



MTPC实验研究进展及问题讨论

报告人：易晗

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

2024年11月30日

时间投影室实验技术暨第二届MTPC研讨会@深圳大学



报告内容

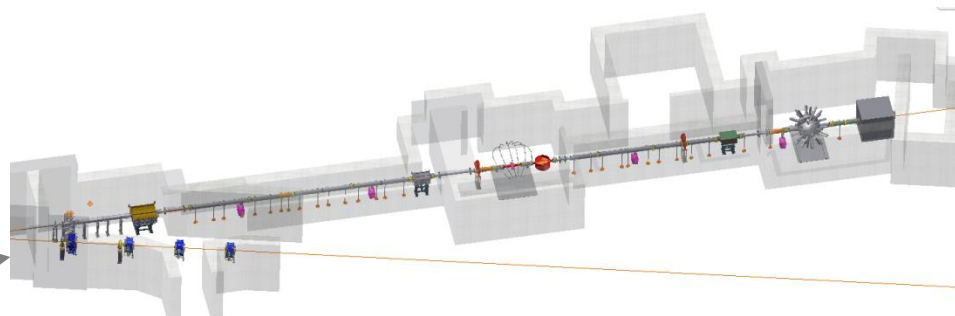
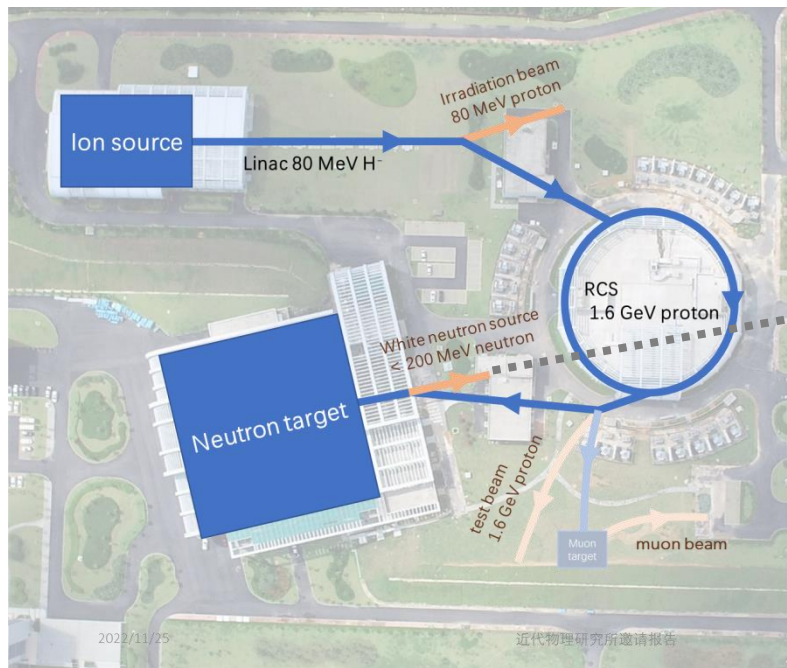
- MTPC概况
- 研究进展
- 问题讨论
- 发展规划



报告内容

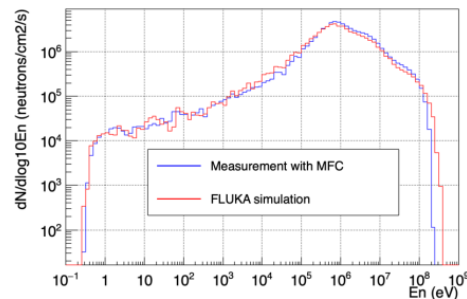
- MTPC概况
- 研究进展
- 问题讨论
- 发展规划

CSNS反角白光中子源

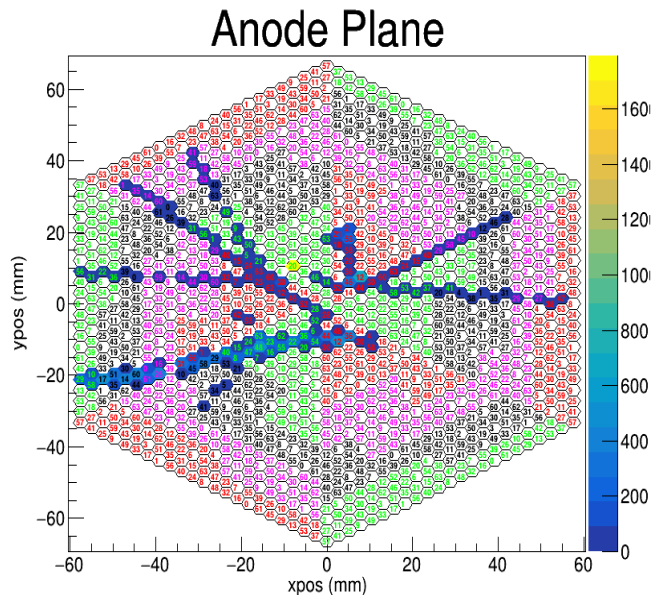


- CSNS反角白光中子源(Back-n): 国内首条宽能区强流白光中子束线
- 覆盖能区: 0.5eV~300MeV, 流强: $\sim 10^7/\text{cm}^2/\text{s}$
- 中子核数据测量研究:

- 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



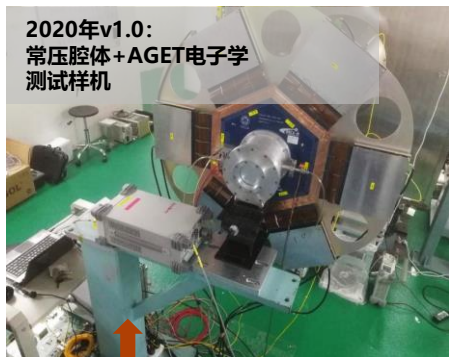
带电粒子出射中子核反应测量



- 对于复杂核反应与小截面核反应，传统实验技术难以进行测量
- 需要高空间分辨、大立体角、具有粒子鉴别能力的探测器系统
- 提出多用途时间投影室**MTPC(Multi-purpose TPC)**解决方案

项目概况

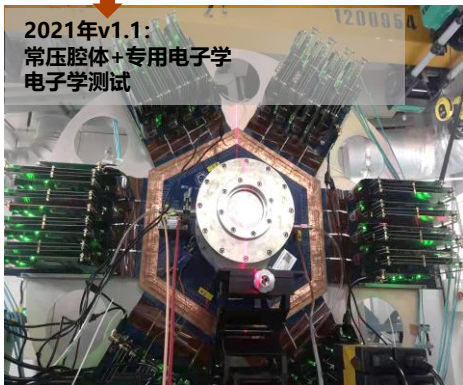
2020年v1.0:
常压腔体+AGET电子学
测试样机



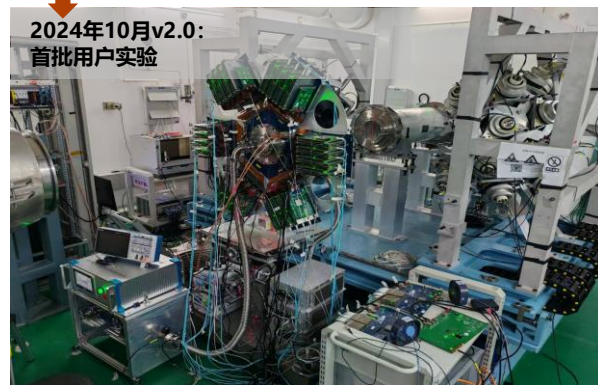
2023年v2.0:
可调气压腔体+专用电子学
物理实验配置



2021年v1.1:
常压腔体+专用电子学
电子学测试

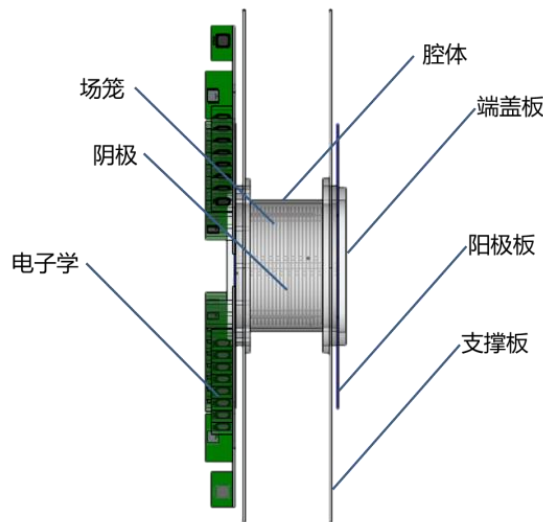
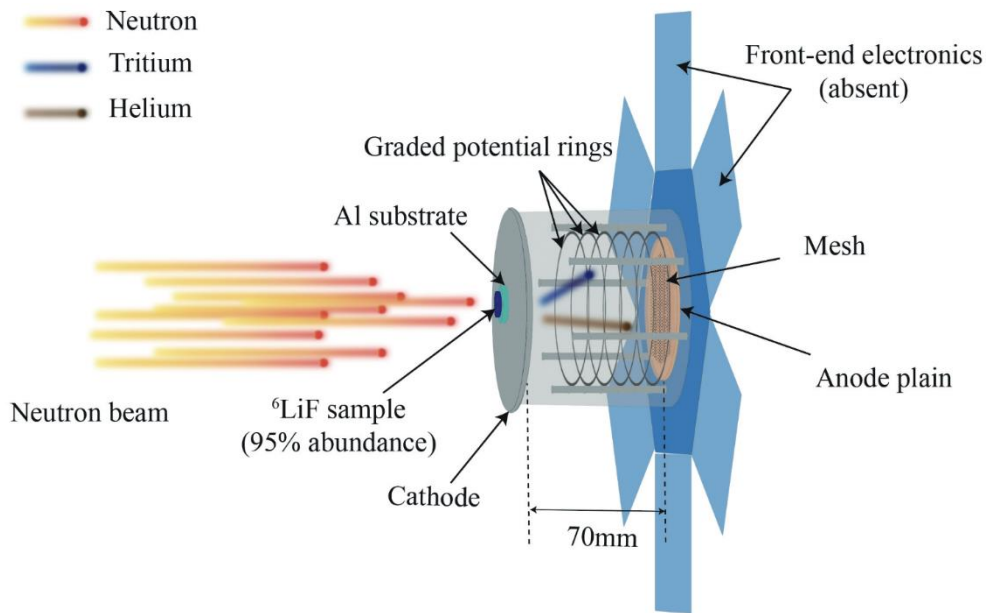
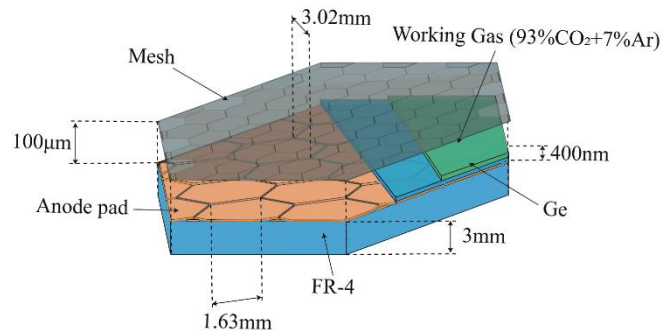
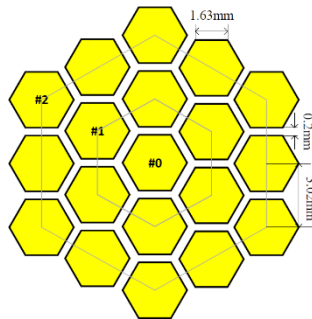


2024年10月v2.0:
首批用户实验



探测器结构

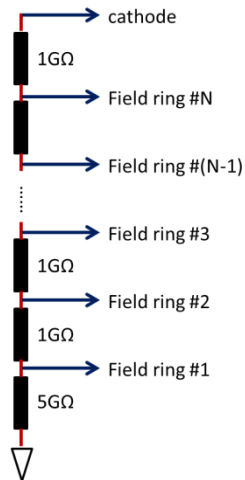
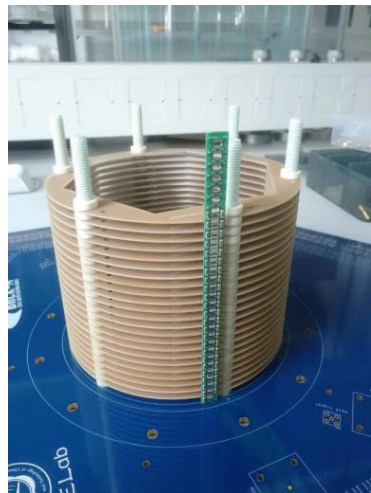
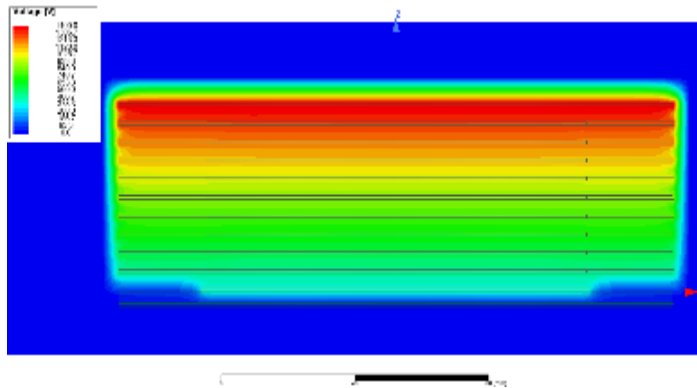
- 场笼结构为圆柱体，兼容单端双端读出模式
- 单端模式漂移区距离可调，适应不同实验需求
- 读出阵列采用六边形密堆结构
- 1519个阳极pad，每个pad边长64mil，阳极区边长约68mm

