

基于GIC与CLYC的 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应实验研究

刘杰¹, Yu. Gledenov², 张国辉¹, 任文凯¹, 夏聪¹, 邬泽鹏¹, E. Sansarbayar²,
Igor Chuprakov², 樊瑞睿³, 易晗³, 蒋伟³, 陈永浩³

¹ 北京大学物理学院重离子物理研究所

² Frank Laboratory of Neutron Physics JINR

³ 中国科学院高能物理研究所, 散裂中子源科学中心

2026.07.16

1. 研究背景、意义与现状

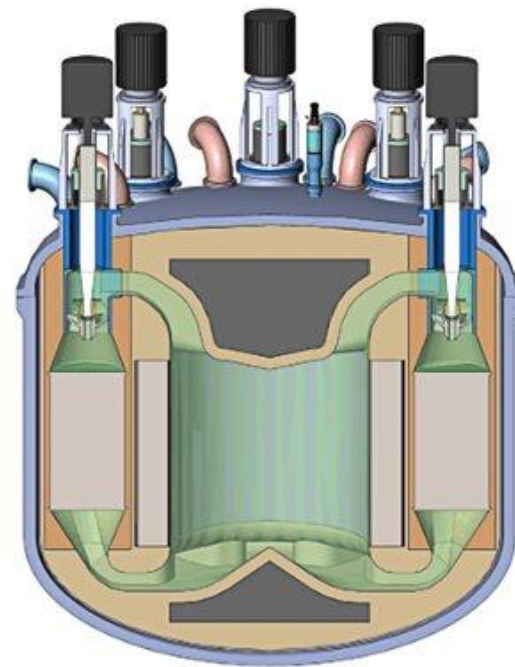
2. 实验装置与流程

3. 数据分析与结果

4. 总结与展望

1. 研究背景、意义与现状

- **熔融氯化物快谱反应堆 (MCFR)** 是熔盐堆的一种，具有更高的重金属原子溶解度、更硬的中子能谱、更低的裂变产物积累以及更好的增殖和嬗变性能^[1,2]
 - MCFR中，**氯化物熔盐**作为冷却剂和燃料载体， **$^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})$** 反应截面较大 (Q 值为0.615 MeV)，**会吸收中子导致中子经济性下降**，影响中子输运过程
 - 对MCFR的计算表明，其 k_{eff} 的总不确定度为 836 pcm，其中 $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})$ **反应截面不确定度的贡献最大**，为595 pcm^[3]
 - $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})$ 反应产生的氢原子核为气体核，气体的产生会影响熔盐的性质，且剩余核 ^{35}S 具有 β 放射性，半衰期分别为87.5天



准确的 $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})$ 反应截面对于MCFR的中子输运计算以及反应堆设计具有重要意义，经合组织核能署 (OECD/NEA) 核数据高优先级需求反应之一，期望数据精度为5%至8%

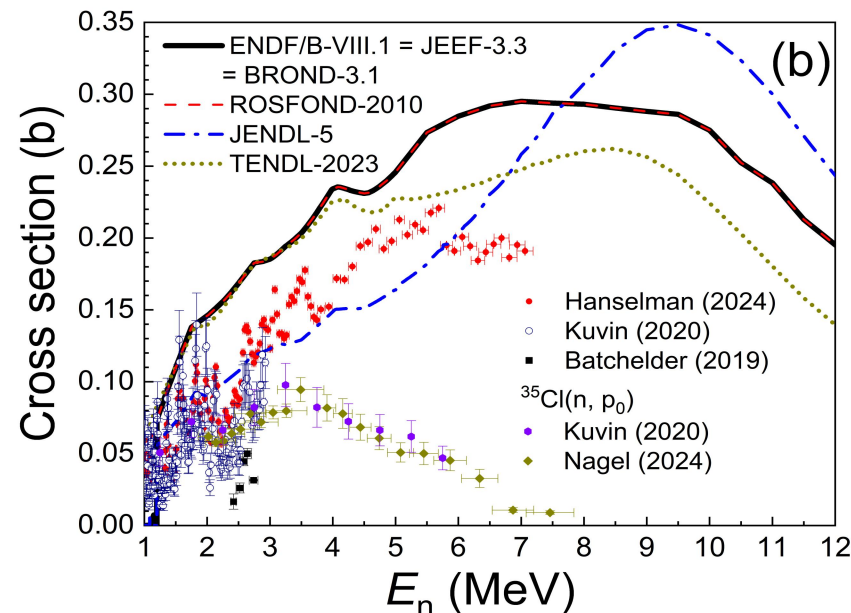
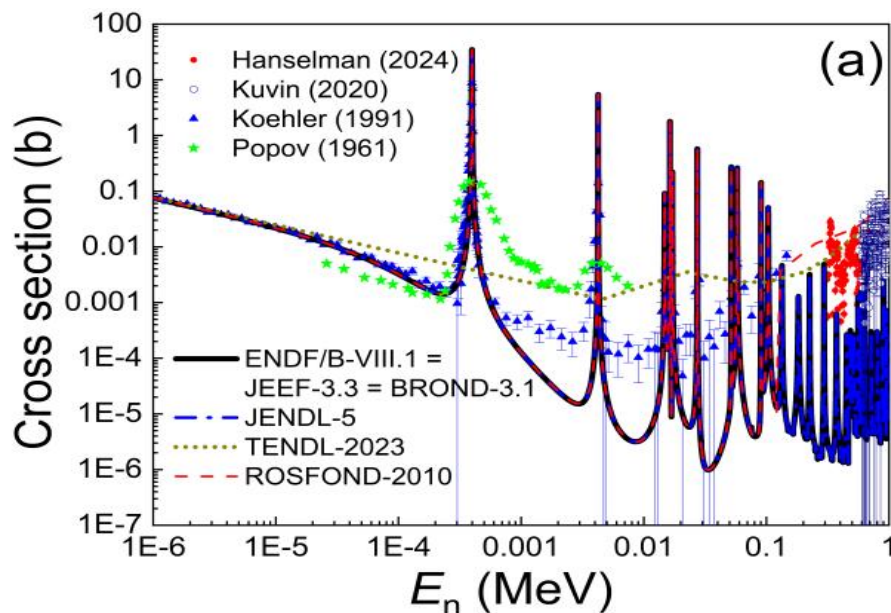
[1] L. He, et al. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34, 46. [2] Z. Mausolff, et al. Nuclear Engineering and Design, 2021, 379, 111181.

[3] NEA Nuclear Data High Priority Request List.

1. 研究背景、意义与现状

• 已有实验与评价数据

- 已有实验数据较少，共有6家实验测量结果，已有实验数据分歧较大
- 在1 eV – 7.4 keV能区，仅有两家1961年和1991年的实验数据，两家测量结果分歧极大，**可达40倍**
- 美国 LANSCE白光中子源团队分别于2020年 (Kuvin) 和2024年 (Hanselman) 进行了实验测量，但其测量结果与加州大学伯克利分校团队2019年 (Batchelder) 基于单能中子源的测量结果存在较大差异，**可达300%**
- 2024年Nagel等人利用CLYC-6探测器对 $^{35}\text{Cl}(n, p_0)$ 反应截面进行了测量

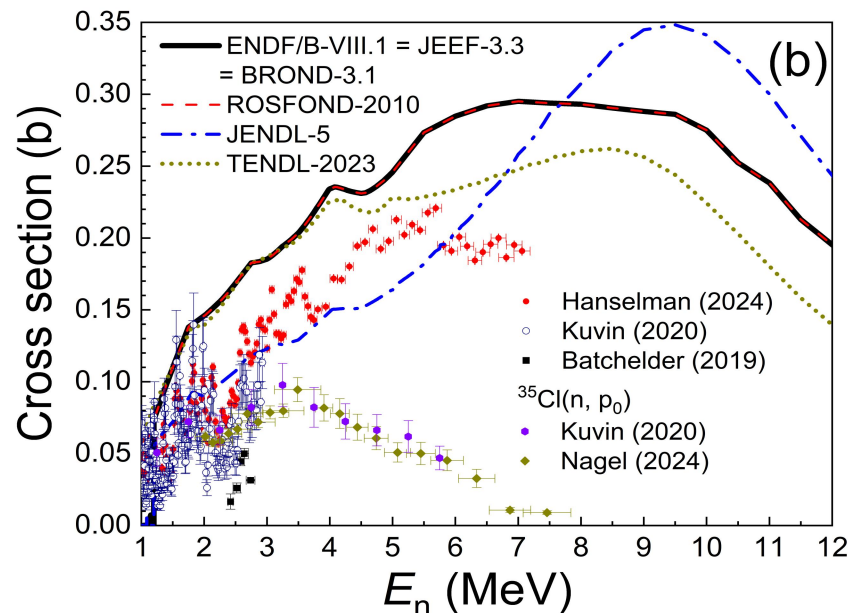
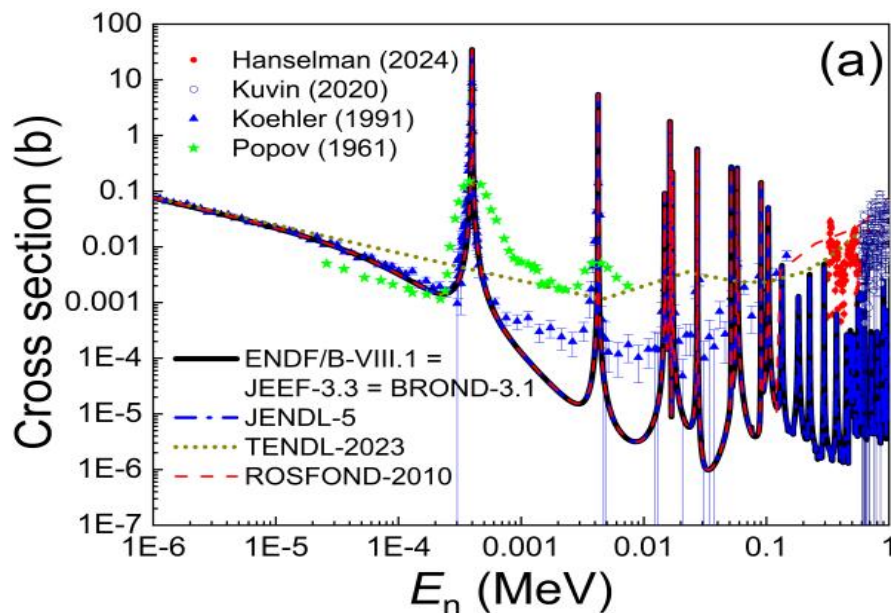


$^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应截面的实验与评价结果, 1 eV – 1 MeV (a), 1 MeV – 12 MeV (b)

