



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

基于多用途时间投影室 (MTPC) 的 ${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$ 反应测量研究

陈宏昆

中山大学物理学院

目录

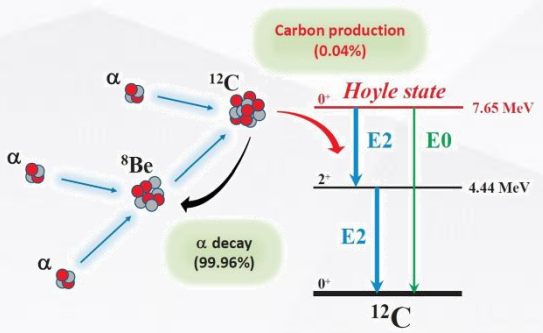
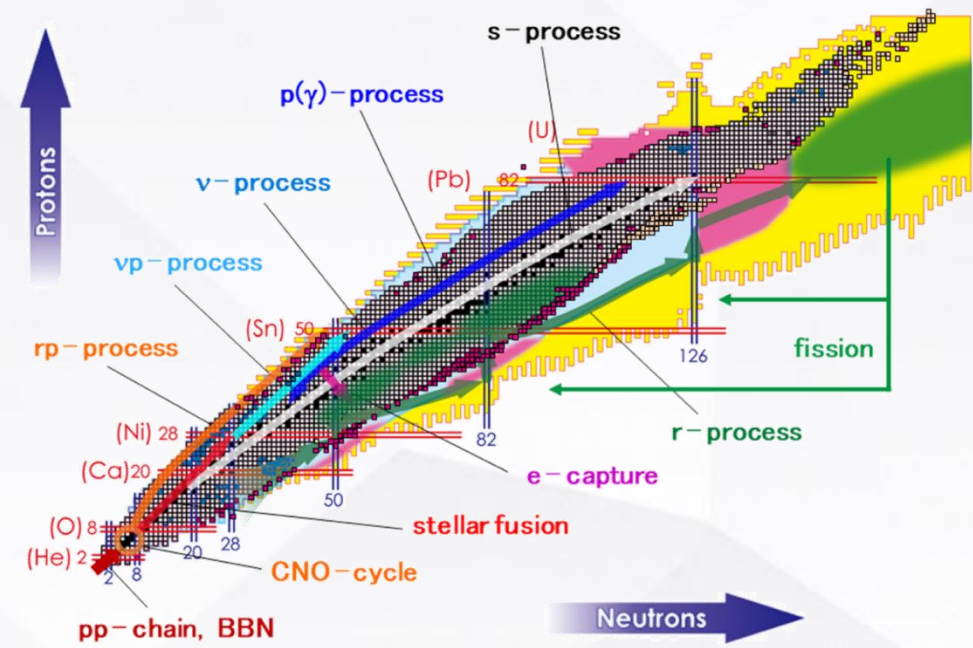
- 背景介绍
- 实验概况
- 数据分析
- 总结展望

背景介绍

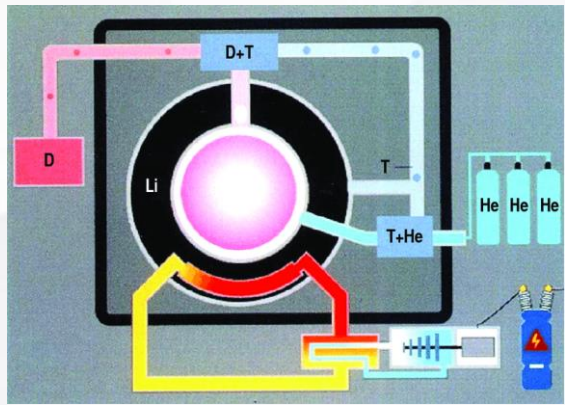
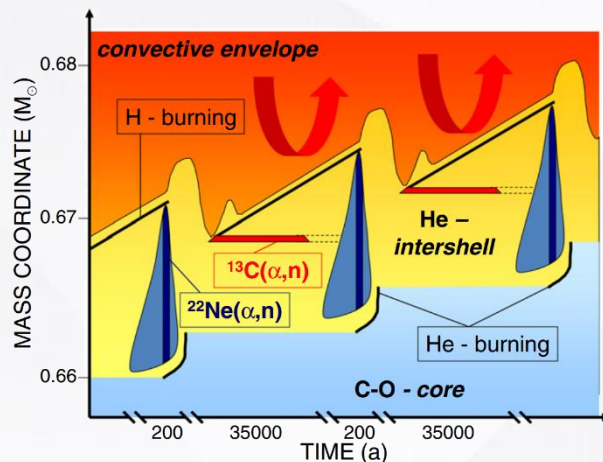
- 中子核数据在核物理、核天体物理和核工程领域有重要应用

Neutron cross section standards	
Reaction	Standards incident neutron energy range
$\text{H}(\text{n},\text{n})$	1 keV to 20 MeV
$^3\text{He}(\text{n},\text{p})$	0.0253 eV to 50 keV
$^6\text{Li}(\text{n},\text{t})$	0.0253 eV to 1 MeV
$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)$	0.0253 eV to 1 MeV
$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha_1\gamma)$	0.0253 eV to 1 MeV
$\text{C}(\text{n},\text{n})$	10 eV to 1.8 MeV
$\text{Au}(\text{n},\gamma)$	0.0253 eV, 0.2 to 2.5 MeV, 30 keV MACS
$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	0.0253 eV, 7.8-11 eV, 0.15 MeV to 200 MeV
$^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$	2 MeV to 200 MeV

