

基于Back-n的半导体探测器 脉冲形状甄别研究

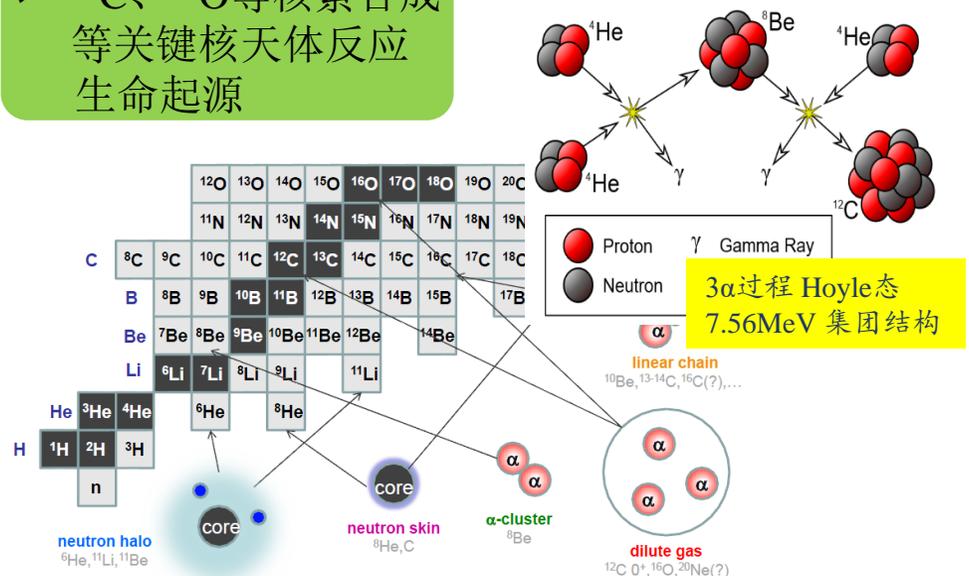
蒋 伟

散裂中子源科学中心

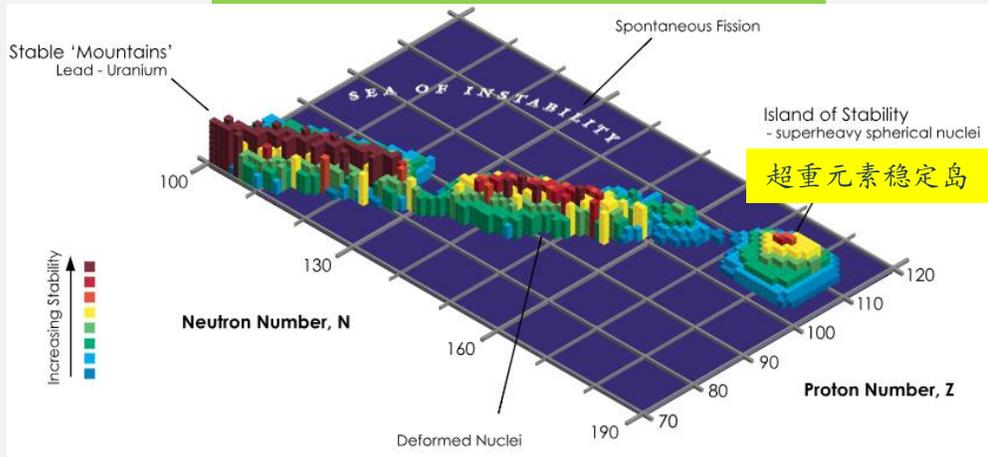
2024年8月23日

- 研究背景
- 研究现状
- 实验开展
- 数据分析及结果
- 总结

✓ ^{12}C 、 ^{16}O 等核素合成等关键核天体反应生命起源



✓ $Z=113$ 、 114 等超重元素合成原子核“幻数”结构

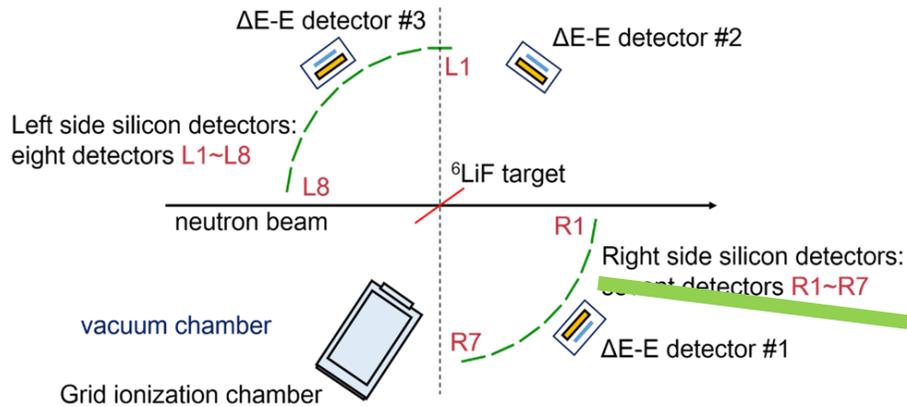


✓ 核武器、核医学关键反应截面

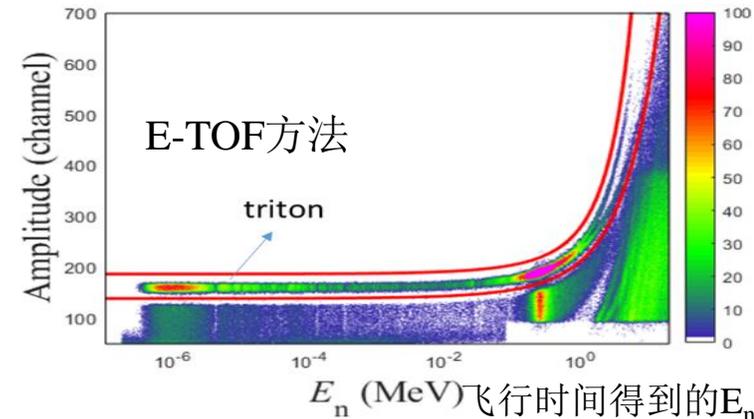
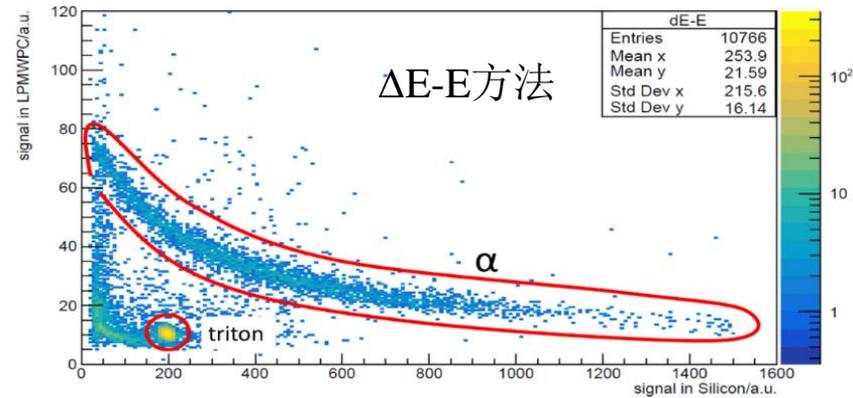




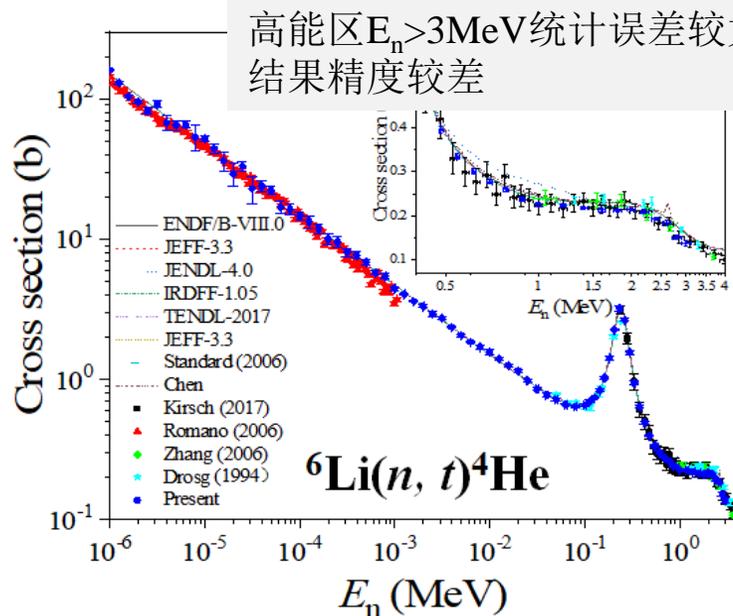
- 依托于散裂中子源，已经开展了一系列关键核数据截面实验测量。
- (n, lcp) 反应测量中，反应产物的鉴别工作十分重要。
- 在目前的工作中，采用的带电粒子鉴别方法有: ΔE -E、E-TOF(飞行时间)等