1. 研究背景、意义与现状

• 已有实验与评价数据

- 共有4家评价库数据，但不同评价库在 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应截面是否有共振峰、截面大小等方面均存在较大分歧
- 在0.1 MeV – 1 MeV能区，TENDL-2023和ROSFOND-2010库没有给出共振结构，但评价值与实验结果较为接近
ENDF/B-VIII.1和JENDL-5库给出了共振结构，但评价值比实验数据低约两个量级
- 在1 MeV以上能区，评价库数据在大小和走势方面都有较大差异，最大**可达40%**
- 国内的CENDL评价库没有给出 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应的评价数据

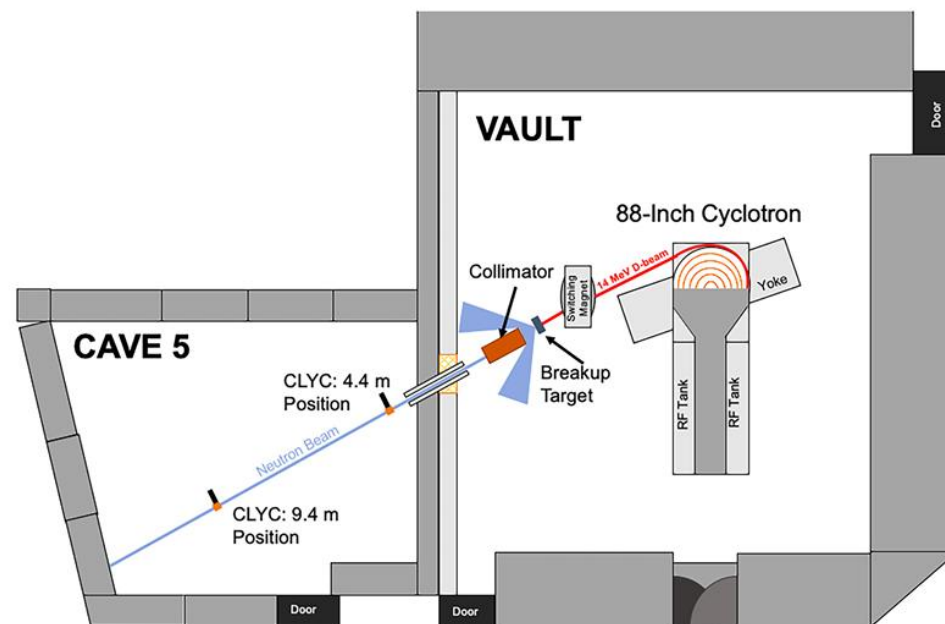
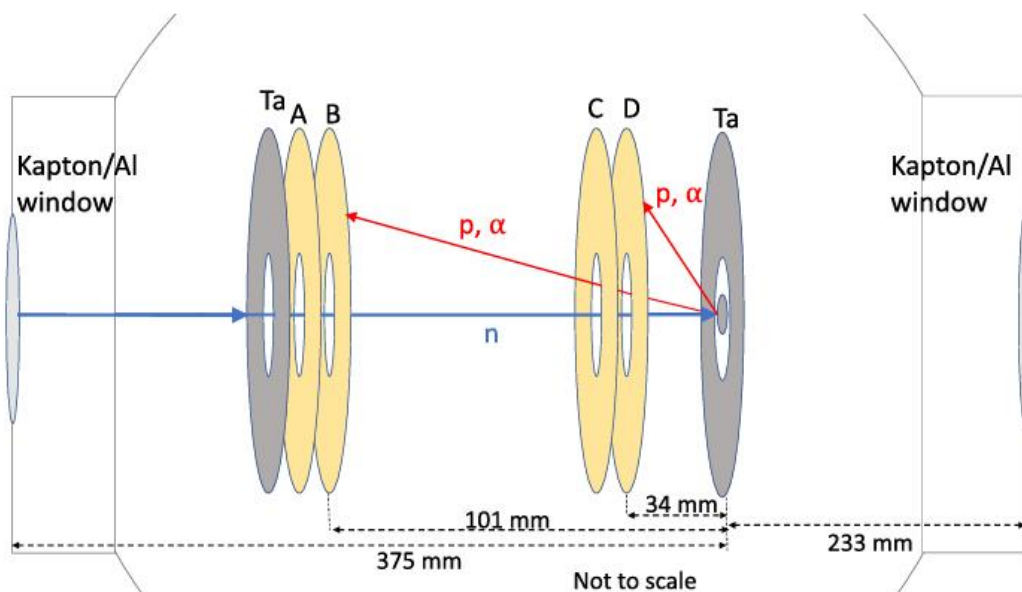


$^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应截面的实验与评价结果, 1 eV – 1 MeV (a), 1 MeV – 12 MeV (b)

1. 研究背景、意义与现状

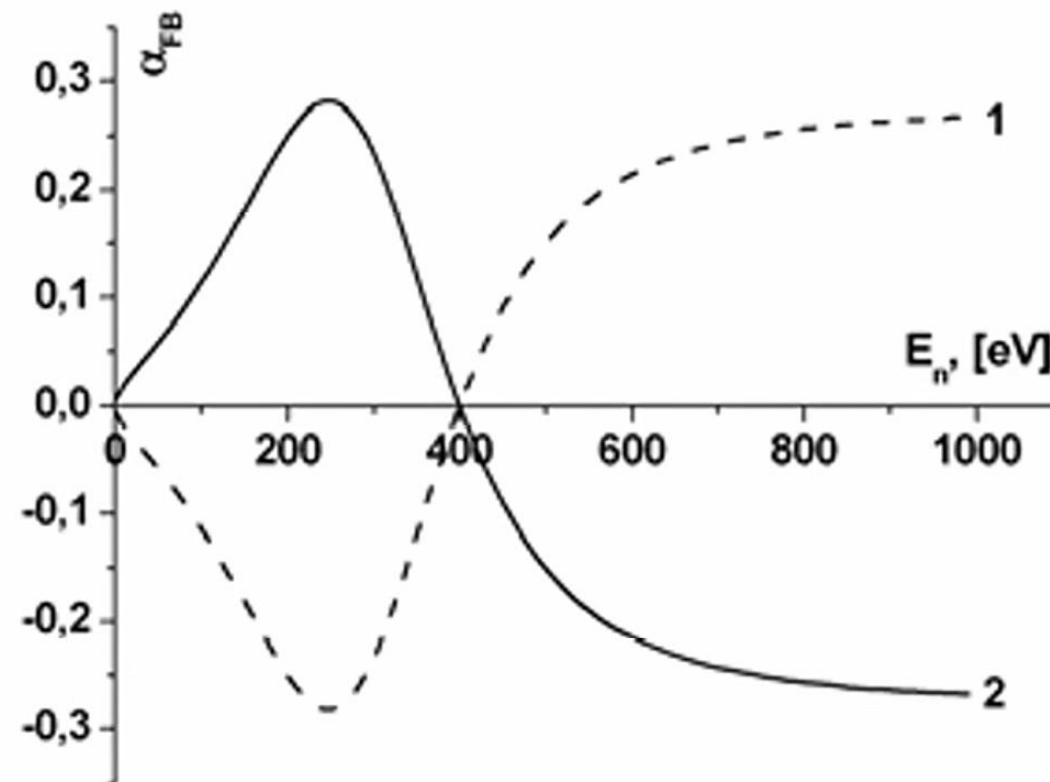
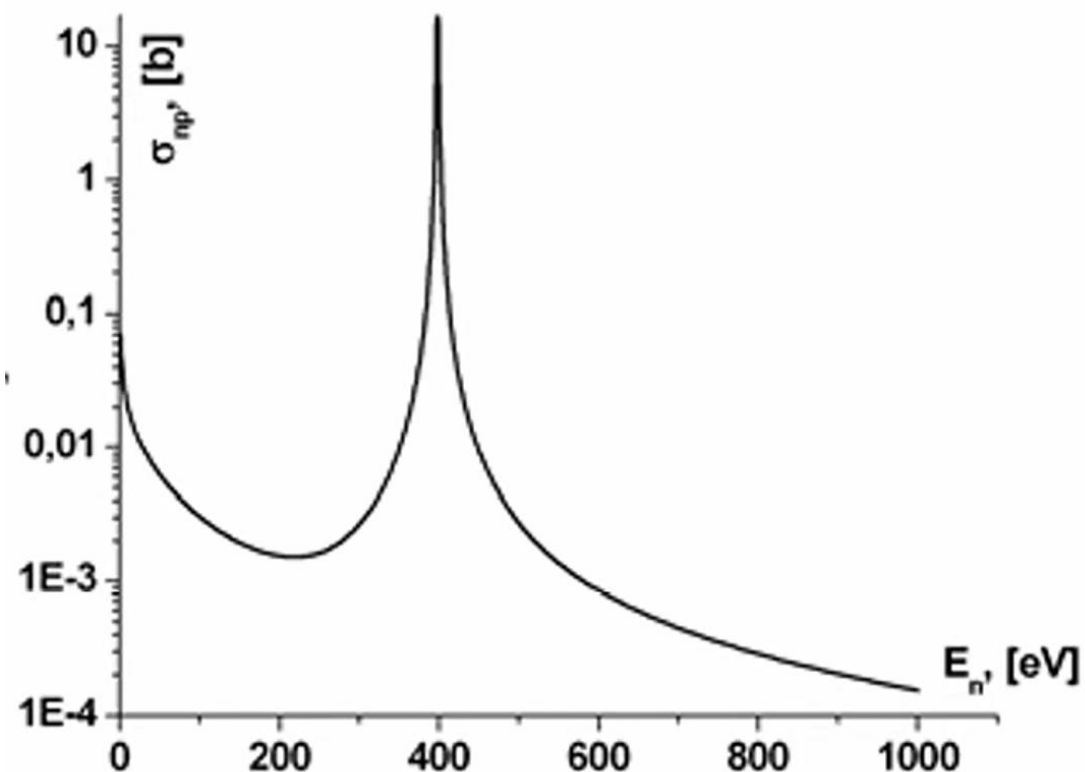
• 实验方法

- LANSCE团队使用**白光中子源**和**双面硅微条探测器**测量了 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应的微分截面，硅微条探测器覆盖的角度较为有限 ($20^\circ - 60^\circ$ 和 $125^\circ - 165^\circ$)
- Nagel等人通过**CLYC-6**($\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$)**探测器活性靶方法**测量了 $^{35}\text{Cl}(n, p_0)$ 反应截面，当中子能量大于3 MeV时，观察其测量谱可以发现， $^6\text{Li}(n, t)$ 反应事件对 $^{35}\text{Cl}(n, p_0)$ 反应事件造成了较大干扰
- Batchelder等人使用**单能中子源**通过**活化法**测量了 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应截面，其结果与上述直接测量法结果之间的分歧可达300%