截面标准



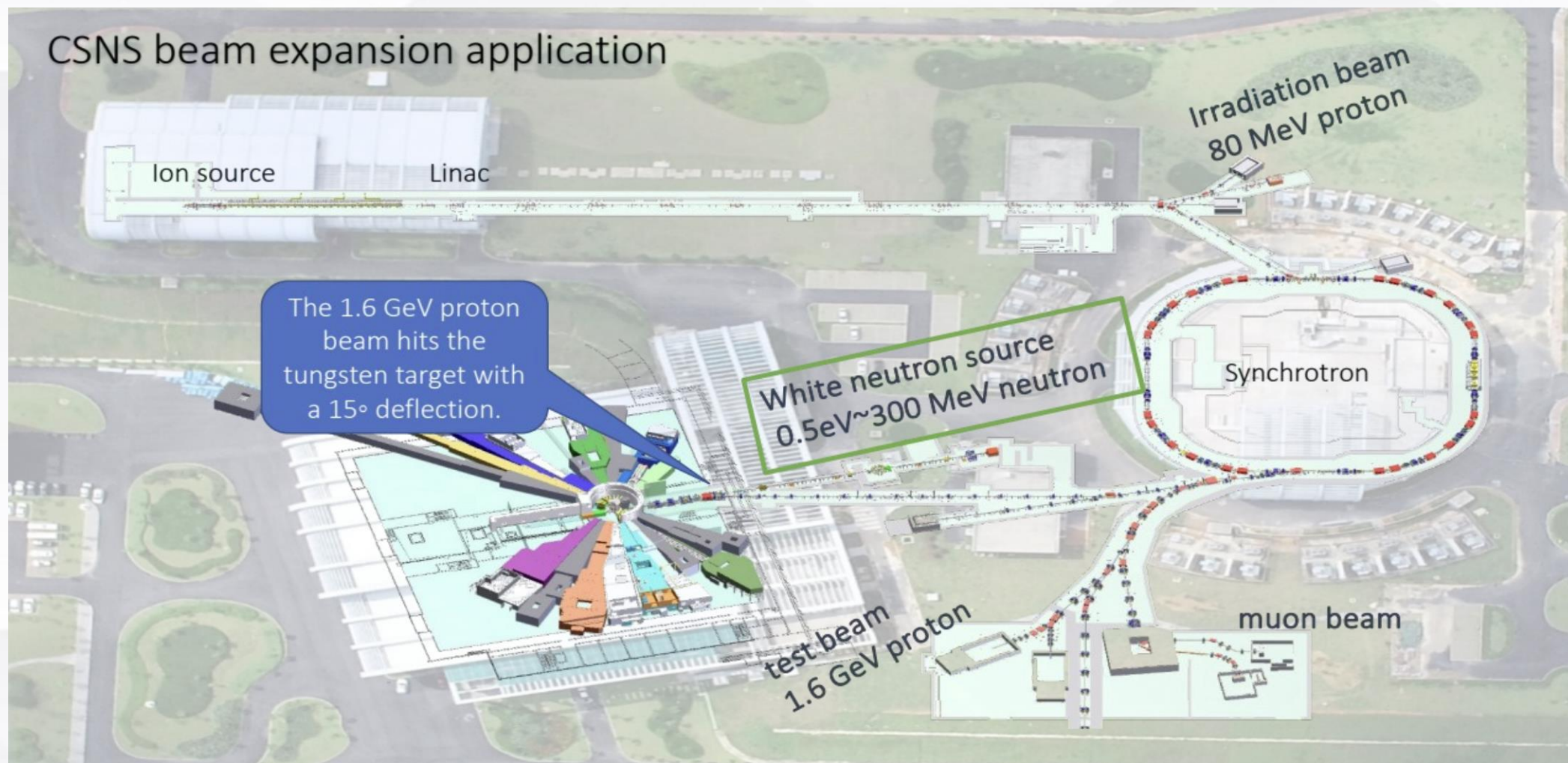
衰变模式



核反应

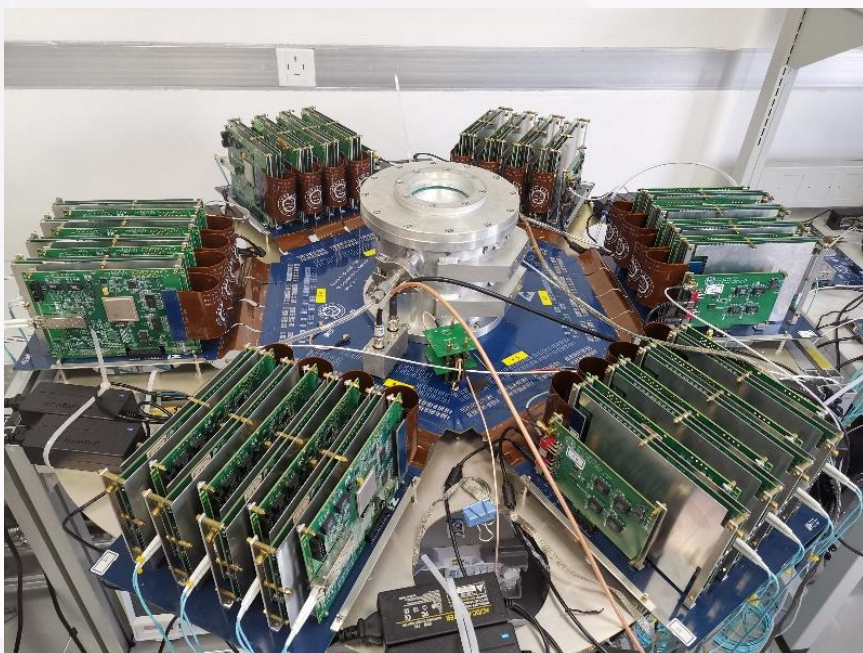
背景介绍

- 中国散裂中子源（CSNS）的Back-n反角白光中子源

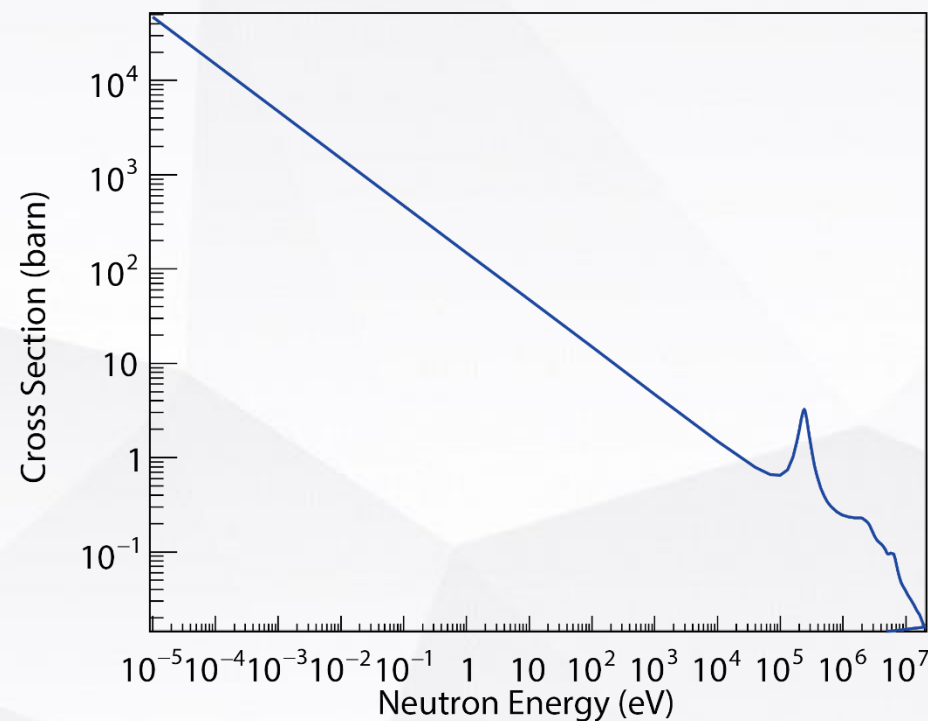


背景介绍

- 多用途时间投影室（MTPC）：设计用于带电粒子出射反应的中子核数据测量
- 目前已进行 $6\text{Li}(n,t)$ 、 $\text{H}(n,n)$ 、 $^{235}\text{U}(n,f)$ 和 $^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 等实验的测量
- $6\text{Li}(n,t)$ 反应作为截面标准，能很好地对探测器性能进行验证



