

基于时间投影室的超低本底 α 探测系统

潘姜、封常青、张志永、刘树彬、王德毅

中国科学技术大学
核探测与核电子学国家重点实验室
2021年10月22日



目 录



研究背景



样机研制



实验结果



后续计划



目 录



研究背景



样机研制



实验结果



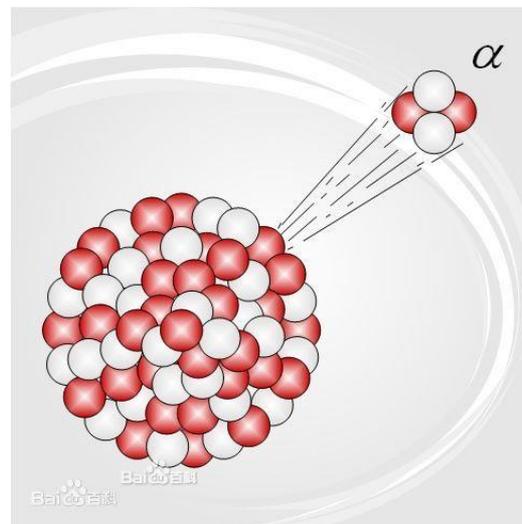
后续计划



环境中的 α 辐射

◆ α 粒子（或 α 辐射、 α 射线）

- ◆ 构成：2个质子+2个中子（氦核）
- ◆ 特点：能损大，射程短



◆ α 辐射源危害性

- ◆ 外照射：射程短，穿透性弱（可被薄纸阻挡），不构成威胁
- ◆ 内照射：能损大，若被人体吸入将持续辐射，引起病变
- ◆ 世界卫生组织2017年将其列入一类致癌物清单

对 α 辐射的测量至关重要！



低本底 α 测量应用



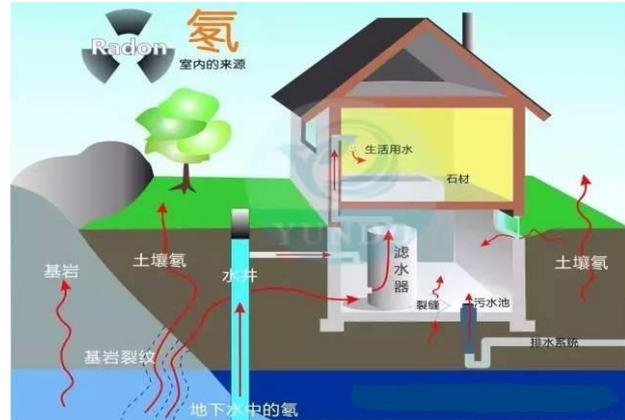
核泄漏事故



核废料处理



饮用水检测



氡气危害性

- 测量目标放射性低
- 需求探测下限高的探测仪器



现有主流技术手段

◆ 主流技术（以探测器类型划分）

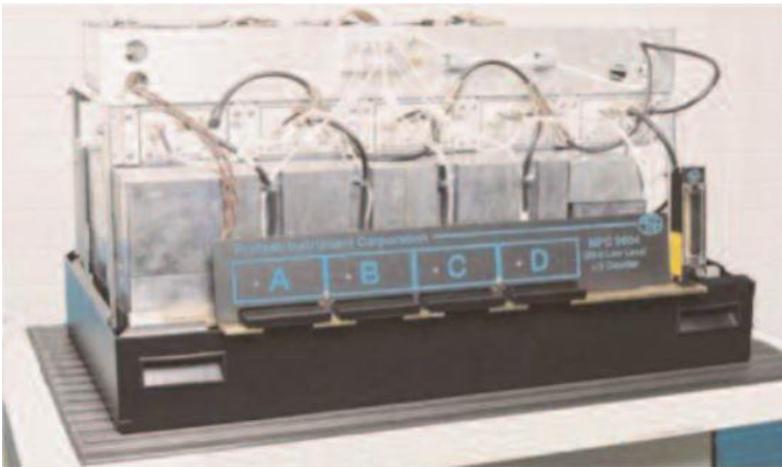
- ◆ 流气式正比计数器
- ◆ 闪烁体型探测器
- ◆ 半导体型探测器

Automatic Systems	Recommended Applications					Model Features				
	HP	SC	RC	CL	NP+	GL	LB	ULB	WL	GC
ASC-950-DP	✓				✓	✓				✓
IPC-650			✓	✓				✓	✓	
WPC-1050	✓	✓		✓	✓			✓		
WPC-1150-GFW	✓	✓		✓	✓		✓			

Application Key
HP = Health Physics; **SC** = Smear Counting; **RC** = Radiochemistry; **CL** = General Counting Labs; **NP+** = Nuclear Power, Fuel Cycle, Decommissioning and Disposal

