

MTPC实验研究进展

汇报人：易晗

中国科学院高能物理研究所/散裂中子源科学中心

2023年11月25日

MTPC物理研讨会2023@广州·中山大学

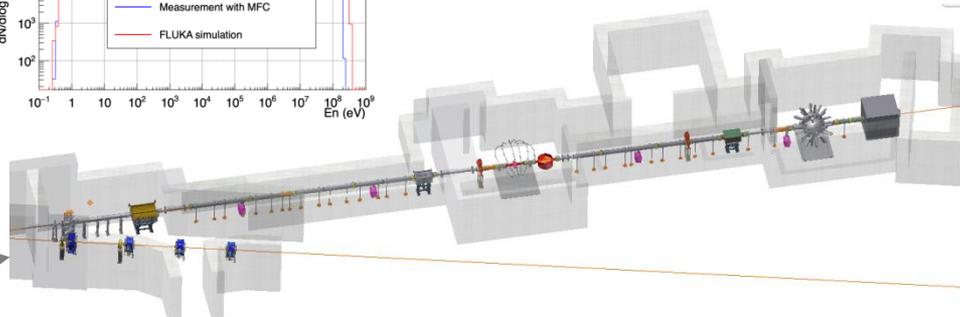
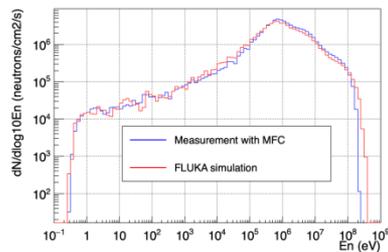
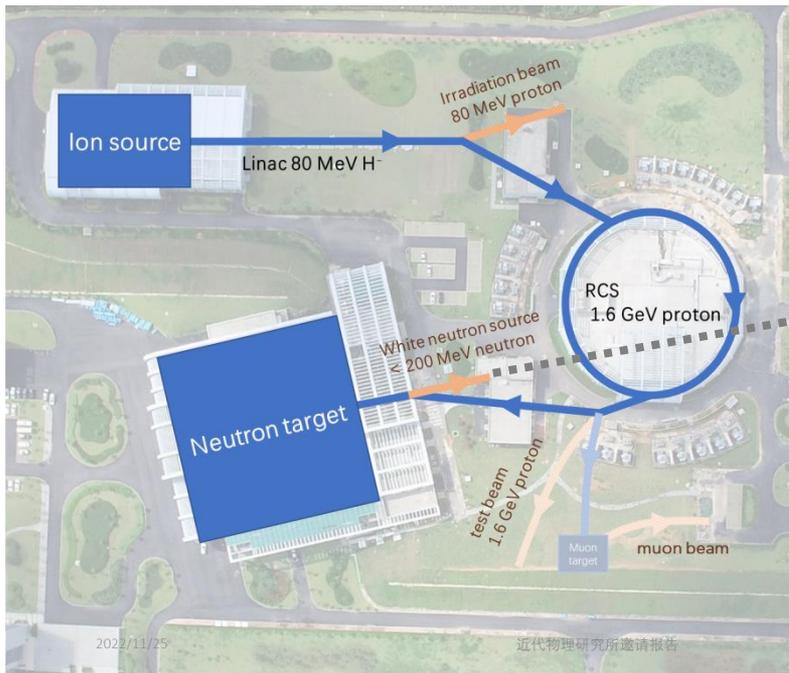
报告内容

- 项目概况
- 探测器系统研究进展
- 数据分析进展及问题
- 工作规划

报告内容

- 项目概况
- 探测器系统研究进展
- 数据分析进展及问题
- 工作规划

项目概况

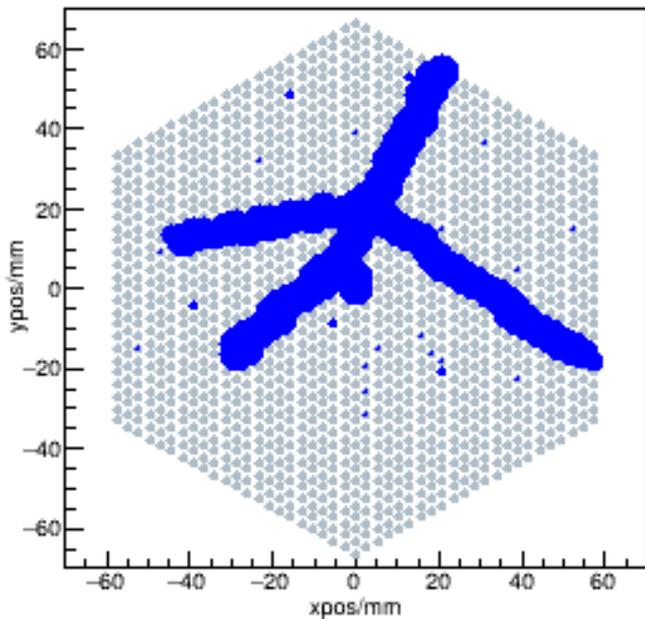


- CSNS反角白光中子源：国内首条宽能区强流白光中子束线
- 覆盖能区：热中子~300MeV，流强：~10⁷/cm²/s
- 中子核数据测量研究：
 - 裂变截面
 - 全截面测量
 - 轻带电粒子出射反应截面测量
 - 中子俘获反应截面测量

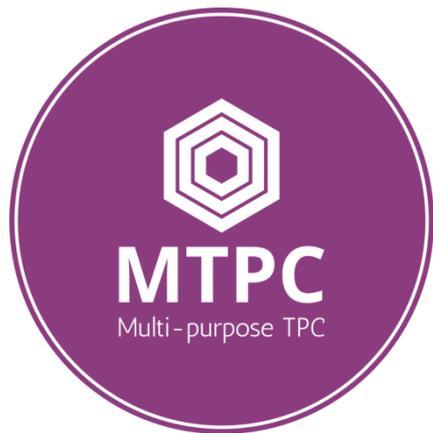
MTPC构想

- 如何测量复杂中子核反应?
- 需要高空间分辨、大立体角、复杂反应道测量能力的探测器系统
- 提出多用途时间投影室(Multi-purpose TPC)解决方案

Event track display in x-y plane.



项目概况

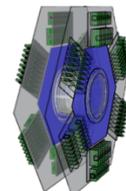


2019年8月：
探测器设计加工



2021年1月：
完成专用电子学
系统研制和测试

2021年4月：
模拟与数据分析程
序框架开发



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：
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

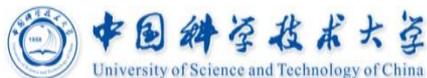
2021年2月：
开展专用电子学和探
测器联合束流测试



2022年3月：
完成v2版本DAQ及
在线显示开发



2023年2月：
开展首个物理实验



报告内容

- 项目概况
- 探测器系统研究进展
- 数据分析进展
- 工作规划



● 探测器系统

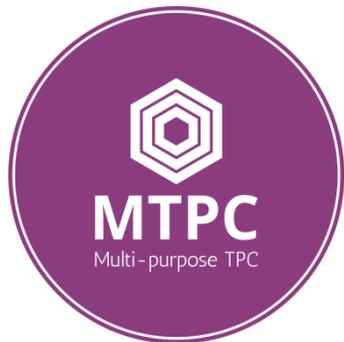
- 阳极读出板、电场笼、气室腔体、气路系统、读出电子学、数据获取

● 程序框架

- 模拟程序框架、模拟程序物理模型、分析程序框架、数据结构

● 测试方法

- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线



● 探测器系统

- 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

● 程序框架

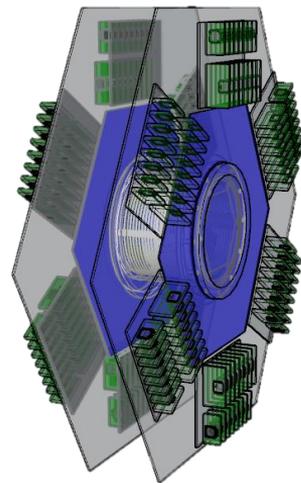
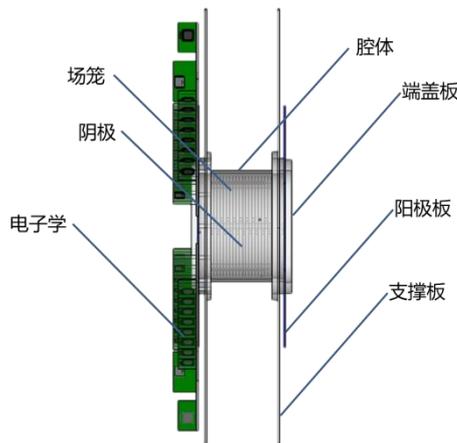
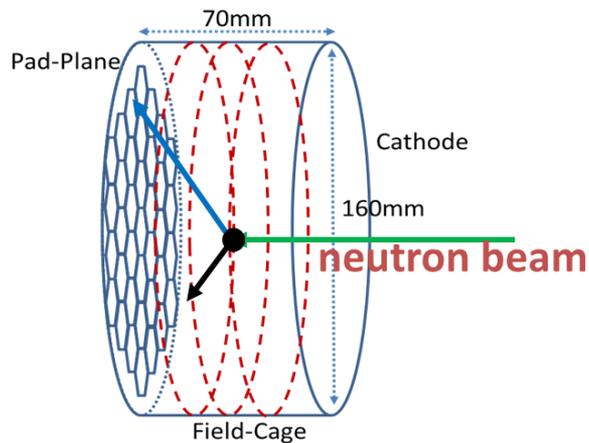
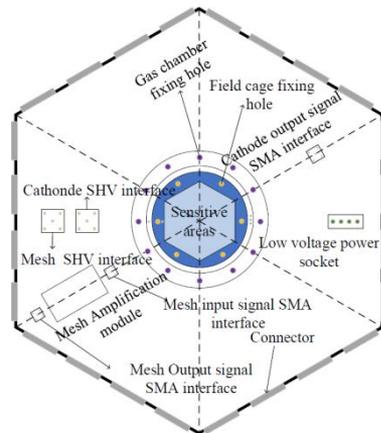
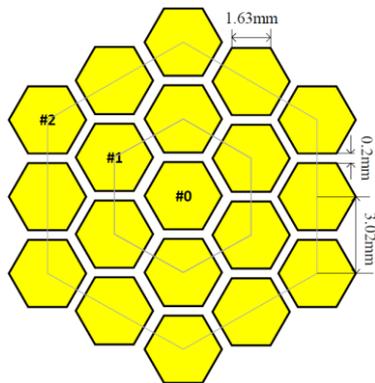
- 模拟程序框架、模拟程序物理模型、分析程序框架、数据结构

● 实验方法体系

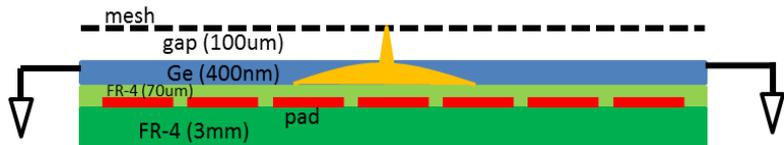
- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线

探测器结构

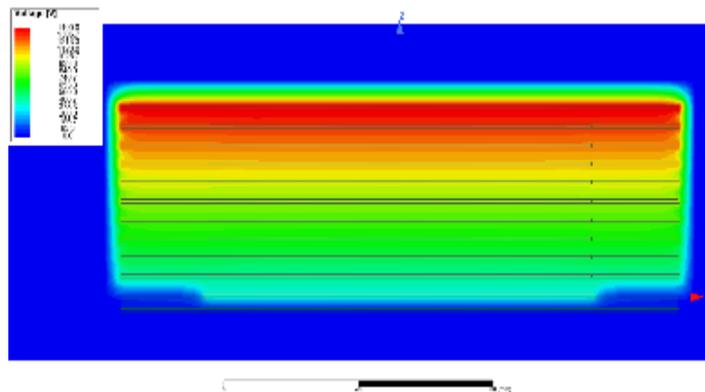
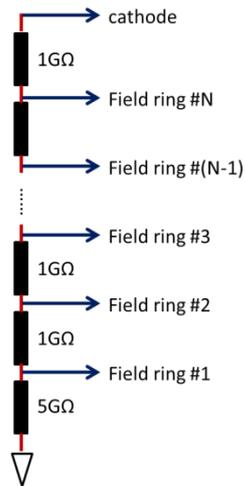
- 场笼结构为圆柱体
- 漂移区距离可调，适应不同实验需求
- 电子增益结构采用Micromegas
- 读出阵列采用六边形密堆结构
- 1519个阳极pad，每个pad边长64mil，阳极区边长约68mm



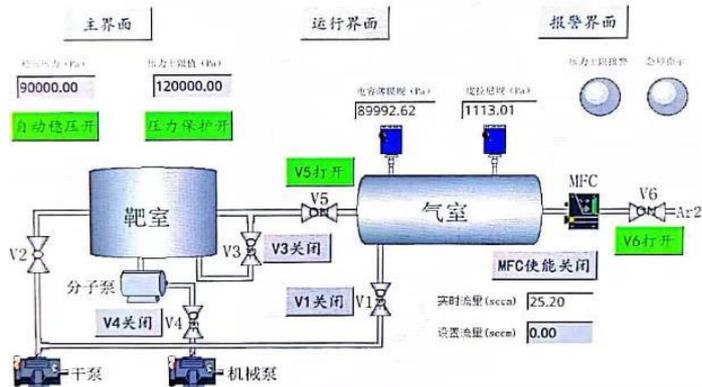
探测器结构



- 阳极板表面镀400nm高阻锗层，增加高压下的稳定性
- 热压接技术制作Micromegas增益结构@USTC;
- mesh参数: 不锈钢丝直径16 μ m、厚度25 μ m、LPI-400
- 透过率55%、张力30N;
- 增益区厚度100 μ m，支撑柱直径1mm，间隔10mm
- 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
- 电阻值按照雪崩漂移场强比200配置，对应最佳电子透过率



