



中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

用于低本底核反应研究的 α 粒子 Bragg 波形分析与判别方法研究

范翊华 唐晓东 张宁涛

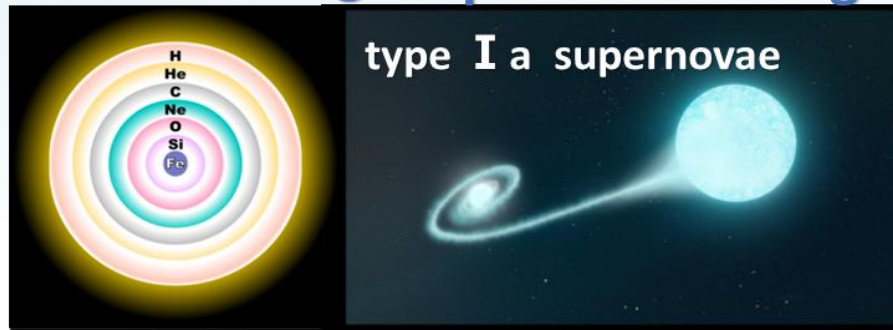
MateTPC合作组

中国科学院近代物理研究所

中国科学院大学

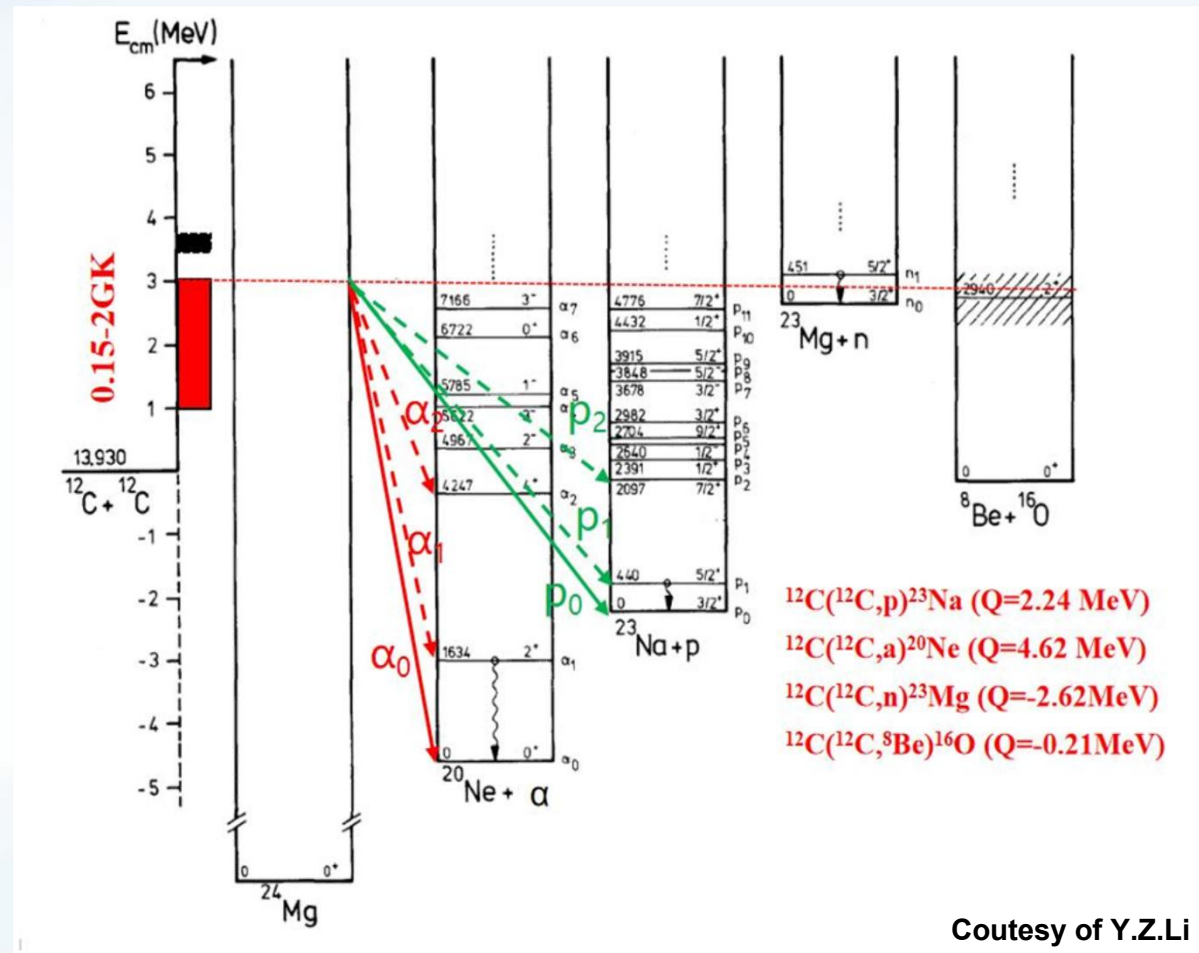
2025-12-30

Stable burning Explosive burning



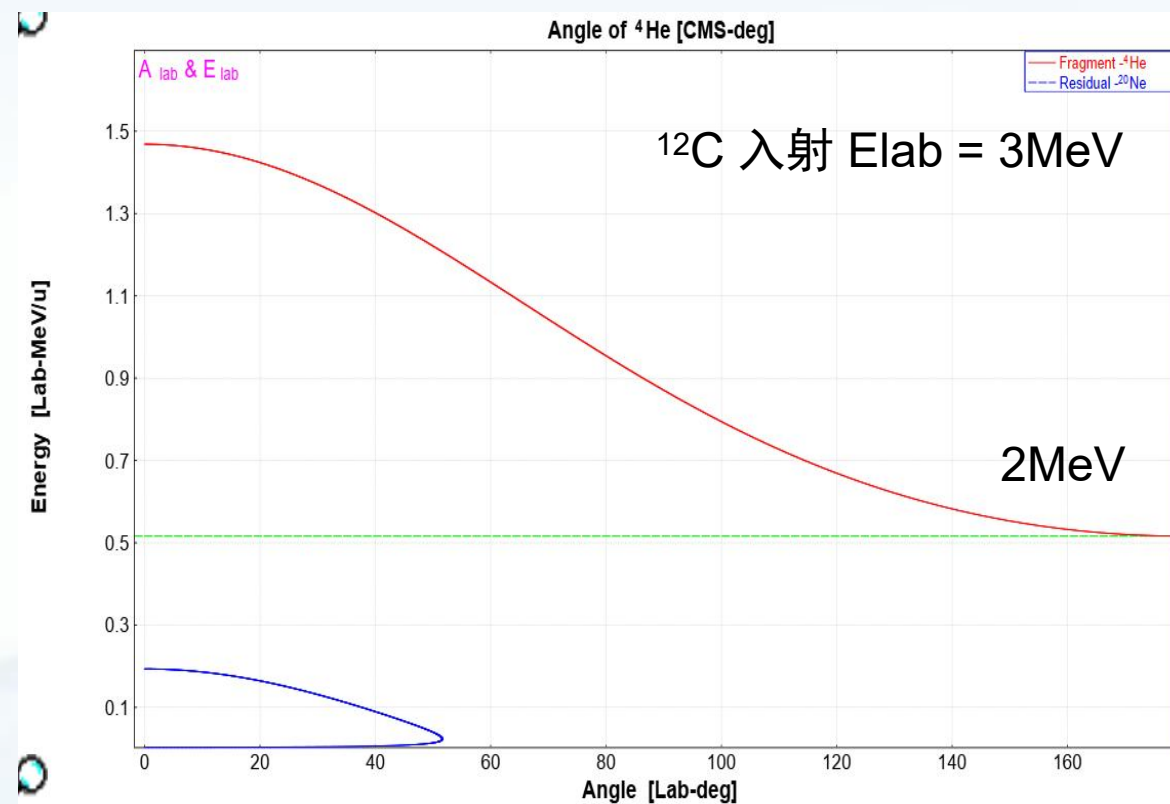
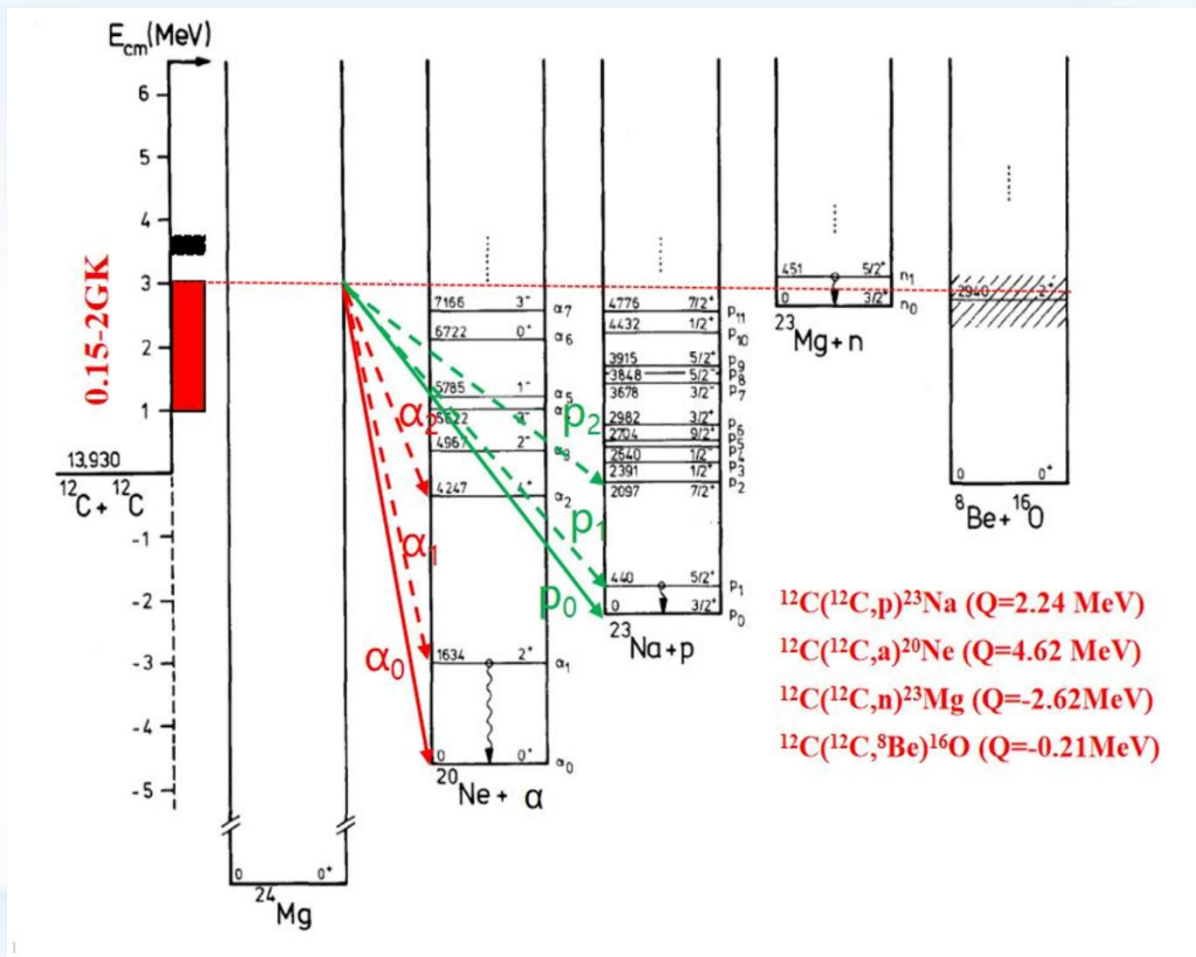
type Ia supernovae

Fuel	Main Product	Secondary Product	T (10 ⁹ K)	Time (yr)	Main Reaction
H	He	¹⁴ N	0.02	10 ⁷	4 ¹ H → ⁴ He
He	O, C	¹⁸ O, ²² Ne s-process	0.2	10 ⁶	3 ⁴ He → ¹² C ¹² C(α, γ) ¹⁶ O
C	Ne, Mg	Na	0.8	10 ³	¹² C + ¹² C
Ne	O, Mg	Al, P	1.5	3	²⁰ Ne(γ, α) ¹⁶ O ²⁰ Ne(α, γ) ²⁴ Mg
O	Si, S	Cl, Ar, K, Ca	2.0	0.8	¹⁶ O + ¹⁶ O
Si, S	Fe	Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni	3.5	0.02	²⁸ Si(γ, α)...



- $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合反应是大质量恒星燃烧阶段的关键反应($T_9 \sim 0.8 - 1.2$)和Ia 型超新星和超级暴的点火反应($T_9 \sim 0.15 - 0.7$)

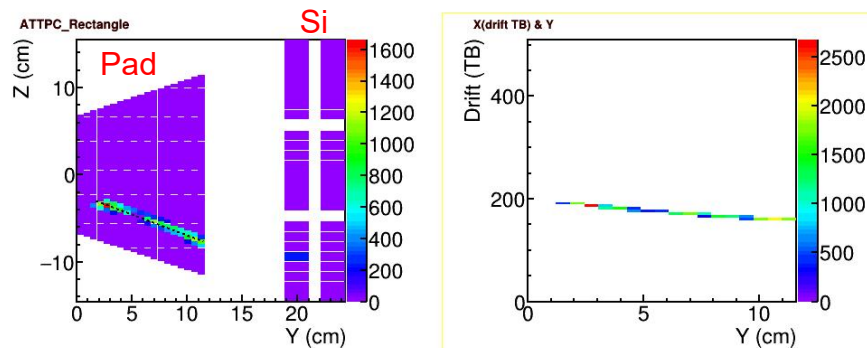
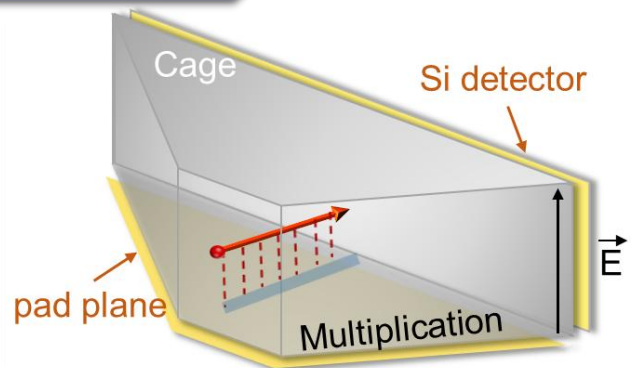
背景



