



多用途时间投影室在中子核反应 实验测量中的应用

报告人：樊瑞睿、易晗

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

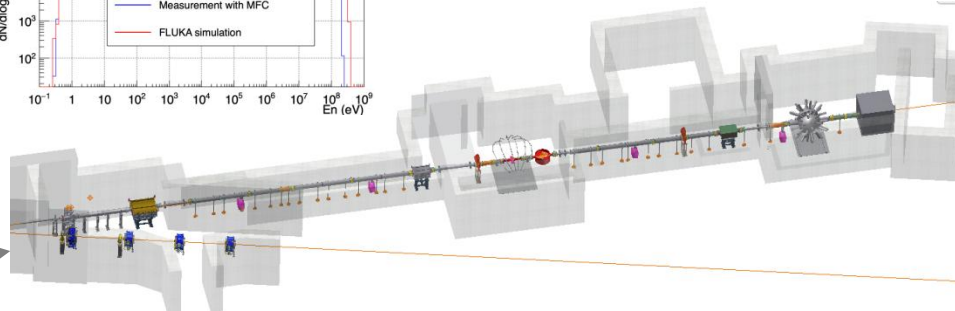
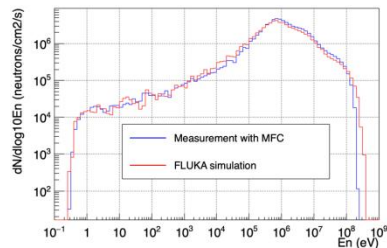
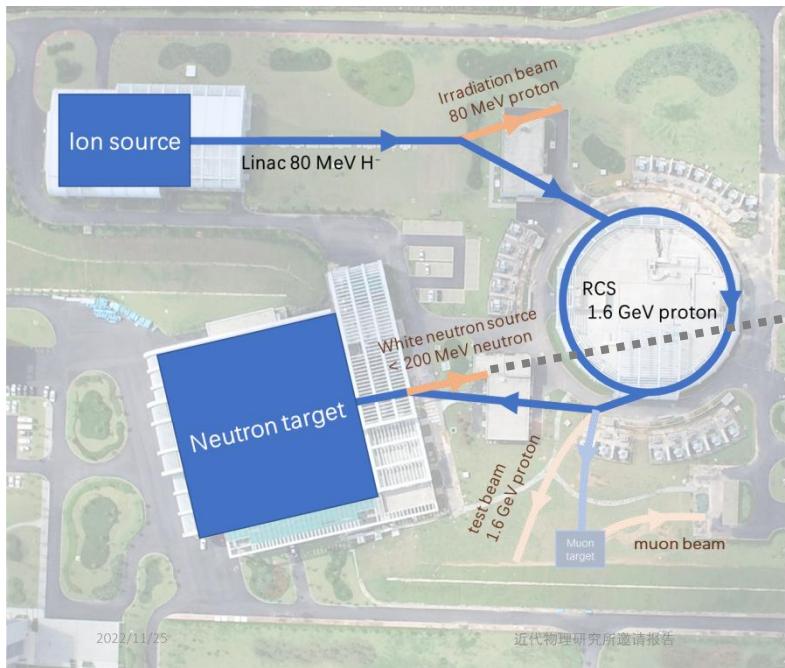
2024年7月16日

NED&CAGD2024@青岛

报告内容

- 项目概况
- 探测器系统设计
- 模拟与分析程序
- 实验方法研究
- 物理实验
- 报告总结

CSNS反角白光中子源

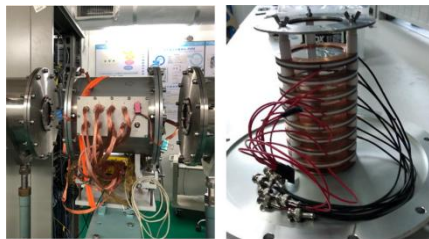


- CSNS反角白光中子源(Back-n): 国内首条宽能区强流白光中子束线
- 覆盖能区: 热中子~300MeV, 流强: $\sim 10^7/\text{cm}^2/\text{s}$
- 中子核数据测量研究:
 - 裂变截面
 - 全截面测量
 - 轻带电粒子出射反应截面测量
 - 中子俘获反应截面测量

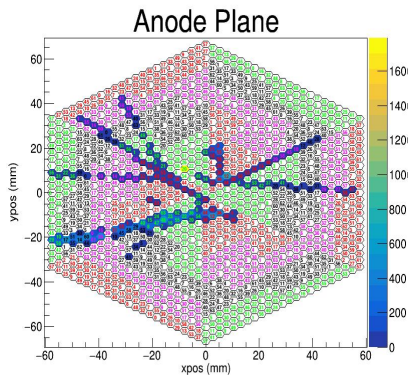
Back-n带电粒子探测器装置



- LPDA: 轻带电粒子探测器阵列
- 特点: 16个 ΔE - $\Delta E - E$ 单元、立体角 $\sim 0.2\%$ 、测量轻粒子(p,d,t, α)

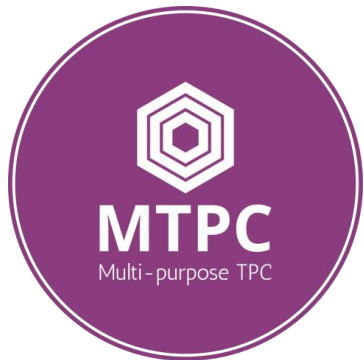


- FIXM: 裂变电离室
- 特点: 8个读出通道、无空间分辨、立体角 2π 、测量重核



- 对于复杂产物核反应, LPDA和FIXM均无法进行测量
- 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**MTPC(Multi-purpose TPC)**解决方案

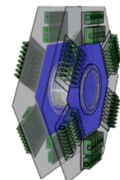
项目概况



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





● 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

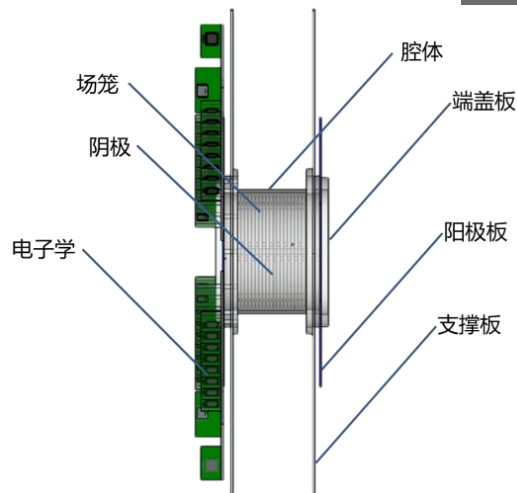
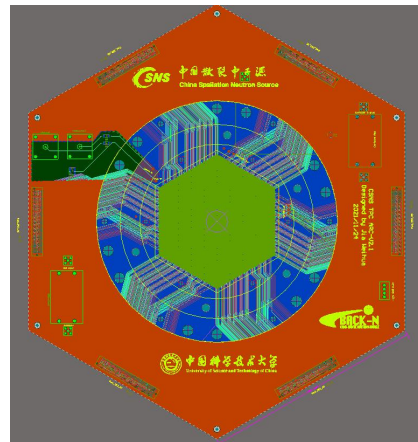
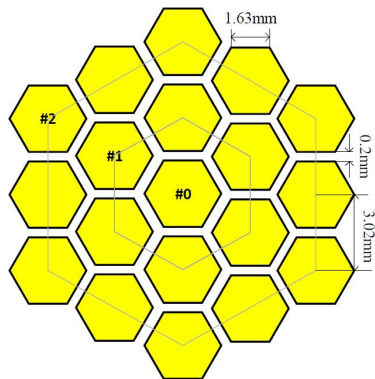
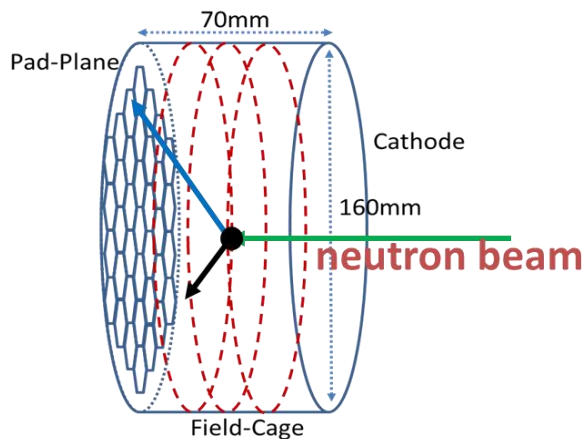
- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线

● 物理实验体系

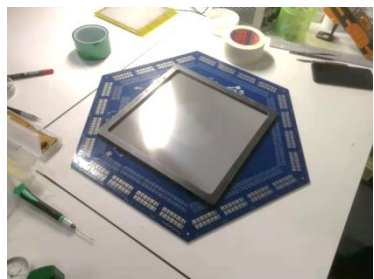
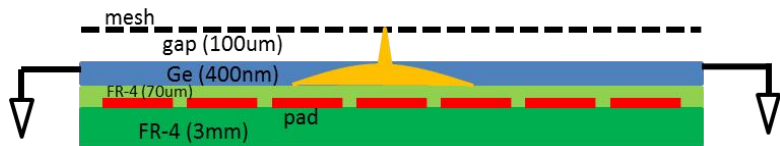
• 中子核反应标准截面、核物理前沿、重要需求相关截面

探测器结构

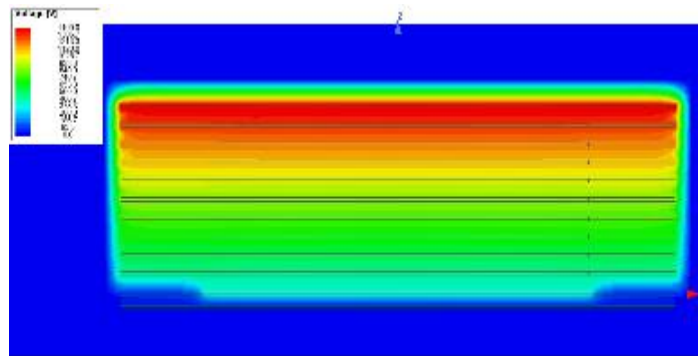
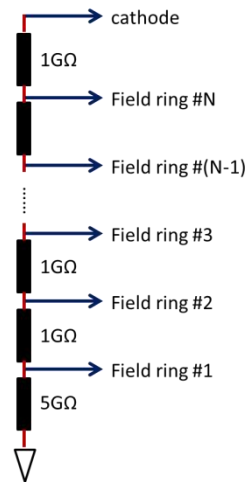
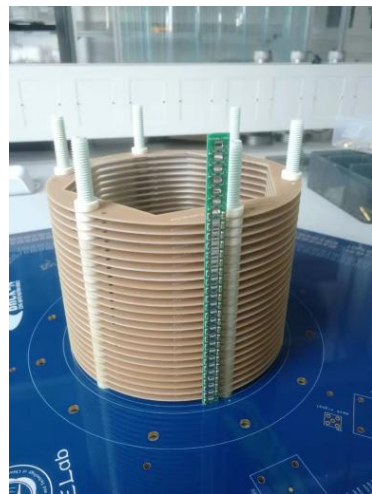
- 场笼结构为圆柱体
- 漂移区距离可调，适应不同实验需求
- 电子增益结构采用Micromegas
- 读出阵列采用六边形密堆结构
- 1519个阳极pad，每个pad边长64mil，阳极区边长约68mm



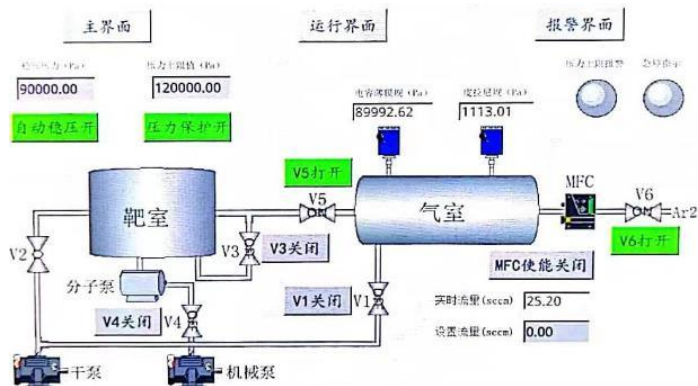
探测器结构



- 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16µm、厚度25µm、LPI-400
- 透过率55%、张力30N；
- 增益区厚度100µm，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