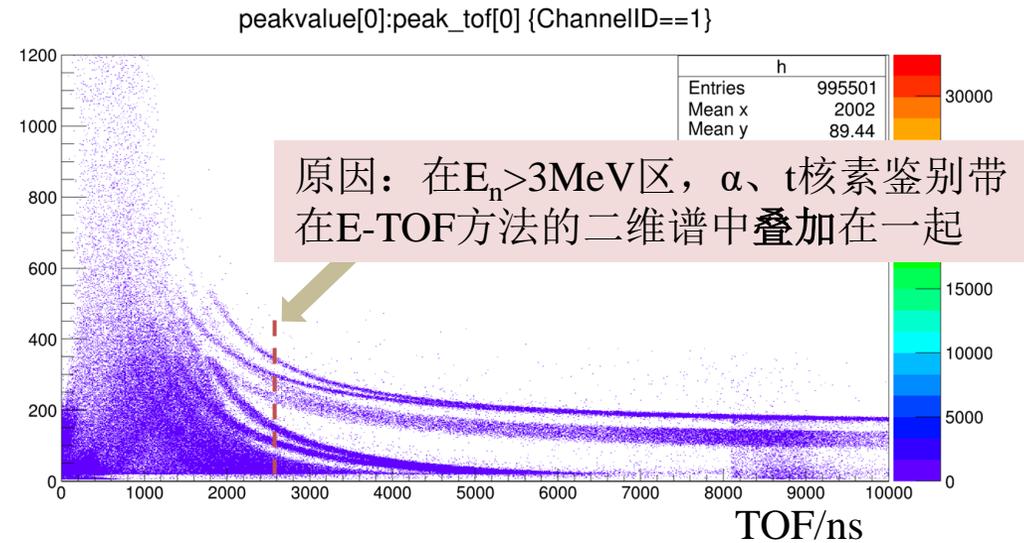
在Back-n开展的 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 实验设置图



- **ΔE-E方法:** 目前使用低气压多丝正比室作为ΔE探测器，Si作为E探测器，有效降低探测阈值，但是由于气体室能量分辨率相对差，且有效面积2.5cm*2.5cm的气体探测器的实际封装尺寸扩展到4cm*5cm。使得探测器死区大。且气体探测器操作相对复杂，能量分辨率较差。反应截面小(mb量级，需要尽可能大的探测立体角)。如采用20μm Si，厚度不确定性达到±50%，能量分辨率。
- **E-TOF方法:** 已经在实验中应用，并且得到了很好的全截面&微分截面结果，在重要的高能中子区遇到困难，高能中子引发的反应不能得到良好的粒子鉴别，非两体反应中粒子鉴别问题。

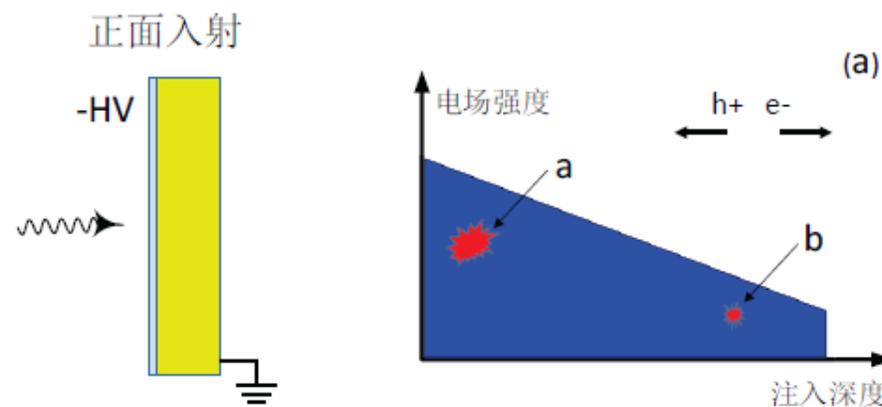
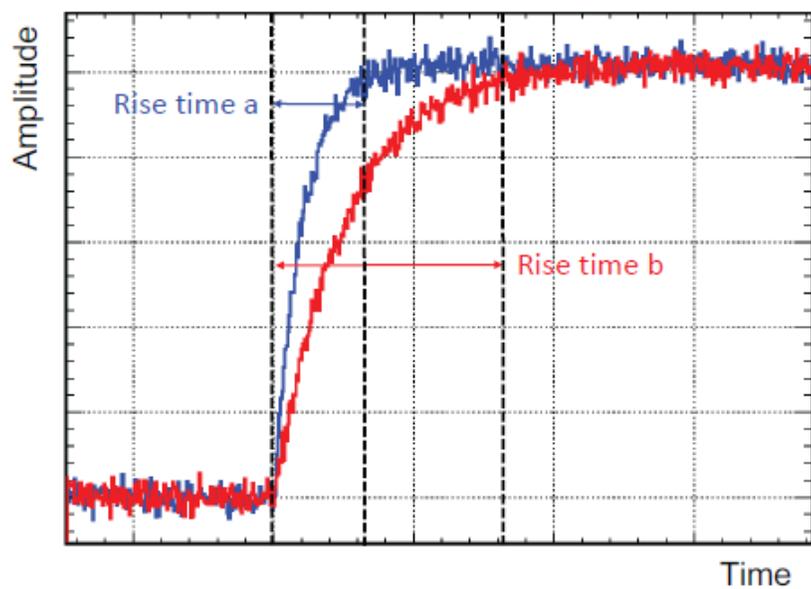


${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应



${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$ 反应存在该 ${}^7\text{Li}$ 、 α 鉴别困难； ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应存在该t、 α 鉴别困难。该类型实验面临这样的难题，需要有更有效的粒子鉴别方法。

- 半导体探测器的脉冲形状甄别(PSD): 利用探测器信号的脉冲形状(幅值与上升时间)与入射粒子的Z和A之间的依赖关系, 提取粒子的种类信息。
- PSD方法利用单片硅探测器能量和信号上升时间信息就可以实现粒子鉴别, 能够显著降低粒子鉴别的阈值。
- 数字化采集前放输出信号, 通过波形分析提取上升时间与能量信息。

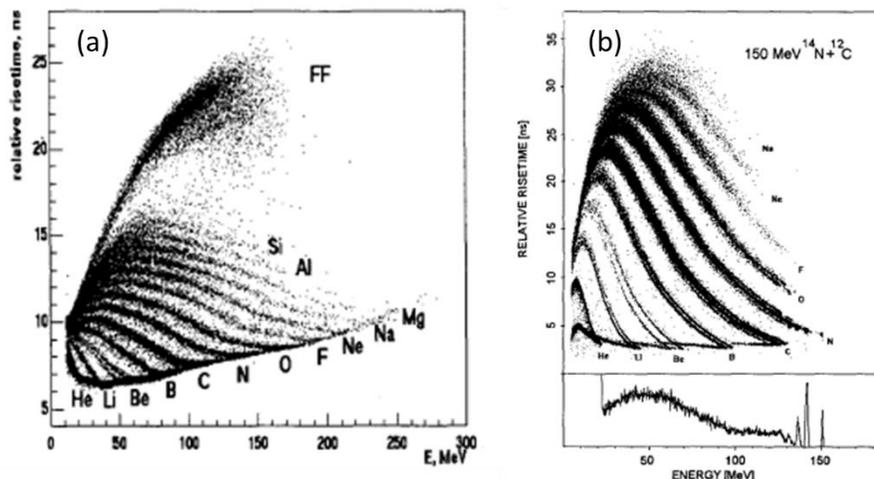


相同能量的两不同核素粒子 ($E_a=E_b$, $Z_a>Z_b$) 正面入射 (从电场强度高的一侧入射) 为例, a与b粒子的能量相同, 故电离产生的电子空穴对总数目相同。

硅探测器输出信号的上升时间正比于电子和空穴的收集时间。对探测器大部分位置, 空穴是信号上升时间的主要贡献者, b粒子的上升时间要更大一些。

1996年，利用500 μm 厚的N型硅探测器，Pausch等人在实验中得到了能量范围为2-20 A MeV，直到Ti元素的脉冲形状甄别结果，其中绝大多数核素（重于Mg）只能得到Z的鉴别而无A的鉴别，而且得到的既有Z又有A的粒子鉴别结果中，能量阈值比较高。

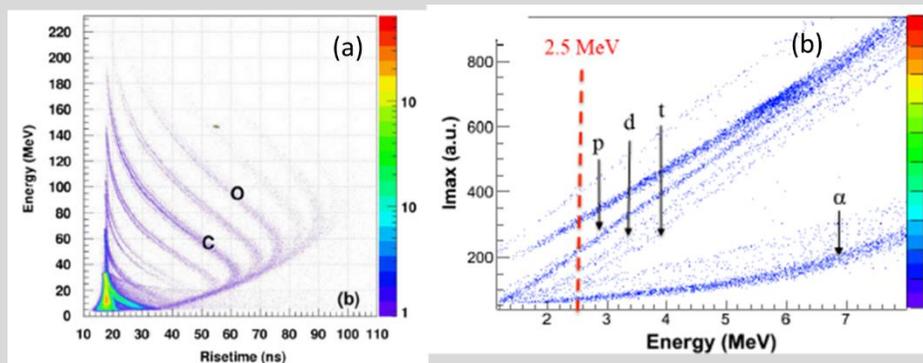
利用模拟电子学得到的硅探测器的PSD的粒子鉴别效果代表



Mutterer等在2000年利用硅探测器的脉冲形状甄别得到的粒子鉴别: (a) 从He (Z=2) 至Si (Z=14) 元素的Z鉴别 (b) He到O元素的同位素得到Z与A同时鉴别

