



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



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



中山大学
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

基于多用途时间投影室的 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应截面测量研究进展



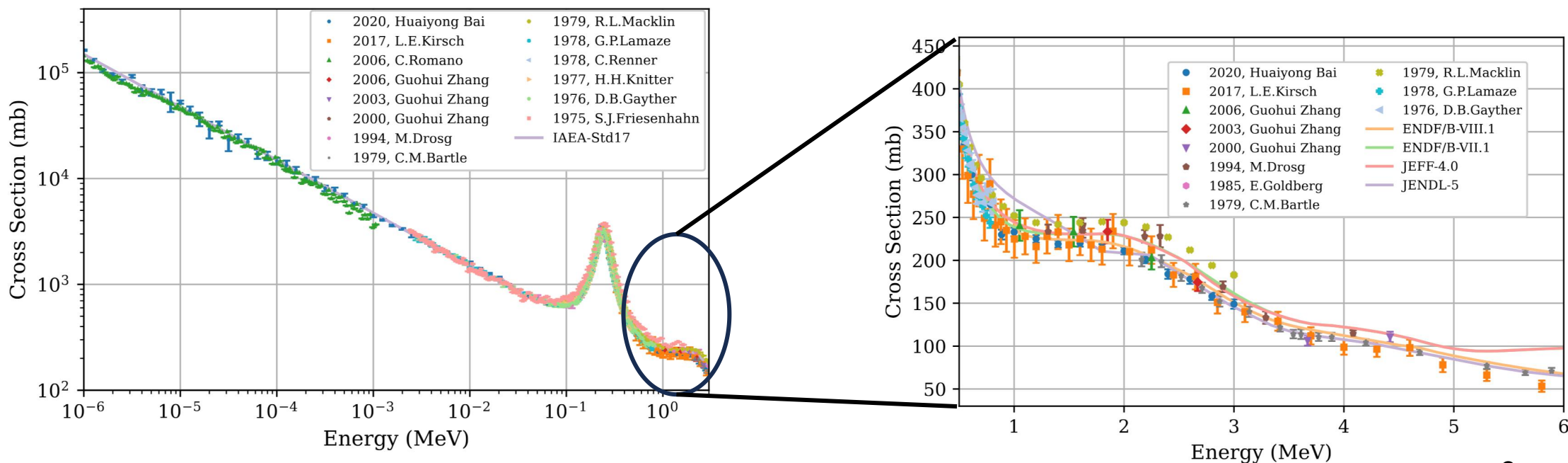
汇报人：陈宏昆

中山大学物理学院
散裂中子源科学中心
中国科学院高能物理研究所
2026 年 7 月 16 日

- 研究背景介绍
- 实验设置
- 实验分析
- 总结与展望

- ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应在中子能量1MeV以下是重要的中子截面标准, 反应截面的精度比较高(目前整体误差在0.5%), 是相对测量的基础
- 利用MTPC进行该反应的目的是:
 - 1) 探测器性能及可靠性的验证
 - 2) 对于MeV能区及微分截面测量的尝试

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

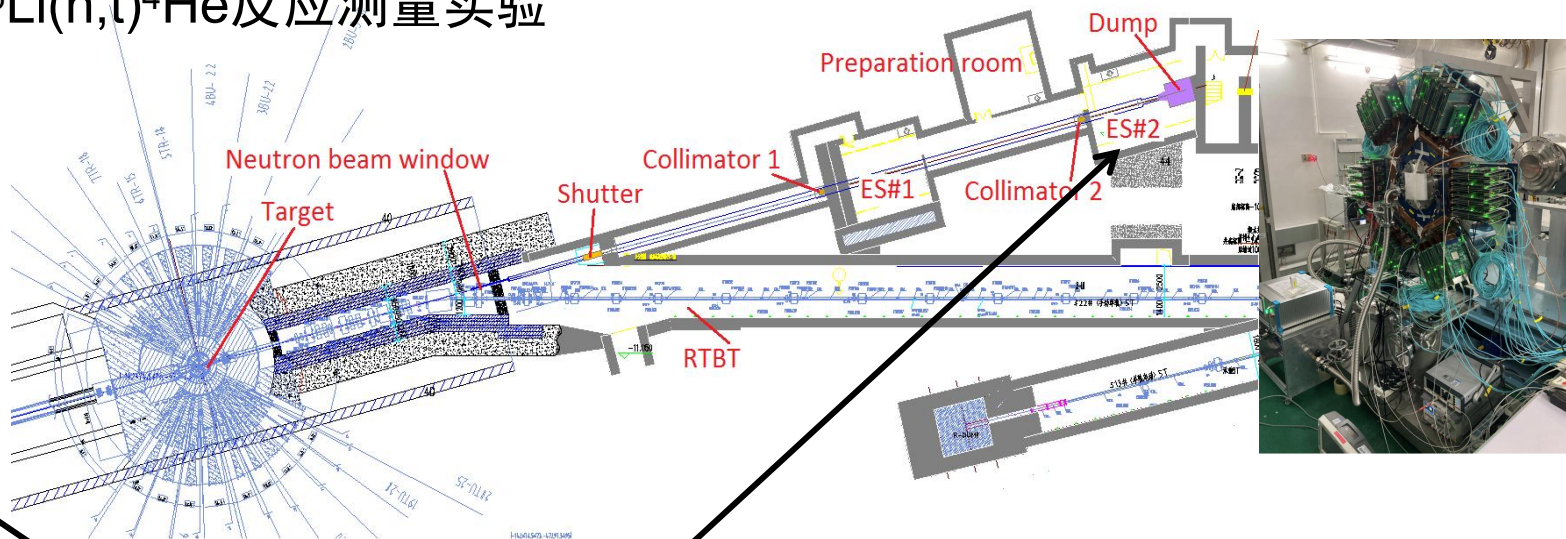


数据引自ENDF数据库

实验设置

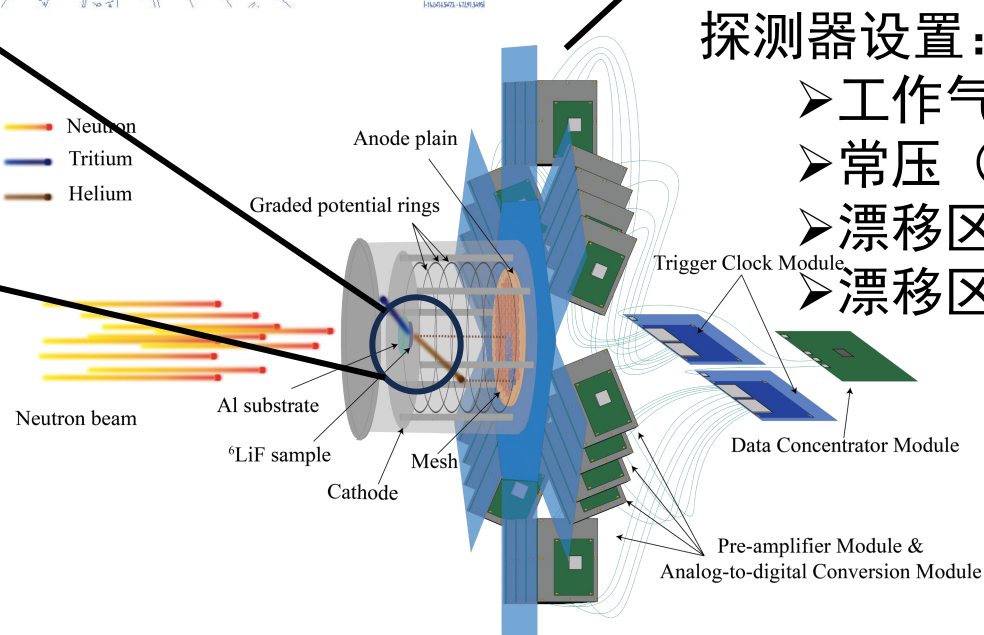
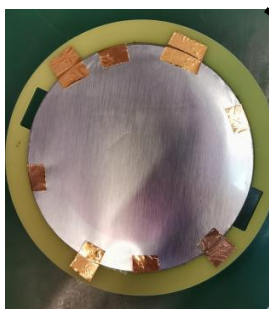
- MTPC在白光中子束流的 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应测量实验