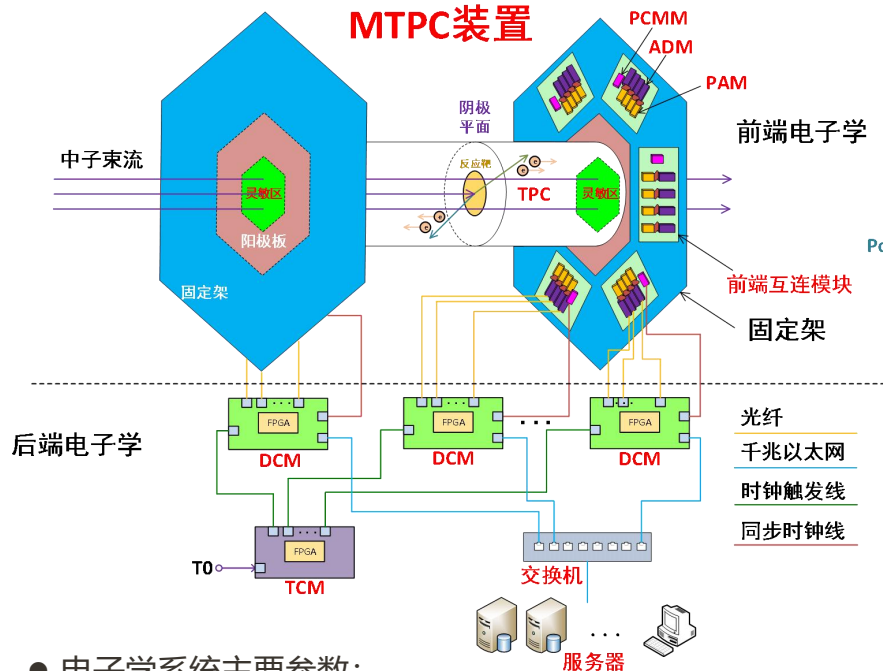
气压气路系统



- 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



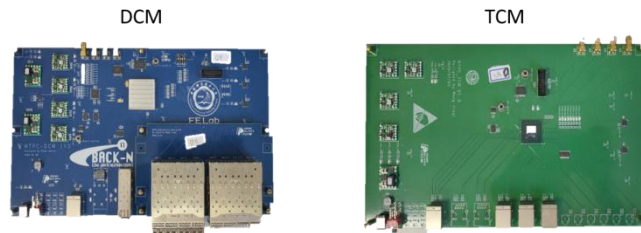
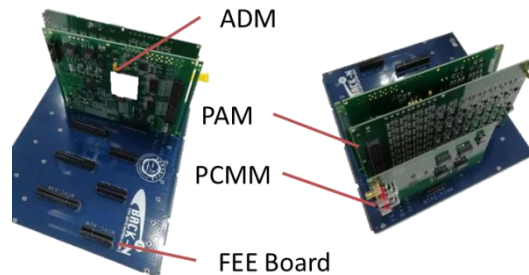
读出电子学@USTC



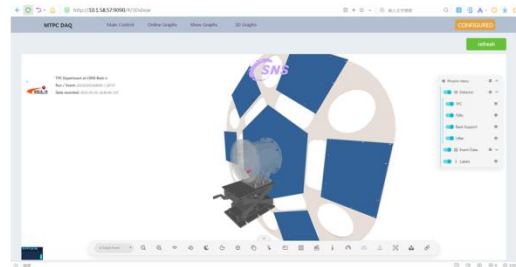
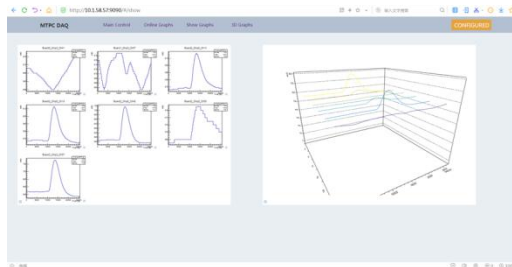
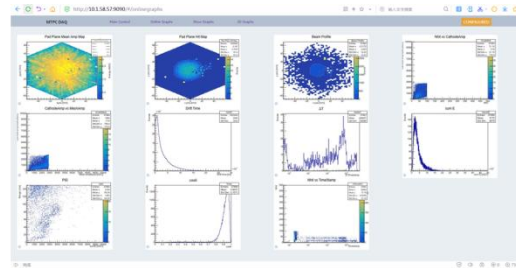
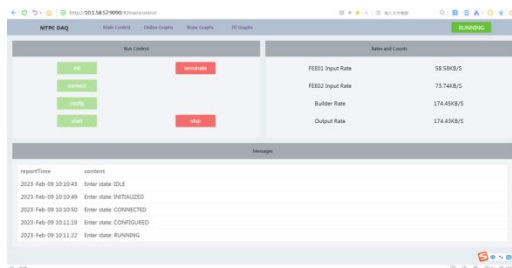
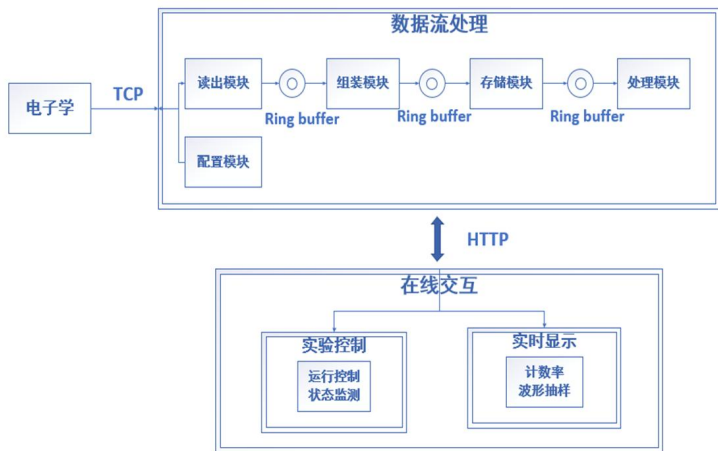
● 电子学系统主要参数:

- ❑ 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

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



DAQ软件和在线显示



数据处理软件 (DAQ 核心)

