图形化展示

包括对实验数据的实时分析（击中情况、波形情况）与大屏展示的实验实时情况模拟





2020年1月@白光, Li6靶



2021年2月@白光, Li6靶

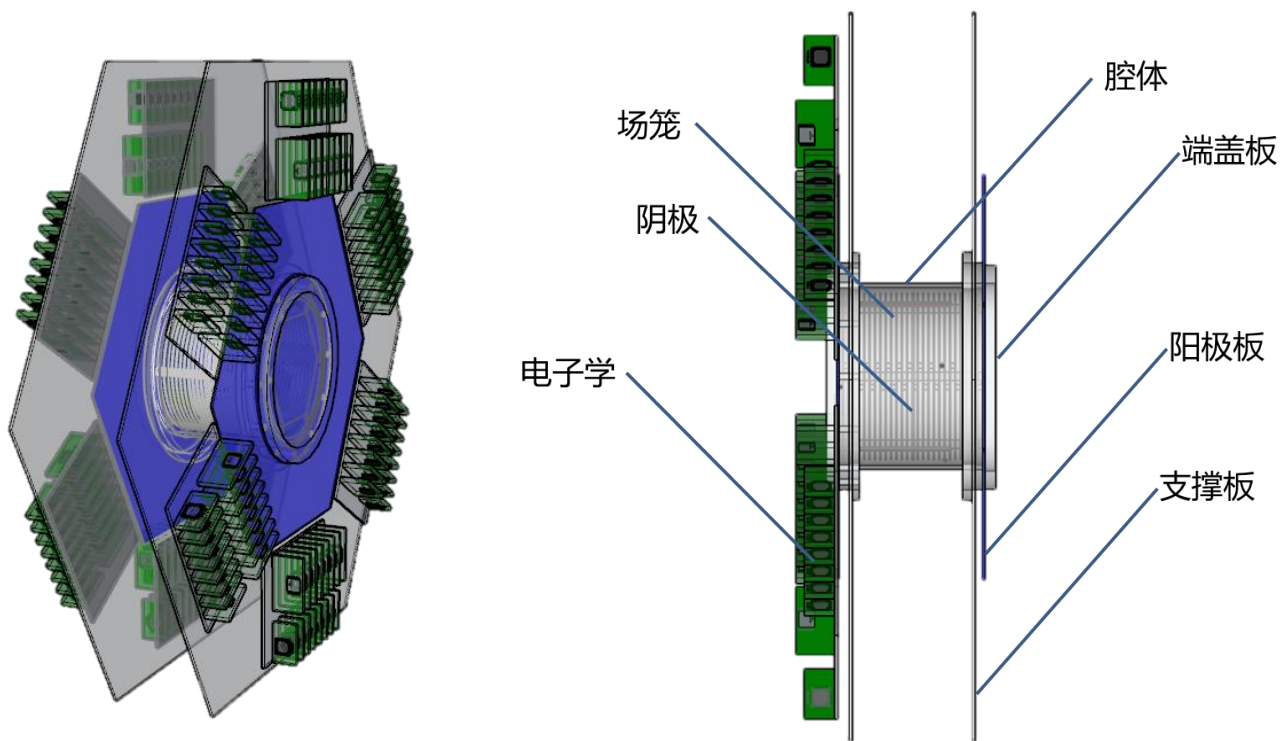


2021年5月@北大, F19靶

TPC测试

TPC-v2

- 腔体可承受气压范围 0.1~5 atm
- 兼容**气体靶**和**固体靶**测量
- 兼容已有新版电子学安装方式
- 兼容**单TPC**和**双TPC**测量



TPC数据分析程序框架

✓ Bluet-v2.0

- BluetSim
 - BluetGarfield
 - BluetGeant4
- BluetAna
 - include
 - source
 - runBluet.C
- BluetWork
- Demo



```
BluetConfig.h
BluetDigi.h
BluetDigiToTrack.h
BluetFourierFilter.h
BluetHough.h
BluetHough3D.h
BluetModule.h
BluetPID.h
BluetPadMaster.h
BluetPointCloud.h
BluetRawToWaveform.h
BluetSphere.h
BluetTrack.h
BluetTrackMaster.h
BluetVector3d.h
BluetWaveFit.h
BluetWaveform.h
BluetWaveformToDigi.h
```

```
BluetConfig.cc
BluetDigi.cc
BluetDigiToTrack.cc
BluetFourierFilter.cc
BluetHough.cc
BluetHough3D.cc
BluetPID.cc
BluetPadMaster.cc
BluetPointCloud.cc
BluetRawToWaveform.cc
BluetSphere.cc
BluetTrack.cc
BluetTrackMaster.cc
BluetVector3d.cc
BluetWaveFit.cc
BluetWaveform.cc
BluetWaveformToDigi.cc
```

(详见孙艳坤
报告)



矢车菊 (Bluet)

CSNS Back-n TPC > BLUET-v2.0



BLUET-v2.0

Project ID: 719

🔔 0 ☆ Star 0 🍴 Fork 0

39 Commits 1 Branch 0 Tags 28.3 MB Files 28.3 MB Storage

BLUET-v2.0 code for CSNS Back-n TPC simulation and data analysis.

master

bluet-v2.0 /

+ ▾

History

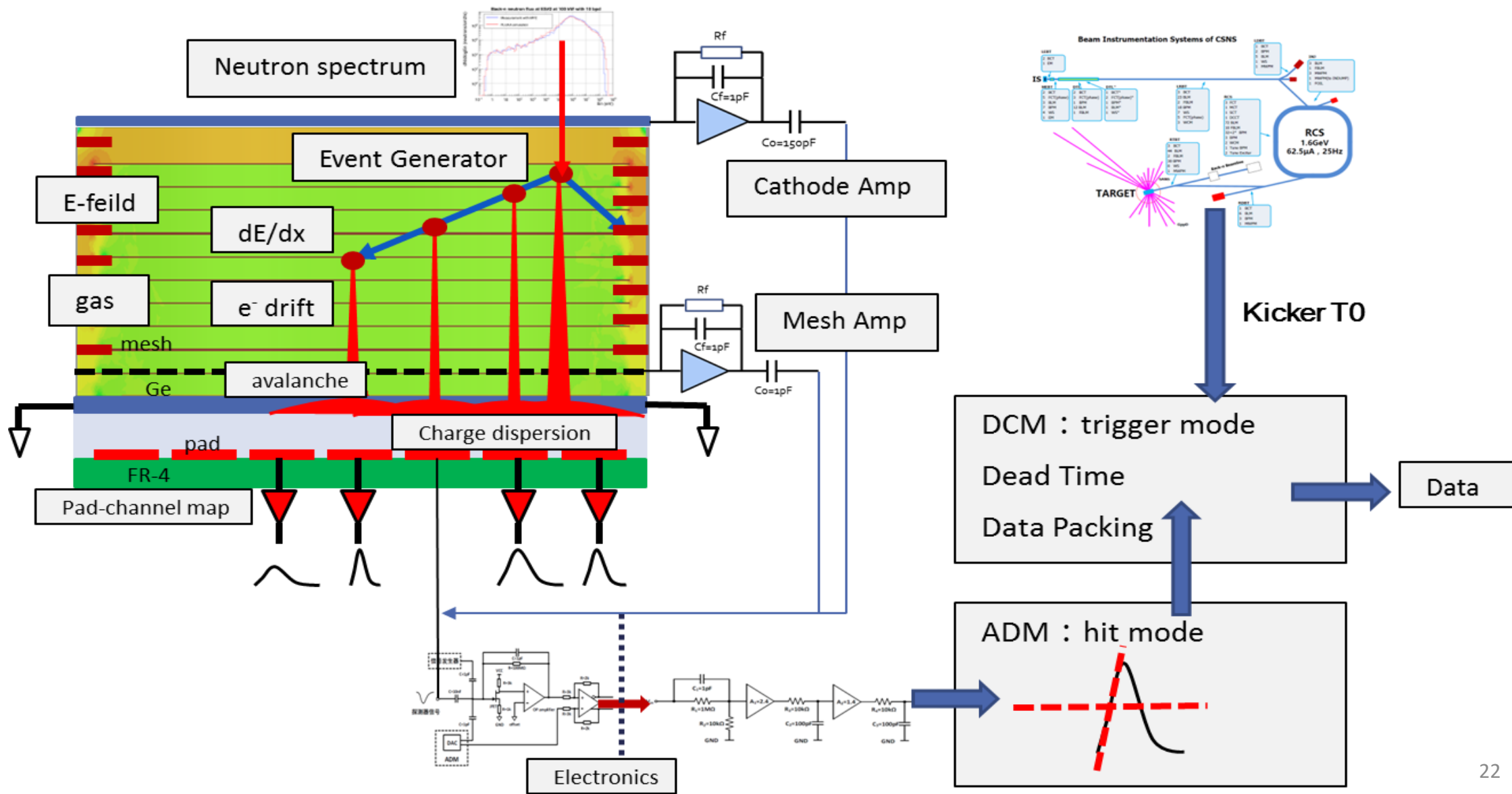
Find file

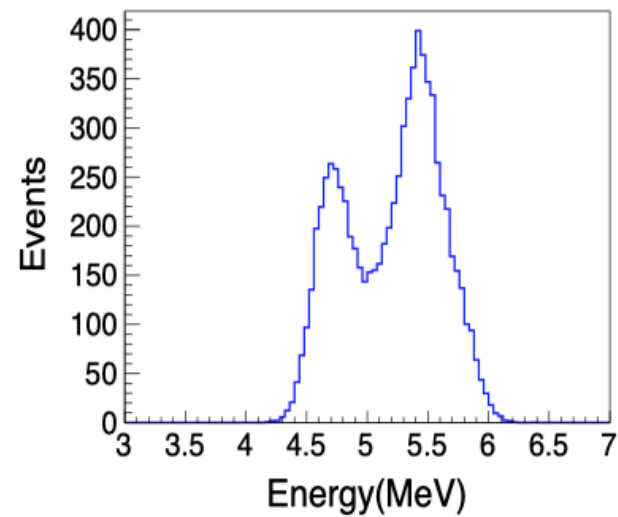
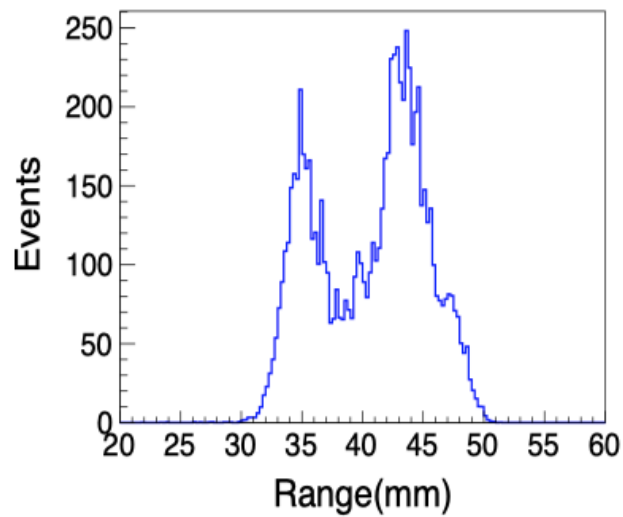
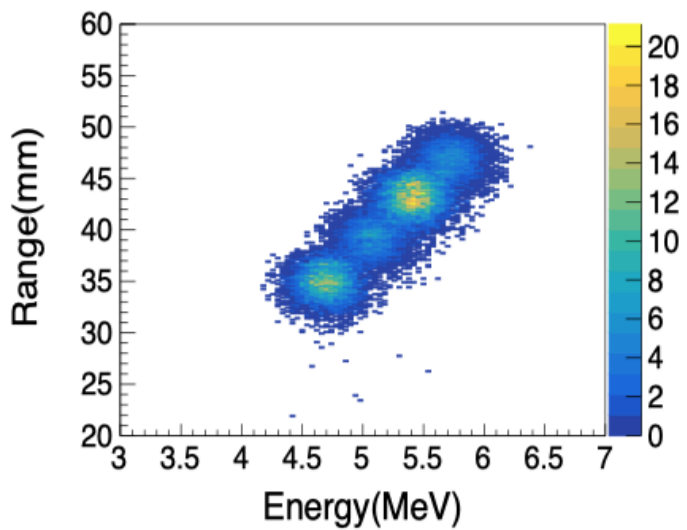
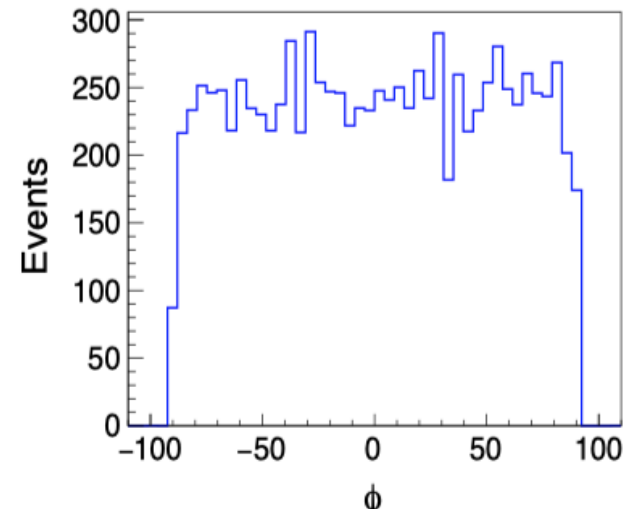
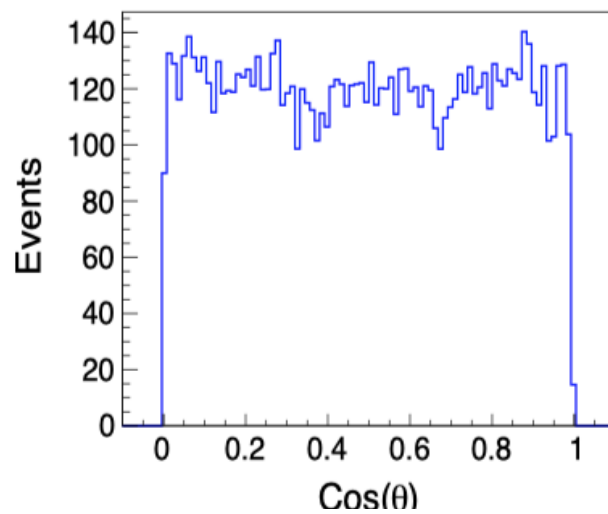
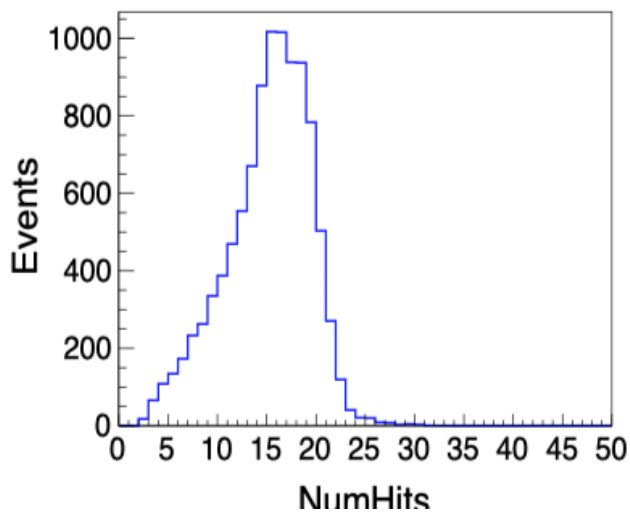
Web IDE