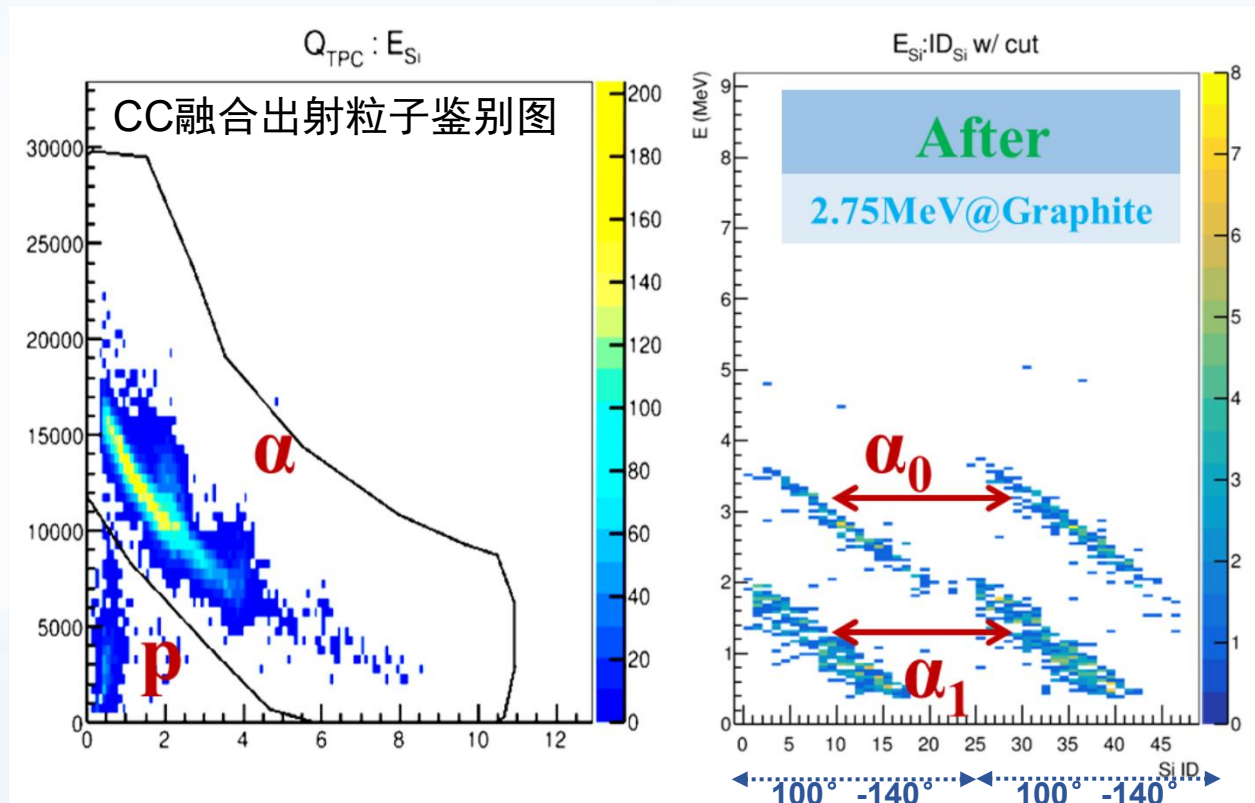
- ^{12}C 入射能量为3MeV时, 反应截面 10^{-22} bar α_1 道出射能量最低为2MeV

时间投影室（TPC）具备三维径迹重建、高位置分辨、大立体角覆盖的探测效率等优点：

Si探测器辅助



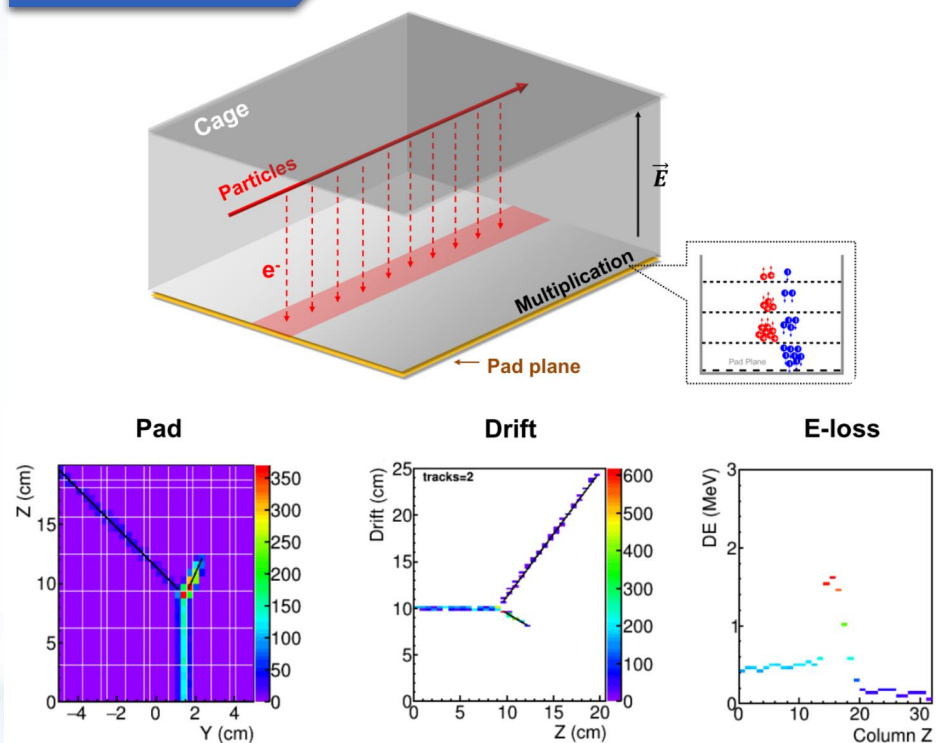
Courtesy of Y.Z.Li



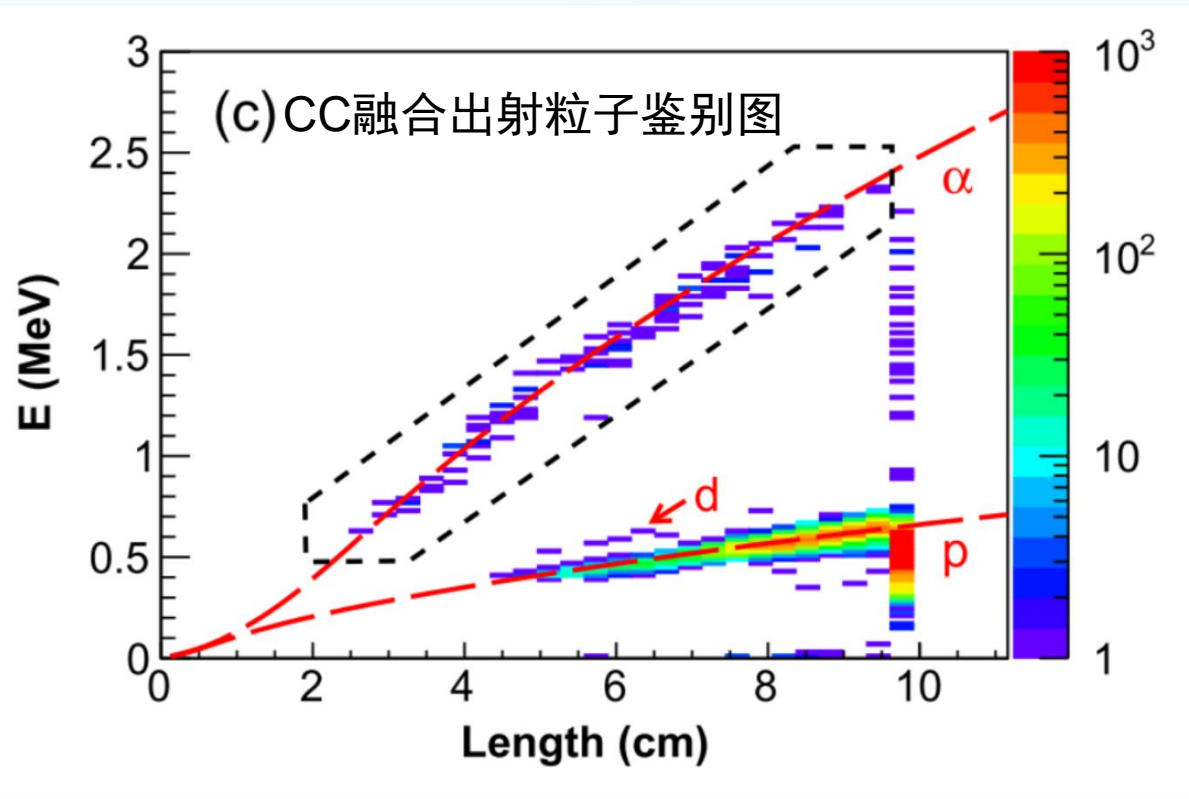
- dE-E粒子鉴别，高能量分辨，Si阵列提供绝对位置
- 探测阈值较高：Si 阈值 500keV $E_\alpha = 2.8\text{MeV}$

时间投影室（TPC）具备三维径迹重建、高位置分辨、大立体角覆盖的探测效率等优点：

侧向入射



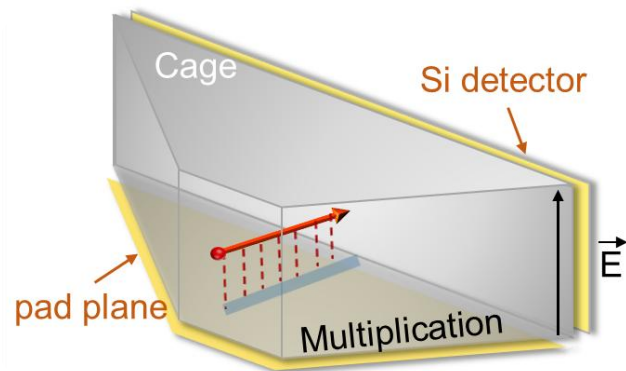
Zhang, Z. C. et al(2021).NIMA,1016, 165740.



- 低探测阈值：灵敏区域 150keV ； 极低本底：0.29/h
- THGEM触发，无绝对入射位置

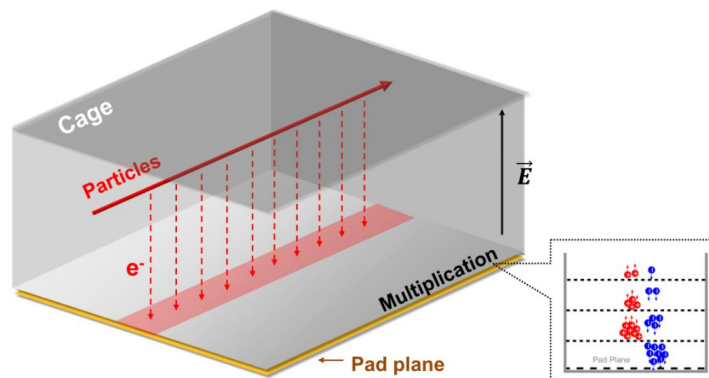
时间投影室（TPC）具备三维径迹重建、高位置分辨、大立体角覆盖的探测效率等优点：

Si探测器辅助



- dE-E粒子鉴别，高能量分辨
- Si阵列提供绝对位置
- 探测阈值较高：500keV

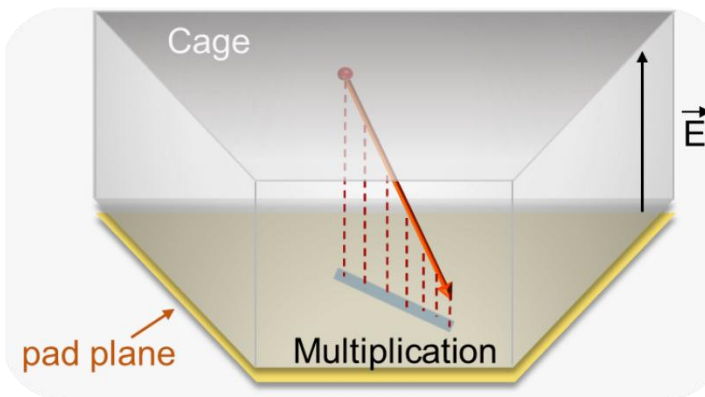
侧向入射



- 低探测阈值：灵敏区 150keV；
- 极低本底：0.29/h
- THGEM触发，无绝对入射位置

Zhang, Z. C. et al(2021).NIMA,1016, 165740.

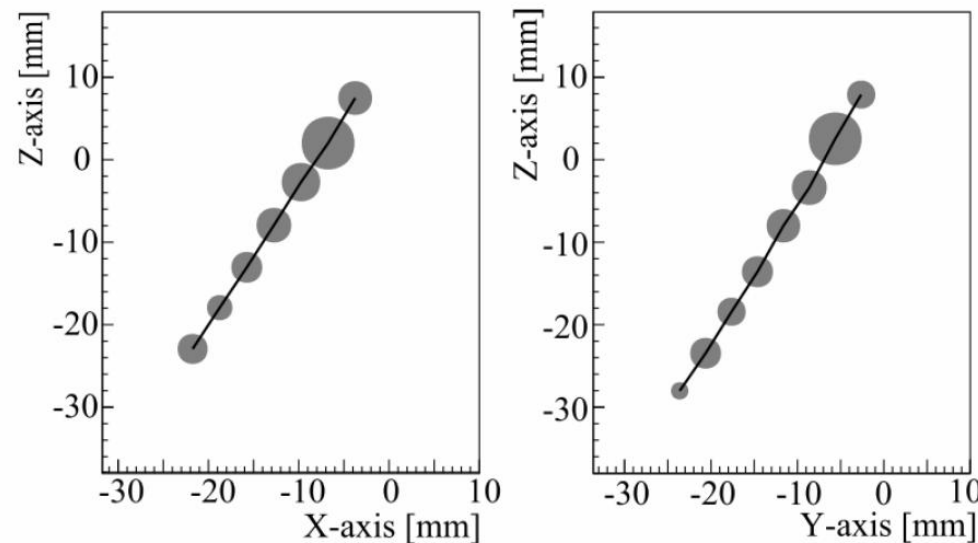
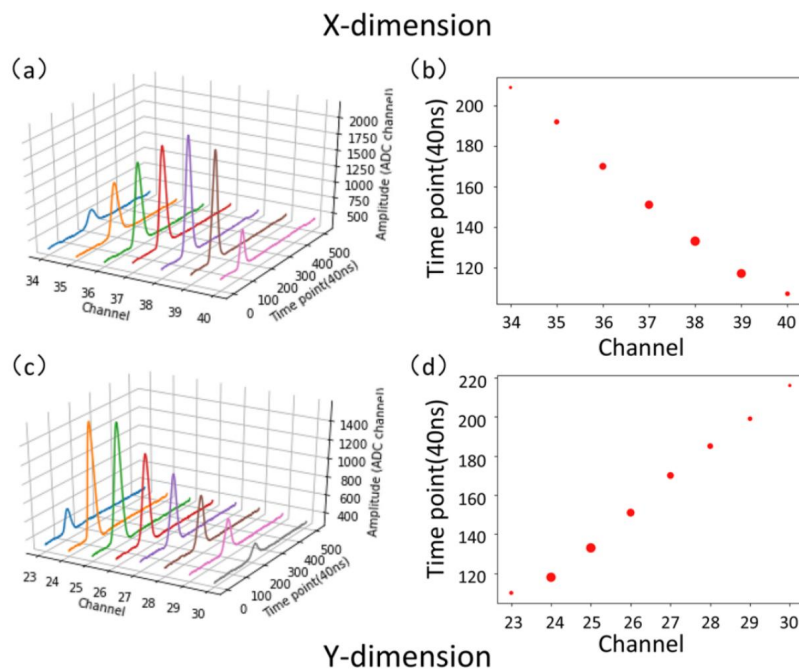
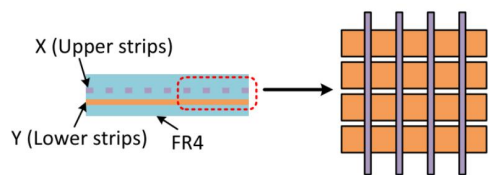
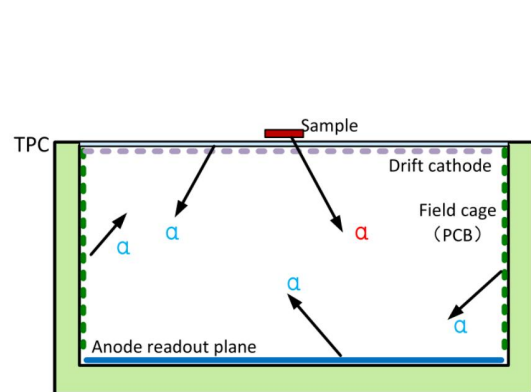
漂移方向入射