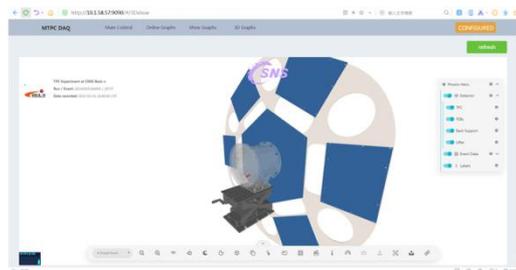
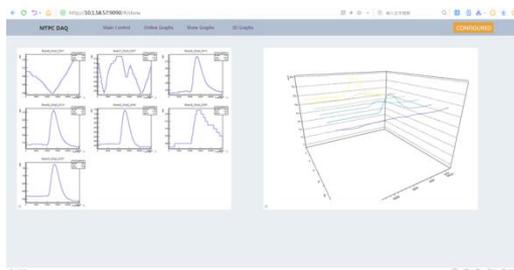
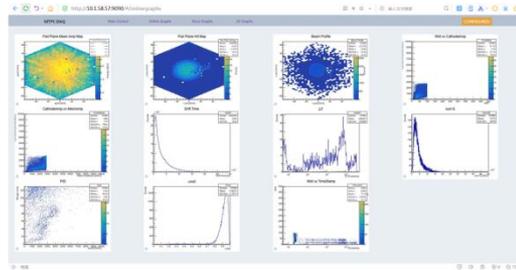
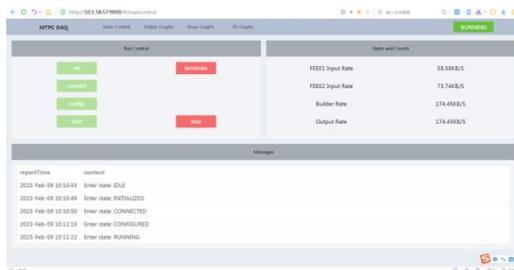
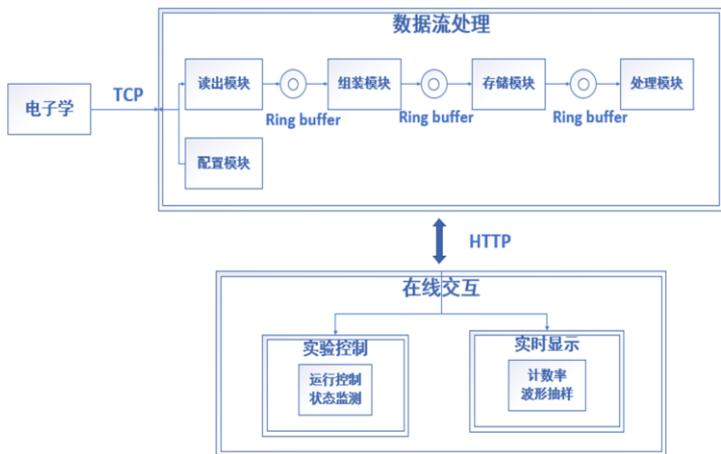
气压气路系统



- 可设定气压值 (0~5atm) , 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



DAQ软件和在线显示



数据处理软件 (DAQ 核心)

负责承载与数据流相关的工作：
数据的接收、组装、存储和处理



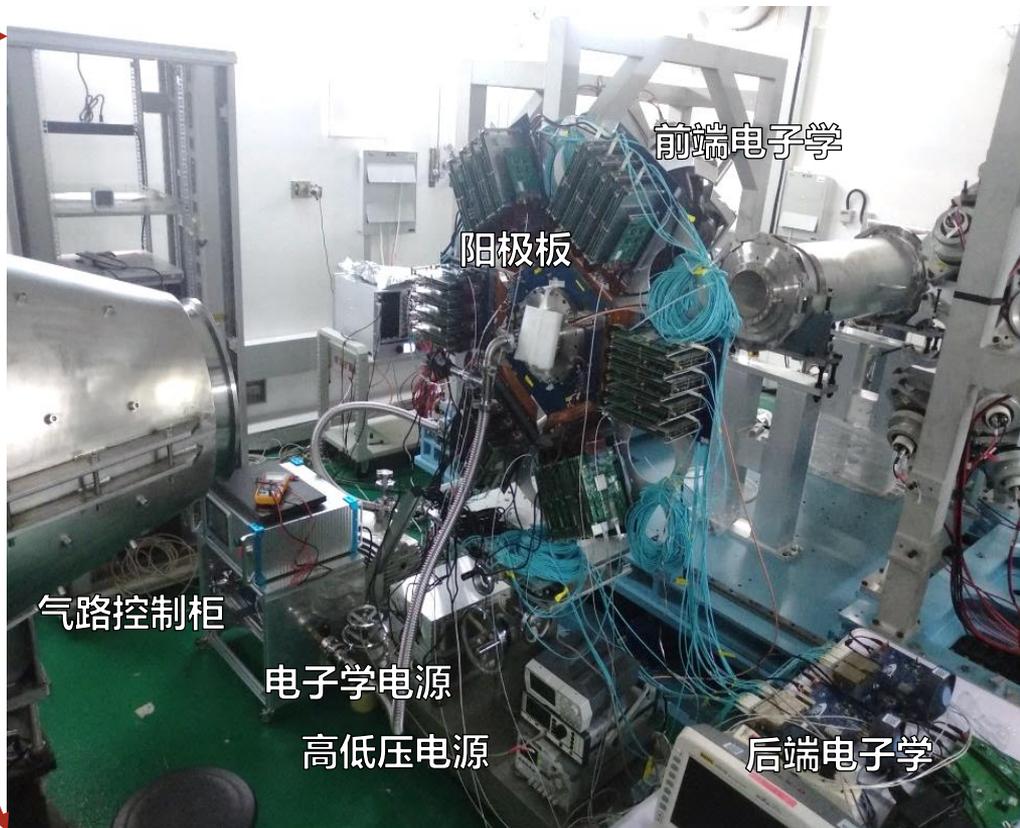
在线交互软件

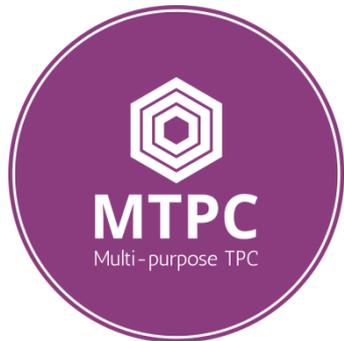
向上提供用户服务：执行、反馈
向下与数据流子系统信息传递

MTPC探测器系统束流测试



- 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：1mmGd-6cmPb- ϕ 12- ϕ 15- ϕ 40





● 探测器系统

- 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

● 程序框架

- 模拟程序框架、模拟程序物理模型、分析程序框架、数据结构

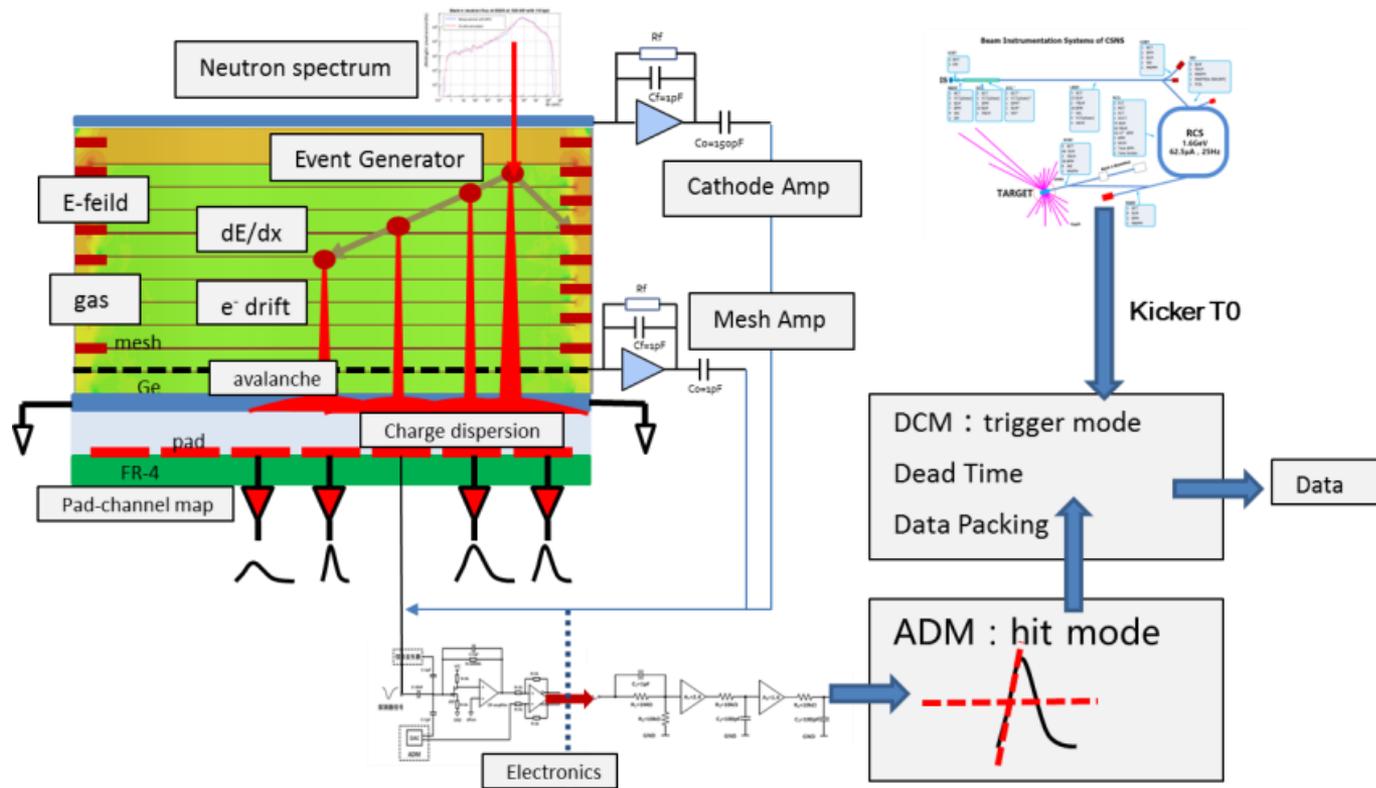
● 实验方法体系

- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线

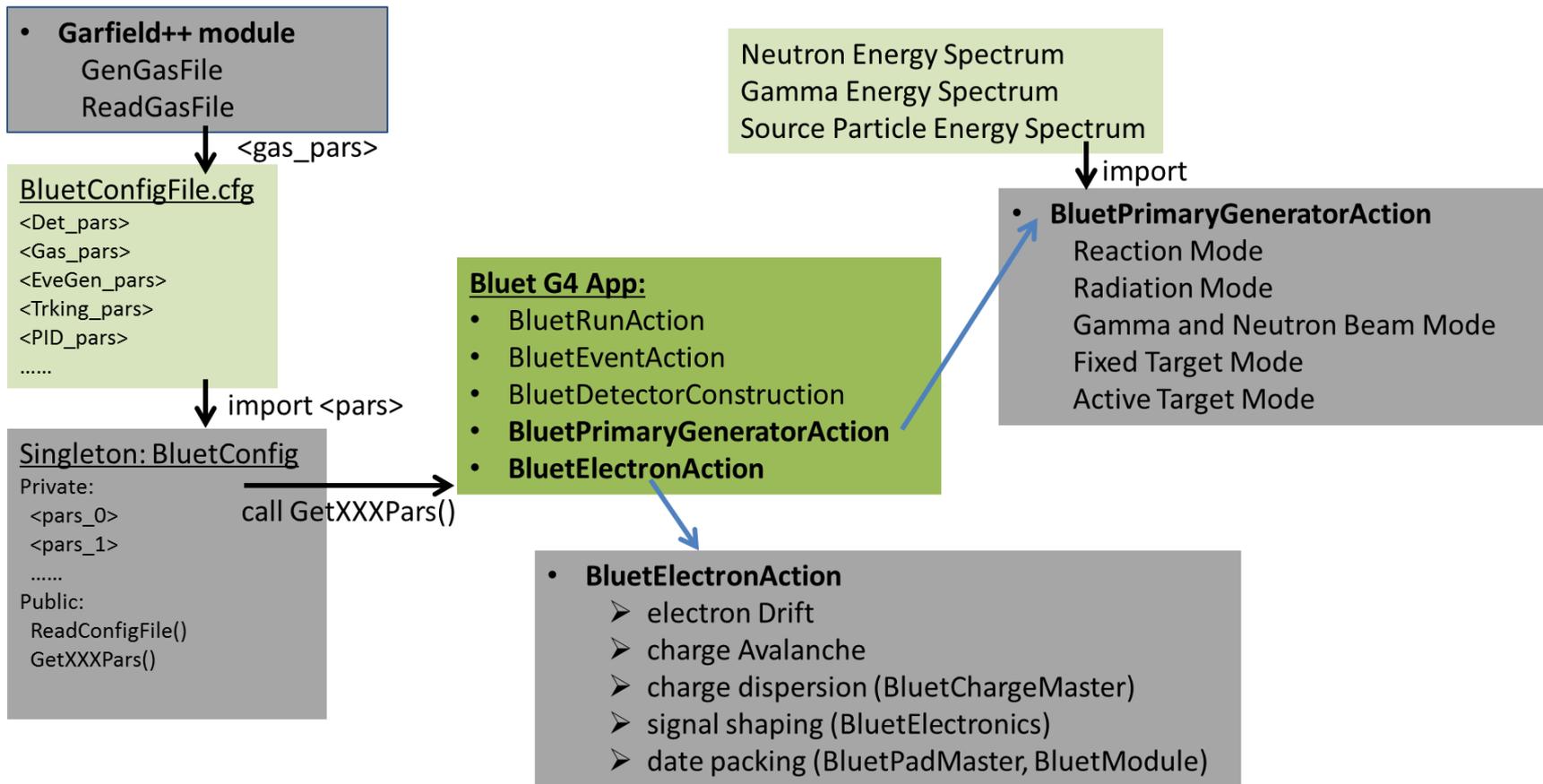
模拟框架

● 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



模拟框架



分析程序框架

BluetConfigFile.cfg

```
<Det_pars>
<Gas_pars>
<EveGen_pars>
<Trking_pars>
<PID_pars>
.....
```

import <pars> call GetXXXPars()

Singleton: BluetConfig

```
Private:
<pars_0>
<pars_1>
.....
Public:
ReadConfigFile()
GetXXXPars()
```

call GetXXXPars()

Bluet Analysis App:

```
GenThreshold
Raw2Root
DrawEvent
BluetMap
BluetFactory
BluetLab
```

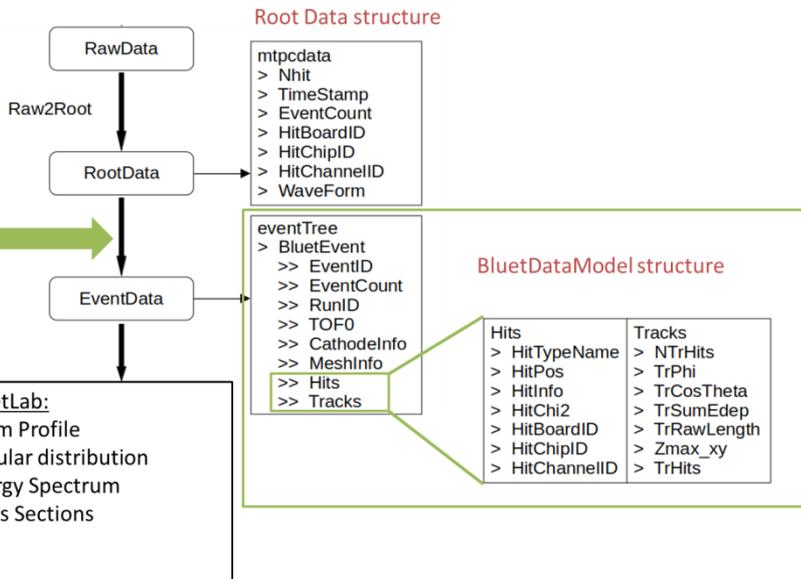
declared in app

Bluet Classes:

- BluetPointCloud
- BluetSphere
- BluetVector3d
- BluetHough
- BluetHough3D
- BluetWaveFit
- BluetSNChecker
- BluetPadMaster
- BluetWaveformMasterer
- BluetTrackMast

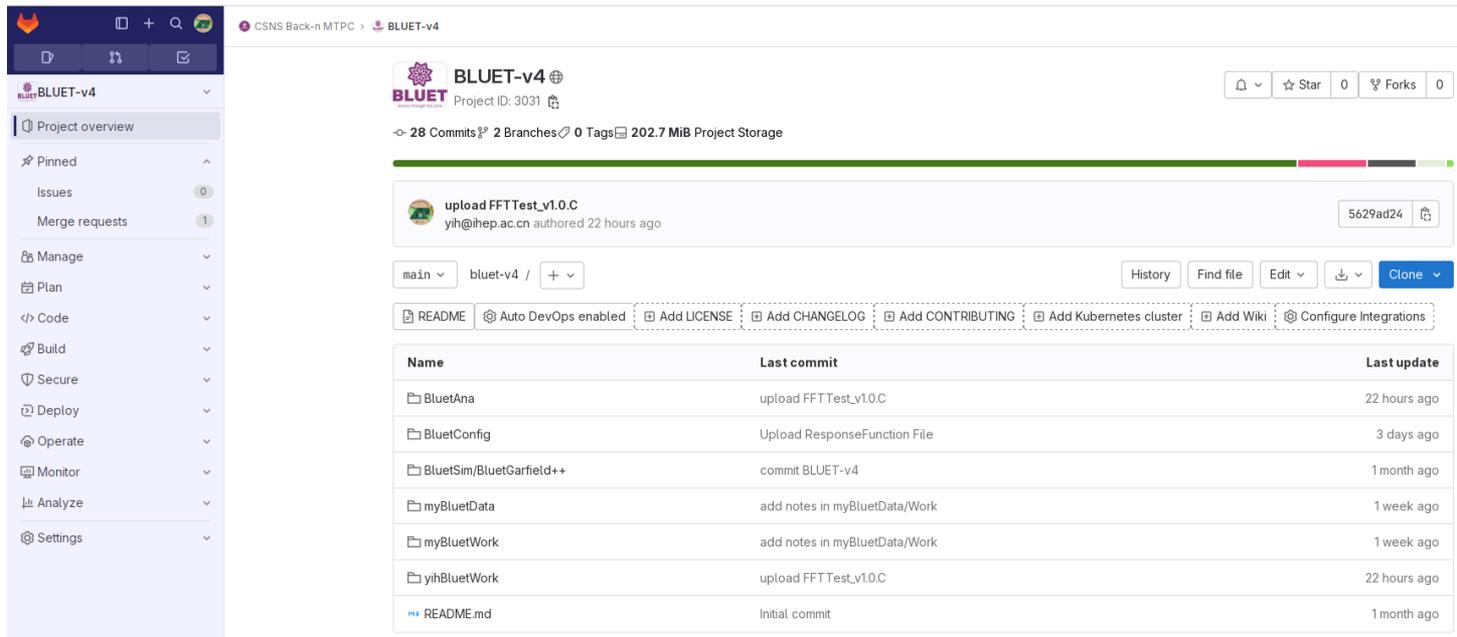
```
BluetFactory:
BluetWaveMaster
BluetTrackMaster
```

```
BluetLab:
Beam Profile
Angular distribution
Energy Spectrum
Cross Sections
... ..
```



BLUET模拟和分析程序库

- 针对MTPC的模拟和分析，开发了模拟和分析程序框架BLUET
- <https://code.ihep.ac.cn/csns-backn-tpc>
- 正在开发v5版本框架



CSNS Back-n MTPC > BLUET-v4

BLUET-v4 Project ID: 3031

28 Commits 2 Branches 0 Tags 202.7 MiB Project Storage

upload FFTTest_v1.0.C
yih@ihep.ac.cn authored 22 hours ago

main bluet-v4 / +

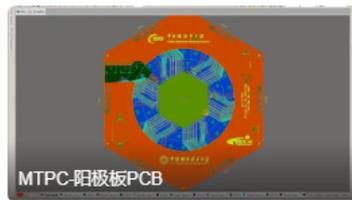
History Find file Edit Download Clone

README Auto DevOps enabled Add LICENSE Add CHANGELOG Add CONTRIBUTING Add Kubernetes cluster Add Wiki Configure Integrations

Name	Last commit	Last update
BluetAna	upload FFTTest_v1.0.C	22 hours ago
BluetConfig	Upload ResponseFunction File	3 days ago
BluetSim/BluetGarfield++	commit BLUET-v4	1 month ago
myBluetData	add notes in myBluetData/Work	1 week ago
myBluetWork	add notes in myBluetData/Work	1 week ago
yihBluetWork	upload FFTTest_v1.0.C	22 hours ago
README.md	Initial commit	1 month ago

MTPC&BLUET在线教程

- MTPC作为公开实验平台对各用户开放
- 为便于用户了解装置和学习实验方法，制作了在线教程@bilibili



从 00:18 开始分享

获取视频分享链接



手机扫码观看/分享



主页 动态 投稿 50 合集和列表 7 收藏 0 订阅 设置 搜索视频、动态

关注数 1 粉丝数 2465 获赞数 2084 硬币数 8万

我的合集和视频列表 > 合集时间投影室MTPC

播放全部

合集 | 17个视频 | 9-5更新

默认排序 升序排序

编辑



主页 动态 投稿 50 合集和列表 7 收藏 0 订阅 设置 搜索视频、动态

关注数 1 粉丝数 2465 获赞数 2084 硬币数 8万

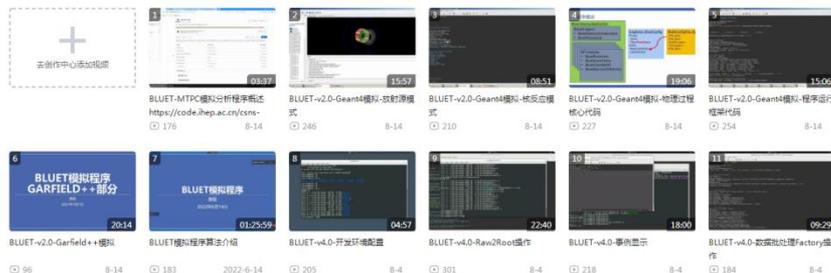
我的合集和视频列表 > 合集时间投影室TPC模拟分析程序-BLUET教程

播放全部

合集 | 13个视频 | 8-14更新

默认排序 升序排序

编辑





● 探测器系统

- 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

● 程序框架

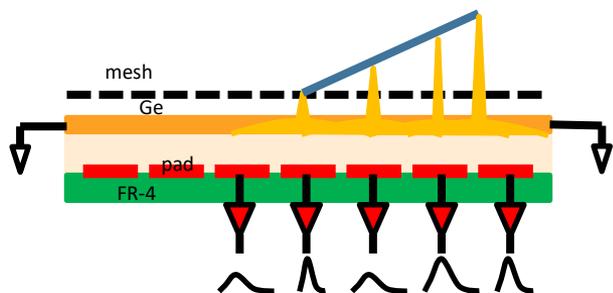
- 模拟程序框架、模拟程序物理模型、分析程序框架、数据结构

● 实验方法体系

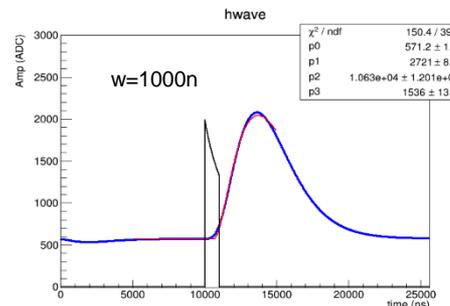
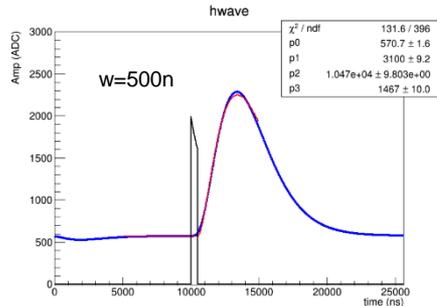
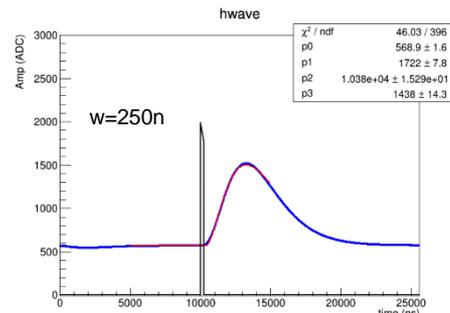
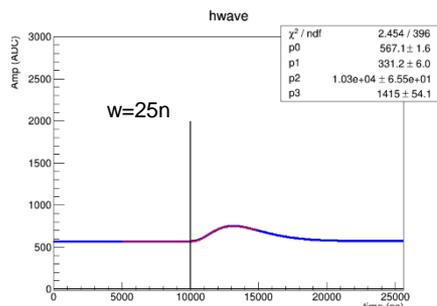
- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线

波形拟合

- 电子学传递函数等效表达式: $f(t) = B + A \left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)^n e^{-(t-t_0)/\tau}$
- 此表达式是输入信号为 δ 函数的输出响应波形, 不同角度径迹的原始信号宽度不一致, 实际波形偏离函数形式
- 采用模拟信号对拟合进行研究, 模拟输入信号为倒数下降波形, 信号起始点为10000ns
- 设定 $n=2$ 进行拟合, 随着原始波形宽度的增加, 拟合的定时点会延后

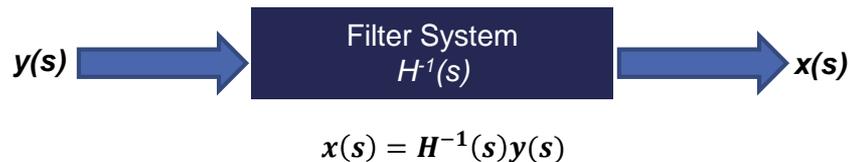


w(ns)	25	250	500	1000
t0(ns)	10300	10380	10470	10630

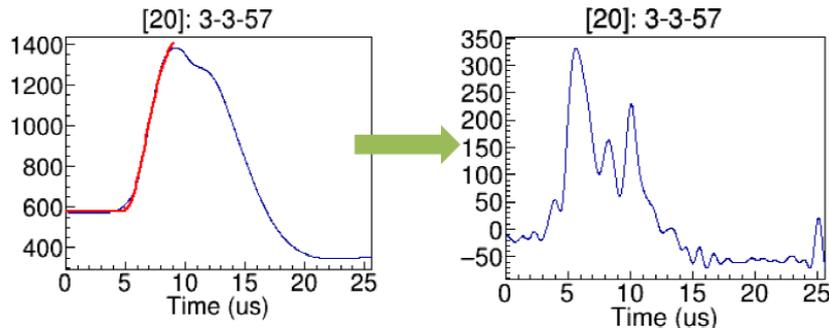
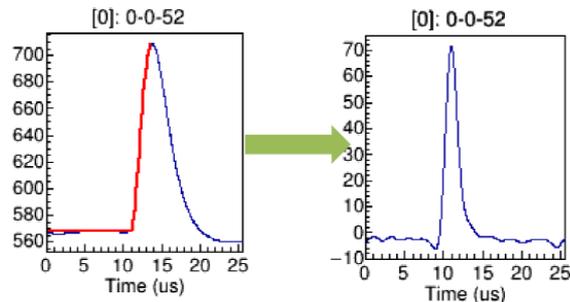
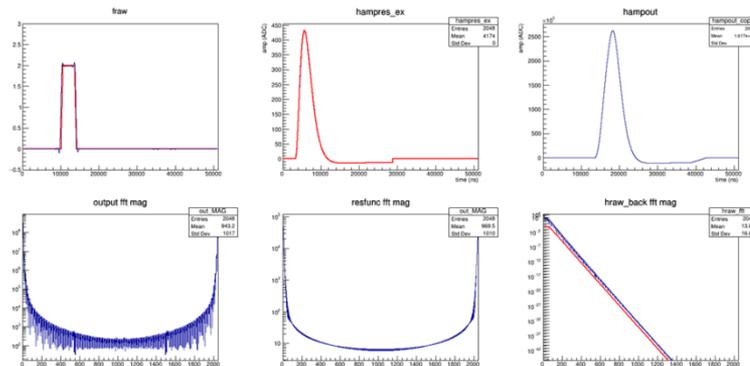


波形反演

- 采样快速傅里叶变换方法 (FFT) 对波形进行反演重建
- 提高时间分辨率和多事例分辨能力



方波算法测试



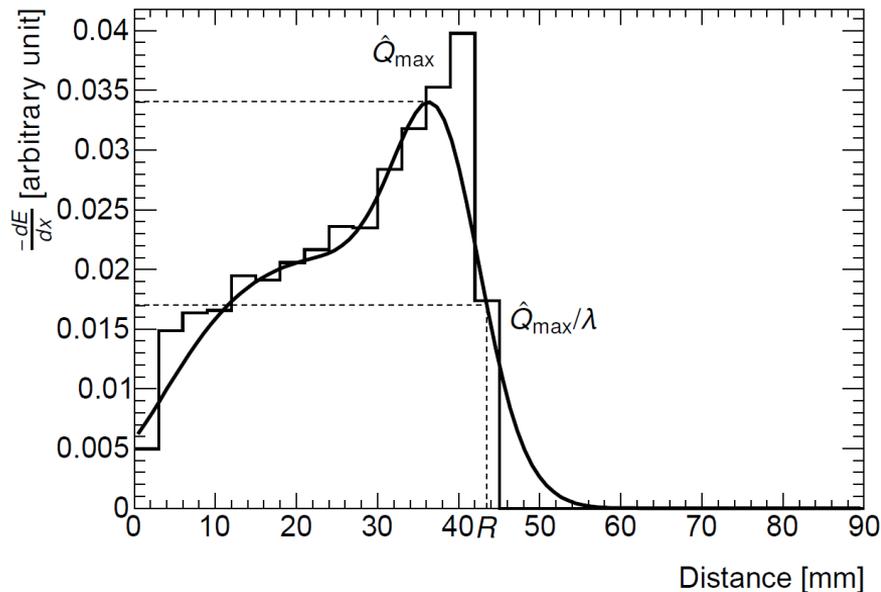
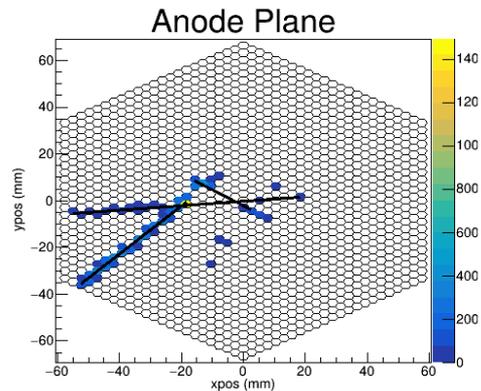
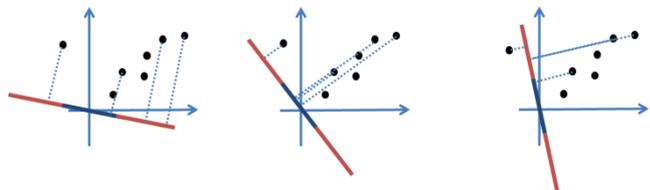
径迹重建