白光中子束流终端2束斑设置:
1mmCd + 6cmPb + ϕ 30束流



${}^6\text{LiF}$ 样品参数:

- ${}^6\text{Li}$ 丰度 95%
- 面密度 148 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、厚度 560nm、直径 66mm
- Al衬直径 89mm、厚度 10.8 μm



探测器设置:

- 工作气体 Ar (93%) + CO₂ (7%)
- 常压 (93500Pa) 室温 (278.15K)
- 漂移区长度70mm
- 漂移区200V/cm, 正比区40000V/cm

目录

- 研究背景介绍

- 实验设置

- 实验分析

- 波形分析

电子学通用

- 事例重建与筛选

- 中子能量刻度

- 死时间修正

- 实验效率计算

- 中子能谱模拟

- 样品数密度计算

- 反应截面计算

TPC特有

白光实验通用

反应截面

$$\sigma(E) = \frac{N_c(E)}{S * N_t * N_n(E) * \epsilon(E)}$$

事例计数谱

束流面积

样品面密度

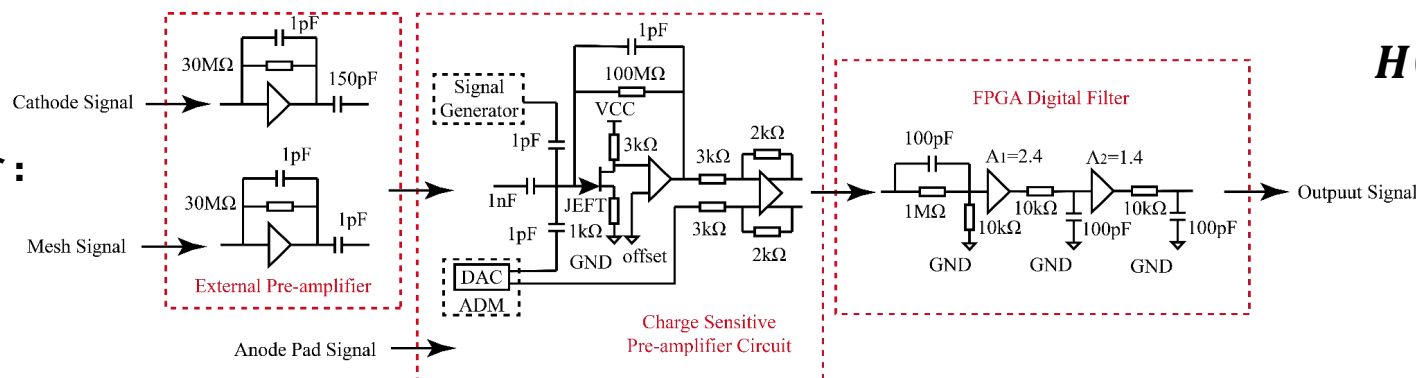
中子能谱

探测效率

- 总结与展望

- 由于在Micromegas探测器中电荷收集的时间较快，信号形状由电子学决定
- 利用电子学的近似响应公式对信号进行拟合与波形重建获取物理信息

波形拟合:



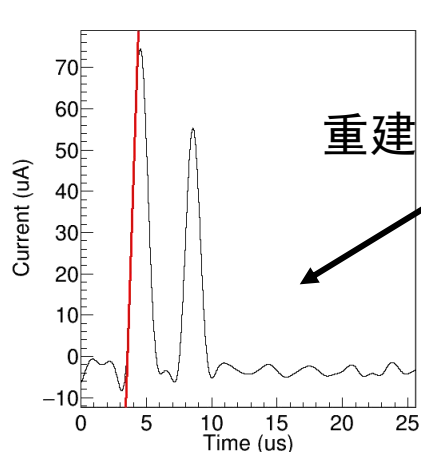
时间起点

波形基线

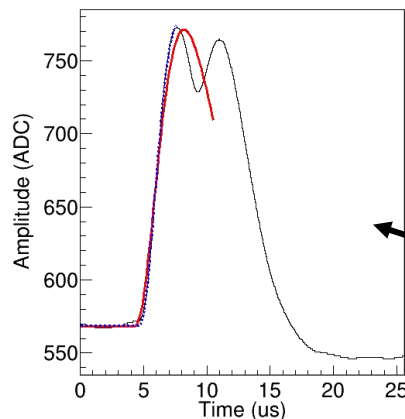
$$H(t) = A(t - t_0)^3 e^{-\frac{t - t_0}{\tau}} \theta(t - t_0) + B$$

波形幅度 波形宽度

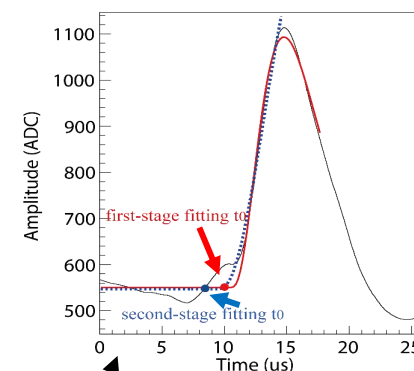
波形重建:



重建电流信号



电子学测量
波形信号



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

径迹重建与筛选

- 利用Hough变换及聚类算法寻找径迹并进行KDE处理提取径迹信息

平滑处理: $f_{KDE}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}nh} \cdot \sum_{i=1}^n e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{h}\right)^2}$

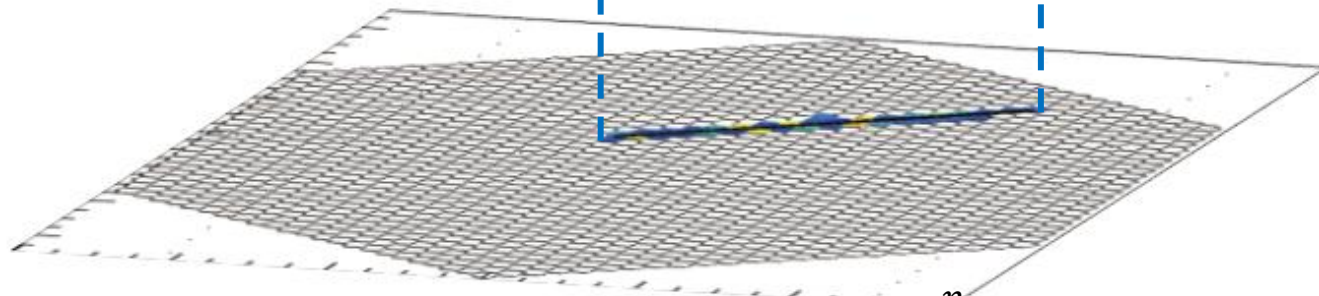
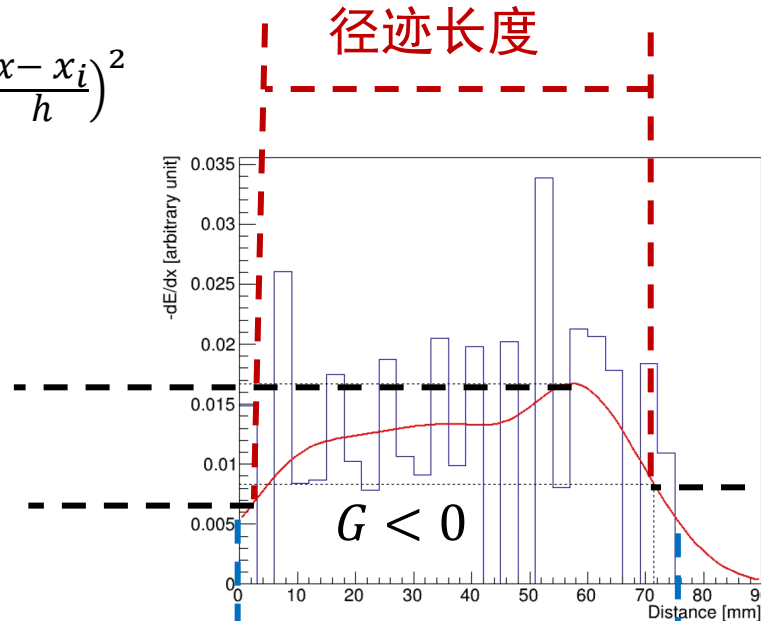
能损峰值 ($-dE/dx=A$)