📄 ▾

Clone ▾

模拟程序

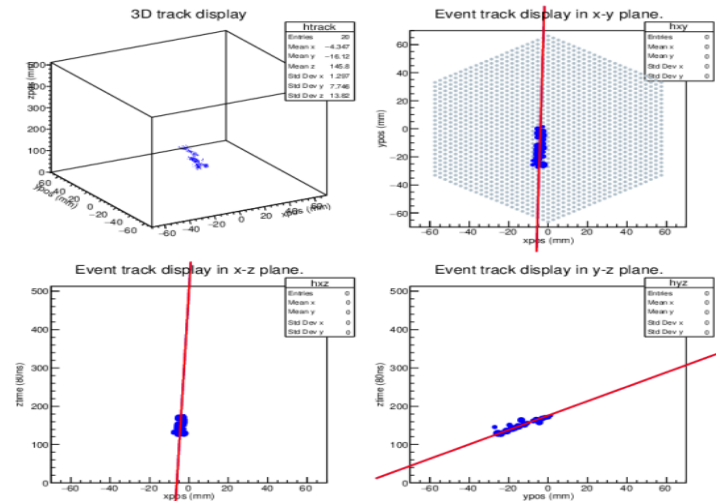
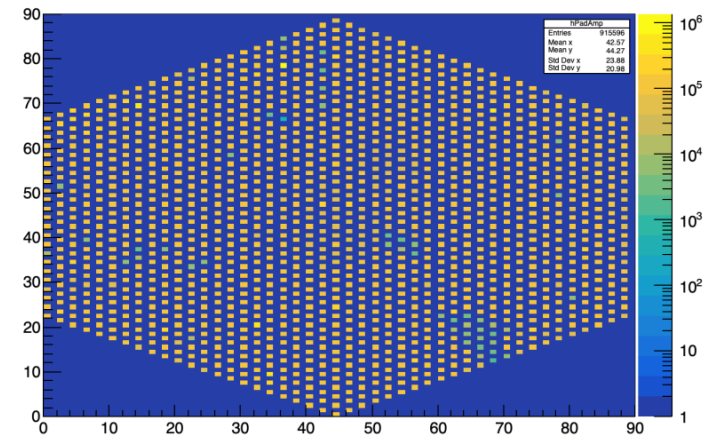
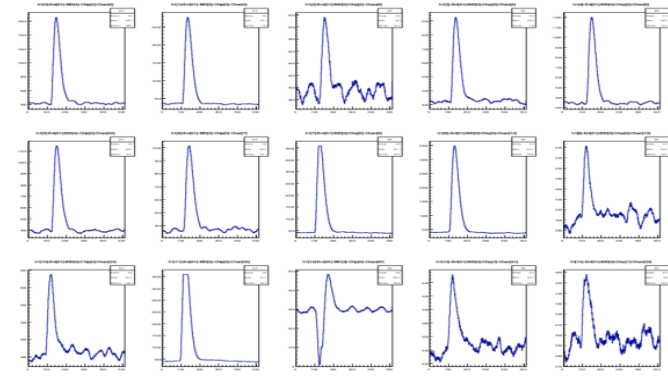




四组分 α 源模拟结果

实验数据分析程序

- **BluetRawToWaveForm**
- **BluetWaveform**
- **BluetWaveformToDigi**
- **BluetDigi**
- **BluetDigiToTrack**
- **BluetPID (coming soon)**



TPC近期计划

- 分析2020、2021年的 ${}^6\text{Li}(n,t)$ 试测数据
- 完成 α 源测试文章撰写与发表
- 开展TPC的宇宙线测试
- 开展 ${}^{14}\text{N}/{}^6\text{Li}$ 截面测量（2021年已申请束流时间）

2.4 用TPC试测 $^{232}\text{Th}(n,f)$

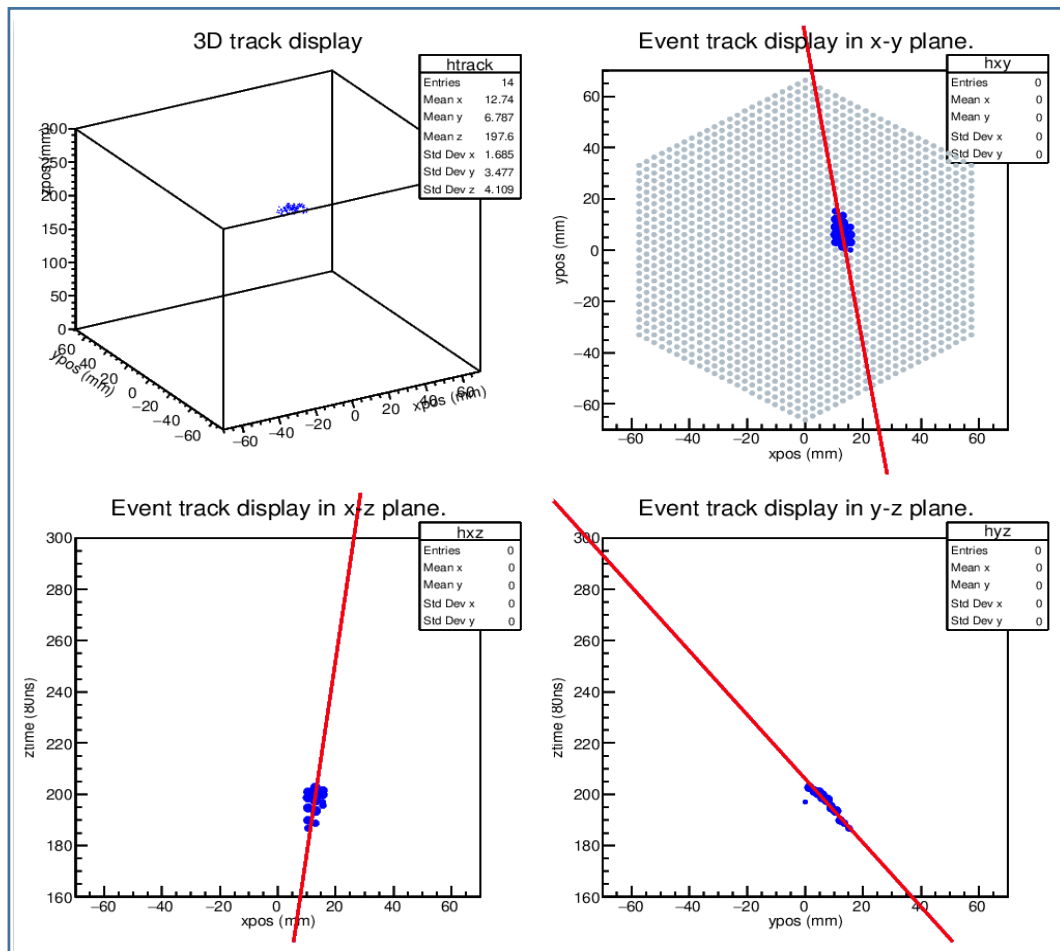


2022年4月@PKU $E_n=5.0\text{MeV}$
(测量时间 $\approx 5\text{h}$)

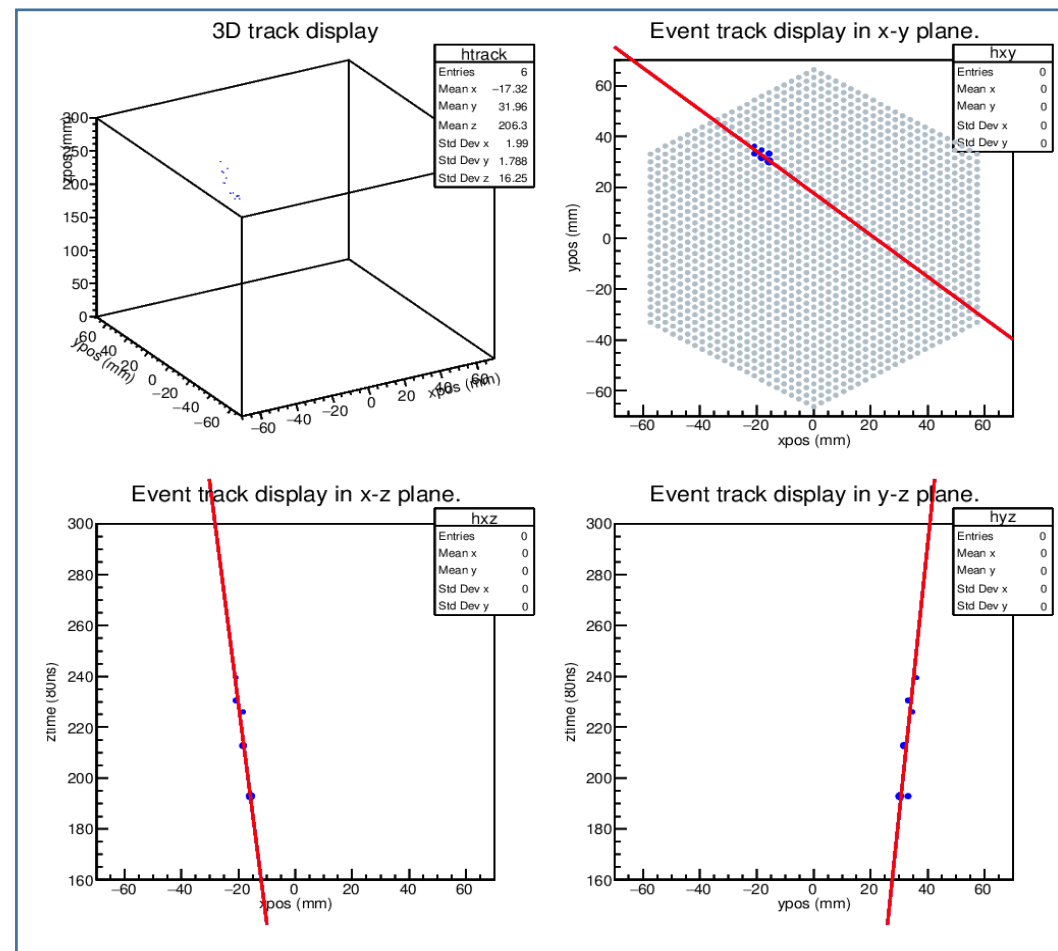
- 氘气体靶：d-d中子源
- 小裂变室： ^{238}U 测中子通量
- 工作气体：P10
- Mesh电压： -270V
- 待测样品： ^{232}Th
- 液闪探测器：测中子能谱

(详见白浩帆的报告)