● 径迹查找：

- 在Hough空间中找到最大值，落在最大值bin内的点认为属于一条直线；

● 径迹长度：

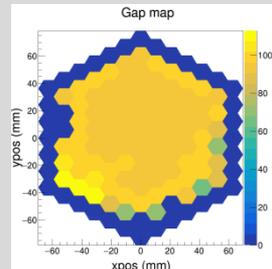
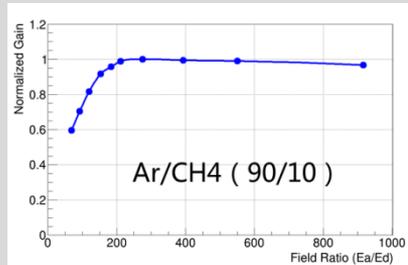
- 将重建之后的数据径迹的点火pad向径迹方向投影，得到沿径迹方向的dE/dx分布
- 使用KDE算法对dE/dx分布进行平滑
- 取径迹起点至 \hat{Q}_{\max}/λ 对应点位粒子射程， $\lambda=2$



探测器测试

● x射线放射源测试:

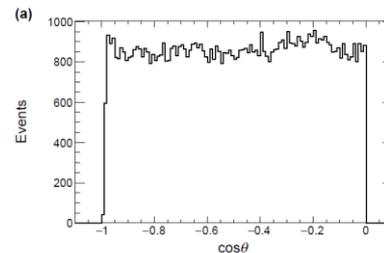
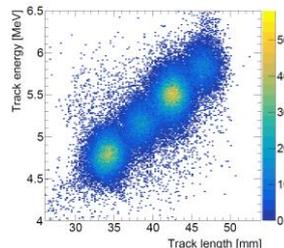
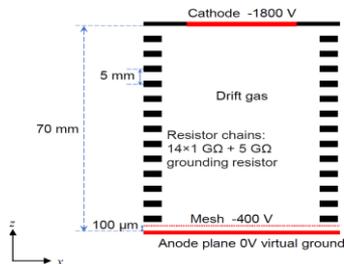
- 透过率曲线
- 增益曲线
- gap均匀性



详见TPC分会场: 吕游《MTPC的雪崩放大气隙刻度》

● α 放射源测试:

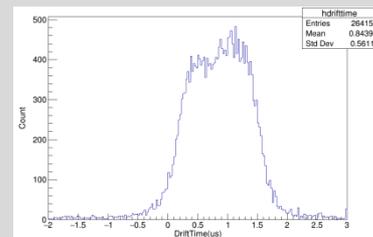
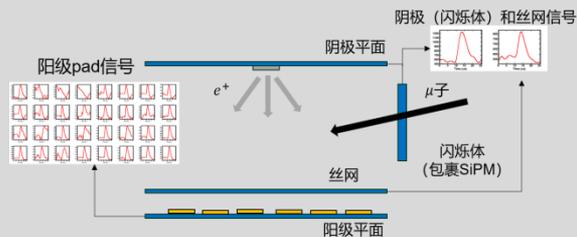
- 能量射程分辨
- 漂移速度
- 角分布



详见TPC分会场: 李祥《Performance Study of the Multipurpose Time Projection Chamber (MTPC) Using a Four-Component Alpha Source》

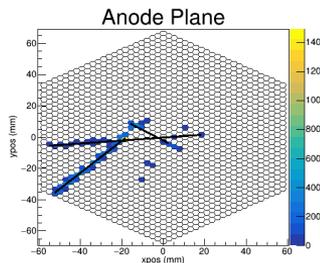
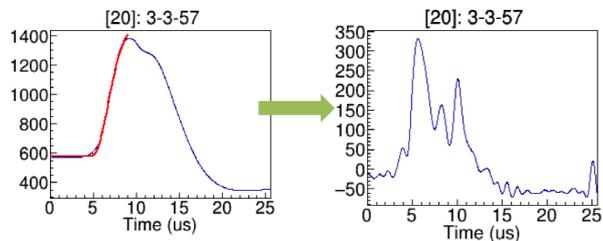
● 宇宙线测试:

- 漂移时间分布
- 空间分辨
- 电场均匀性

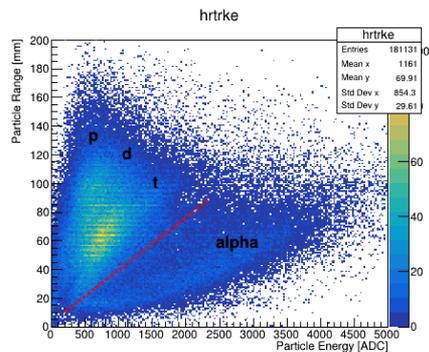


分析难点:

- 多事例叠加波形分析、径迹重建、事例重组
- 白光中子源高能区流强高，易造成多事例波形叠加，增加分析难度



- 粒子鉴别
- E-L关联无法有效鉴别高能区同位素原子核

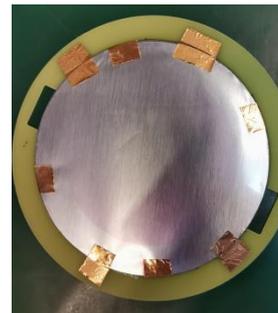
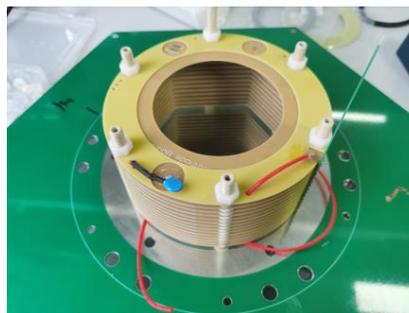
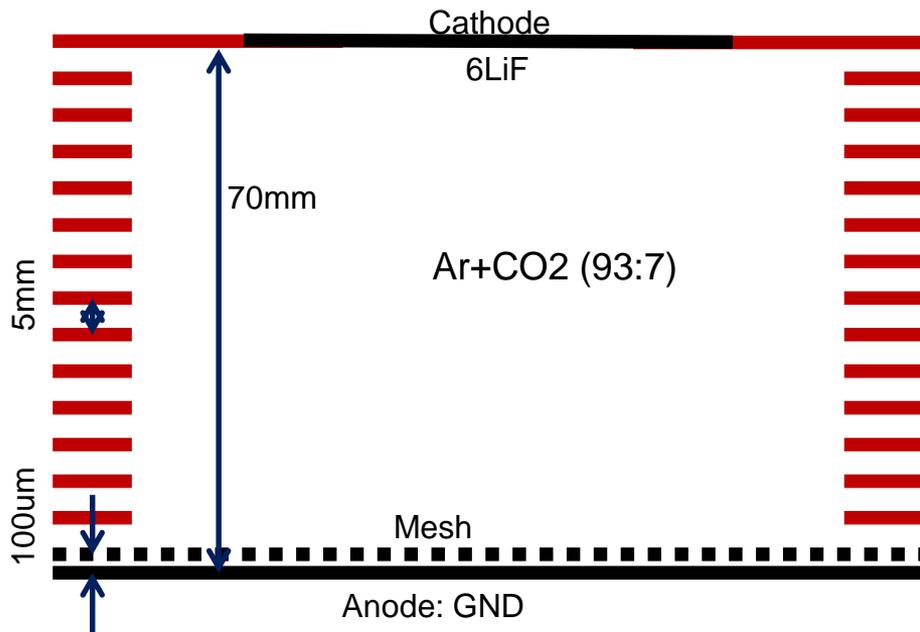


报告内容

- 项目概况
- 探测器系统研究进展
- 数据分析进展及问题**
- 工作规划

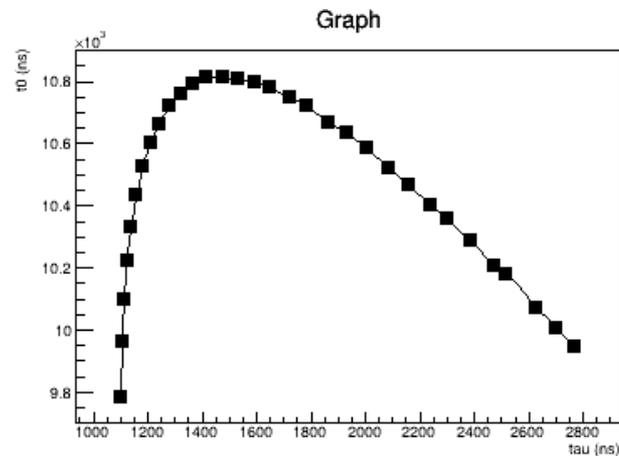
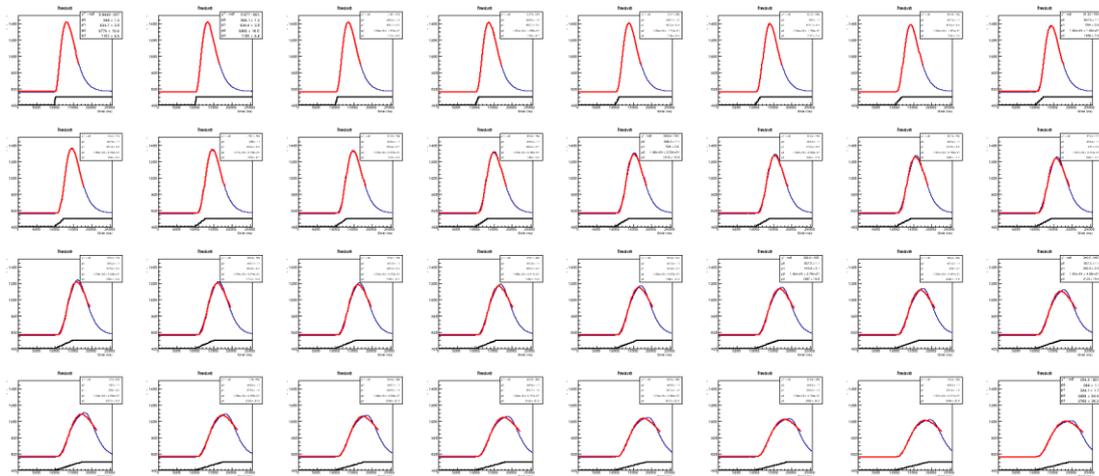
束流实验配置

- 2023年2月束流实验:
- 漂移区距离70mm, 阴极中心放置6LiF样品
- 样品参数:
 - 厚度560nm
 - 6Li丰度95%
 - 6LiF面密度148ug/cm²、直径66mm
 - Al衬直径89mm、厚度10.8um
- 工作高压:
 - 0.9bar: V_{mesh}=-400V, V_{cathode}=-1800V
 - 0.5bar: V_{mesh}=-300V, V_{cathode}=-1350V
- 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-φ12-φ15-φ40组合
- 0.9bar气压: 针对氚粒子进行测量 (133h)
- 0.5bar气压: 针对α粒子进行测量 (143h)



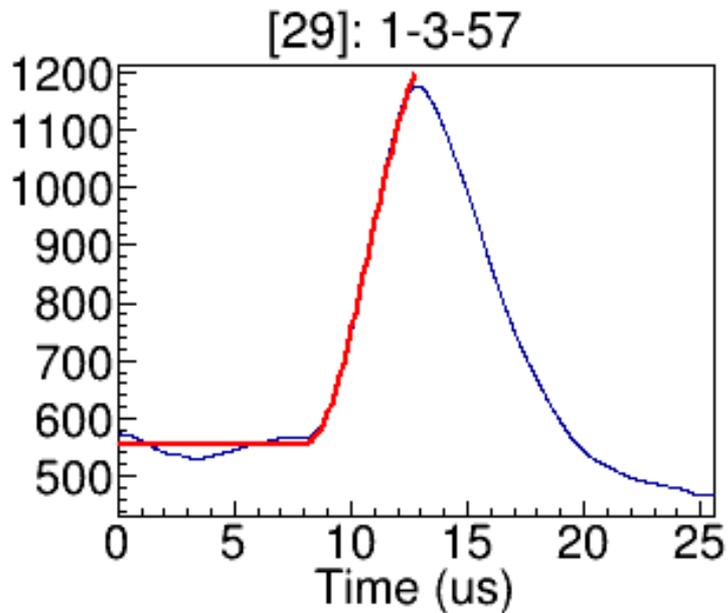
波形拟合研究

- 波形函数 $f(t) = B + A \left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)^3 e^{-(t-t_0)/\tau}$
- 通过模拟波形拟合，研究原始脉冲宽度对波形定时的影响
- 原始信号时间点为10000ns，拟合定时点随tau值变化