- 低探测阈值，2MeV的 α 粒子：灵敏区沉积 500keV
- 更好的射程分辨
- 本底抑制

核心思路：通过粒子入射与漂移同向，由Pad提供精确入射位置，进一步压低本底。

时间投影室（TPC）具备三维径迹重建、高位置分辨、大立体角覆盖的探测效率等优点：

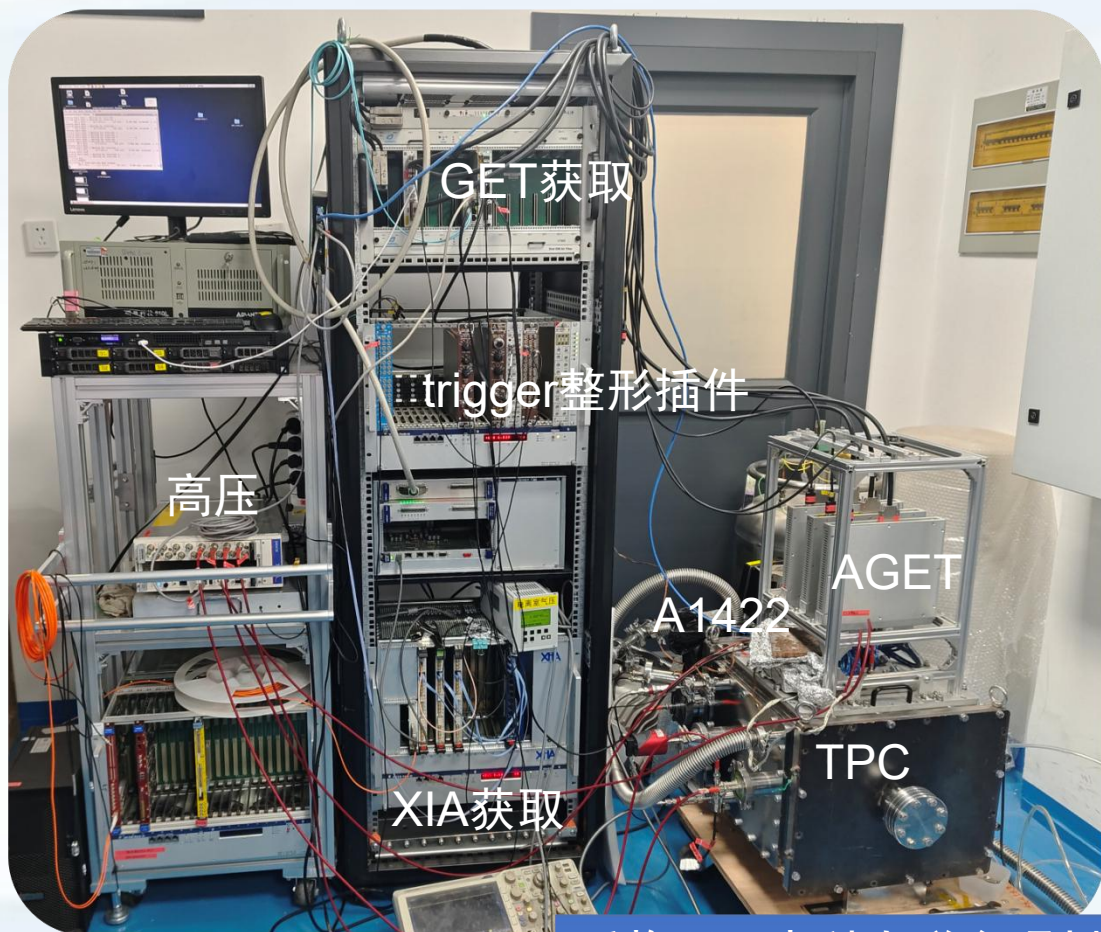


Pan, J., Zhang, Z., Feng, C. et al. (2022) *Review of Scientific Instruments*, 93(1).

Du, H., Du, C., Han, K. et al. (2023) *Radiation Detection Technology and Methods*.

- 中科大团队：中心 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 有效区域本底计数率在95%置信水平下低于 1.6×10^{-3} 计数/分钟， $0.00384 / (\text{h} \cdot \text{cm}^2)$ 。
- 上海交大团队：无窗TPC，实现了 $(0.13 \pm 0.03) \times 10^{-6} \text{ Bq/cm}^2$ 的本底计数率， $0.00047 / (\text{h} \cdot \text{cm}^2)$

实验测试



GET获取

trigger整形插件

高压

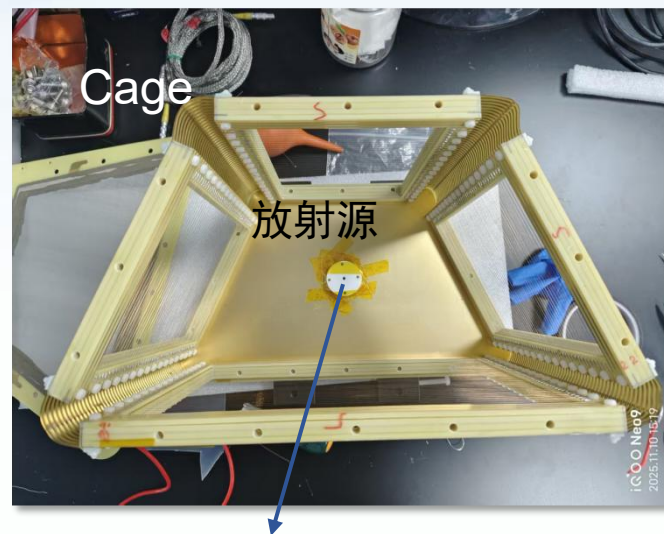
AGET

A1422

XIA获取

TPC

近物所、中科大联合研制



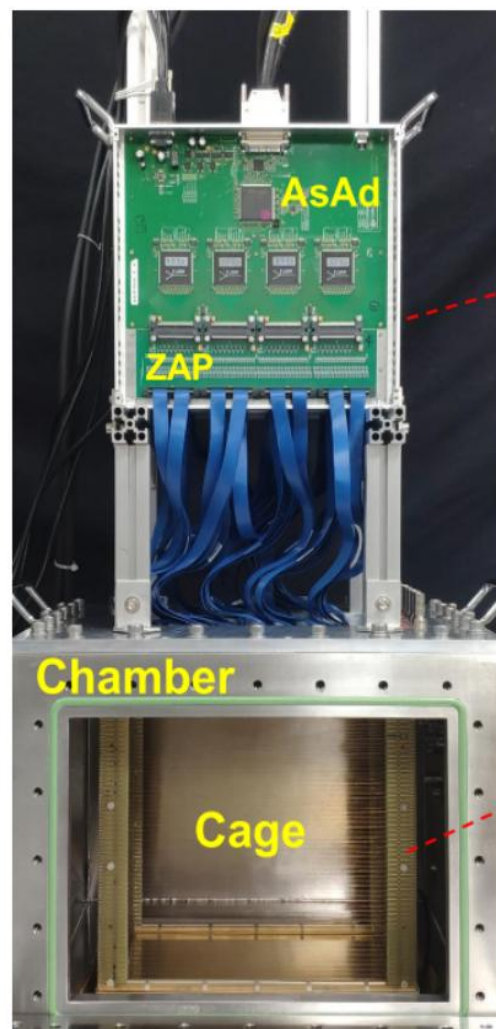
距离放射源表面5mm高度的，有5mm厚度的聚乙烯盖子准直

实验条件： 常温20°C

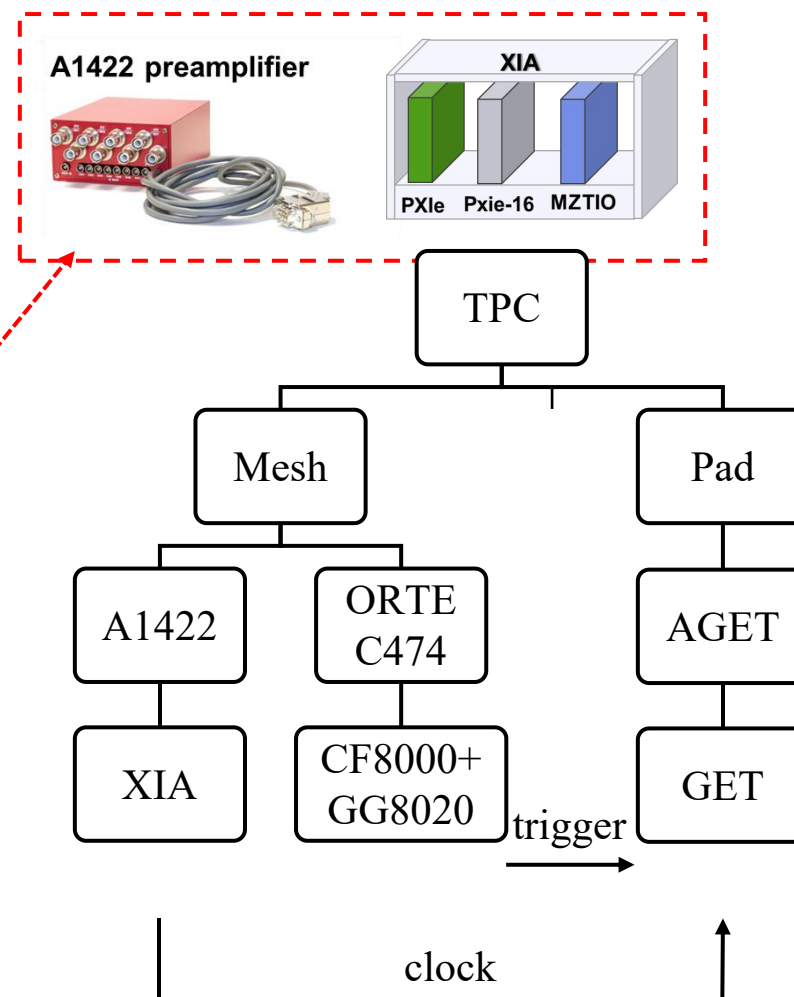
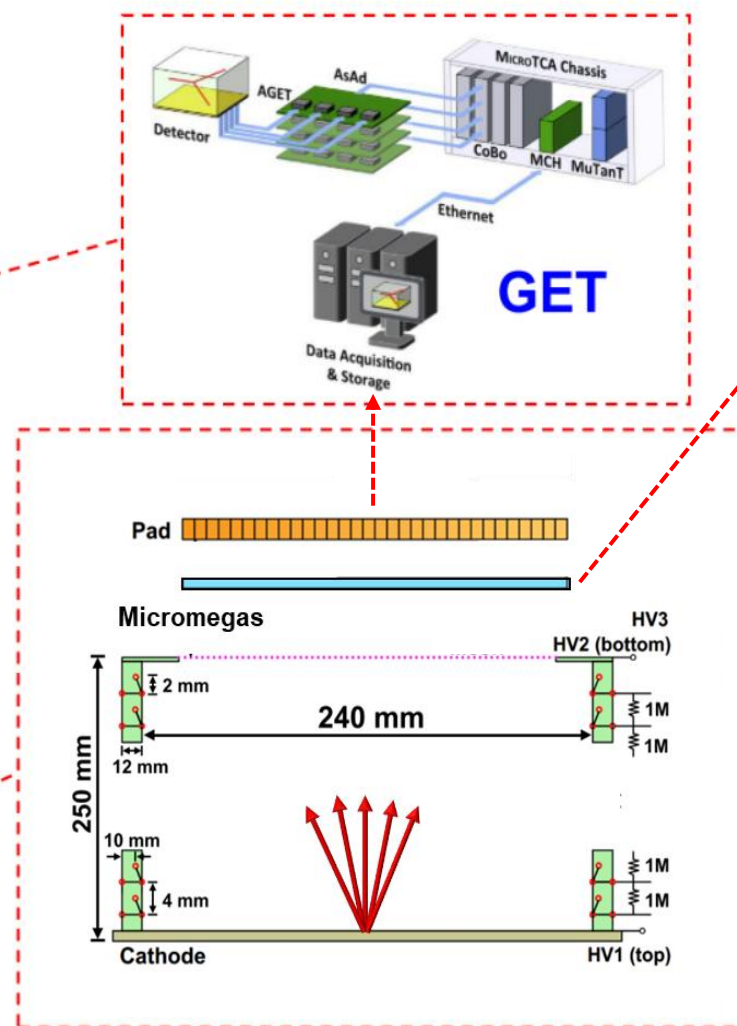
- 95%Ar+5%CO₂ 300mbar
- 漂移速度0.72cm/us by garfield++
- Cathode -1500V 阳极反馈-657.9V
- mesh -540V

- 流气、温度监控、气压监控
- 684块5*6mm² pad读出
- 3组分α放射源
- 63h长时间本底测试

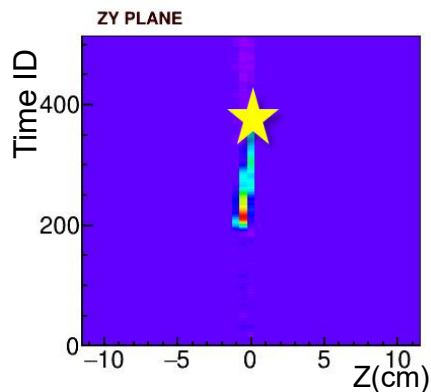
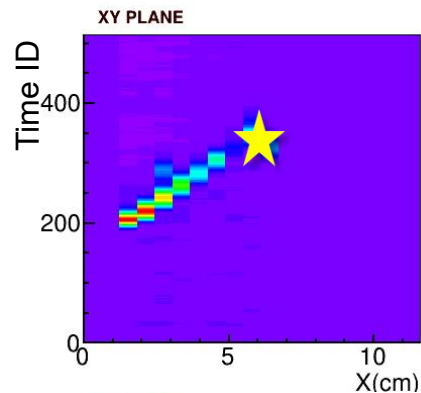
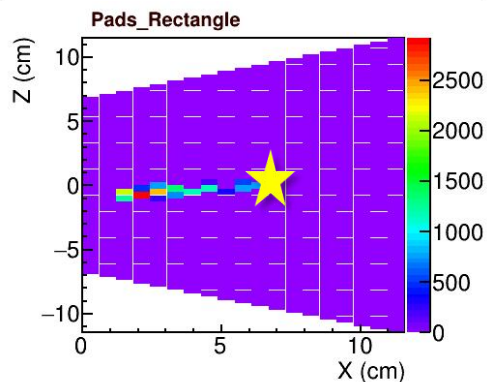
Bragg型TPC探测器



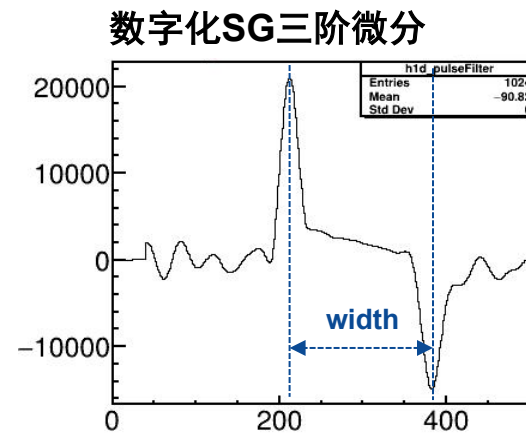
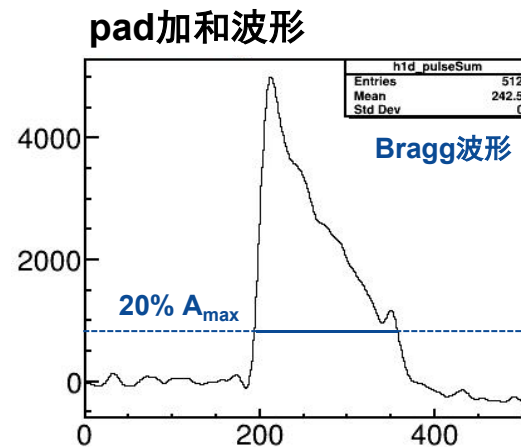
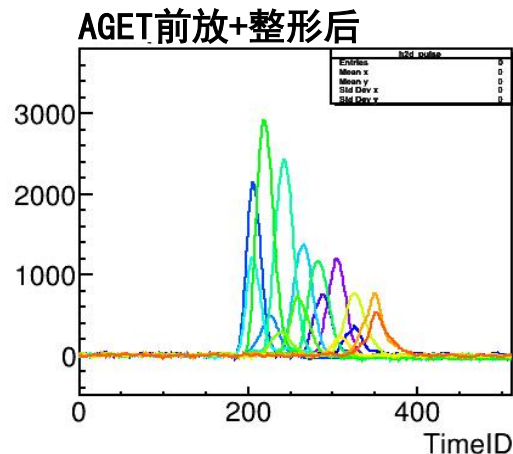
Z.C.Zhang, thesis[D],(2021)