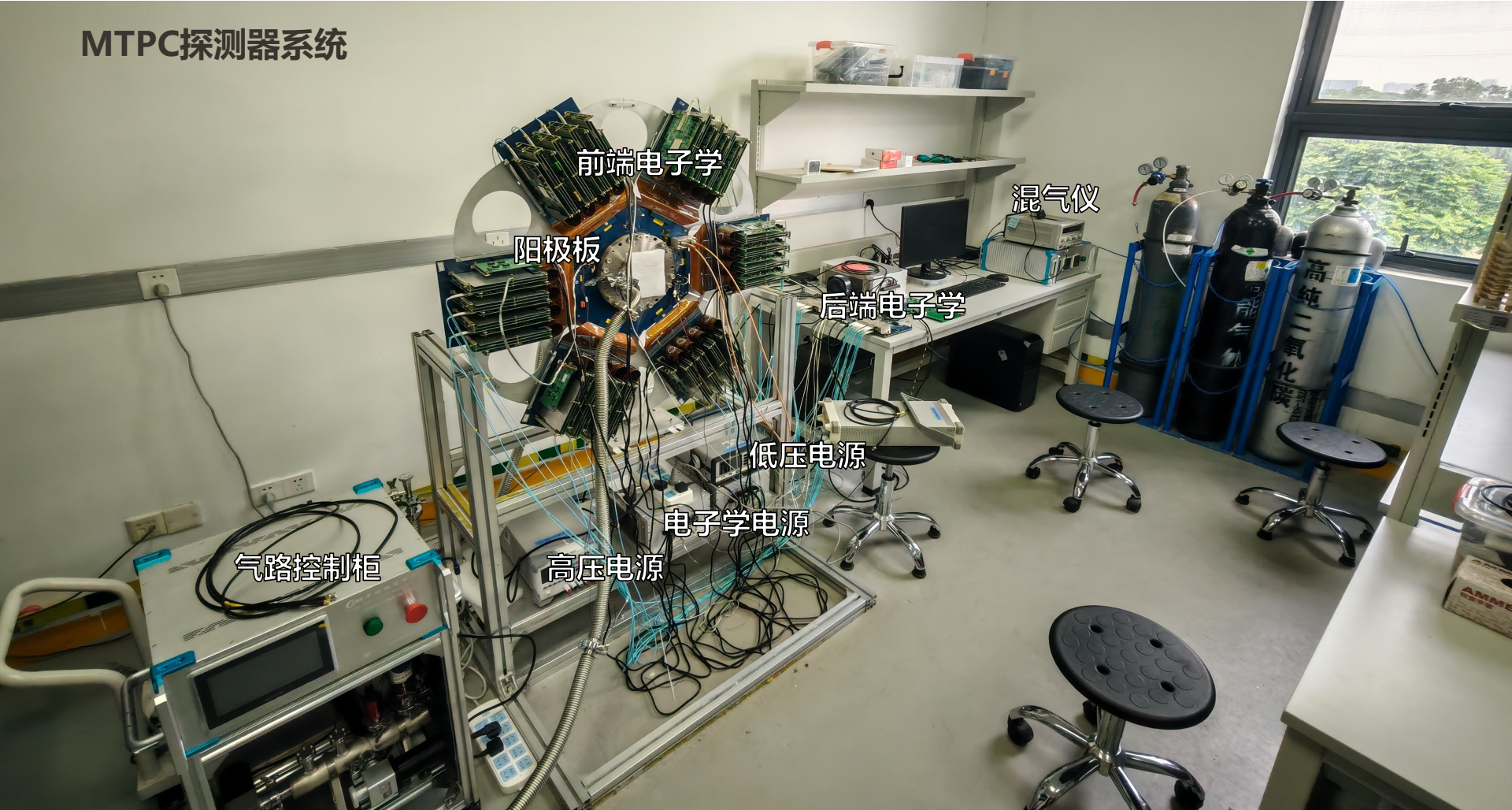
负责承载与数据流相关的工作：
数据的接收、组装、存储和处理

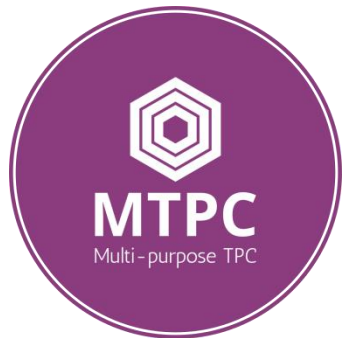


在线交互软件

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





● 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

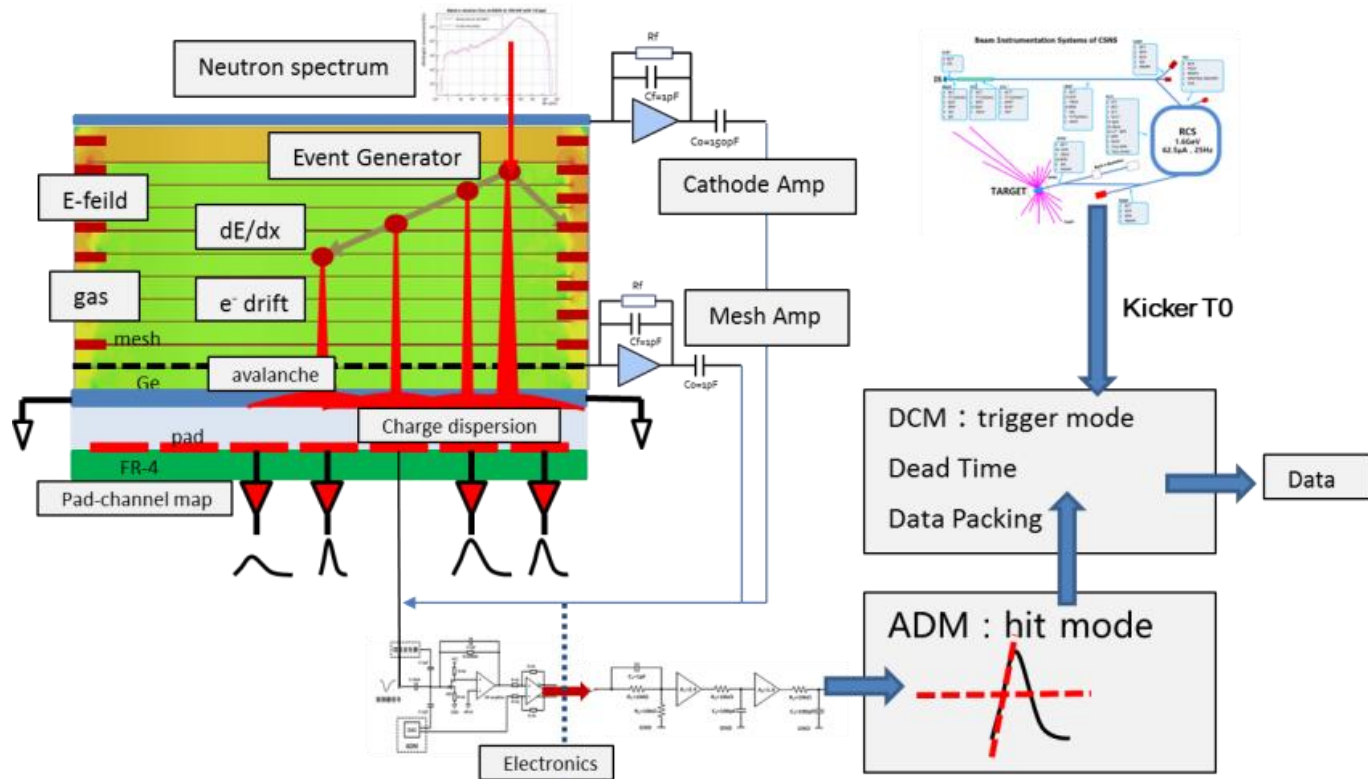
● 物理实验体系

• 中子核反应标准截面、核物理前沿、重要需求相关截面

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



BLUET模拟框架物理模型-事例产生器

- 对于核反应模式：
- 采用TGenPhaseSpace生成核反应相空间参数，基于此开发EventGenerator
- 设定初态粒子核末态粒子，按照质心系均匀分布随机产生粒子相空间参数，物理量按洛伦兹四矢量表示

TGenPhaseSpace Class Reference

Math > Physics Vectors

List of all members | Public Member Functions

Utility class to generate n-body event, with constant cross-section (default) or with Fermi energy dependence (opt="Fermi").

The event is generated in the center-of-mass frame, but the decay products are finally boosted using the betas of the original particle.

The code is based on the GENBOD function (W515 from CERNLIB) using the Raubold and Lynch method F. James, Monte Carlo Phase Space, CERN 68-15 (1968)

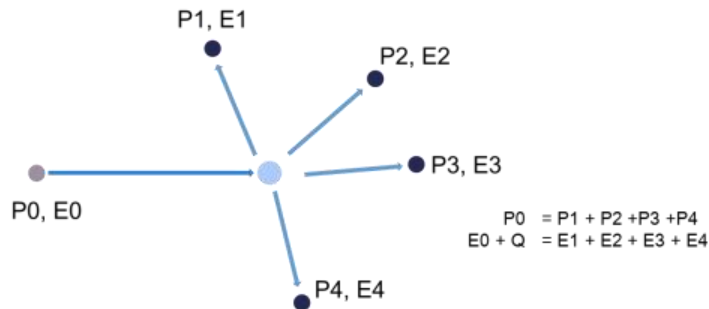
see example of use in [PhaseSpace.C](#)

Note that Momentum, Energy units are GeV/c, GeV

Definition at line 15 of file [TGenPhaseSpace.h](#).

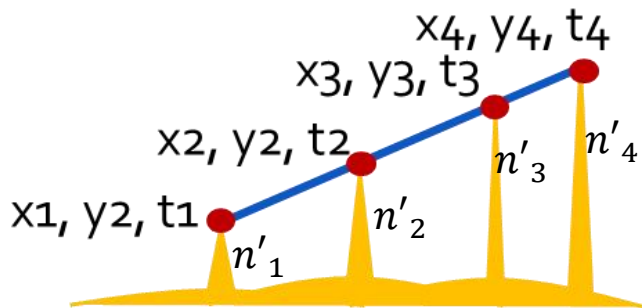
Public Member Functions

	TGenPhaseSpace ()
	TGenPhaseSpace (const TGenPhaseSpace &gen) Copy constructor. More...
	virtual ~TGenPhaseSpace ()
Double_t	Generate () Generate a random final state. More...
TLorentzVector *	GetDecay (Int_t n) Return Lorentz vector corresponding to decay n. More...

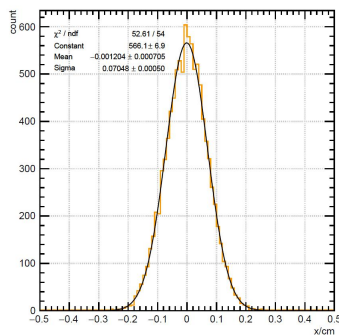
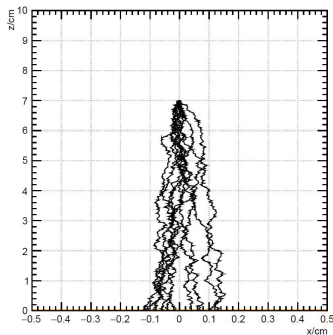


粒子电离过程

- 模拟过程中得到每个hit沉积的电离能损：总沉积能量-非电离沉积能量
- $G4double edep = step->GetTotalEnergyDeposit() - step->GetNonIonizingEnergyDeposit()$
- 每个hit产生的评价电离电子数 $n = E_{dep}/I$
- 每个hit的实际电离电子数按照均值为n的泊松分布近似随机抽样得到 $n' = P(n)$
- 对于 n' 个电子，再对每个电子单独进行扩散抽样，得到每个电子最终的漂移位置和漂移时间



BLUET模拟框架物理模型-电子漂移雪崩



- 粒子随机游走（布朗运动）时间 t 之后，粒子距原点的距离方程
$$\sigma = \sqrt{Dt} = \sqrt{Ds/v} = \sqrt{ds}$$
- 横向扩散： $\sigma_T = \sqrt{d_t z}$
- 纵向扩散： $\sigma'_L = \sigma_L / v = \sqrt{d_l z} / v$
- 横向扩散根据扩散系数进行随机抽象，纵向扩散根据扩散系数进行随机抽样并转化为漂移时间

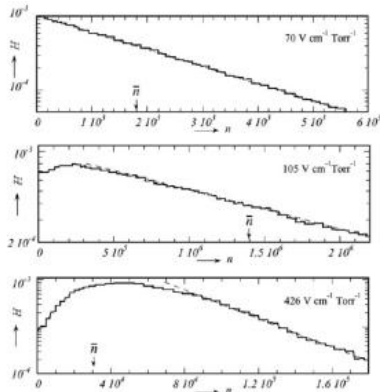
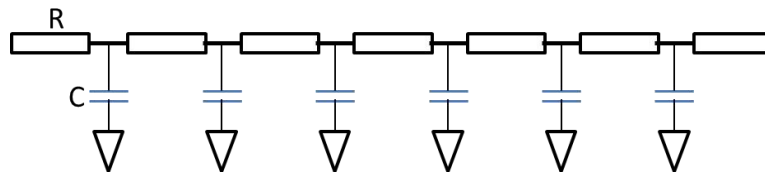
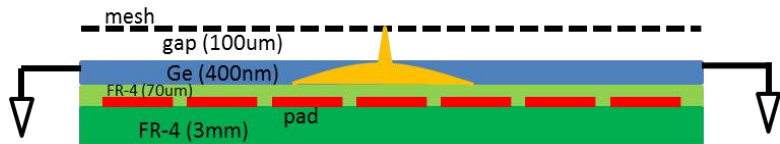


Figure 5.30 Evolution of the avalanche size from exponential to a Polya distribution at increasing values of field (Schlumbohm, 1958). By kind permission of Springer Science+Business Media.

- 根据气体雪崩理论，在低增益下，电子在气体中的每次碰撞独立不相关，那么单个电子的雪崩之后的电子数符合指数分布： $P(n) = e^{-n/G}$
- 设每个电子雪崩之后的电子数为 n_i ，认为电子雪崩之后没有空间弥散，和原初电子坐标相同
- 高增益时单电子增益符合Polya分布（暂未设置）

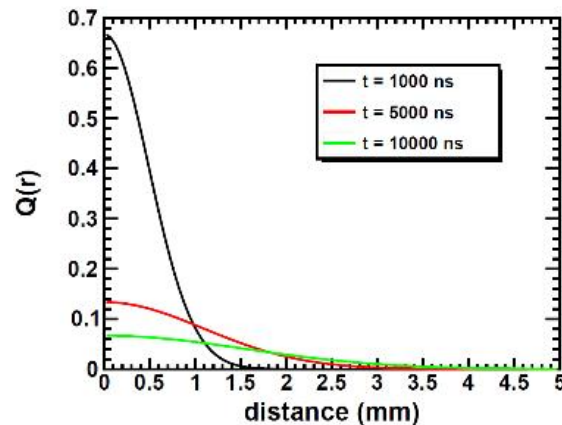
模拟物理模型-阻性层电荷扩散

- 雪崩产生的电荷沉积在阻性锗层上向周围扩散。雪崩中心附近pad上也会产生幅度较小前沿较慢的信号
- 电荷扩散产生的信号大小和快慢，取决于阻性层的面电阻及阻性层与pad层之间的耦合电容



$$\rho(x, y, t) = \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi t RC}} \right)^2 \exp[-(x^2 + y^2)/4tRC]$$

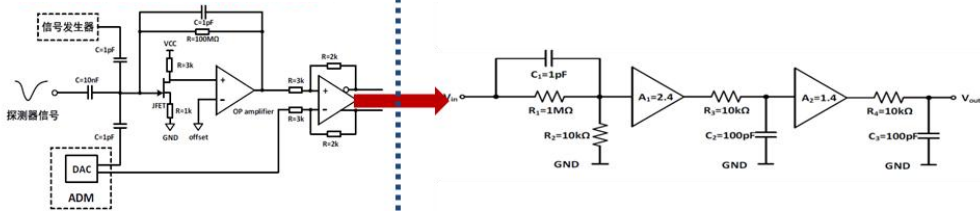
- 电荷扩散呈高斯分布, $\sigma = \sqrt{\frac{2t}{RC}}$, 随时间增加 σ 增大



模拟物理模型-电子学信号卷积

模拟硬件电路：电荷灵敏前放

FPGA数字波形处理：极零-RC1-RC2



$$y(s) = H(s)x(s)$$

● $Q(t)$ 作为输入信号时的各级电路传递函数：

● 前放 $H(t) = 1/C_0(-\frac{t}{\tau_0} + e^{-\frac{t}{\tau_r}})$

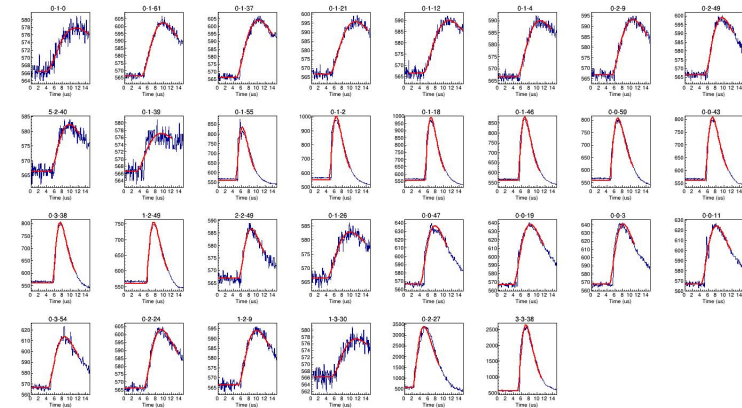
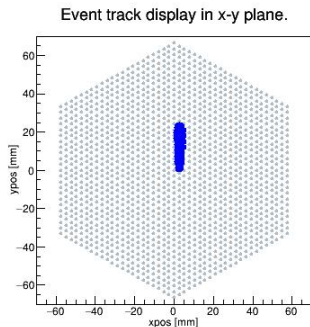
• $\tau_0 = RC$, 前放积分时间常数; τ_r : 前放信号上升沿时间常数