目前在 $Z \leq 3$ 的核素的粒子鉴别能量下限尚未确定。且集中在原理研究，尚未应用于物理实验研究。

利用数字化电子学得到的硅探测器的PSD的粒子鉴别效果代表



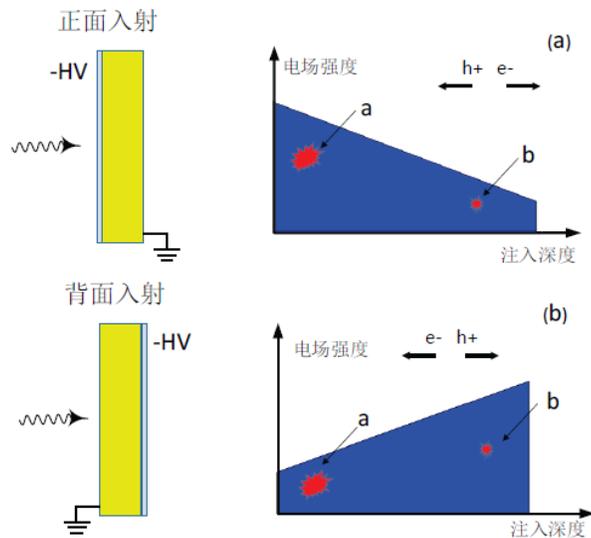
FAZIA合作组(a)和Assié等人(b)通过硅探测器的脉冲形状甄别得到的粒子鉴别。FAZIA合作组在建设 4π 粒子探测阵列中，将 ΔE -E望远镜方法与硅探测器的脉冲形状甄别相结合，扩展探测阵列的能量动态范围。

➤ 研究目标：基于(n, lcp)反应的需求，探究利用硅探测器的数字化脉冲形状甄别得到 $Z \leq 3$ 的核素的粒子鉴别能量下限，补充完善目前散裂中子源上低能轻带电粒子的鉴别方法，并应用到核反应截面实验测量中。

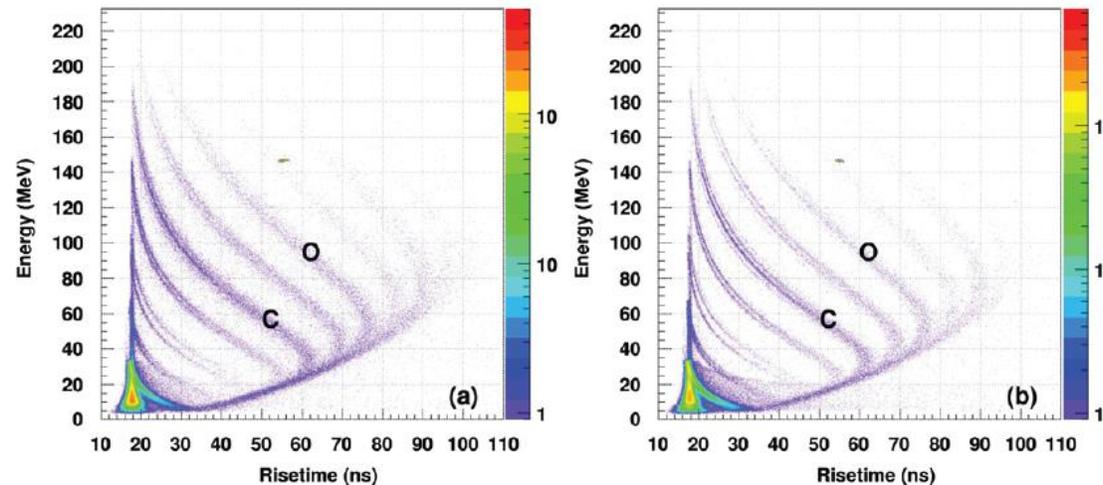
➤ 影响PSD的因素：

探测器方面因素：(a)正背面入射 (b)硅探测器电阻率不均匀性 (c)沟道效应

电子学方面因素：(a)前放上升时间 (b)不同采样率



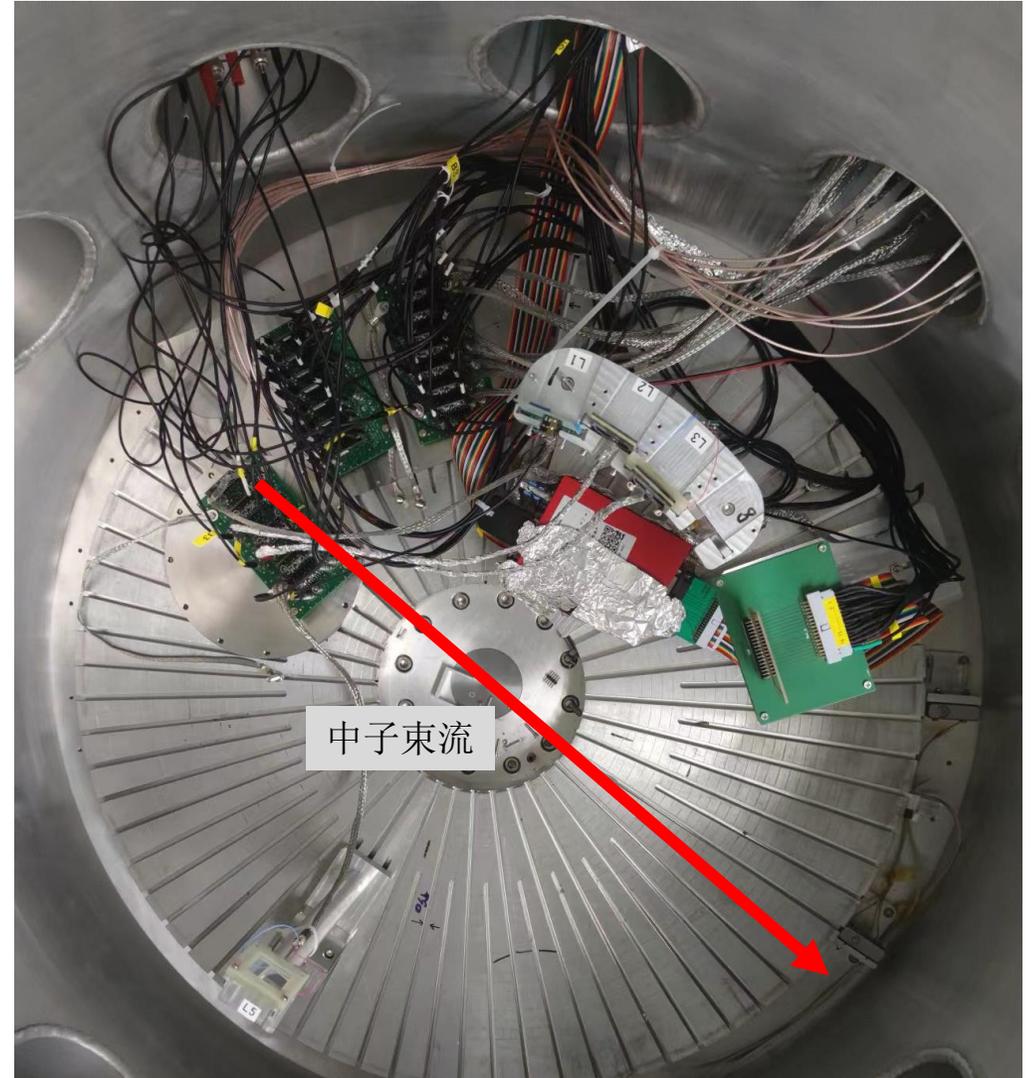
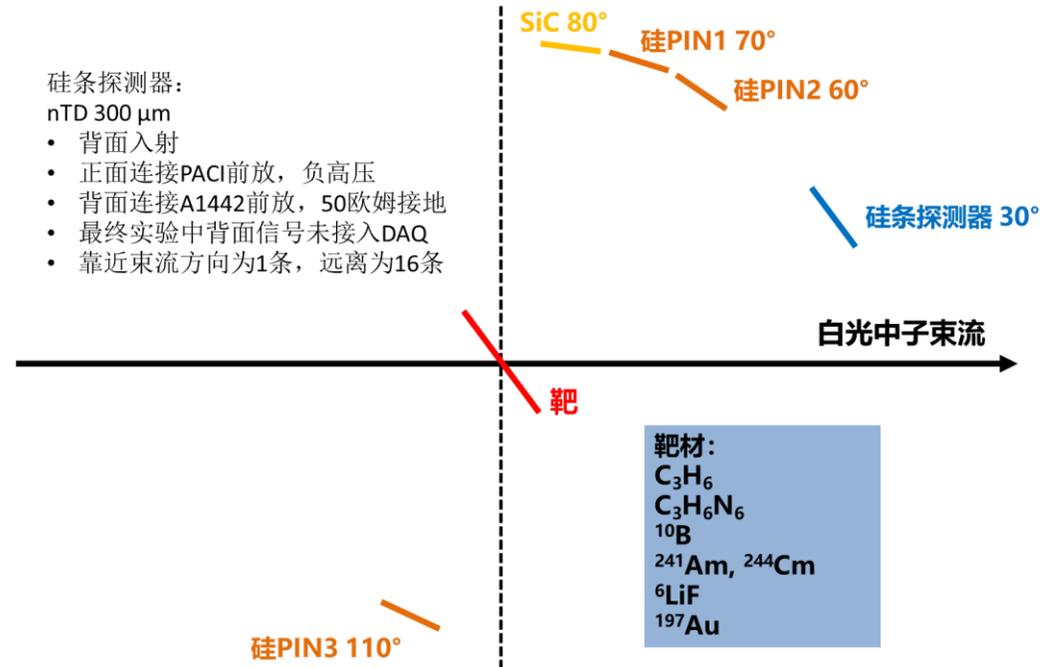
(在线彩图) 粒子入射硅探测器以及探测器内部电场分布示意图：(a) 正面入射；(b) 背面入射