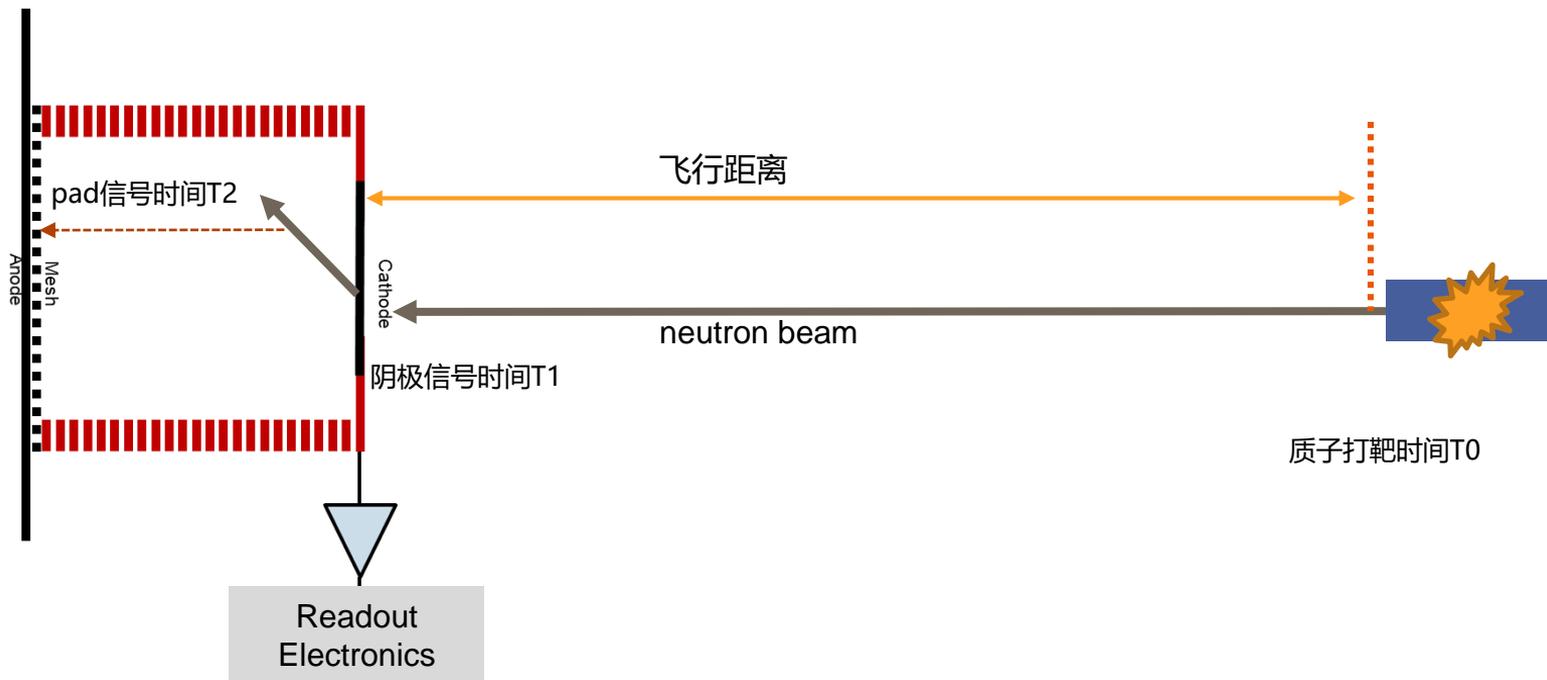
波形研究

- 重新设置第2轮拟合区间终点为信号峰值点,
- 减少信号后沿对定时点的影响, 提高拟合精度
- 为进一步提高定时精度, 将采用波形反演算法



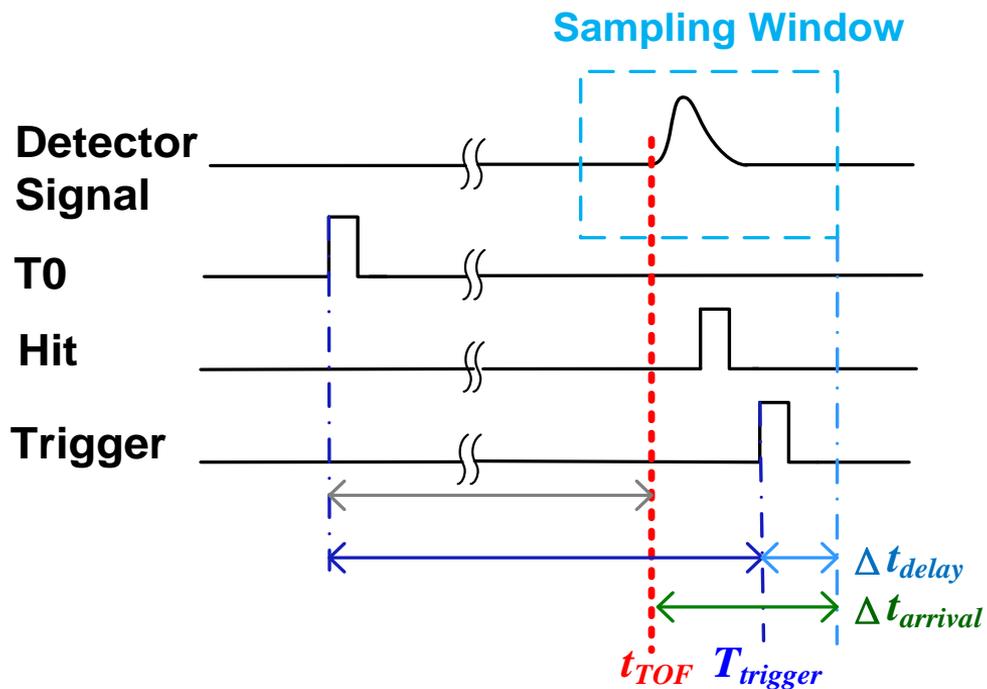
中子TOF实验测量

- 通过阴极信号测量中子TOF
- $TOF = T1 - T0$



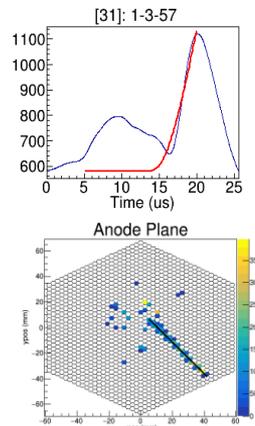
中子TOF实验测量

- 电子学触发方式

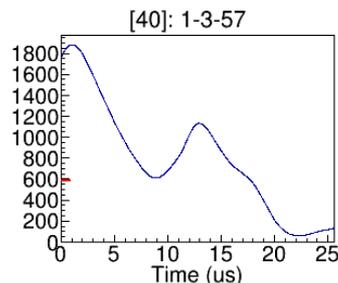
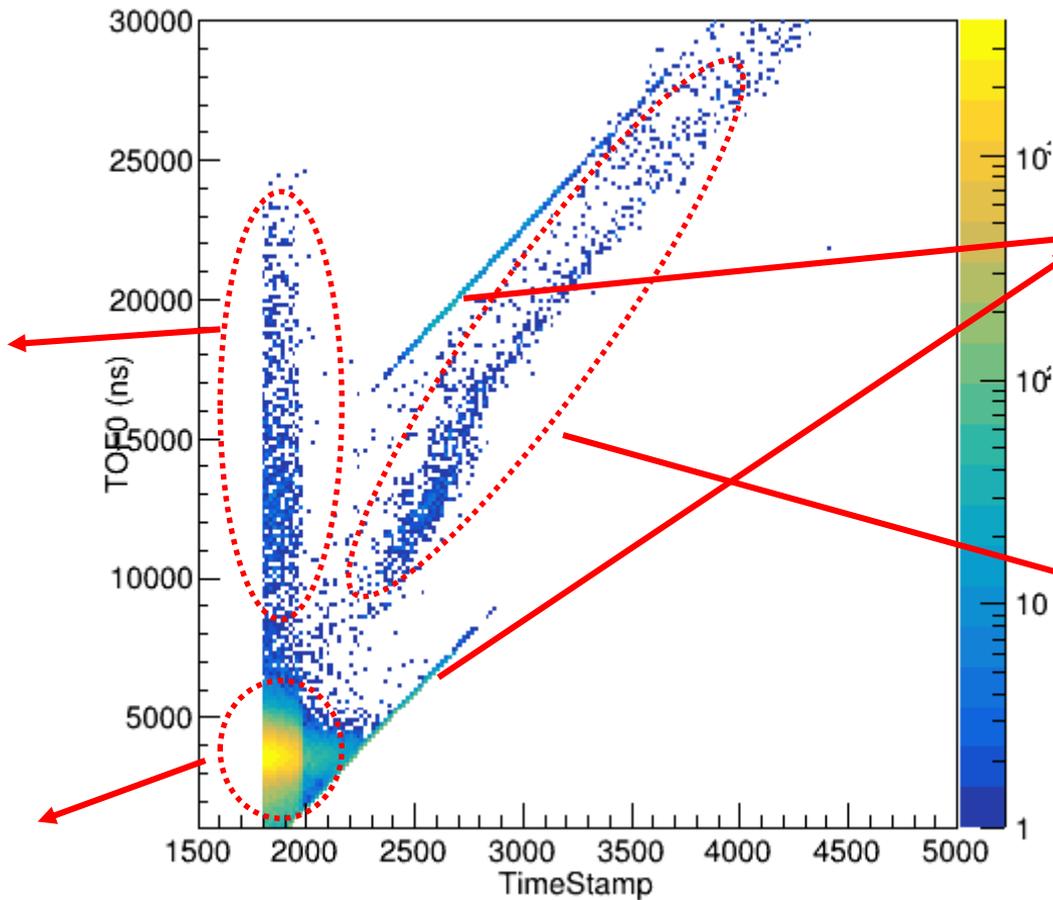
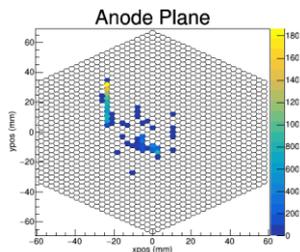


事例筛选

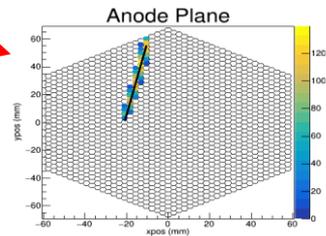
高能区触发事例



高能区事例



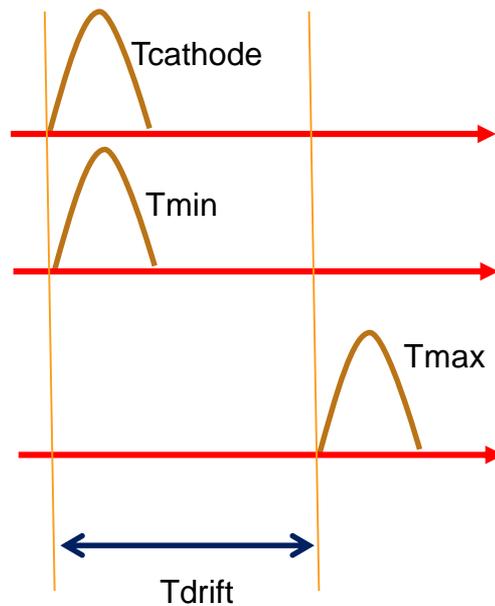
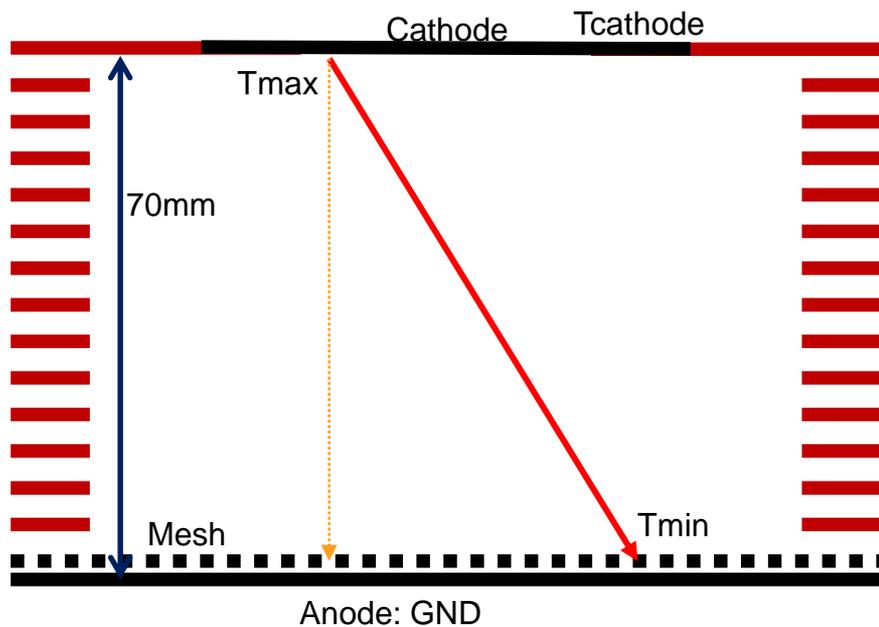
拟合发散事例



单径迹事例

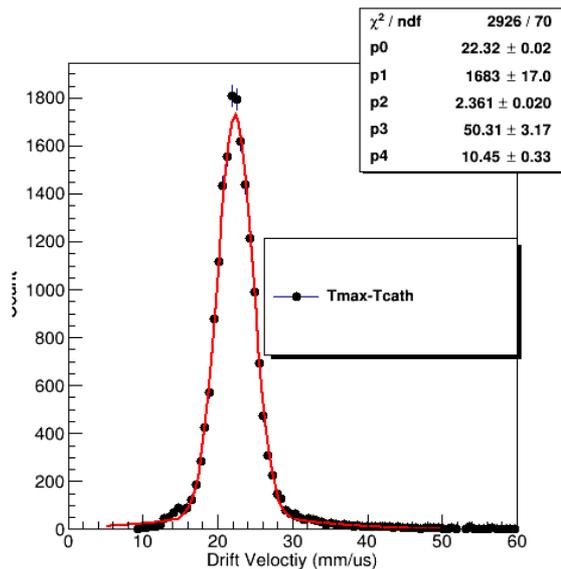
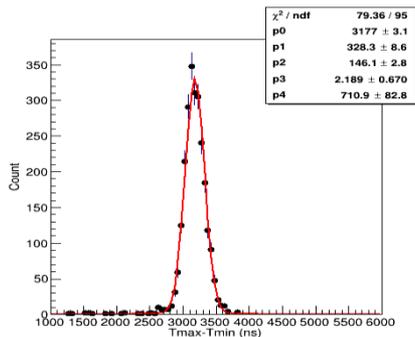
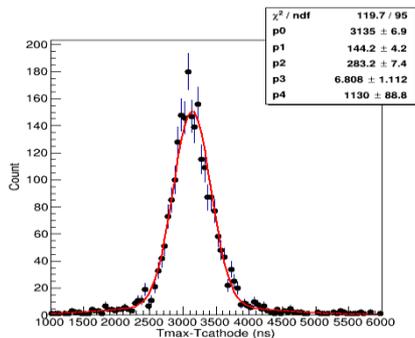
漂移时间

- 选取TOF > 10000的单径迹事例进行分析



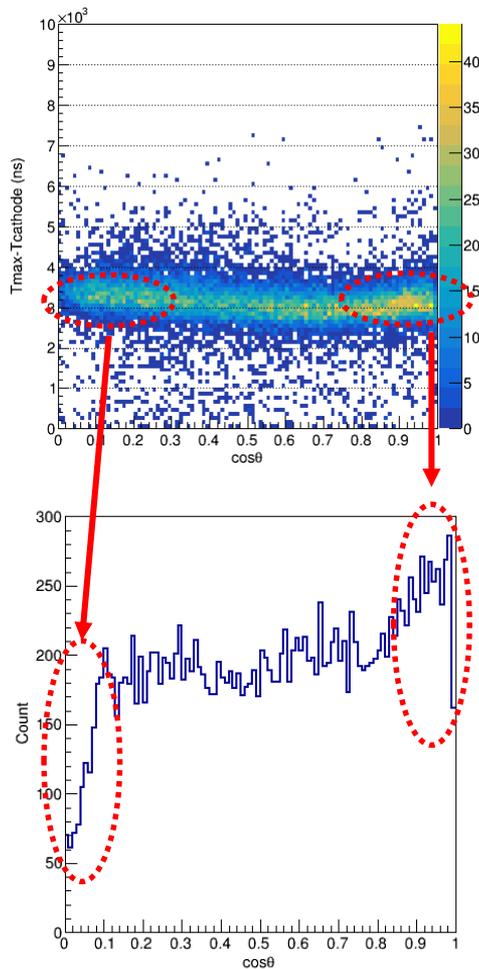
漂移时间

- 分别统计(Tmax-Tcathode)和(Tmax-Tmin)分布
- 两者峰值接近，阴极定时精度低，pad定时精度约100ns，阴极定时精度约265ns
- 漂移速度：22.3mm/us