● 极零 $H(t) = \delta(t) + 1/\tau_0(1 - \frac{\tau_0}{\tau_1})e^{-t/\tau_1}$

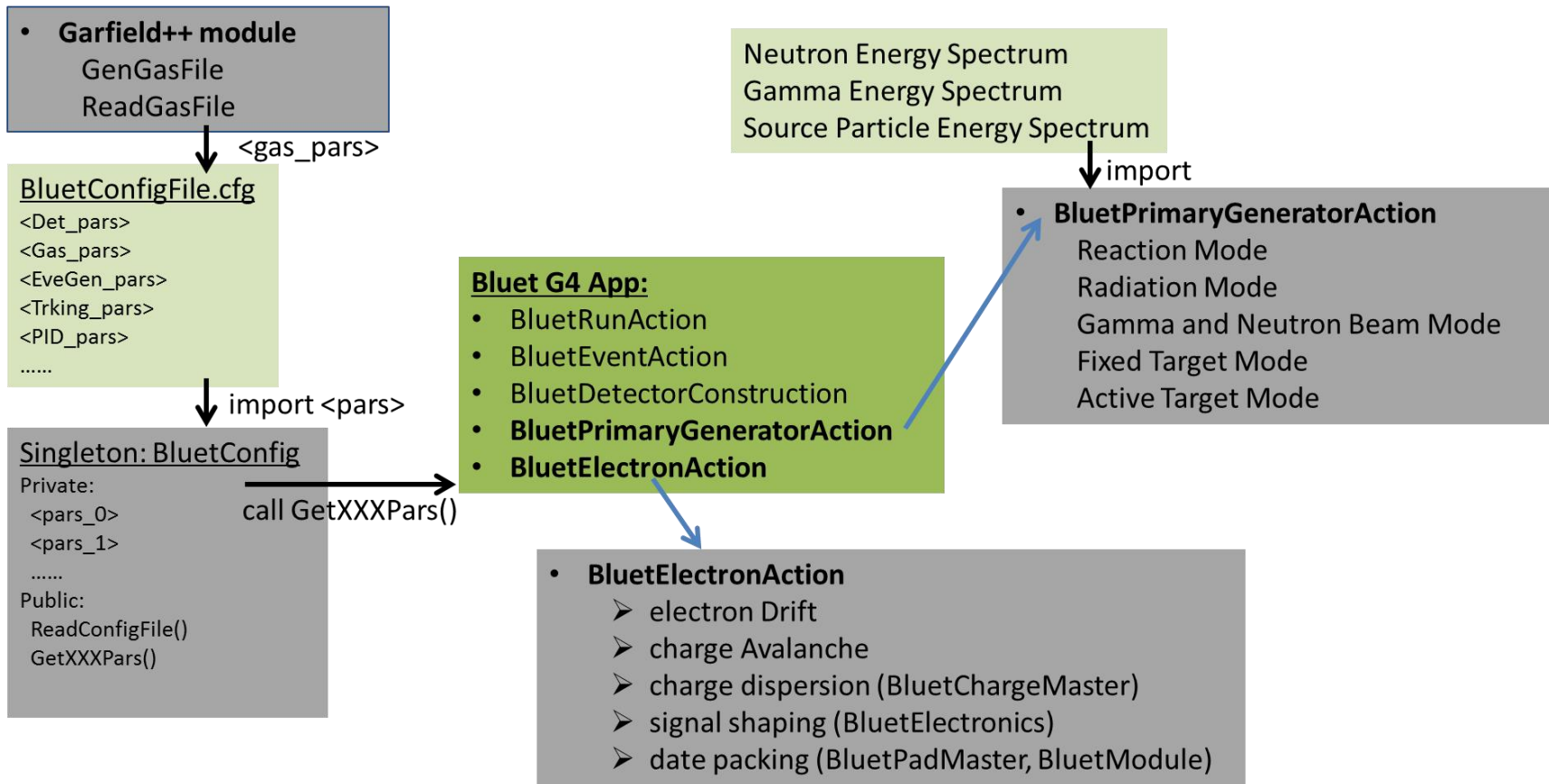
• $\tau_1 = R_2C_1$

● RC电路 $H(t) = 1/\tau_1 e^{-t/\tau_1}$

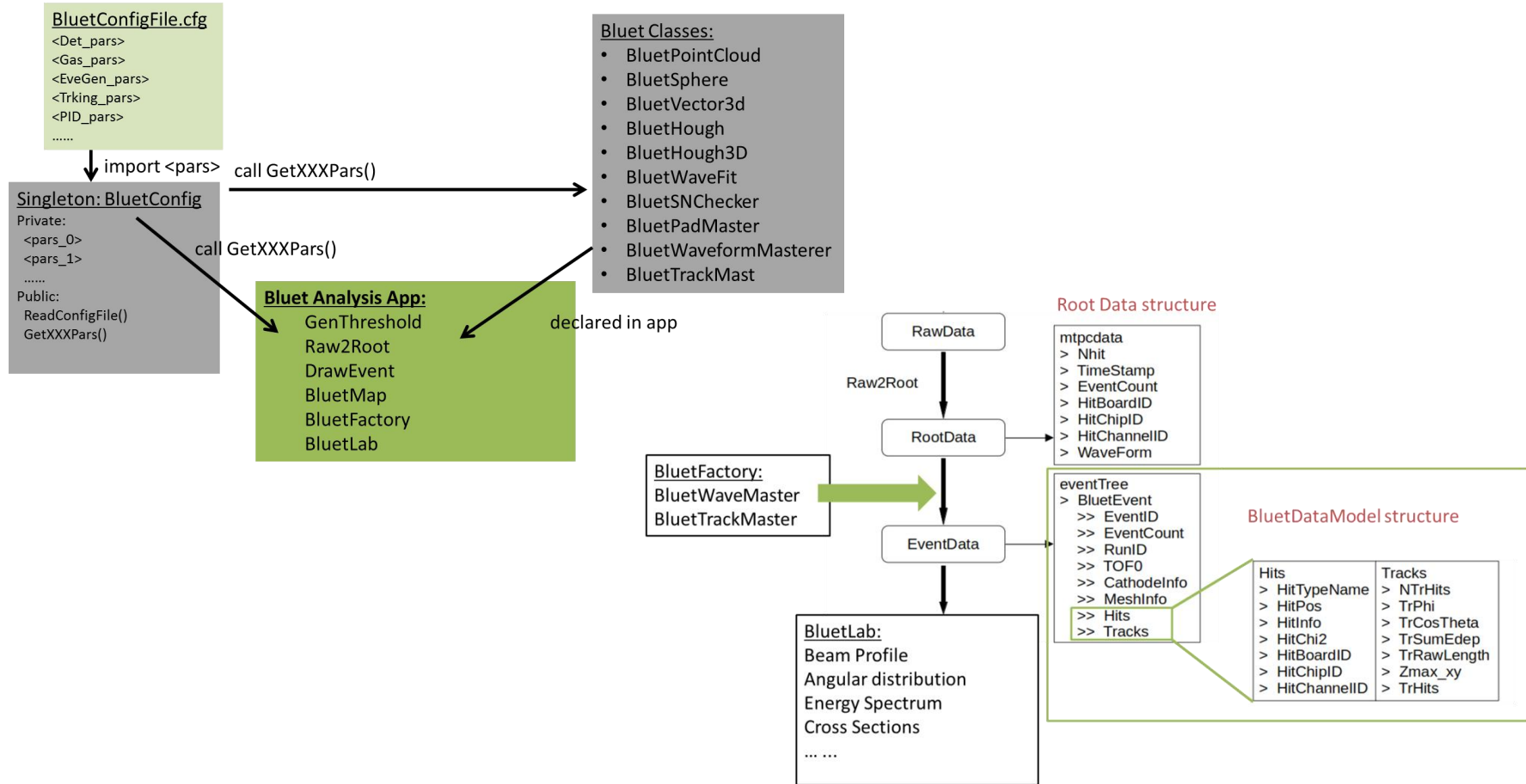
模拟得到的 α 粒子事例和波形



模拟框架

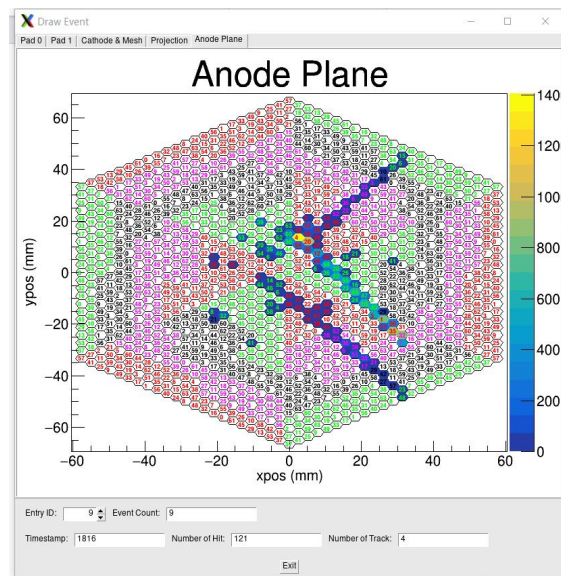
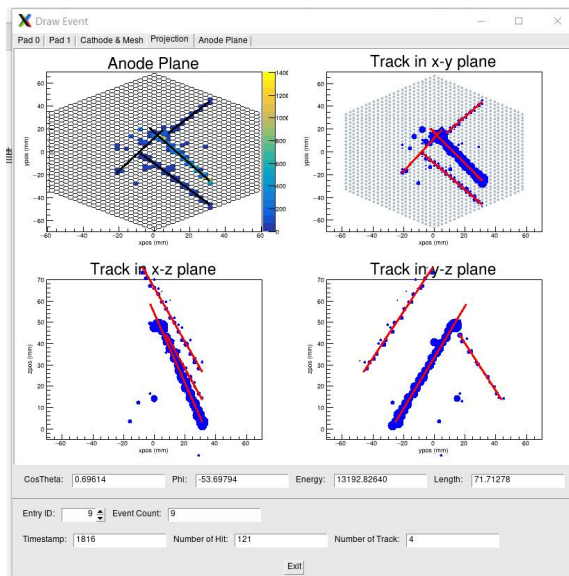
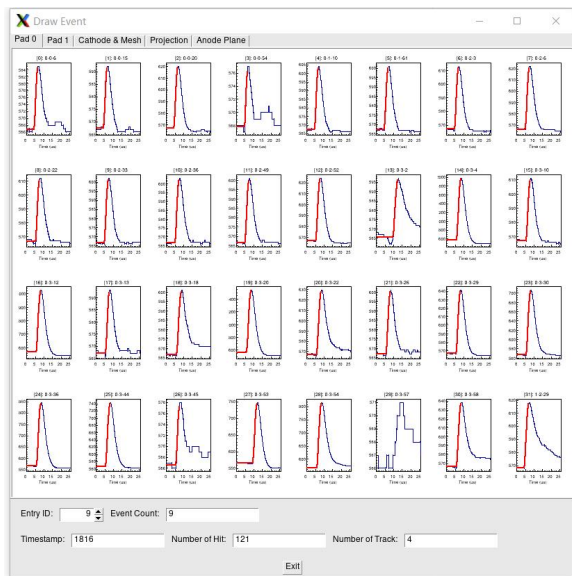


分析程序框架



分析程序界面

- 简易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



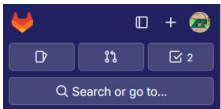
BLUET模拟和分析程序库

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



BLUET

bloom through the time



CSNS Back-n MTPC / BLUET-v5

BLUET BLUET-v5

main bluet-v5

History Find file Edit Code

fix in CmakeList.txt and update command squeue --me
yih@ihep.ac.cn authored 1 day ago