径迹起点 ($-dE/dx=A/5$)

径迹长度

径迹能量: 电荷求和

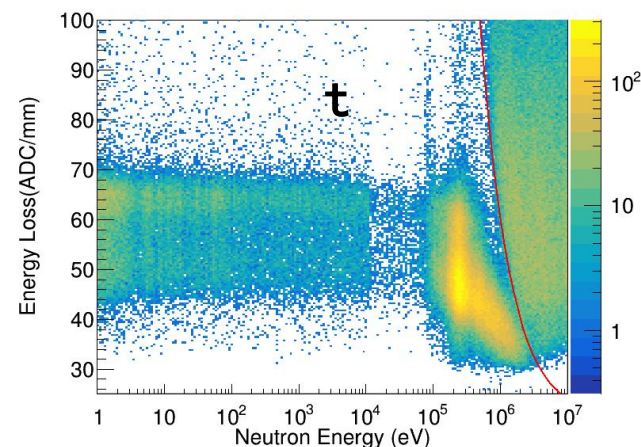
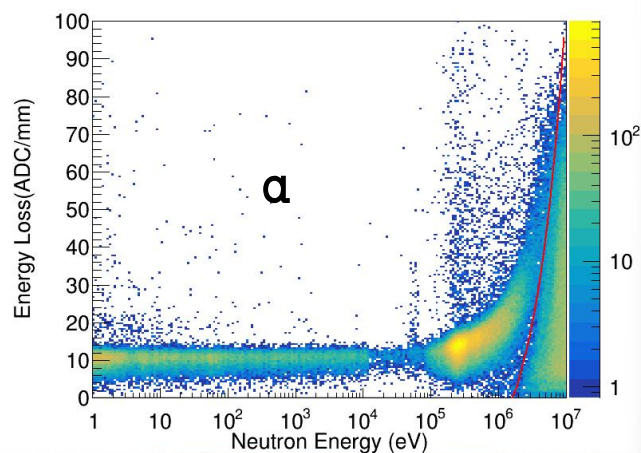
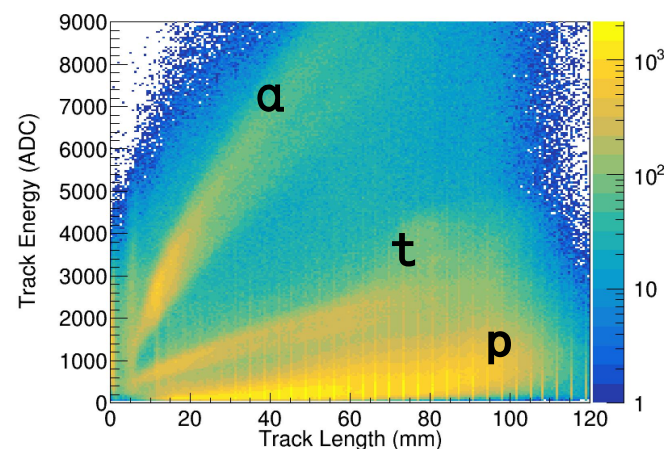
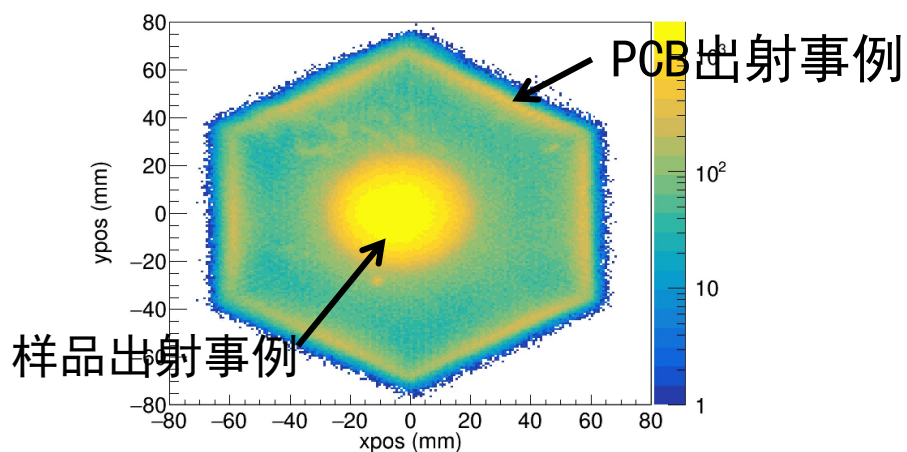
径迹终点 ($-dE/dx=A/2$)



方向由偏度确定: $G = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} \cdot \frac{m_3}{m_2^{3/2}}, m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k$

径迹重建与筛选

- 通过事例的顶点位置筛选出从样品出射的事例
- 利用能量-射程关系筛选出 α 和t事例
- 利用能损随中子能量的变化筛选出属于反应的事例



中子能量刻度

- 事例的计数修正包括中子能量的修正与死时间的修正
- 中子能量利用中子飞行时间法计算:

待求参数

L : 中子飞行距离

T_{local} : 事例定时

T_d : 打靶时间间隔

$$E_n = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{c \cdot TOF}\right)^2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{c \cdot (T_{local} - T_d)}\right)^2}}$$