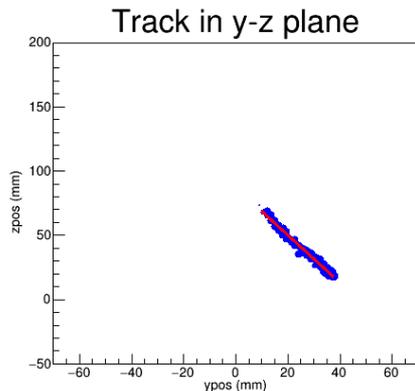
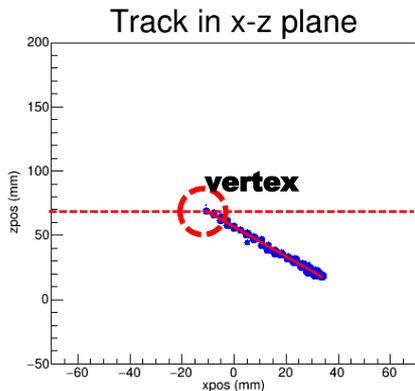
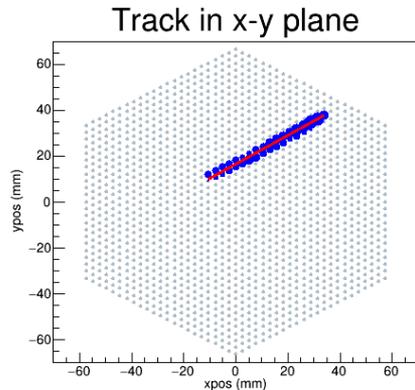
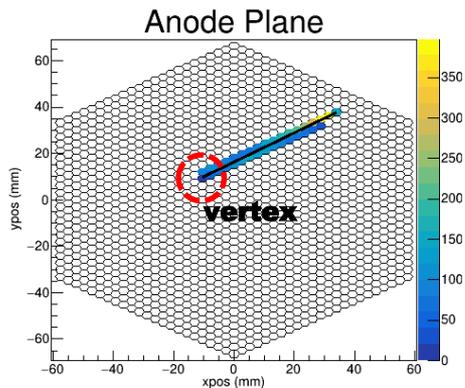


漂移时间

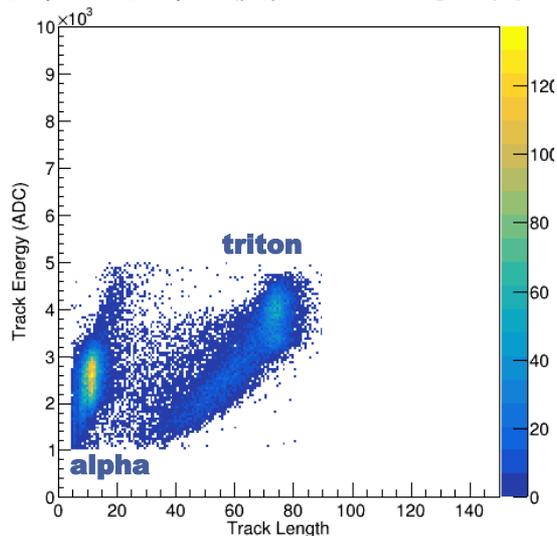
- $(T_{\max} - T_{\text{cathode}})$ 随 $\cos\theta$ 分布不完全水平, 在靠近0和1的区域有上翘
- 造成 $\cos\theta$ 分布在0和1区域不均匀
- 目前定时方法对波形仍有依赖关系, 需要继续更新



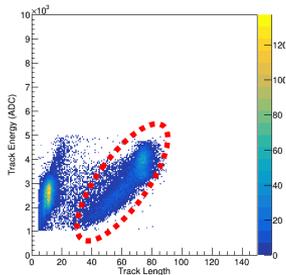
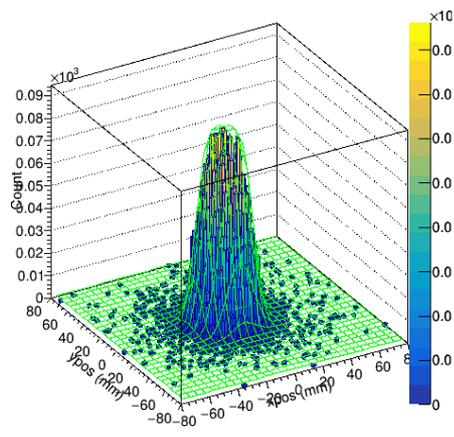
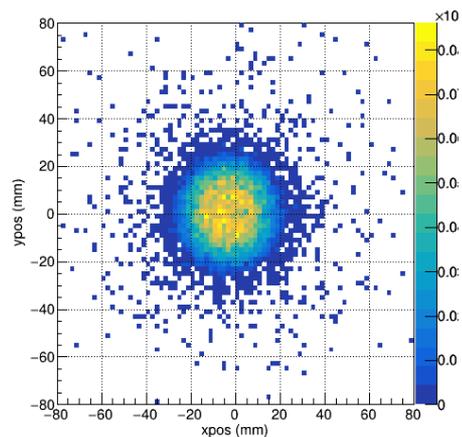
径迹和顶点重建



- 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



束斑分析

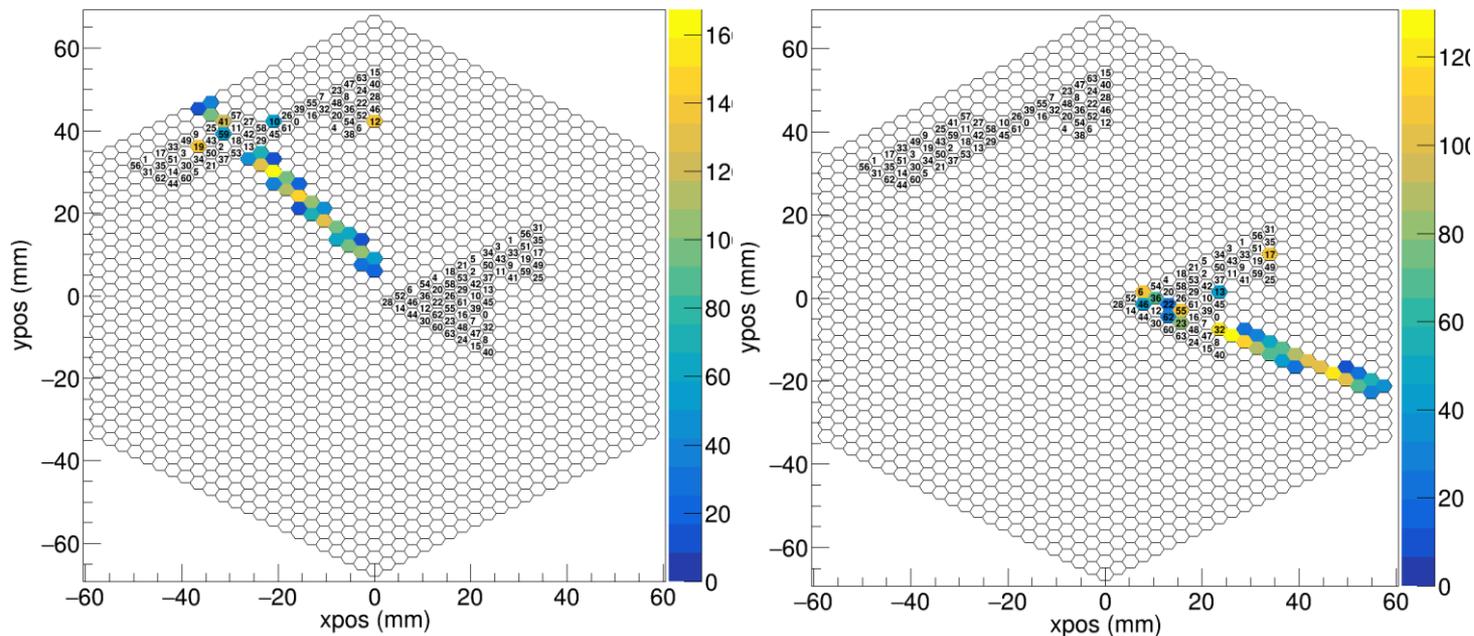


- 选择triton事例分析束斑
- 通过二维函数拟合束斑中心和半径
- Erf : 误差函数
- r_0 : 幅度50%处半径
- σ : 边缘分布方差

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

- 拟合结果:
- 中心(x_0, y_0): (-3.1mm, 0.6mm)
- r_0 : 17.7 ± 0.1 mm
- σ : 6mm
- 中心位置x方向偏心, 可能因为准直激光线偏心

电子学ID号问题

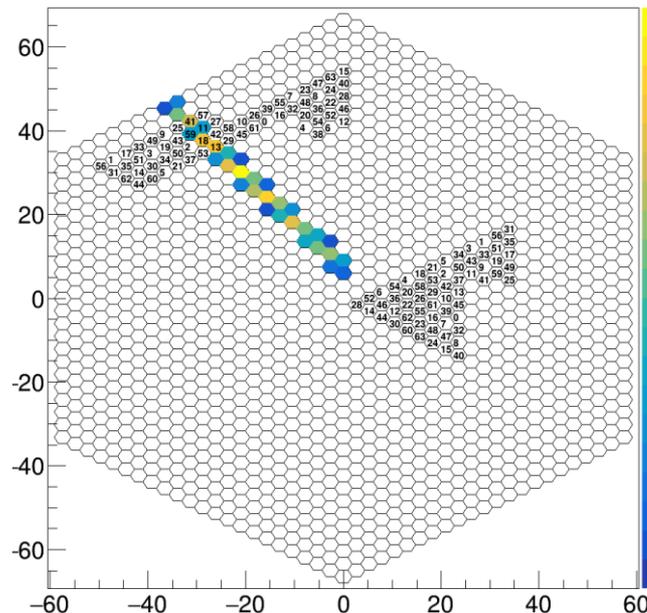


- 进行初步数据检查室，发现部分事例径迹不连续，电子学通道号和pad的空间坐标对应关系不正确
- 经过多次检查，确认根据PCB文件和电子学设计图做的map文件无误
- 对不连续径迹ID号全面检查，发现是2块ADC的输出通道ID号错位

电子学ID号问题

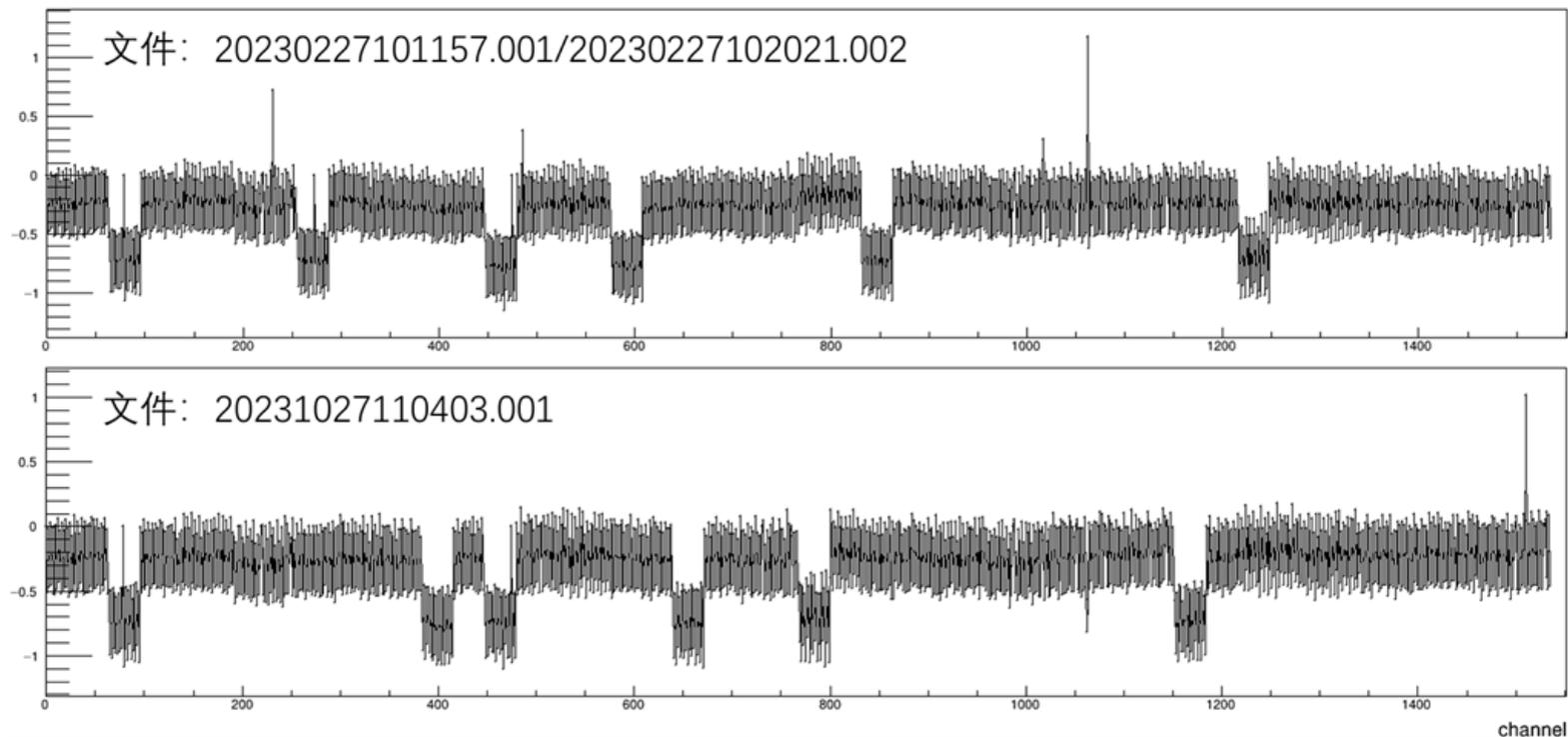
- 2块ADM的ADC芯片输出通道号成对颠倒，造成径迹不连续
- 在代码中将颠倒的ID号校正之后检查事例径迹正常
- 后续又单独多次测量，每次上电后之前有问题的芯片不一定出问题