1f466974

Name	Last commit	Last update
.vscode	update .gitignore	1 month ago
BluetConfig	debug init0 = t0 * sampleT	1 week ago
myBluetData	add directory	6 months ago
myBluetWork	init the project to delete cache files	8 months ago
sources	fix in CmakeList.txt and update comman...	1 day ago
utils	feat: use llvm code style	3 weeks ago
.DS_Store	fix raw2root & drawevent	5 months ago
.clang-format	feat: use llvm code style	3 weeks ago
.gitignore	revise .gitignore	2 weeks ago
Bluet.cc	Feat: draw the canvas across multiple ta...	2 weeks ago
CMakeLists.txt	fix in CmakeList.txt and update comman...	1 day ago
LICENSE	Update LICENSE	5 months ago
README.md	fix range number comparison in Factory....	2 days ago

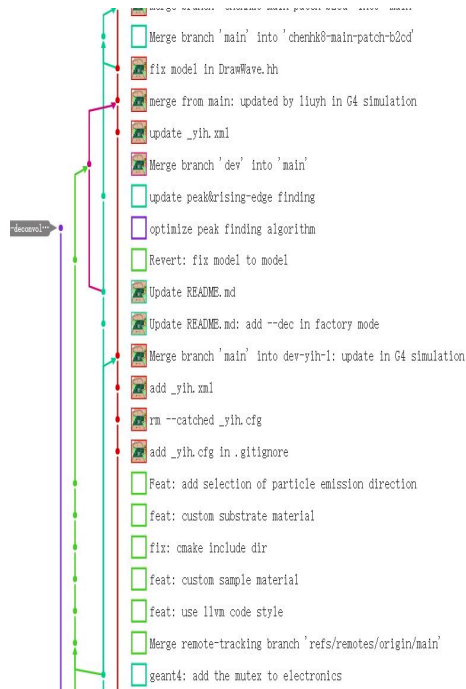
Star 0 Fork 1

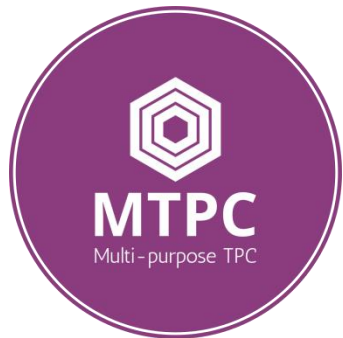
Project information

149 Commits
2 Branches
1 Tag
169 MiB Project Storage
1 Environment

README
MIT License
Wiki
Add CHANGELOG
Add CONTRIBUTING
Enable Auto DevOps
Add Kubernetes cluster
Set up CI/CD
Configure Integrations

Created on
October 19, 2023





● 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

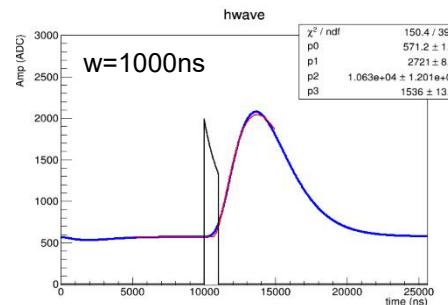
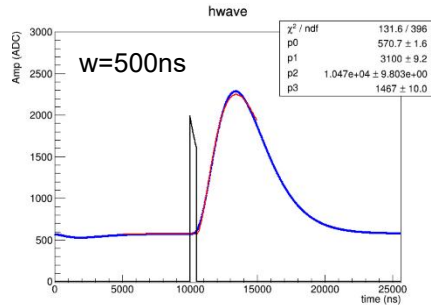
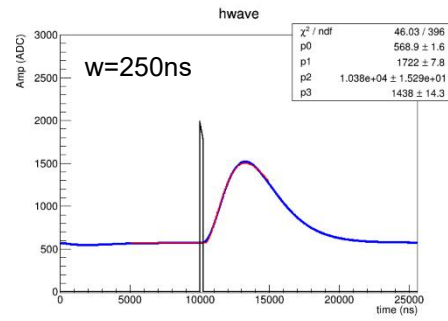
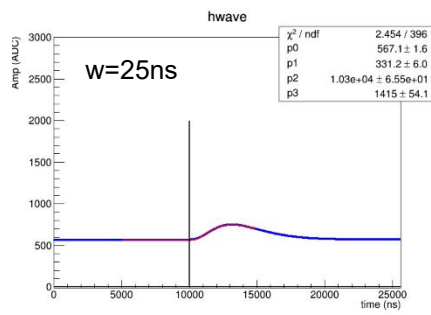
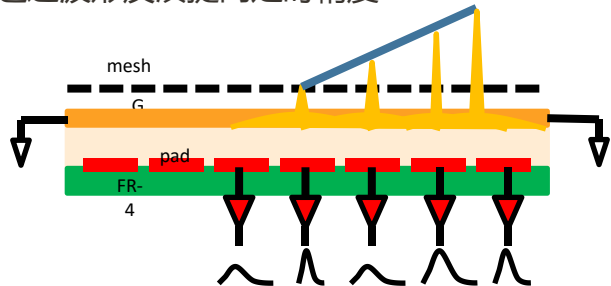
- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线

● 物理实验体系

• 中子核反应标准截面、核物理前沿、重要需求相关截面

波形拟合算法研究

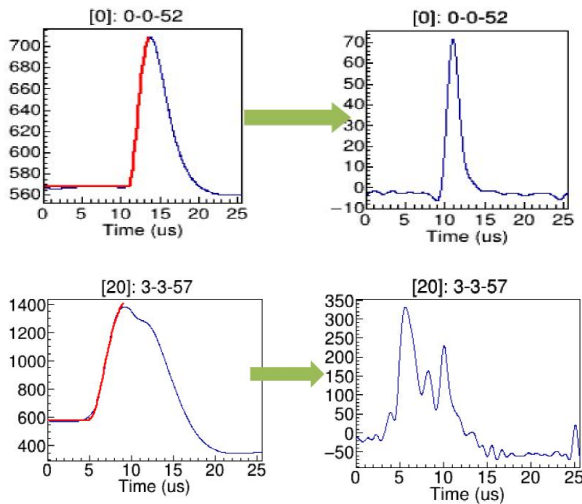
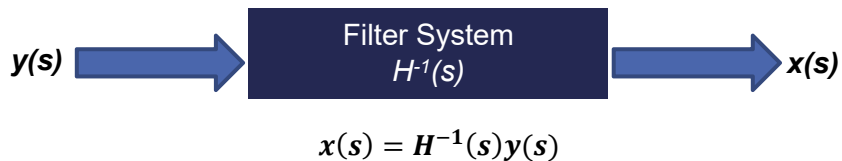
- 电子学传递函数等效表达式: $f(t) = B + A\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^n e^{-(t-t_0)/\tau}$
- 此表达式是输入信号为 δ 函数的输出响应波形, 不同角度径迹的原始信号宽度不一致, 实际波形偏离函数形式
- 采用模拟信号对拟合进行研究, 模拟输入信号为倒数下降波形, 信号起始点为10000ns
- 设定 $n=2$ 进行拟合, 随着原始波形宽度 w 的增加, 拟合的定时点会延后
- 通过波形反演提高定时精度



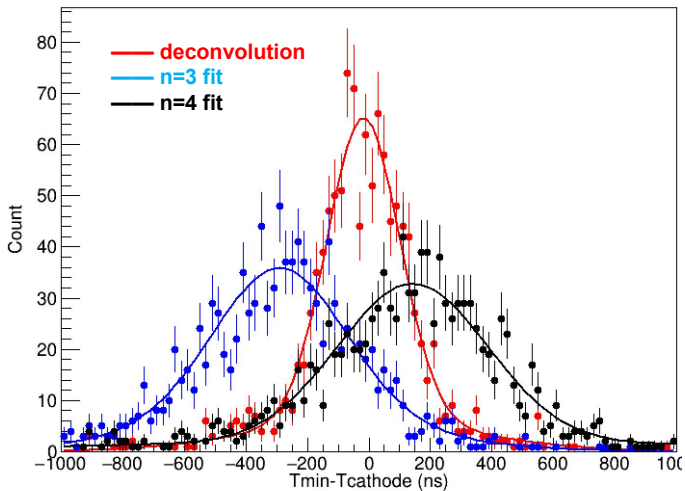
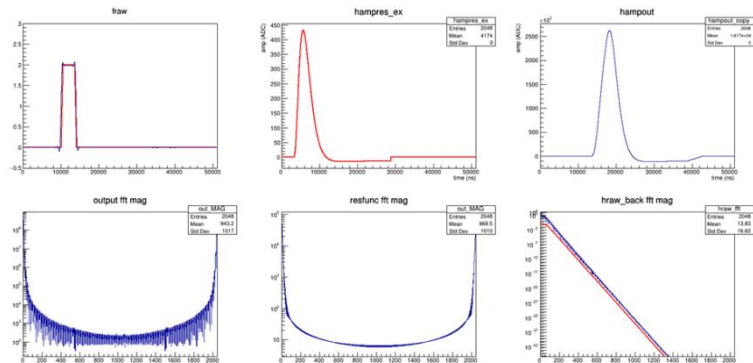
w(ns)	25	250	500	1000
t0(ns)	10300	10380	10470	10630

波形分析

- 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



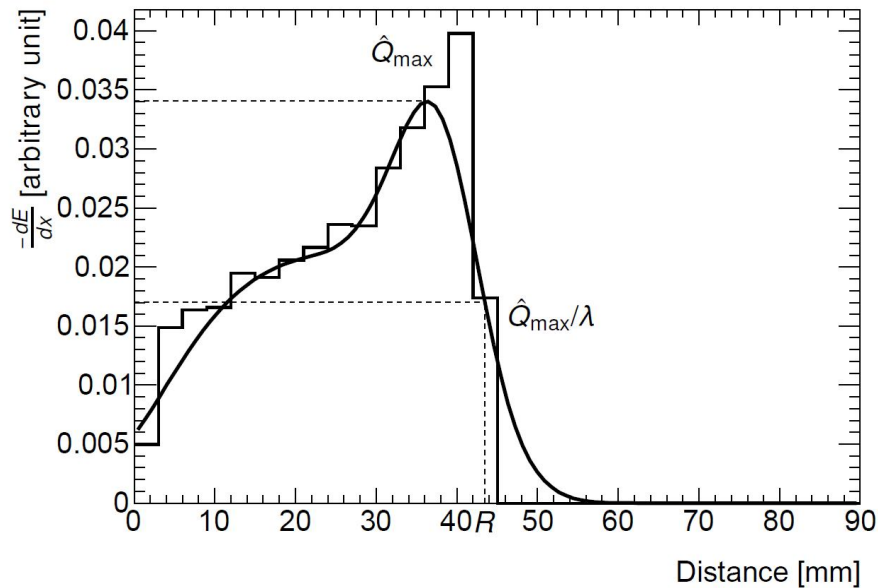
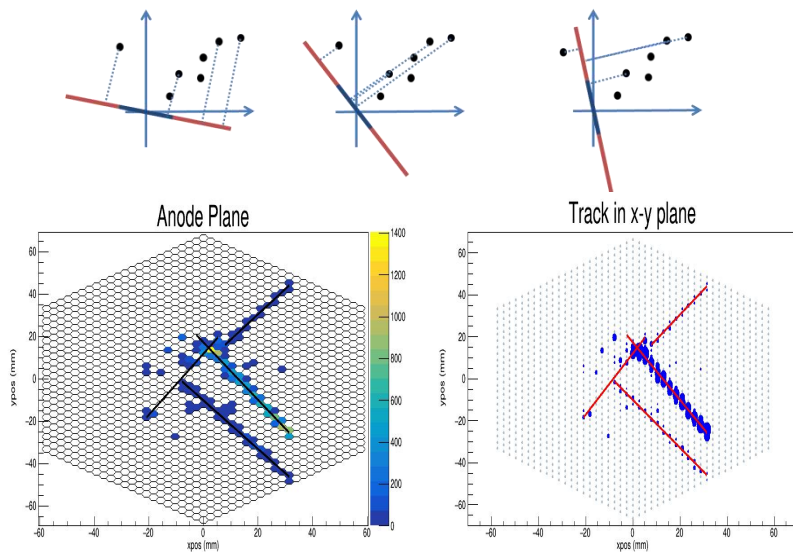
径迹重建

● 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:

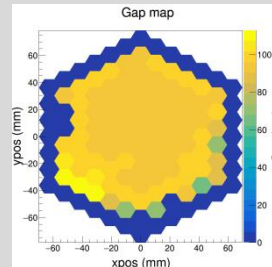
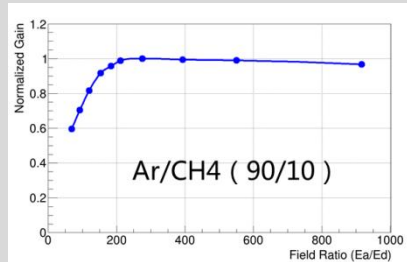
- 将重建之后的数据径迹的点火pad向径迹方向投影，得到沿径迹方向的dE/dx分布
- 使用KDE算法对dE/dx分布进行平滑
- 取径迹起点至 Q_{\max}/λ 对应点位粒子射程， $\lambda=2$



探测器测试

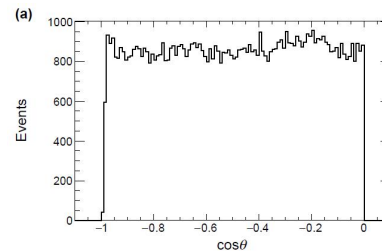
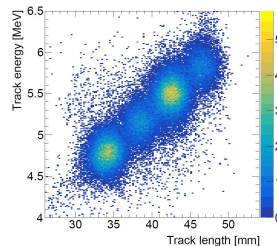
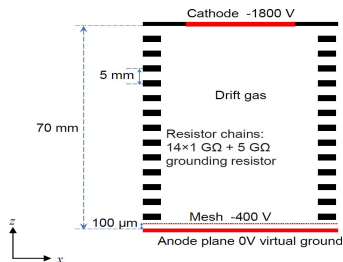
● x射线放射源测试:

- 透过率曲线
- 增益曲线
- gap均匀性



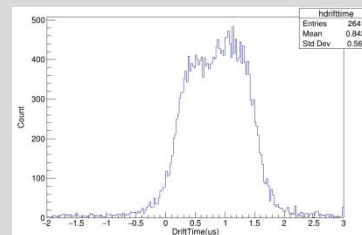
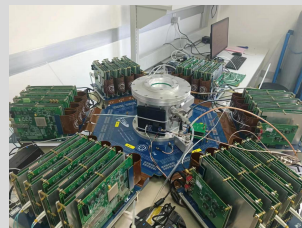
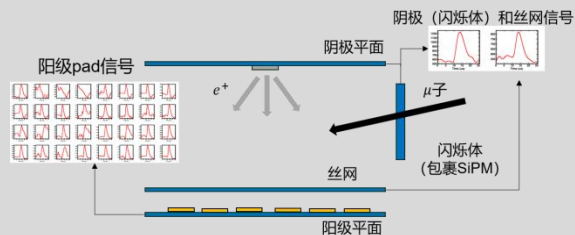
● α 放射源测试:

- 能量射程分辨
- 漂移速度
- 角分布



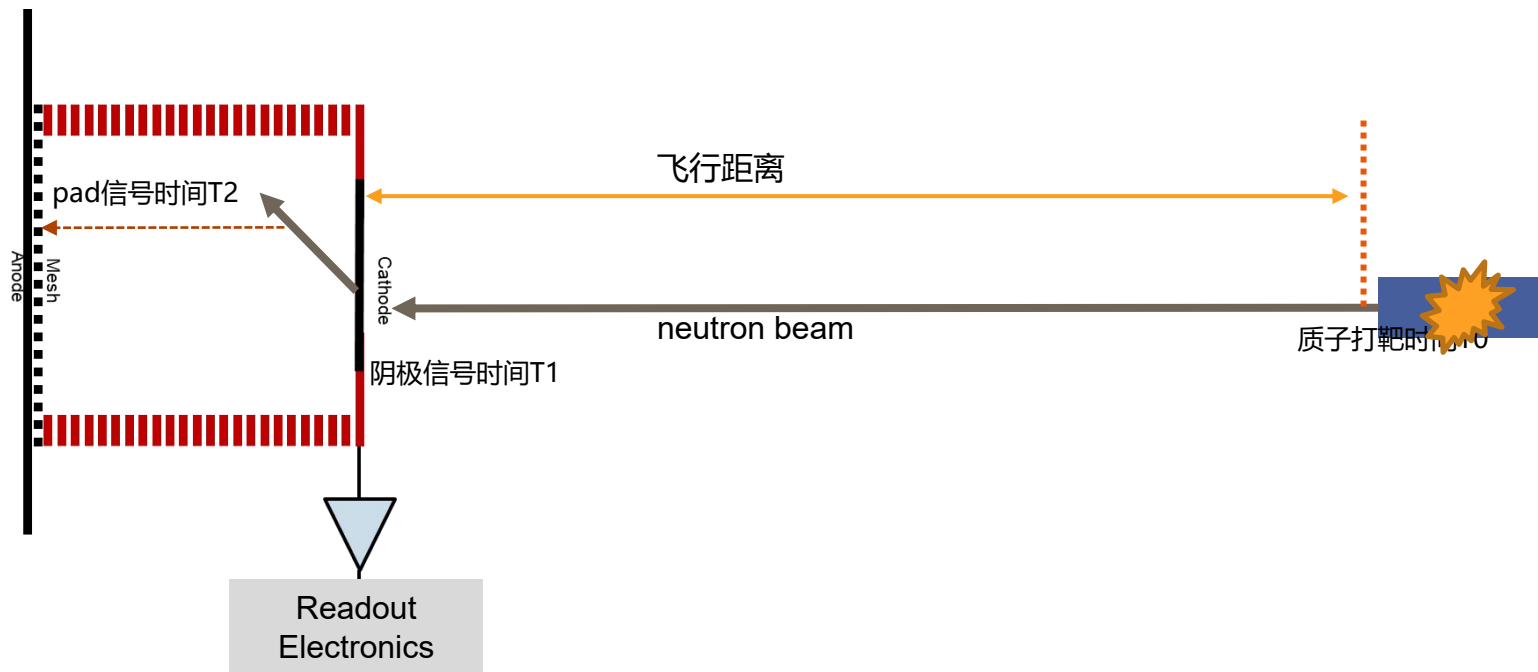
● 宇宙线测试:

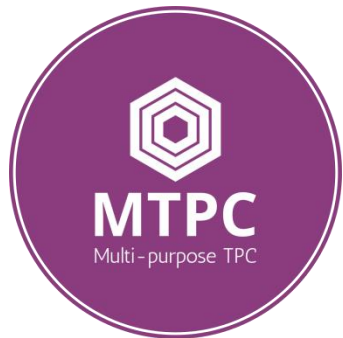
- 漂移时间分布
- 空间分辨
- 电场均匀性



中子TOF测量方法

- 为了测量中子TOF和漂移时间，需要采集阴极信号
- $TOF = T1 - T0$
- $Td = T2 - T1$
- 阴极信号需要有高信噪比





● 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

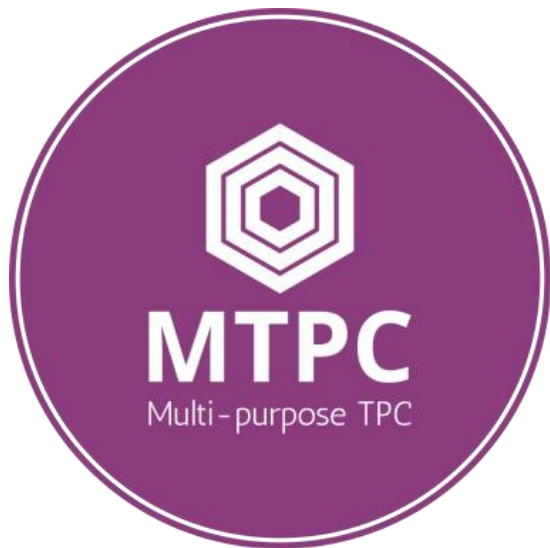
- 数据分析方法：波形分析算法、径迹重建算法等
- 探测器测试方法：x射线、 α 源、宇宙线

● 物理实验体系

• 中子核反应标准截面、核物理前沿、重要需求截面

物理实验体系

- 规划3大类物理实验



标准截面测量

核物理前沿

重要需求截面数据

中子核反应标准截面

- 中子标准截面数据是核数据测量的重要基础数据
- 在10MeV以下能区，适合使用MTPC进行测量
- 自主开展成体系的标准截面实验测量及数据评价有重要意义

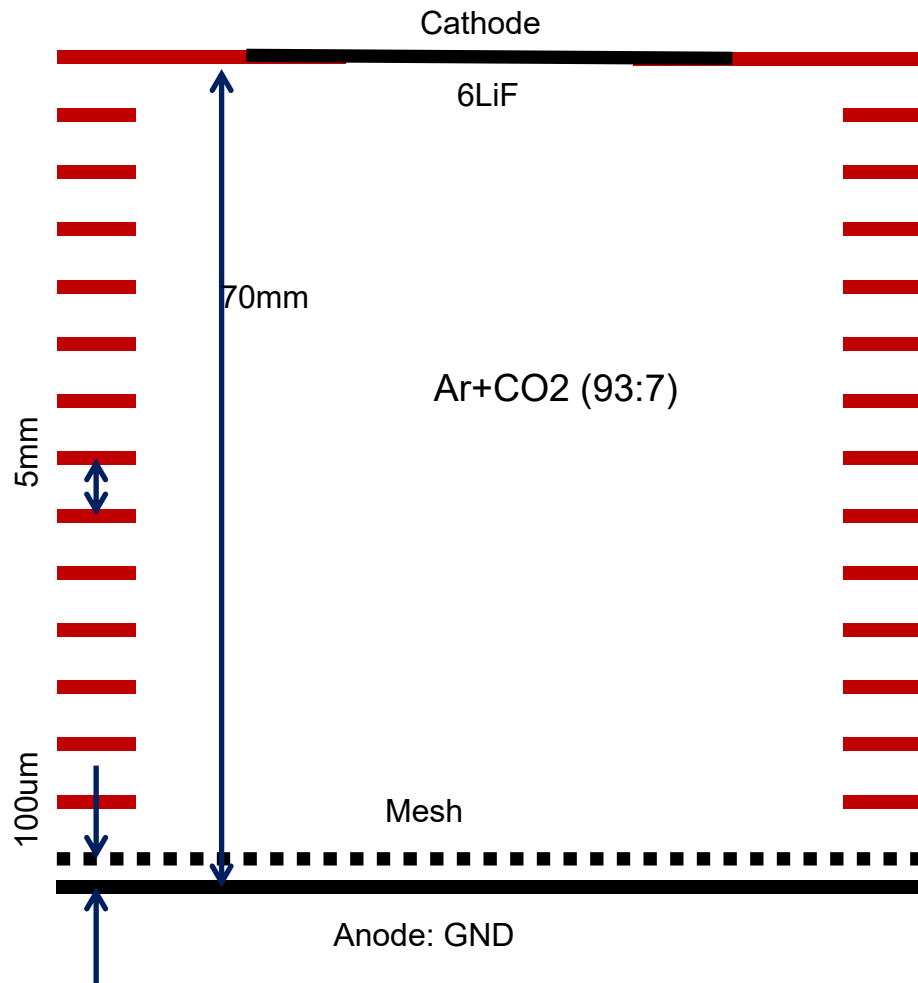
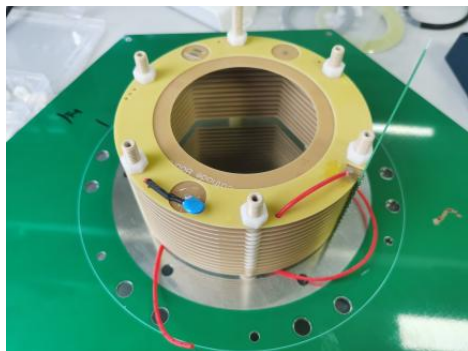
TABLE I. Cross section standards and reference data, release 2017.