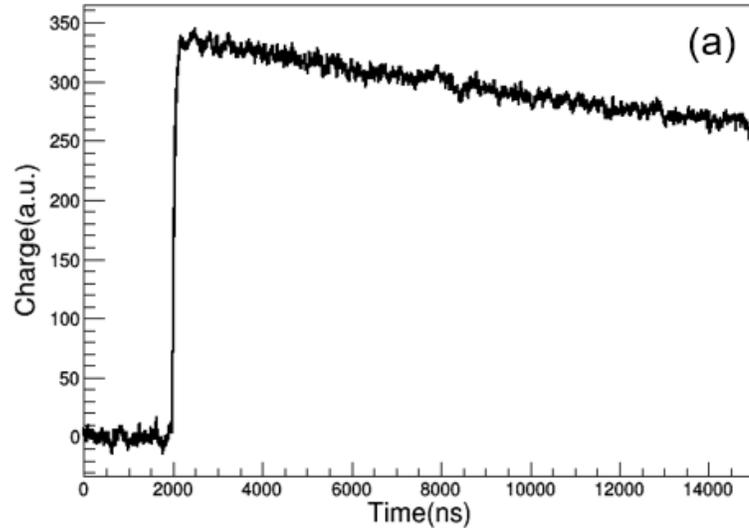


(在线彩图) 硅探测器中脉冲形状分析法得到Energy vs Risetime 二维关联图，(a)沟道效应；(b)无沟道效应

晶体的切割方向、晶轴；粒子的入射方向；探测器摆放等方式

- 300 μm nTD型硅条探测器，背面入射
- 连接PACI前放：电荷及电流输出
- PIN型硅探测器、SiC探测器
- 1Gsps采样率波形数字化系统
- 不同电压情况下开展测量(耗尽与未耗尽)

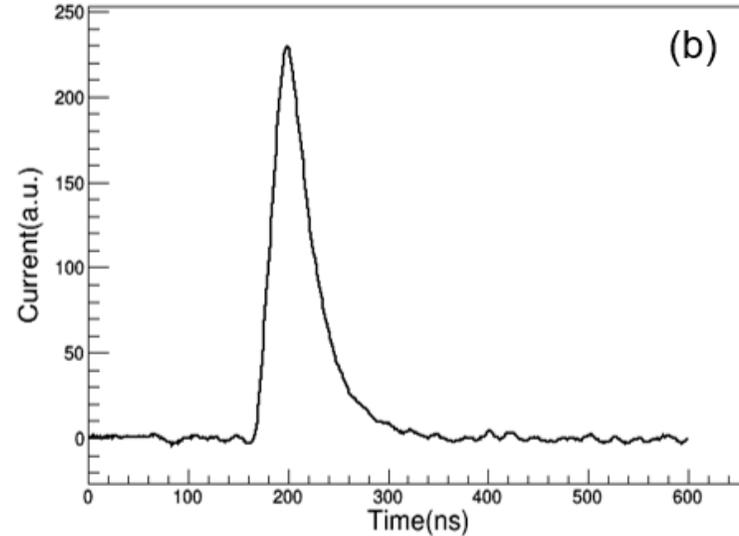




典型电荷输出波形



微分、积分提取幅度信息及时间信息
进而得到事件能量 Q_{\max} 及对应的中子飞行时间信息TOF

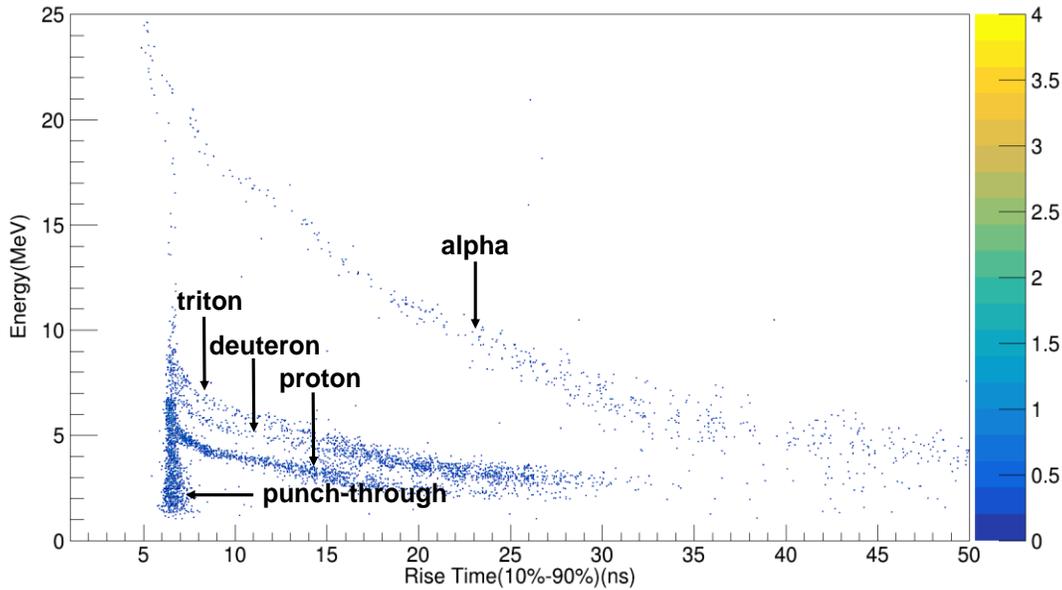


典型电流输出波形

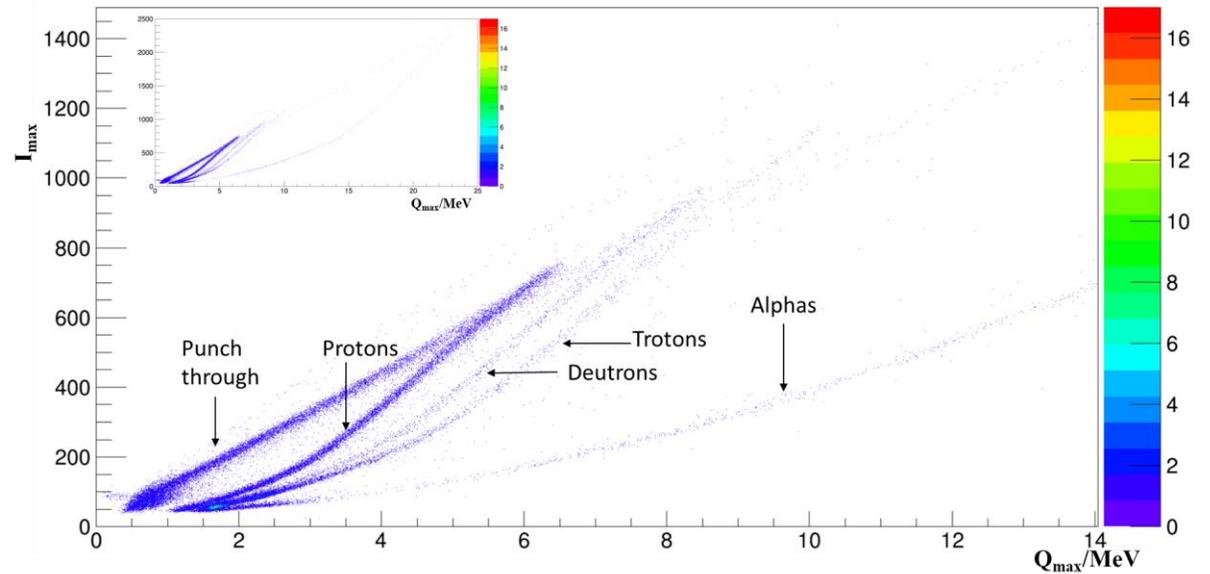


上升事件10%-90%: t_{ir}
直接提取幅度信息 I_{\max}

- 通过粒子沉积能量 Q_{\max} 、电流信号的上升时间 t_{ir} 以及电流信号 I_{\max} 的关联谱来开展脉冲形状甄别研究
- α 与t的鉴别阈值约为2.5 MeV, p/d/t在3.5 MeV以上得到很好鉴别