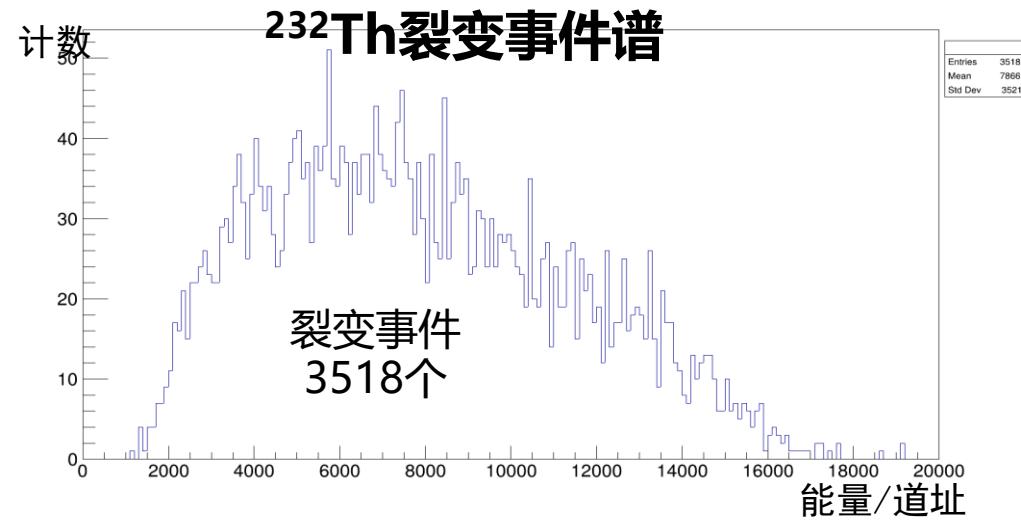
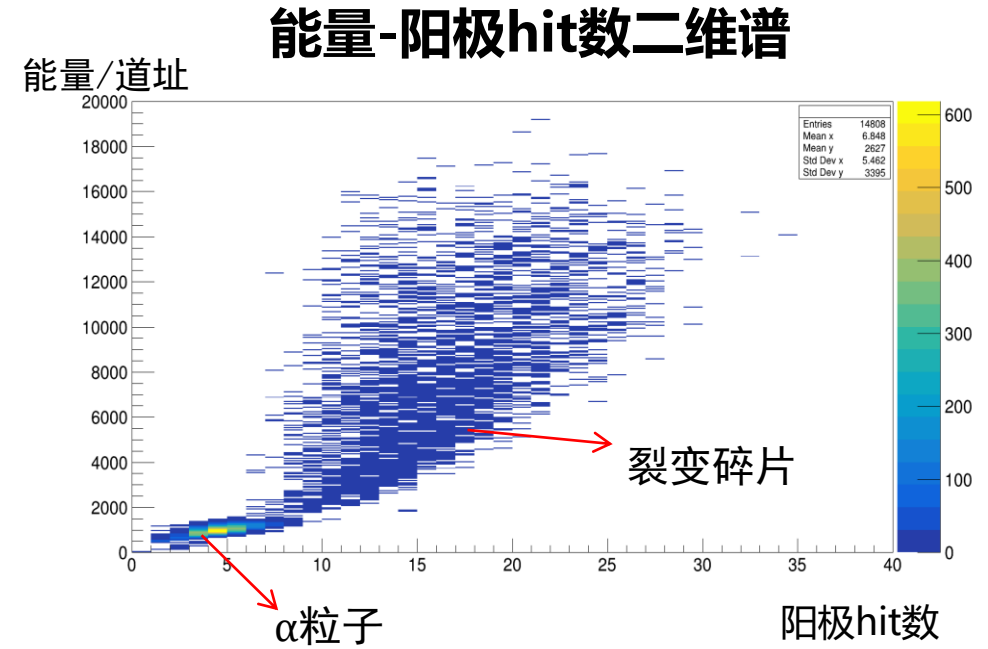
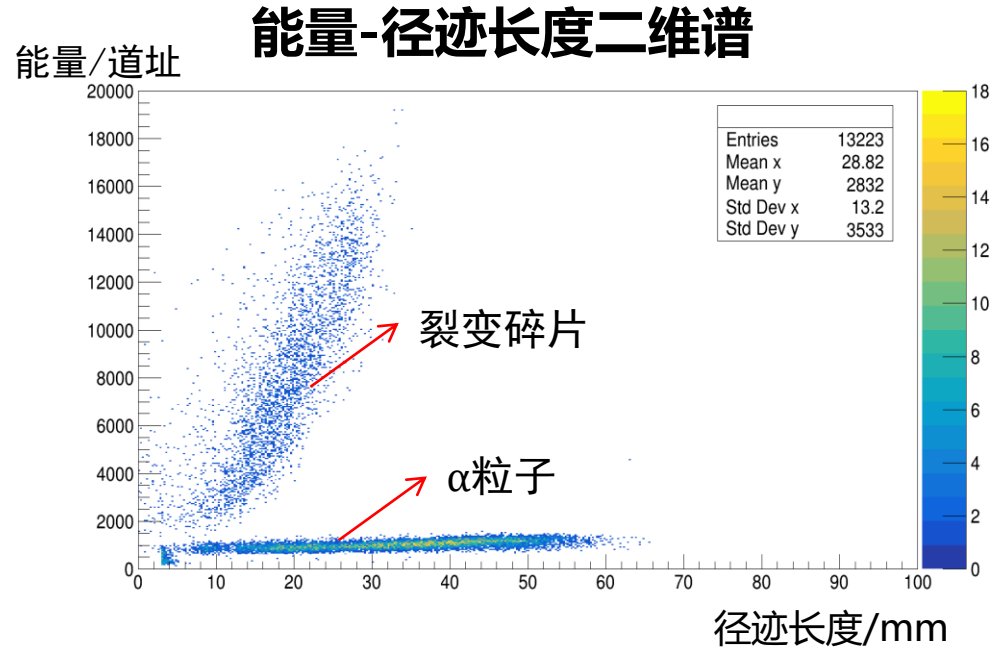
裂变事件



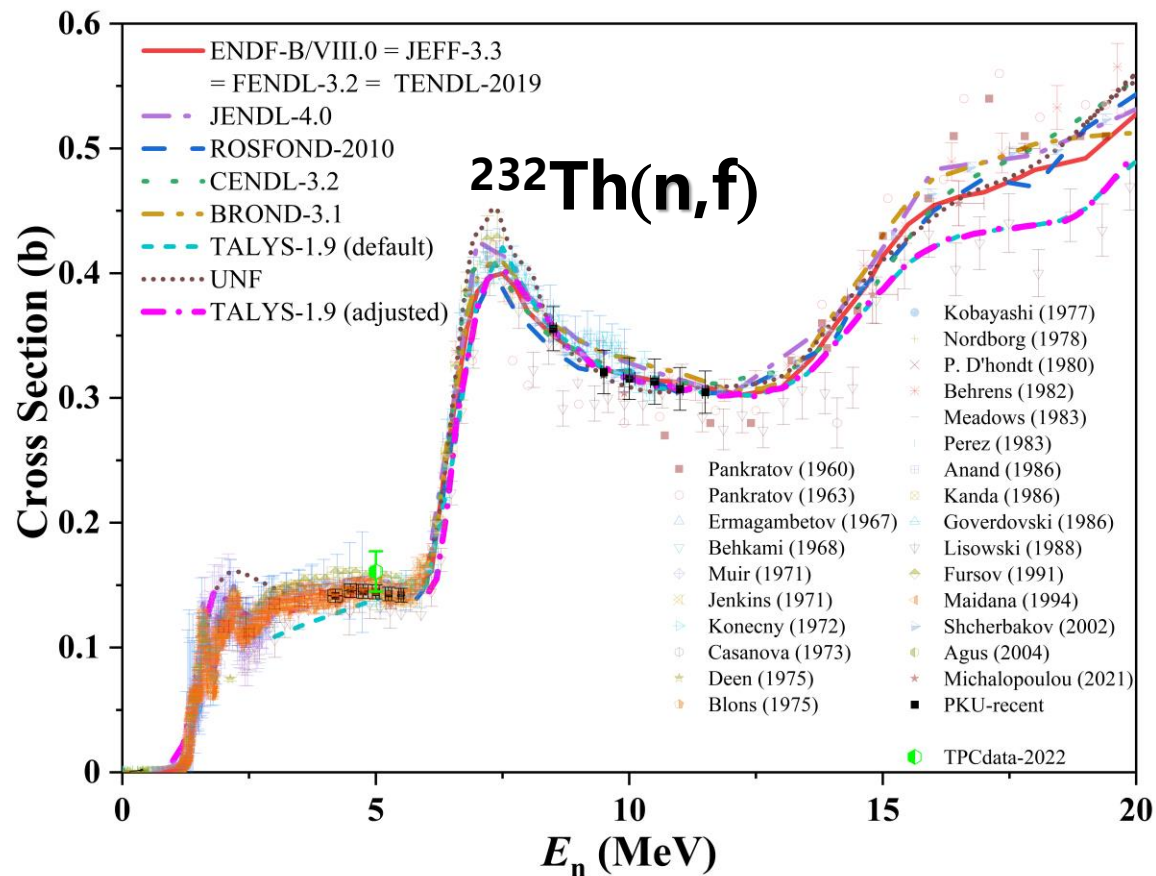
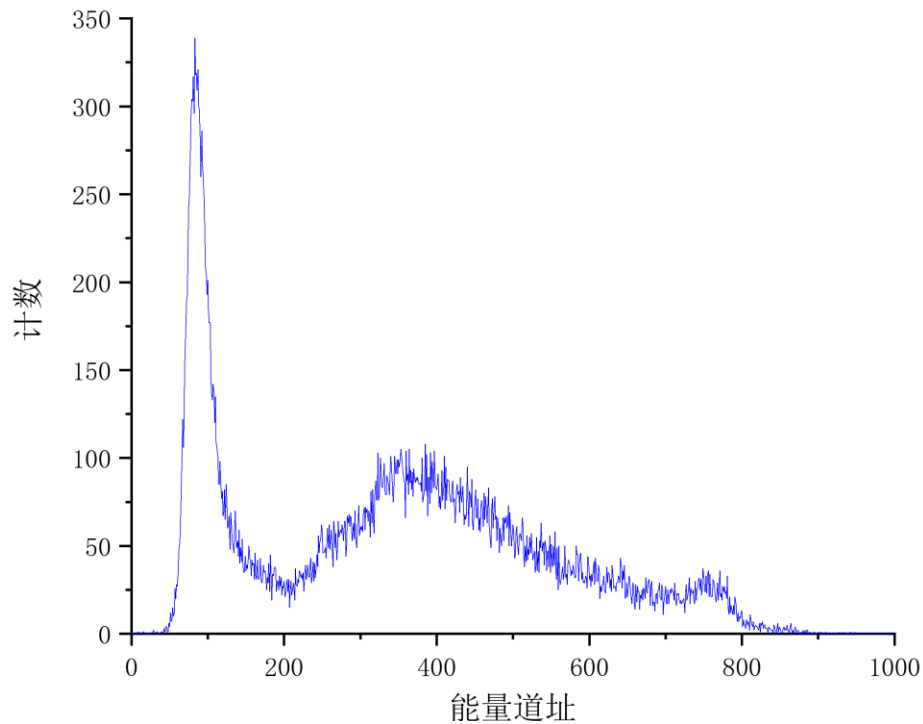
α 粒子