LB(Low Background): $\beta < 2\text{cpm}$, $\alpha < 0.5\text{cpm}$

ULB(Ultra Low Background): $\alpha + \beta < 1\text{cpm}$



MPC-9604（流气式正比计数管）
 α 本底 $\leq 0.05\text{cpm}$



BH1216（闪烁体型探测器）
 α 本底 $\leq 3.5\text{cpm}$

低本底 α 测量挑战

型号	探测器种类	探测器直径	工作方式(α 、 β)	α 探测效率	β 探测效率	α 本底计数	β 本底计数	α 进入 β 道	β 进入 α 道
iMac	PIPS 半导体	50 mm	同时测量	$\geq 80\%$	$\geq 60\%$	≤ 0.5 cpm	≤ 3 cpm	-	-
BH1216 ^[5]	闪烁体	50 mm	同时测量	$\geq 80\%$	$\geq 60\%$	≤ 3.5 cpm	≤ 140 cpm	$\leq 3\%$	$\leq 0.5\%$
MPC9604	流气式正比计数管	60 mm	同时测量	$\geq 40\%$	$\geq 20\%$	≤ 0.05 cpm	≤ 0.45 cpm	-	-

◆ 主流技术的不足

◆ 测量参数单一，粒子鉴别、本底抑制能力弱

◆ 仪器材料中的粒子误计数

◆ 宇宙线、 β 、 γ 等干扰计数

◆ 笨重、成本高昂（进口仪器，老铅等）

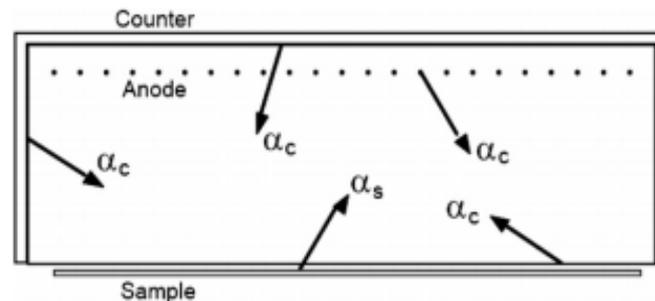
◆ 需求与挑战

◆ 高区分度的鉴别手段

◆ 超低本底

◆ 低成本

传统正比计数器 α 检测



易受内壁放出的 α 粒子干扰



时间投影室 (TPC)

◆ 时间投影室 (Time Projection Chamber, TPC)

◆ 可获取粒子多维信息的气体探测器

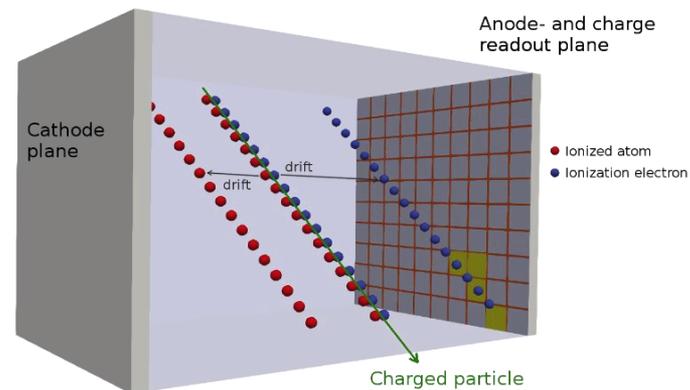
◆ 可收集信息:

◆ 粒子三维径迹

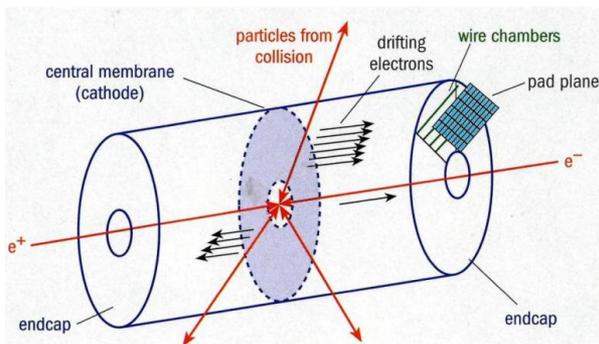
◆ 沉积能量

◆

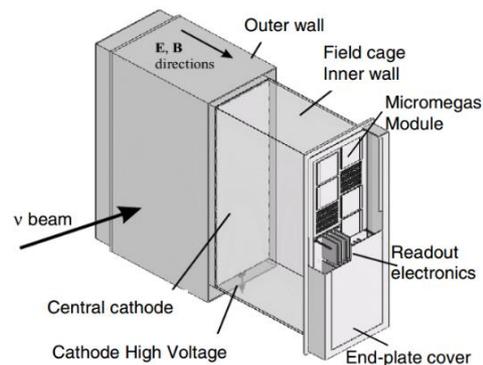
◆ 已在粒子物理领域获得广泛应用



TPC结构和原理



PEP4实验TPC



T2K实验TPC装置



热压接Micromegas

◆ 科大自主研发，原创热压接方法

◆ 无刻蚀溶剂污染

◆ 易制作，成本可控

◆ 已实现大面积、流程化制作工艺

◆ 性能

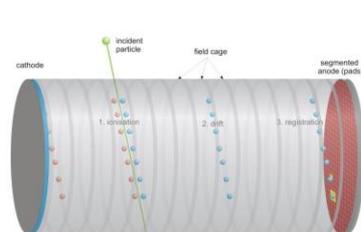
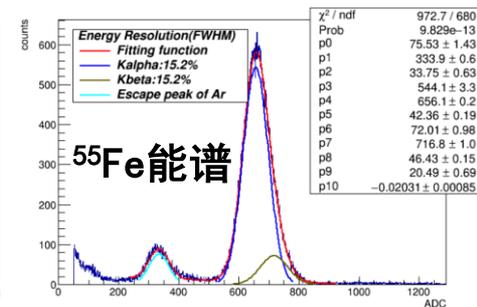
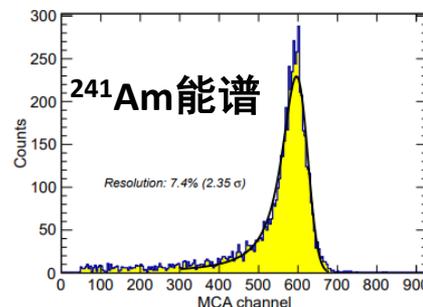
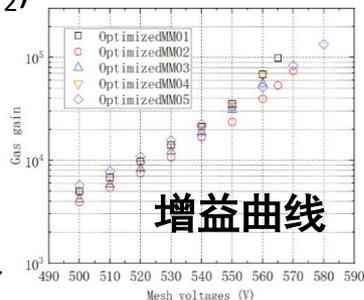
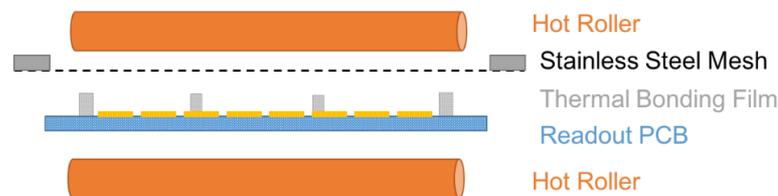
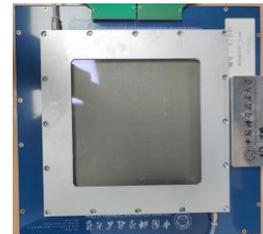
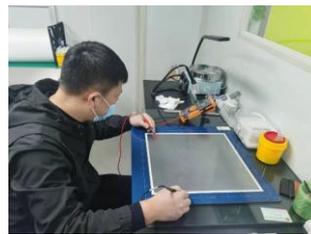
◆ 高增益： $\sim 10^5$ (Ar+CO₂)

◆ 高能量分辨

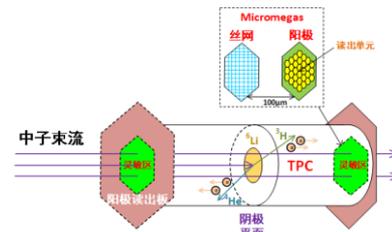
◆ 应用于多个科学实验

◆ CEPC、STCF、 μ 子成像.....

◆ PandaX-III、散裂中子源 (TPC)



PandaX-III实验TPC



散裂白光中子源MTPC

(详见张志永老师与文思成的报告)