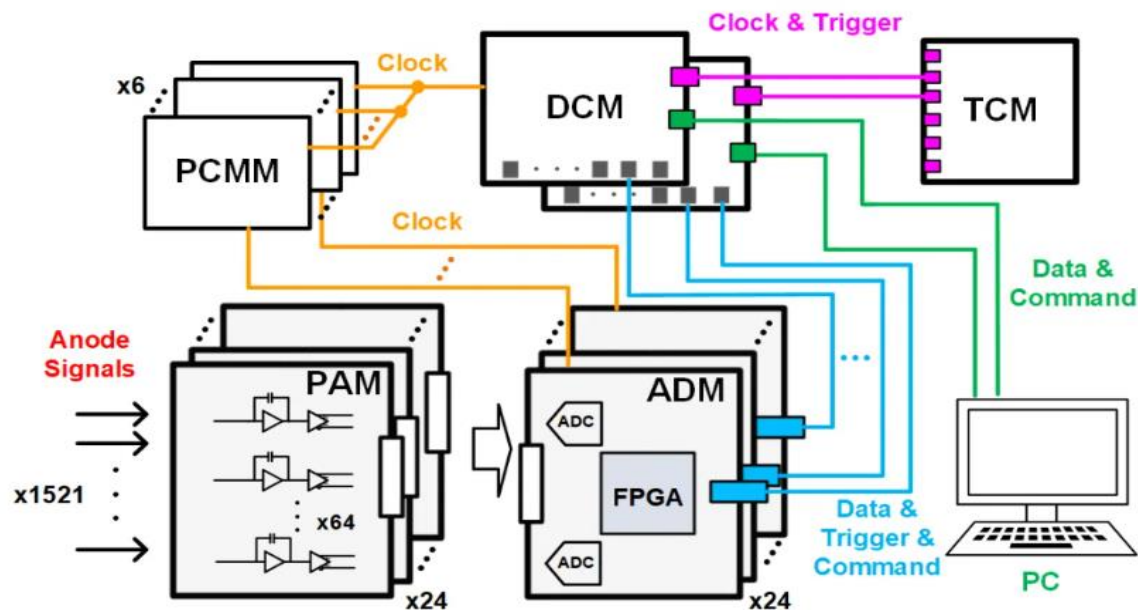


探测器结构



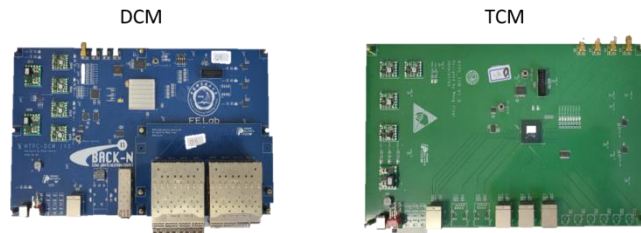
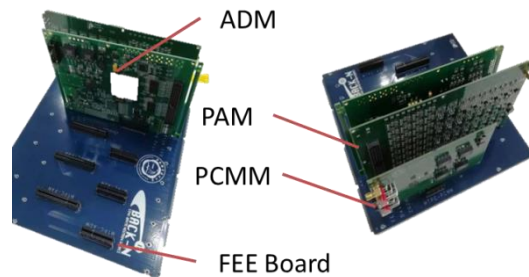
- 热压接技术制作Micromegas增益结构@USTC
- 阳极板表面镀400nm高阻锗层，增加高压下的稳定性
- mesh参数：不锈钢丝直径16 μm 、厚度25 μm 、LPI-400
- 透过率55%、张力30N
- 增益区厚度100 μm ，支撑柱直径1mm，间隔10mm
- 均压环采用PCB制作，间隔5mm
- 电阻值按照雪崩漂移场强比200配置，对应最高电子透过率





- 电子学系统主要参数:

- ❑ 共1536通道 (MTPC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





MTPC研究团队



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



深圳大学
SHENZHEN UNIVERSITY



北京大学
PEKING UNIVERSITY



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



中国原子能科学研究院
CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

MTPC研究团队

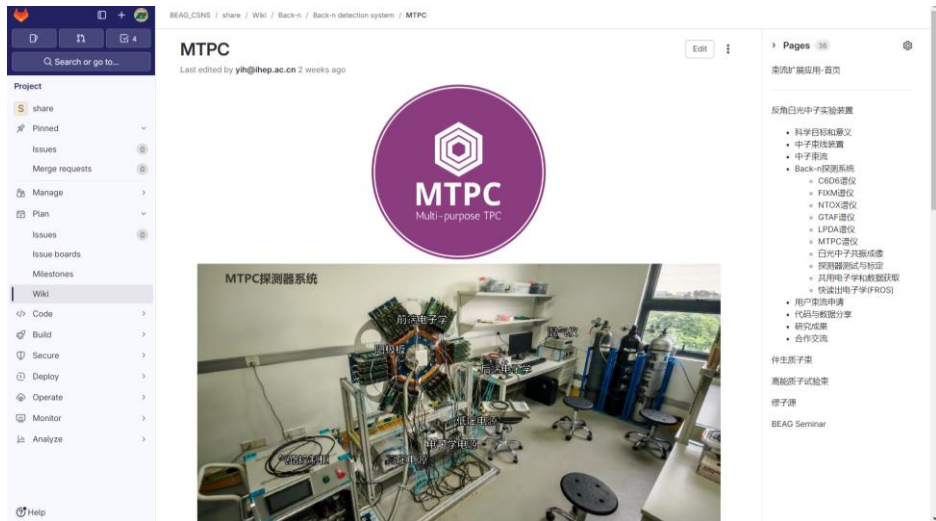
● MTPC实验例会

- 每月召开一次MTPC，线上+线下
- 讨论近期各方面的研究和测试进展

收件人	主题
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (7月19日周五)
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (6月19日)
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (时间更新: 5月23日周四)
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (5月22日周三)
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (4月19日)
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (3月20日周三)
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会 (1月17日)
☐  mtpc	[已发送] Re: [Mtpc] MTPC实验例会
☐  mtpc	[已发送] MTPC实验例会

● MTPC主页

- 汇总整理MTPC实验资料和技术文档，方便开发者参考查阅



实验研究链接:

- [MTPC技术文档与研究报告 \(IHEP Docs\)](#)
- [MTPC探测器系统教程 \(B站\)](#)
- [MTPC实验记录](#)
- [MTPC通知邮件列表订阅](#)
- [BLUET模拟与数据分析程序协作开发平台 \(GitLab\)](#)
- [BLUET在线Doxygen文档 \(高能所网络或VPN访问\)](#)
- [BLUET程序教程 \(B站\)](#)





报告内容

● MTPC概况

● 研究进展

- BLUET-v5
- 探测器测试
- 电子学测试
- DAQ
- 束流实验

● 问题讨论

● 发展规划

BLUET-v5框架

BluetConfigFile.xml

- ❑ <CutParameters>
- ❑ <RunMode>
- ❑ <GasParameters>
- ❑ <DetectorParameters>
- ❑ <ElectronicsParameters>
- ❑ <WaveFitParameters>
- ❑ <ReconstructParameters>
- ❑ <TrackParameters>
- ❑ <SampleParameters>
- ❑ <G4EventGeneratorParameters>
- ❑ <G4Parameters>

temp_env.xml

- ❑ <bluet_config>
- ❑ <bluet_rawdata>
- ❑ <bluet_eventdata>
- ❑ <bluet_rootdata>
- ❑ <bluet_simdata>

Prerequisites:

- ❑ C++ compiler; Fortran compiler; ROOT 6; GSL; Geant4; Garfield++; fmt; eigen3.

Bluet Core:

- ❑ Environment config
- ❑ RunningMode config
- ❑ ConfigFile reading
- ❑ Modules loading

config:

- ❏ BluetConfig.hh
- ❏ BluetDataModel.hh
- ❏ BluetDeconvolution.hh
- ❏ BluetFourierFilter.hh
- ❏ BluetHough.hh
- ❏ BluetHough3D.hh
- ❏ BluetPointCloud.hh
- ❏ BluetSNChecker.hh
- ❏ BluetSphere.hh
- ❏ BluetVector.hh
- ❏ BluetVector3d.hh
- ❏ BluetWaveFit.hh
- ❏ BluetWaveformMaster.hh

custom:

- ❏ BluetCustom.hh

modules:

- ❏ BluetDrawLinkDef.hh
- ❏ BluetLab.hh
- ❏ BluetMap.hh
- ❏ BluetProgram.hh
- ❏ DrawEvent.hh
- ❏ DrawWave.hh
- ❏ Factory.hh
- ❏ GenGasFile.hh
- ❏ Raw2RootMTPC.hh
- ❏ ReadGasFile.hh

utils:

- ❏ BluetModule.hh
- h clipp.h
- h++ pugiconfig.hpp
- h++ pugixml.hpp
- ❏ stringhandle.hh
- ❏ xmlparse.hh

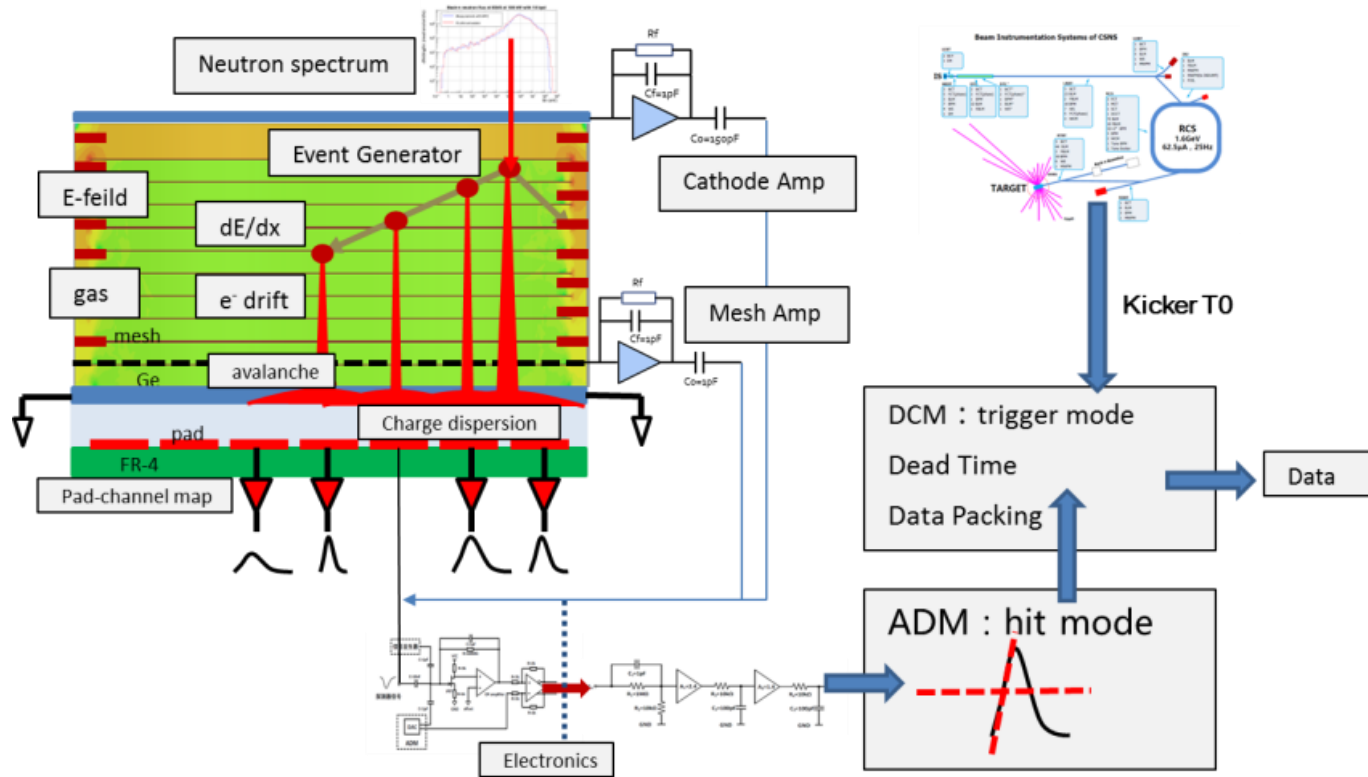
runner:

- ❏ BluetActionInitialization.hh
- ❏ BluetChamberHit.hh
- ❏ BluetChamberSD.hh
- ❏ BluetChargeMaster.hh
- ❏ BluetDetectorConstruction.hh
- ❏ BluetElectronDriftAction.hh
- ❏ BluetElectronics.hh
- ❏ BluetEventAction.hh
- ❏ BluetNoise.hh
- ❏ BluetOutput.hh
- ❏ BluetPadMaster.hh
- ❏ BluetPhysicsList.hh
- ❏ BluetPrimaryGeneratorAction.hh
- ❏ BluetRunAction.hh
- ❏ BluetTrackMaster.hh

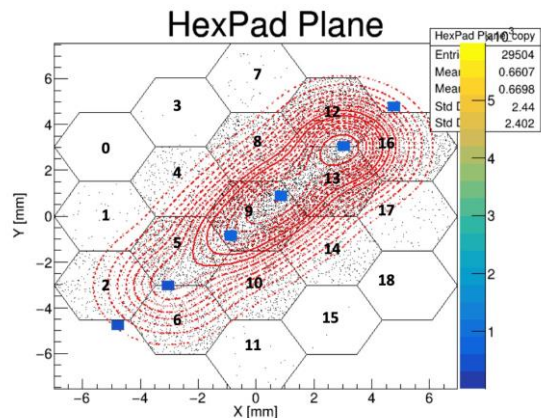
模拟框架

- 模拟程序框架包含所有的物理过程与电子学过程

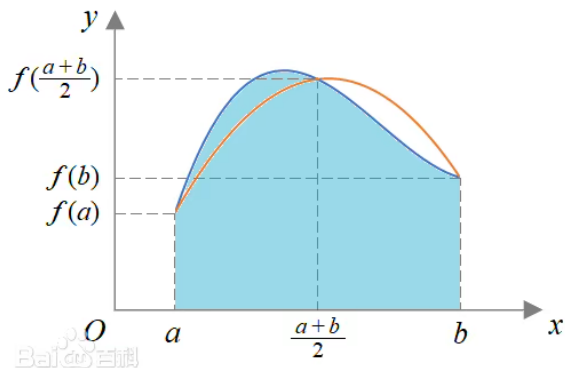
- 气体参数
- 中子能谱
- 事例产生器
- 电离过程
- 电子漂移
- 电子雪崩
- 电荷扩散
- 电子学模型
- 阴极和mesh波形
- Hit与Trigger



积分算法优化



- 循环算法优化
- 使用2层pad共19个pad进行测试
- 6个电荷单元（图中一个方点代表一个电荷单元）
- 优化循环逻辑，减少计算所需的次数
- 原循环次数为 $19 \times 6 = 114$ 次；现循环次数为 $6 \times 7 = 42$ 次



- 蒙特卡罗抽样算法耗时较长，考虑换作积分算法
- 辛普森积分算法（二次函数逼近）
- 将区间端点和区间中点三个点近似看成抛物线上对应的三个点
- 以二次曲线逼近方式取代矩形积分公式，得到数值解

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \frac{a}{3}x^3 + \frac{b}{2}x^2 + cx + d$$

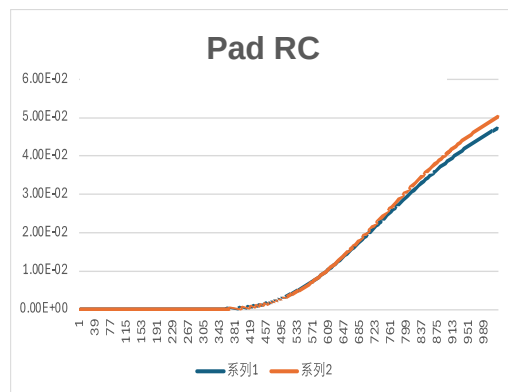
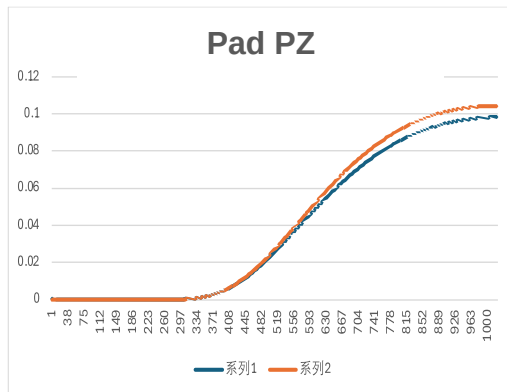
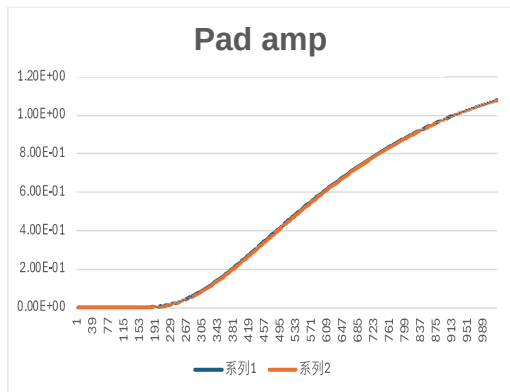
$$\int_L^R f(x)dx = F(R) - F(L) = \frac{R-L}{6} [f(L) + 4f\left(\frac{L+R}{2}\right) + f(R)]$$