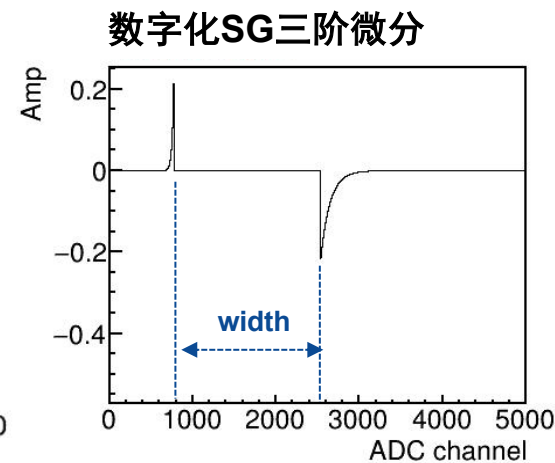
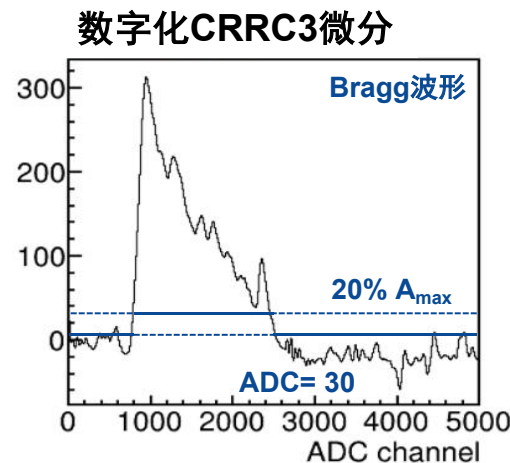
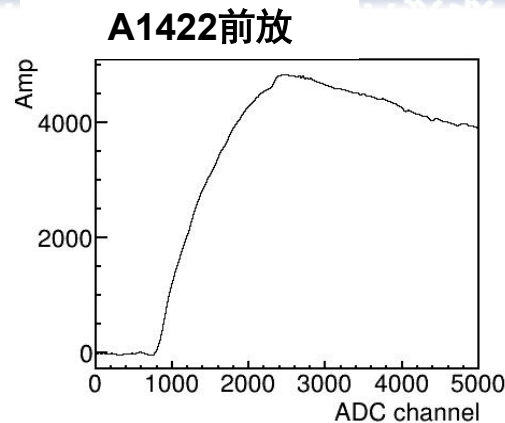
Pad、Mesh双读出结构互相验证



Pad信号 —— GET获

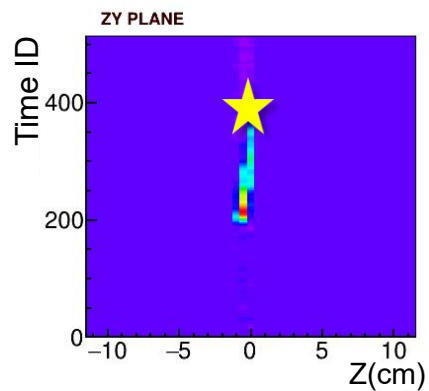
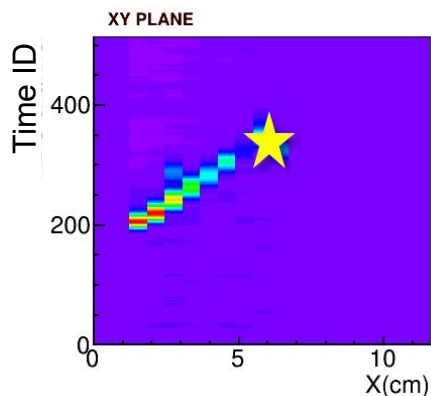
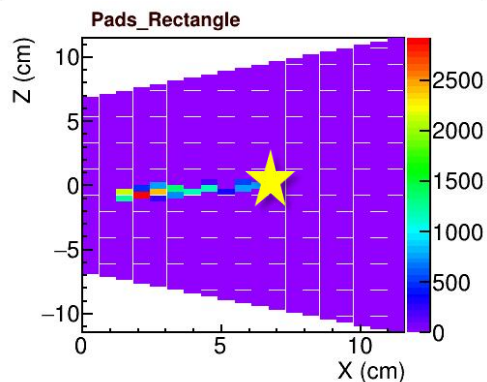


Mesh信号 —— XIA获取

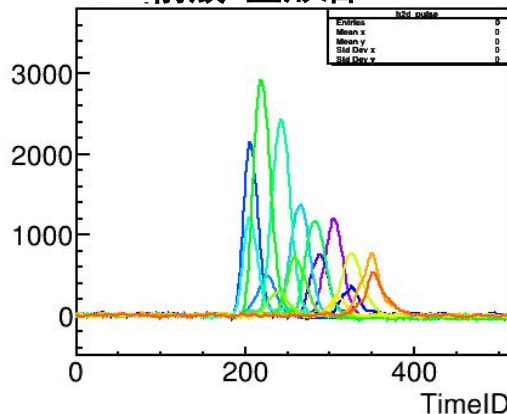


Pad二维径迹 + 波形宽度 构成三维射程长度信息

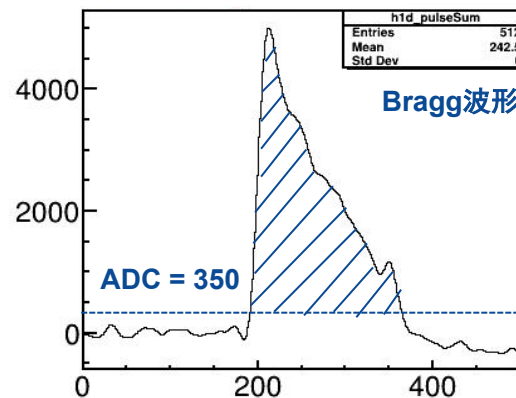
Pad信号 —— GET获取



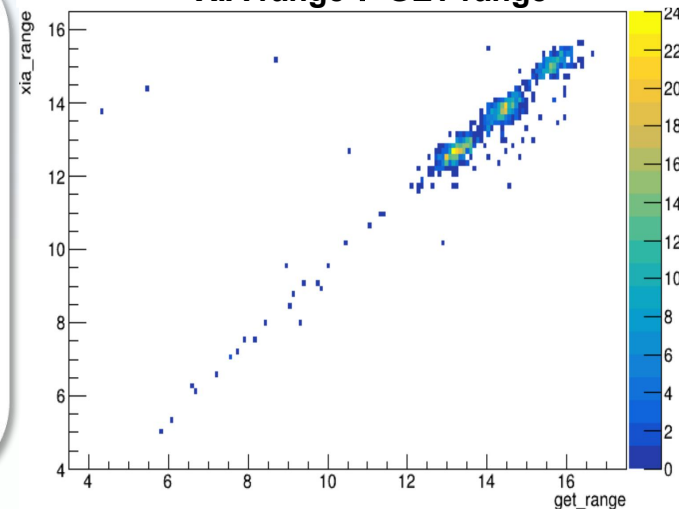
AGET前放+整形后



pad加和波形

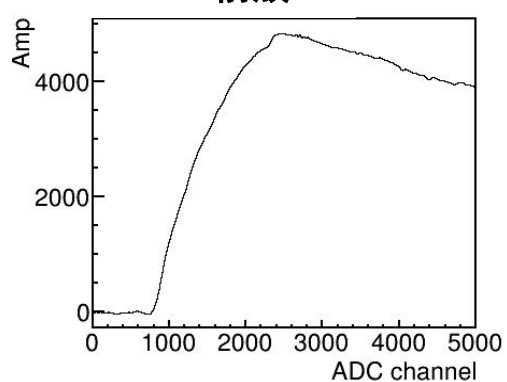


XIA range : GET range

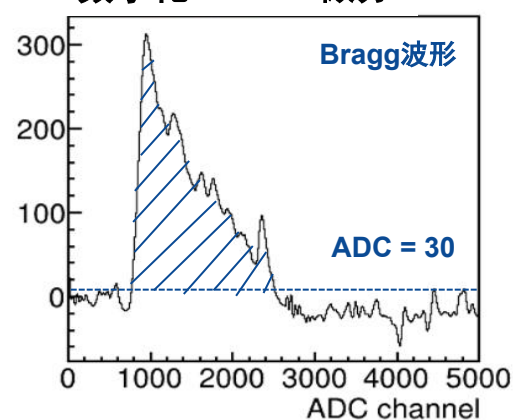


Mesh信号 —— XIA获取

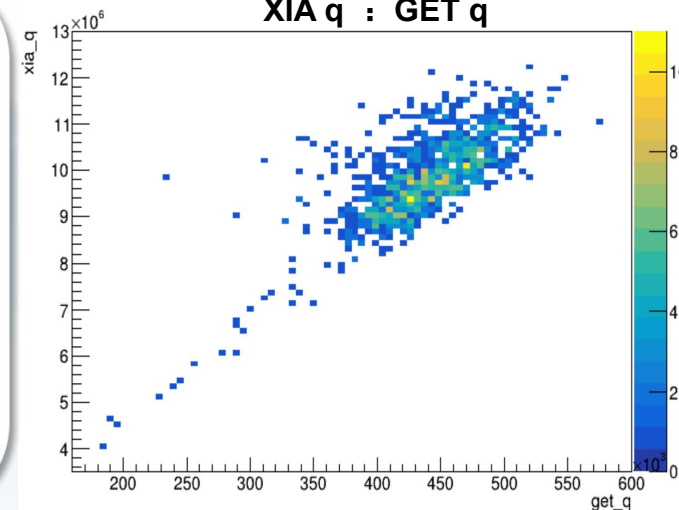
A1422前放



数字化CRRC3微分

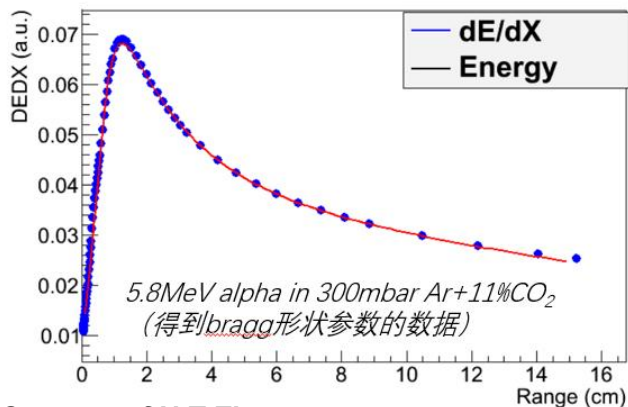
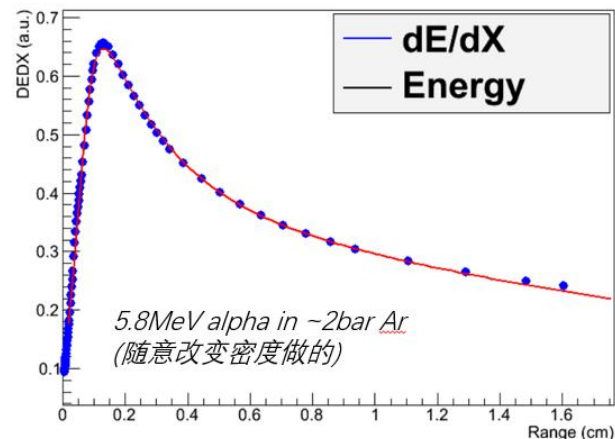


XIA q : GET q



Bragg波形的过阈积分 构成粒子能量信息

Bragg波形拟合



Courtesy of N.T.Zhang

SRIM模拟数据的训练 (stopping power calc)

✓ $X = (r - [1]) / [2]$

- ✓ [1] 定义实际中射程的offset (起点未必是0)
- ✓ [2] 定义入射角度不同带来的效应

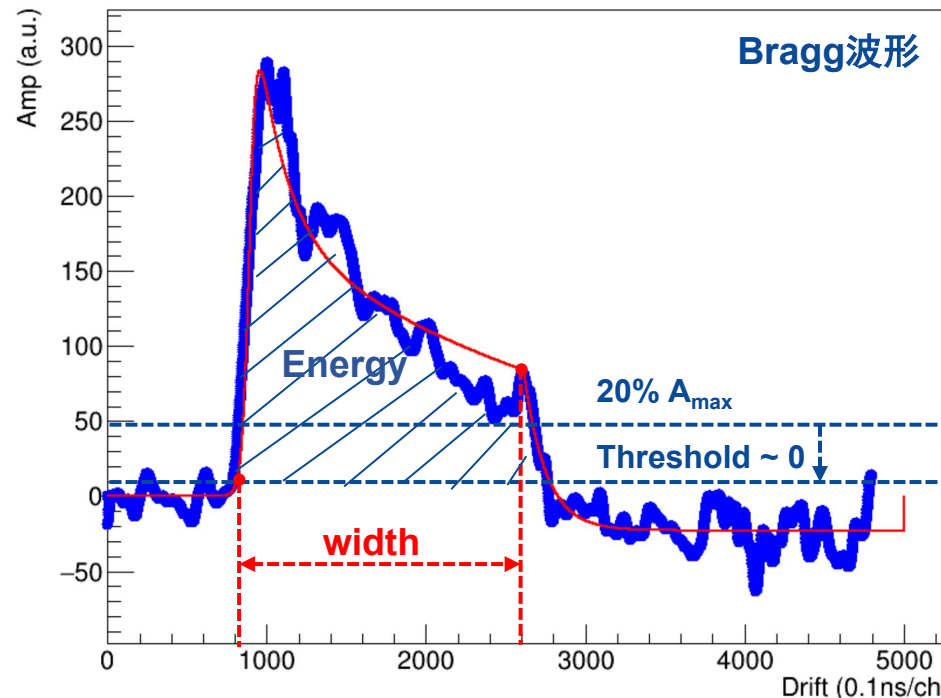
✓ $DEDX = [0] \frac{Ae^{Bx} + Ce^{Dx}}{500 + Ee^{Fx}}$