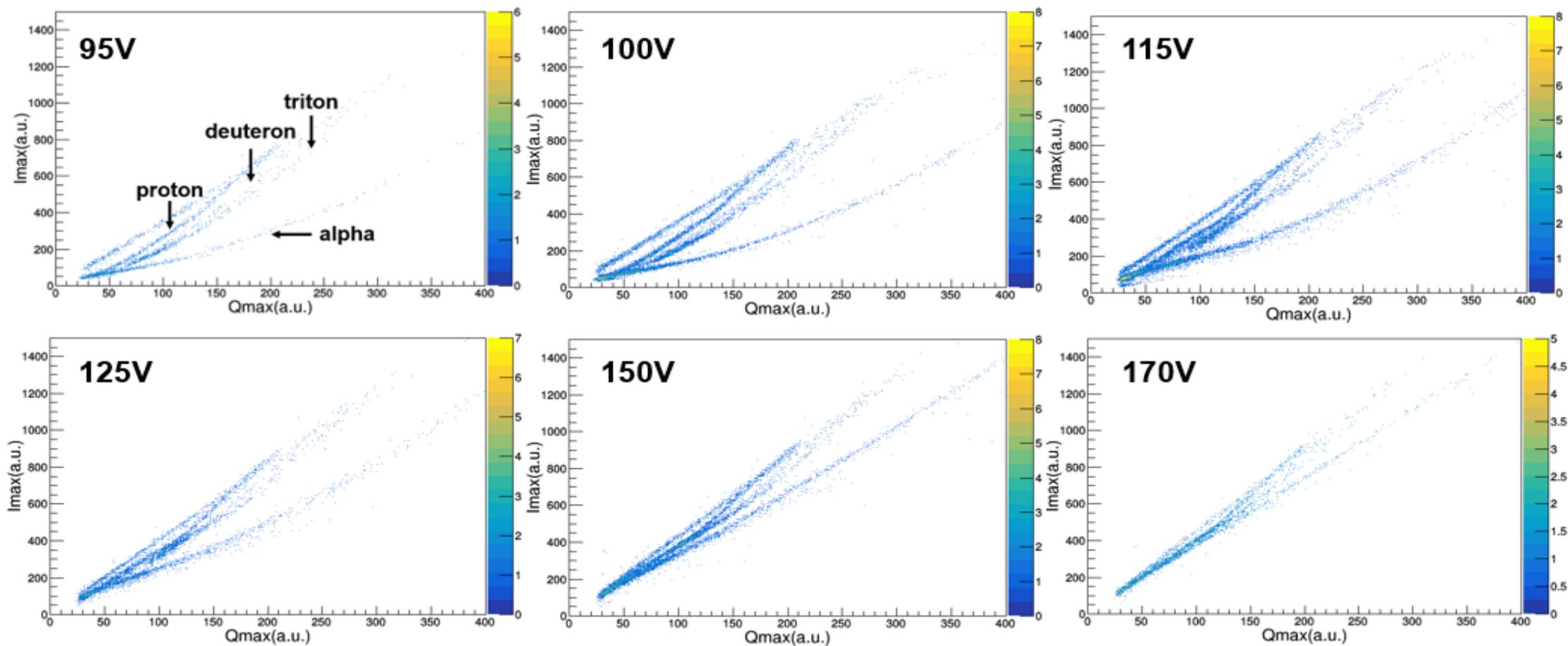


粒子沉积能量 Q_{\max} :电流信号的上升时间 t_{ir} 二维谱



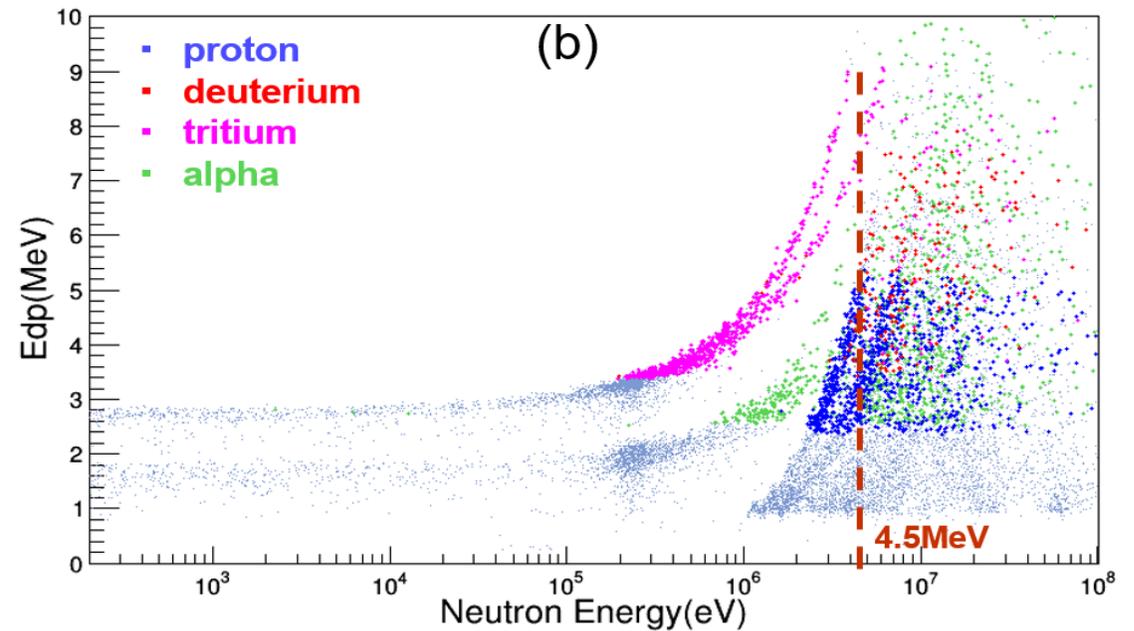
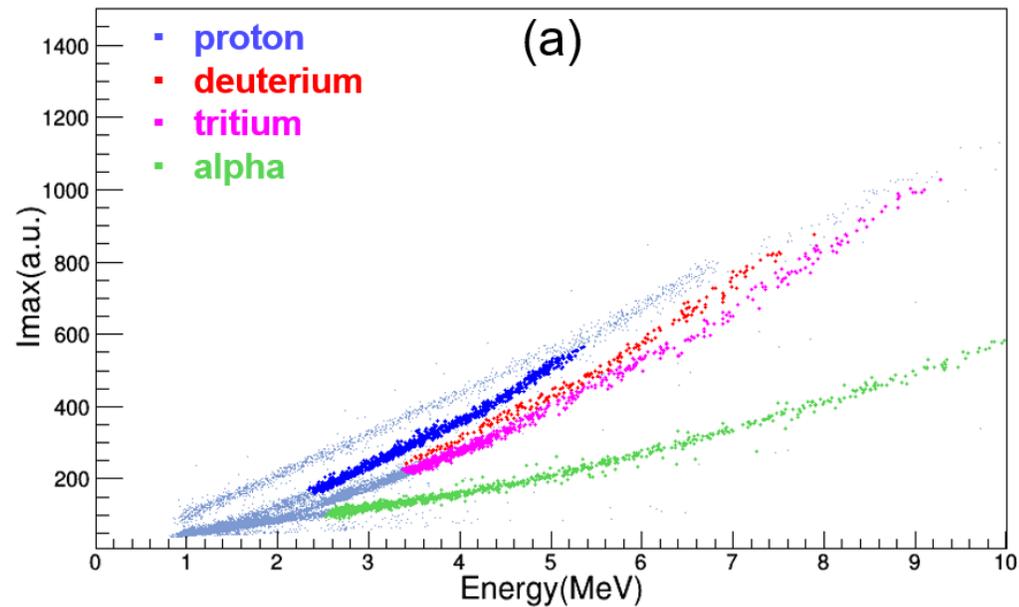
粒子沉积能量 Q_{\max} :电流信号 I_{\max} 二维谱
(插图为0-25MeV范围)

PSD不同偏压鉴别结果



不同电压下粒子沉积能量 Q_{max} : 电流信号 I_{max} 二维谱

- 对比 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 反应得到的Amplitude- E_n 二维谱鉴别
- 选取p/d/t/ α 事件，对比在两个二维谱中的位置