卷积算法优化

- 前期采用root的TF1Convolution类进行卷积
- 代码开发，但是需要有TF1的转换过程，效率低速度慢
- 直接数值卷积

$$f(x) \otimes g(x) = h(x)$$

$f(x)$	$\otimes$	$g(x)$	$=$	$h(x)$
$f(x_0)$		$g(x_0)$		$f(x_0) * g(x_0)$
$f(x_1)$		$g(x_1)$		$f(x_0) * g(x_1) + f(x_1) * g(x_0)$
$f(x_2)$		$g(x_2)$		$f(x_0) * g(x_2) + \dots + f(x_2) * g(x_0)$
.....				
$f(x_{n-2})$		$g(x_{n-2})$		$f(x_0) * g(x_{n-2}) + \dots + f(x_{n-2}) * g(x_0)$
$f(x_{n-1})$		$g(x_{n-1})$		$f(x_0) * g(x_{n-1}) + \dots + f(x_{n-1}) * g(x_0)$
$f(x_n)$		$g(x_n)$		$f(x_0) * g(x_n) + \dots + f(x_n) * g(x_0)$



算法优化效果

● 积分算法优化效果

0.001266	0.442202	349.291
0.002451	1.11403	454.519
0.00264	0.955835	362.059
0.002636	0.690952	262.121
0.002618	0.572991	218.866
0.002616	0.503645	192.525
0.00263	0.462536	175.869
0.002701	0.43095	159.552
0.00269	0.402343	149.57
0.002648	0.378976	143.118
0.002617	0.360436	137.729

优化前

优化后

前后比值

● 卷积算法优化效果

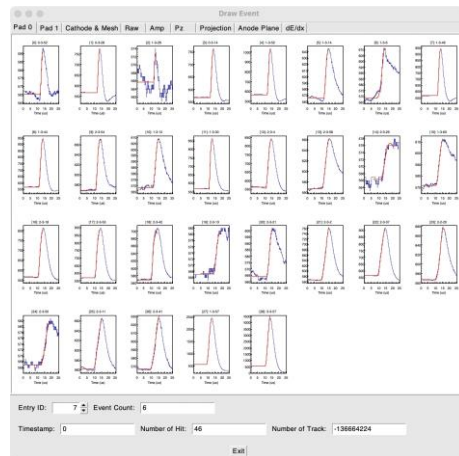
4.65276s	0.530661s
8.35214s	0.844131s
7.1365s	0.778673s
6.91002s	0.811879s
8.31311s	0.976764s
5.52278s	0.685429s
8.6506s	0.916553s
7.07195s	0.958201s
7.57119s	0.893452s
8.18084s	0.909518s
4.26365s	0.489533s
7.2048s	0.811376s
6.901s	0.723459s
7.79258s	0.806578s
8.16082s	0.836586s

优化前

优化后

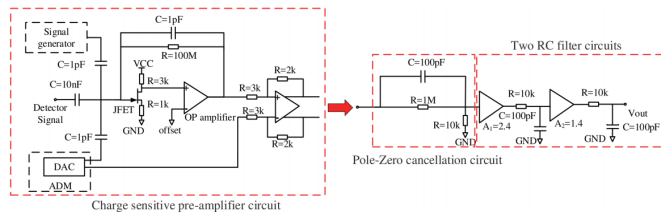
● α 事例耗时

10.17
7.22011
8.87982
6.91957
6.93439
7.94904
3.44278
9.51924
9.92667
8.81478
9.3247
7.6335
8.97854
9.44203



波形分析进展

- 波形拟合函数研究
- 电子学输出波形解析表达式



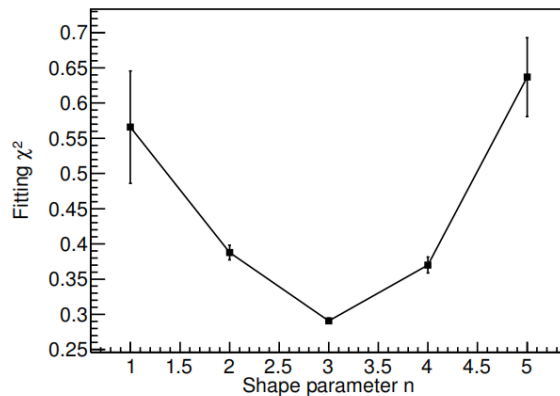
$$H(s) = \frac{1}{s} \cdot H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s)$$

$$= \frac{\tau_0 - \tau_r}{C_0 \tau_r \tau_0 \tau_1^2} \cdot \frac{1}{\left(s + \frac{1}{\tau_r}\right) \left(s + \frac{1}{\tau_1}\right)^3}$$

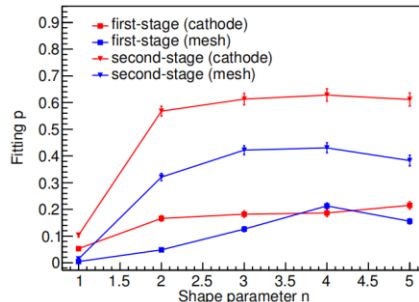
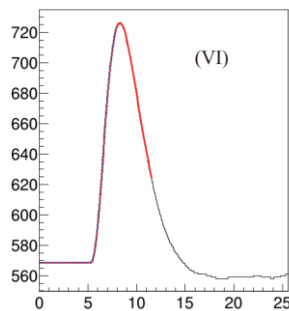
$$h(t) = \alpha \cdot \left(\beta^3 e^{-\frac{t}{\tau_r}} - \beta^3 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \beta^2 t e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{\beta}{2} t^2 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$$

$$h(t) \simeq \frac{\alpha}{6} t^3 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad \left| \frac{t}{\tau_r} - \frac{t}{\tau_1} \right| \ll 1$$

- 多项式不同阶次的拟合结果

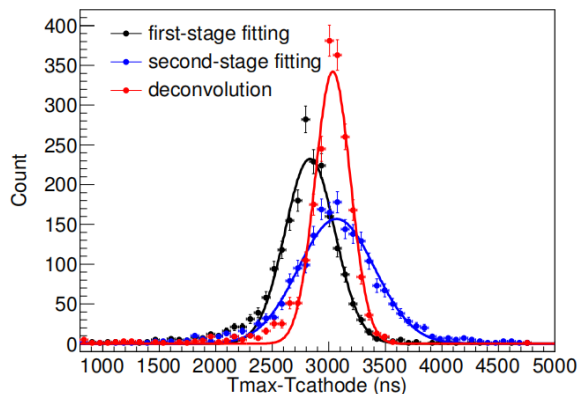


- 考虑推导过程中的近似条件，采用二次前沿拟合确定时间点
- 比单次拟合精度有所提高



波形分析进展

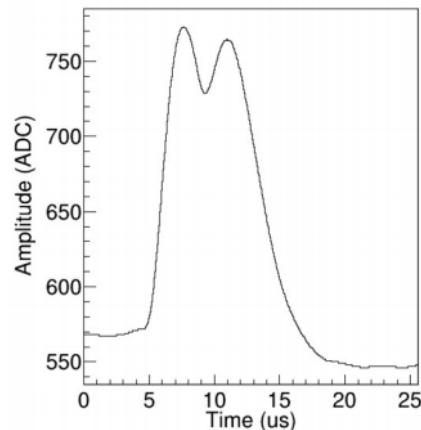
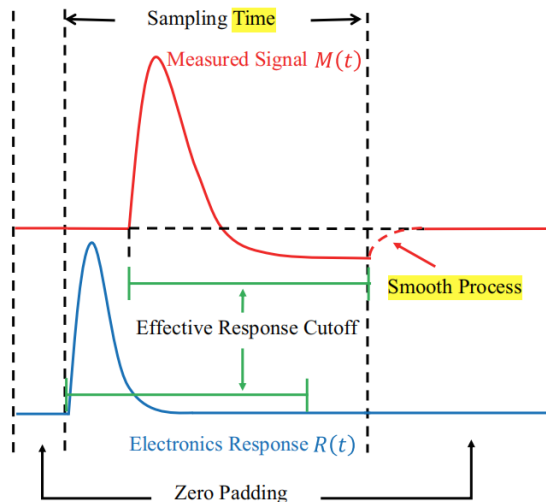
- 一次拟合有系统偏差，二次拟合解决了系统偏差问题，但定时展宽变大
- 采用波形反演算法提高定时精度
- 研究反演算法和滤波函数的参数优化，解决反演波形振荡问题



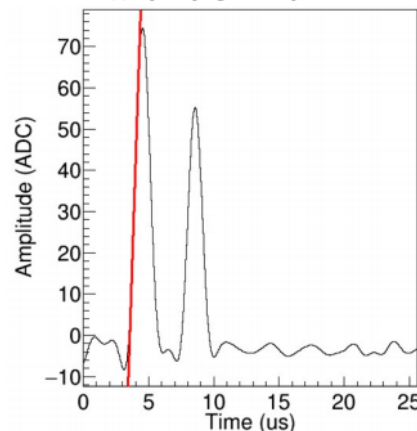
电子学输出波形

$$\hat{S}(\omega) = \frac{M(\omega)}{R(\omega)} F(\omega)$$

反演波形 电子学传递函数 滤波函数



(a) A pile-up signal example.

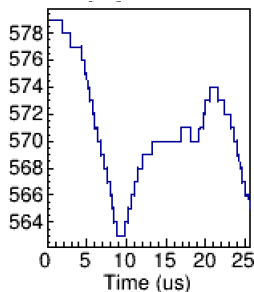
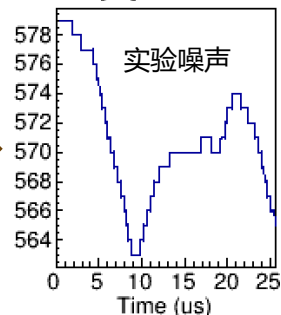
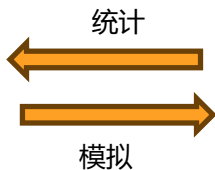
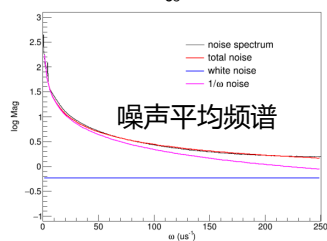


(b) Deconvolution result of pile-up signal.

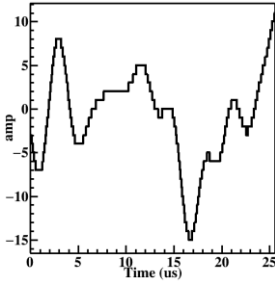
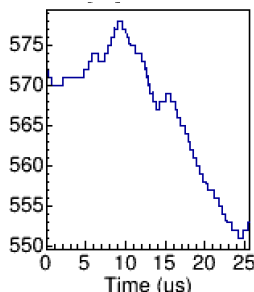
波形分析进展

- 噪声信号模拟
- 为研究探测器和电子学噪声对数据分析的影响，在模拟中加入噪声模型
- 基本思路：直接通过测量的噪声频谱或能量谱生成模拟噪声

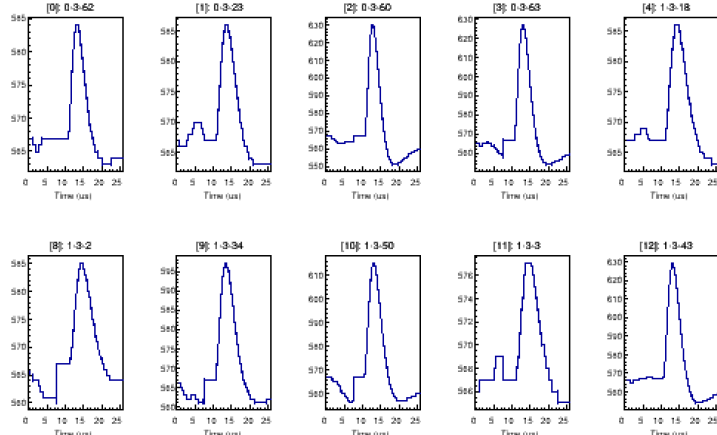
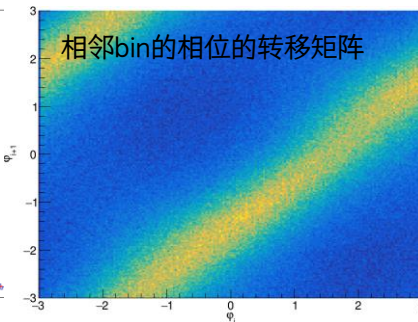
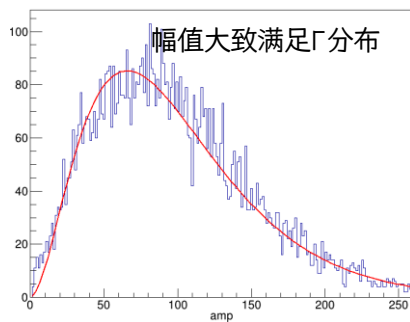
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt$$



实验噪声



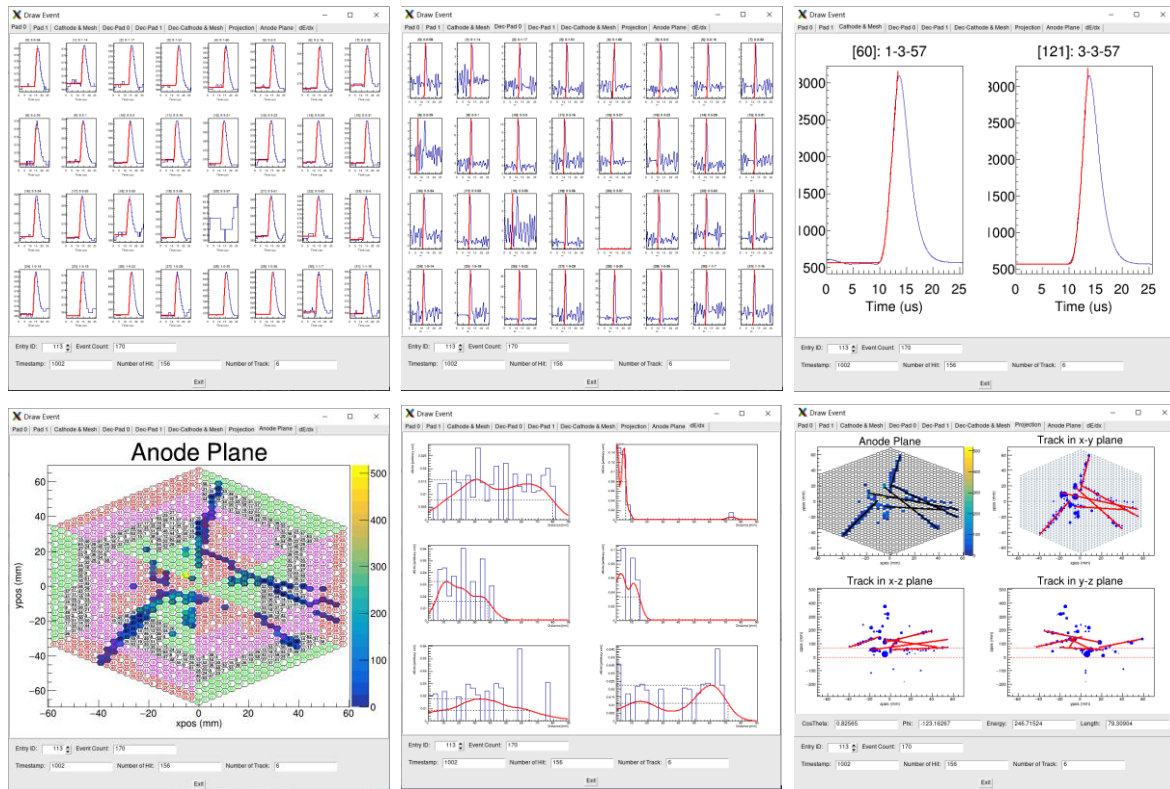
模拟噪声



叠加噪声的模拟信号

程序UI界面

- 新增UI界面，用于进行数据检查及算法检验
- 包含：波形展示、事例展示、径迹重建、Map检查



BLUET程序库

- 开源TPC模拟和分析程序框架BLUET
- <https://code.ihep.ac.cn/csns-backn-tpc/bluet-v5>





Q Search or go to...