MTPC探测器



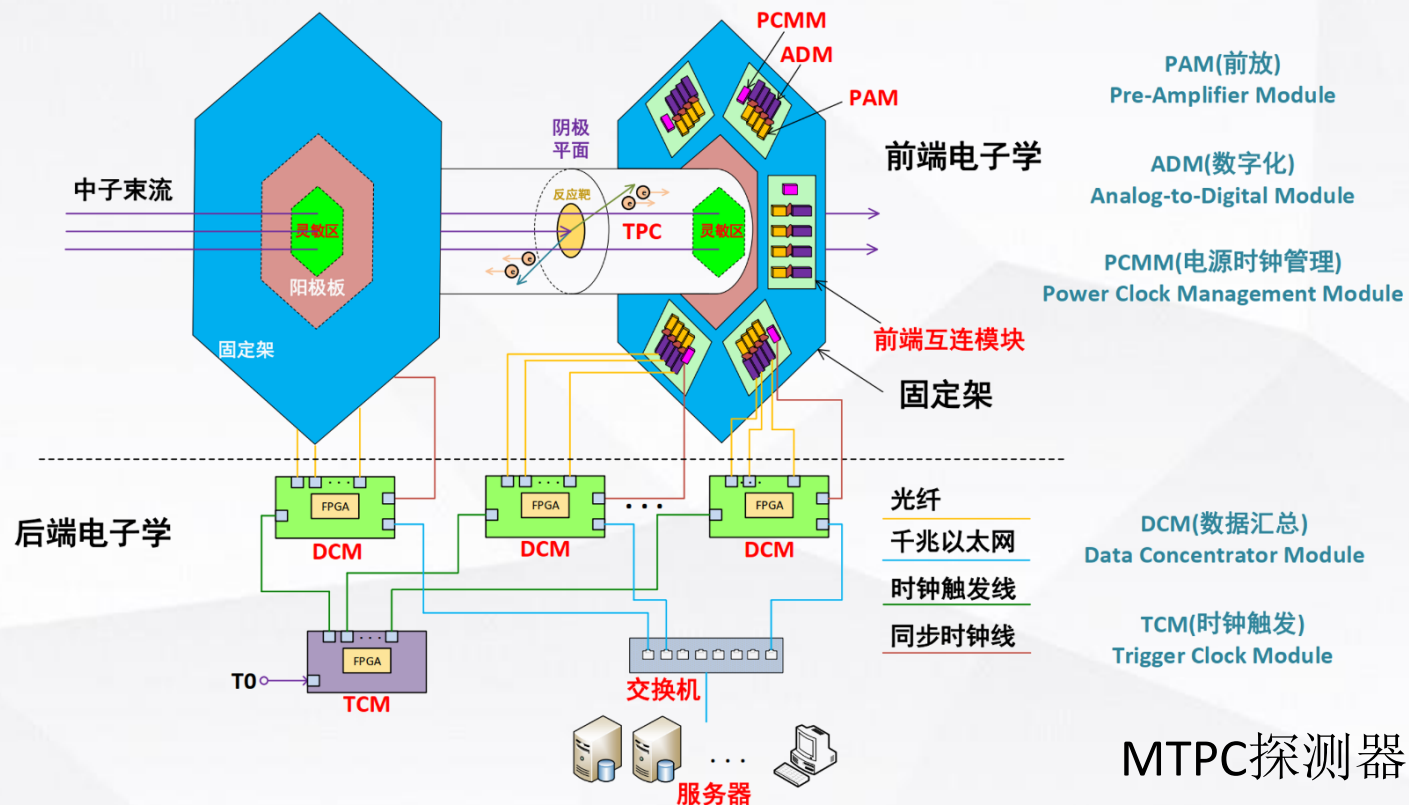
$6\text{Li}(n,t)$ 截面标准

目录

- 背景介绍
- 实验概况
 - 探测器系统
 - ${}^6\text{Li}(\text{n},\text{t})\alpha$ 实验设置
- 数据分析
- 总结展望

探测器系统

- MTPC分为三层结构：阴极、丝网、阳极
- 工作时固体样品放置于阴极中心，中子束流方向垂直于阴极
- 中子能量通过阴极测量飞行时间确定，反应粒子通过阳极测量
- 电子学系统波形采样频率40MHz，采样窗1024个点，ADC位数12bit



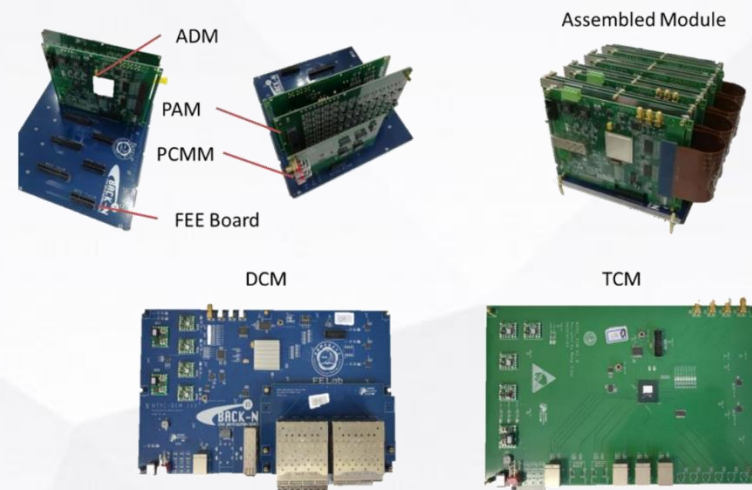
PAM(前放)
Pre-Amplifier Module

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

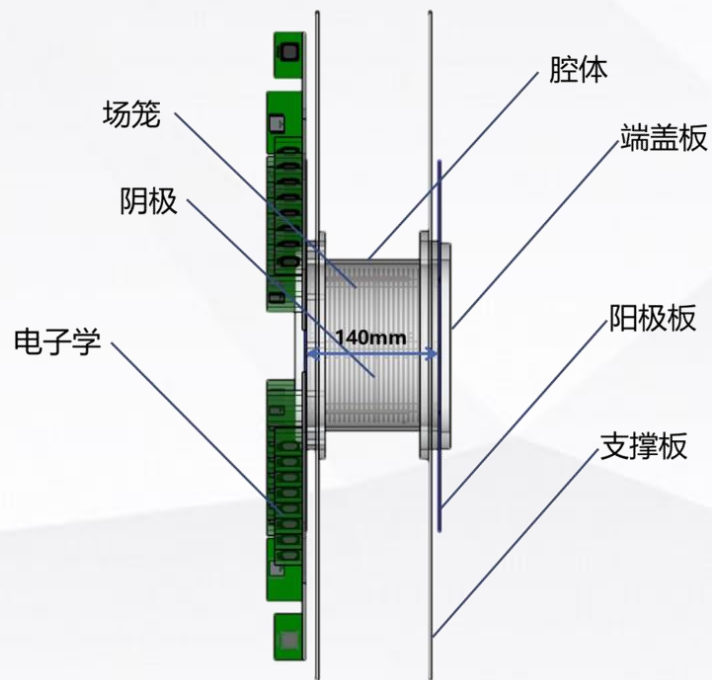
TCM(时钟触发)
Trigger Clock Module



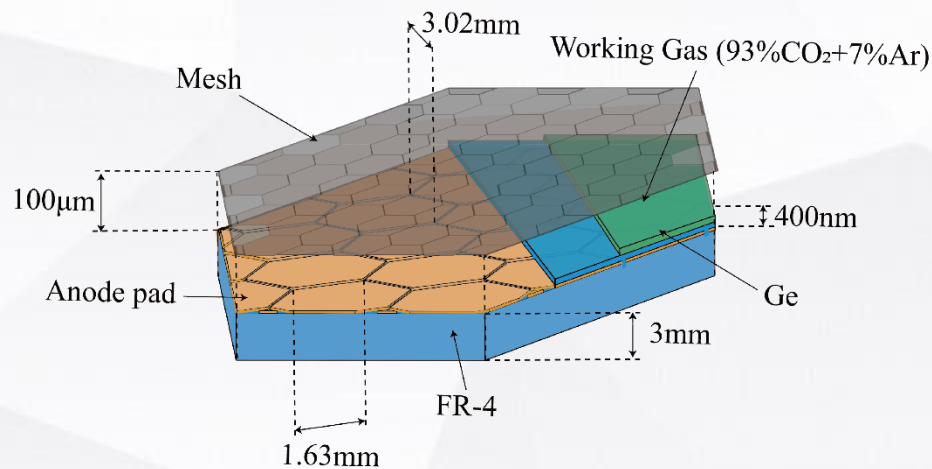
MTPC探测器及电子学系统

探测器系统

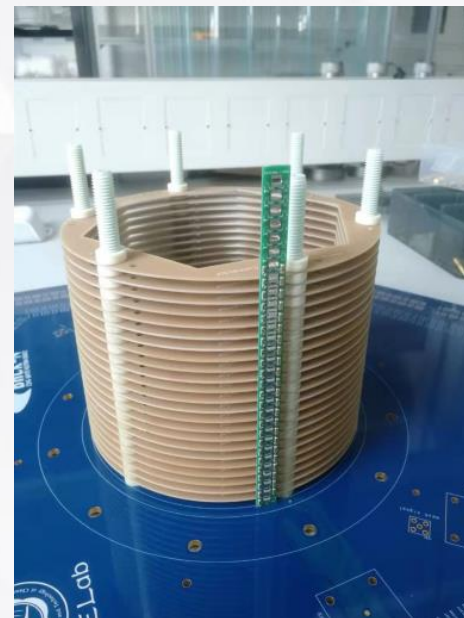
- 漂移区采用场笼结构维持均匀电场，长度70mm-140mm内可调
- 气室腔体主体为钛合金，能够承受0-5bar范围的气压
- 阳极采用热压接工艺的阻性Micromegas探测器作为读出探测器：
 - 读出pad为六边形密堆结构，总共有1519个通道
 - 采用阻性的Ge层有效抑制打火现象，并扩大pad响应面积