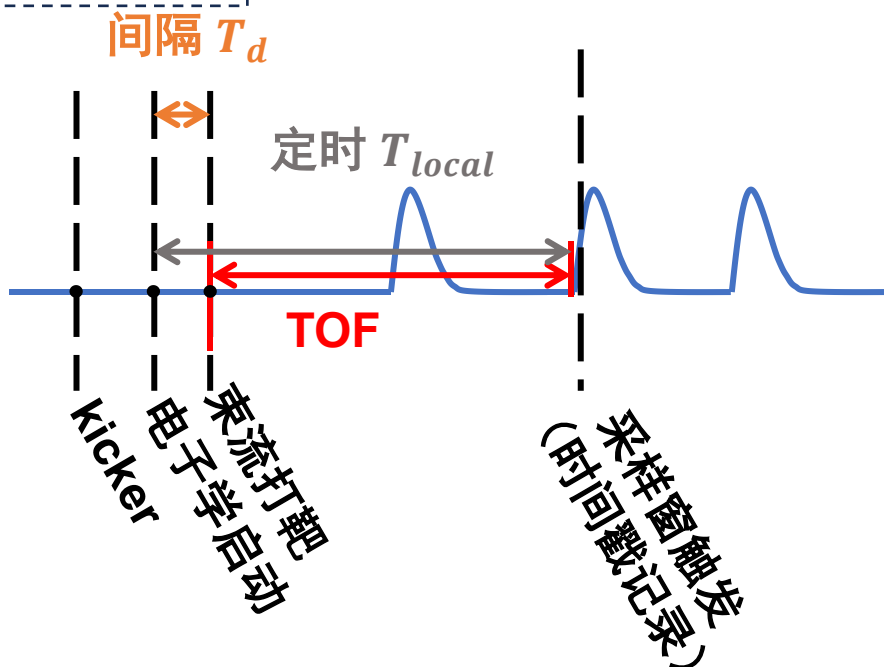
T_d 和 L 刻度方法

对于中子信号有: $TOF_n = T_n - T_d = \frac{L}{v_n}$

对于 γ -flash信号有: $TOF_\gamma = T_\gamma - T_d = \frac{L}{c}$

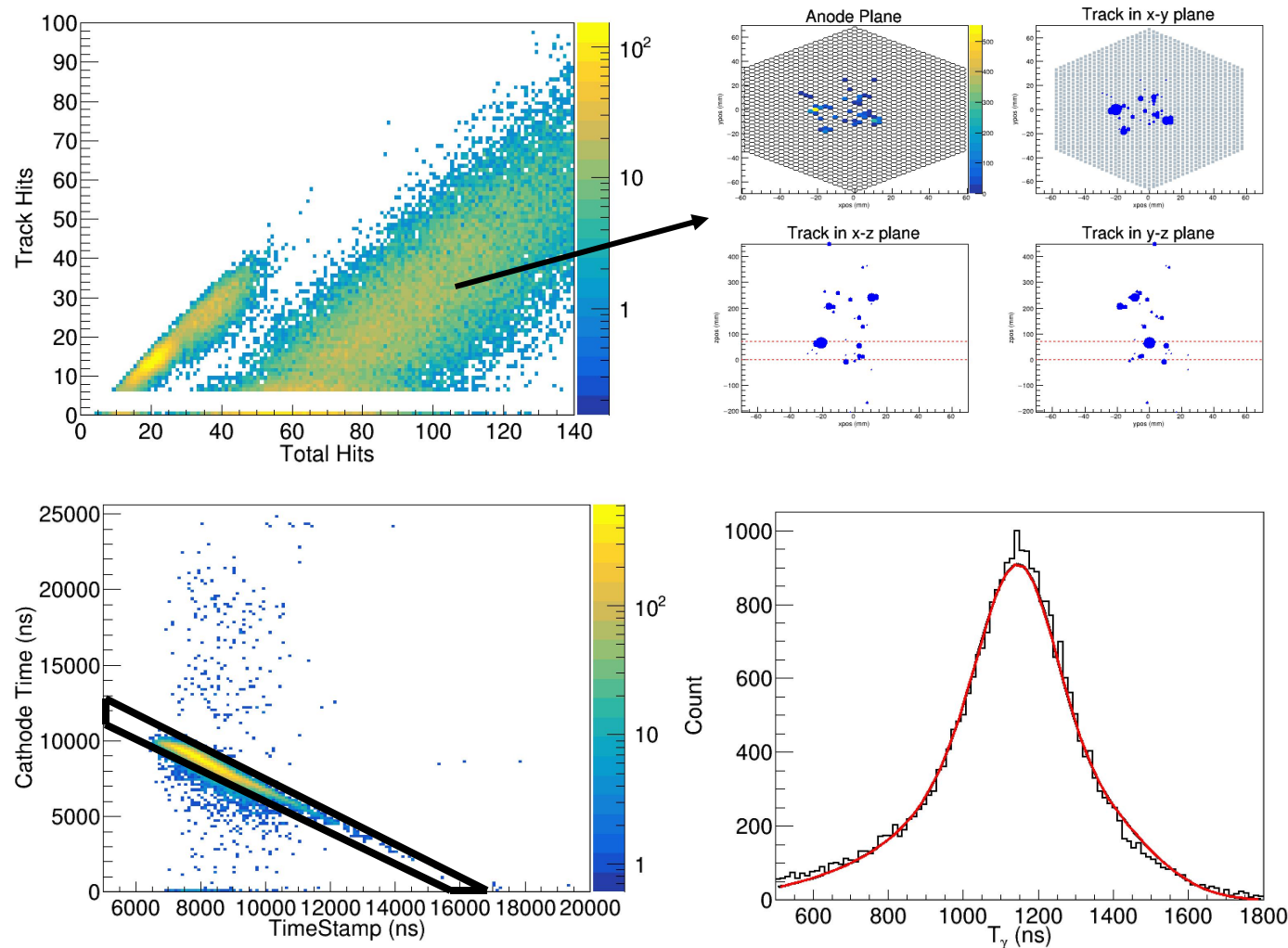
$$v_n = c \cdot \sqrt{1 - (E_n / (m_n c) + 1)^{-2}}$$

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



中子能量刻度

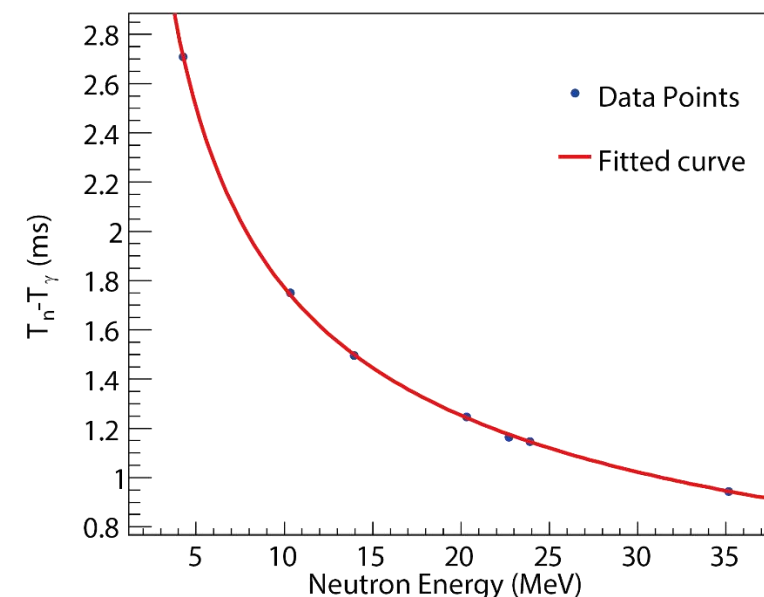
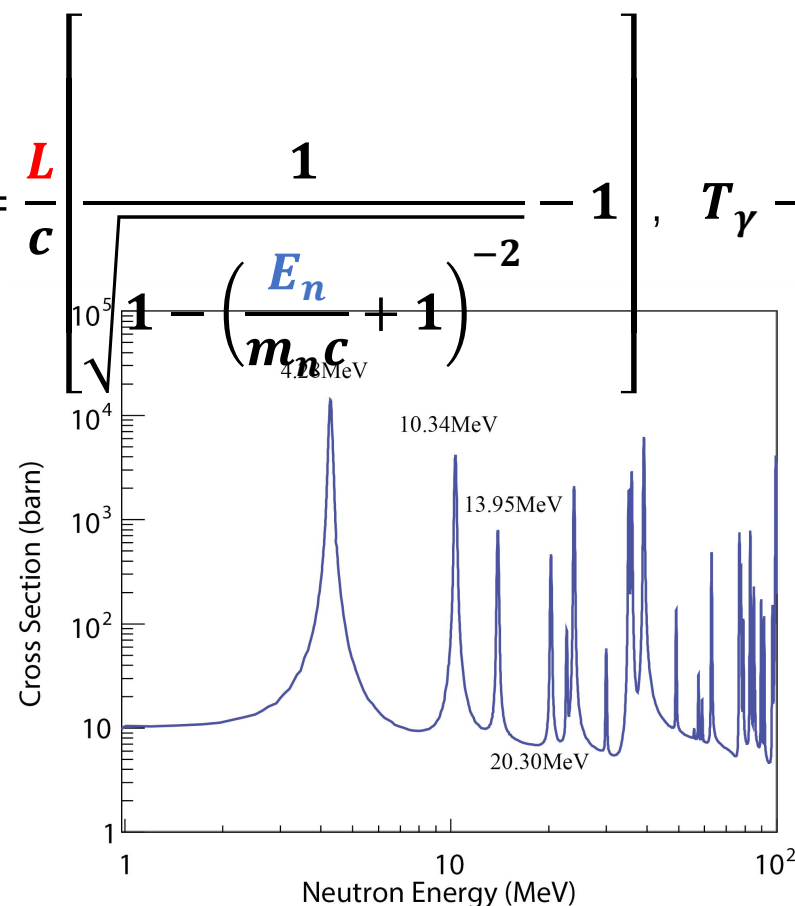
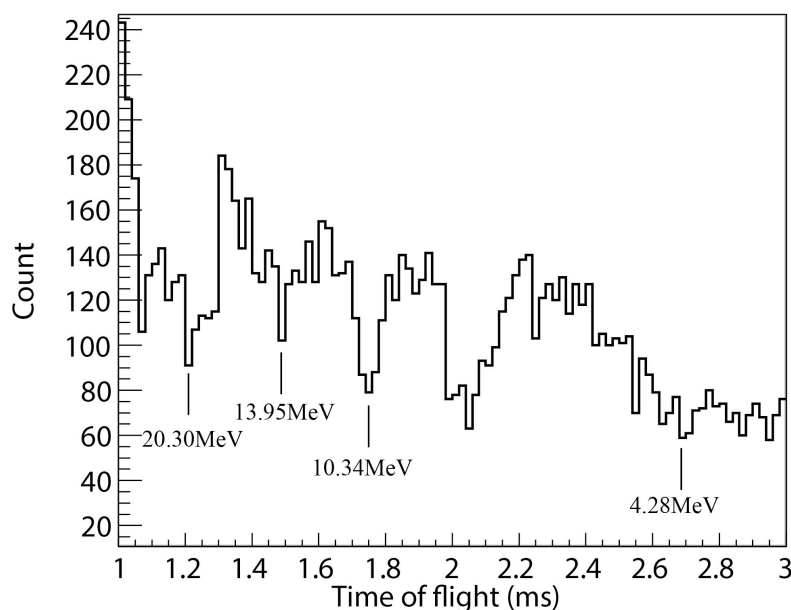
- 选取击中pad数远大于径迹上pad数且阴极时间与时间戳相关联的 γ -flash事例
- 统计 γ -flash的到达时间 T_γ ，利用双对数高斯分布进行拟合