1. 研究背景、意义与现状

- P波共振峰左右的前后向比



- 1 – reduced neutron widths = 0.707
- 2 – reduced neutron widths = -0.707

1. 研究背景、意义与现状

2. 实验装置与流程

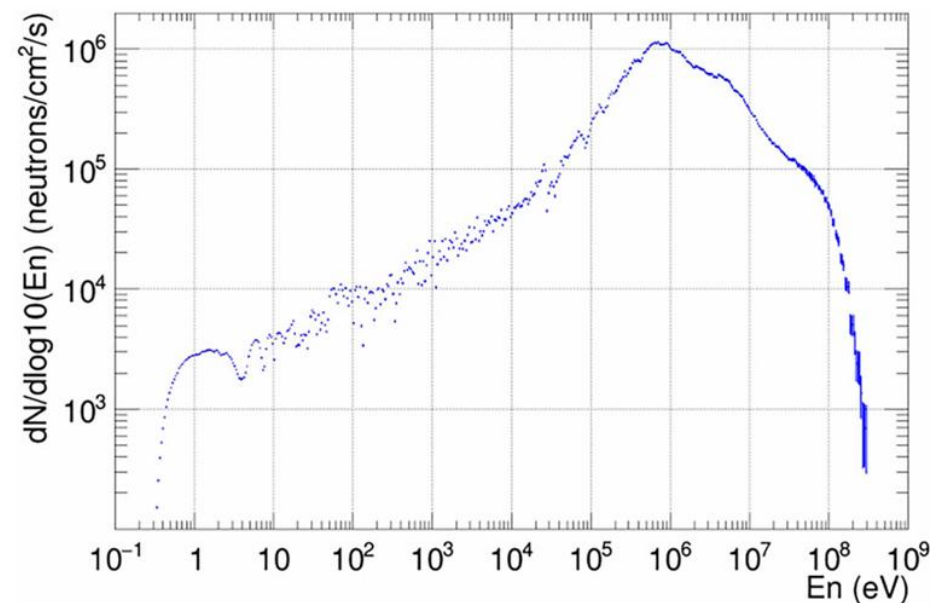
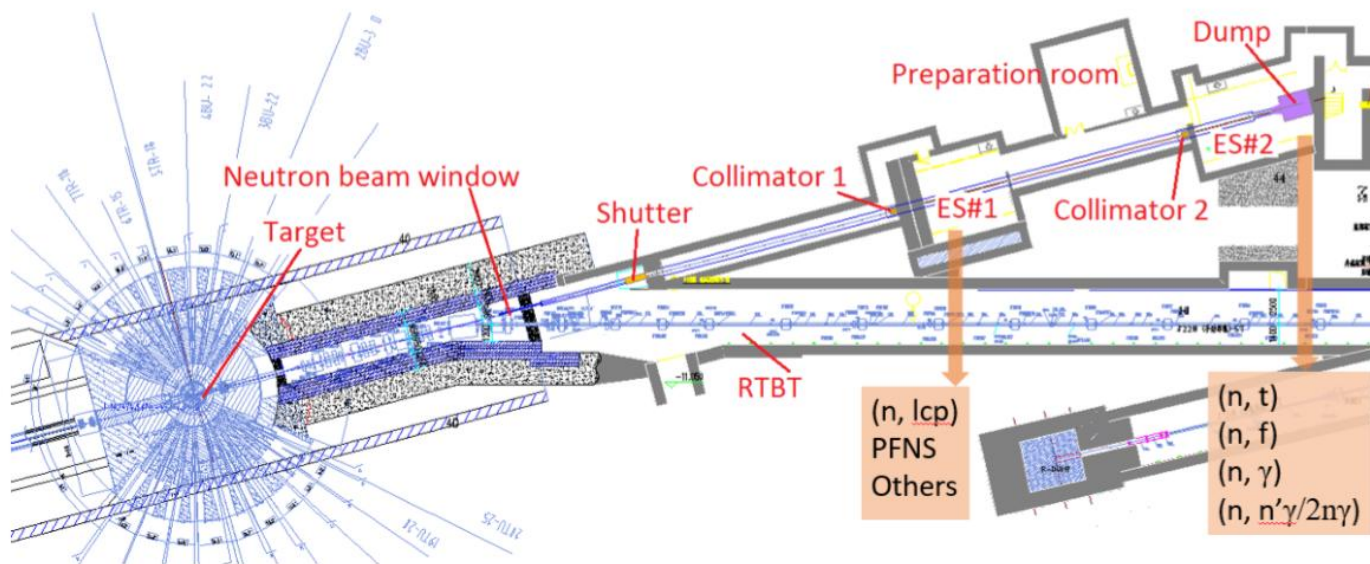
3. 数据分析与结果

4. 总结与展望

2. 实验装置与流程

中国散裂中子源CSNS：我国首台，世界第四台脉冲型散裂中子源

反角白光中子实验装置Back-n：核数据测量研究工具



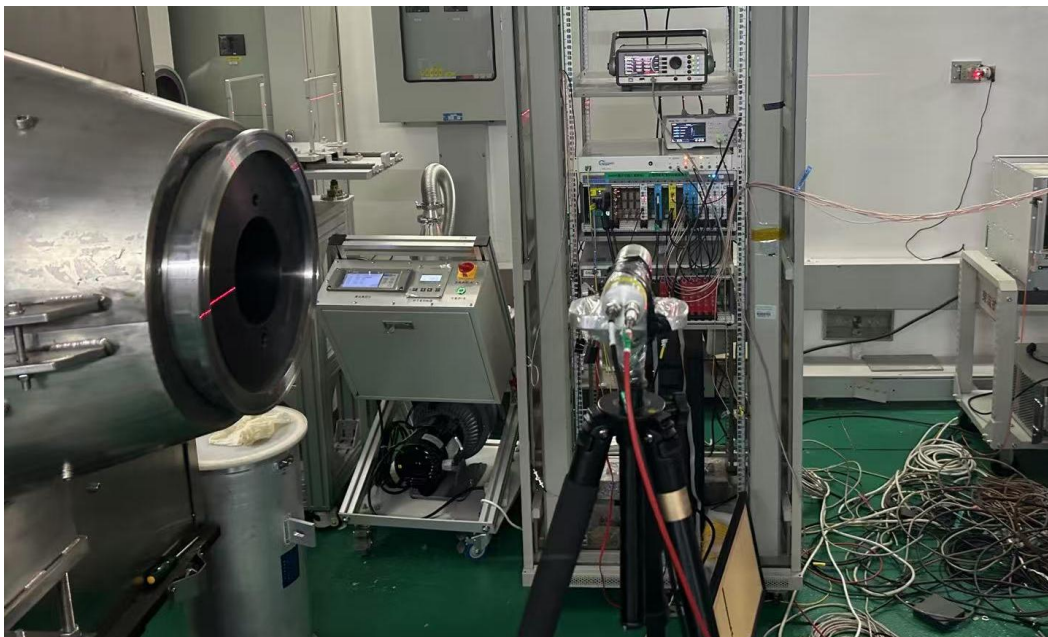
中国散裂中子源CSNS 反角白光中子实验装置Back-n示意图

中子能谱

2. 实验装置与流程

- 基于CLYC-6测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

厅2 $\varnothing 3\text{ mm} + 6\text{ cm}$ 铅砖 + $\varnothing 15\text{ mm} + \varnothing 40\text{ mm}$



北京大学

公用电子学采集CLYC-6信号

- 基于**屏栅电离室**测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应 第一次

厅1 $\varnothing 50\text{ mm} + \varnothing 50\text{ mm} + 2.8/0.8\text{ cm}$ 铅砖



Dubna联合核子所 Yu. Gledenov

电离室信号 — MPR-1 — 主放 — 公用电子学
Li-Si测量能谱

2. 实验装置与流程

- **基于CLYC-6测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应** **目标：低能区 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应绝对截面**

2025.05.29—2025.06.02:

- ✓ 5.29 摸索实验条件 (铅砖厚度、阈值等等)
- ✓ 5.30 – 6.2 CLYC探测器测量

- **基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应** **目标：低能区 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应激发函数以及前后向比**

两轮实验:

第一轮实验 (2025.06.04—2025.06.09):

- ✓ 06.04: $^{35}\text{Cl}/^6\text{Li}$ 样品, 工作气体: 1.5 atm Ar + CO_2
- ✓ 06.05: $^{35}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 样品, 工作气体: 0.3 atm Ar + CO_2
- ✓ 06.06-06.08: 加铅砖 (2.8 cm), $^{35}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 样品, 工作气体: 0.3 atm Ar + CO_2
- ✓ 06.09: 加速器停机

第二轮实验 (2025.11.15—2025.11.24):

- ✓ 11.15-11.18: 加铅砖 (0.8 cm), $^{35}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 样品, 0.3 atm Ar + CO_2 , 测试, 降噪以及尽量减小 γ -flash影响
- ✓ 11.19-11.24: 加铅砖 (0.8 cm), $^{35}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 样品, 0.3 atm Ar + CO_2 , **正式测量**

1. 研究背景、意义与现状
2. 实验装置与流程
- 3. 数据分析与结果**
4. 总结与展望

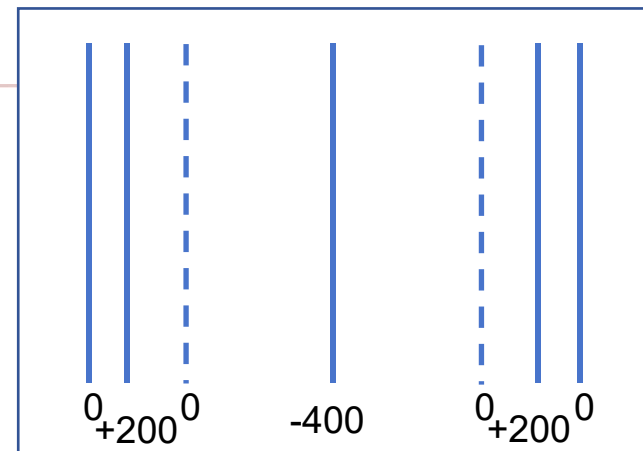
3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