232Th 裂变事件



^{232}Th 裂变反应截面试测结果



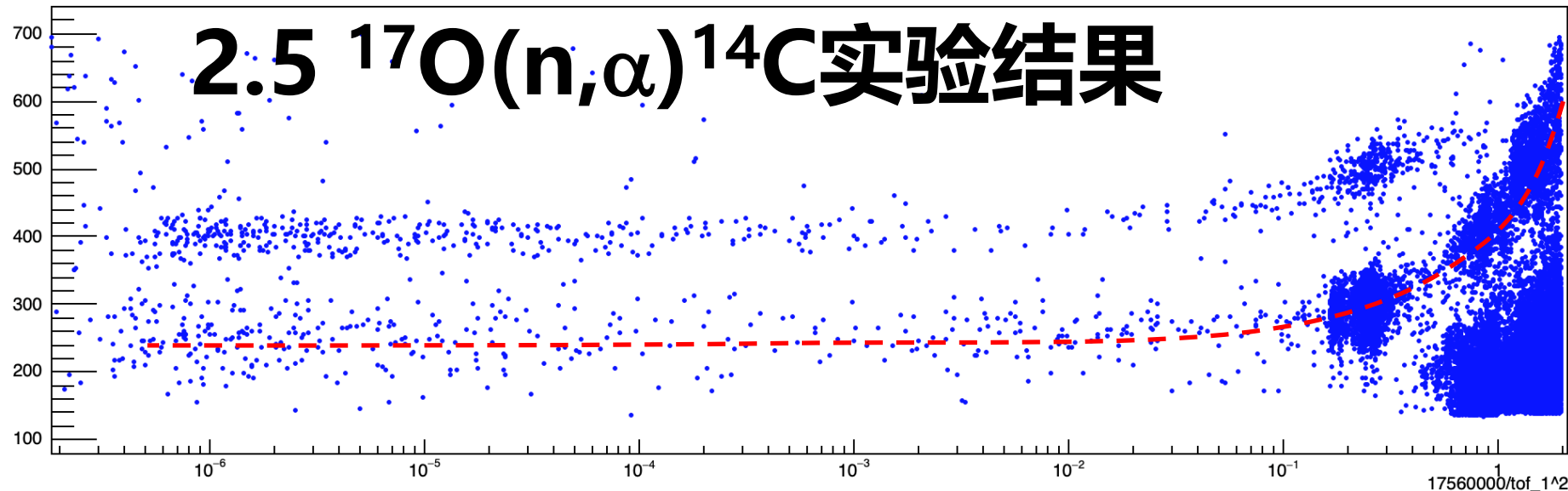
首次用TPC测量到裂变截面

下一步将提高精度开展系统测量

2.5 $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 实验结果

^{17}O 靶

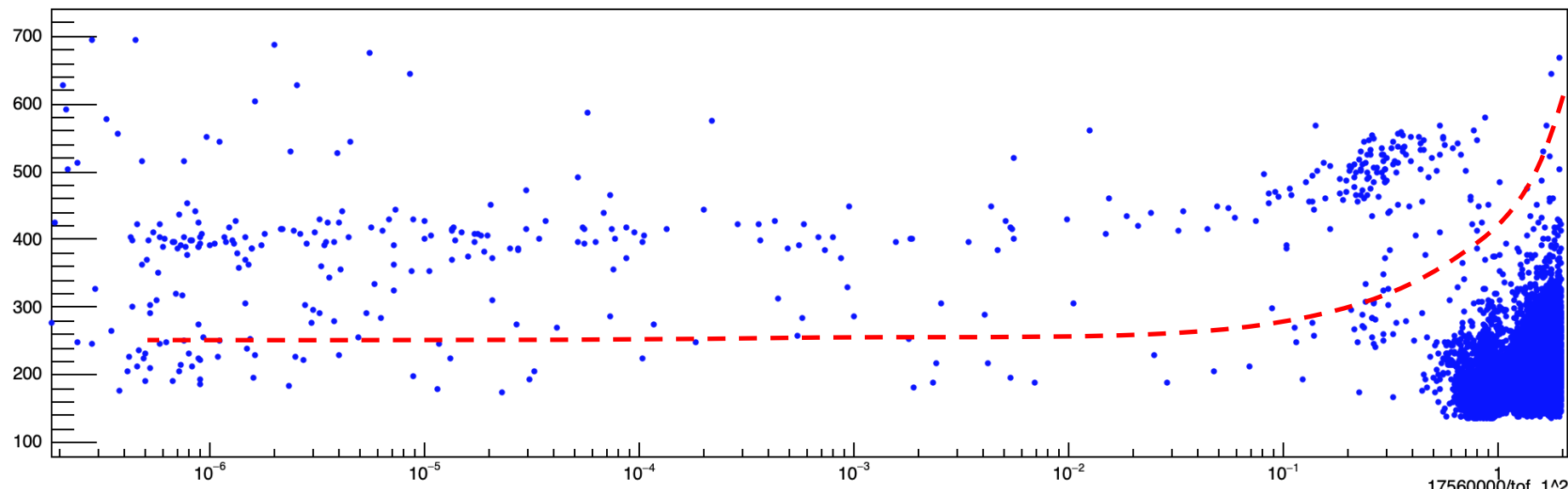
8块SiC
探测器



$^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$
相对测量

$E\alpha$ (Channel)

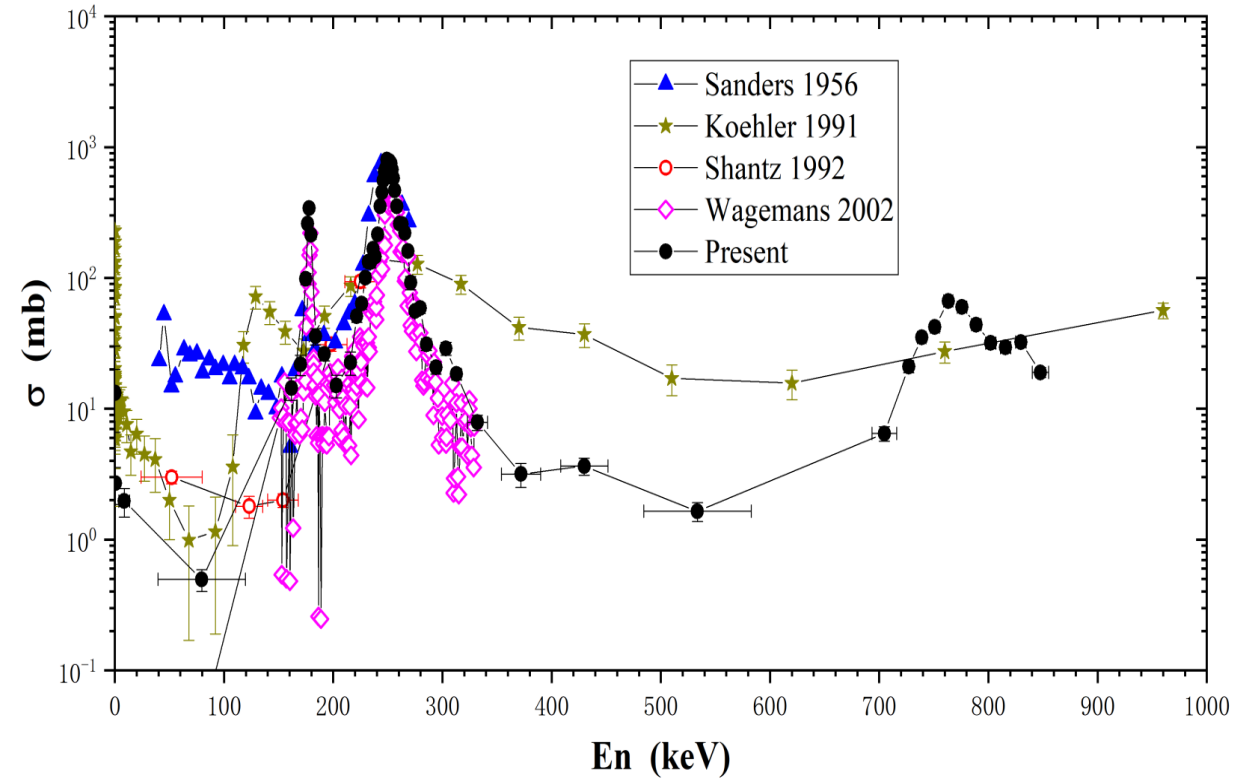
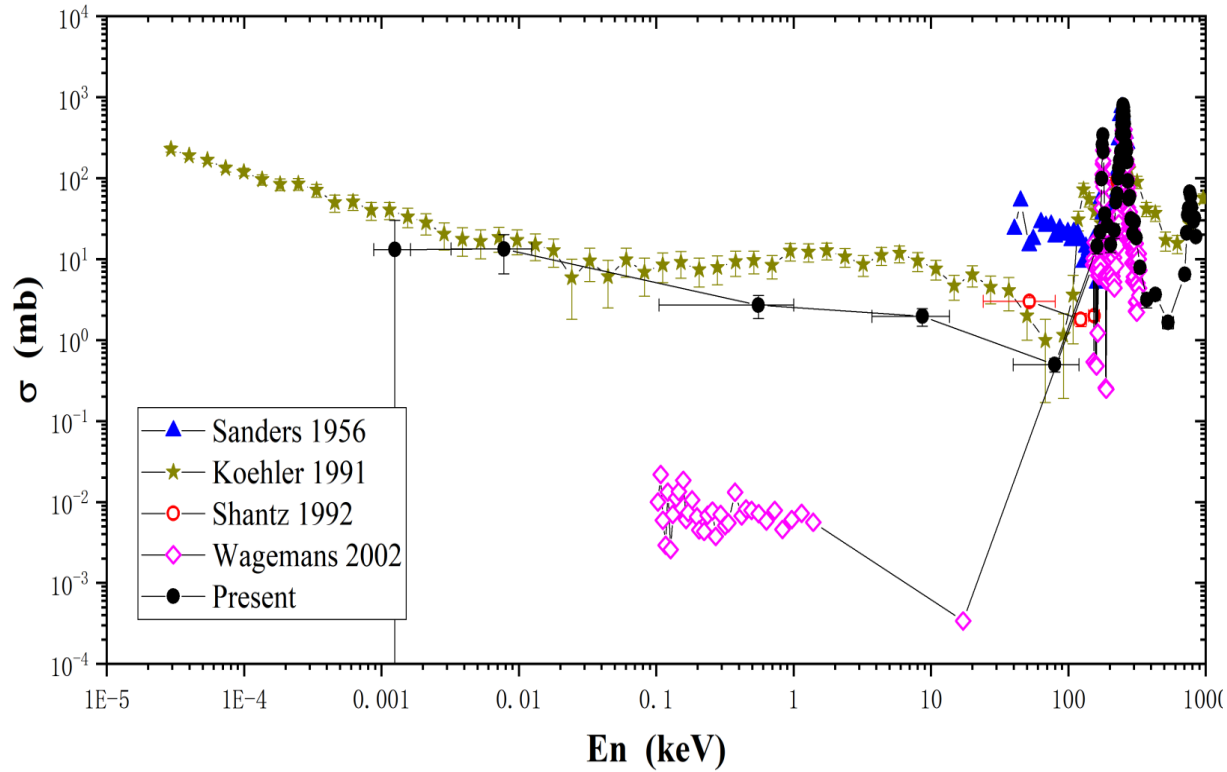
^{16}O 靶
扣本底



(详见李云居报告)

E_n (MeV)

$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ 激发函数



3. 展望—思路



- **探测器研发与开展物理实验并重**

TPC 硬件完善(单TPC, 双TPC, 非流气TPC)、软件开发与测试
实验测量的重点是**轻核反应**: 两体、三体... 核反应

- LPDA SiC TPC **结合**

标准核反应截面的高精度测量

两体核反应 三体、四体核反应测量

单能源-白光源 相结合

展望1



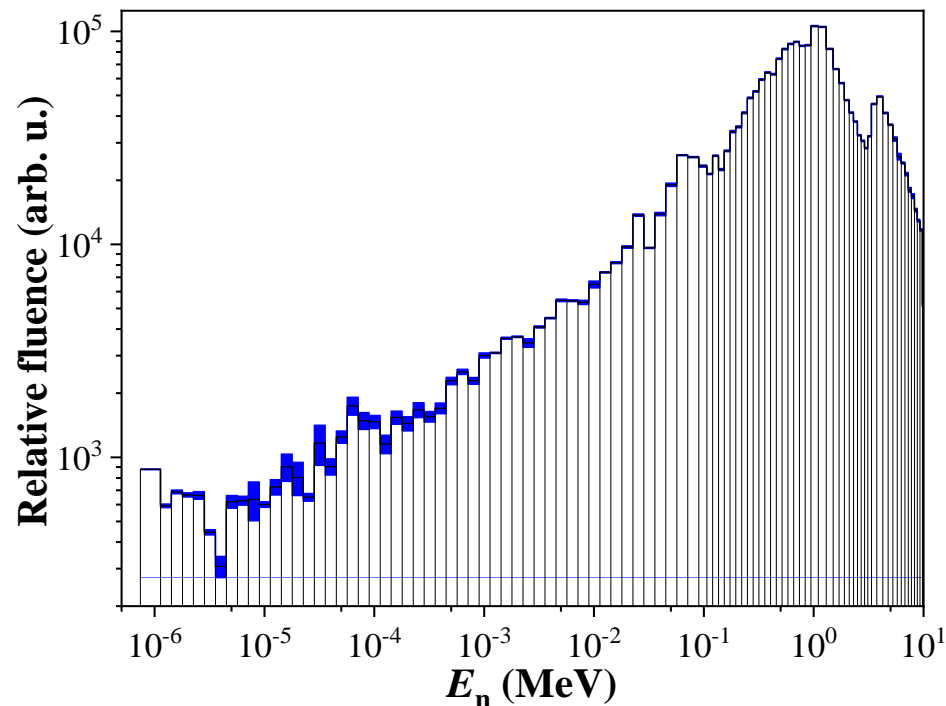
- **标准核反应截面的高精度测量**

宽能区测量

相对测量

高精度测量

$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 与 $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$



白光中子源能谱
(蓝色柱高度表示相对误差)