中子能量刻度

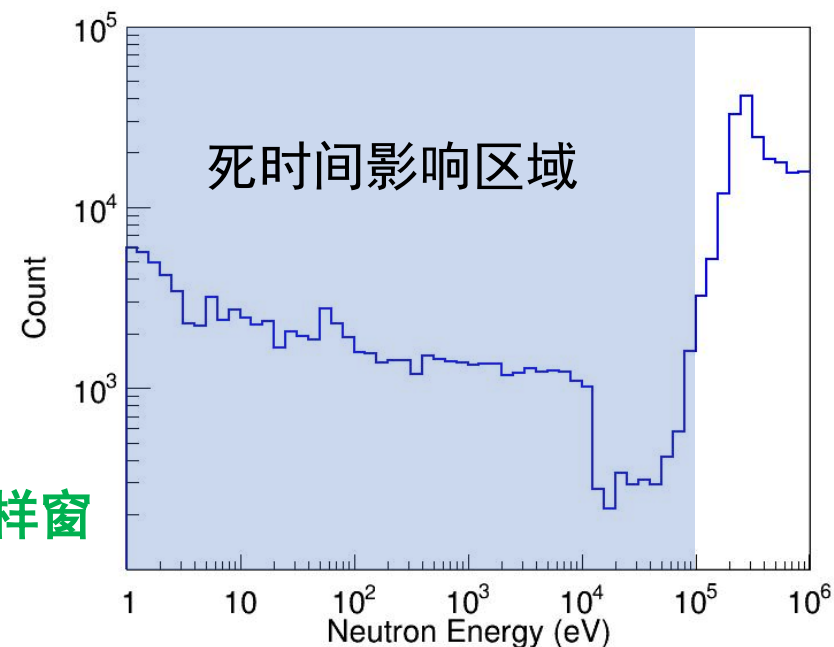
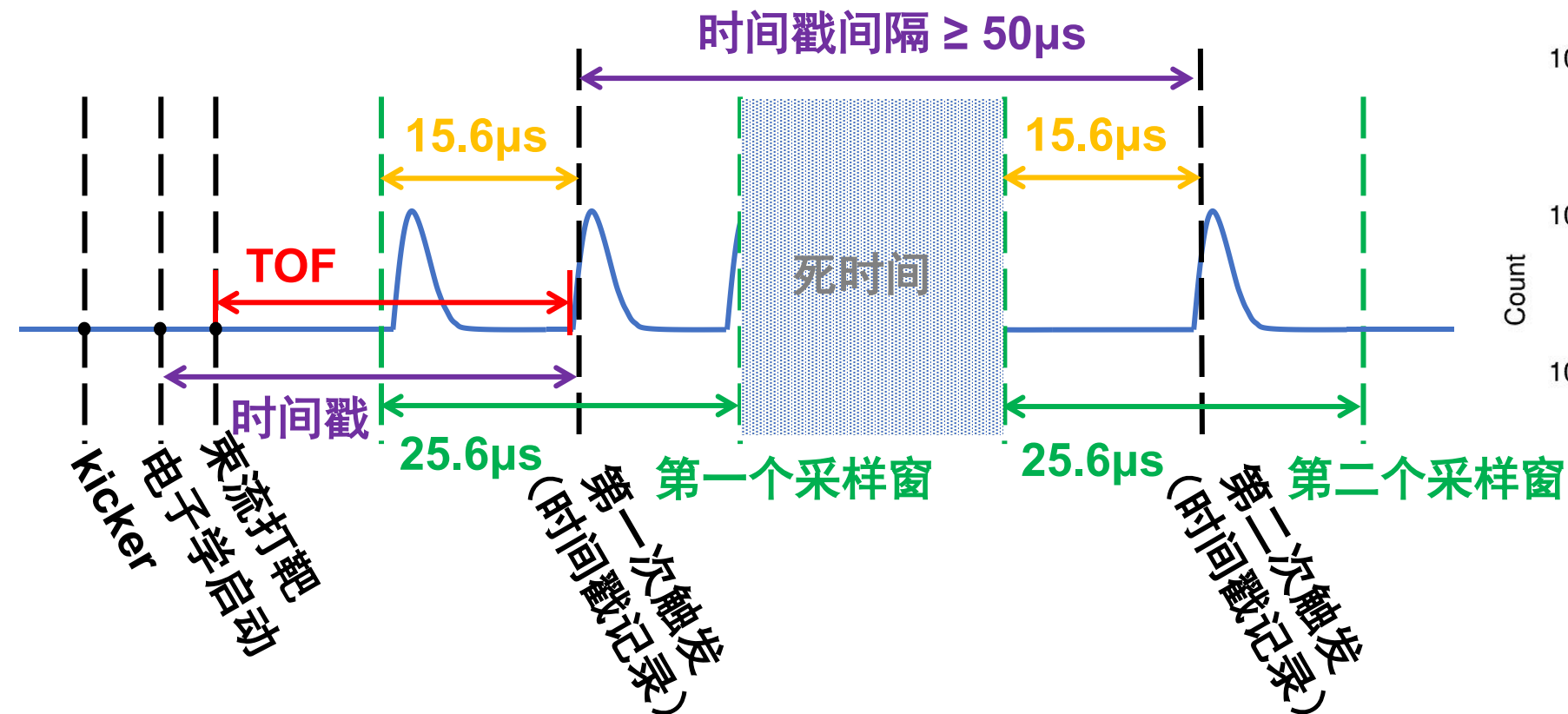
- 散裂的中子靶外层由Ta组成，通过Ta的共振吸收峰寻找中子能量 E_n -飞行时间 T_n 对
- 利用刻度公式拟合得到 L ，进一步计算 T_d

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



死时间修正

- 实验中MTPC电子学开启采样窗的时间间隔造成了探测器的死时间现象
- 死时间最终导致了实验在低能区的计数损失



- 由于死时间由时间戳引起，所以修正从时间戳开始
- 测量 $N_o[n]$ 和实际谱 $f(TS^j) = N_c[m]$ （时间戳谱）存在关系：

$$N_o[n] = f(N_c[m])$$

$$= N_b \times P(\text{不考虑死时间时产生计数}) \times P(\text{不在之前Bin造成的死时间范围内})$$
- 继而通过 $N_o[n]$ 重建出 $N_c[m]$