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

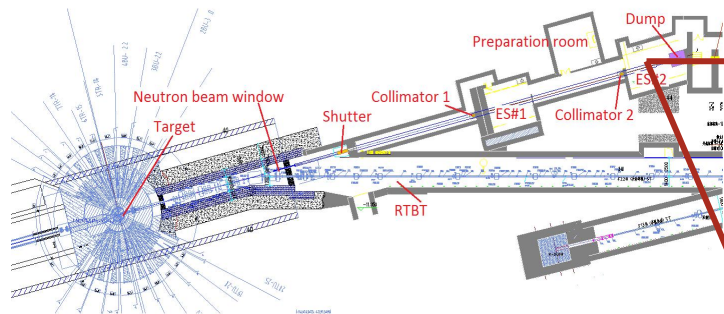
反应	实验规划	实验时间
⁶ Li(n,t)	√	2023年2月
H(n,n)	√	2024年10月
²³⁵ U(n,f)	√	2024年10月
¹⁰ B(n,α)	√	2025年~2027年

标准截面测量： ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应

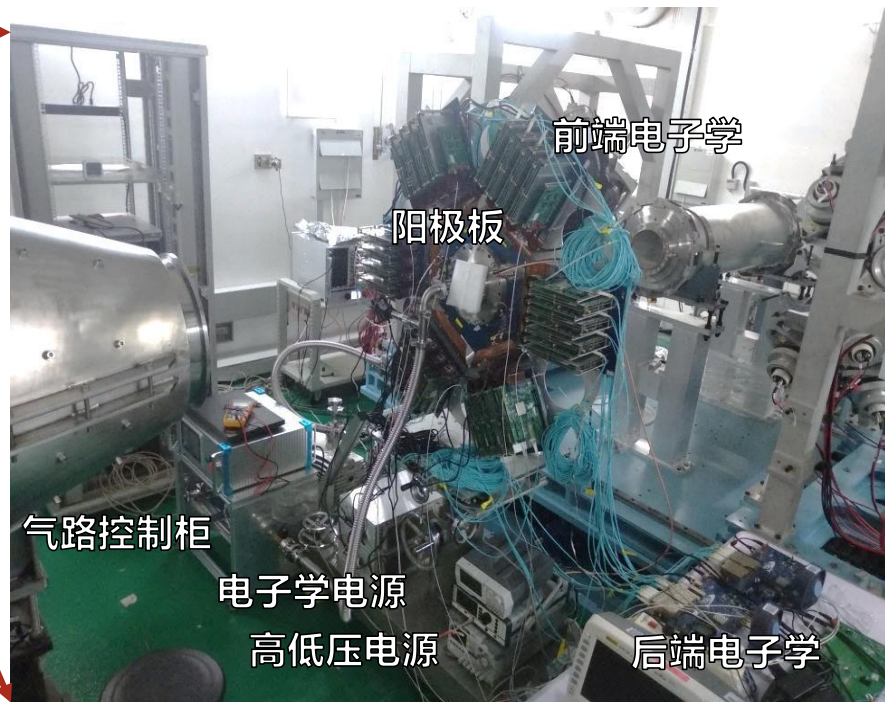
- ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应截面测量，中子能区1eV~500keV
- 漂移区距离70mm，阴极中心放置 ${}^6\text{LiF}$ 样品
- 样品参数：
 - 厚度560nm，Al衬直径89mm、厚度10.8um
 - ${}^6\text{Li}$ 丰度95%， ${}^6\text{LiF}$ 面密度148ug/cm²、直径66mm



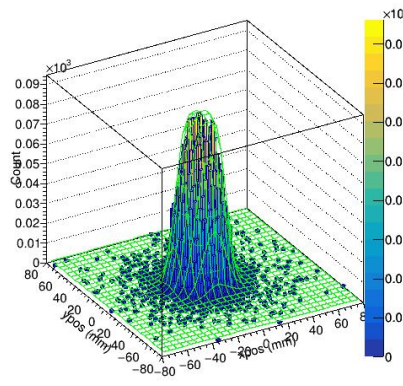
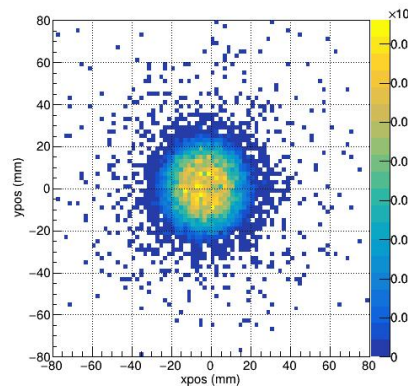
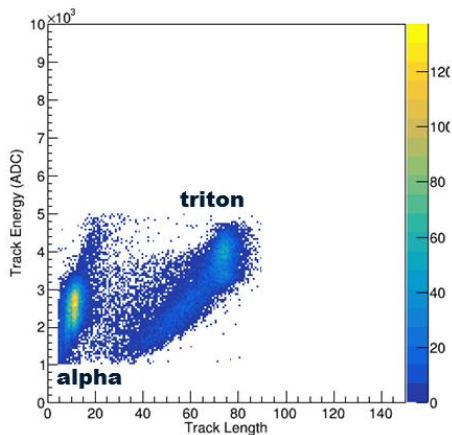
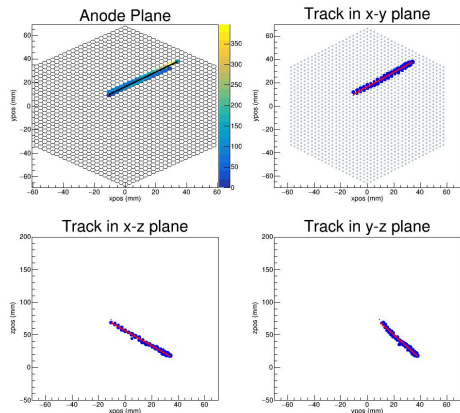
标准截面测量： ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应



- 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- ϕ 12- ϕ 15- ϕ 40组合（加铅砖 ϕ 30）
- 0.9bar气压：针对氦粒子进行测量（133h）
- 0.5bar气压：针对 α 粒子进行测量（143h）



标准截面测量： ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应



- 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

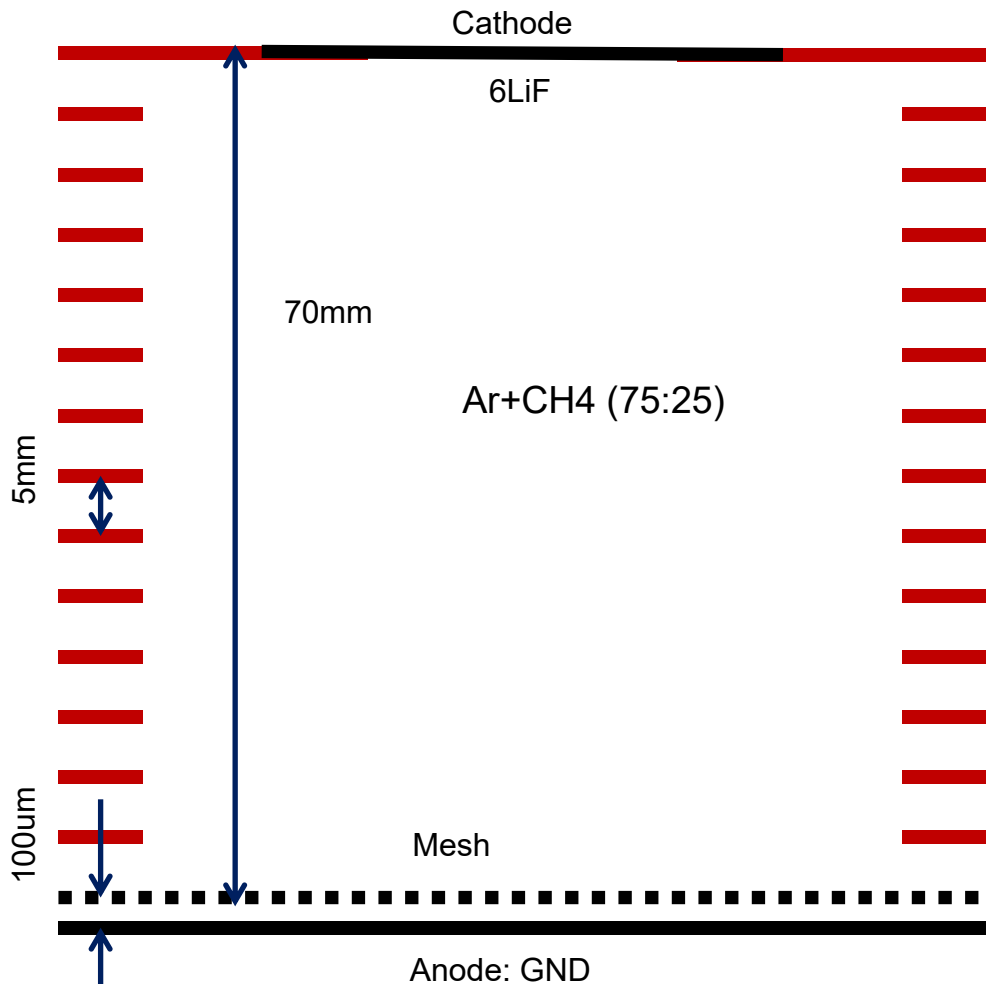
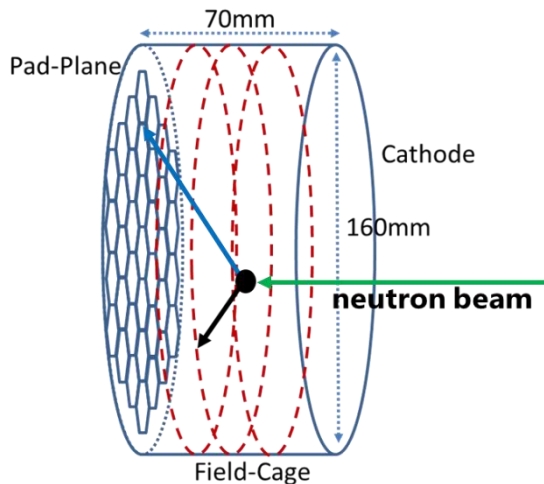
$$f(x, y) = B + \frac{A}{2} \left[\text{Erf} \left(\frac{r(x, y) - r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left(\frac{r(r, y) + r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right],$$

$$r(x, y) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

- 拟合结果:
 - 中心(x_0, y_0): (-3.1mm, 0.6mm)
 - r_0 : $17.7 \pm 0.1\text{mm}$
 - σ : 6mm