- ✓ [0] 定义DEDX不同单位引起的高度不同
- ✓ 其中ABCDEF参数是事先在300 mbar Ar+11%中拟合出来的, 然后就固定下来

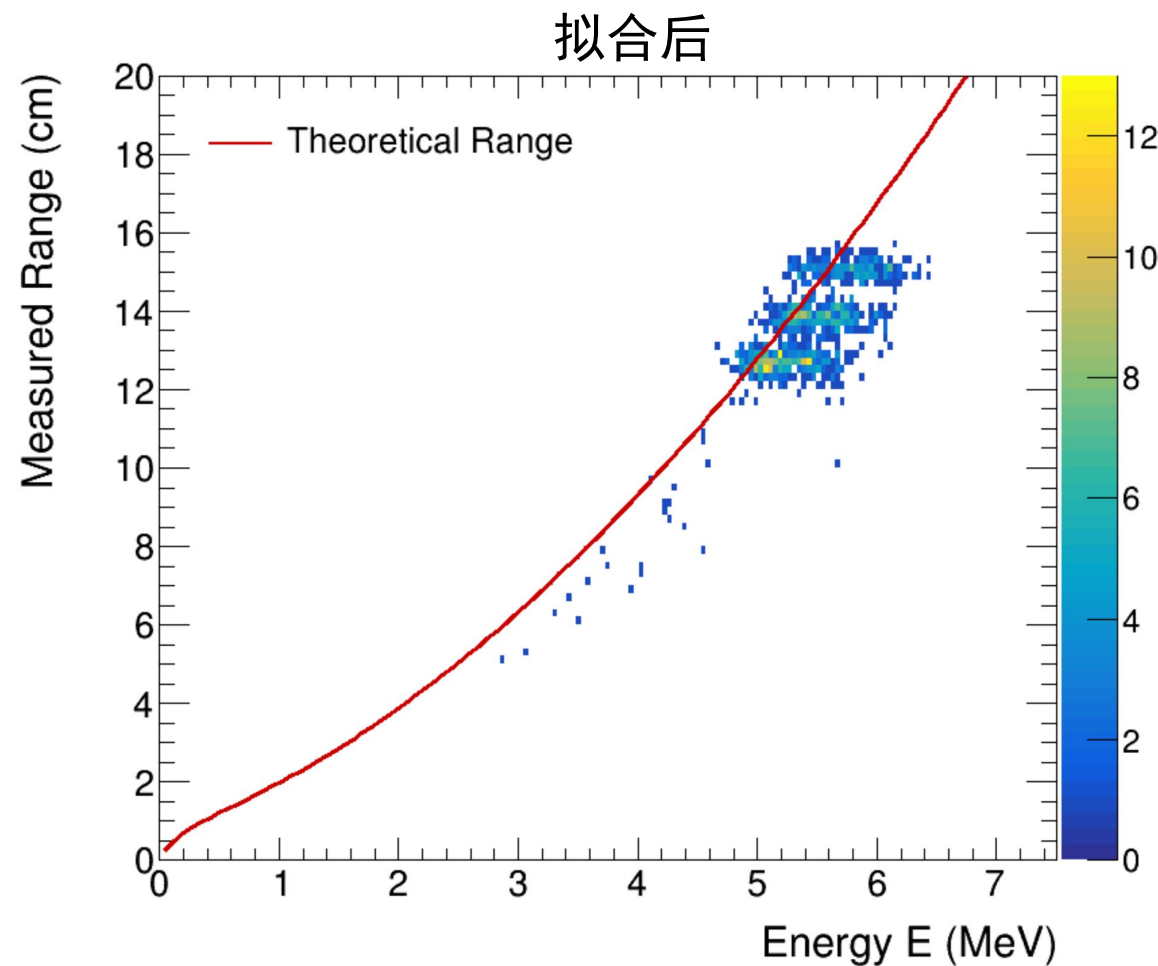
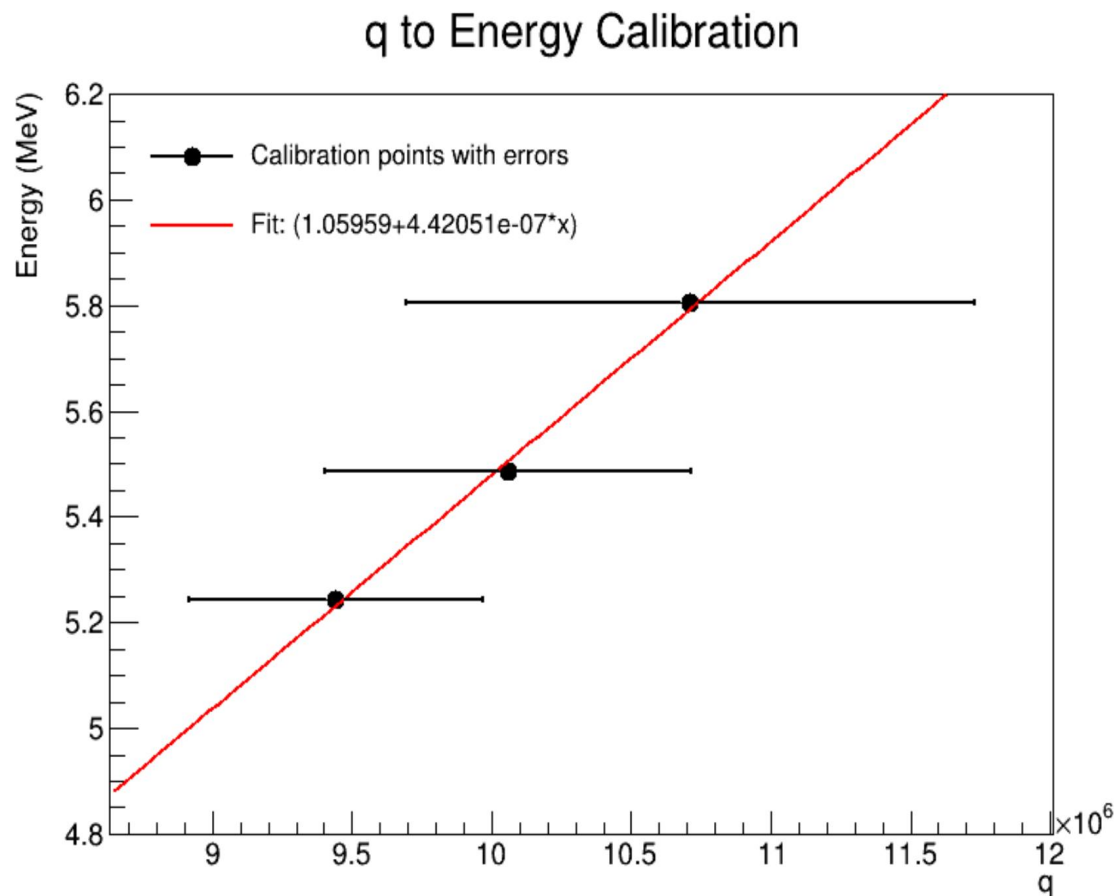
下降沿由指数项拟合:

✓ $[0] + [1] * \exp(-x / [2])$

Mesh采集 微分信号



由SRIM模拟数据曲线和指数项对Bragg波形进行了简单的形状拟合, 压低了阈值, 减小了滤波成型影响

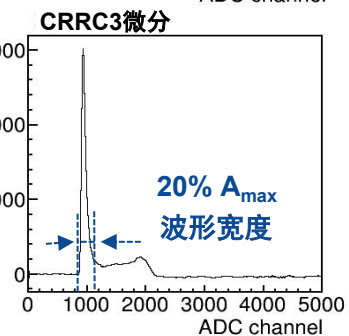
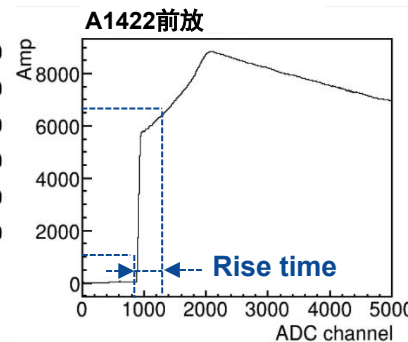
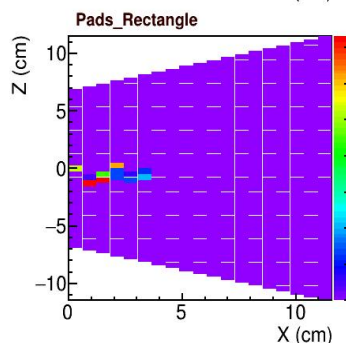
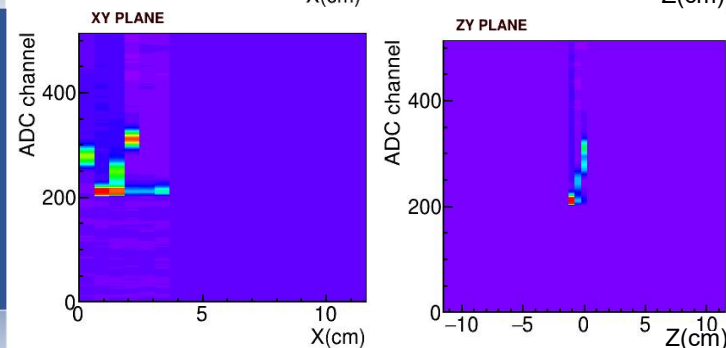
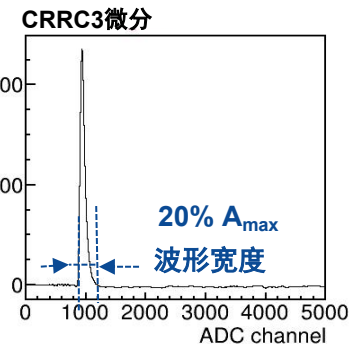
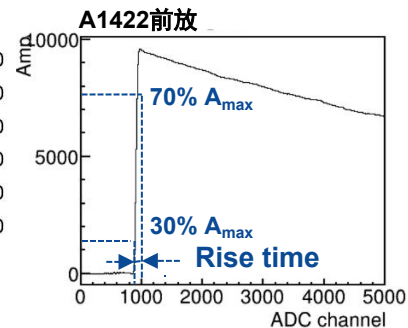
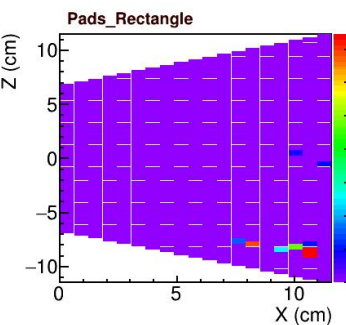
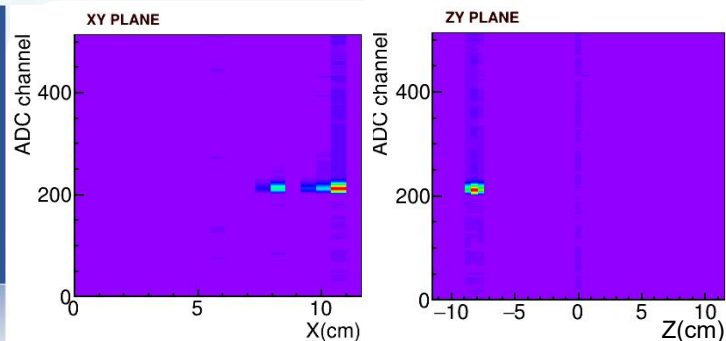


对Bragg波形进行了简单的形状拟合，压低了阈值、减小了滤波成型影响，刻度后和理论线符合的很好

本底抑制 | 放电信号去除

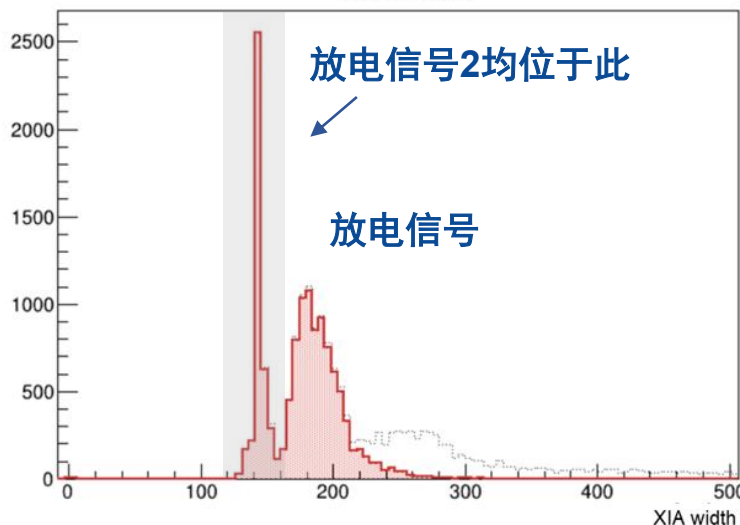
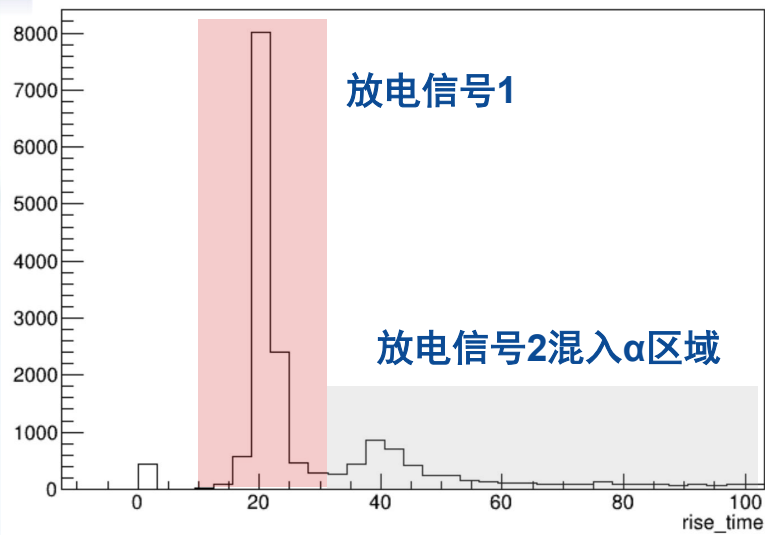
放电信号1

放电信号2



Rise time

波形宽度



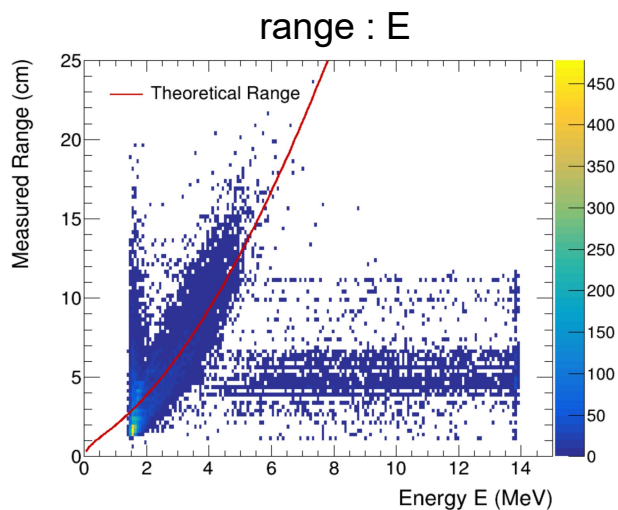
在波形宽度谱中，放电信号2
与 α 区域区分开

➤ 选择cut:

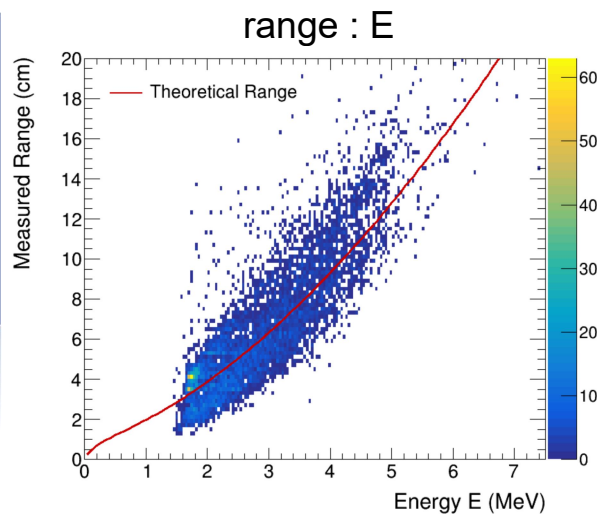
Rise_time>30 && 波形宽度>160

本底抑制

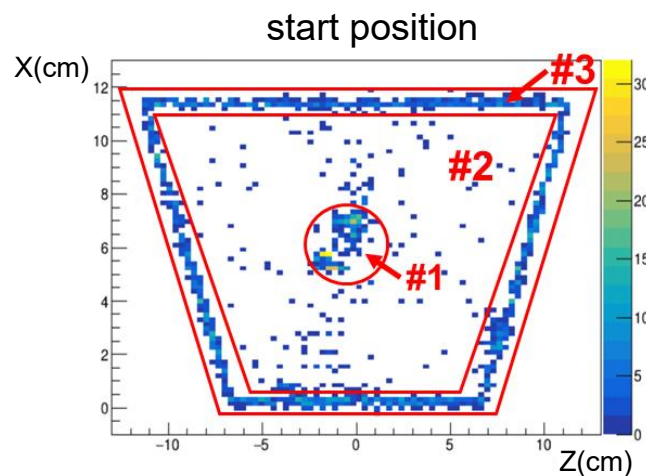
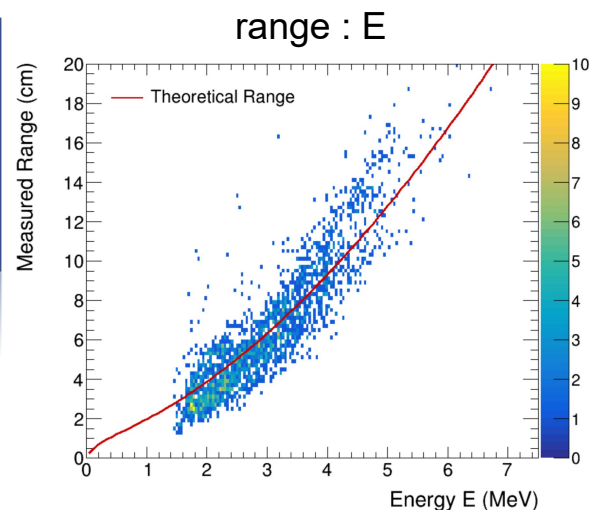
原始图