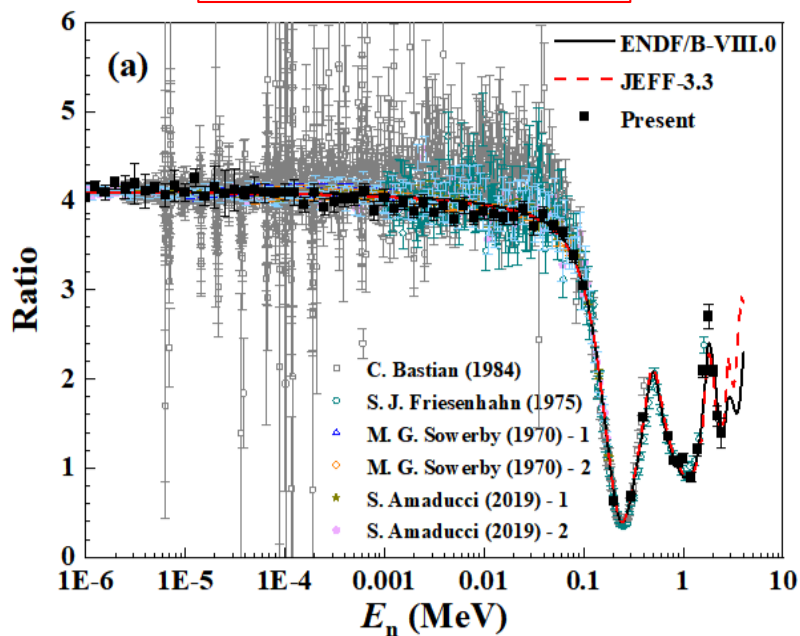
2018年 分别测量 实验条件相同

- 打靶功率
- 中子能谱
- 探测器
- 样品架
- 电子学

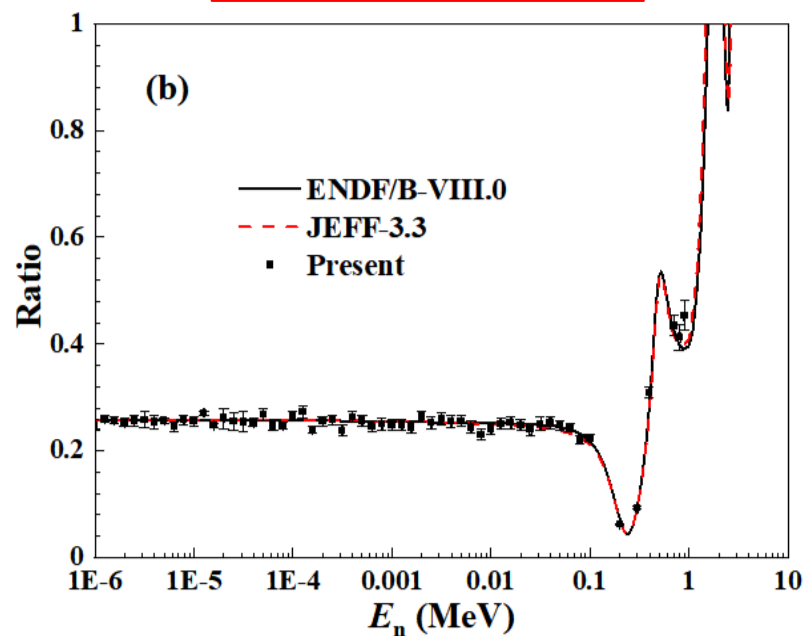
...

重新处理截面的比值

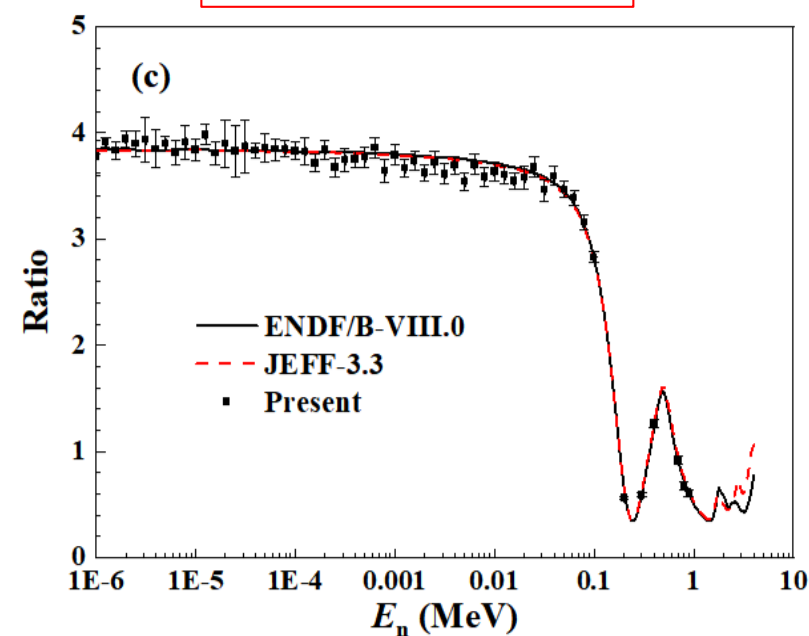
$^{10}\text{B}(n, \alpha) / ^6\text{Li}(n, t)$



$^{10}\text{B}(n, \alpha_0) / ^6\text{Li}(n, t)$

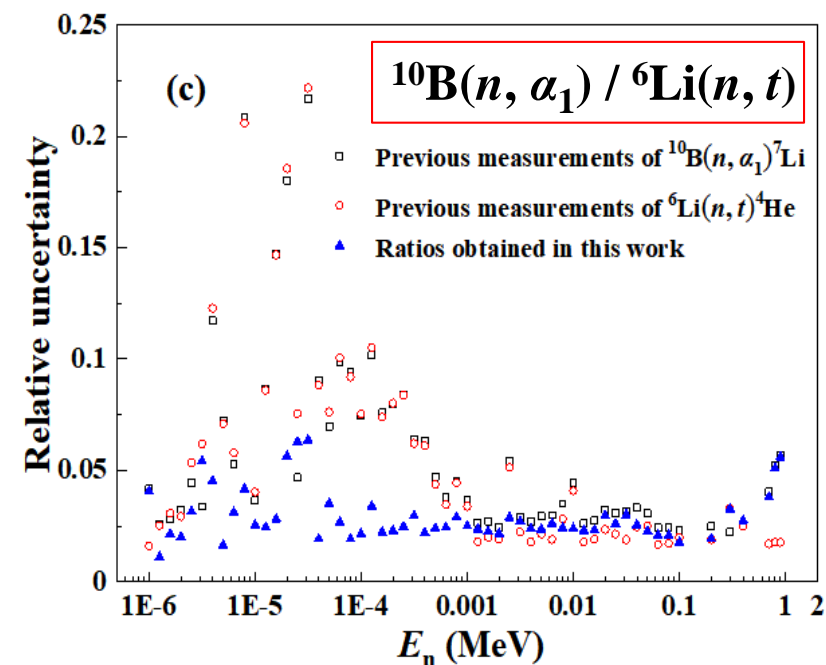
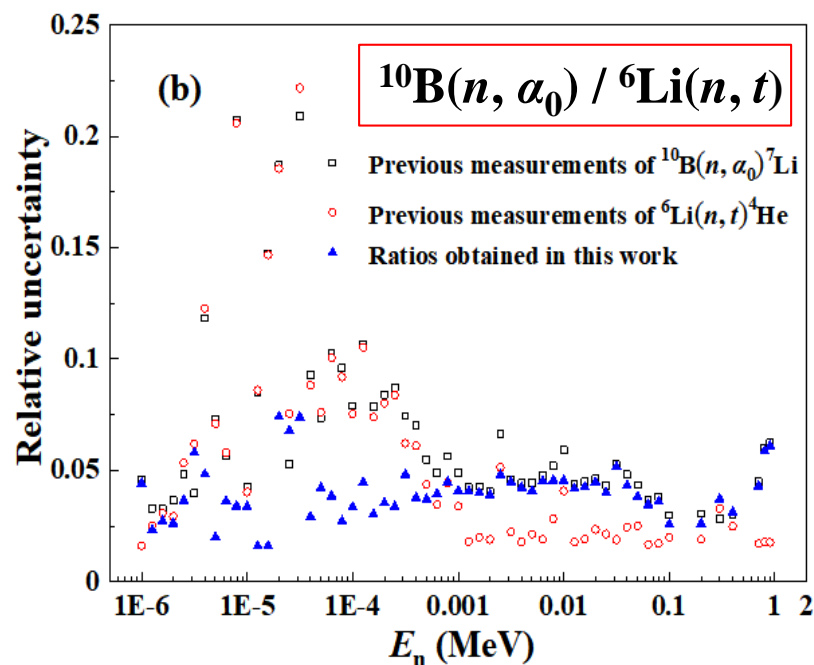
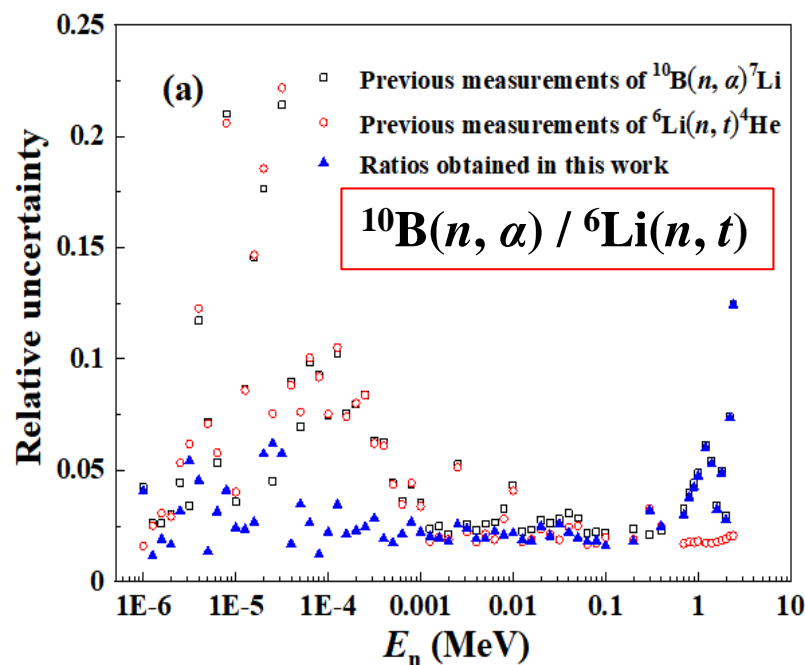


$^{10}\text{B}(n, \alpha_1) / ^6\text{Li}(n, t)$



与其他实验结果相比：误差小；与评价库数据相比：符合的很好

截面比值的误差

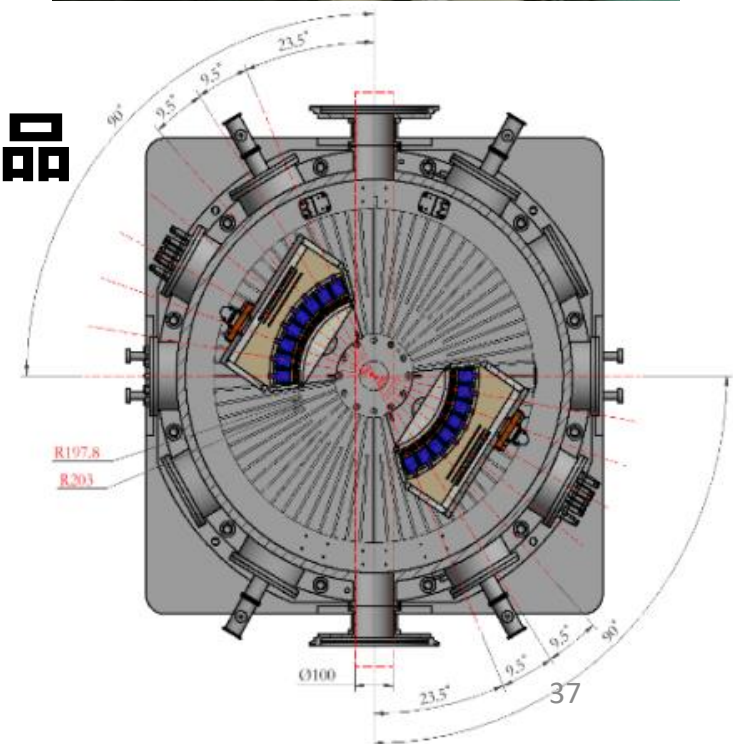
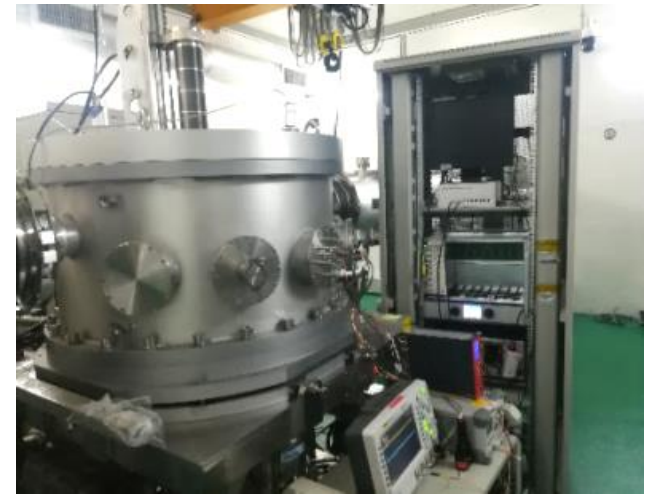