气室腔体外壳设计



阻性Micromegas探测器示意图

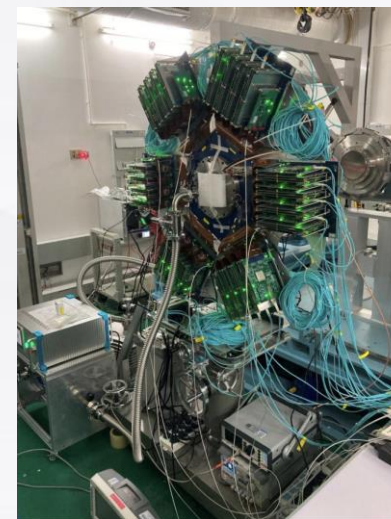
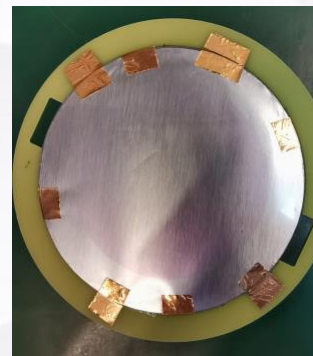


内部场笼结构

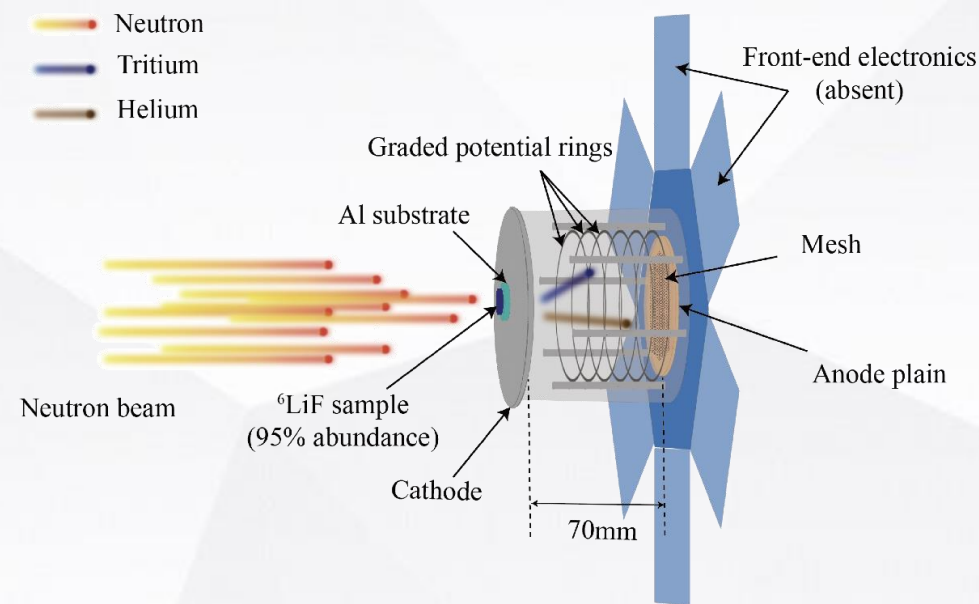
${}^6\text{Li} (n, t) \alpha$ 实验设置

- ${}^6\text{LiF}$ 样品参数:
 - ${}^6\text{Li}$ 丰度 95%
 - ${}^6\text{LiF}$ 面密度 148ug/cm²、厚度 560nm、直径 66mm
 - Al衬直径 89mm、厚度 10.8um
- 束斑设置:

厅2 + 1mmGd + 6cmPb + $\phi 30$ 束流
- 探测器设置:
 - 漂移区长度 70mm
 - 工作气体 Ar (93%) + CO₂ (7%)
- 探测条件:
 - 低压 (50000Pa) 测量 α (2.05MeV, 23.2mm)
 - 常压 (93500Pa) 测量T (2.70MeV, 68.6mm)



样品与实验图片



${}^6\text{Li} (n, t) \alpha$ 实验示意图

目录

- 背景介绍
- 实验概况
- 数据分析
 - 实验波形分析
 - 事例信息重建
 - 计数率谱计算
- 总结展望

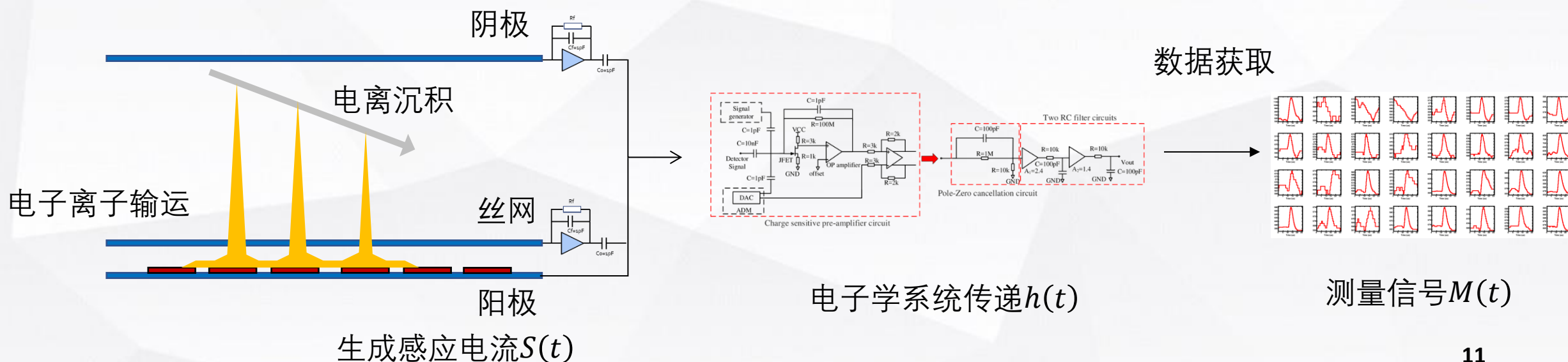
实验波形分析

- 采取方法：波形拟合+波形反演
- 对采集波形进行拟合获取基本物理信息
- 假设探测器感应电流为 δ 信号，测量信号近似表达式：

$$\bar{M}(t) = \int_0^t S(t')h(t-t') dt' \approx A \left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)^3 e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \theta(t-t_0) + B$$