Project

B

BLUET-v5

 Pinned

Issues

Merge requests

 Manage

Plan

Code

Build

Secure

Deploy

Operate

Monitor

Analyze

Settings

 Help

CSNS Back-n MTPC / BLUET-v5

main

bluet-v5

+

History

Find file

Edit

Code

 Merge branch 'main' of code.ihep.ac.cn:csns-backn-tpc/bluet-v5 into main
yih@ihep.ac.cn authored 1 week ago

6355c244

Name	Last commit	Last update
BluetConfig	rm config file	3 weeks ago
myBluetData	add directory	10 months ago
myBluetWork	init the project to delete cache files	1 year ago
sources	Merge branch 'main' of code.ihep.ac.cn:csns-backn-tpc/...	1 week ago
utils	small update	2 weeks ago
.clang-format	update .clang-format	2 weeks ago
.gitignore	update .gitignore	1 week ago
AUTHORS.md	Update file AUTHORS.md	3 months ago
Bluet.cc	fix conflicts in merging	3 months ago
CMakeLists.txt	geant4: revise nuclear reaction MonoEnergy error.	1 month ago
LICENSE	Update LICENSE	4 months ago
README.md	Update file README.md	2 months ago
bluet.csh	minor modifications	4 months ago
bluet.sh	fix error in cling garfieldpp	4 months ago

BLUET程序开发

- 基于GitLab进行代码版本管理
- 近一年进行了多项代码更新

Project information



238 Commits

2 Branches

1 Tag

170.5 MiB Project Storage

1 Environment

CSNS Back-n MTPC / BLUET-v5 / Repository

main | bluet-v5 / AUTHORS.md

Update file AUTHORS.md
yih@ihep.ac.cn authored just now

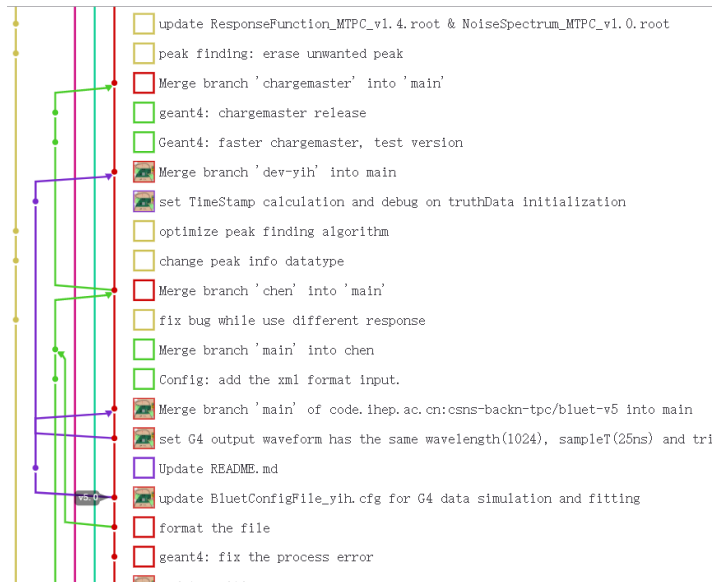
AUTHORS.md 767 B

BLUET is developed and maintained by

- Yi Han, CSNS, yih
- CHEN Haizheng, XJTU & CSNS, hzchen
- CHEN Hongkun, SYSU & CSNS, chenhi8
- LIU Yihui, CIAE, liuyihui02
- CHU Tianzhi, SZU & CSNS, chutz
- Li Yang, CSNS, yangli
- FAN Ruirui, CSNS, fanrr

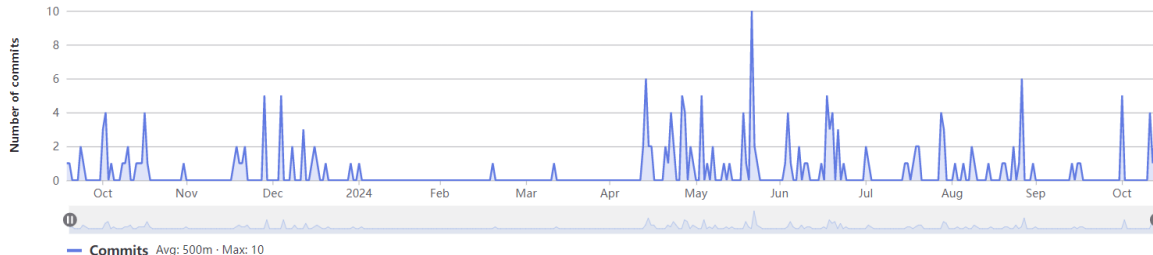
The following authors, in alphabetical order, have developed or contributed to BLUET:

- CHEN Yonghao, CSNS, chen Yonghao
- LV You, CSNS, lvyou
- SUN Yankun, CSNS, sunyankun



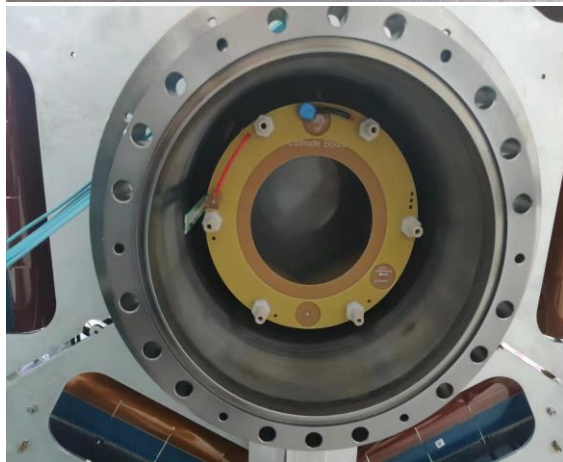
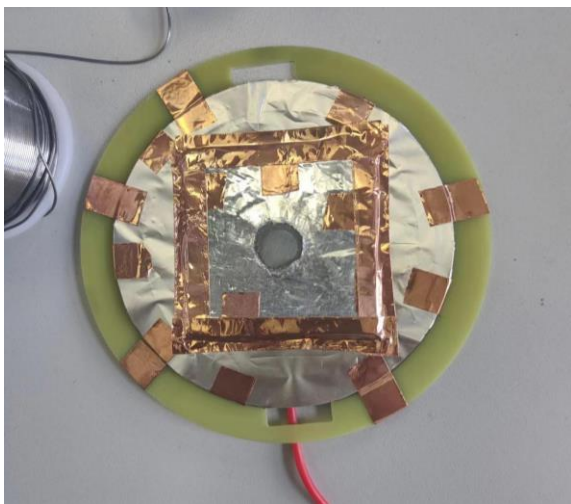
Commits to main

Excluding merge commits. Limited to 6,000 commits.



实验条件测试

- 使用 ^{244}Cm 放射源, α 能量为5.8MeV
- 放射源放置于阴极中央
- 针对3个实验进行实验条件测试:
- np散射
- $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应
- $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应



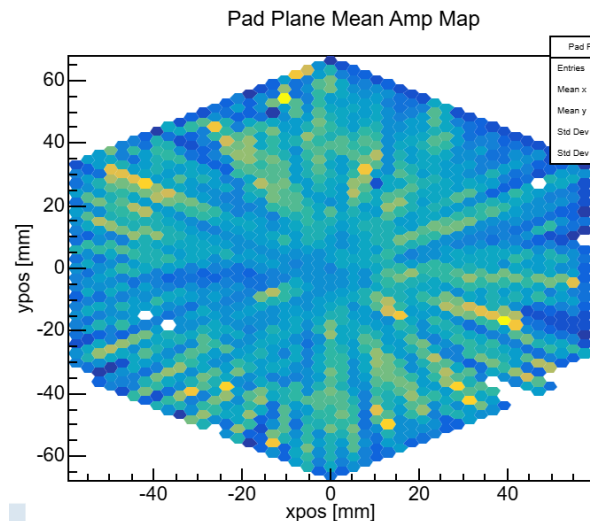
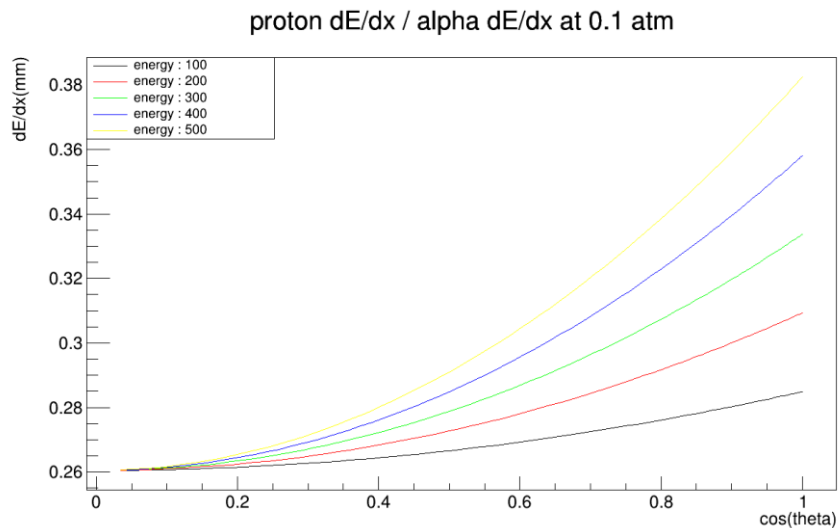
实验条件测试

- np散射中质子能量为几十keV, $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应中 α 能量为百keV
- 需要在低气压条件开展实验以增大粒子射程
- 同时低气压条件可减小 γ flash对高能区测量的干扰
- 测试用探测器Micromegas气隙厚度设计值为100 μm
- 使用气体Ar+CH₄ (75:25), 使用CH₄中的H核作为活性靶

0.05bar	0.1bar	0.15bar
mesh电压265V打火 阴极电压800V打火 无有效信号, 该气压不可用	mesh电压270V : mesh信号约3-10mV 阴极电压1215V: 约10s一次打火 增益偏低, np事例信号小触发效率低, 再提高电压打火频率增大	mesh电压330V, mesh信号均值29mV 阴极电压1485V, 约10s打火一次 增益足够, 但气压高低能质子射程短无 法有效测量出射方向

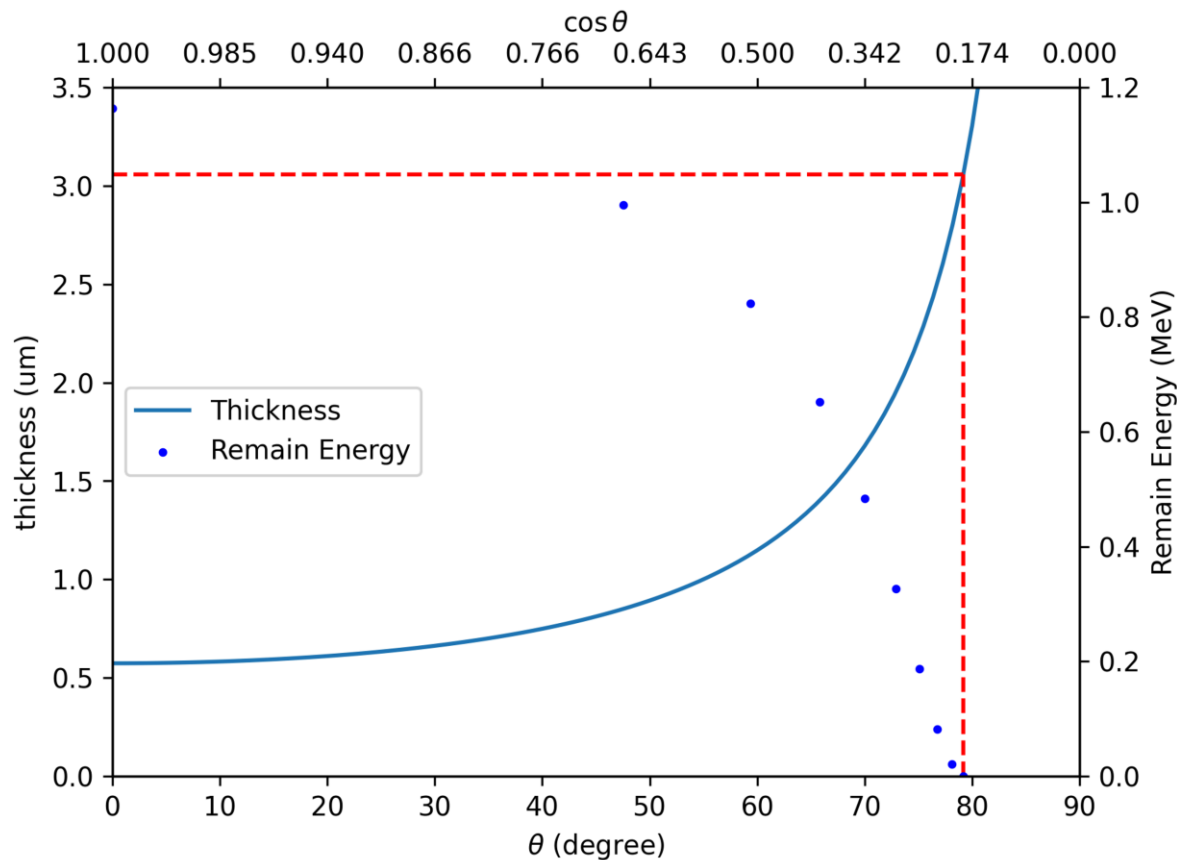
实验条件测试

- np散射实验电子学触发效率
- 考虑到质子 dE/dx 比 $\alpha dE/dx$ 小很多
- 通过调整触斜率 k 模拟质子实验中的触发情况
- 假设质子实验中使用 $k3 = 2$ ，如果全部触发，相当于 α 源测试中 $k3 = 8$