$E_n = 1.0 \text{ eV} \sim 1.0 \text{ keV}$ 能区，截面比值的误差明显低于各自截面的误差，
 $E_n = 1.0 \text{ keV} \sim 0.5 \text{ MeV}$ 能区，比值的误差逐渐向截面的误差靠近，
 $E_n > 0.5 \text{ MeV}$ 能区，比值的误差主要由 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面误差决定[$^6\text{Li}(n, t)$ 误差小]

在较高能区对 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应开展高精度实验测量很有必要

标准截面高精度测量1 (采用LPDA)

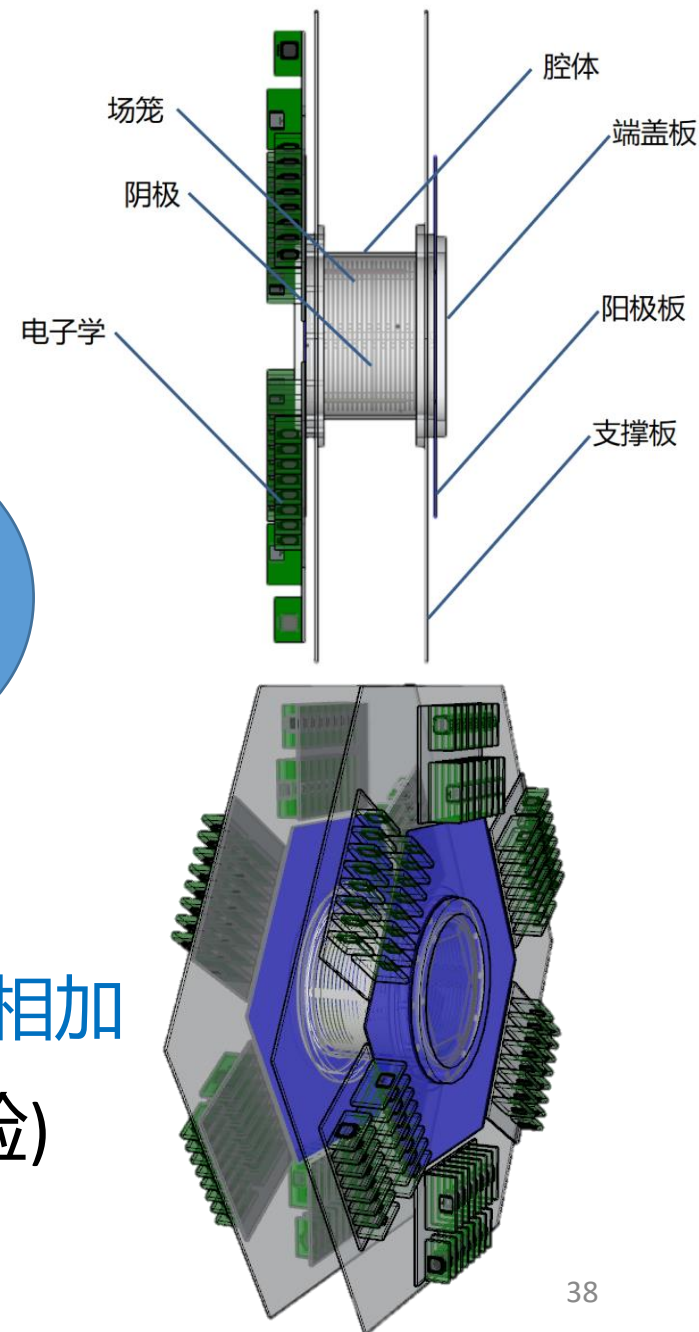
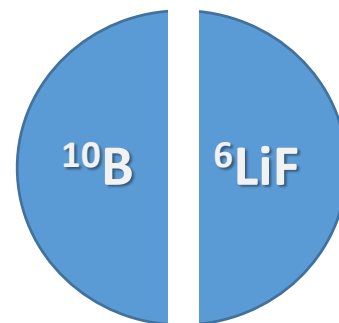
- 测量截面的比值 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}/^6\text{Li}(n,t)^3\text{H}$
- 1eV– MeV宽能区 向更高的能区拓展
- 误差来源：双束团退卷积—**单束团测量**(可行性?)
 ^{10}B 的 α_0, α_1 事件的分割—采用**更薄的样品**
统计误差—**增加有效测量时间**
- 采用**LPDA探测器**测量：双背对背薄样品 $^{10}\text{B}/^6\text{LiF}$
立体角小, 但能得到微分截面



标准截面高精度测量2 (采用TPC)

- 测量截面的比值 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}/^6\text{Li}(n,t)^3\text{H}$
- 采用单TPC测量：固体薄样品
 - 两个圆形样品分别测量
 - or 两个半圆样品同时测-顶点重建
- 采用双TPC测量：固体薄衬薄样品
 - 两个圆形样品分别测量—前后同时测 能量相加
 - or 两个半圆样品同时测-顶点重建—前后同时测 能量相加
- 采用热中子核反应准确测量 $^{10}\text{B}/^6\text{Li}$ 核数比(专门实验)

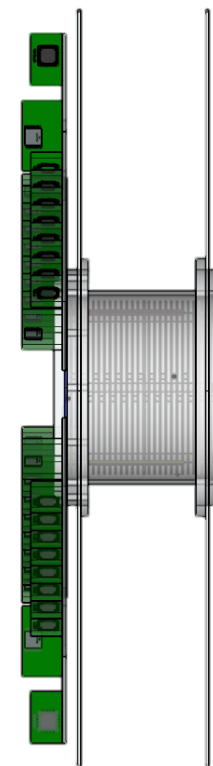
需要完善双TPC的数据获取系统



标准截面测量3 (采用TPC)



- 测量 ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反应激发函数
在eV--MeV宽能区得到相对激发函数
- 测量 ${}^3\text{He}(n,p)/{}^{10}\text{B}(n,\alpha)$ 截面比
得到高精度的截面比
- 采用气体样品(${}^3\text{He}$ 难以形成固体)
分别掺入 ${}^3\text{He}$ 气体、 BF_3 (或硼烷)气体
or 同时掺入 ${}^3\text{He}$ 气体+ BF_3 (或硼烷)气体
- 采用固定气压、非流气式单TPC测量
- 采用热中子核反应测量 ${}^{10}\text{B}/{}^3\text{He}$ 核数比
(或采用光谱分析方法)

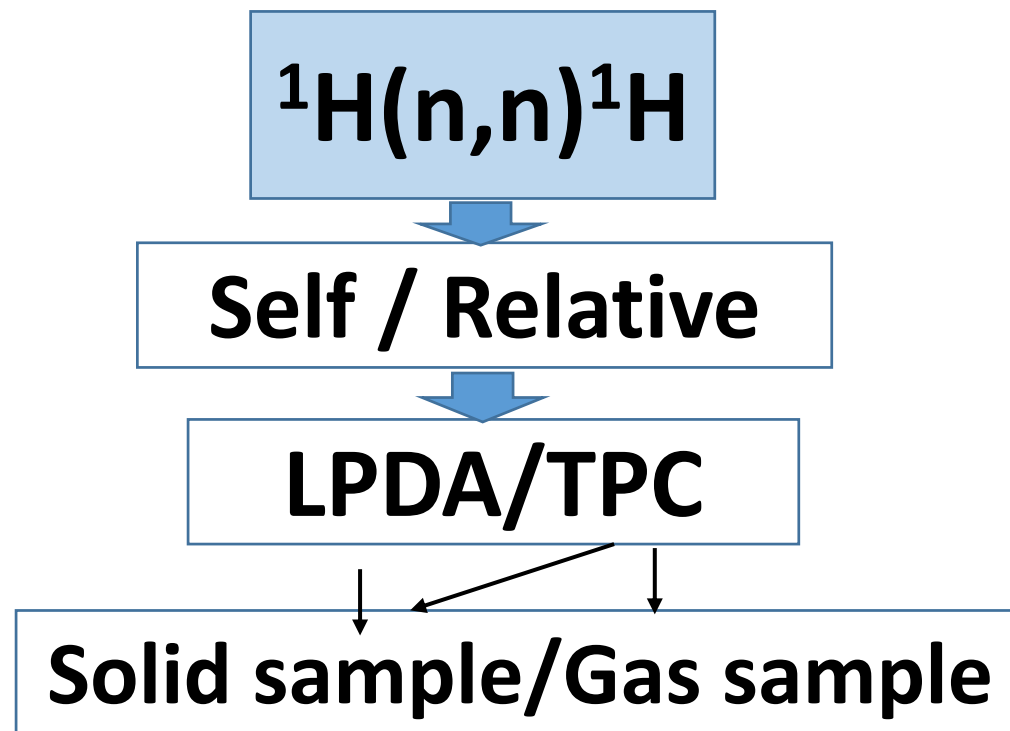


需研制非流气式TPC

标准截面测量4 (采用LPDA与TPC)



- 测量 $^1\text{H}(n,n)^1\text{H}$ 反应
向低能区拓展
- 自归一测量 vs 相对于 $^6\text{Li}(n,t)$ 测量
- 用LPDA测量(固体样品) vs 用TPC测量
- TPC用气体样品 vs 用固体样品测量



展望2



• 基于TPC的多体核反应实验测量

问题:

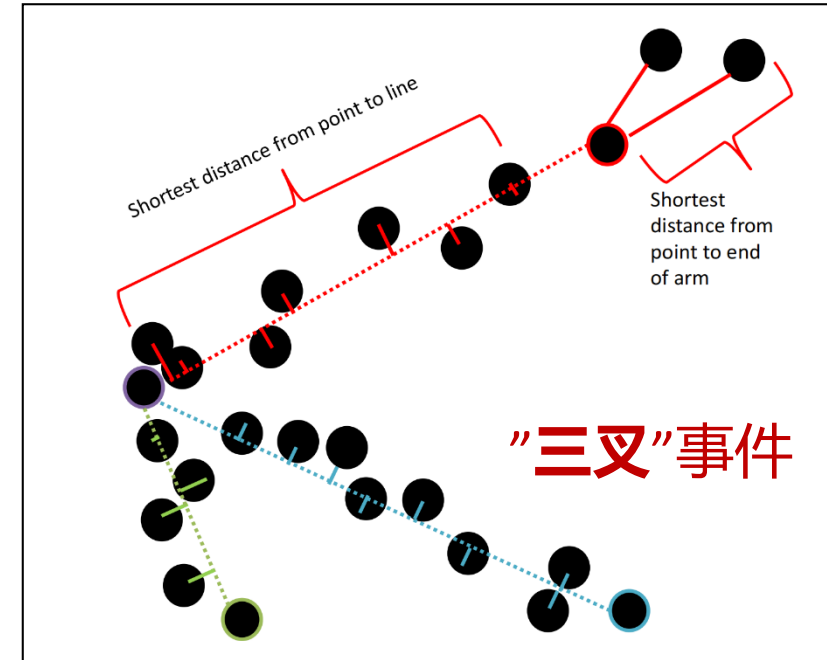
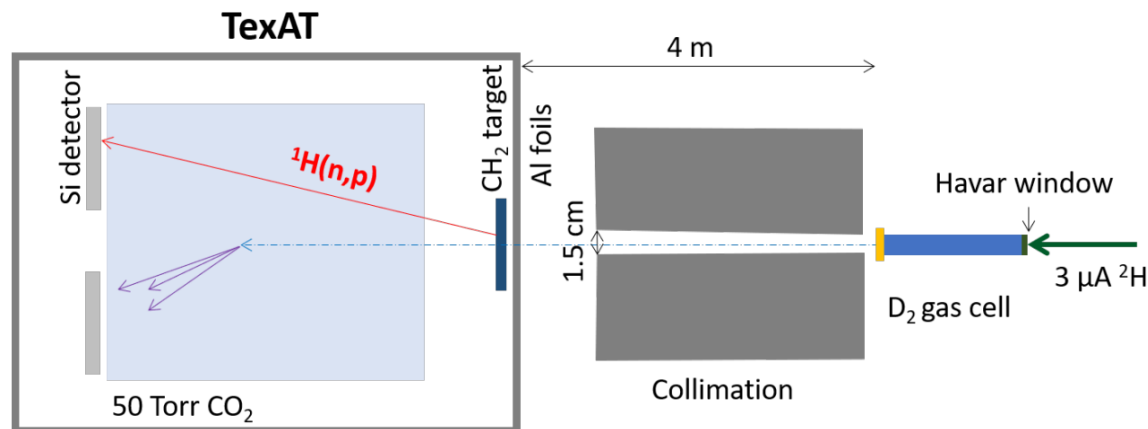
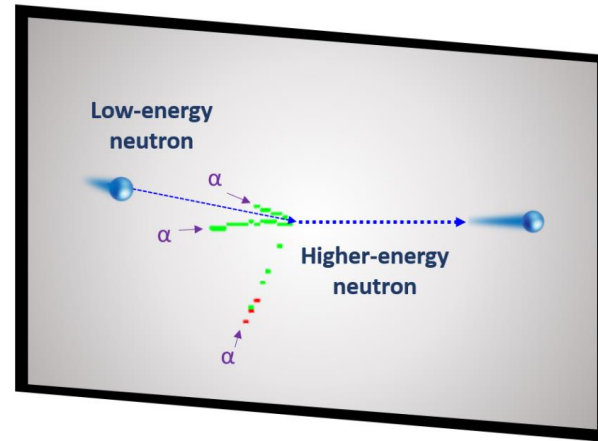
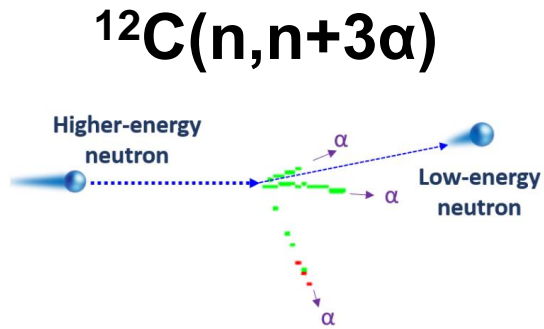
- 两体核反应种类繁多
- TPC能量分辨、角度分辨能力有待提高
- p , d , t , ${}^3\text{He}$, α 粒子不容易区分