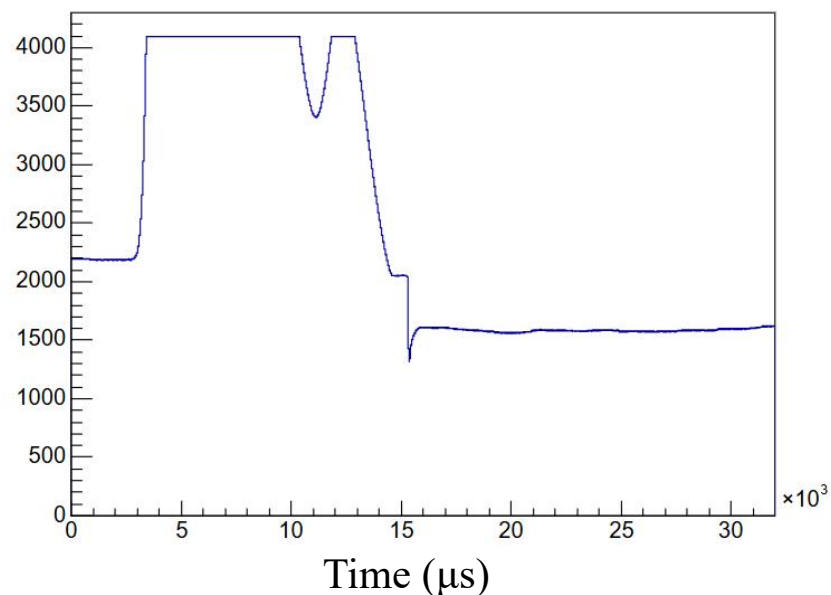
束流测试工作, γ -Flash造成的死时间问题

➤ GIC的典型信号

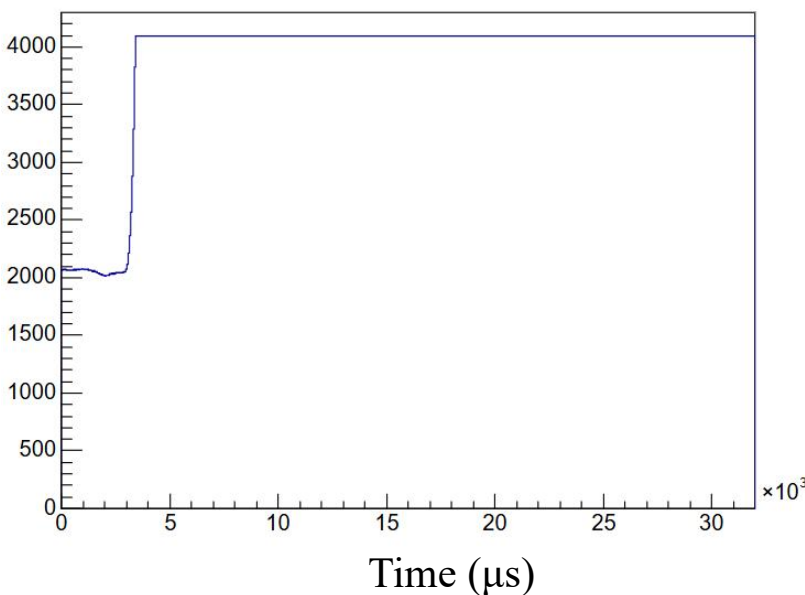
➤ 死时间很大, $\sim$ 几十 μs



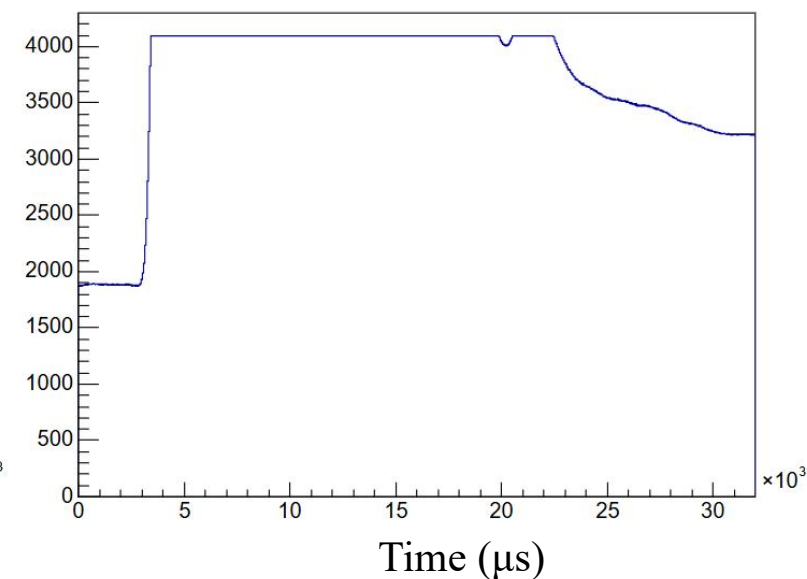
Cathode



Anode 1 (Forward)



Anode 2 (Backward)

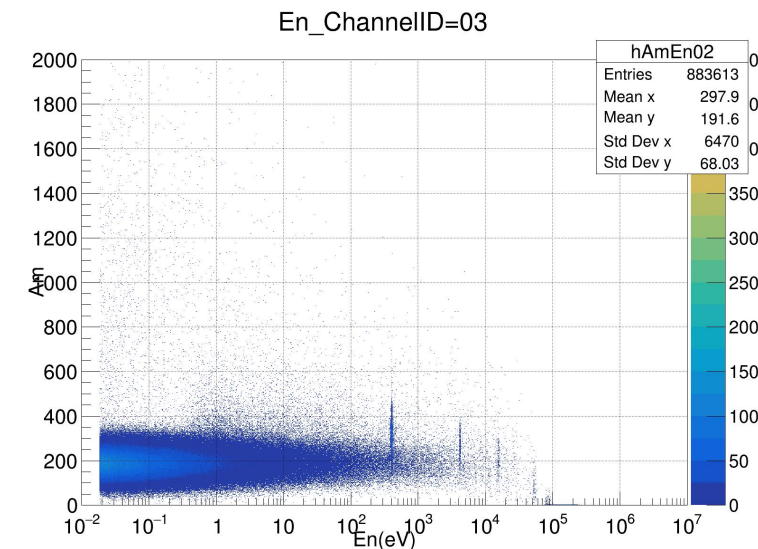
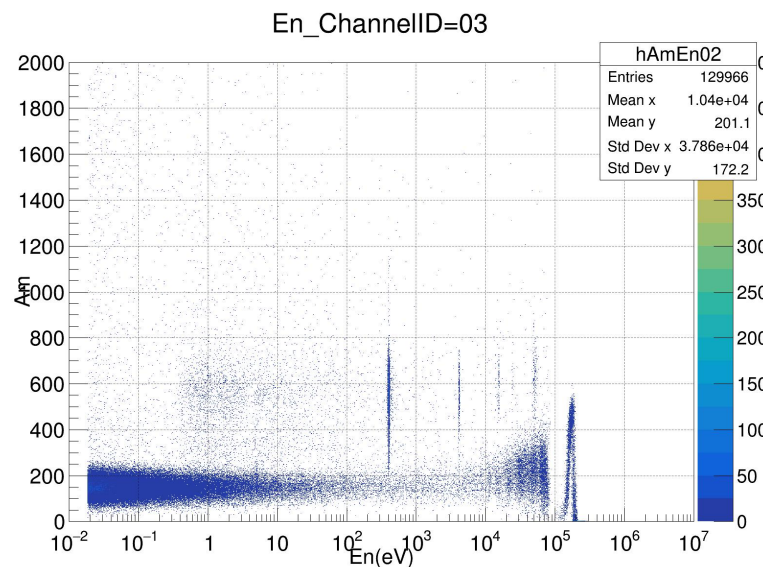
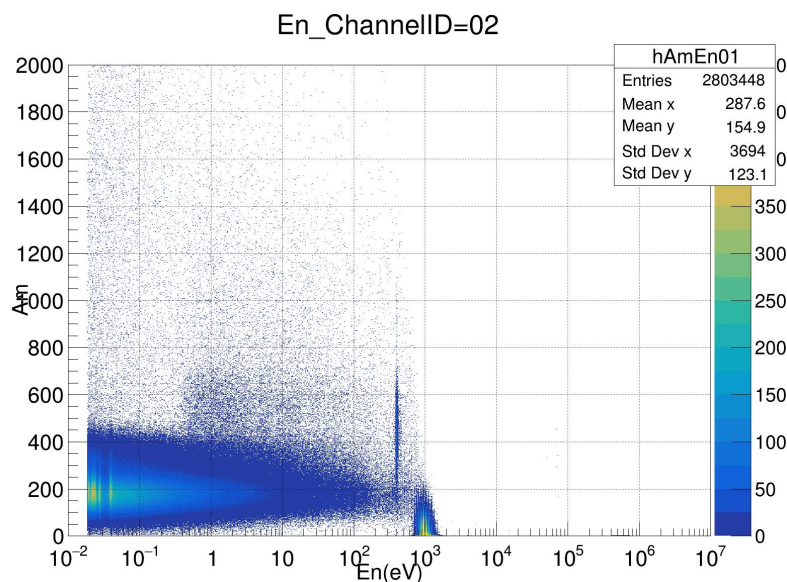
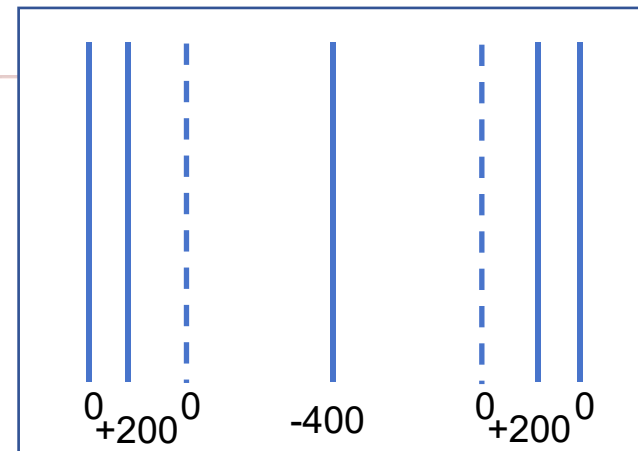