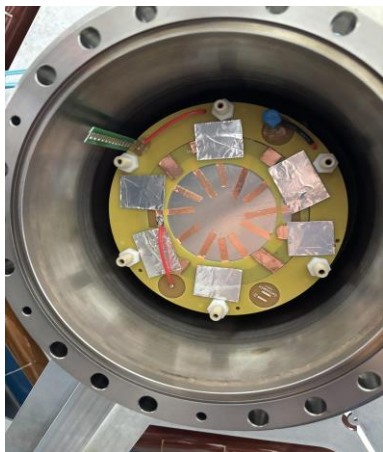
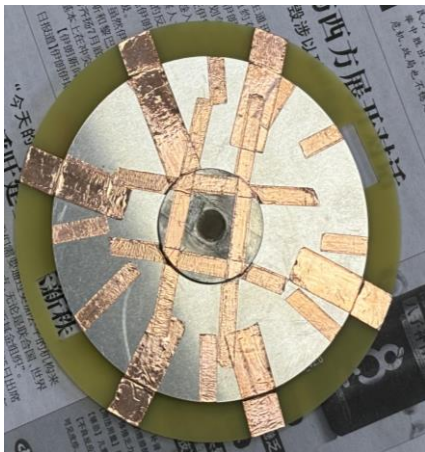
实验条件测试

- $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应中 α 能量为百keV
- 使用Ar+CO₂测试, 低气压下无法稳定工作
- 使用Ar+CH₄(75:25), 气压0.15bar, 在所需增益下电压条件下可稳定工作
- α 能量低dE/dx较大, 所需电压低
- mesh电压160V, 阴极电压1170V

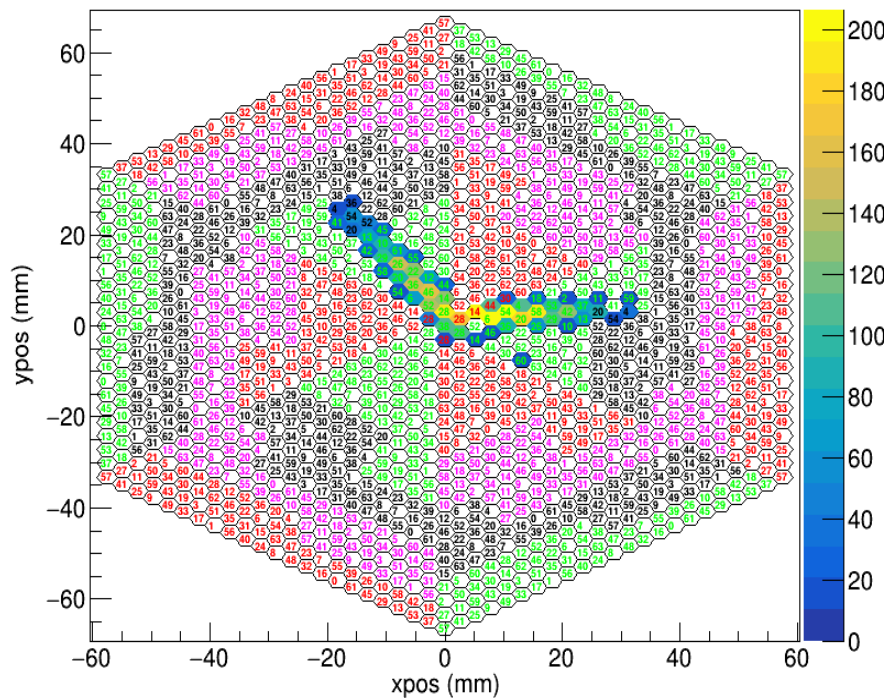


实验条件测试

- $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应裂变碎片能量几十至百MeV
- 因为碎片重, dE/dx 很大, 探测器增益为1E1量级即可触发
- 考虑到使碎片有足够的射程, 同时能在探测器中完全沉积能量
- 希望电子漂移速度尽可能大以减小高能区事例干扰
- 采用Ar+CH₄ (75:25), 气压0.6bar
- mesh电压240V, 阴极1080V
- 使用 ^{252}Cf 放射源进行裂变碎片测试



Anode Plane



Entry ID: 363

Event Count: 454

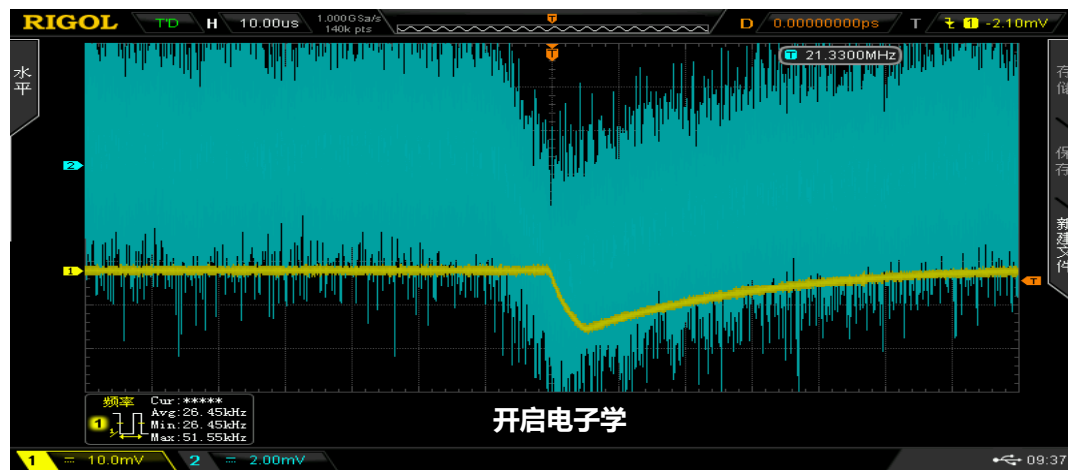
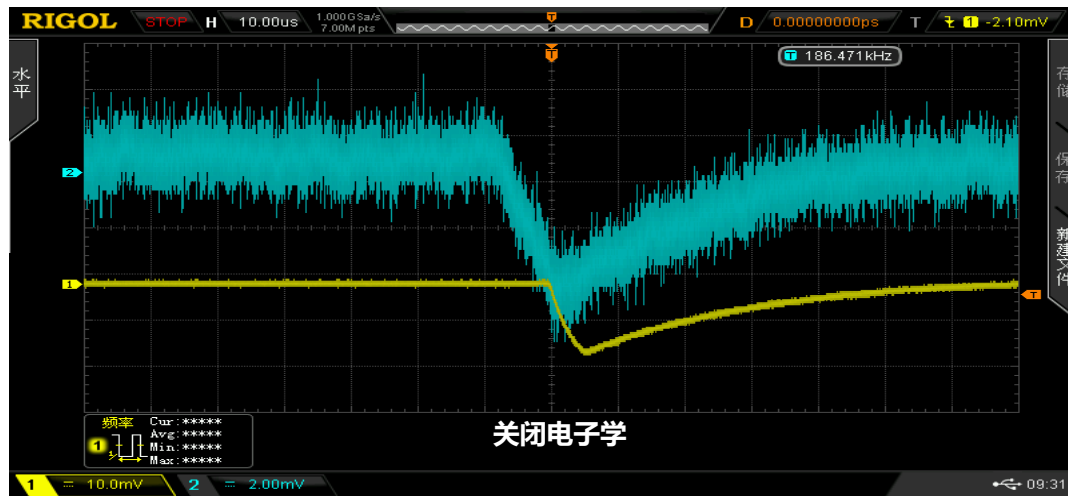
Timestamp: 919936

Number of Hit: 74

Number of Track: 2

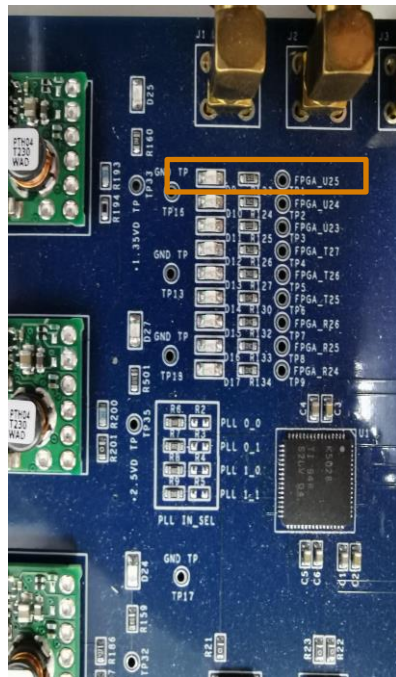
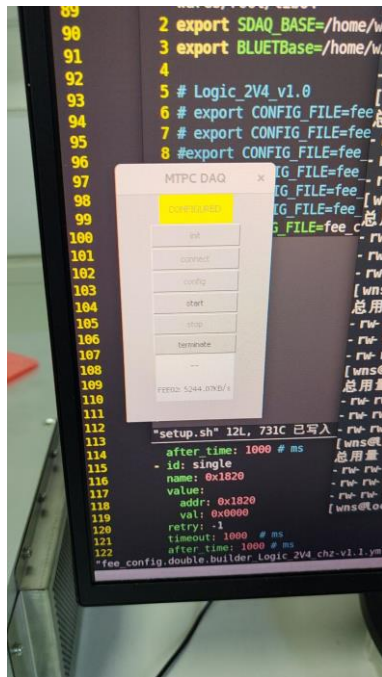
电子学测试

- 阴极噪声
- 开启电子学会让阴极信号噪声明显增大
- 初步判断为通过地线引入的噪声
- 通过接地措施可减小噪声，但仍然偏大
- 对小信号事例，如np散射、 $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应测量不利



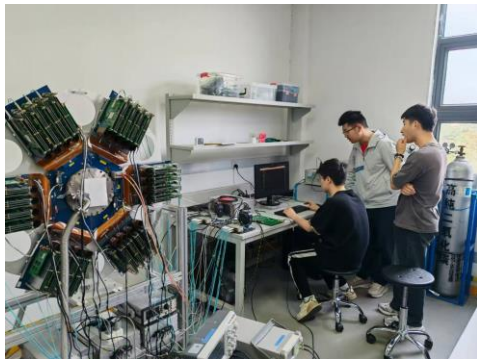
电子学测试

- 更新电子学时钟频率为20MHz
- 使用自触发可得到数据
- 使用TCM触发，电子学无法建立稳定的同步时钟链路，无法采集数据
- 束流实验采用10MHz时钟频率



MTPC操作培训

- 确保每个**实验执行人**了解探测器系统细节
- 组织现场的探测器实操和讨论，了解硬件和软件系统中的可能的bug
- 为实验设计和数据分析的可靠性提供保障



● 已培训实验执行人：

- 褚天志（深大）、陈海铮（西交）、陈宏昆（中大）、白浩帆（北大）、任文凯（北大）
- 邬泽鹏（北大/西核院）、刘亦辉（原子能院）、田涛（原子能院）

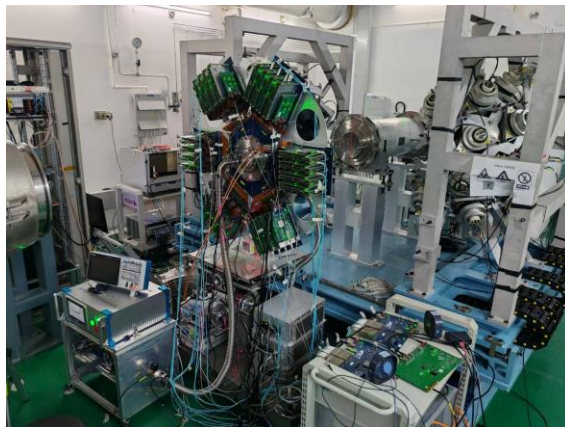
束流实验

- 2024年10月8日~11月8日
- 开展2024年MTPC束流实验:
- $^{235}\text{U}(n,f)$ 、 ^{235}U 三分裂、 np 散射、 $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应

$^{235}\text{U}(n,f)$ 、 ^{235}U 三分裂	北京大学	10月12日~10月18日
--	------	---------------

np 散射	高能所	10月18日~11月2日
---------	-----	--------------

$^{17}\text{O}(n,\alpha)$	原子能院	11月2日~11月8日
---------------------------	------	-------------



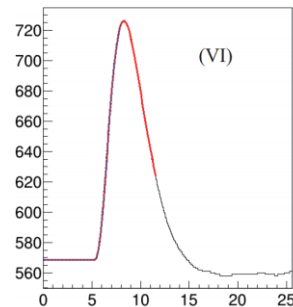
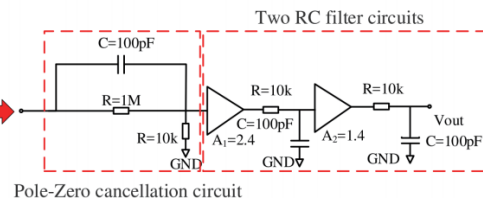
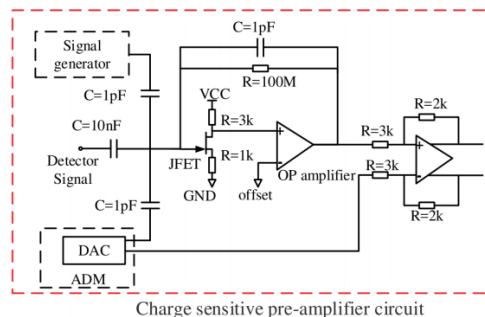


报告内容

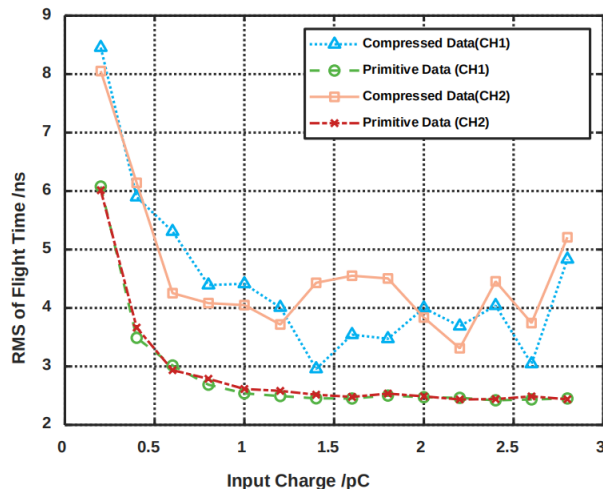
- MTPC概况
- 研究进展
- 问题讨论
 - 时间
 - 空间
 - 能量
 - 实验设计
- 发展规划