对策:

基于TPC可在特定能区对多体核反应进行测量(三叉)

在测量过程中 逐步掌握 p , d , t , ${}^3\text{He}$, α 鉴别方法

国际上的经验 TexAT

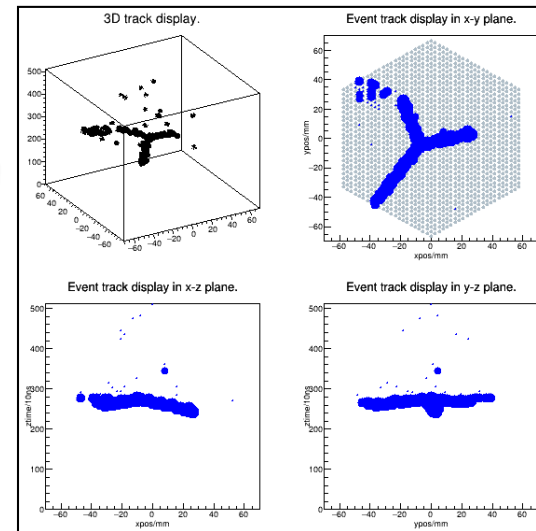


This measurement demonstrates the use of neutron-induced reactions with an active-target TPC...

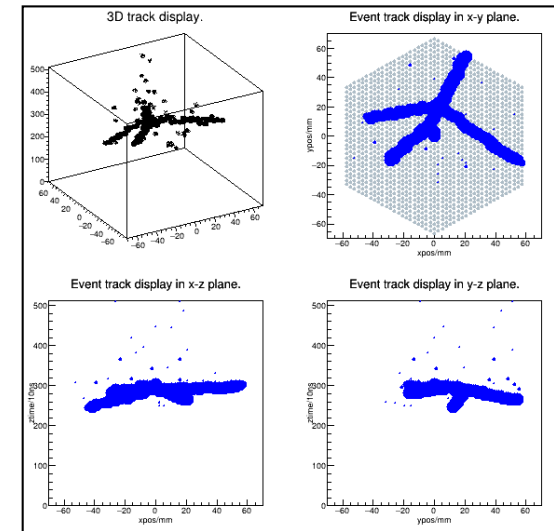
- J. Bishop, et al., **Neutron-upscattering enhancement of the triple-alpha process.** *Nature Communications*, (2022) 13:2151 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29848-7>

多体核反应测量思路

- 基于单TPC 采用**气体样品**
寻找“**三叉**”事件 眼睛寻找→机器学习
- 先在**单能源**上试测
 - 1) 绝对中子通量测量
 - 2) 样品核数的确定
- 在**测量三体反应过程中** 逐步掌握p, d, t, ^3He , α 鉴别方法
“先测三体、再测二体” (?)



3径迹事件

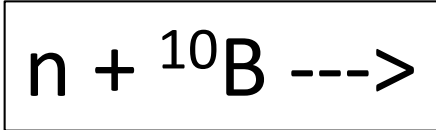


4径迹事件

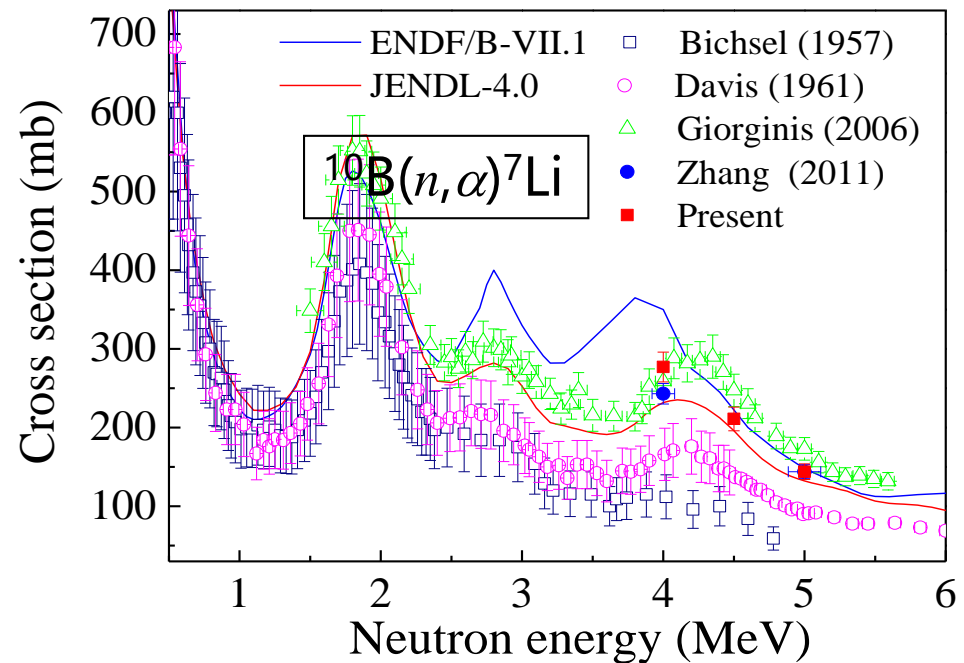
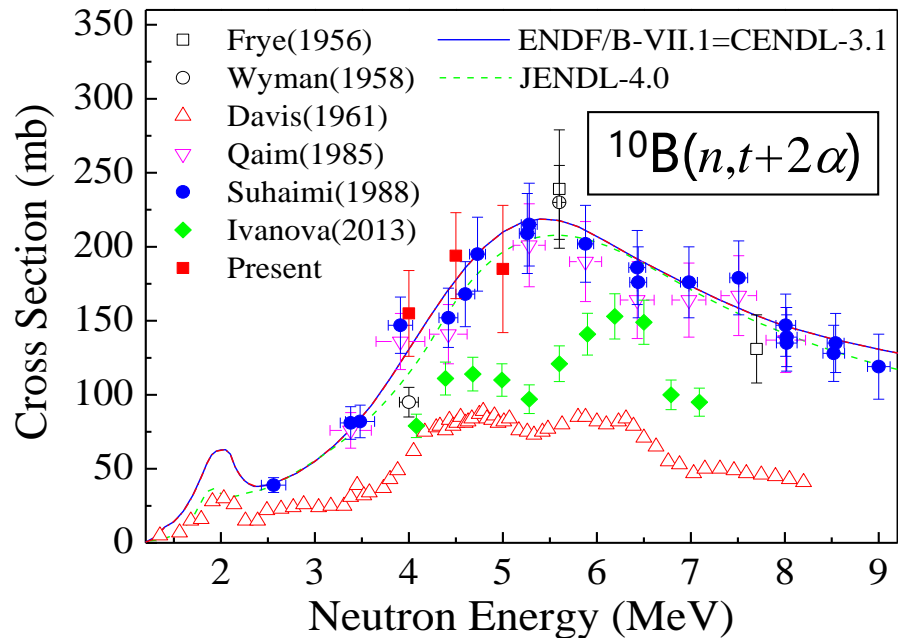
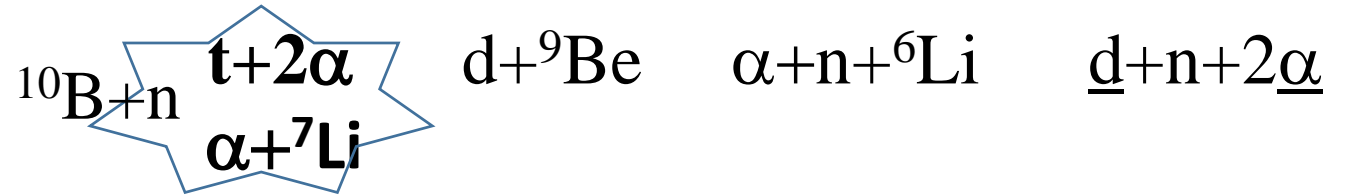
TPC系统已具备多体核反应测量能力

待测多体核反应1

- $^{10}\text{B}(n, t+2\alpha)$ 三体反应
- $E_{\text{th}} = 0$ 北大能区
- 与 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 两体反应同时测量
- 测量比值可消去通量&核数误差

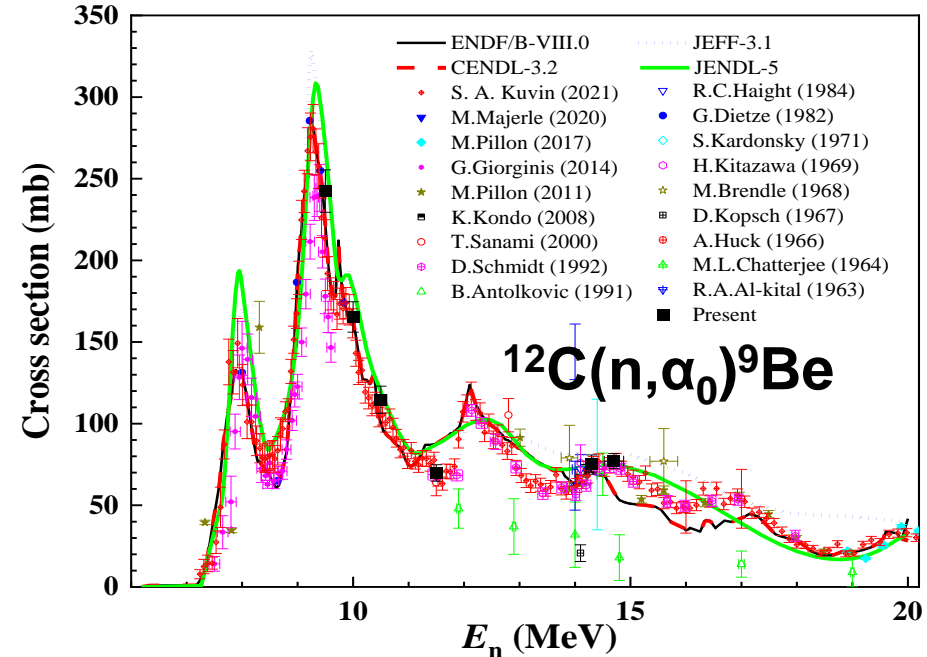
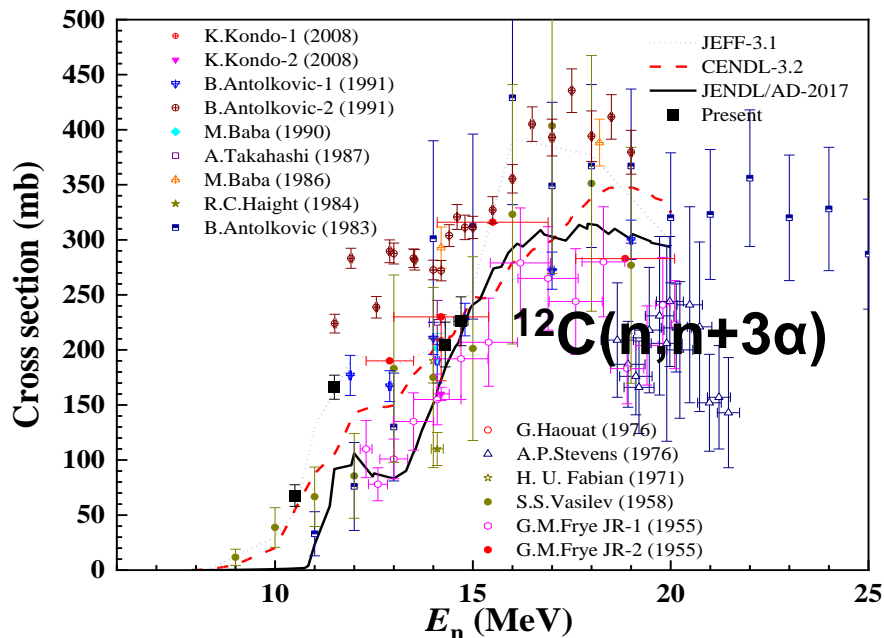
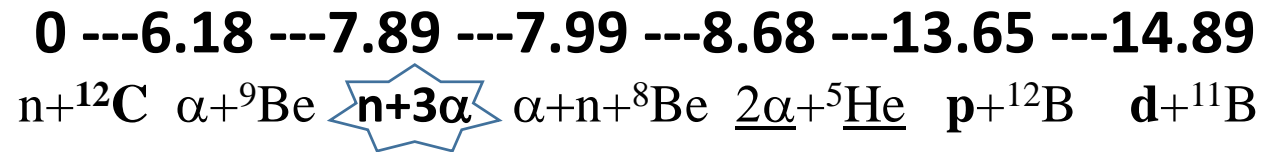
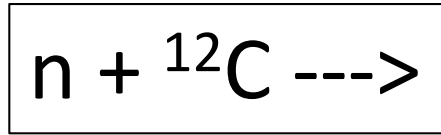


0 ---- 4.80 ---- 4.91 ---- 6.53 MeV



待测多体核反应2

- $^{12}\text{C}(n, n+3\alpha)$ 四体反应(三叉)
- 与 $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)$ (n, e_l) 同时测量?
- 原子能院能区 $^{12}\text{C}(n, n)$ 10eV-1.8 - 2.45MeV 标准截面



展望3



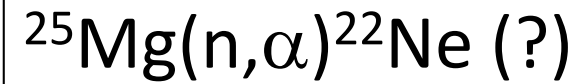
- 基于LPDA与TPC的**两体核反应实验测量**

在**两体核反应**中找最特殊的：

低能情况下出射带电粒子只有(n,p)或(n, α)反应

或者质子p与其他带电粒子容易鉴别(射程长、
电离密度最低)

- 例如 可测吗?(估算)



...