3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

束流测试工作, γ -Flash造成的死时间问题

- GIC的典型阳极谱

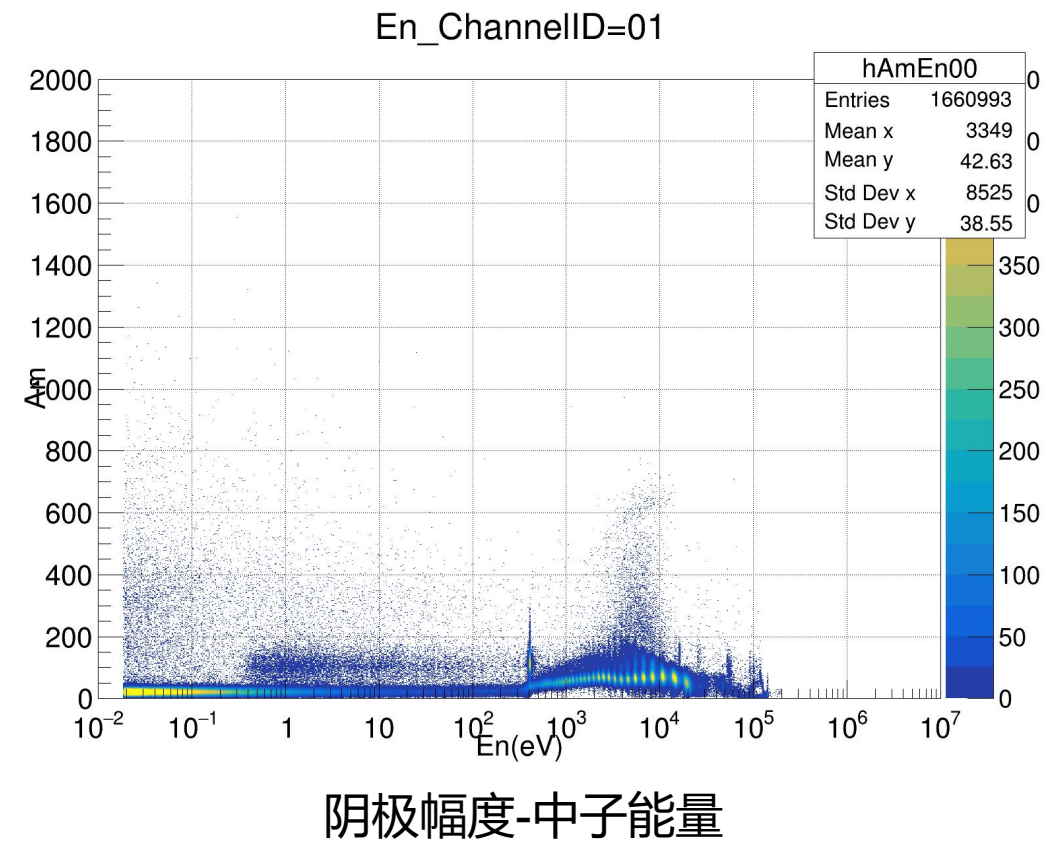


3. 数据分析与结果

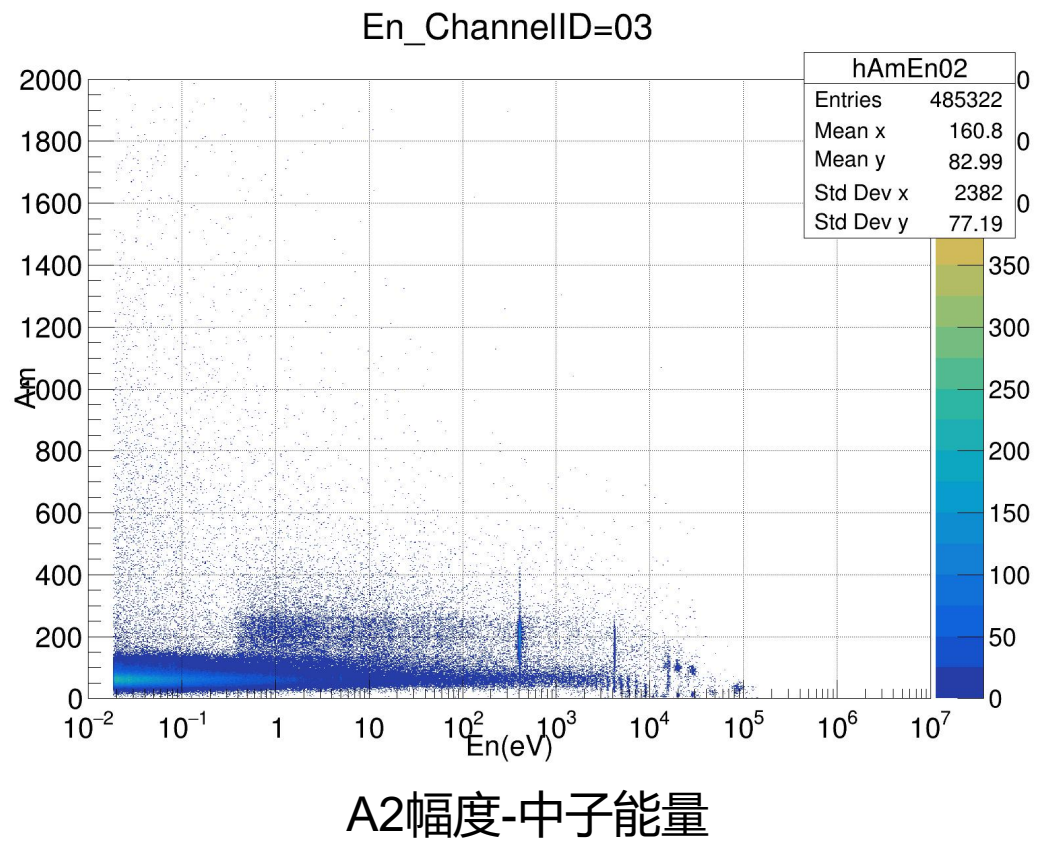
- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

束流测试工作， γ -Flash造成的死时间问题

➤ 中子能量信号幅度二维谱



待测质子能量仅为0.6MeV，受噪声干扰大



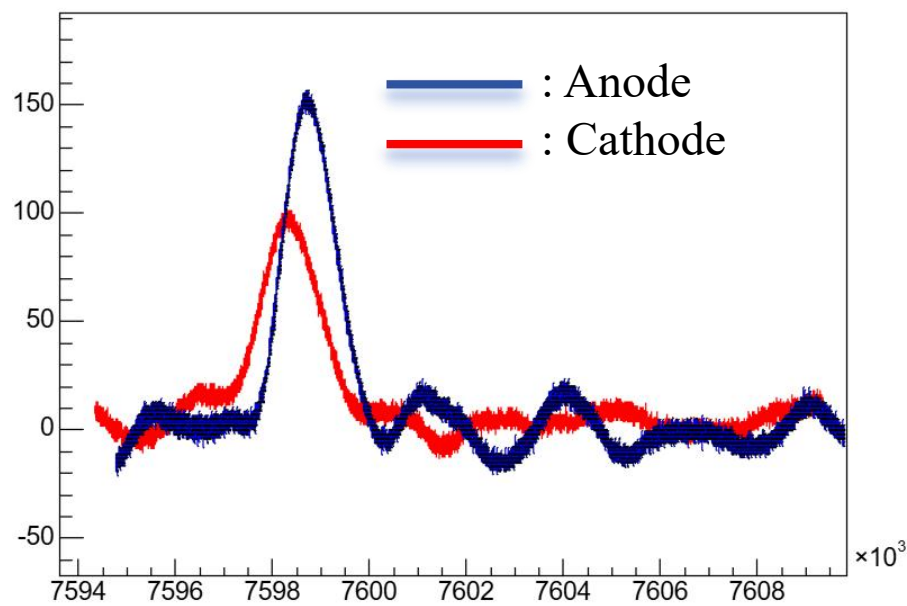
3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

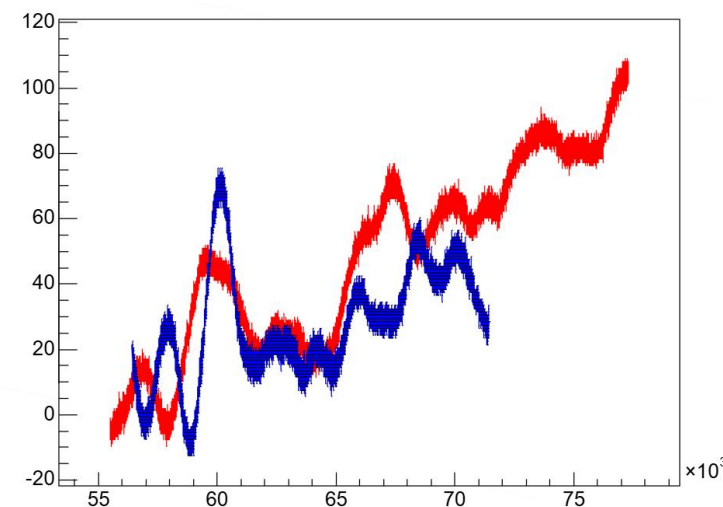
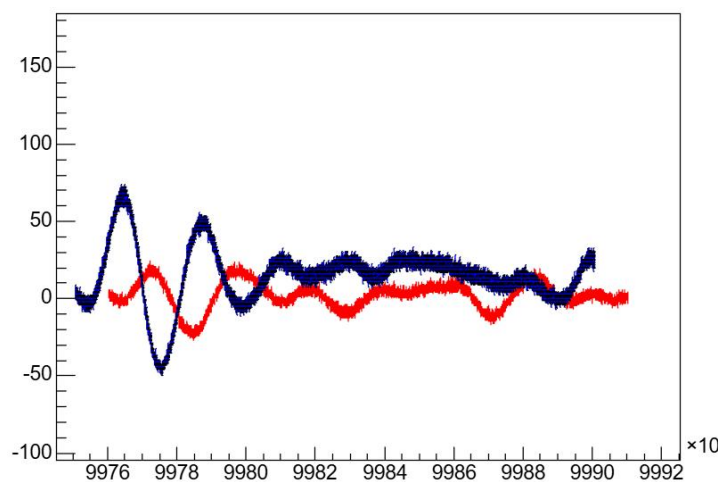
束流测试工作, γ -Flash造成的死时间问题