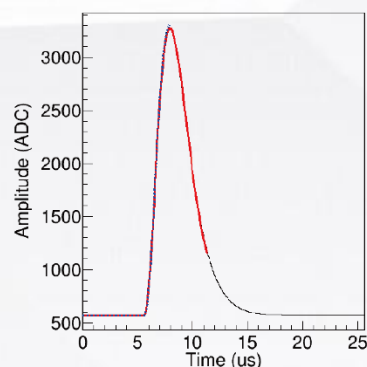
- t_0 可用以重建 z 方向位置， A 可用以重建沉积能量

A : 波形幅度
 t_0 : 起始时间
 τ : 波形宽度
 B : 波形基线

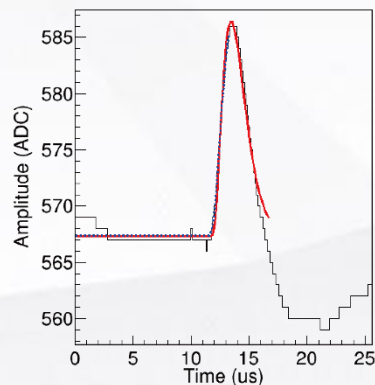


实验波形分析

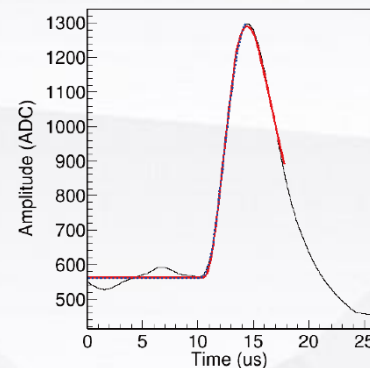
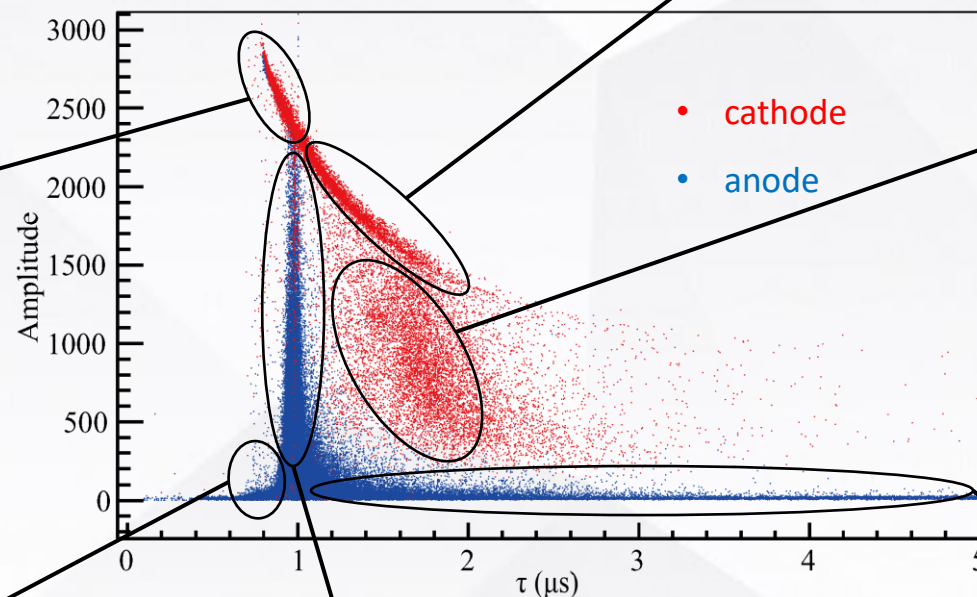
- 利用幅度 A -宽度 τ 联合分布可以对信号进行区分
- 拟合过程包括全峰拟合和前沿拟合



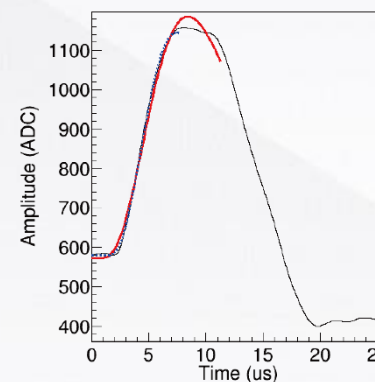
饱和信号



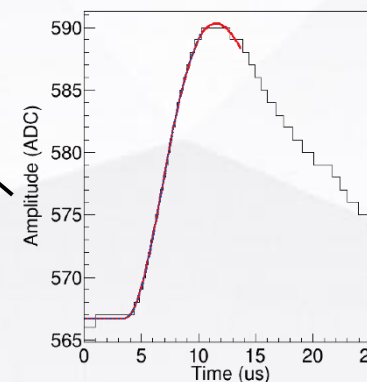
串扰信号



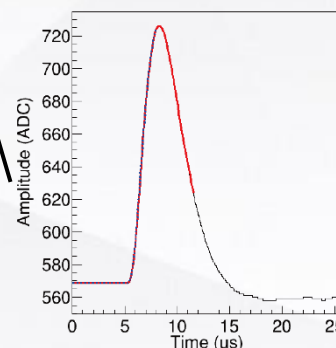
单事例



堆叠事例



扩散信号

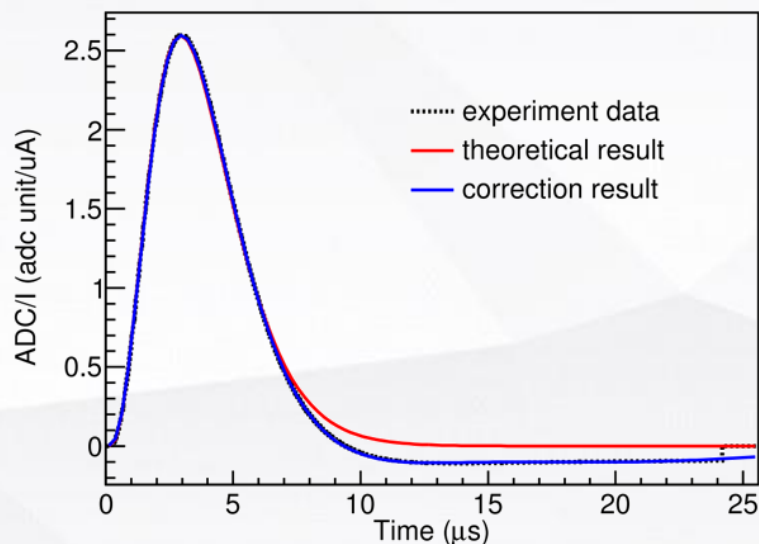


雪崩信号

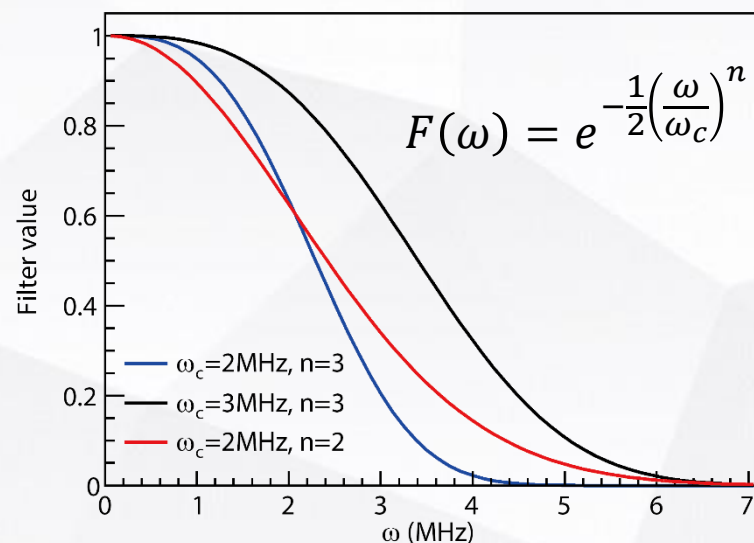
实验波形分析

- t_0 精度对于TPC具有重要影响:
 - 对于阴极信号, t_0 可用于中子能量的ToF法测量
 - 对于阳极信号, t_0 可用以重建z方向位置
- 为进一步提升时间精度, 对感应电流信号进行了反演:

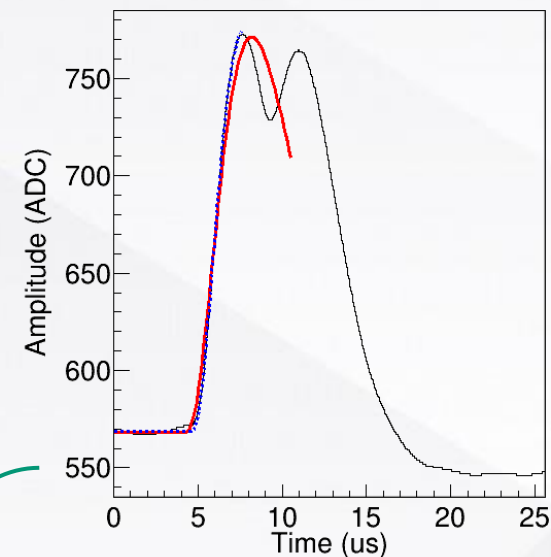
$$\text{重建信号 } \hat{S}(\omega) = \frac{\text{测量信号 } M(\omega)}{\text{电子学响应 } H(\omega)} \times \text{滤波 } F(\omega)$$