时间分辨

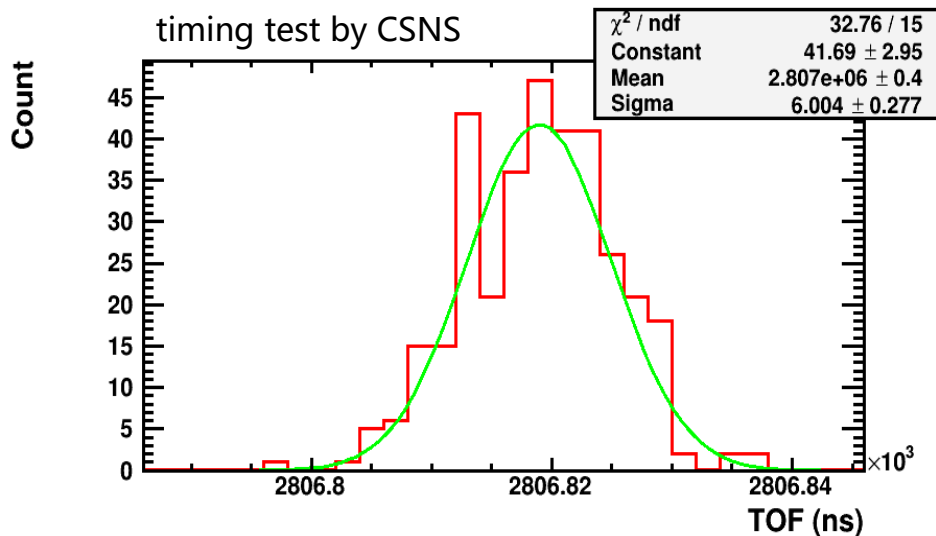
- 电子学信号成形算法
- 最初设计参考了AGET电子学参数
- PZ&RC²成形时间1us
- 提高信噪比和能量分辨
- 信号源测试时间分辨率在ns量级
- 测试在大信号条件下进行



timing test by USTC

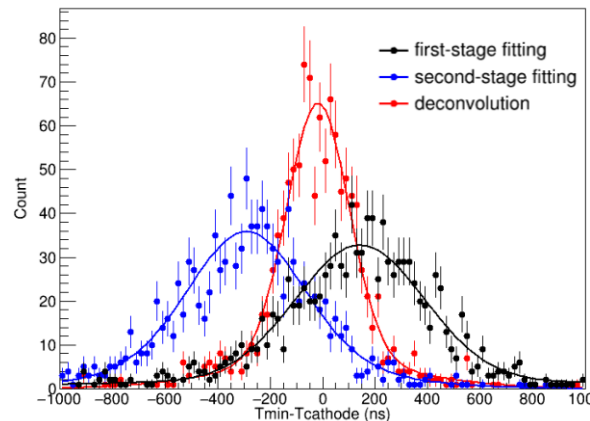
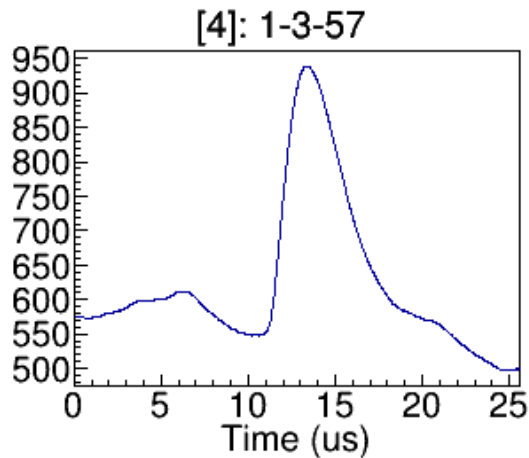
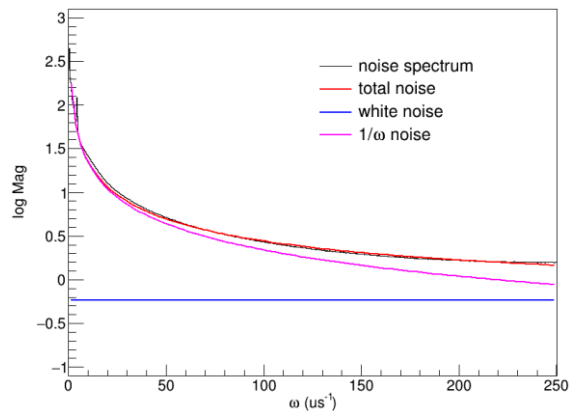


timing test by CSNS



时间分辨

- 实验中噪声频谱成分主要集中在低频，与电子学成形时间1 μ s处于同一频段
- 预期通过信号成形过滤高频噪声，无法过滤低频噪声（基线晃动）
- 采用不同方法定时误差均较大（几十ns~百ns）

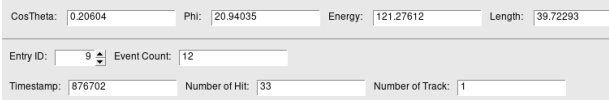
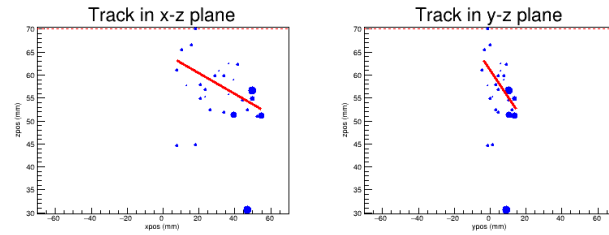
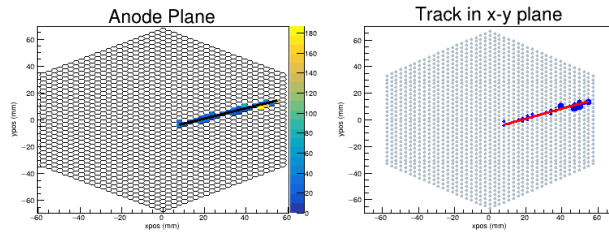
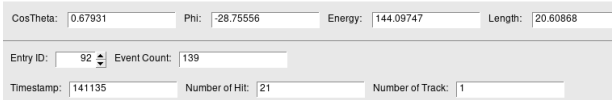
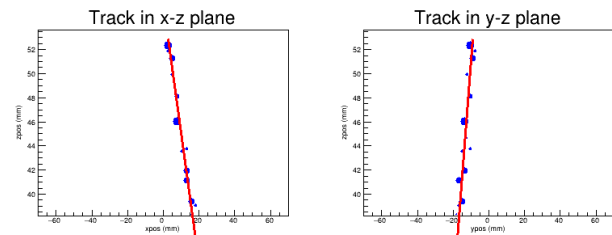
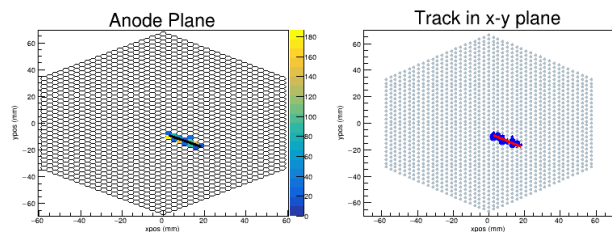
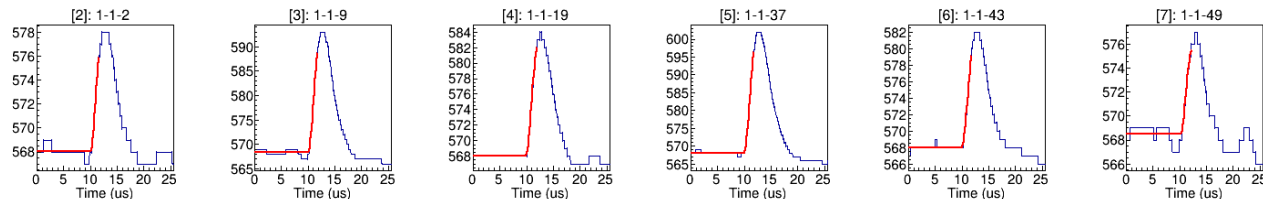


时间分辨与z方向重建

- 不同事例的pad信号幅度不同
- pad信号幅度影响z方向重建质量
- 不同出射角度的氙粒子:

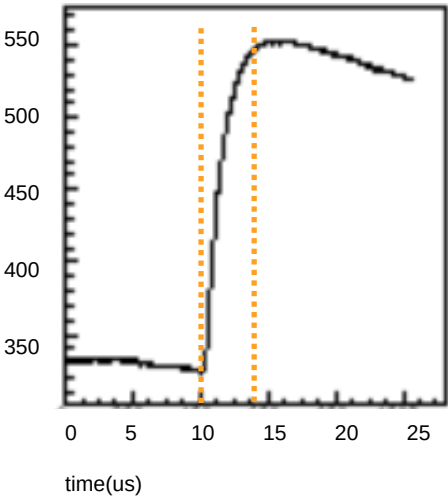
□ cos值大事例z方向重建效果好

□ cos值小事例z方向离散大



电子学设计考虑

- 方案1：减小成形时间为百ns，仅保留信号快成分
 - ❑ 问题：阴极原始信号是us量级，会降低阴极信噪比
- 方案2：曲线PZ和RC²，直接采集前放波形
 - ❑ 问题：前放带宽和摆率偏低，上升沿宽度偏大，信噪比低时会影响定时精度



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

Data Sheet

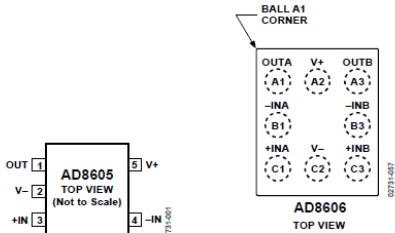
AD8605/AD8606/AD8608

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

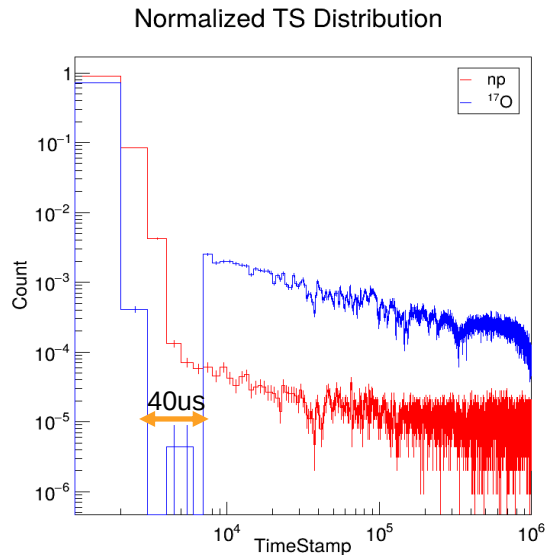
PIN CONFIGURATIONS



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%, 0 V to 2 V step, $A_v = 1$	<1	μ s
Unity Gain Bandwidth Product	GBP		10	MHz
Phase Margin	Φ_M		65	Degrees

TOF测量死时间

- 常规触发逻辑，两个相邻触发间隔最小值约40us
- 高能区计数率高的情况下会有死时间
- 通过双触发逻辑解决，目前工作不稳定，需要继续调试
- 陈朕论文中测试相邻两个Trigger最小间隔为25.8us
- 与实验结果40us不一致，测试条件不一样？



4.3 Sustained trigger rate

The sustained trigger rate is limited by the dead time of trigger and the sustained data rate. To measure the dead time of the trigger, two signals with a certain time interval were injected into the PAM. The width of the hit signal generated from the input signal is about $0.9\mu\text{s}$. As shown in figure 16, when the time interval of the two hit signals is $25\mu\text{s} \sim 25.8\mu\text{s}$, the time interval of two triggers generated from the two hit signals is always $25.8\mu\text{s}$. When the time interval is below $25\mu\text{s}$, the second trigger is lost. Therefore, the minimum time between two triggers, which also represents the dead time, is $25.8\mu\text{s}$, corresponding to a maximum 38.7kHz trigger rate.

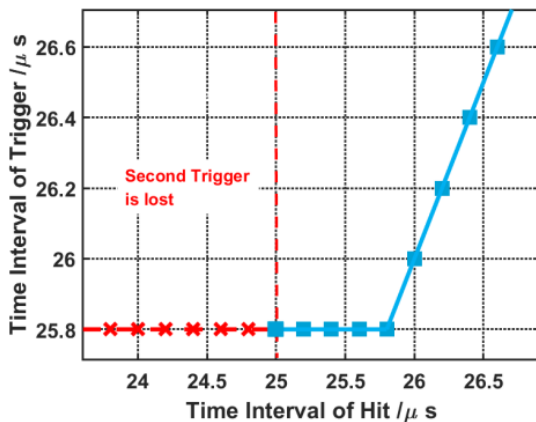
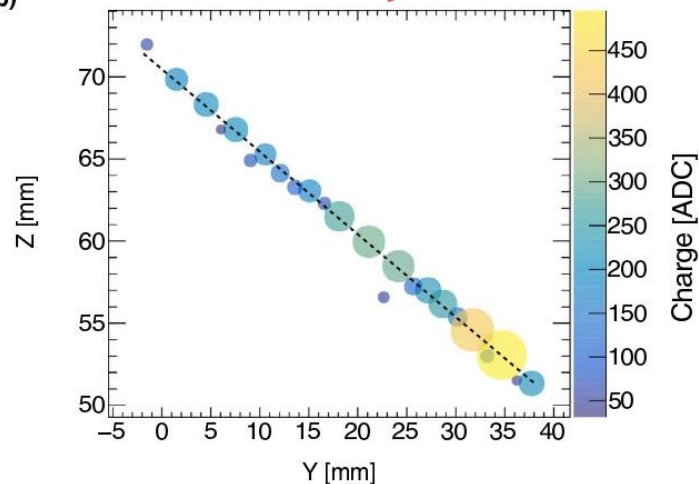
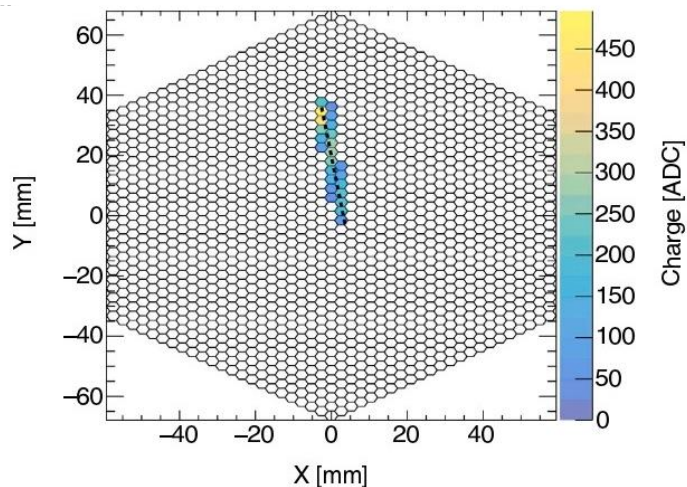
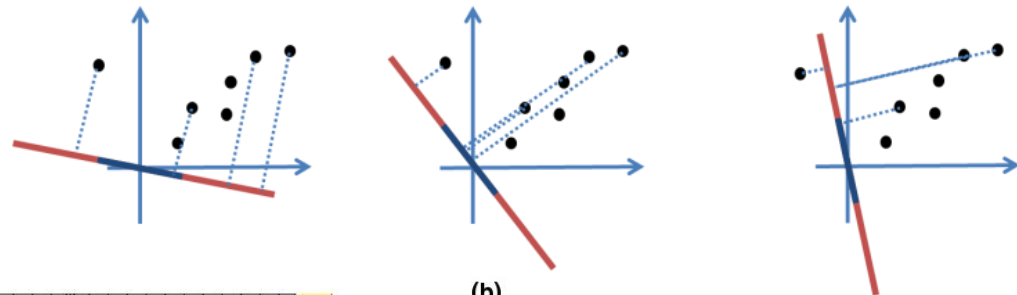


Figure 16. The time interval of the two triggers.