- 阴极阳极符合以降低噪声干扰

可以符合的正常信号



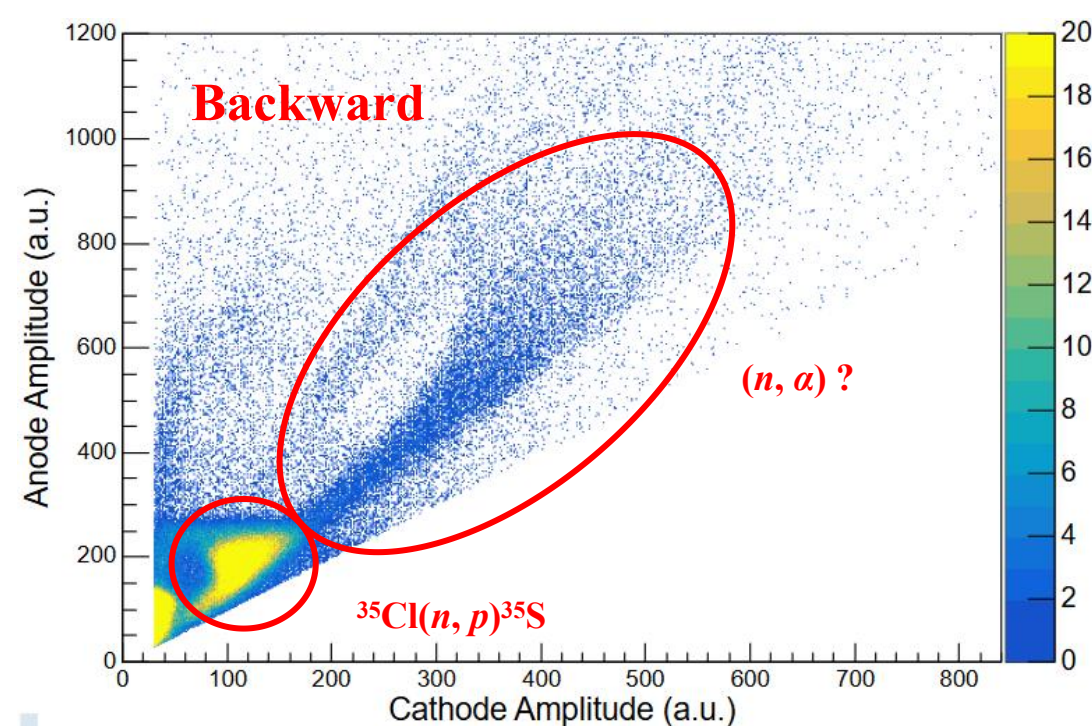
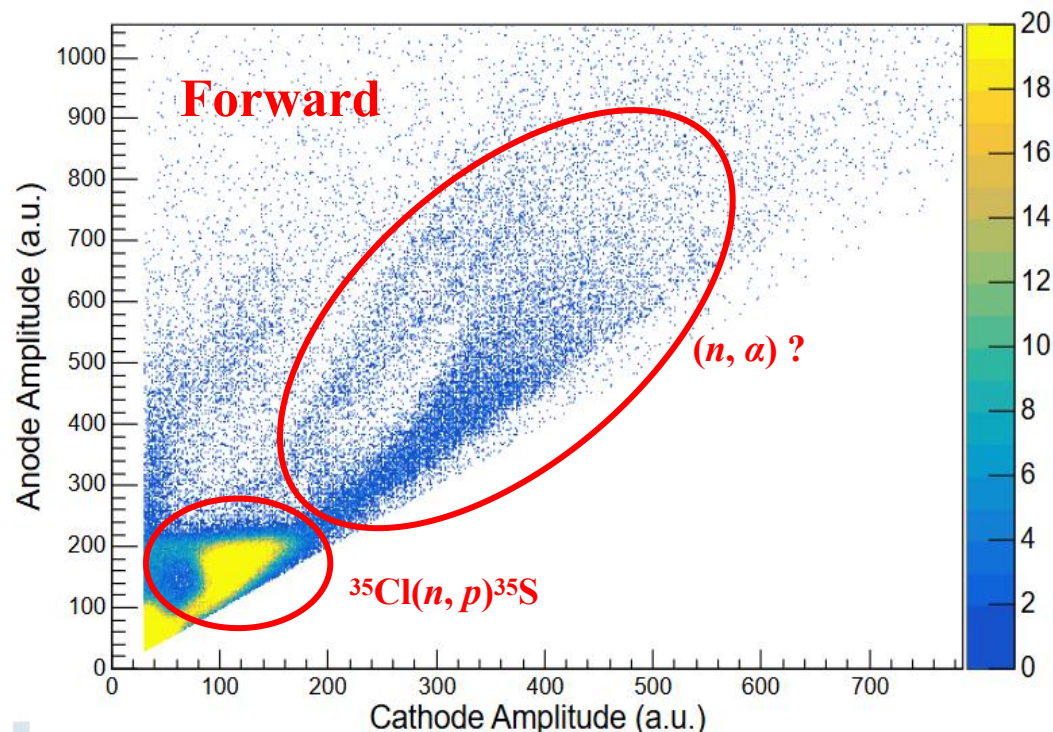
噪声



3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

- 阴极-阳极二维谱

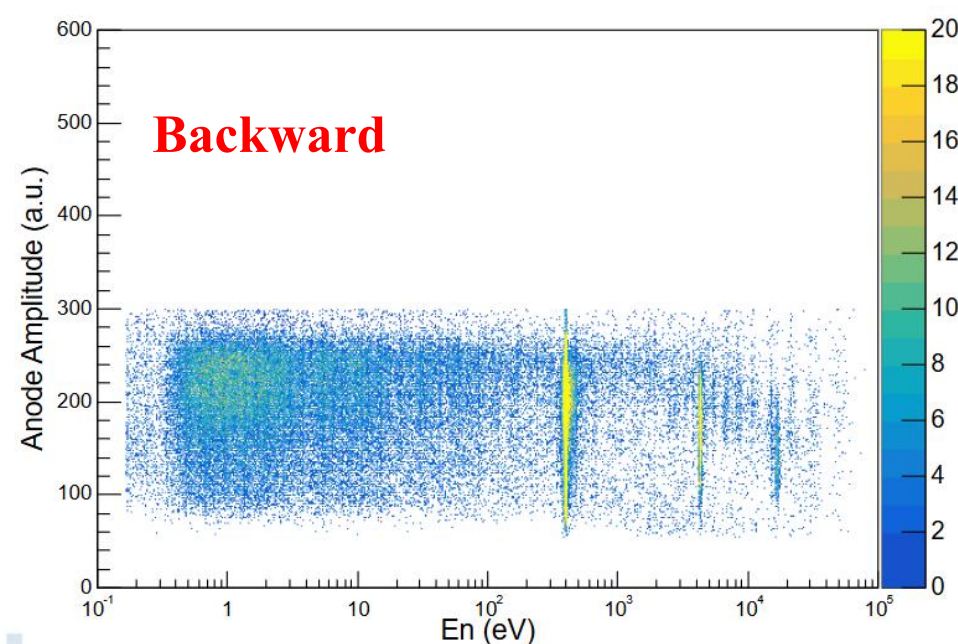
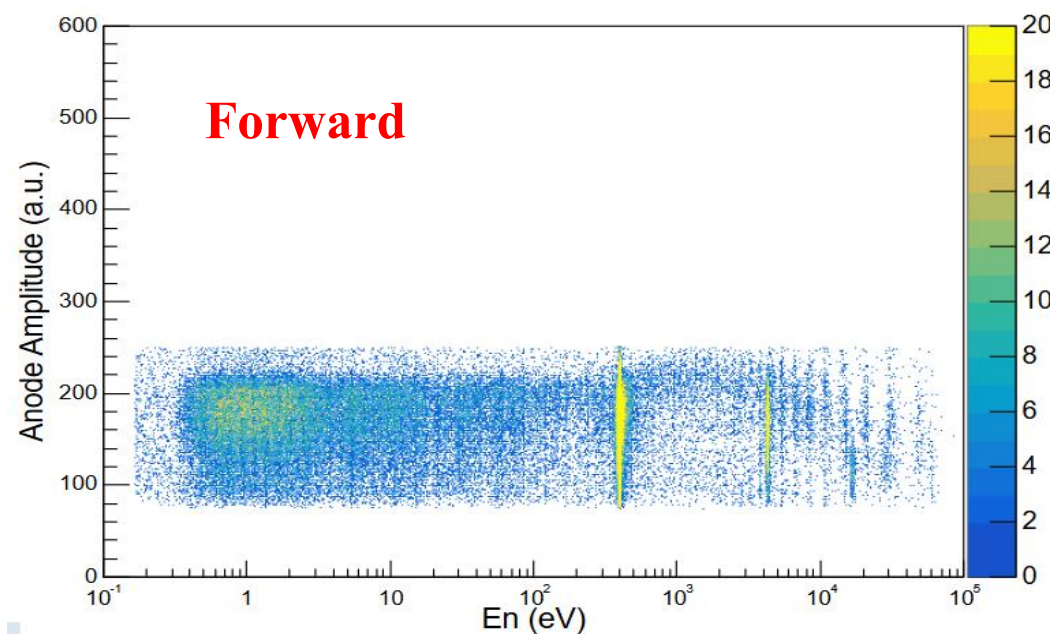


- $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应的事件区比较明显，低能噪声会有一些干扰；
- 存在一些高能 (n, α) 本底事件