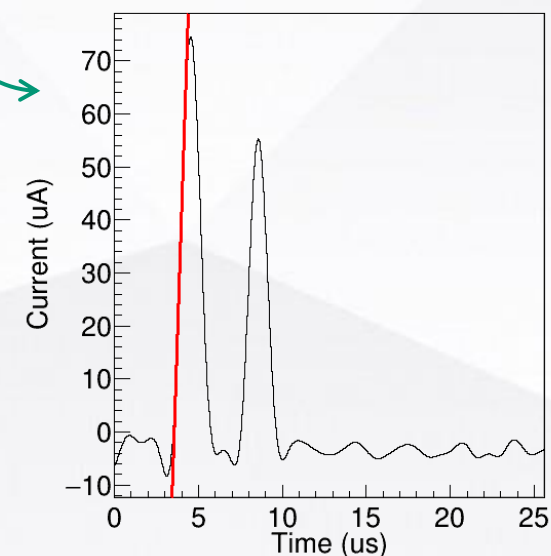
实测电子学响应 $H(\omega)$



不同参数下的滤波 $F(\omega)$



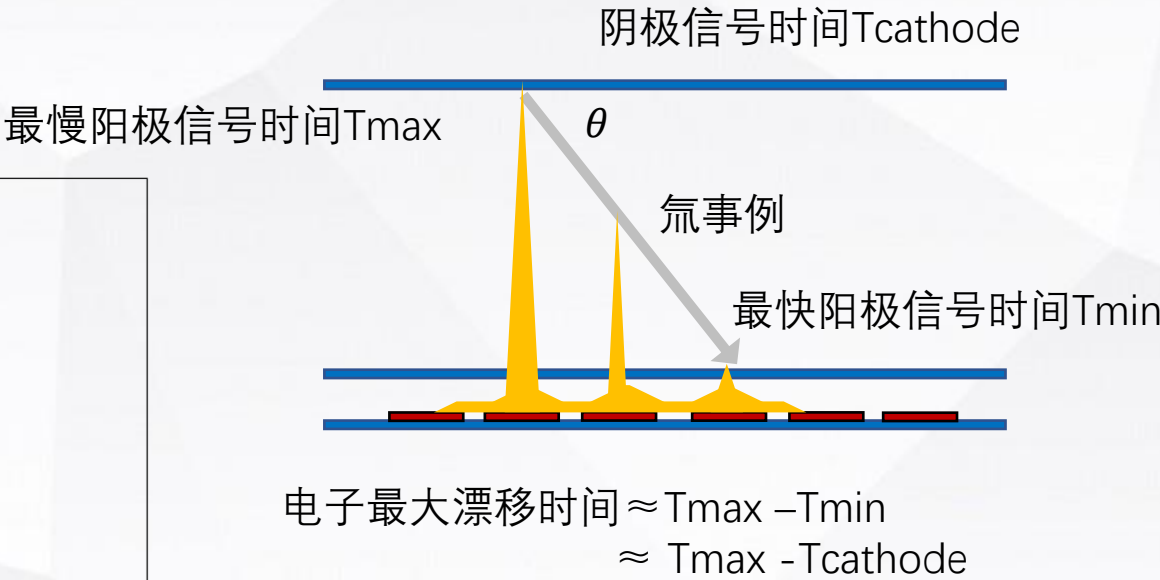
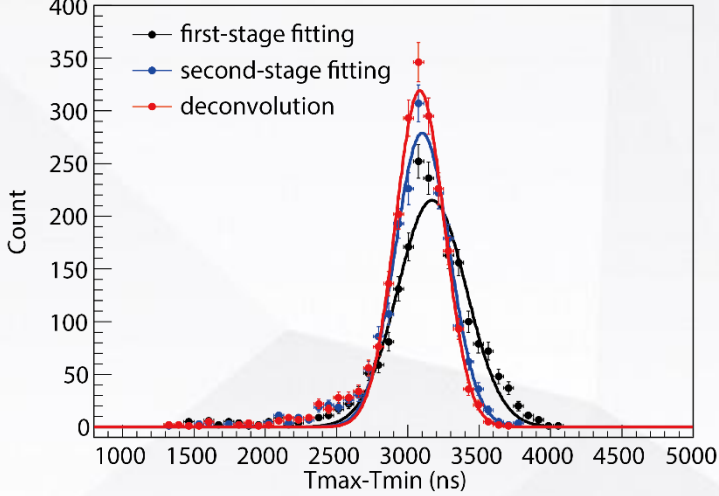
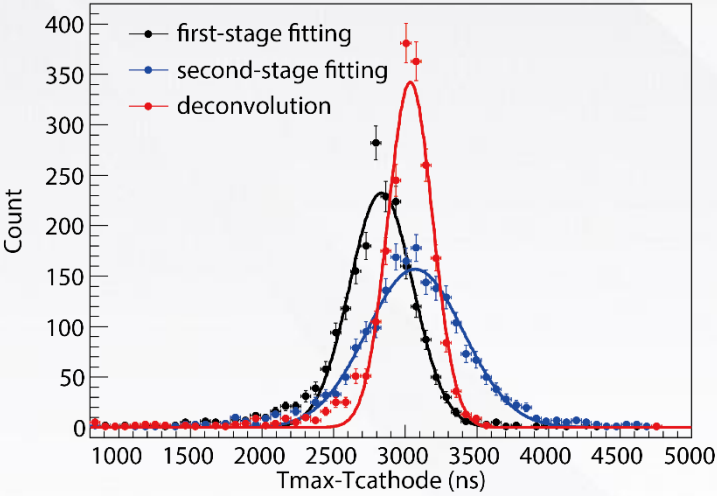
测量信号 $M(\omega)$



重建信号 $\hat{S}(\omega)$

实验波形分析

- 基于Garfield++对 θ 较大的氩事例的电子最大漂移时间进行刻度
- 波形反演在时间分辨和定时偏移上具有良好表现

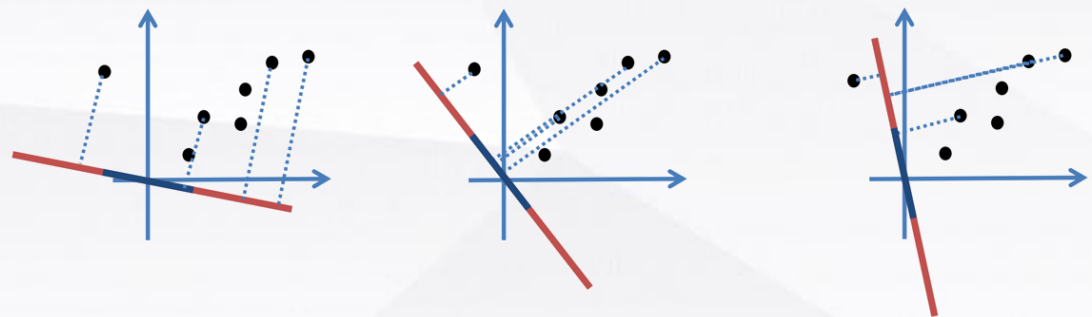


刻度结果

定时方法	阴极分辨 (ns)	阳极分辨 (ns)	阴极-阳极偏移 (ns)
全峰拟合	138.40	168.97	336.33
前沿拟合	308.37	131.68	32.83
波形反演	95.16	118.66	48.87

事例信息重建

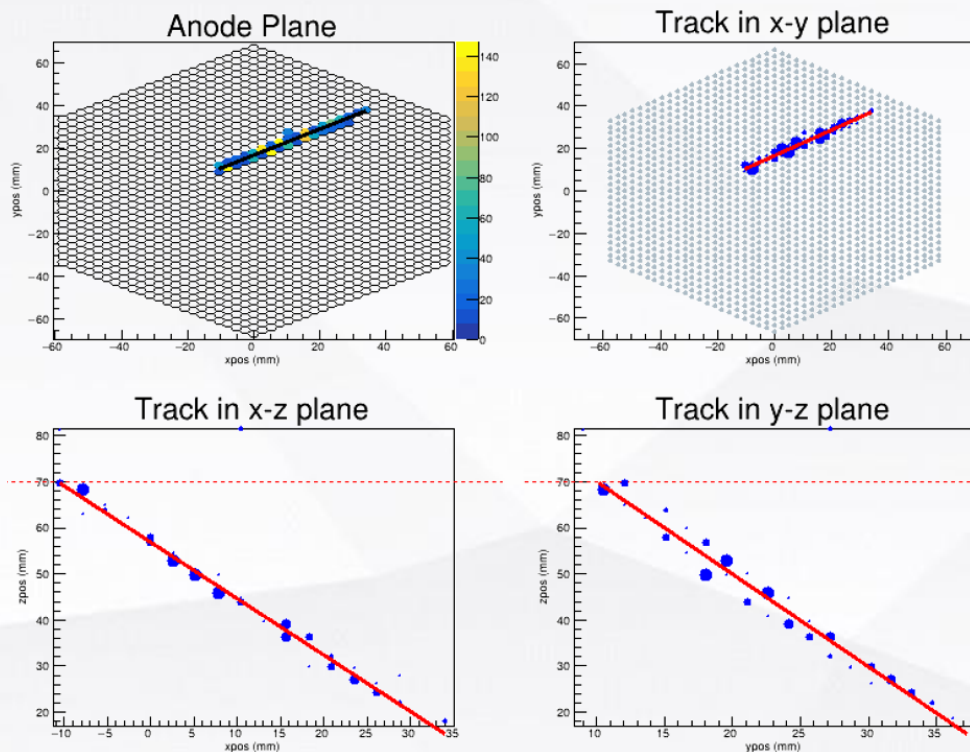
- 利用波形分析获取的物理信息进一步重建事例
- Hough变换寻找径迹点，主成分分析径迹拟合
- 射程通过对能损曲线进行KDE平滑处理获取