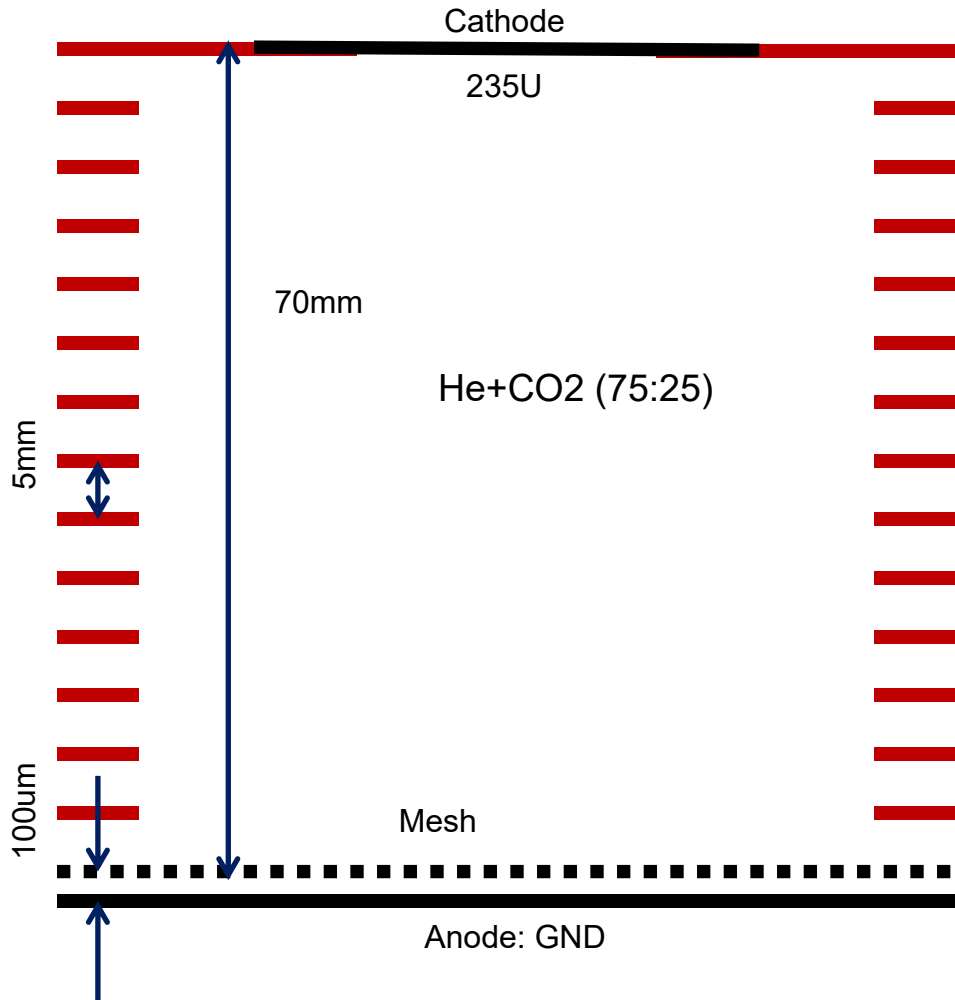
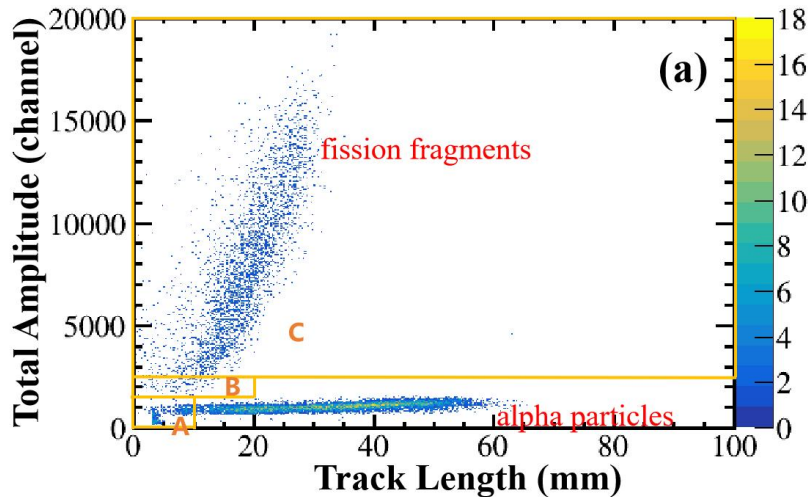
标准截面测量：H(n,n)反应

- H(n,n)截面测量，中子能区100keV~500keV
- 漂移区长度70mm
- 工作气体为Ar与CH4混合气体(75:25)，其中H作为靶核
- 阴极中心放置6LiF样品，作为探测器参数检验标准样品

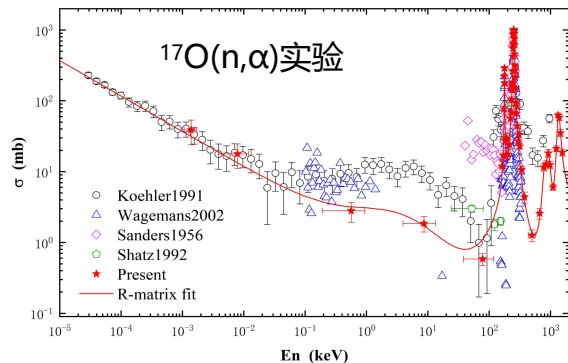


标准截面测量： $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应

- $^{235}\text{U}(n,f)$ 截面测量
- 使用0.3atm减小 α 粒子干扰，实现高精度测量

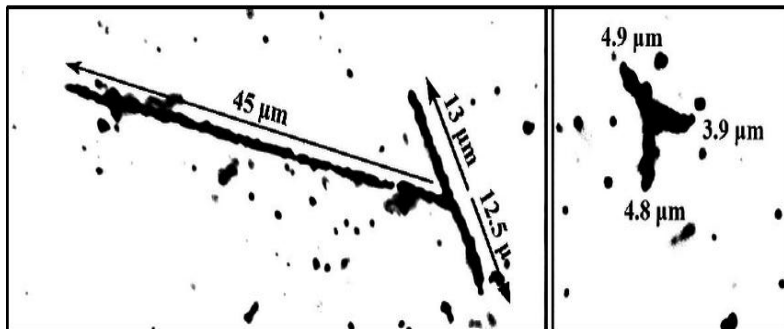


核物理前沿



- 已有实验：W¹⁷O₃靶+Si/SiC探测器阵列
- 实验的不足：SiC探测器接收立体角较小
- 天体关键能区的截面比以前结果低约一个量级
- T9 < 0.2的反应率比当前采用结果低约5 ~ 8倍
- 天体关键能区的截面测量有望采用TPC解决这一问题
- 进一步尝试²⁵Mg(n,α)反应测量

- 中子诱发²³⁵U三分裂变的轻带电粒子测量
- 对裂变机制研究有重要意义

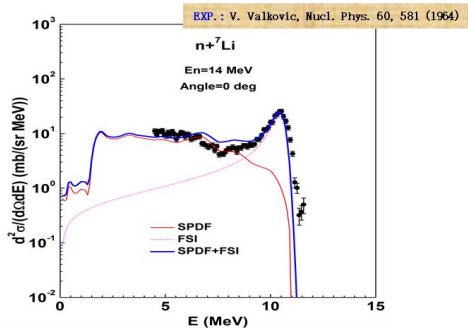
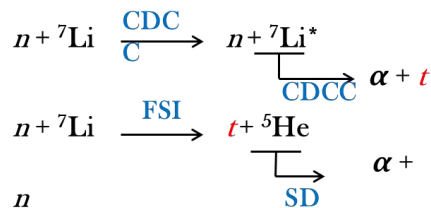


反应	实验规划	实验时间
¹⁷ O(n,α)	√	2024年10月
²³⁵ U三分裂	√	2024年10月
²⁵ Mg(n,α)	√	2025年~2027年

重要需求截面数据

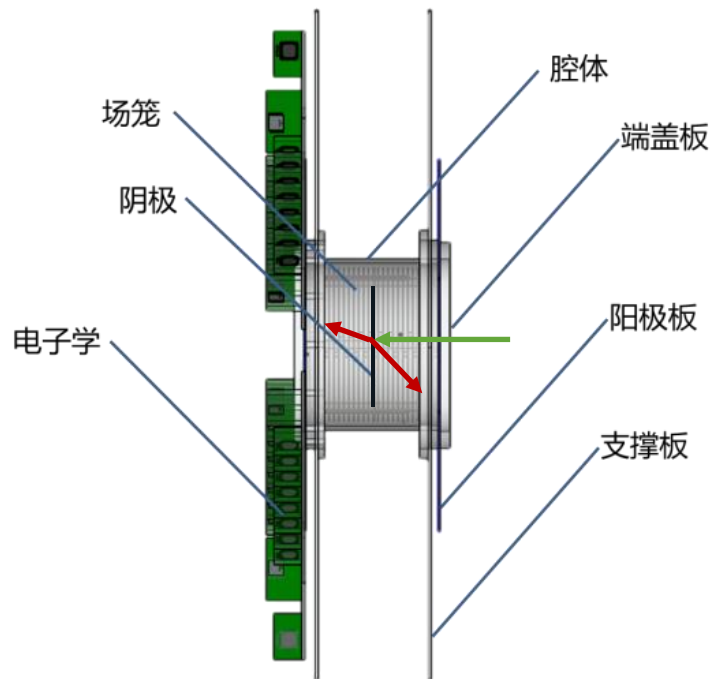
- $n+{}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t + n$
- 高能区对产氚截面数据比较重要
- 使用MTPC双端构型进行测量，实现2个带电粒子符合测量

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



反应	实验规划	实验时间
$n+{}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t + n$	√	2027年~

报告内容

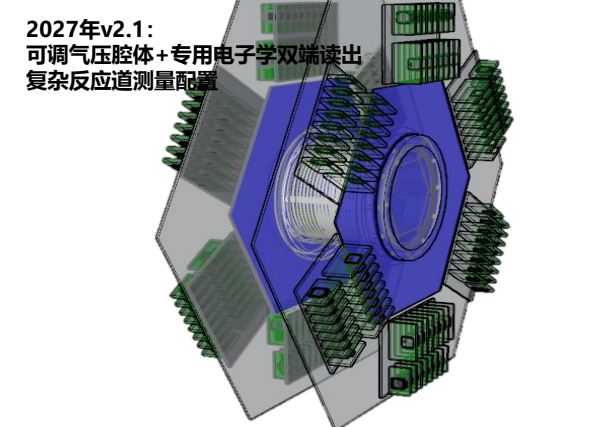
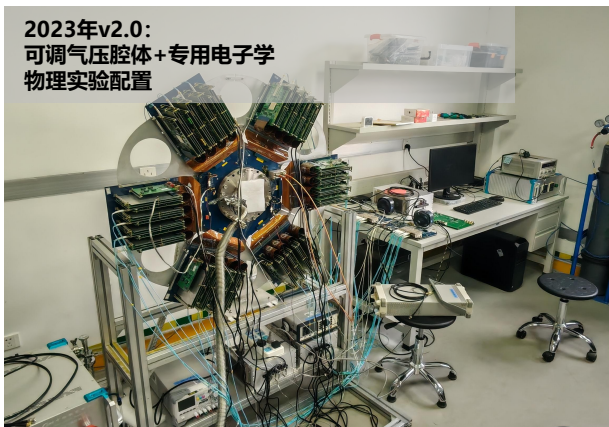
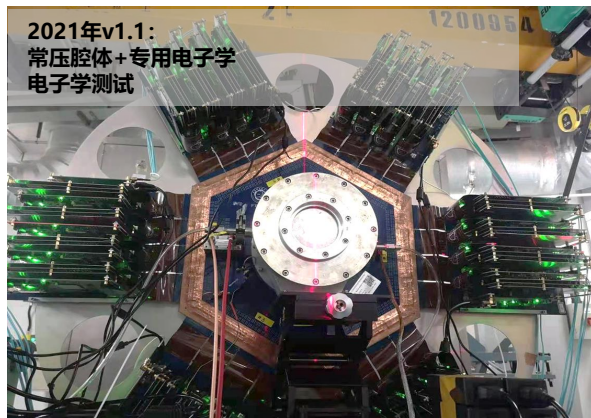
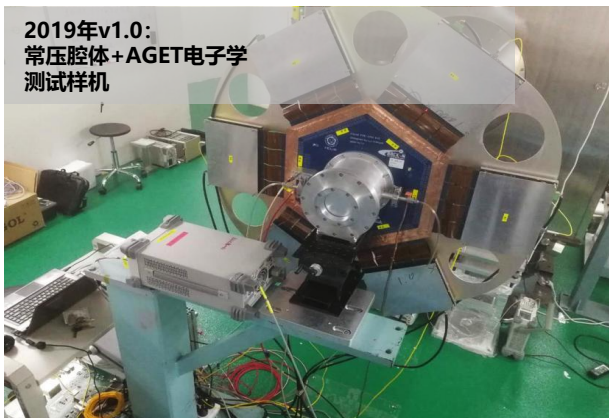
- 项目概况
- 探测器系统设计
- 模拟与分析程序
- 实验方法研究
- 物理实验
- 报告总结

报告总结

- MTPC项目已进入实验研究阶段
- 将按计划开展实验研究
- 研究团队将继续对系统进行升级改进

反应	实验规划	实验时间
${}^6\text{Li}(n,t)$	√	2023年2月
$\text{H}(n,n)$	√	2024年10月
${}^{235}\text{U}(n,f)$	√	2024年10月
${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$	√	2025年~2027年
${}^{17}\text{O}(n,\alpha)$	√	2024年10月
${}^{235}\text{U}$ 三分裂	√	2024年10月
${}^{25}\text{Mg}(n,\alpha)$	√	2025年~2027年
$n+{}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t + n$	√	2027年~

MTPC版本更新





期待更多老师和同学的加入！
希望得到更多同行专家的支持！

谢谢！