无需考虑堆叠，与经典非瘫痪型死时间模型类似

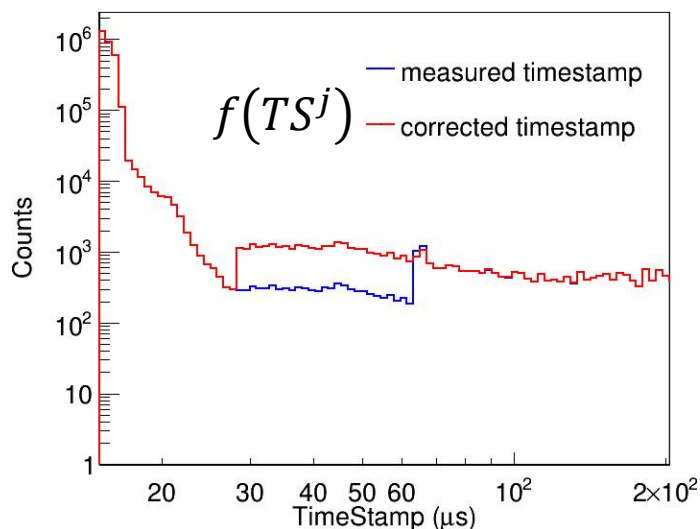
$$N_c[i] = \begin{cases} -\ln\left(1 - \frac{N_o[i]}{N_b - \sum_{j=1}^{i-1} N_o[j]}\right) & , 25\mu s < i < 60\mu s \\ -\ln\left(1 - \frac{N_o[i] - \frac{N_o[i-n_1]}{N_b} \sum_{j=i-n_2}^{i-1} (N_c[j] - N_o[j])}{N_b - \sum_{j=i-n_1}^{i-1} N_o[j]}\right) & , i > 60\mu s \end{cases}$$

考虑死时间事例堆叠

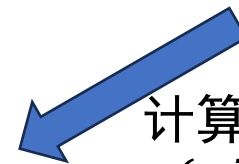
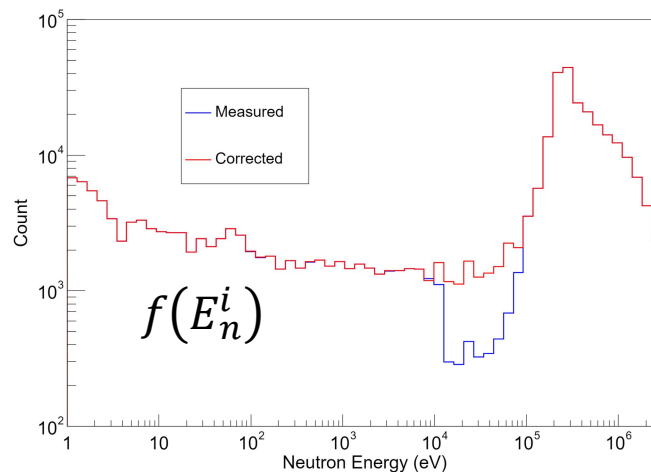
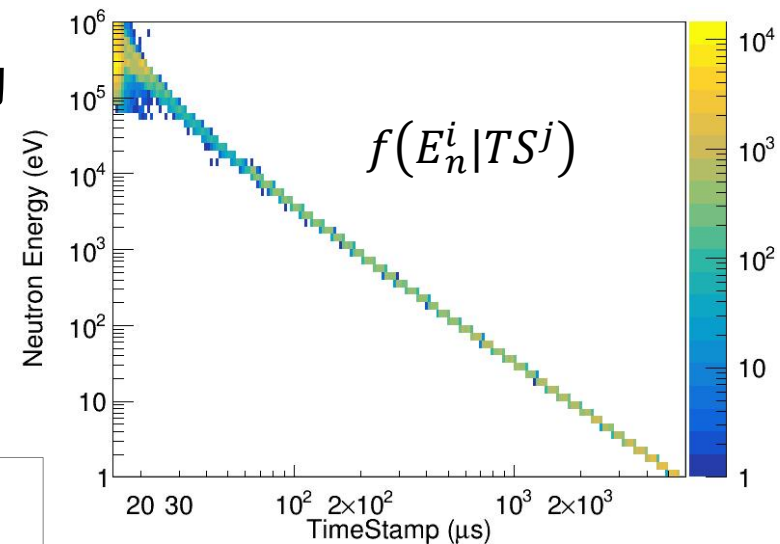
参数	参数含义
N_b	束流总脉冲次数
$N_o[i]$	第 i 个 Bin 的测量计数
$N_c[i]$	第 i 个 Bin 的修正后总计数
n_1	死时间窗口远端 Bin
n_2	堆积窗口远端 Bin

死时间修正

- 通过时间戳的概率模型进行递归重建
- 通过中子能量和时间戳的关联性，将时间戳的修正 $f(TS^j)$ 转化成计数率谱的修正 $f(E_n^i)$
- 构建这一联系的关键在于二者的条件分布概率 $f(E_n^i|TS^j)$



构建时间戳与中子能量的
条件分布关系 $f(E_n^i|TS^j)$



计算修正后的计数率谱
 $f(E_n^i) = f(E_n^i|TS^j) \cdot f(TS^j)$

死时间修正

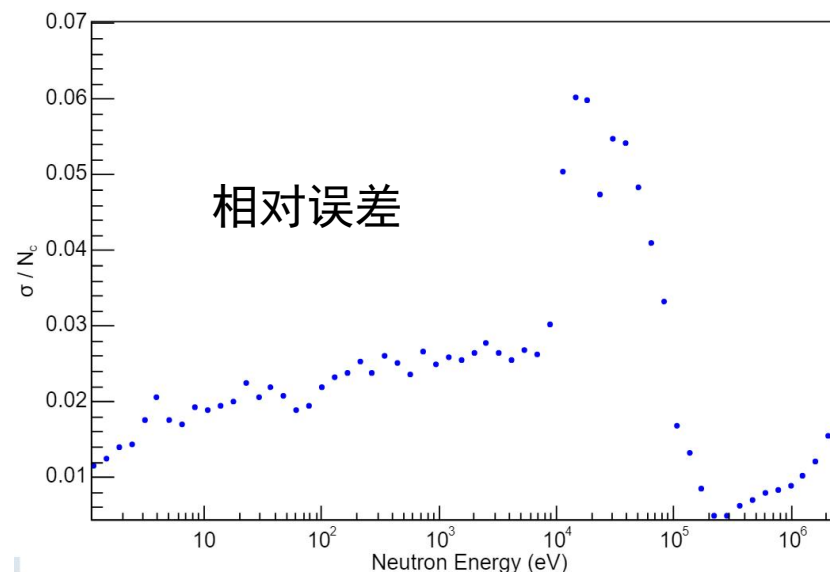
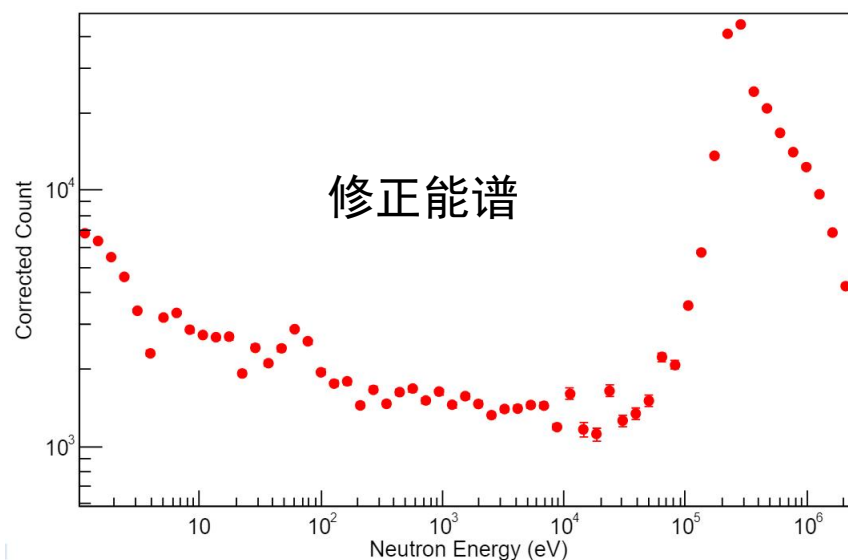
- 由于 $f(TS^j)$ 与 $f(E_n^i|TS^j)$ 均与 $N_o[n]$ 相关，解析误差传递过程十分困难
- 可利用 $N_o[n]$ 作为输入进行参数Bootstrap计算：

单次采样有：

$$N_o^*[j] \sim \text{Poisson}(N_o[j]) \rightarrow f^*(TS^j), f^*(E_n^i|TS^j) \sim \text{Multinomial}(N_o^*[j]; f(E_n^i|TS^j))$$