统计1-3-ADM错位ID对		统计5-1-ADM错位ID对	
1	0	0	1
3	2	3	2
5	4	5	4
7	6	7	6
8	9	8	9
11	10	10	11
12	13	12	13
15	14	14	15
17	16	17	16
18	19	19	18
20	21	20	21
22	23	23	22
24	25	25	24
27	26	27	26
28	29	29	28
31	30	30	31



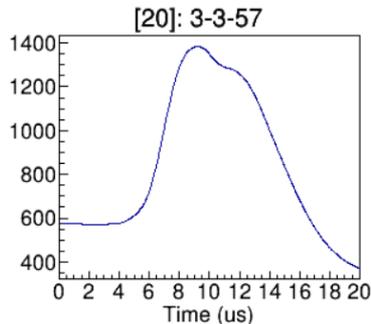
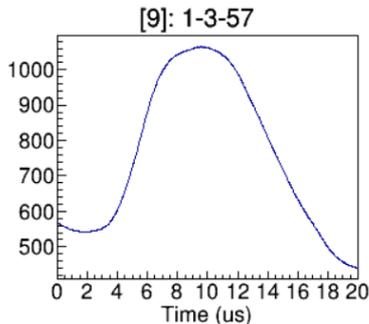
ADC芯片时间偏移问题

- 全通道时间偏差分析
- 上图为二月份数据 下图为10月份数据



电子学改进需求

- 在中子能量为1MeV以上的高能区，多个中子事例会在相近时间内到达，造成波形叠加
 - 阴极信号叠加导致采用常规方法难以对粒子的分析时间进行确定
 - 需要进行波形反演
-
- 当前波形信号较慢，主要受前放性能参数和FPGA数字成形时间限制，改进设想：
 - ❑ 取消FPGA中的数字成形部分，直接采集电荷前放原始波形，目前可实现
 - ❑ 后续电子学改进设计中，使用高带宽高摆率运放，提高信号前沿上升速度



Precision, Low Noise, CMOS, Rail-to-Rail, Input/Output Operational Amplifiers

Data Sheet

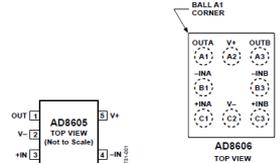
AD8605/AD8606/AD8608

FEATURES

Low offset voltage: 65 μ V maximum
 Low input bias currents: 1 pA maximum
 Low noise: 8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
 Wide bandwidth: 10 MHz
 High open-loop gain: 1000 V/mV
 Unity gain stable
 Single-supply operation: 2.7 V to 5.5 V
 5-ball WLCSP for single (AD8605) and 8-ball WLCSP for dual (AD8606)

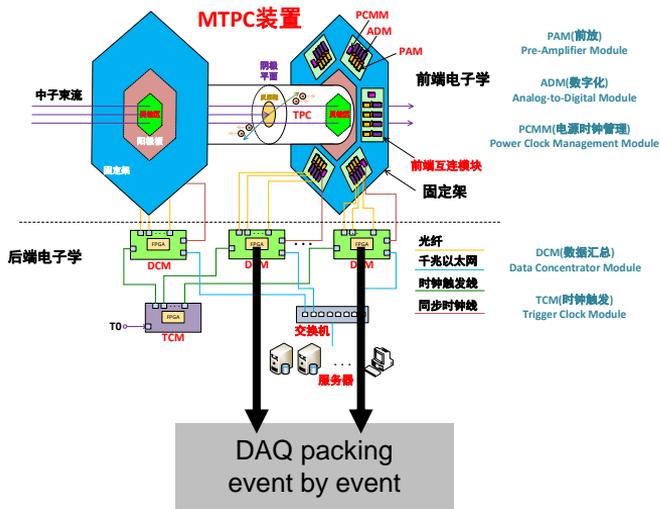
APPLICATIONS

PIN CONFIGURATIONS



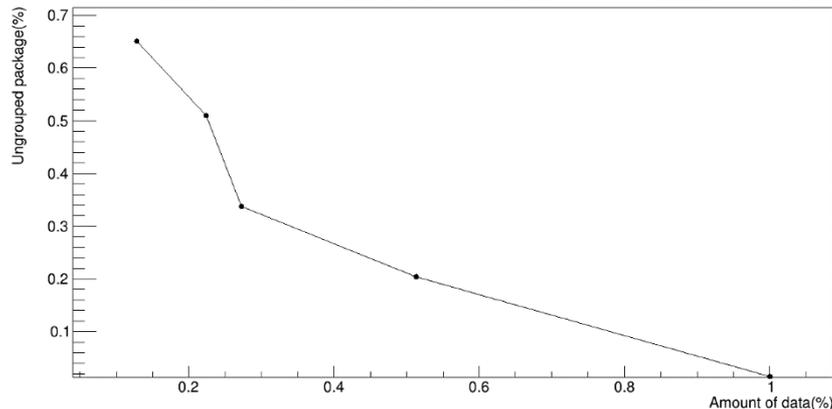
DYNAMIC PERFORMANCE					
Slew Rate	SR	$R_L = 2 \text{ k}\Omega, C_L = 16 \text{ pF}$	5		V/ μ s
Settling Time	t_s	To 0.01%, 0V to 2V step, $A_v = 1$	<1		μ s
Unity Gain Bandwidth Product	GBP		10		MHz
Phase Margin	Φ_m		65		Degrees

DAQ在线组包问题



通道3频率	通道1频率	通道3计数率	通道1计数率	计数率比	事件数	未组包数	未组包率
10Hz	10Hz	1352.6	1352.74	1.000104	3252	50	0.015375
10Hz	5Hz	1334.57	685.25	0.513461	3679	752	0.204403
10Hz	2.5Hz	1334.56	364.81	0.273356	4054	1372	0.338431
10Hz	2Hz	1334.61	299.78	0.22462	3468	1769	0.510092
10Hz	1Hz	1334.61	171	0.128127	4081	2656	0.650821

- 使用#1和#3象限电子学进行测试
- 分别给两个象限模块输入不同频率测试信号
- 测试未组包率随计数率比值变化
- 通过提高DAQ缓存和超时阈值，降低提高组包率
- 实验中计数率比值接近1，可离线进行再组包



报告内容

- 项目概况
- 探测器系统研究进展
- 数据分析进展及问题
- 工作规划**

研究目标

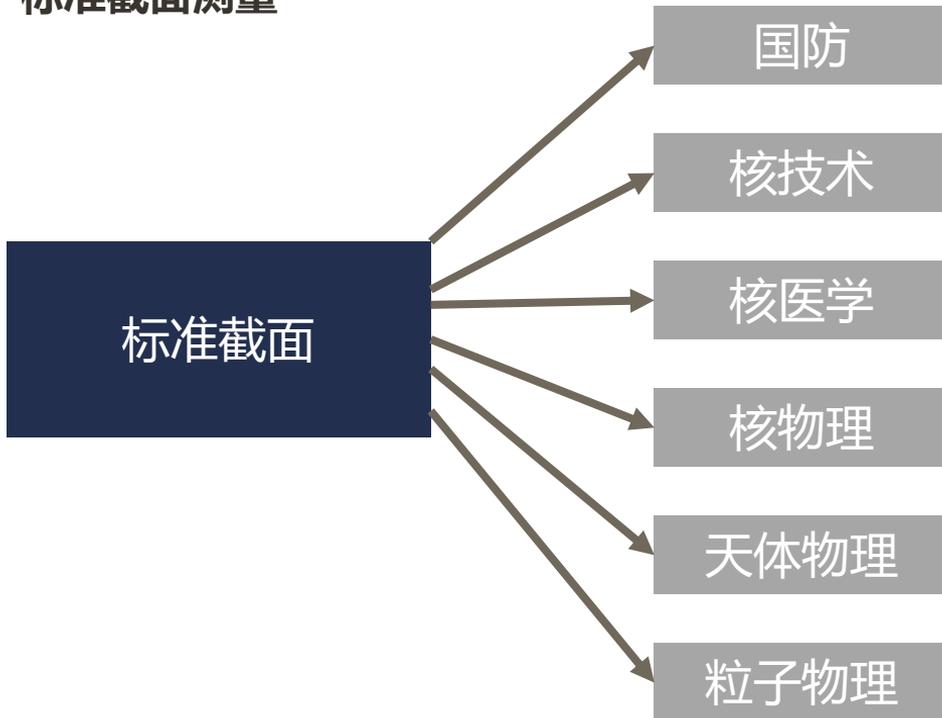


- 面对新形势, 需要确定准确的研究方向
- 如何科技自立自强?
- 关键技术自主可控
- 关键设备自主可控
- 关键软件自主可控
- **关键数据自主可控?**
- **我们自己的数据, 能不能顶上?**

研究目标

- 标准截面
- 重要需求
- 物理前沿

标准截面测量



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Nuclear Data Sheets 148 (2018) 143–188

Nuclear Data
Sheets

www.elsevier.com/locate/nds

Evaluation of the Neutron Data Standards

A.D. Carlson,^{1,*} V.G. Pronyaev,² R. Capote,³ G.M. Hale,⁴ Z.-P. Chen,⁵ I. Duran,⁶ F.-J. Hantsch,⁷ S. Kunieda,⁸ W. Mamhart,⁹ B. Marcinkievicius,^{3,10} R.O. Nelson,⁴ D. Neudecker,⁴ G. Noguere,¹¹ M. Paris,⁴ S.P. Simakov,¹² P. Schillebeeckx,⁷ D.L. Smith,¹³ X. Tao,¹⁴ A. Trkov,³ A. Wallner,^{15,16} and W. Wang¹⁴

¹National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Stop 8463, Gaithersburg, MD 20899-8463, USA

²PI Atomstandart, State Corporation Rosatom, 117342, Moscow, Russia

³NAPC-Nuclear Data Section, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria

⁴Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA

⁵Tsinghua University, Beijing, 100084, China

⁶Universidad de Santiago de Compostela, Spain

⁷EC-JRC-Directorate G, Unit G.2, B-2440 Geel, Belgium

⁸Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Data Center, Ibaraki 319-1195, Japan

⁹Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Org. 64, 38116 Braunschweig, Germany

¹⁰Uppsala University, Uppsala, Sweden

¹¹SPRC/LEPh, CEA Cadarache, 13108 Saint Paul Les Durance, France

¹²Karlsruhe Institute of Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

¹³Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, USA

¹⁴China Nuclear Data Center (CNDC), China Institute of Atomic Energy, Beijing, China

¹⁵Vera Laboratory, Faculty of Physics, University of Vienna, A-1090 Vienna, Austria

¹⁶Dept. of Nuclear Physics, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia

(Received 3 September 2017; revised received 30 October and 12 November 2017; accepted 20 November 2017)

中子核反应标准截面

- 中子标准截面对应的核反应主要为带电粒子出射反应
- 在10MeV以下能区，适合使用MTPC进行测量
- 开展成体系的标准截面实验测量及数据评价有重要意义

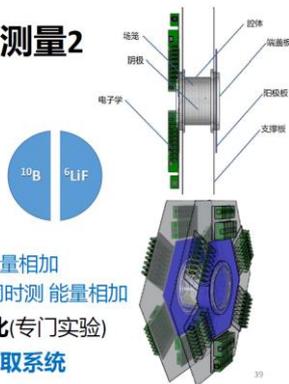
TABLE I. Cross section standards and reference data, release 2017.

Neutron cross section standards	
Reaction	Standards incident neutron energy range
H(n,n)	1 keV to 20 MeV
³ He(n,p)	0.0253 eV to 50 keV
⁶ Li(n,t)	0.0253 eV to 1 MeV
¹⁰ B(n,α)	0.0253 eV to 1 MeV
¹⁰ B(n,α ₁ 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
²³⁵ U(n,f)	0.0253 eV, 7.8-11 eV, 0.15 MeV to 200 MeV
²³⁸ U(n,f)	2 MeV to 200 MeV

标准截面测量

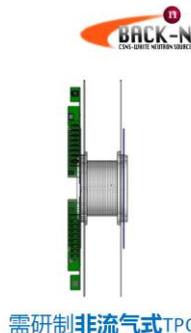
标准截面高精度测量2

- 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



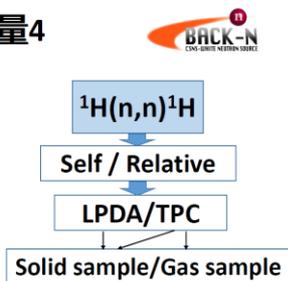
标准截面测量3

- 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(^3He 难以形成固体)
分别掺入 ^3He 气体、 BF_3 (或硼烷)气体
or 同时掺入 ^3He 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)



标准截面测量4

- 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



摘自张国辉老师报告



轻核及聚变反应 数据需求

叶涛 郭海瑞 孙伟力

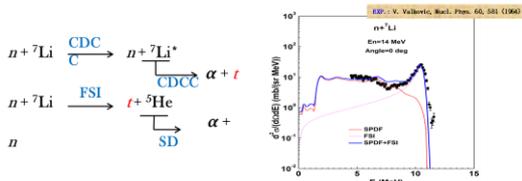
北京应用物理与计算数学研究所

2022/4/22

2022-核数据及应用研讨会

1. 锂的中子数据需求

20MeV以下中子与锂-7反应产氦有两个反应道（1组实验）：



➢ 需要多组 ${}^7\text{Li}(n, xT)$ 的双微分截面实验，20MeV以下。

- ✓ 理论研究需要结合DDX实验来确定不同反应机制的贡献
- ✓ 可通过理论计算或R矩阵分析得到更精确的核数据

2022-核数据及应用研讨会

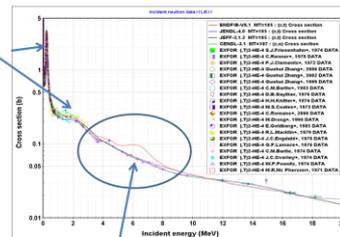
2022/4/22

10

➢ 需要 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 的截面实验，4-9MeV

- ✓ ENDF/B8.0的产氦截面有一个峰，是通过符合角分布实验数据得到，评价价值远大于其它实验值，需澄清。

${}^6\text{Li}$ 共振态



理论上没有明显的共振态

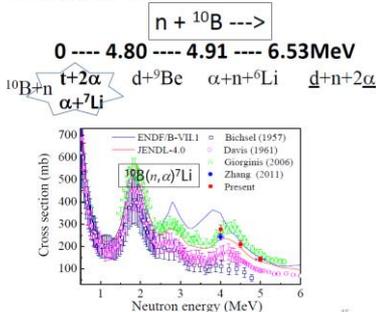
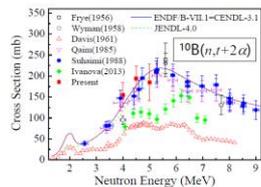
2022-核数据及应用研讨会