放电信号去除

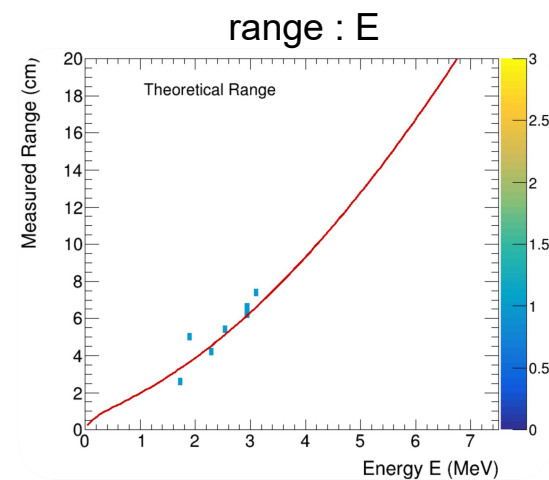


阻停在內



- 区域#1: $0.506/(h \cdot \text{cm}^2)$
存在放射源污染
- 区域#2: $0.024/(h \cdot \text{cm}^2)$
- 区域#3: 场笼方向本底

放射源位置



经63.35h本底测量，在阈值为1.4MeV情况下将靶点位置 α 本底抑制为原来的0.08%以下，最低本底区域 $0.024/(h \cdot \text{cm}^2)$

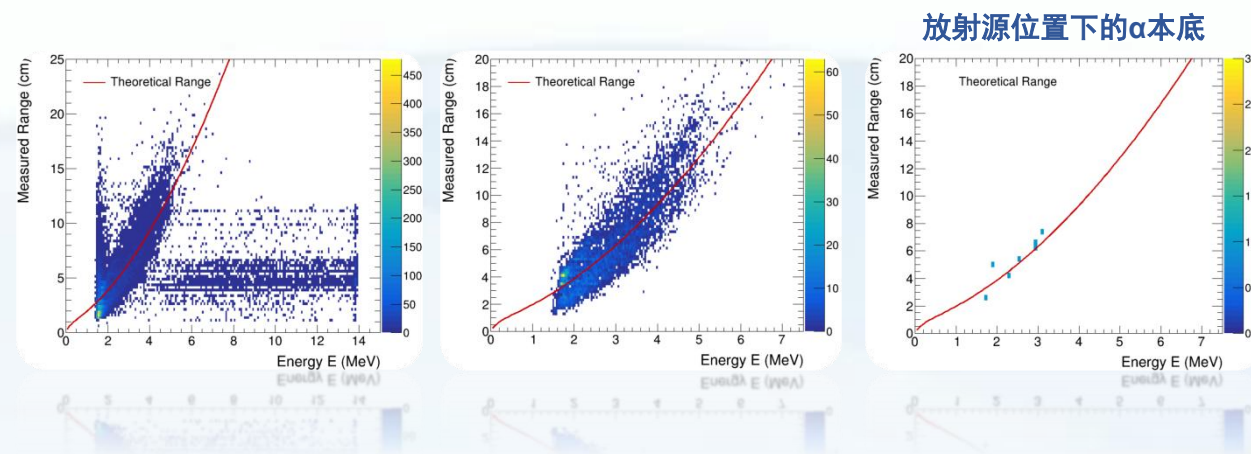
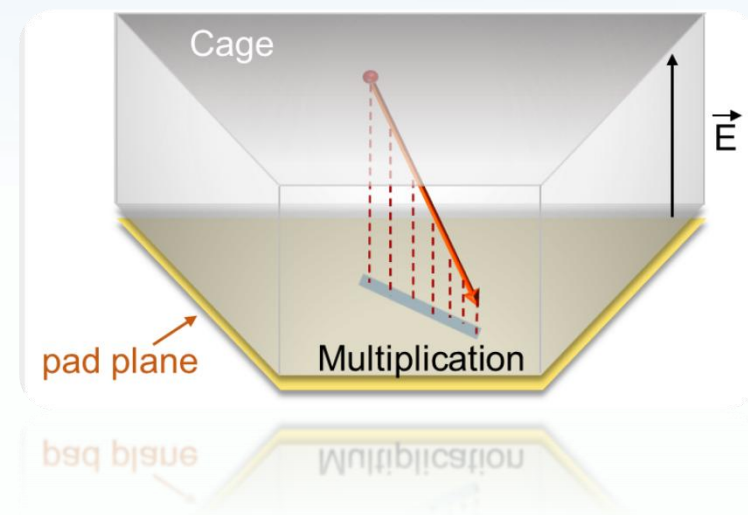
基于现有电子学和探测器设置，测试了以漂移方向为入射方向的TPC：

- 实现了 α 能量刻度、波形处理、事件甄别，进行了初步的Bragg波形拟合，优化了径迹长度分辨。
- 进行了稳定的长时间本底测量，本底可以压制到 $0.024/(h \cdot \text{cm}^2)$
- 目前气压、电压下，能量阈值为1.4MeV

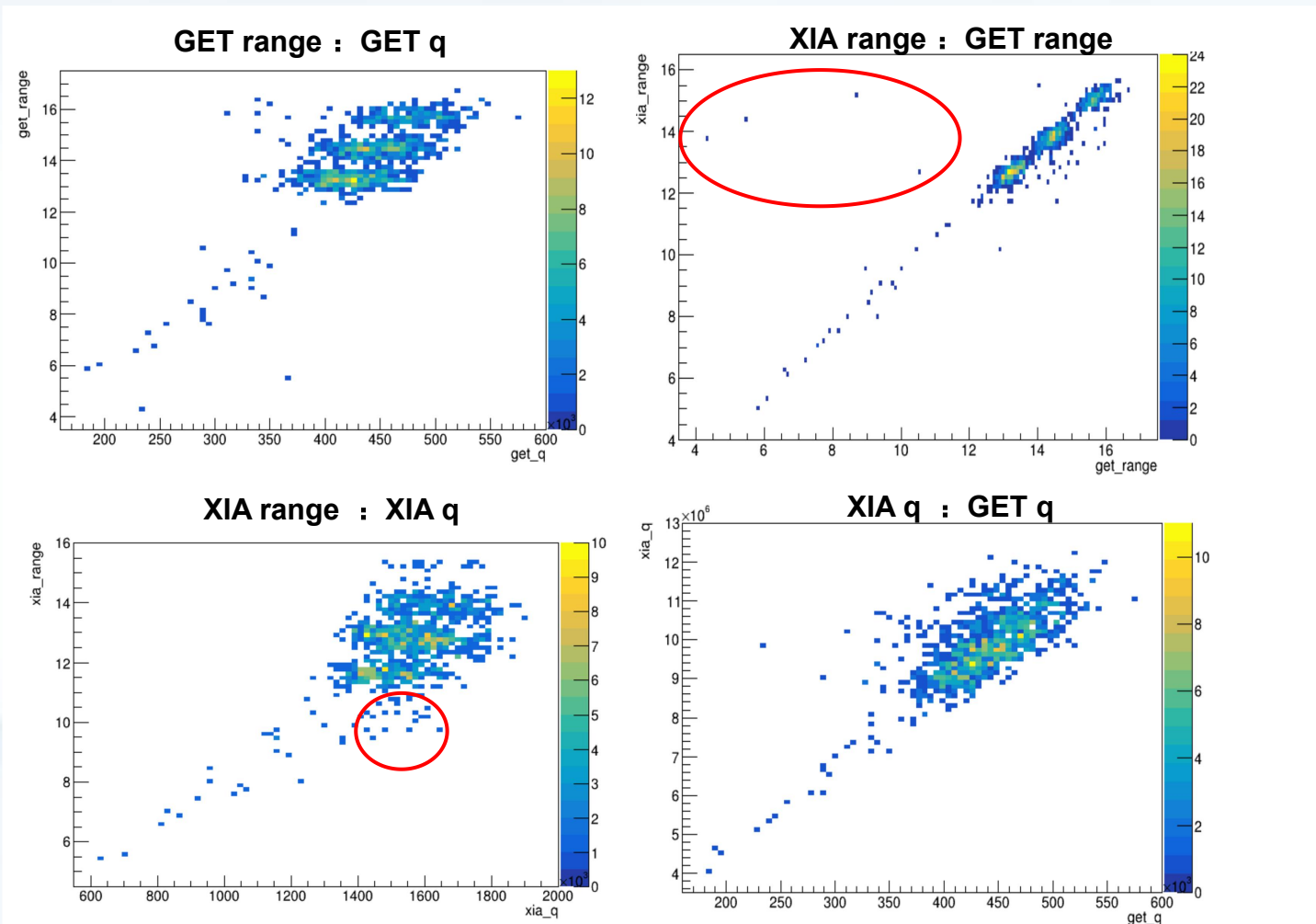
未来工作：

- 引入电子学卷积 → 提高 Bragg 曲线拟合精度
- 阳极XY读出
- 阴极丝网mylar入射窗 进一步压低本底
- 优化气压、场强、采样率，进一步降低阈值
- 引入 proton / deuteron 低能束线测试

目标：面向低本底核天体物理反应测量

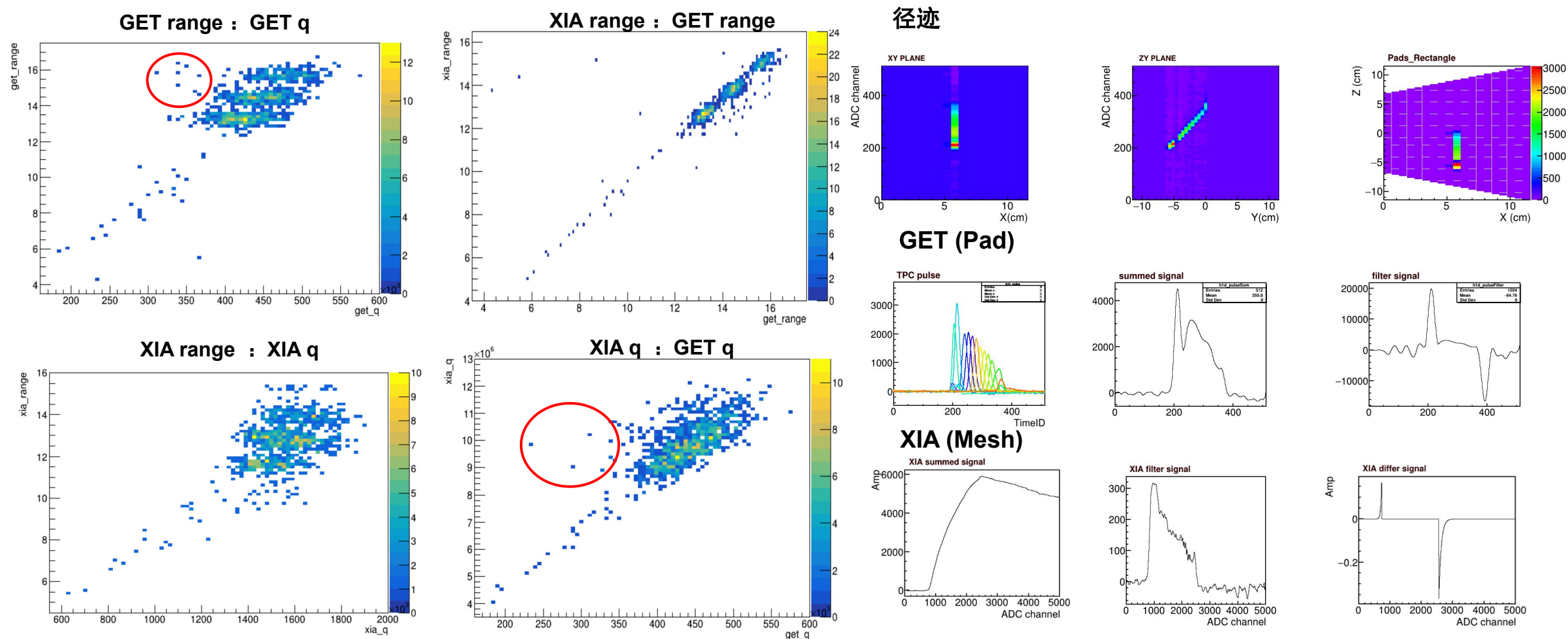


GET (Pad) 与 XIA (Mesh) 信号的处理结果对比 (无拟合)



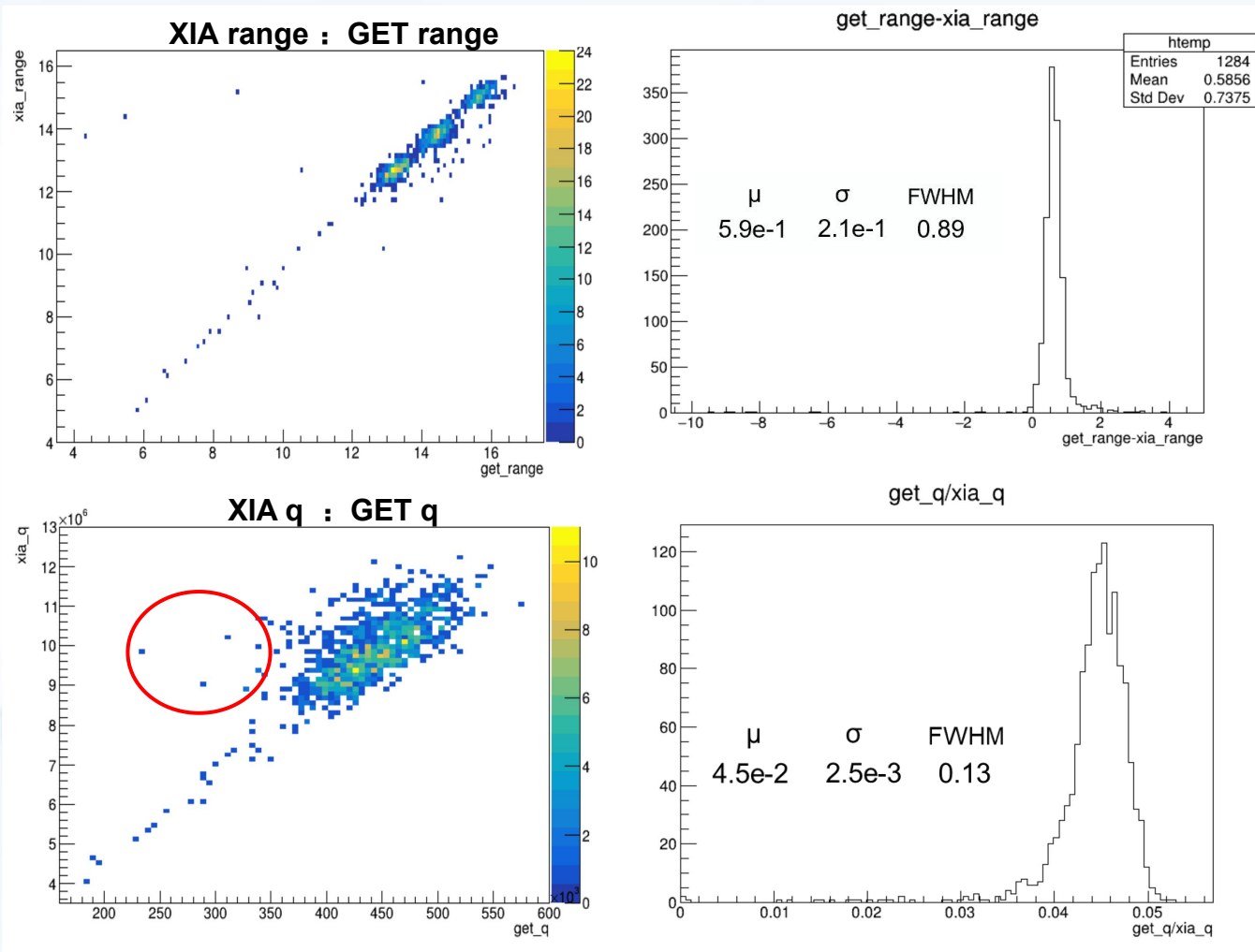
射程误判是因为XIA在无拟合时噪声引起的时间误判

GET (Pad) 与 XIA (Mesh) 信号的处理结果对比 (无拟合)