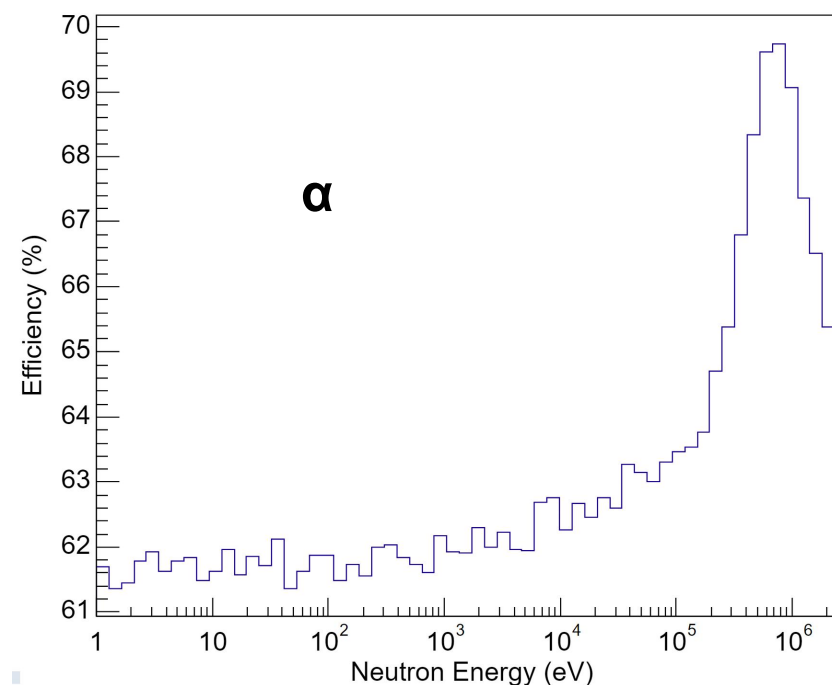
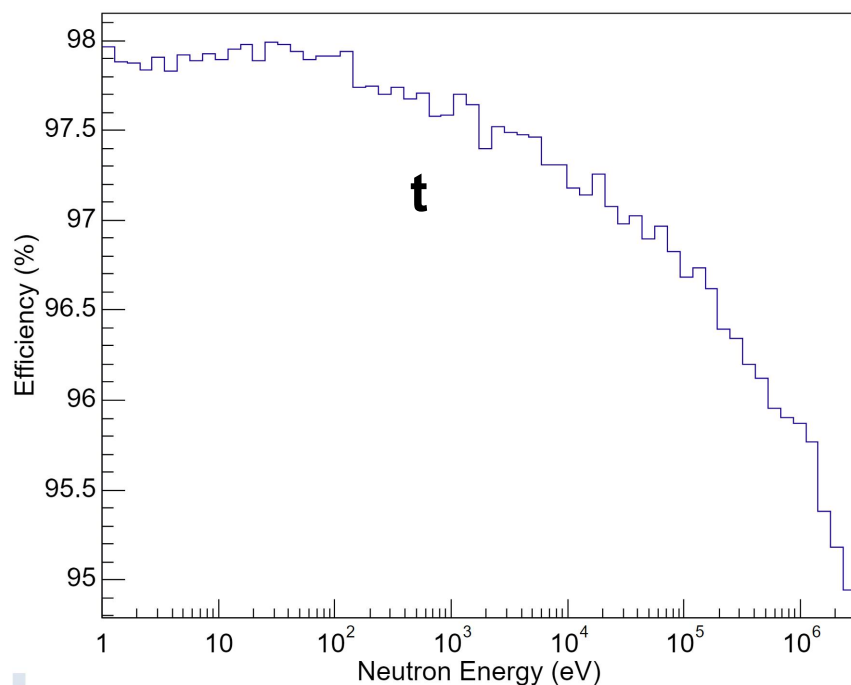
$$f^*(E_n^i) = f^*(E_n^i|TS^j) \cdot f^*(TS^j)$$

- $N_c[n]$ 的误差为多次抽样的标准差统计结果



实验效率计算

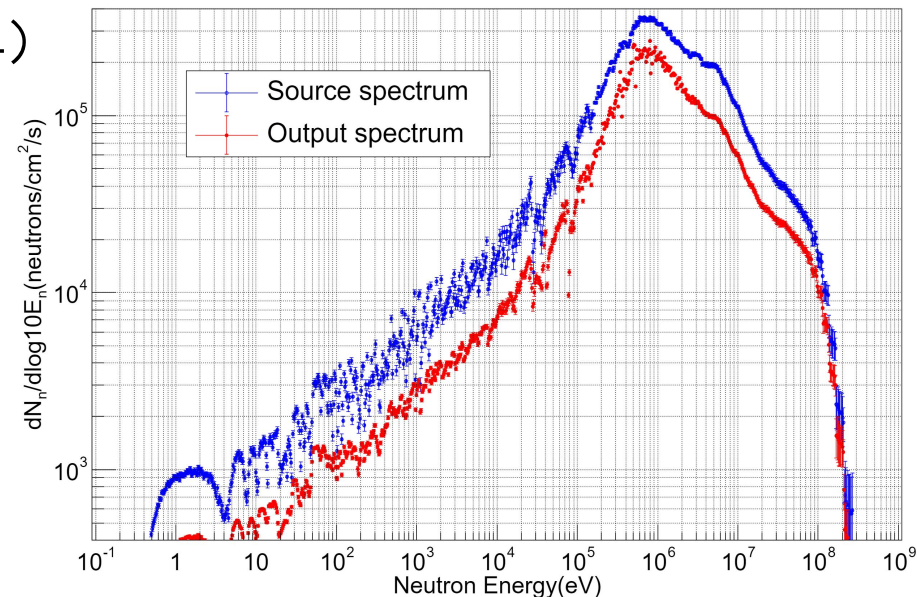
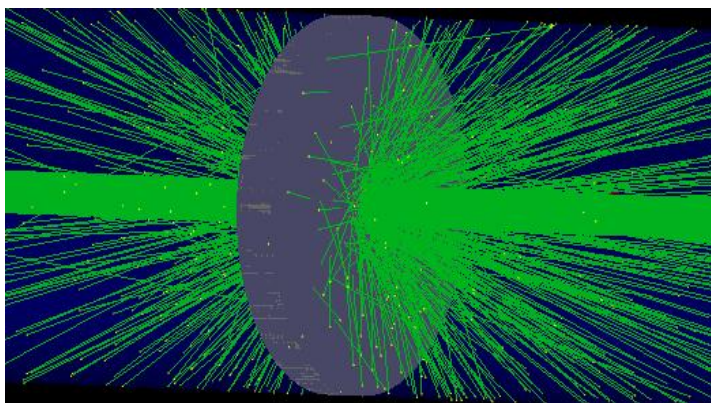
- 不同粒子实验效率随中子能量的关系
- 受径迹长度的影响， α 粒子的探测效率明显小于t