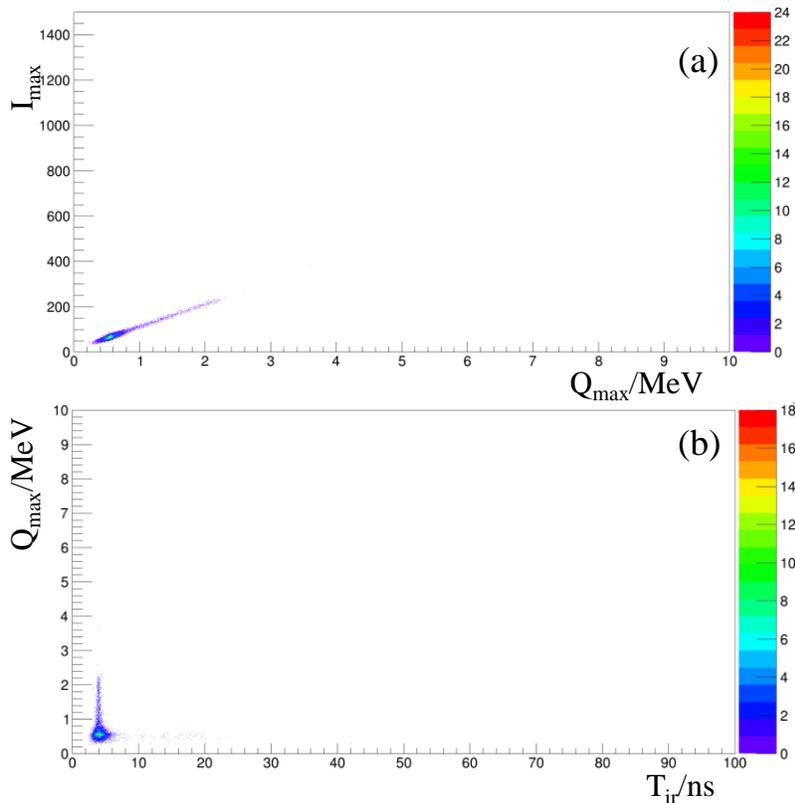


PSD与Amplitude- E_n 的鉴别对比

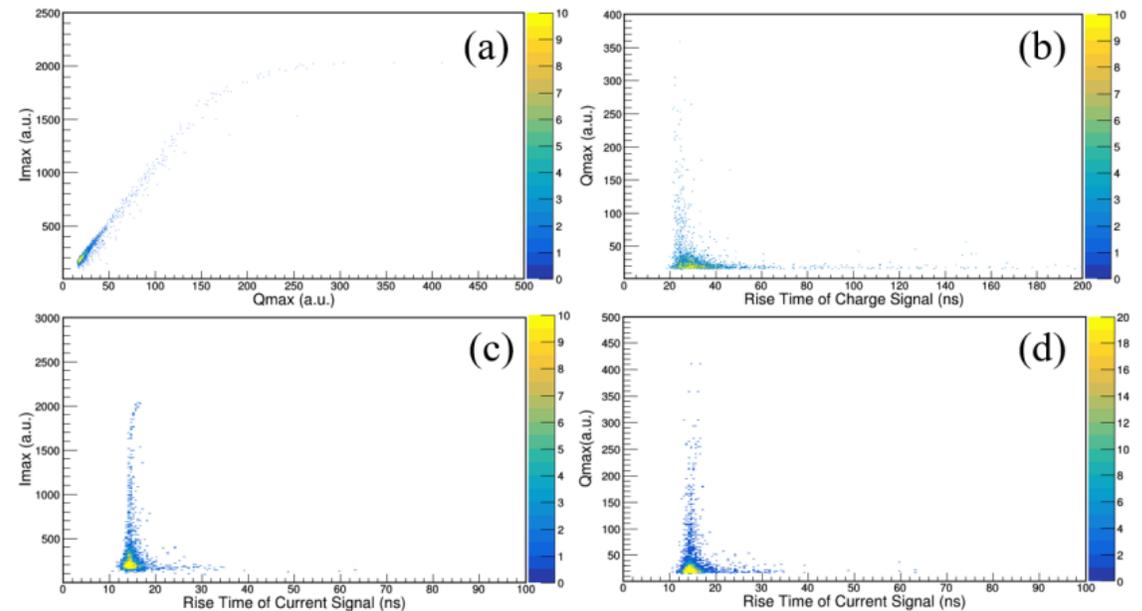
金刚石及SiC探测器PSD测试



- 金刚石及SiC探测器PSD测试：目前的研究中无法观察到明显的不同粒子的事件带
- 硅探测器中电子和空穴漂移速度相差较大(常见的电子和空穴漂移速度分别为 $1500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $400 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，而且速度较慢，容易被探测系统所探测到。金刚石探测器电子和空穴的漂移速度分别可达 $4500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $3800 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，差距偏小且漂移速度较快，载流子漂移时间的差异难以被电子学系统所甄别。
- 提高电子学系统的时间分辨能力，可以金刚石、SiC探测器开展 PSD 方法鉴别核反应出射粒子种类。

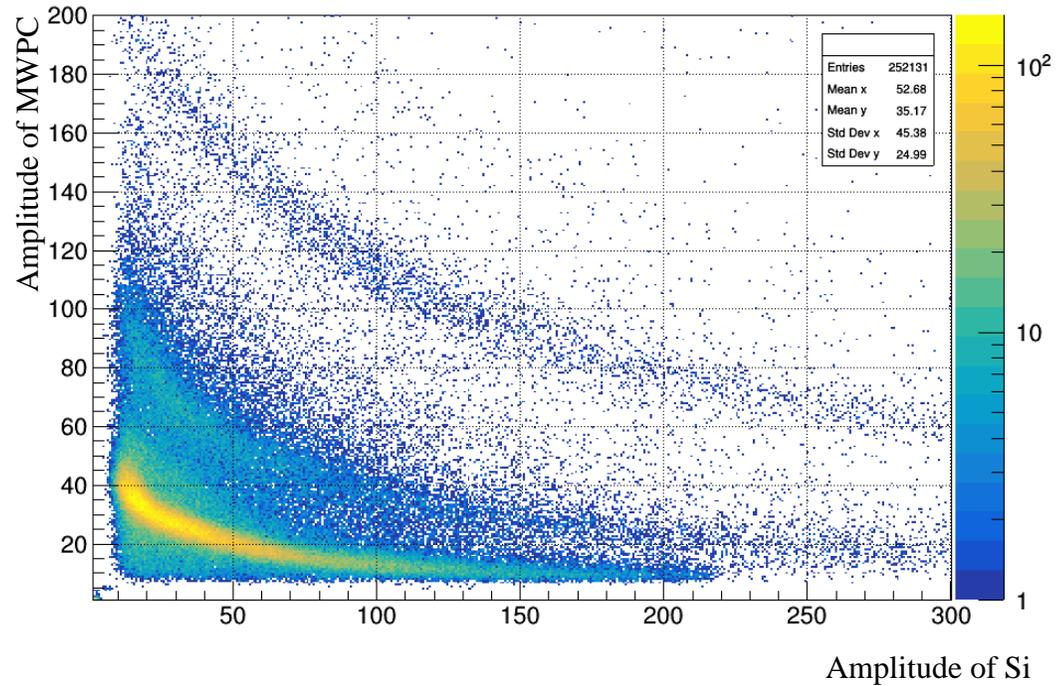
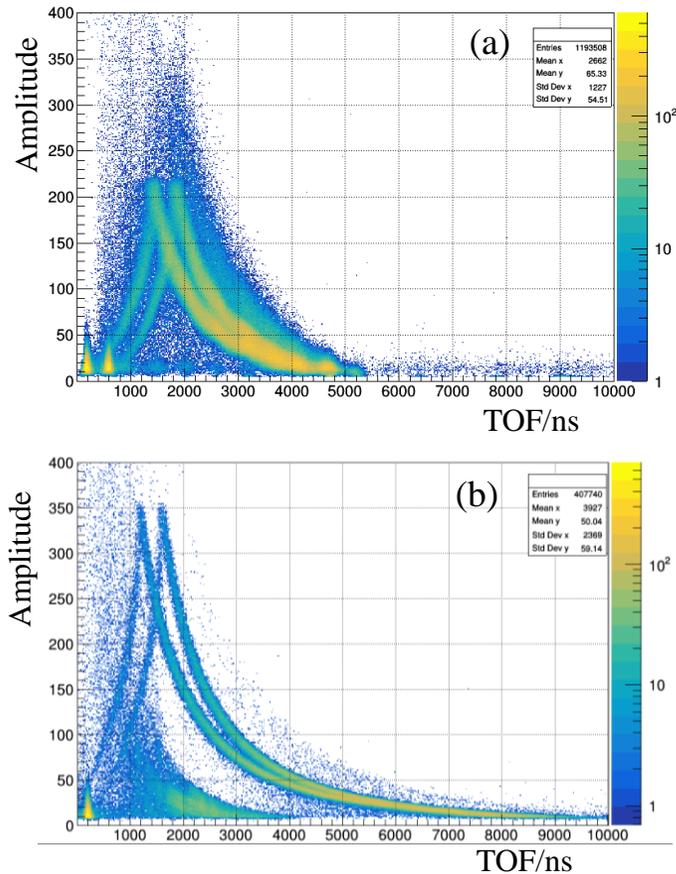


SiC探测器PSD方法鉴别 ${}^6\text{LiF}$ 靶产物的实验结果：(a) 电流信号的最大值-电荷信号的最大值二维谱，(b) 电荷信号的最大值-电流信号的上升时间二维谱



金刚石探测器PSD方法鉴别 ${}^6\text{LiF}$ 靶产物的实验结果：(a) 电流信号的最大值-电荷信号的最大值二维谱，(b) 电荷信号的最大值-电荷信号的上升时间二维谱，(c) 电流信号的最大值-电流信号的上升时间二维谱，(d) 电荷信号的最大值-电流信号的上升时间二维谱