在径迹末尾，GET能量有时会丢失

GET (Pad) 与 XIA (Mesh) 信号的处理结果对比 (无拟合)

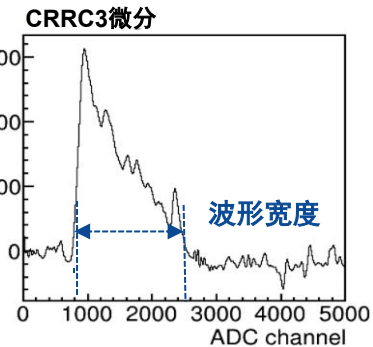
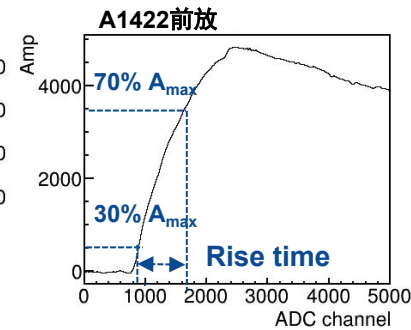
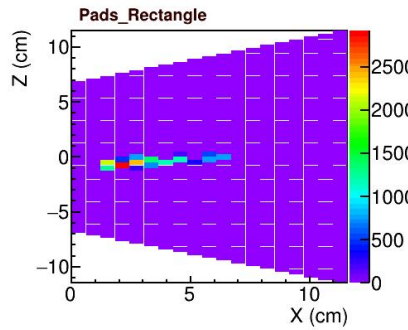
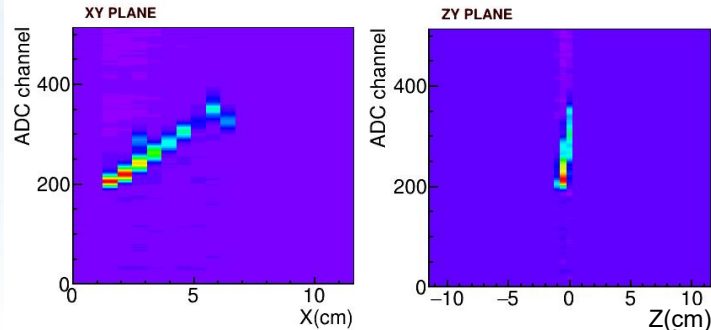


- GET射程>XIA射程并相差一个常数，来自于成型时间的影响，但整体分辨率较差，可能源自于成型时间本身并不是线性影响

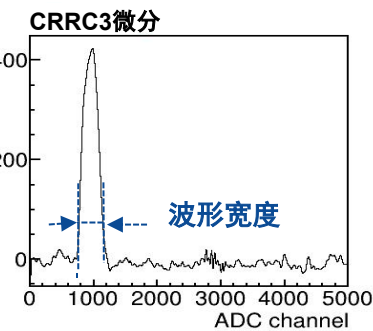
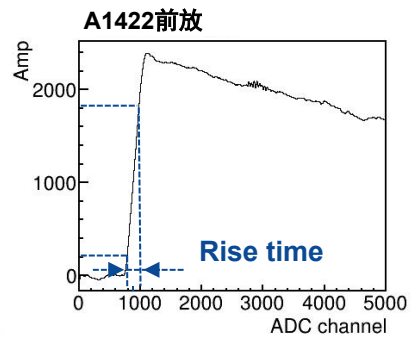
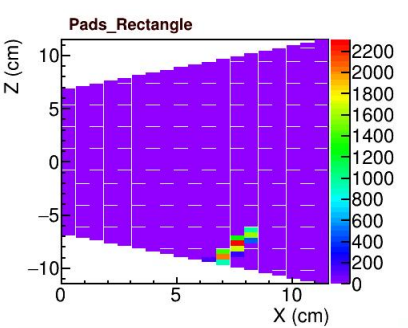
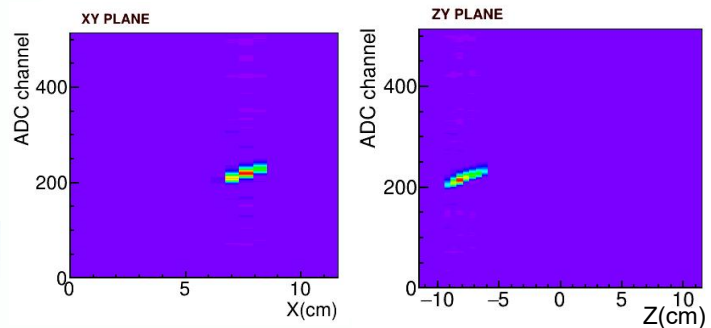
- XIA和GET存在能量scale，来自于成型时间的不同，整体分辨率不差

α 粒子径迹

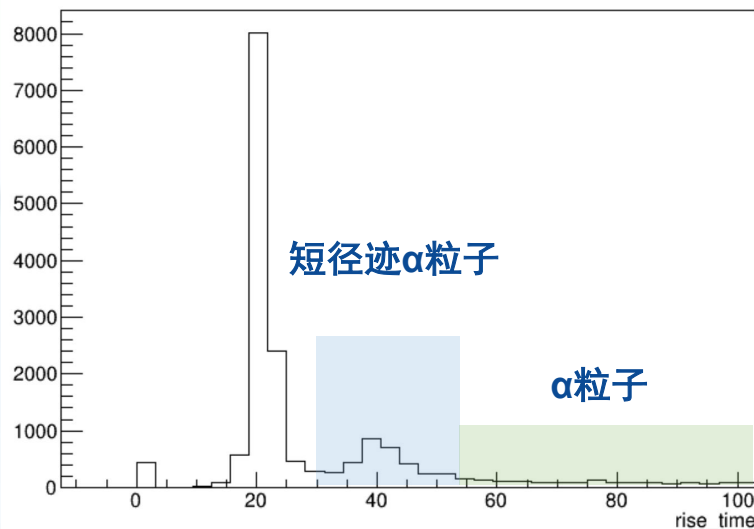
α 粒子



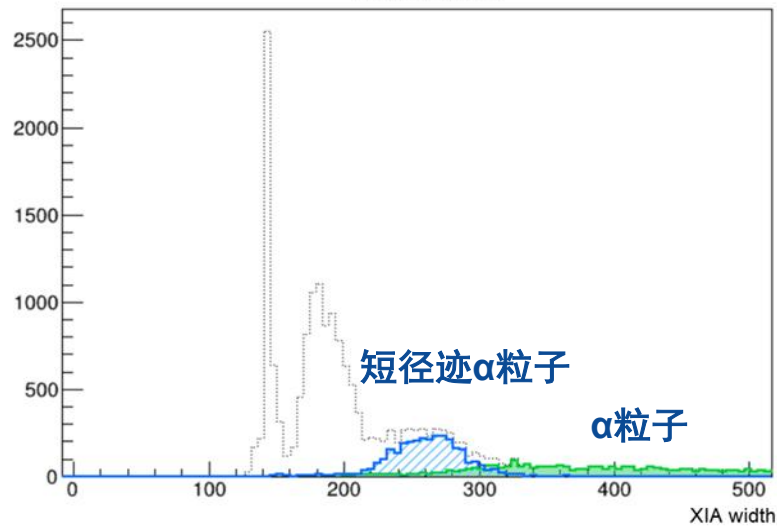
短径迹 α



Rise time



波形宽度

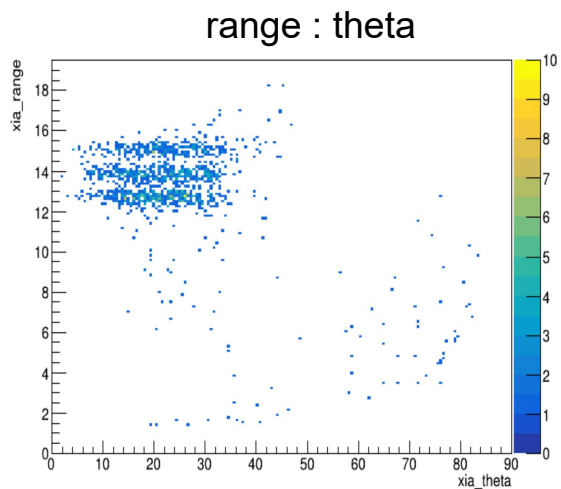
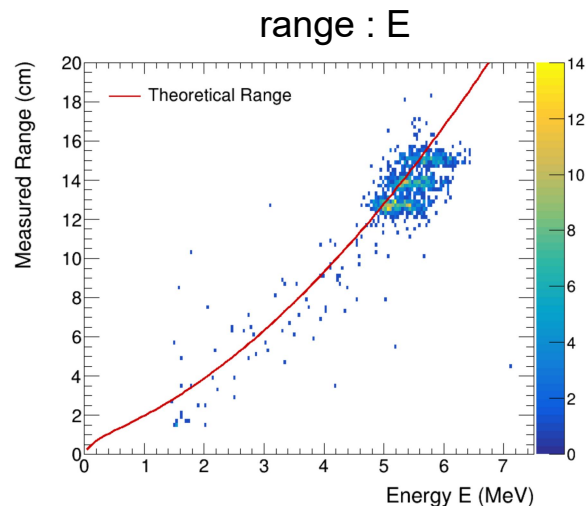


在上升时间谱中，可以更好将
 α 粒子和放电信号区分开

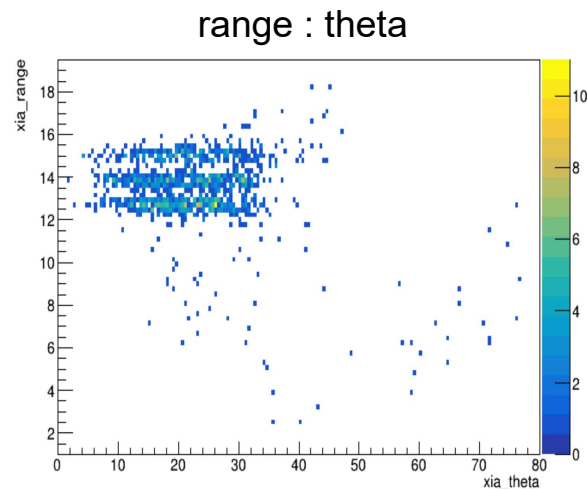
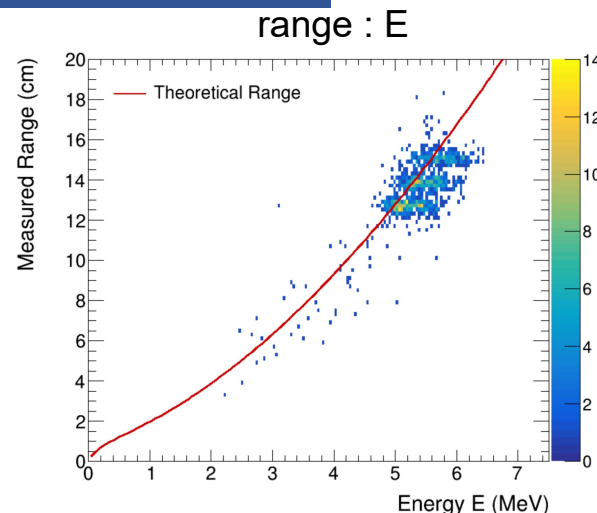
处理结果 | 放射源Alpha



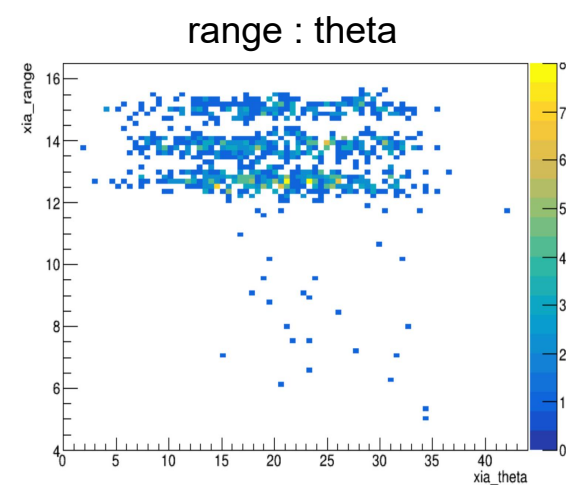
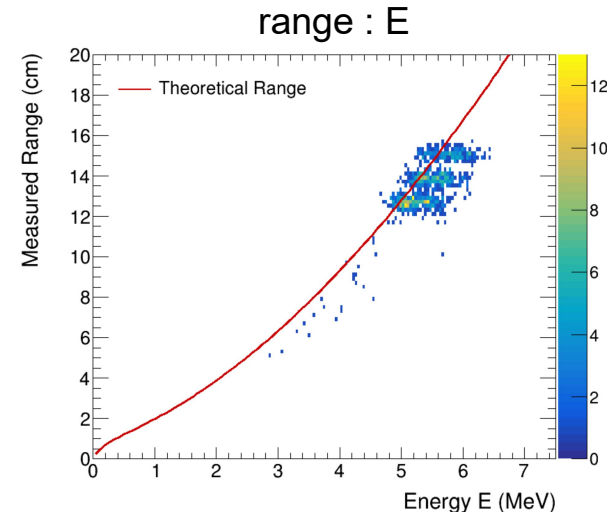
原始图



放电信号去除

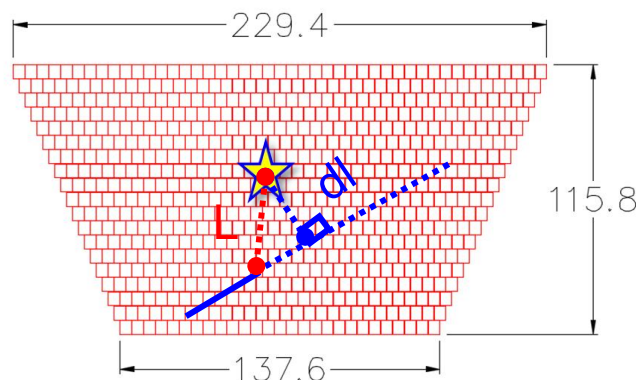
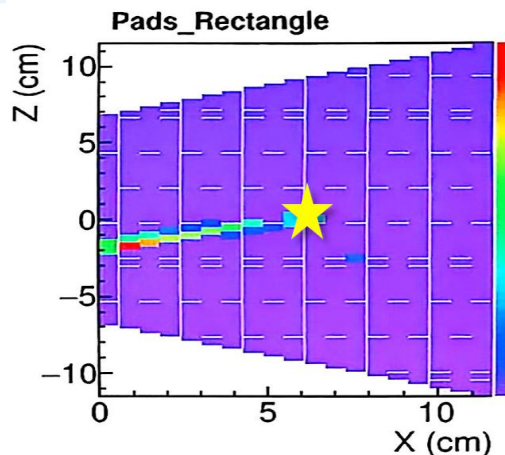