- Back-n低能中子能区出射轻粒子为p
反应截面小

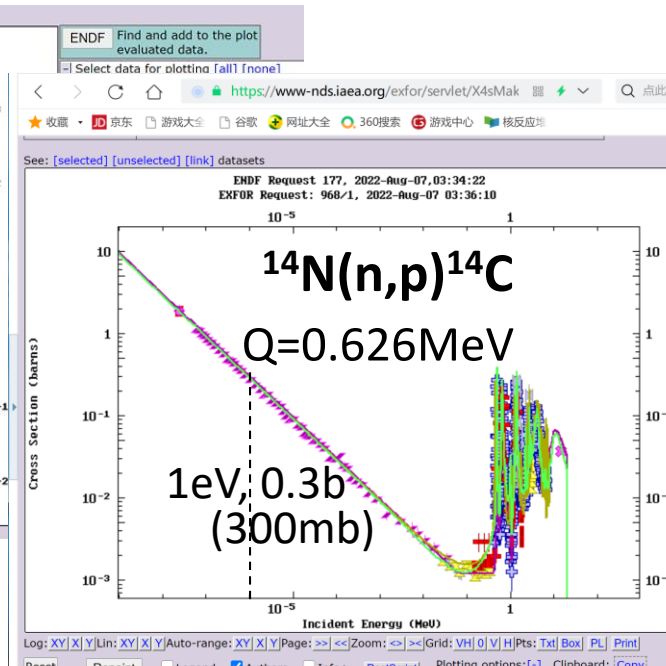
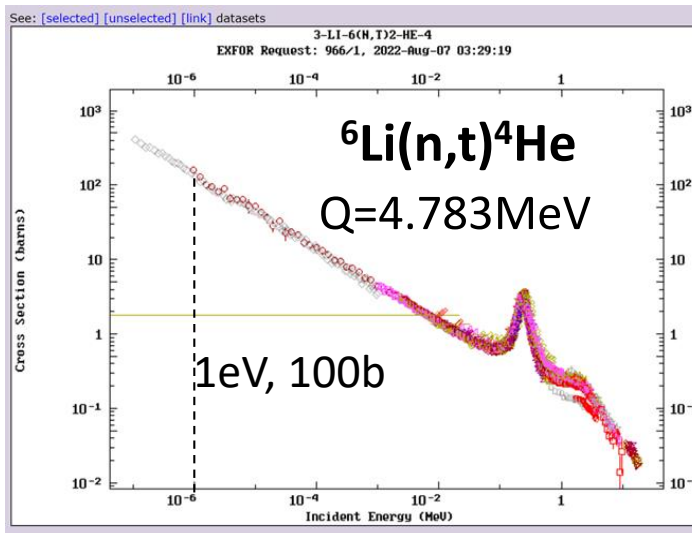
每个能bin有10个计数
就可以处理出截面

- LPDA立体角小、固体样品核数少 计数率低

TPC探测立体角大、效率~100%、气体样品核数多

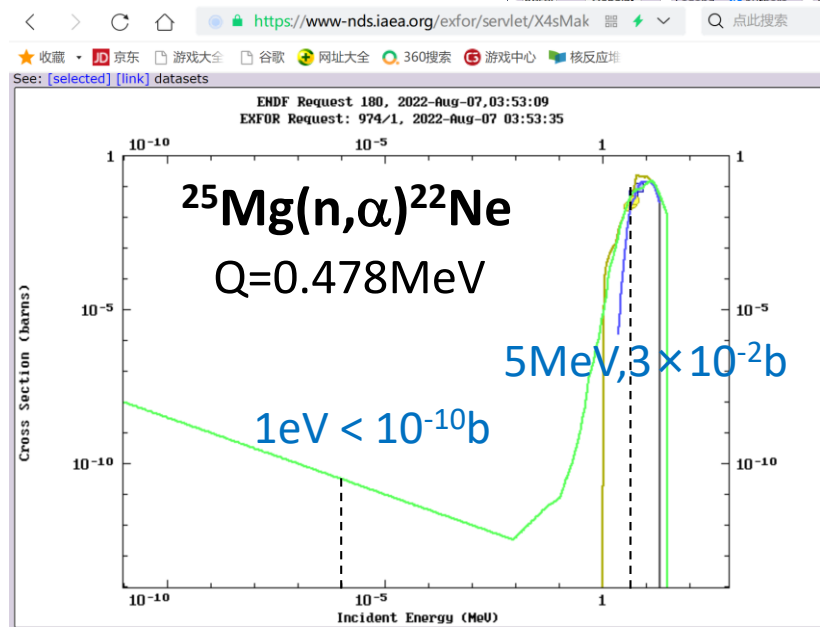
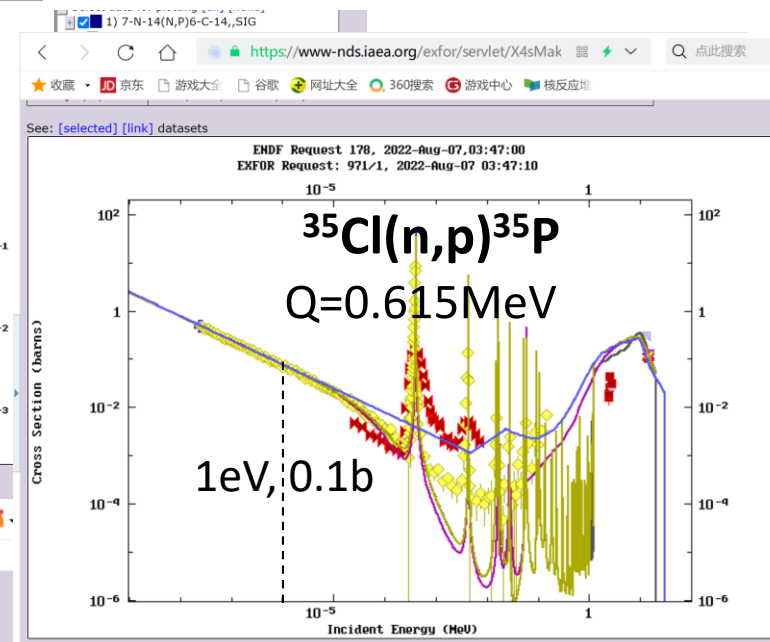
- 需要考虑的细节问题

- 气体/固体样品
- 中子通量 ^3He 气 ^6Li 固 ^{10}B 固 (相对测量)
- 事件径迹——顶点重建 位置分辨

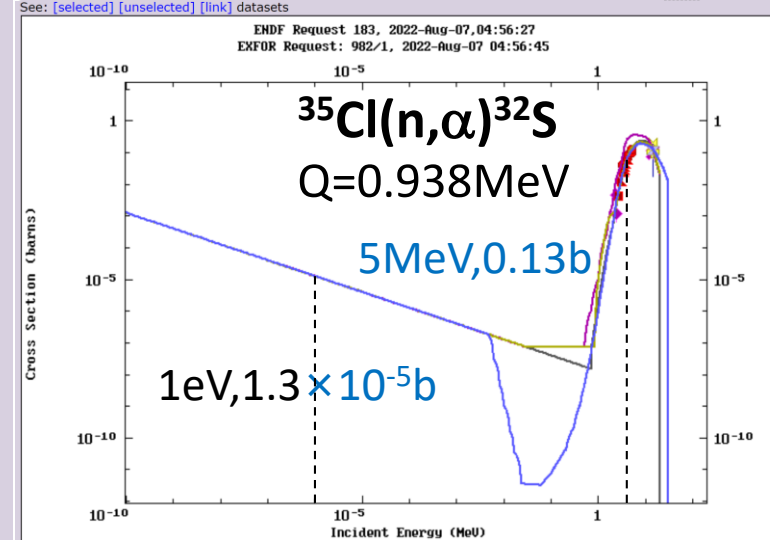


$\sigma = 1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ b} = 10^{-27} \text{ cm}^2$
 $\phi = 1.6 \times 10^6 \text{ n/s/cm}^2$
 $N = 1/100 \text{ mol} = 6 \times 10^{21}$

$\sigma \phi N = 10 \text{ s}^{-1}$
 $T = 100 \text{ h} = 3.6 \times 10^5 \text{ s}$
 $\rightarrow 3.6 \times 10^6 \text{ Counts}$



- Select data for plotting [all] [none]
- 1) 12-MG-25(N,A)10-NE-22,,SIG
 - 2) ENDF/B-VIII.0: MG-25(N,A)NE-22
 - 3) JEFF-3.3: MG-25(N,A)NE-22
 - 4) JENDL-5: MG-25(N,A)NE-22
 - 5) JENDL-4.0: MG-25(N,A)NE-22
 - 6) BROND-3.1: MG-25(N,A)NE-22
 - 7) CENDL-3.2: MG-25(N,A)NE-22
 - 8) TENDL-2019: MG-25(N,A)NE-22
- 9) Use my data [example][2]
 Use my control file [init] [help]
- See: plotted data (21Kb) out: e6 json: + plotly2



- Select data for plotting [all] [none]
- 1) 17-CL-35(N,A)15-P-32,,SIG
 - 2) ENDF/B-VIII.0: CL-35(N,A)P-32
 - 3) JEFF-3.3: CL-35(N,A)P-32
 - 4) JENDL-5: CL-35(N,A)P-32
 - 5) JENDL-4.0: CL-35(N,A)P-32
 - 6) BROND-3.1: CL-35(N,A)P-32
 - 7) TENDL-2019: CL-35(N,A)P-32
- 8) Use my data [example][2]
 Use my control file [init] [help]
- See: plotted data (141Kb) out: e6 json: + plotly2

Log: XY | X | Y | Lin: XY | X | Y | Auto-range: XY | X | Y | Page: >> << Zoom: <> Grid: VH | 0 | V | H | Pts: Txt | Box | PL | Print

Reset Repaint Legend Authors Info+ PostScript Plotting options: [-] Clipboard: Copy

Shift legend: x=10 y=10 Split: 0 1:xy; 2:y Marker: Plot data or ratio: 0 0:data; 1:ratio to dataset-1; 2:ratio to 2-nd, etc.

Y: Axis: Log Min: 1e-14 Max: 1 Units: barn

总结



- **一年来本研究方向取得了重要进展：**
在完善LPDA 探测系统的同时
TPC 硬件+软件两方面都有长足的进步——**在国际上有特色**
- **既要学习借鉴国际同行的经验, 又要勇于开拓创新**
不断完善探测技术, 提高实验测量水平
- **标准核反应高精度测量 两体-三体-四体核反应测量**
- **本团队会继续努力、加强国内外合作、不断开拓!**
- **感谢各位专家的热心指导、帮助、建议与支持!**

第3分会场报告安排



内容涉及本年度总体进展，探测器开发、测试、应用以及软件的完善，具体核反应截面的测量等

- 1) 易晗：带电粒子实验概况与TPC探测器系统研制进展
- 2) 孙艳坤：TPC软件开发与测试
- 3) 白浩帆：基于时间投影室的 ^{232}Th 裂变截面试测
- 4) 李云居：基于散裂中子源的 $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 截面测量结果

每个报告15分钟，加上讨论共 1.5小时