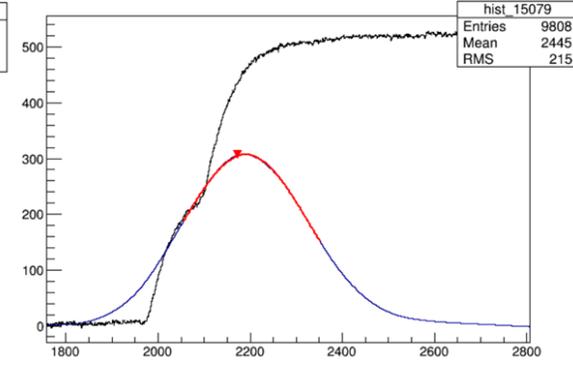
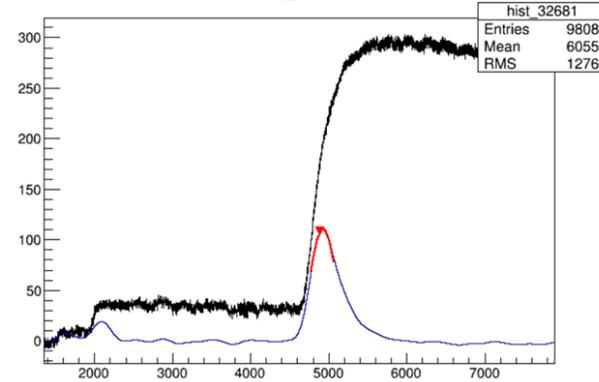
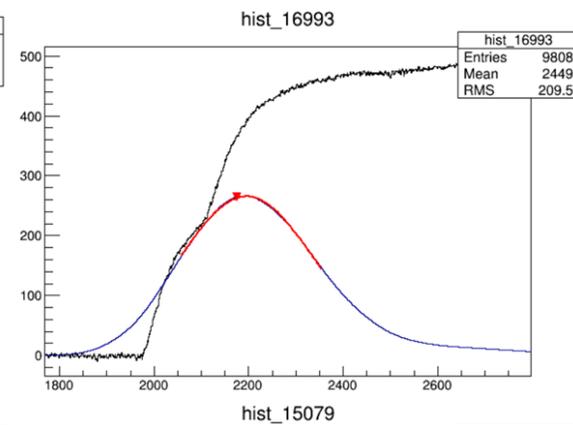
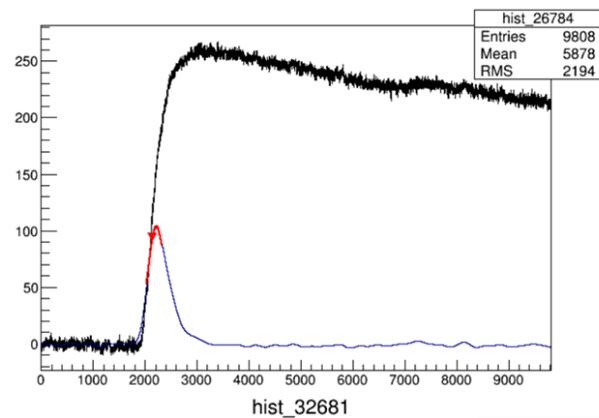
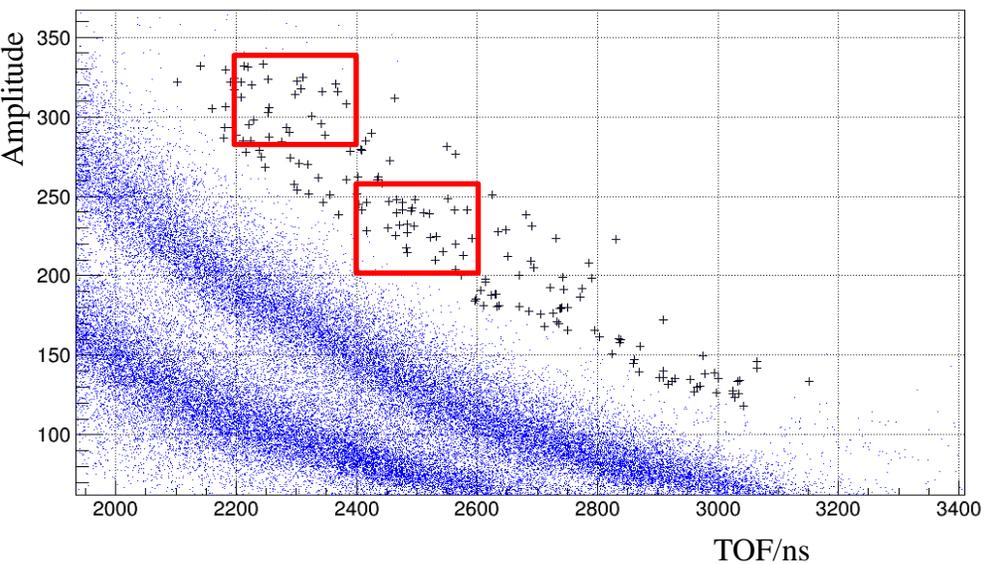
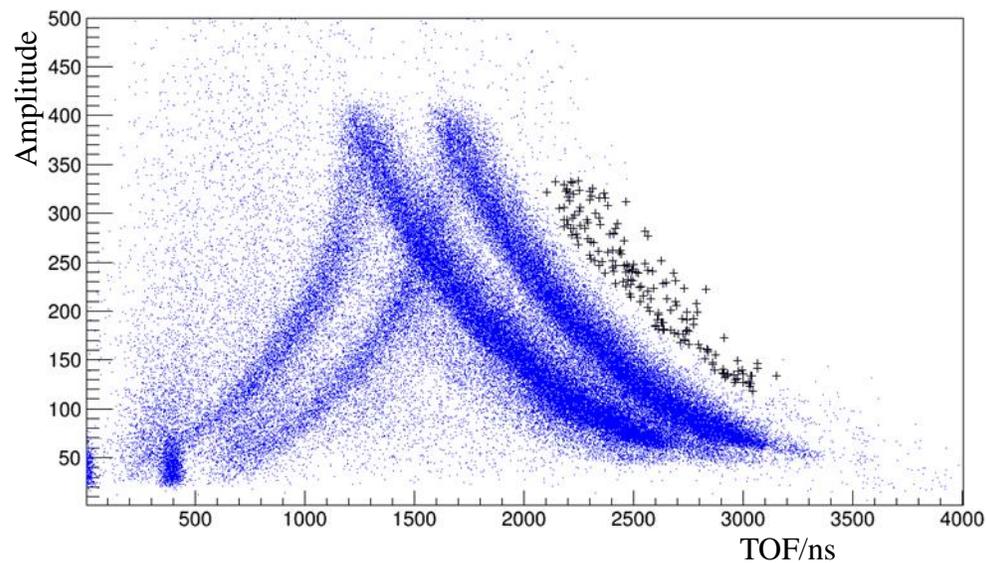
- n-p散射实验（聚丙烯(C₃H₆)样品）中发现在反冲质子事件带上方有模糊干扰事件带，给实验引入误差
- 气体探测器与硅探测器的 ΔE -E鉴别中得到该部分事件位于质子之上