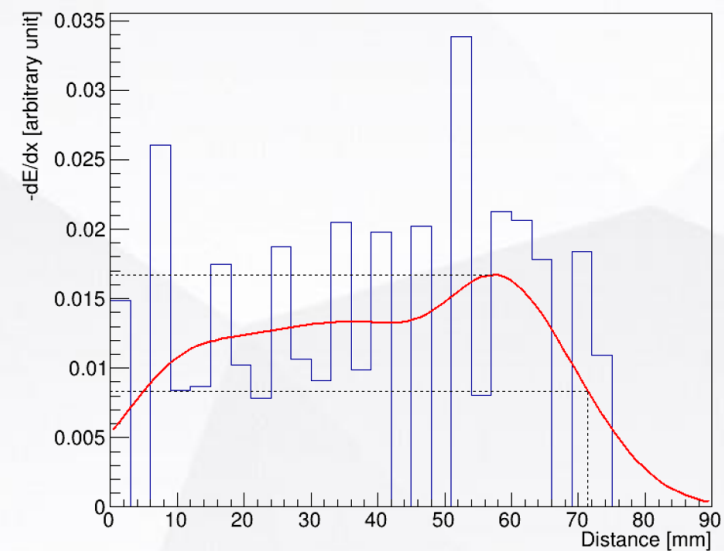
+1	4	0	0
0	2	6	3
-1	1	1	4
	10°	45°	80°

θ

Hough变换示意



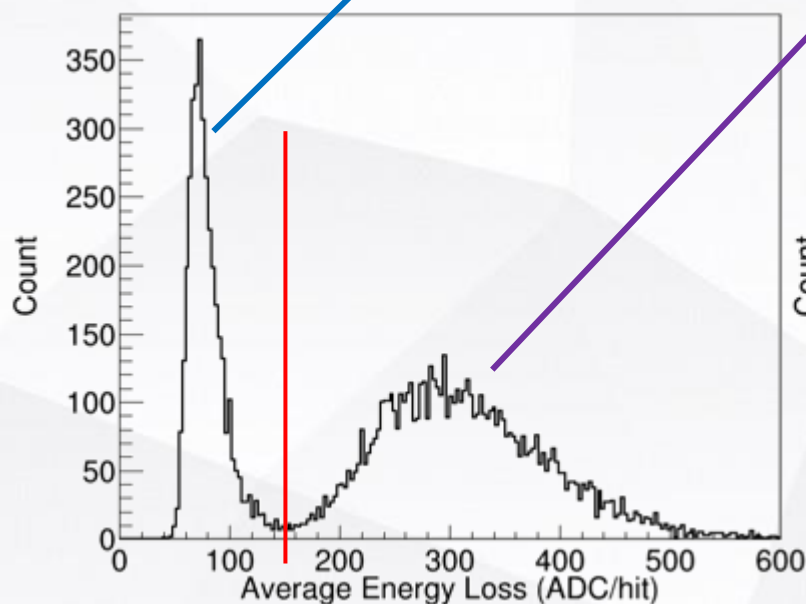
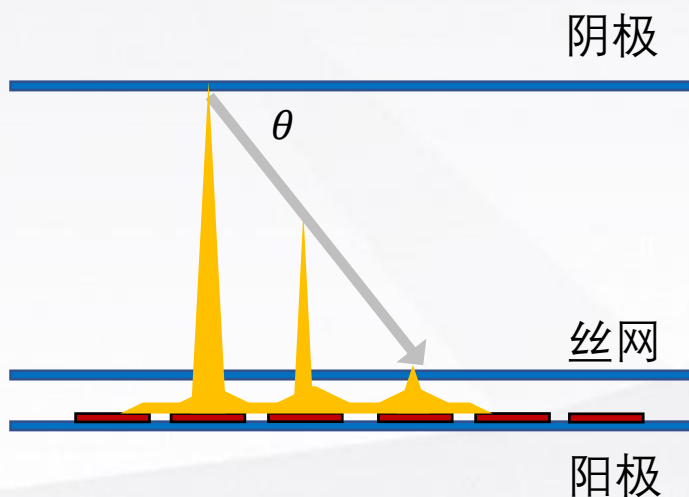
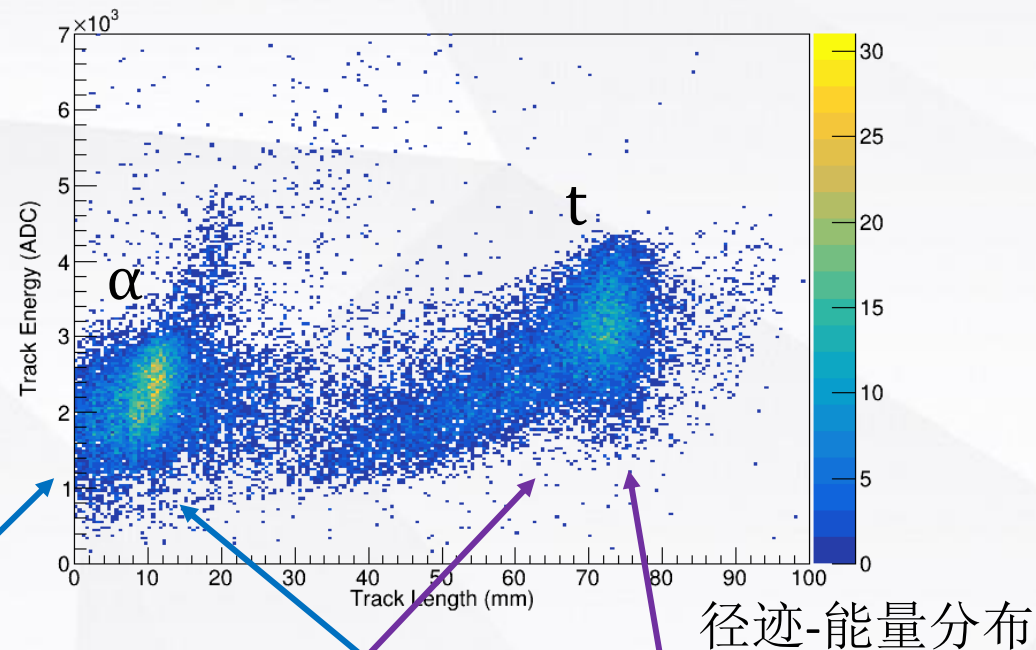
径迹拟合结果



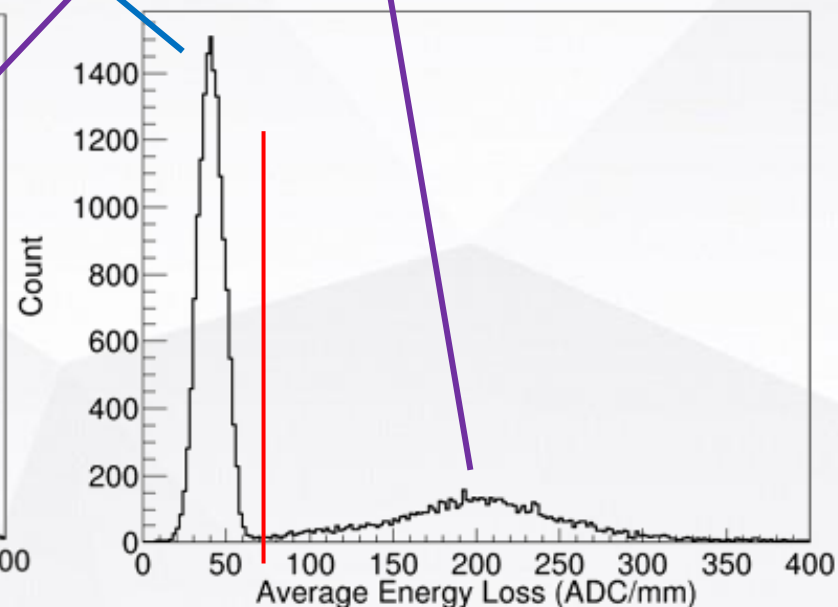
能损曲线平滑结果

计数率谱计算

- 基于径迹和能量对粒子做基本的筛选
- 对于 θ 较大的事例，可以以平均能损进行区分：
粒子能量 / 径迹长度
- 对于 θ 较小的事例，可以以电离均匀性进行区分：
粒子能量 / 击中pad数