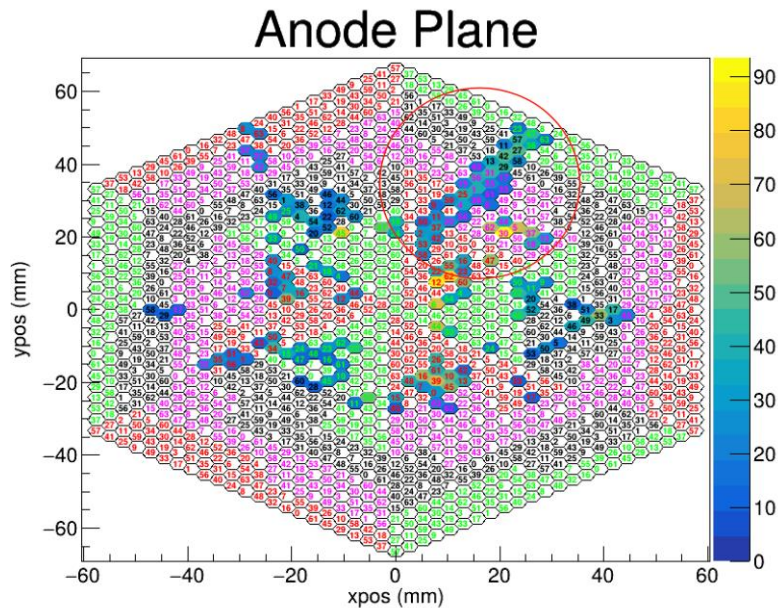
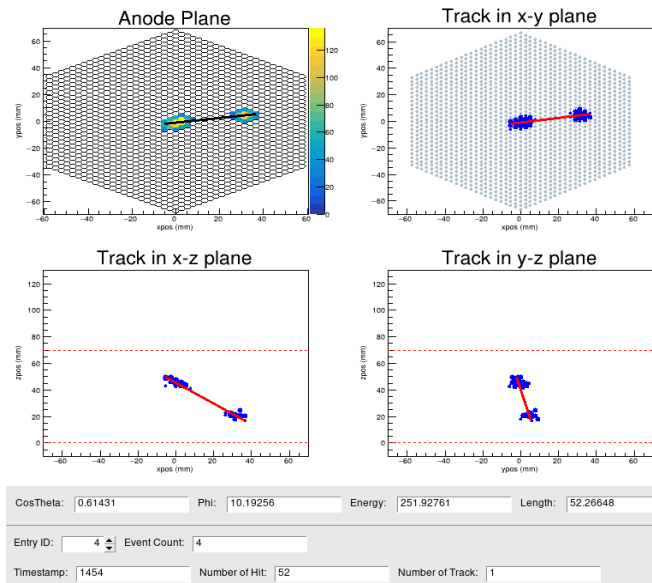
径迹重建算法

- 目前算法：霍夫变换
- 简单直线径迹有较好重建效果



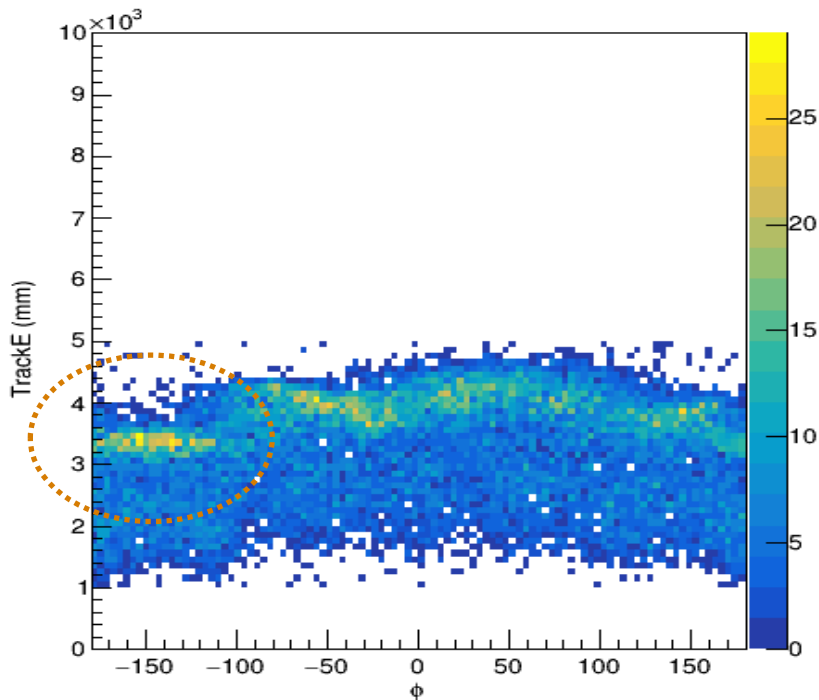
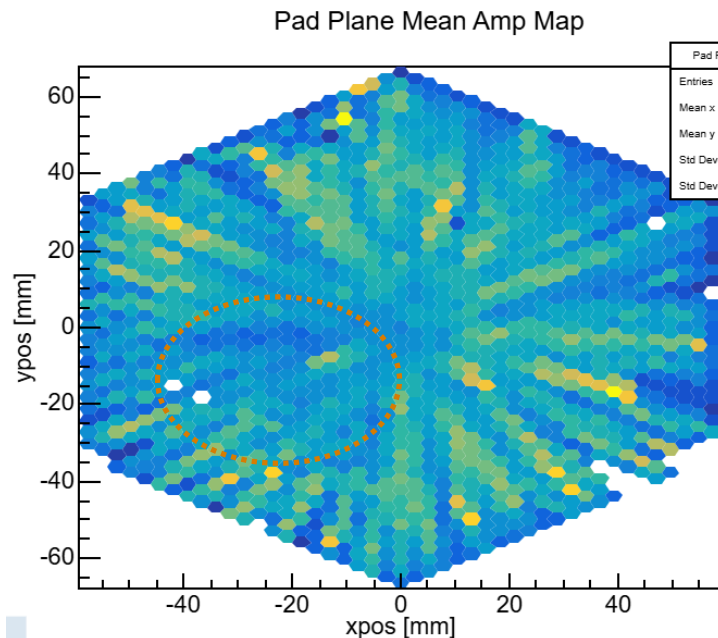
多重事例叠加

- 高能区计数率高，多重事例叠加
- 已有的霍夫变换方法会将不同事例hit重建为一条径迹
- 在强干扰本底中挑选所需事例，需要升级径迹重建算法



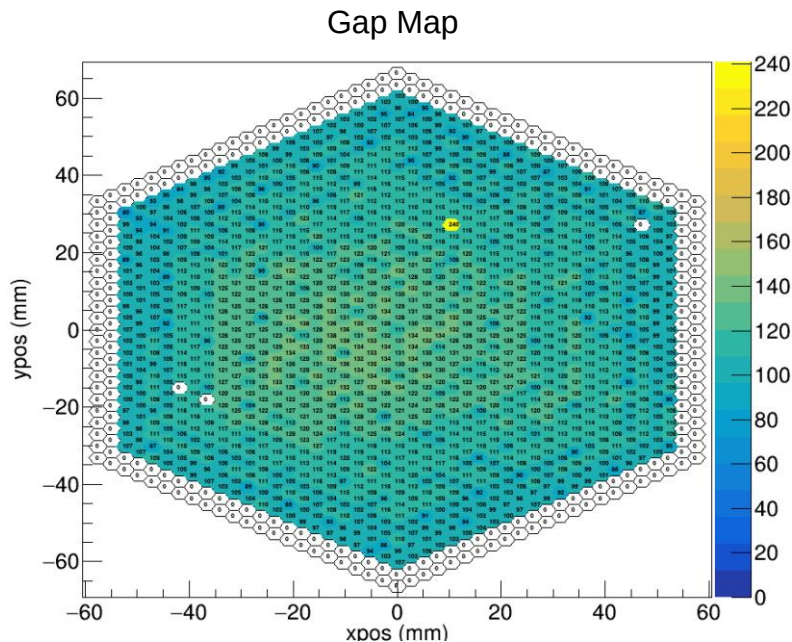
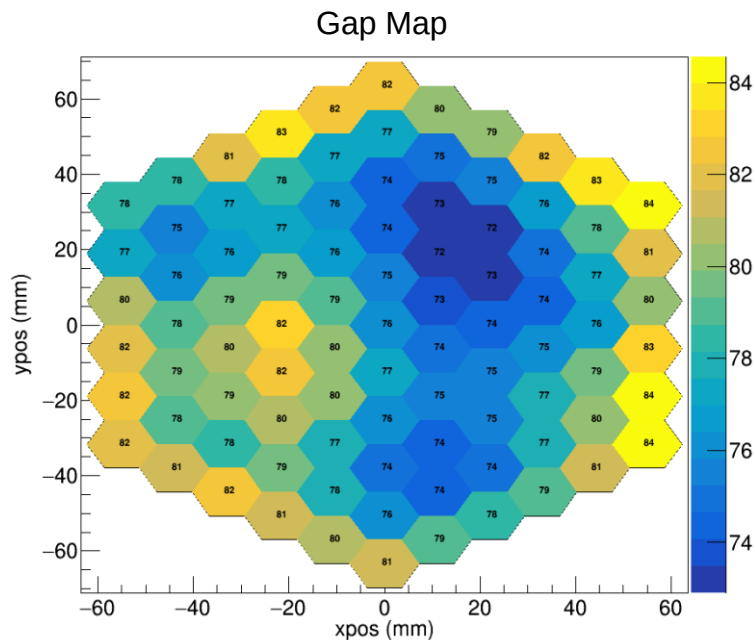
阳极板Micromegas增益

- 目前实验的阳极板Micromegas左右增益有差异
- 需要进行刻度提高能量分辨



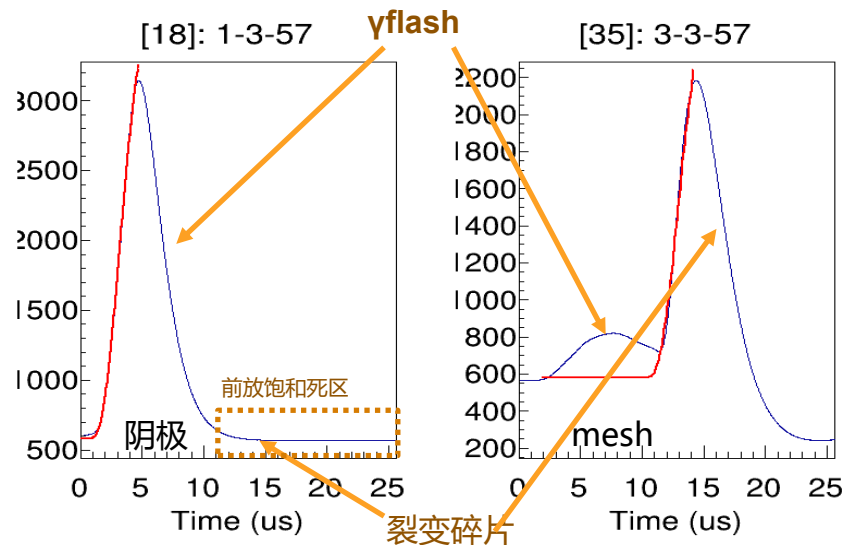
阳极板气隙刻度

- 目前采用2中方法进行刻度：
- 增益曲线拟合法：参考 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1039 (2022) 167157
- mesh注入信号法：通过测量mesh和阳极之间电容得到气隙厚度
- 两种方法结果差异较大



实验配置需求差异

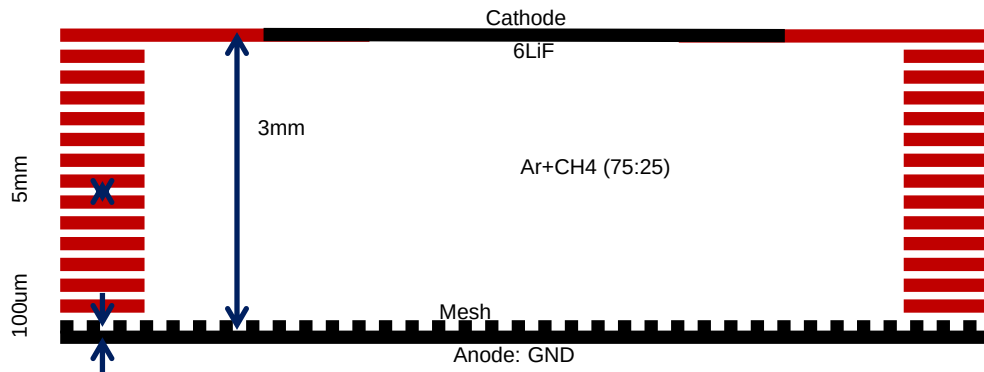
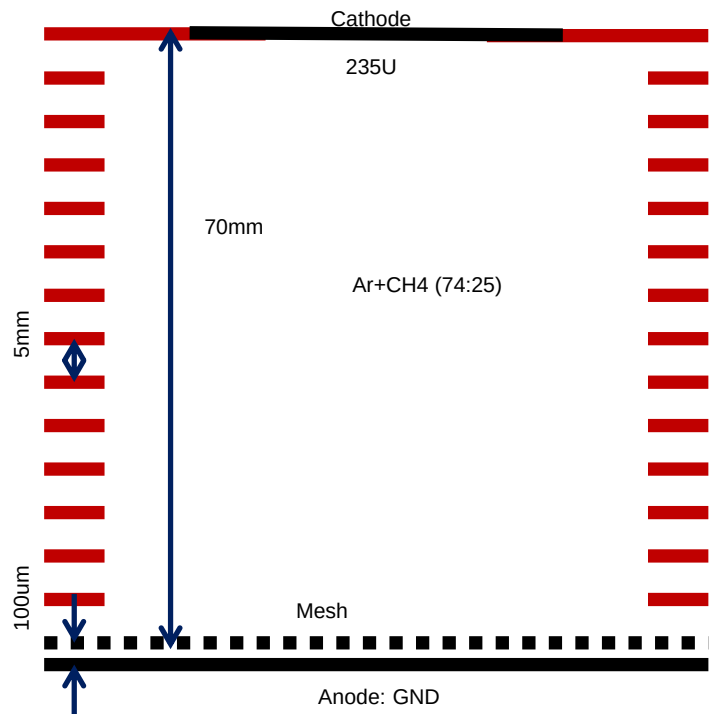
- 2024年3个实验，实际的实验需求配置有差异
- 束流实验中更换硬件所需时间太长，3个实验用相同配置
- 阴极增益需求：
 - $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应：采用 $\phi 30$ 束斑， γ flash信号大(MeV)，裂变碎片信号大(百MeV)，阴极前放需要配置为低增益
 - np散射：采用 $\phi 3$ +铅砖束斑，无 γ flash信号，np散射信号小(百keV)，阴极前放需要配置为高增益
 - $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应： $\phi 60$ -30-30束斑， γ flash信号大(MeV)， α 事例信号小(百keV)，阴极前放需要配置为大动态范围