2022/4/22

11

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

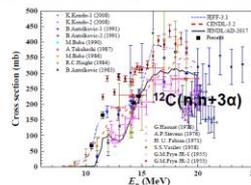


45

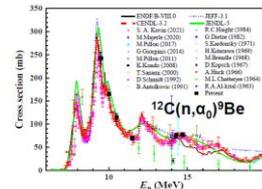
待测多体核反应2



- $^{12}\text{C}(n, n+3\alpha)$ 四体反应(三叉)
- 与 $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)$ (n, el) 同时测量?
- 原子能院能区

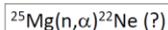


- $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 三叉
- 与 $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)$ (n, el) 同时测量?
- 原子能院能区



46

- 例如 可测吗?(估算)



- Back-n 低能中子能区 出射轻粒子为 p 每个能bin有10个计数 反应截面小 就可以处理出截面
- TPC探测立体角大、效率~100%、气体样品核数多 [LPDA立体角小(1%)、固体样品核数少(1%) → 计数率低]
- 需要考虑的细节问题
 - 气体/固体样品 (^{14}N 气体 ^{35}Cl 气体/固体 ^{25}Mg 固体)
 - 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

48

摘自张国辉老师报告

物理前沿

● 中子诱发 ^{235}U 三分裂变的轻带电粒子测量

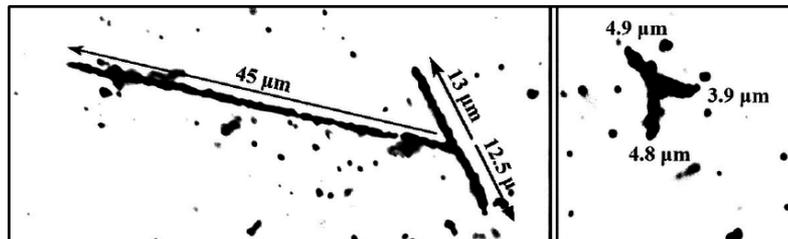
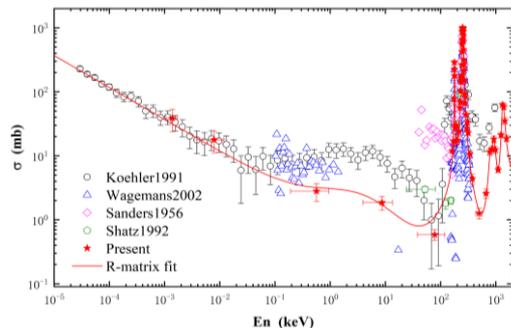


TABLE VI. Survey of the probability of emission of the ternary α particles (B/LRA) and of all ternary fission particles (B/T).

Reaction	B/T	B/LRA true	B/LRA Gaussian	Method	Reference
$^{235}\text{U} + n_{th}$	499 ± 30			Ion chamber	Nobles (Ref. 4)
	570 ± 30^a	690 ± 25^c		$\Delta E-E$ detector	Marshall <i>et al.</i> (Ref. 28)
	511 ± 9^b			Surface barrier detector	Schröder <i>et al.</i> (Ref. 29)
			500	Calculation	Doan <i>et al.</i> (Ref. 27)
	(394)	(433)	459 ± 22	Mass spectrometer	Kugler <i>et al.</i> (Ref. 30)
	(528)	(580)	615 ± 20	Surface barrier detector	Wagemans <i>et al.</i> (Ref. 8)
(545)	(599)	635 ± 12	$\Delta E-E$ detector	Aleksandrov <i>et al.</i> (Ref. 9)	
	536 ± 10	589 ± 9^d		$\Delta E-E$ detector	This work

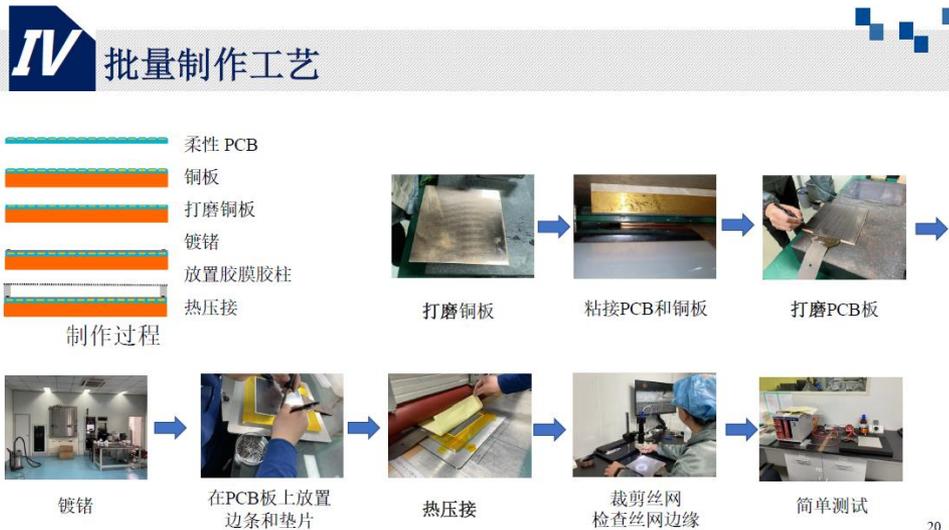
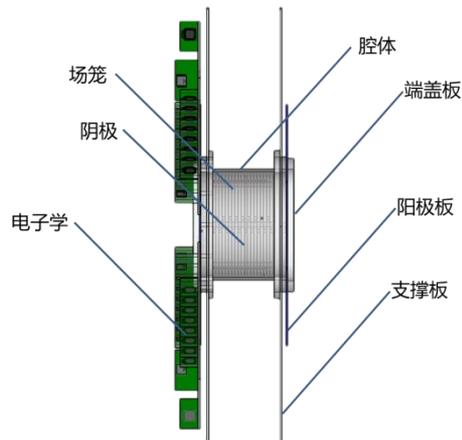
● $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应测量

● 对天体物理研究又重要意义的keV能区统计少误差大, 可采用TPC进行测量



TPC探测器技术发展

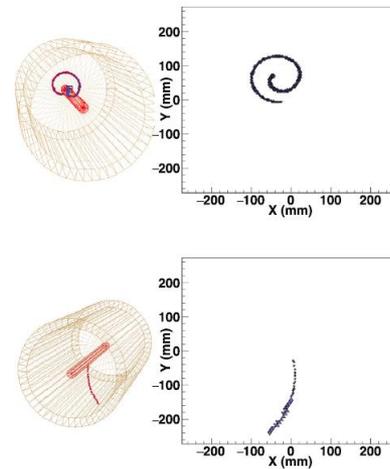
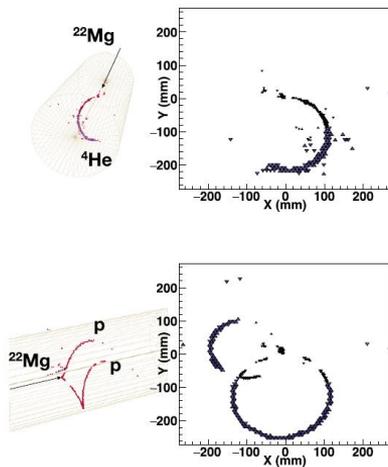
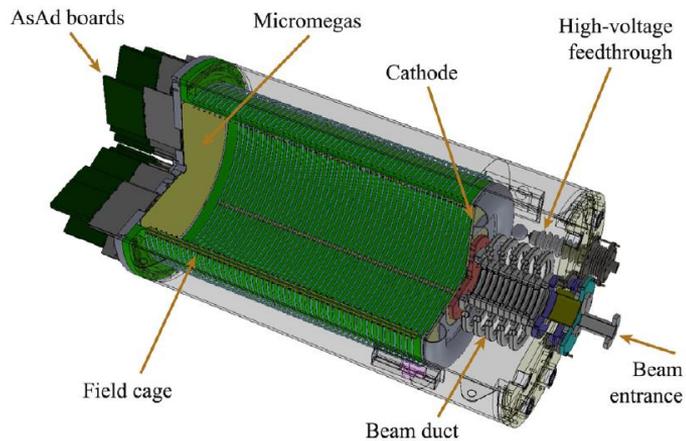
- 双端读出需要低物质阳极板制作工艺



摘自中科大彭云志报告

TPC探测器技术发展

- AT-TPC@MSU
- 圆柱形场笼+螺线管磁场
- 通过出射粒子的螺旋径迹进行粒子鉴别



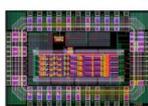
TPC探测器技术发展

- 国产ASIC发展
- 摘自中科大赵雷老师报告

气体径迹探测器读出ASIC(清华)

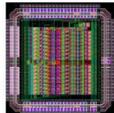
集成度: 模拟前端→波形采样→数字滤波
工艺: 350nm→180nm→65nm

CASA: 4ch CSA+Shaper



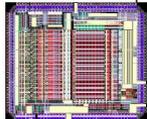
2008

CASAGEM: 16ch CSA+Shaper



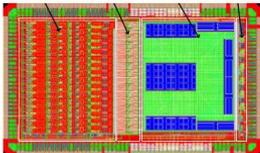
2010

CASCA: 32ch CSA+Shaper+SCA



2014

WASA: 16ch AFE+ADC+DSP



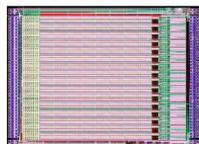
2021

WASA: 16ch AFE+ADC



2019

GERO: 16ch SCA



2018

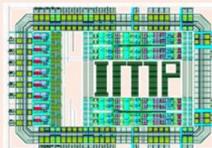
UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

30

模拟读出 [国内]

① FEAM (近物所)

通道数: 8
动态范围: 1 pC
噪声: 4000 e⁻
@100 pF C_{in}
功耗: 6.6 mW/ch



② 低噪声辐射探测读出ASIC(西工大)

通道数: 12
动态范围: 2 fC
噪声: 59 e⁻
@0 pF C_{in}
功耗: 1.25 mW/ch



③ MTPC readout ASIC (中科大)

通道数: 16
动态范围: Up to 10 pC
噪声: 17000 e⁻
@10 pC Range
@100 pF C_{in}
@480 ns T_{peak}
功耗: 8.6 mW/ch

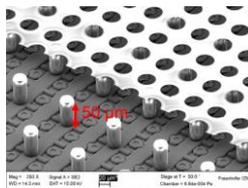
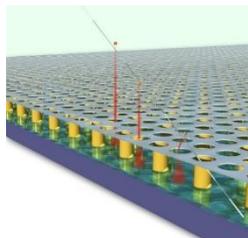
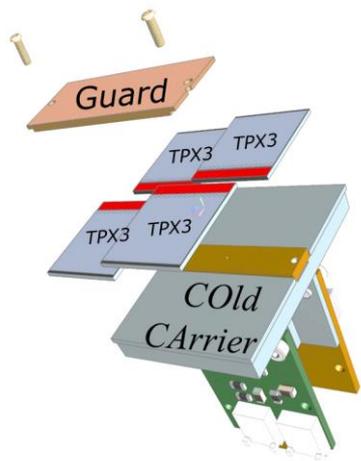


UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

31

TPC探测器技术发展

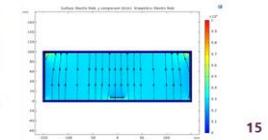
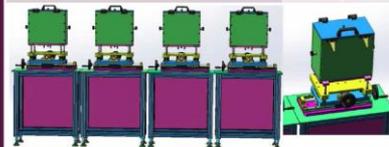
- 数字型TPC是当前的研究前沿方向之一
- 典型芯片如Timepix, 采用55um*55um读出像素
- 采用dN/dx方法, 或得比dE/dx方法更好的粒子鉴别效果



实验研究进展

■ 与清华大学的合作, 对像素型TPC的实验研究

Micromegas Bonding pixel单元, 实现像素型技术	模块尺寸	R&D
<ul style="list-style-type: none"> • $\geq 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ • 由清华大学邓智勇团队开发出芯片 • 由高能所研发 Micromegas 探测器模块 • 搭建一台像素型TPC原型机 	1-2 cm ²	<ul style="list-style-type: none"> • 像素型读出技术的研发和实现 • 实现cluster研究和像素尺寸的优化 • 利用dN/dx + dE/dx 进行PID性能研究
	100 cm ²	<ul style="list-style-type: none"> • 利用UV laser辐照实现TPC调试研究 • 基于UV laser的实现TPC性能的监测 • 利用dN/dx + dE/dx 进行长径透PID性能研究



15

实验研究进展

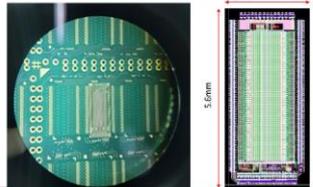
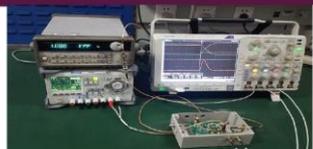
■ 像素型TPC读出芯片研发进展

- ✓ 像素型 TPC ASIC 芯片于今年开始研发
- ✓ 巴流片完成
- ✓ 第一版ROIC正在测试中
- ✓ TOA+TOT模式

■ 从传统的尺寸1mm×6mm Pad 读出→

500µm×500µm 小像素读出

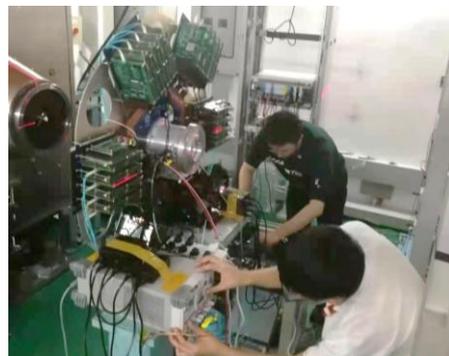
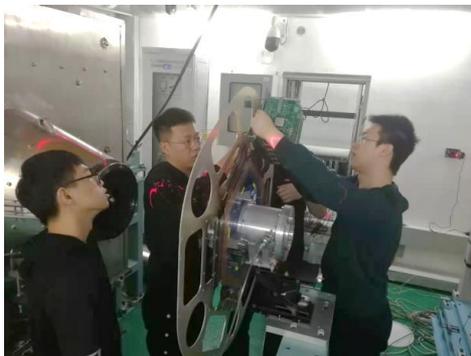
- ✓ 更高的精度, 更高的计数率(MHz/cm²)
- ✓ 放大增益: >40mV/fC
- ✓ 功耗: ~400mW/cm² (最初版测试结果)
- ✓ 100mW/cm² (目标和最终设计)
- ✓ 工艺: 180 nm CMOS → 60 nm CMOS



摘自高能所常悦报告

实验执行人

- TPC实验复杂度高，每个实验需要一个实验执行人对实验各方面和细节整体把控
- 组织对实验执行人的现场探测器组装和操作培训，周期一个月
- 系统整理相关操作文档
- 组织BLUET程序使用课程，整理程序文档
- 组织定期讨论实验方案设计和数据分析进展



谢谢

yih@ihep.ac.cn