电离均匀性分布

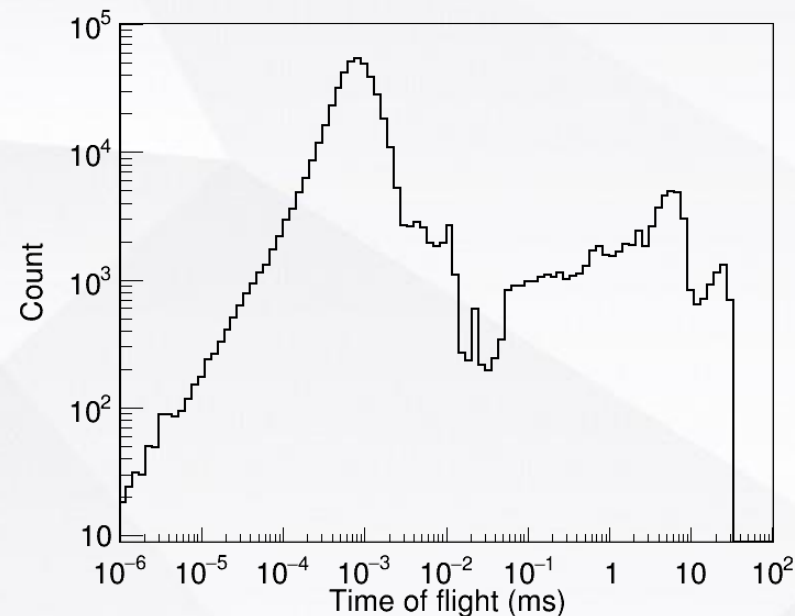


平均能损分布

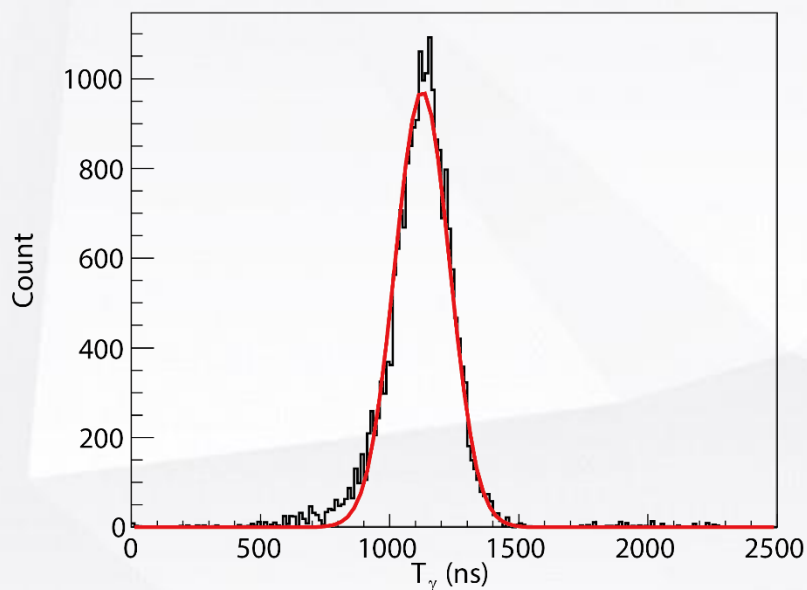
计数率谱计算

- 基于筛选出的事例进行计数率谱的统计
- ToF的触发时间到 neutron 产生时间由 γ flash 进行刻度 T_γ
- 中子飞行 L 距离通过不同中子能量 E_n 下 Ta 的共振峰进行刻度:

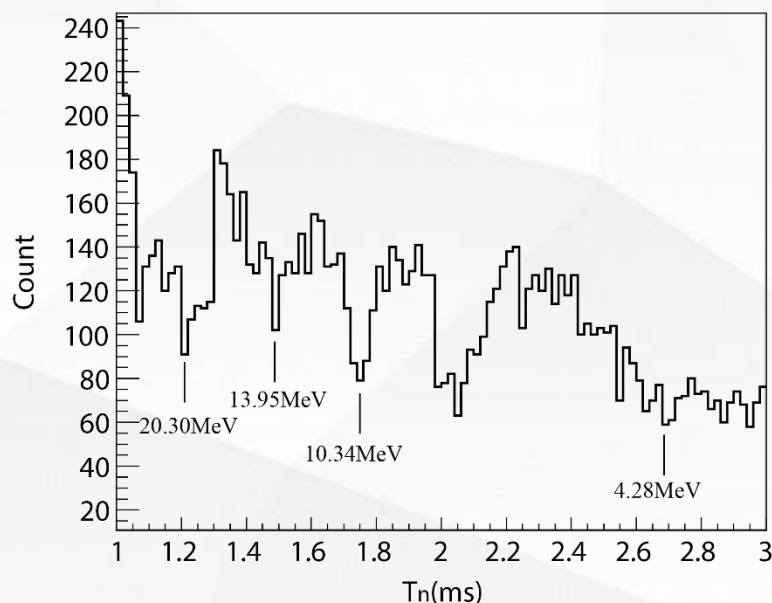
$$T_n - T_\gamma = \frac{L}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{E_n}{m_n c^2} + 1 \right)^{-2}}} - 1 \right]$$



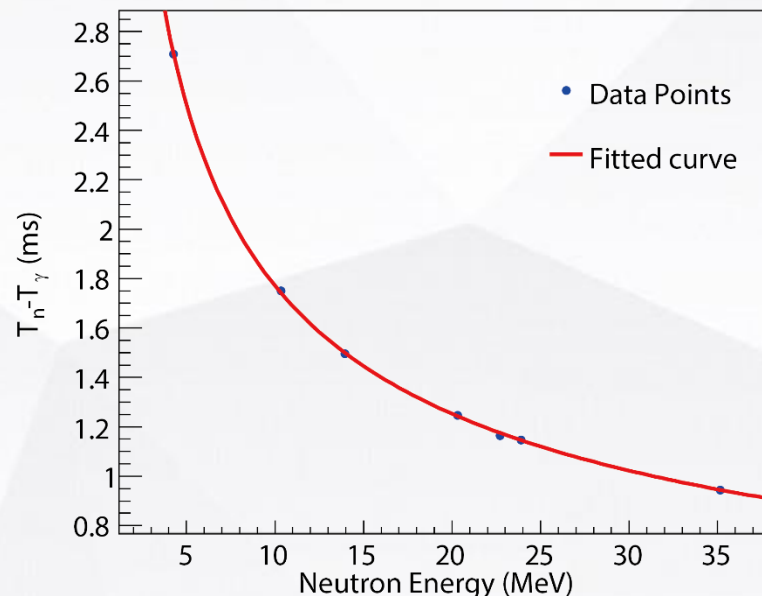
刻度后的计数率谱



γ flash 刻度结果



Ta 共振峰刻度



飞行距离刻度

总结展望

总结:

- 目前Back-n的MTPC装置进行了 ${}^6\text{Li}(\text{n},\text{t})\alpha$ 反应的测量
- 基于实验数据对数据分析算法进行了改进,提升了程序的时间分辨
- 对实验数据进行了初步的分析,计算了中子计数率谱

展望:

- 进行中子能谱的模拟及探测器效率的修正,进一步计算反应截面



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

谢谢大家！