实验配置需求差异

- 场笼配置需求:

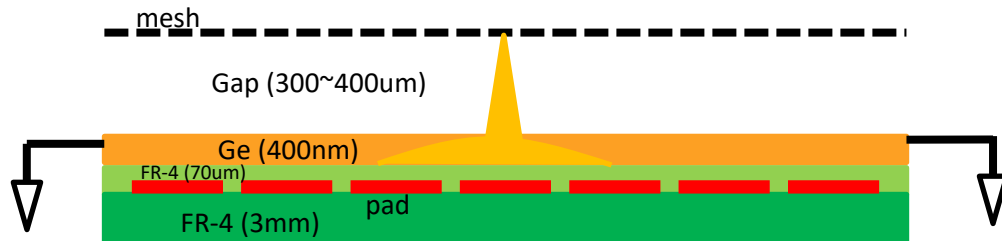
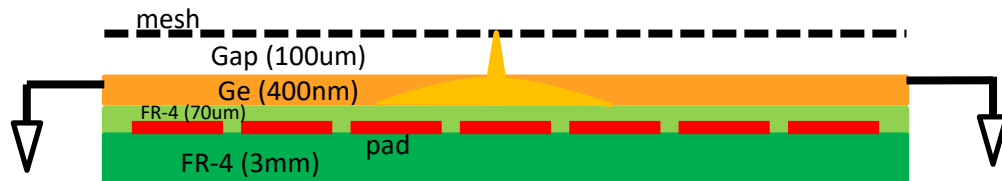
- $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应: 射程相对长, 需要径迹全沉积, 需要大漂移距离
- np散射、 $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应: 射程短、计数率高、阳极pad定时、需要小漂移距离



实验配置需求差异

- Micromegas增益需求:

- ❑ $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 反应: 碎片能量大, 低增益满足使用需求, 0.6bar气压与100um雪崩气隙适配
- ❑ np散射、 $^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)$ 反应: 粒子能量小需要高增益, 0.15bar气压与100um雪崩气隙不适配
- ❑ 低气压条件下, 电子平均自由程增大, 需要采用厚气隙Micromegas, 以同时满足增益、能量分辨和稳定性要求





报告内容

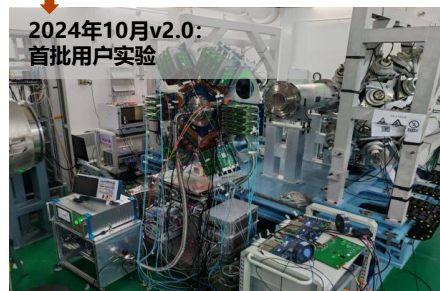
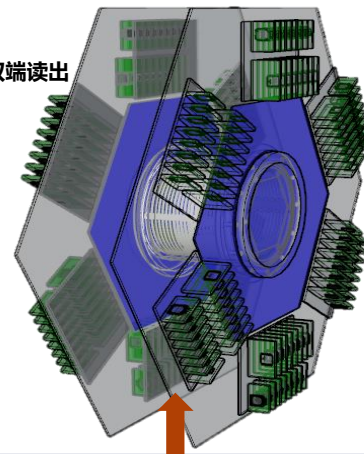
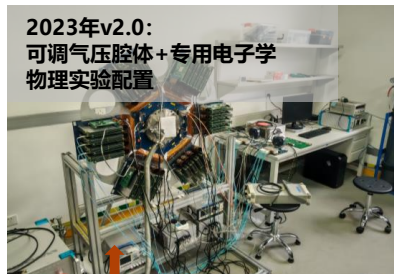
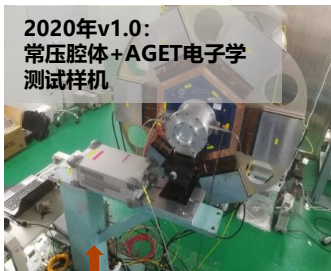
- MTPC概况
- 研究进展
- 问题讨论
- 发展规划
 - 实验方向
 - 探测器技术
 - 远期发展

MTPC实验研究方向

- 3个实验研究方向
- 同一反应道开展持续测量以提升数据质量

标准截面		核物理前沿		重要需求	
${}^6\text{Li}(n,t)$	2023年2月	${}^{17}\text{O}(n,\alpha)$	2024年10月	$n+{}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t + n$	2027年~
$\text{H}(n,n)$	2024年10月	${}^{25}\text{Mg}(n,\alpha)$	2025年~		
${}^{235}\text{U}(n,f)$	2024年10月	${}^{235}\text{U}$ 三分裂	2024年10月		
${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$	2025年~				

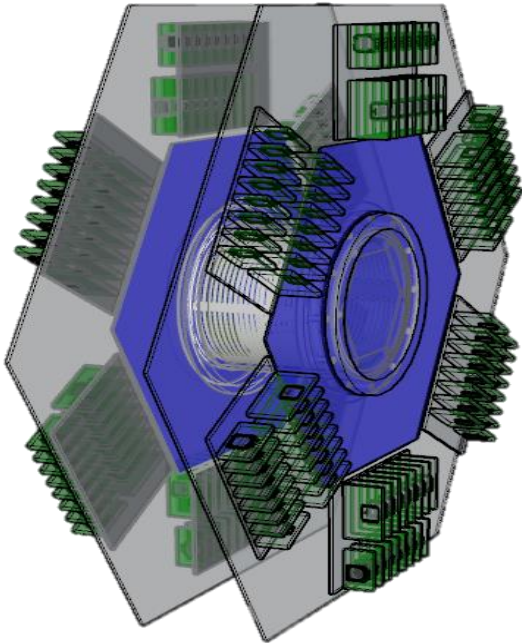
探测器发展计划



探测器发展计划

- MTPC-v2.1
- 后续实验将根据具体需求，采用优化的实验配置

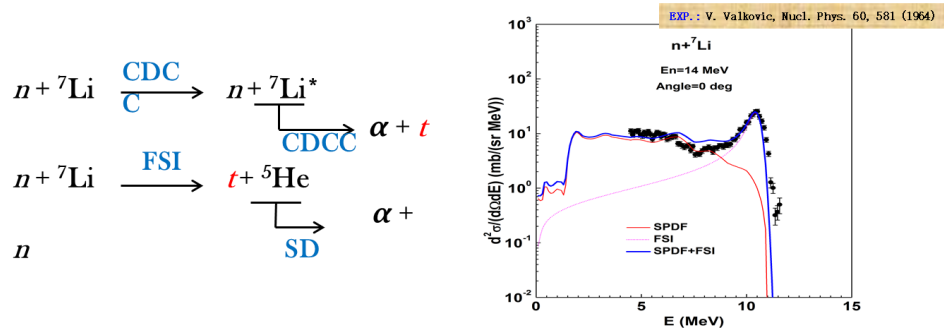
技术点	发展计划
阴极电路	增益档位选择
场笼	根据实验需要设置漂移距离、电场比(E_a/E_d)、分压电阻值
阳极板	中心减薄设计
Micromegas	设置3种气隙厚度 (100um、500um、1000um) 适配不同气压的实验
电子学优化	成形算法、时钟频率、触发间隔 (死时间)



重要需求截面数据

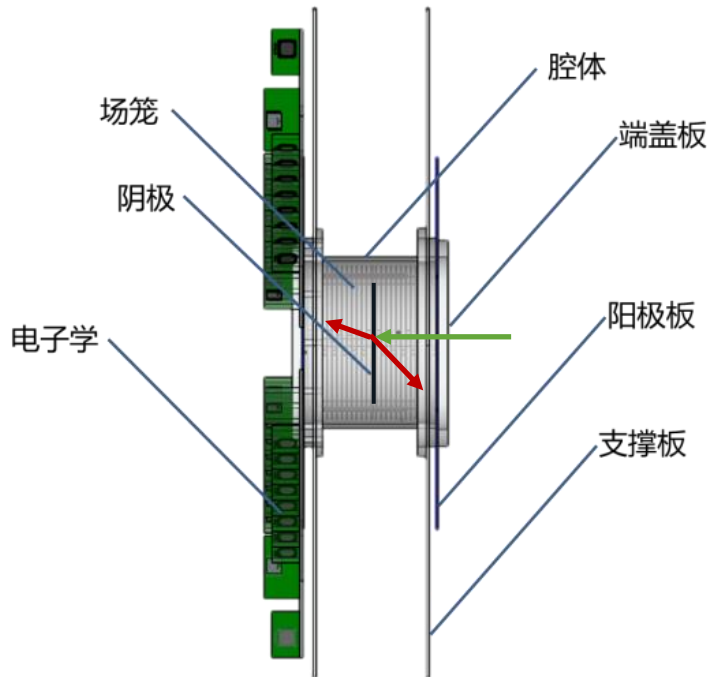
- $n+{}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t + n$
- 对国防技术研究与氚同位素生产研究中有重要意义
- 使用MTPC双端构型进行测量，实现2个带电粒子符合测量

20MeV以下中子与锂-7反应产氚有两个反应道（1组实验）：



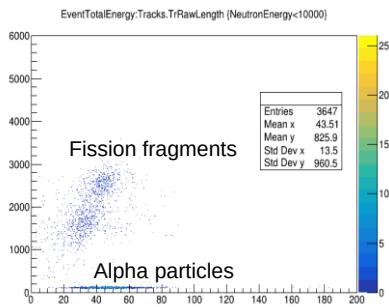
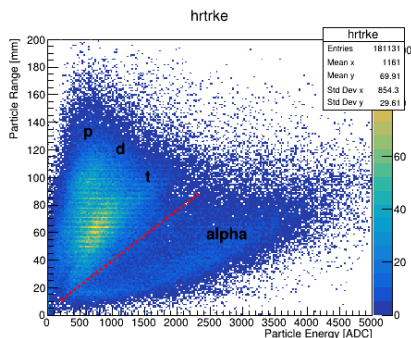
➤ 需要多组 ${}^7\text{Li}(n, xT)$ 的双微分截面实验，20MeV以下。

- ✓ 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

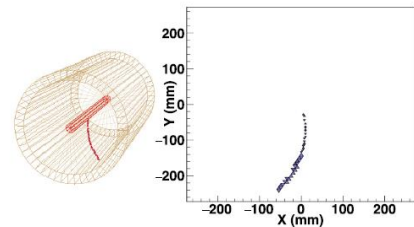
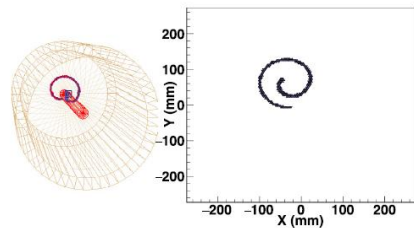
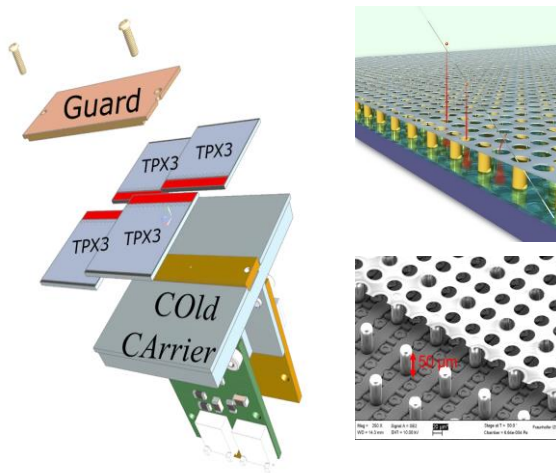


远期规划

- 只靠径迹信息，同位素核鉴别能力有限
- 轻核：氦气鉴别
- 重核：裂变产物鉴别

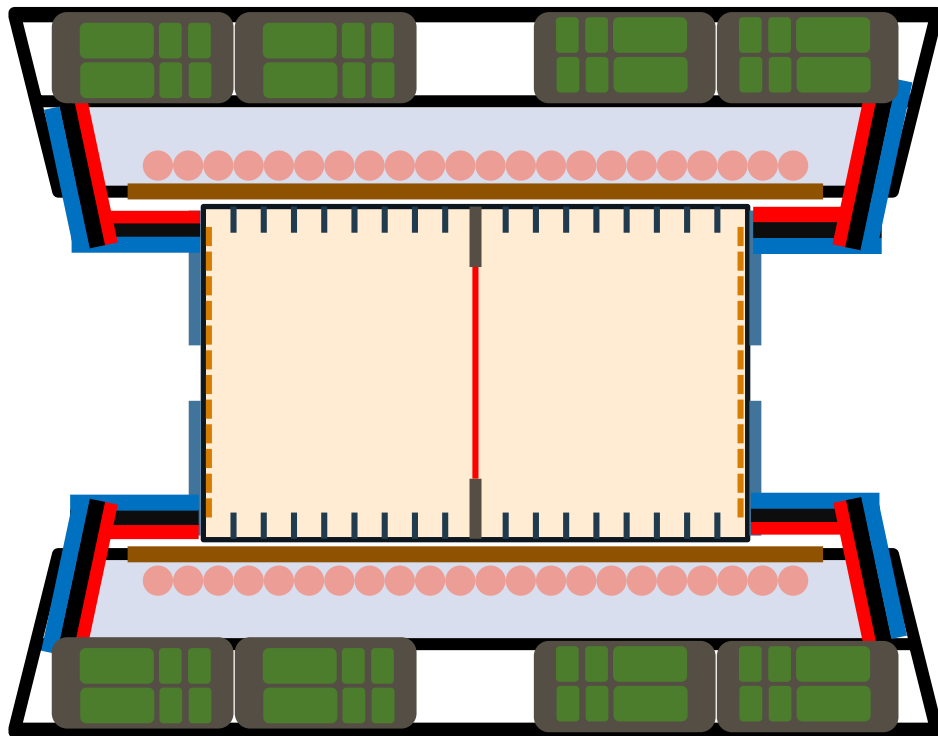


- 提升PID能力的技术手段：
- 增加对A/Z敏感的参数维度
- 已有参数：E、L
- 可能参数：dE/dx、dN/dx、Q/p
- 对时间精度、能量精度、径迹重建精度有很高要求



MTPC Pro

- 采用新螺线管磁谱仪构型
- 采用新电子学技术
- 实现对同位素核的有效鉴别
- 面对各种理论与技术挑战
- 关注物理研究的最新进展
- 关注技术发展最新进展
- 联合开展研究



A wide-angle photograph of a snowy mountain landscape under a clear blue sky. In the foreground, a skier with a large orange backpack is seen from behind, moving up a slope. Further up the slope, four other skiers are visible, spaced out. The background features rugged, snow-covered mountain peaks and some low-lying clouds. The overall scene is bright and clear.

感谢各位老师对MTPC项目的支持！
期待更多老师和同学的加入MTPC实验研究！

谢谢！