3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

- 阴极-阳极二维谱中筛选事件后的**阳极幅度-中子能量二维谱**

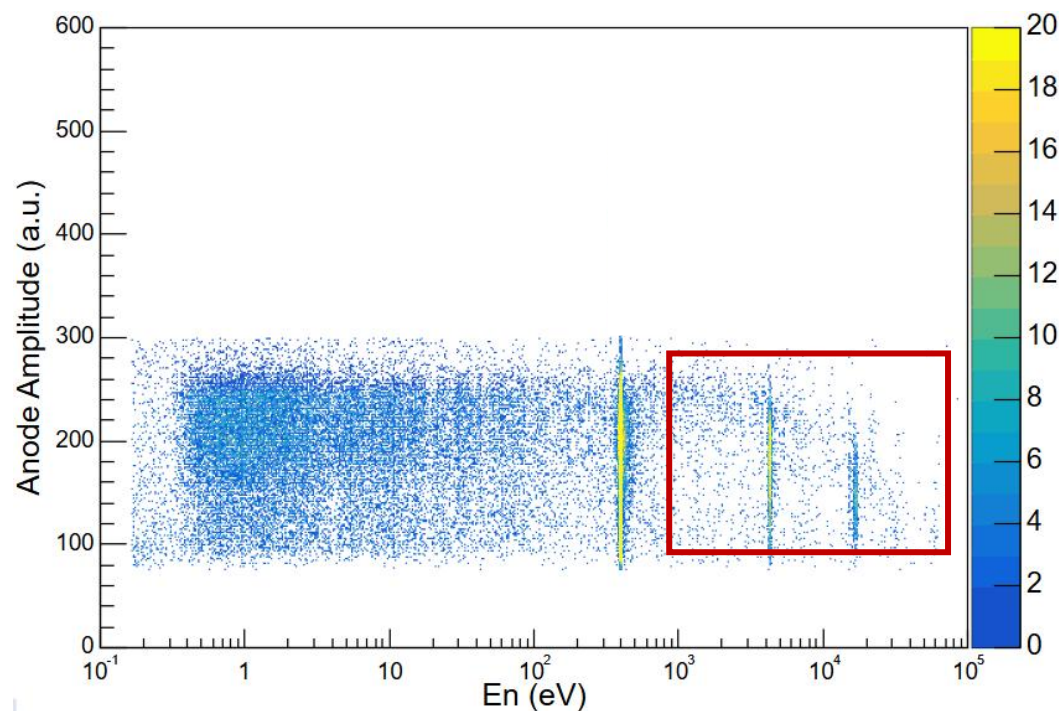
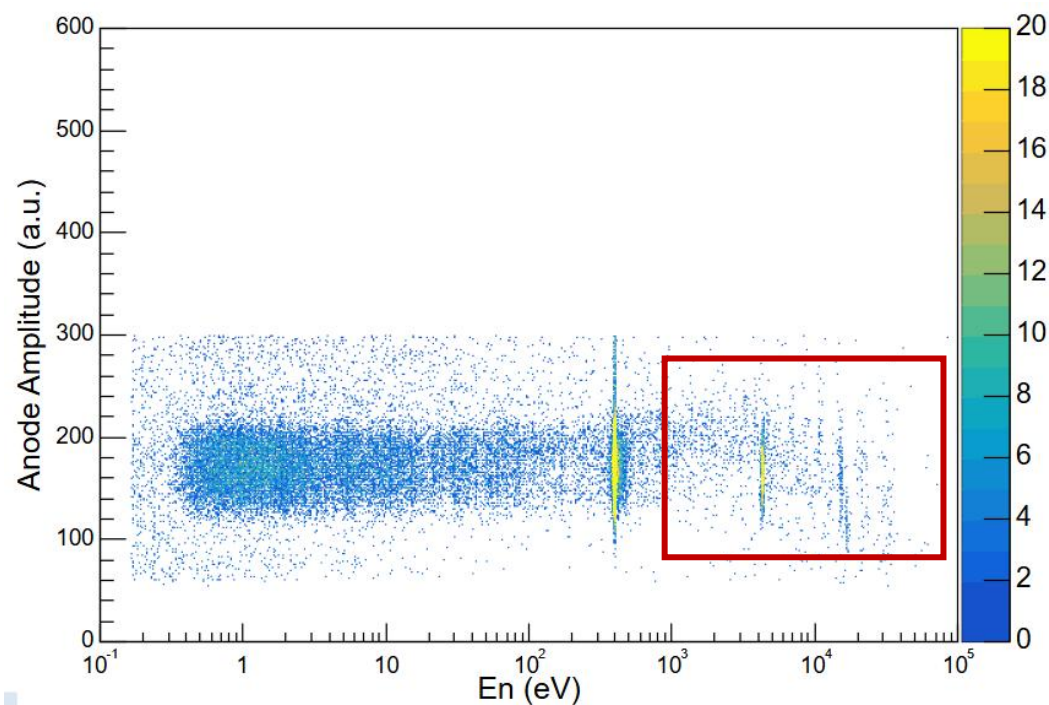


- 仍然有一些噪声

3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

➤ 阴极-阳极二维谱中筛选事件后的**阳极幅度-中子能量二维谱**---调转了GIC前后向

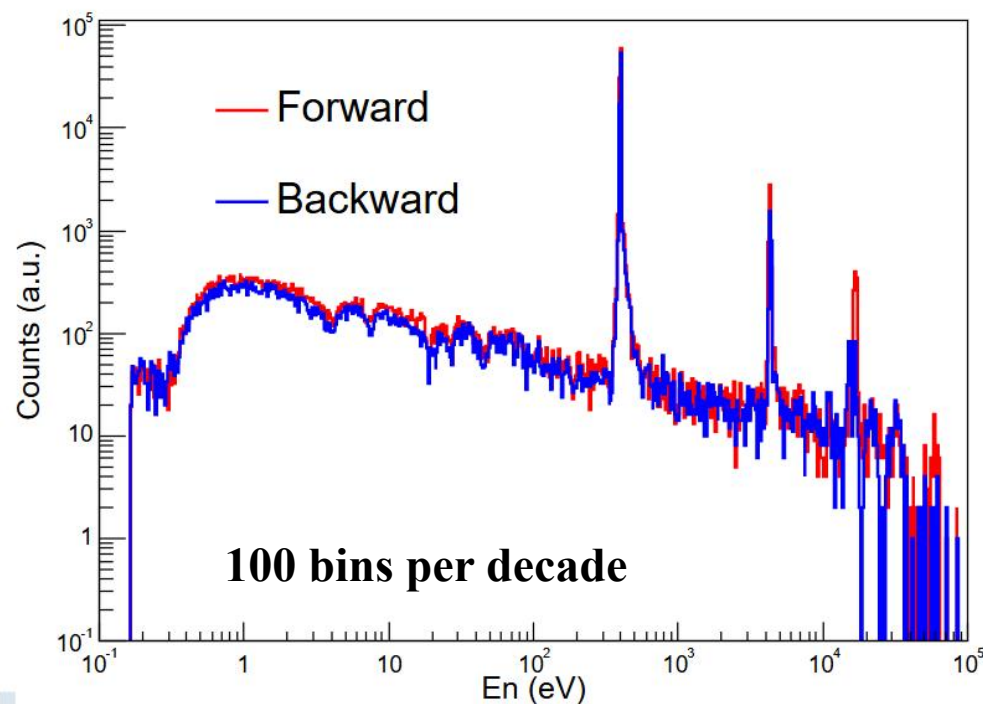
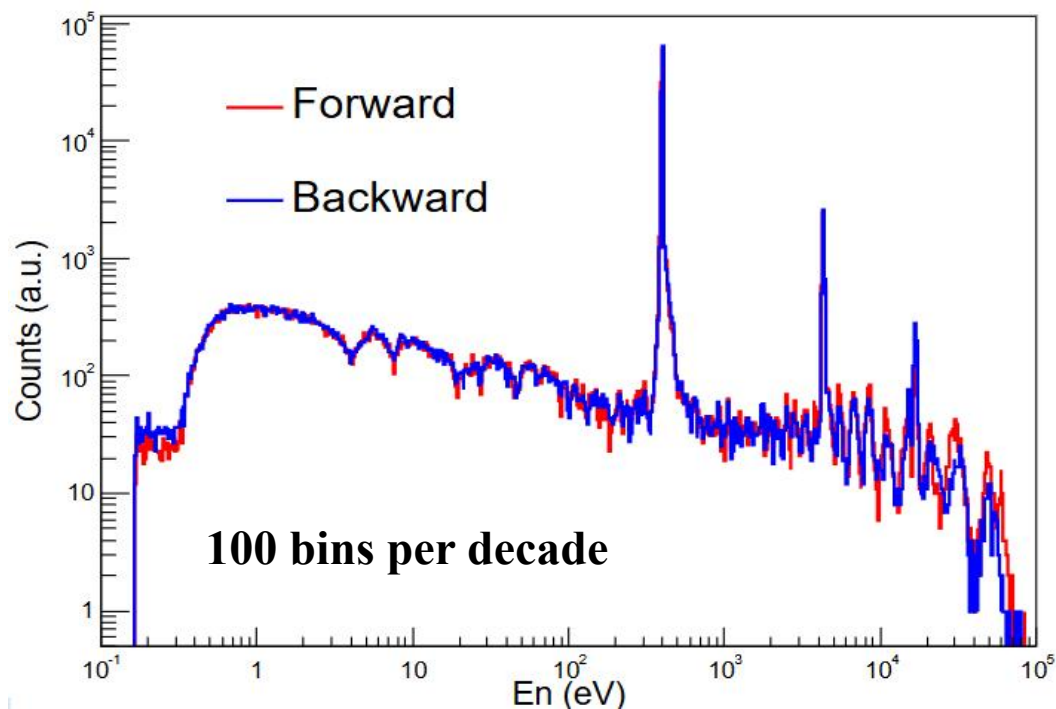


- 噪声大大减少了

3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

- 中子能量-阳极计数谱

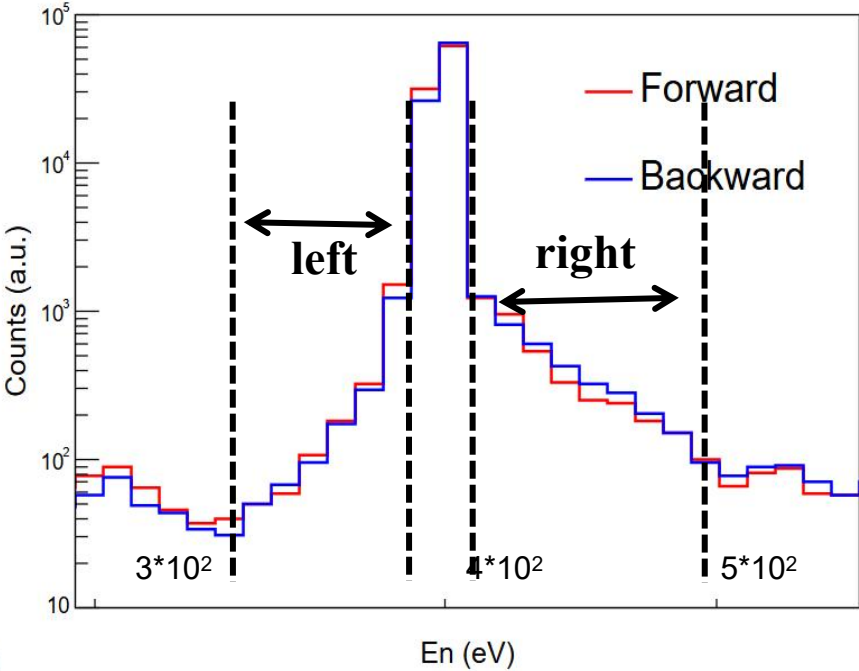
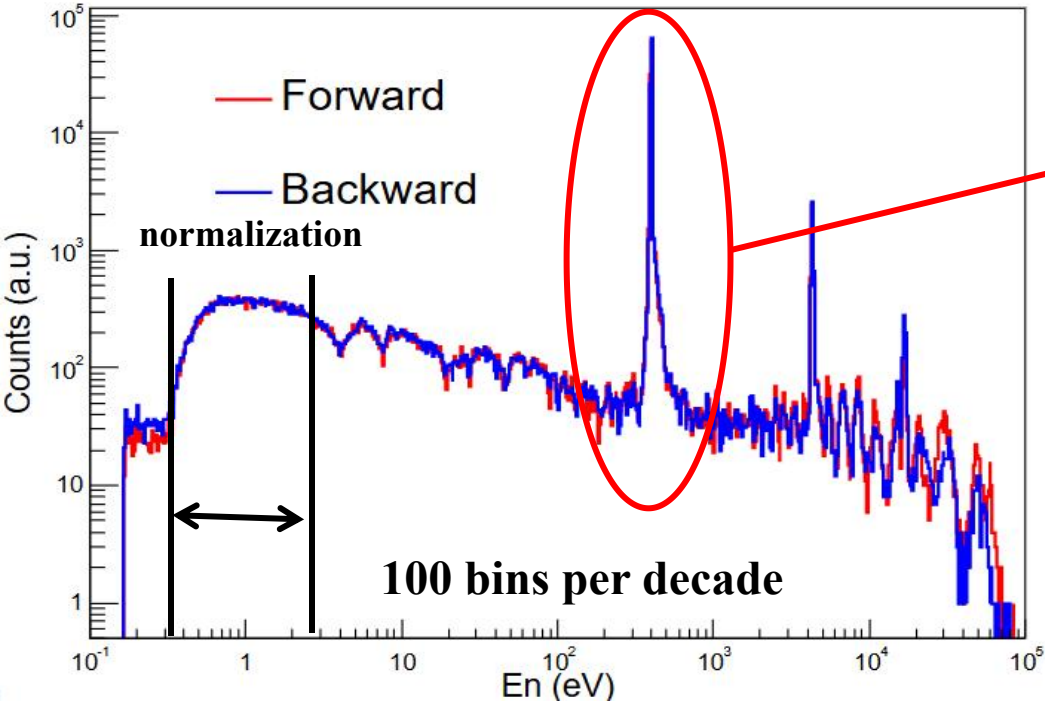