- 中子能谱的计算基于2022年对白光束流的测量结果 $N_{in}(E_i)$
- 当前实验的束流条件 $N_n(E_i)$ 可作为以往束流测量的线性传播的结果：

$$N_n(E_i) = \sum_j R_{ij} N_{in}(E_j)$$

- 该传递关系（传播矩阵 R_{ij} ）的由MC方法得到（基于GEANT4）



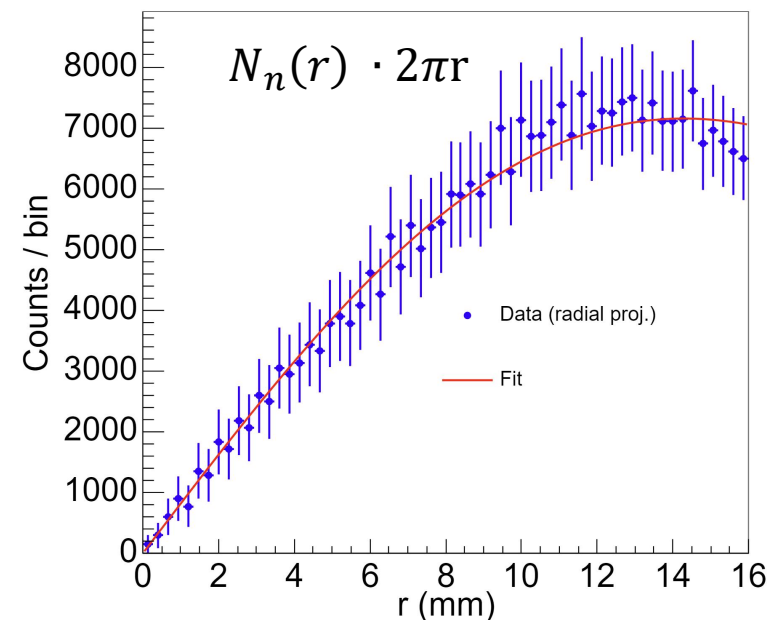
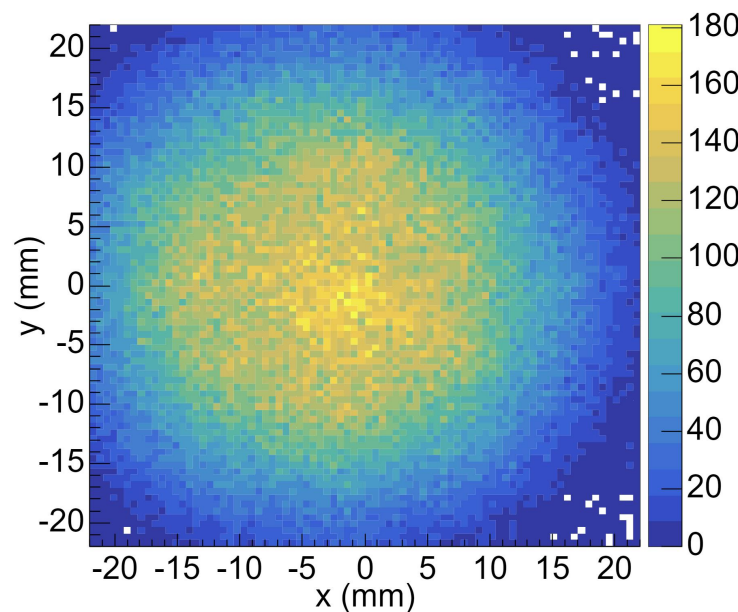
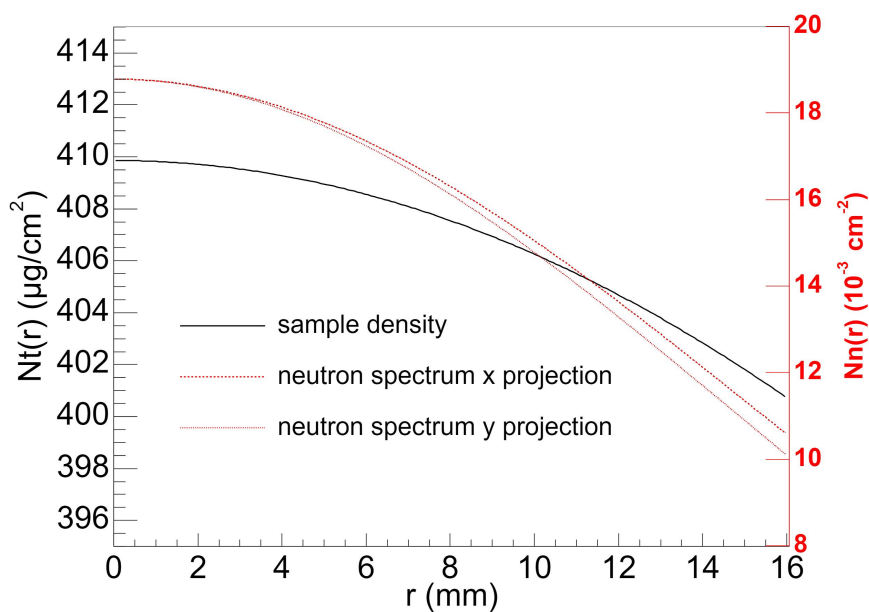
- 总体误差由以往测量误差 $\sigma_{EX,i}^2$ 与MC的统计误差 $\sigma_{MC,ij}^2$ 共同决定：

$$\text{Cov}(E_i, E_j) = \sum_k \overline{R_{ik}} \cdot \overline{R_{jk}} \sigma_{EX,k}^2 + \sum_k \overline{N_{in}(E_k)} \cdot \overline{N_{in}(E_k)} \sigma_{MC,ik}^2 \delta_{ij}$$

- 由于MTPC的反应顶点空间分辨能力，测量过程中可以考虑靶与束流的不均匀性，实际样品面密度的计算应变成积分：

$$S * N_t * N_n \rightarrow \iint_{\text{束流范围}} N_t(\vec{r}) * N_n(\vec{r}) d\vec{r}$$

- 结合蒸镀薄片样品面密度分布模型得到 $N_t(\vec{r})$ ，利用 $N_t(\vec{r}) * N_n(\vec{r})$ 对反应顶点进行拟合分析



截面计算

- 截面计算结果显示在1MeV以上的截面与目前数据库有较大偏差
- 后续对效率的计算采用更贴合实验的事例筛选方法
- 除10keV在100keV区域，整体的相对误差较小在5%以内

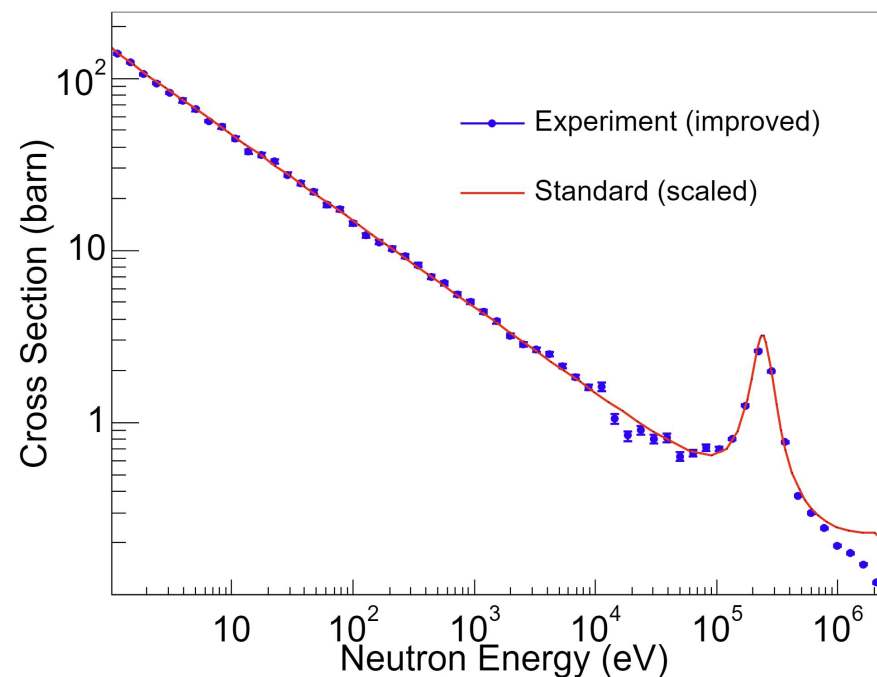
反应截面 $\sigma(E) = \frac{\text{事例计数谱 } N_c(E)}{S * N_t * N_n(E) * \epsilon(E)}$

束流面积 S

样品面密度 N_t

中子能谱 $N_n(E)$

探测效率 $\epsilon(E)$





总结和展望

总结：

- ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反应作为标准截面，其在MeV区域存在更精确的数据需求
- 研究利用多用途时间投影室装置对反应进行了测量
- 基于实验发展了MTPC探测器的实验分析方法
- 通过分析以及修正初步得到了3MeV以下的截面结果

展望：

- 将对反应的角分布进行分析，并将积分截面的修正方法推广至微分截面的计算
- 更改探测器的电子学逻辑（双触发）在未来消除死时间带来的系统误差



谢谢！