MWPC气体探测器vs硅探测器 ΔE -E鉴别

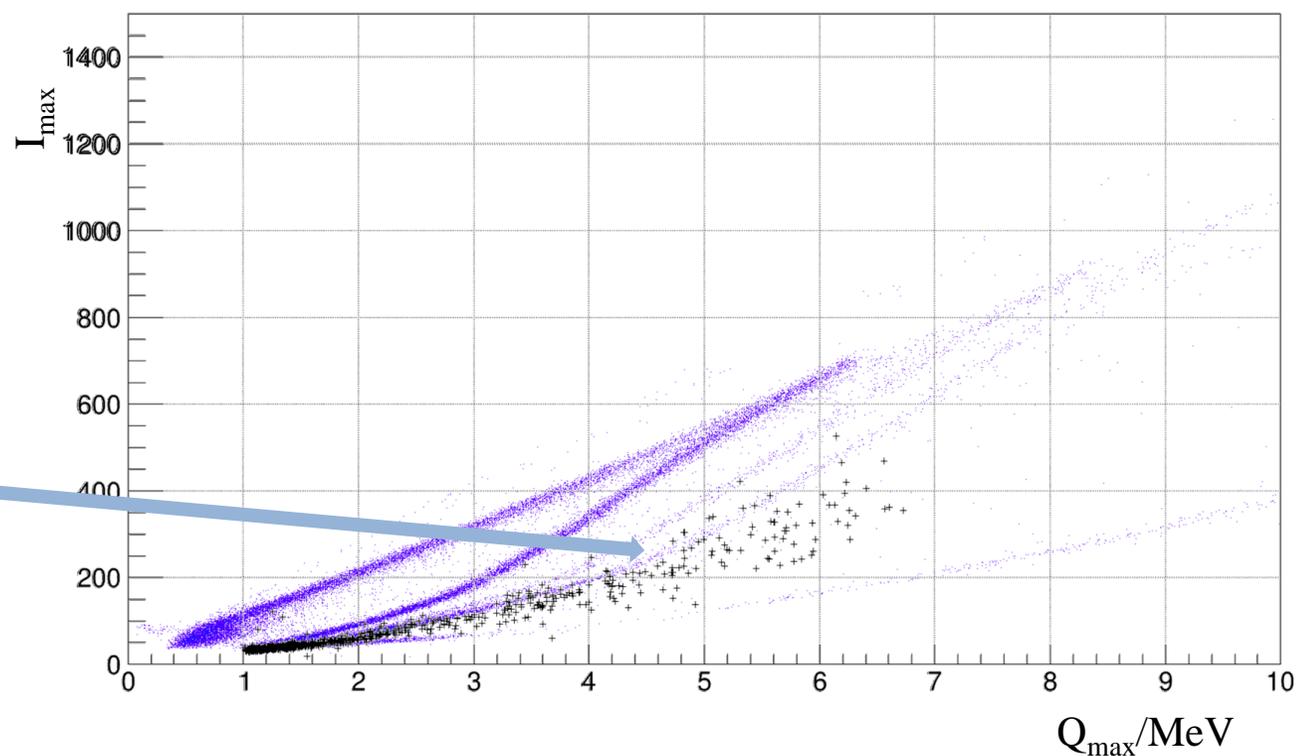
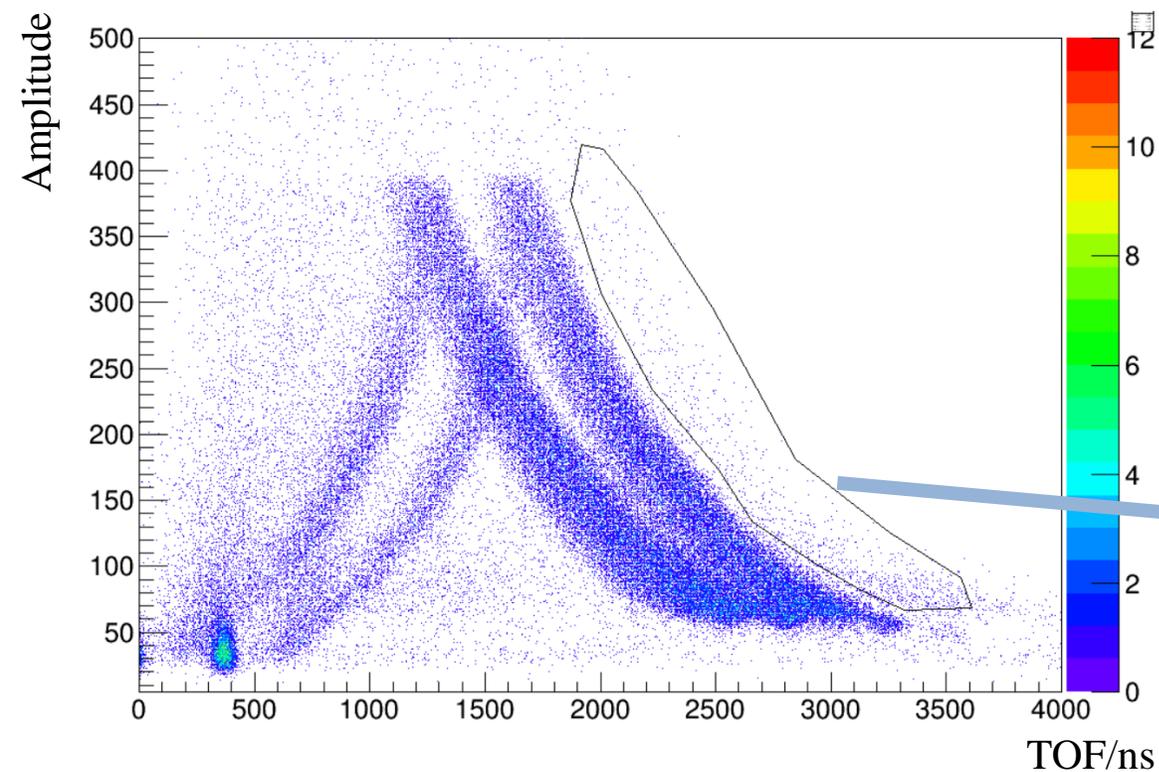
(a)50-50束斑组合情况下得到的Amplitude:TOF二维谱
(b)50-15束斑组合情况下得到的Amplitude:TOF二维谱

原始波形

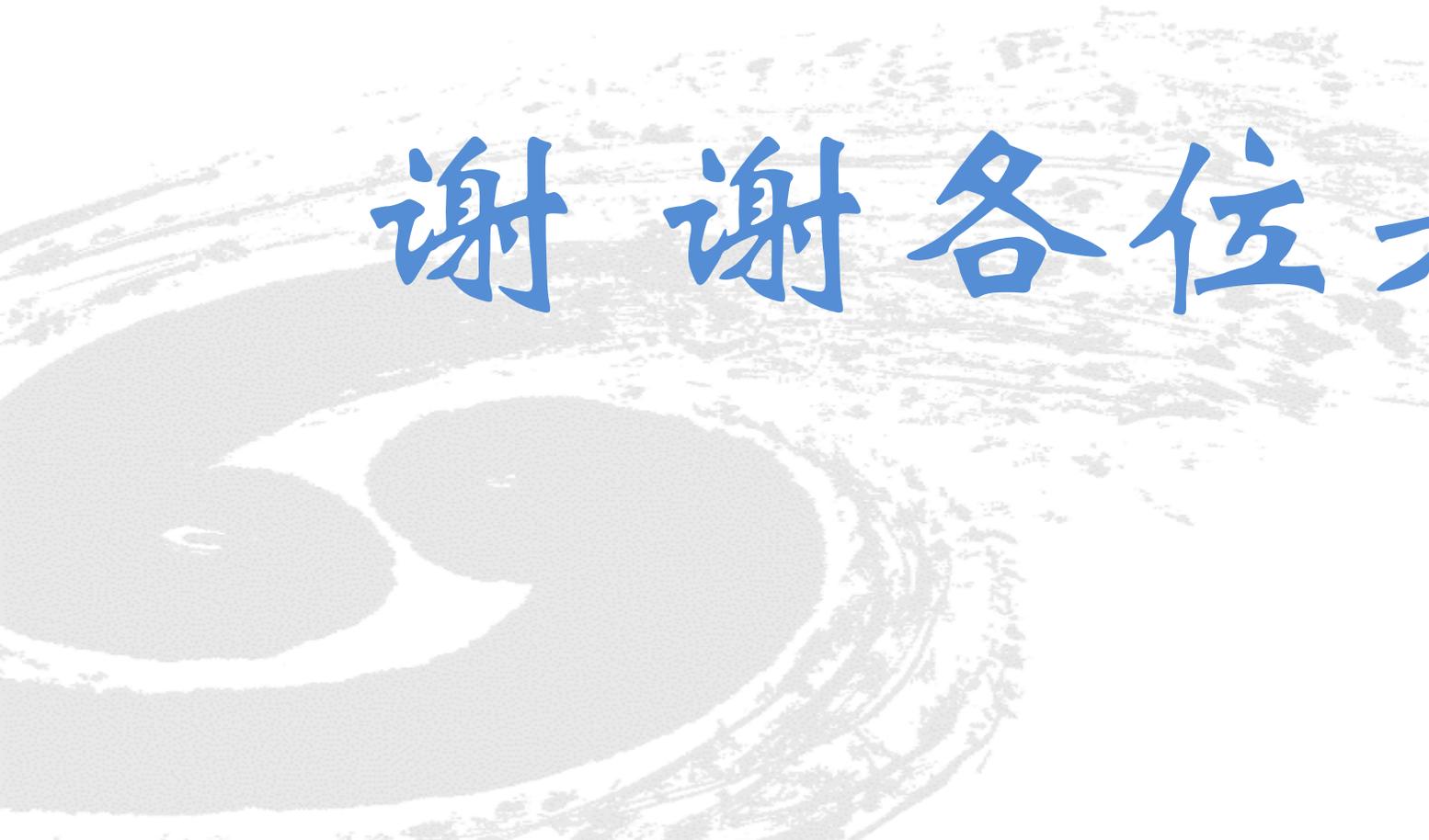


部分波形有堆积
大多数波形无堆积，正常波形信号

- 针对该部分事件尝试使用PSD方法判断其粒子性质
- 并非p、d、t、 α 等粒子
- 目前并未解决该问题



- 利用PACI前放，搭建实验系统，在Back-n利用(n, lcp)反应出射的轻带电粒子对硅、金刚石、SiC等半导体带电粒子探测器开展PSD实验研究。
- 硅探测器的PSD得到了良好的p、d、t、 α 等粒子鉴别，为(n, lcp)反应研究提供了新的方法。
- 基于目前的电子学系统，金刚石及SiC探测器无法给出良好的PSD鉴别。
- 通过PSD鉴别给出np散射中干扰事件带的分布，但并未解决该问题。



谢谢各位老师！

普通Pin型硅探测器PSD