- 如果有能谱，可以得到 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应0.5 eV — 10 keV的激发函数，需要归一
- 因为挡了铅砖，需要对能谱进行一个修正

3. 数据分析与结果

- 基于屏栅电离室测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

➤ $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应397.36 eV共振峰附近的前后向对称性问题

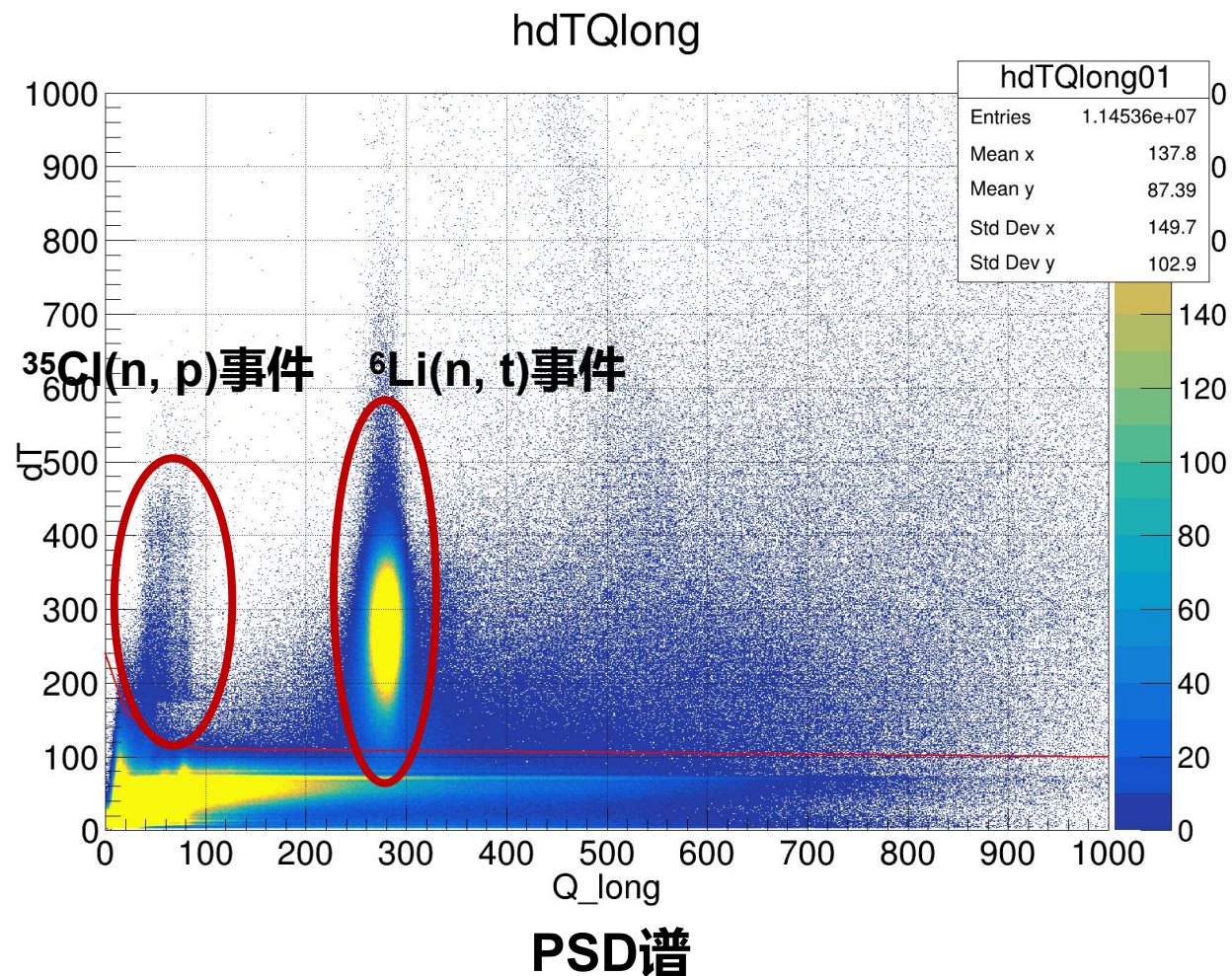


	$E_n(\text{eV})$	ratios	normalized ratios
峰左侧	338.80~389.00	1.17	1.19
峰右侧	407.40~478.60	0.96	0.97
峰位处	389.00~407.40	1.03	1.04

3. 数据分析与结果

- 基于CLYC测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

PSD鉴别n- γ 事件，目前只处理中子飞行时间大于 2.5×10^4 ns的事件：

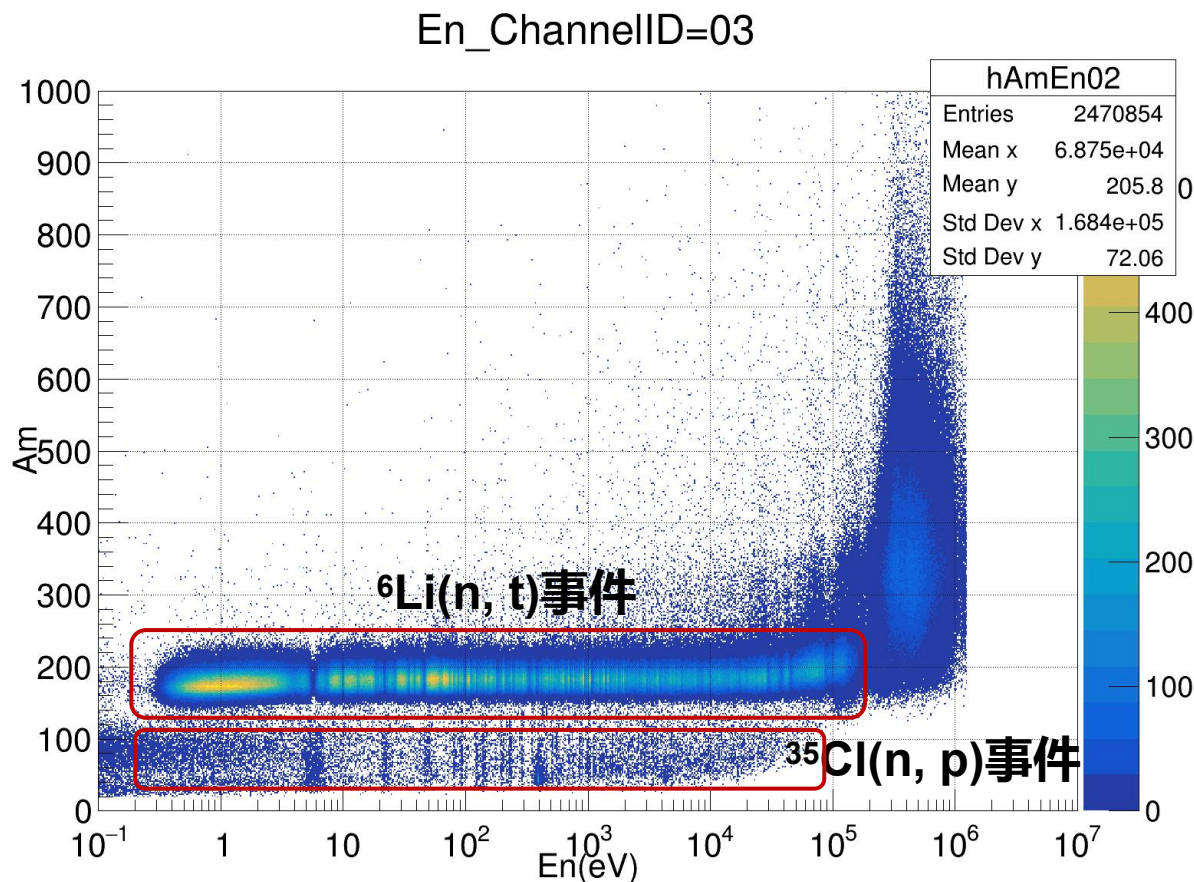


- 由于 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应事件的幅度过低，对于 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应，目前的PSD效果不是太好，需要进一步优化，多参数鉴别
- 对于 $^6\text{Li}(n, t)$ 反应，PSD鉴别效果较好

3. 数据分析与结果

- 基于CLYC测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应

通过PSD谱，筛选出 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 与 $^6\text{Li}(n, t)$ 事件，做中子能量-信号幅度二维谱：



- 两个反应的事件区较为明显
- 由于 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 事件幅度较低，存在一些本底的干扰
- $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应计数谱中可以看到共振峰，与评价结果中共振峰的位置吻合

1. 研究背景、意义与现状
2. 实验装置与流程
3. 数据分析与结果
- 4. 总结与展望**

4. 总结与展望

□ 总结:

- 1) 利用GIC和CLYC-6测量了 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应
- 2) γ -Flash导致GIC和CLYC-6较大的死时间
- 3) Q 值低, 噪声本底的干扰很难避免
- 4) 目前的数据分析证明低能区测量 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应的可行性

□ 未来工作:

- 1) GIC: 寻求新的本底扣除方法, **得到 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应的激发函数**
- 2) CLYC: 优化PSD鉴别参数, **得到可靠的 $^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反应截面**
- 3) 更多的 (n, cp) 反应的测量...

**谢谢各位老师！
欢迎大家批评指正！**