过放射源位置+阻停在内

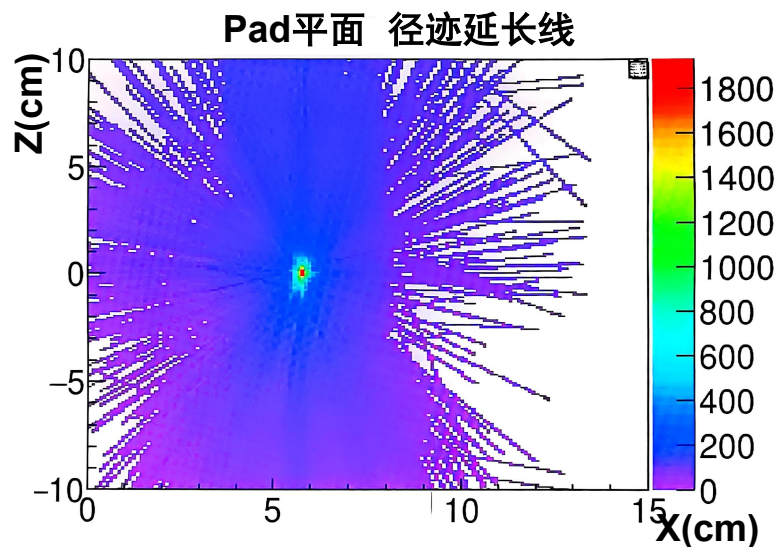


通过波形处理和本底抑制，得到了干净、射程分辨明显改善的谱图

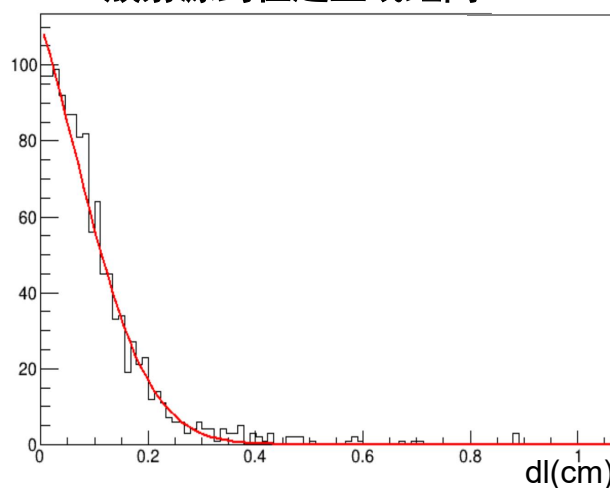
放射源位置重构和判别依据



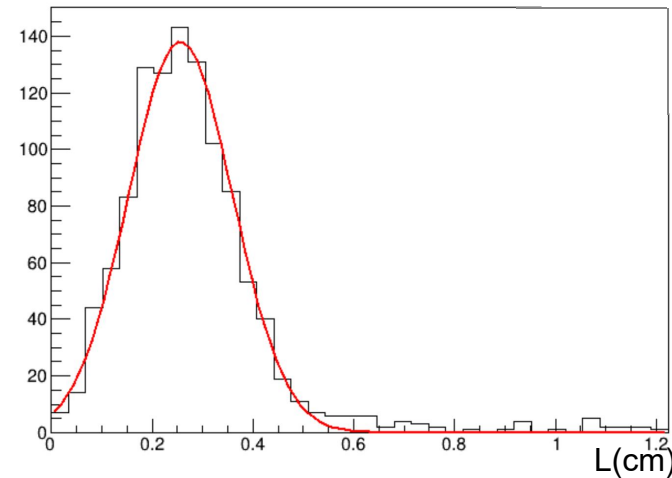
- ✓ Pad共19排
- ✓ 总pad数: 684个 (140pin接头, 6个)
- ✓ Pad间隙: 0.1mm
- ✓ 单pad: $5 \times 6 \text{ mm}^2$



放射源到径迹直线距离 dl



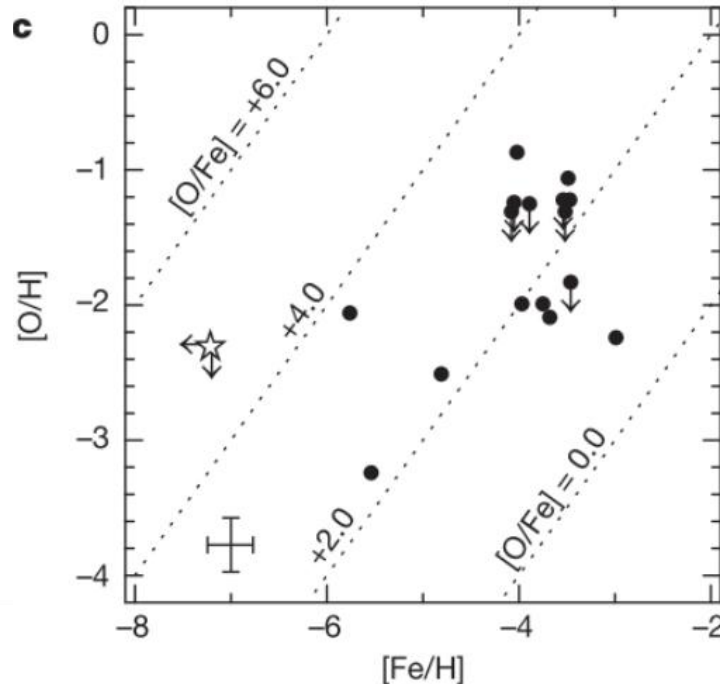
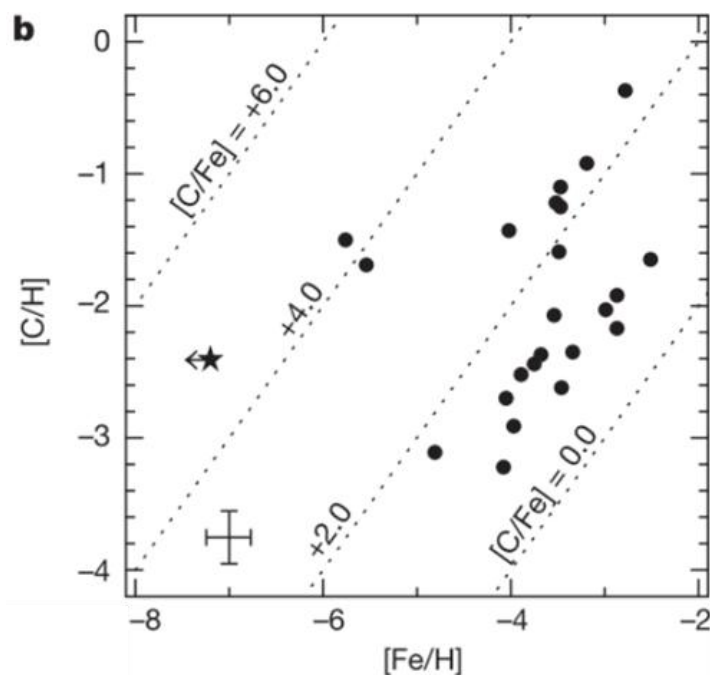
放射源位置到径迹起始点距离 L



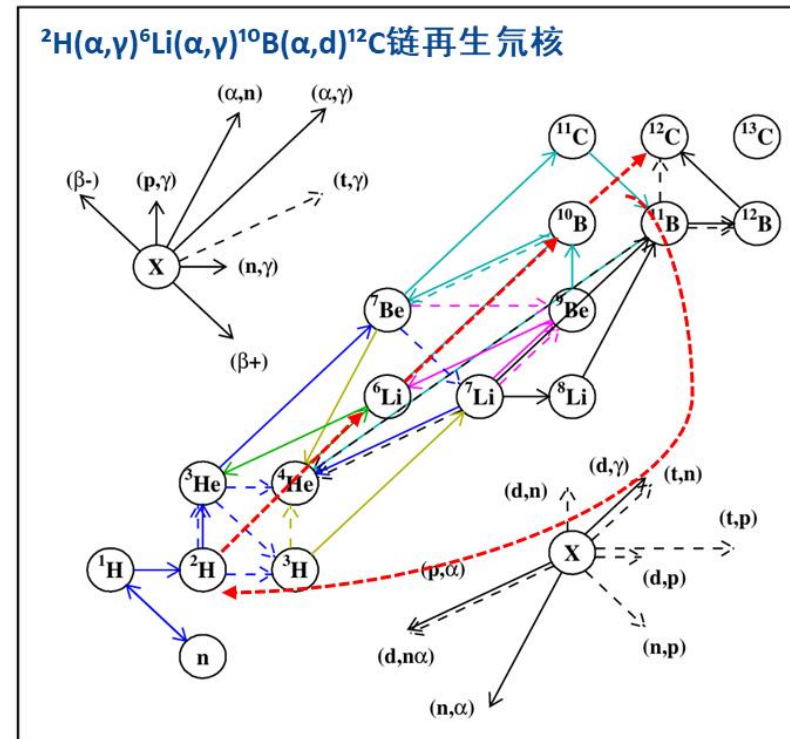
通过始末点延长径迹，重构放射源位置，做放 射源到径迹直线距离 dl 和 起始点到靶点距离 L

➤ 选择cut : $dl < 0.334 \text{ cm}$ && $L < 0.567 \text{ cm}$

C、O丰度超丰： $[\text{O/B}]^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$ 是原始恒星中 CNO 种子核再生的关键路径。



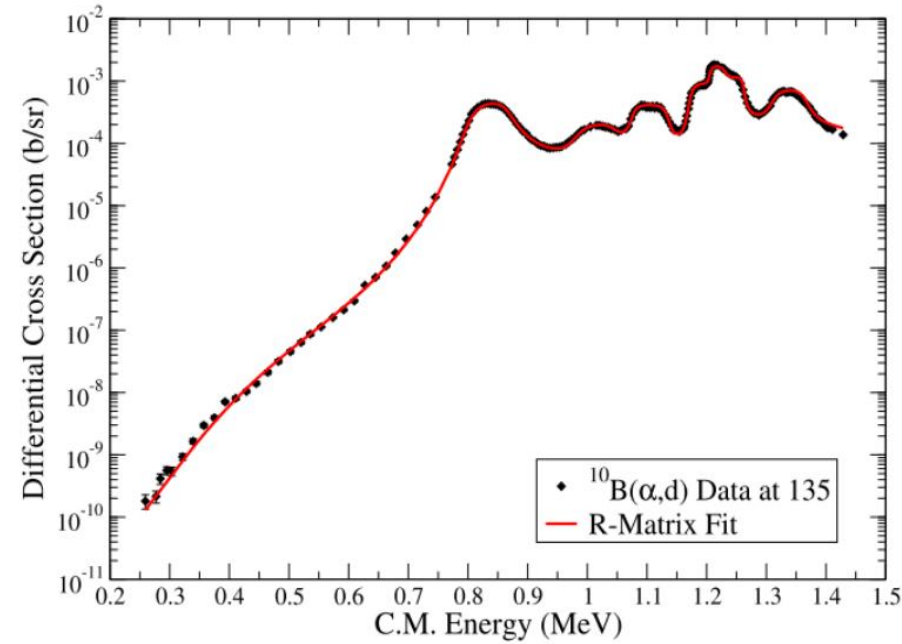
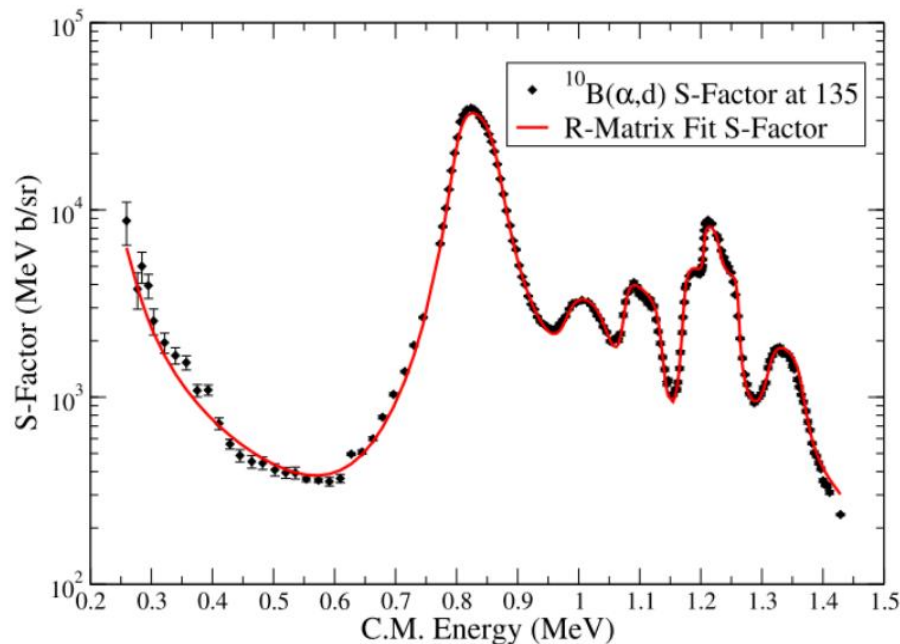
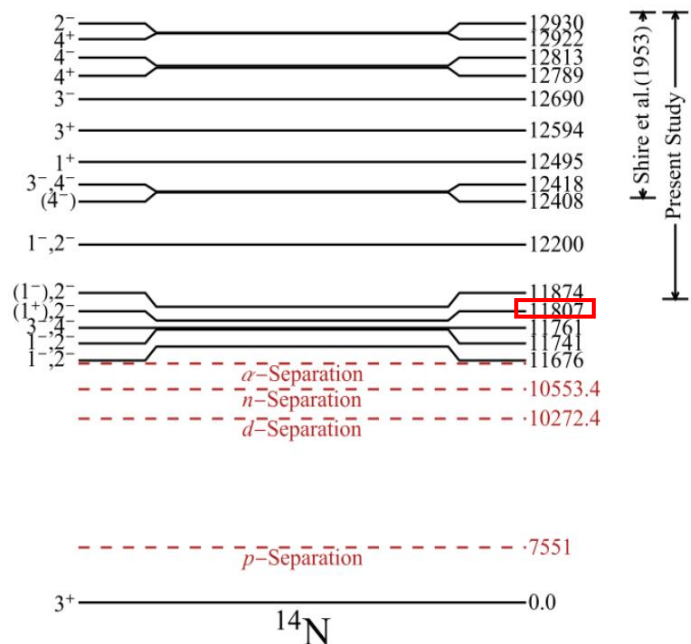
Keller, S. C.(2014). *Nature*, 506(7489), 463–466.



Cyril Pitrou, arXiv:1801.08023v3

- SMSS 031326708 作为已知Fe丰度最低的恒星， $[\text{Fe}/\text{H}]$ 上限为-7.1，钙($[\text{Ca}/\text{H}]=-7.0$)、镁($[\text{Mg}/\text{H}]=-3.8$)和碳($[\text{C}/\text{H}]=-2.6$)相对铁显著增强
- $^2\text{H}(\alpha, \gamma)^6\text{Li}(\alpha, \gamma)^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$ 反应链可以在更低温度下越过不稳定核区($A=5-8$)产生 ^{12}C ，同时生成的d又将补充 ^{10}B 丰度。

C、O丰度超丰： $^{10}\text{B}(\alpha, d)^{12}\text{C}$ 是原始恒星中 CNO 种子核再生的关键路径。



Gula, A., deBoer, R (2023).PRC, 107(2)

- 发现近阈共振结构 ($E_x = 11.807$ MeV), α 团簇结构使得部分能级自旋宇称 与旧文献存在差异
- 反应率在 0.1 GK 下较理论预测提高约 1 个量级, 但不确定性仍高达 ~30% (近阈共振强度及能级结构未知)。

反应Q值: 1.3 MeV 极低的反应截面: 10^{-10} b/sr