目 录



研究背景



样机研制



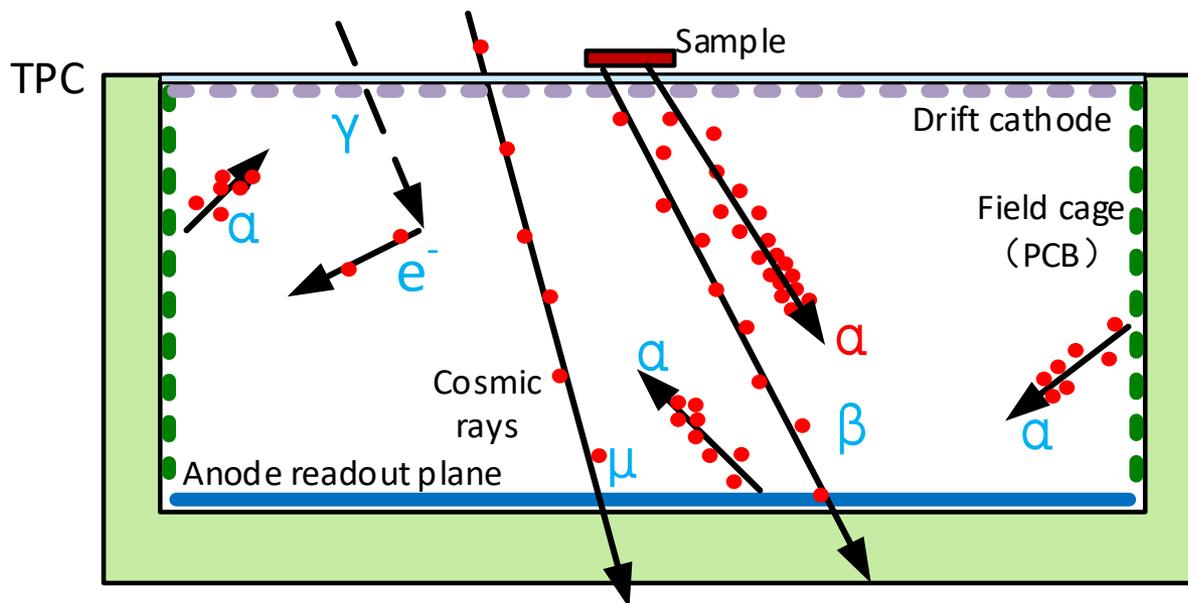
实验结果



后续计划



基于气体时间投影室的低本底 α 测量



◆ 技术思路：基于气体时间投影室（TPC）实现低本底 α 测量

- ◆ 核心探测器：科大核探测重点实验室自主知识产权的Micromegas

- ◆ 电子学：自主研发的多路波形数字化系统

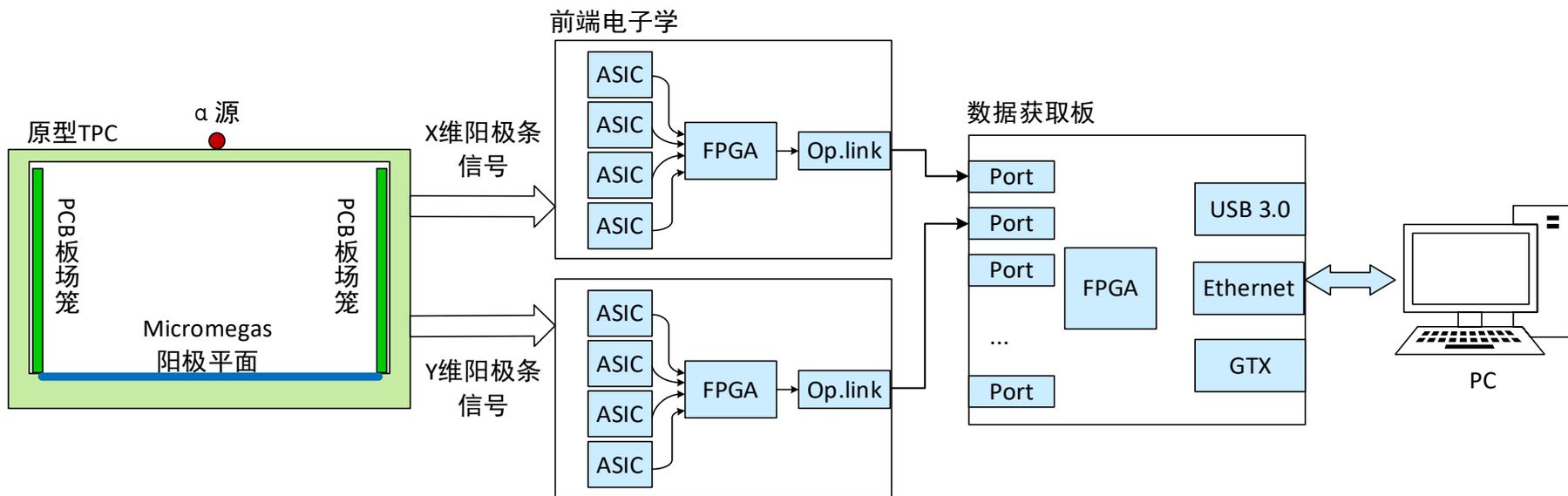
◆ 创新点：由单一物理参数的测量变成多维度信息的测量

- ◆ α 计数及能谱，粒子径迹，电离密度分布.....

- ◆ 多维信息鉴别感兴趣的射线和本底

◆ 优势：实现本底抑制、辐射计数、 α 能谱和污染分布成像，能量分辨高

TPC原型样机系统

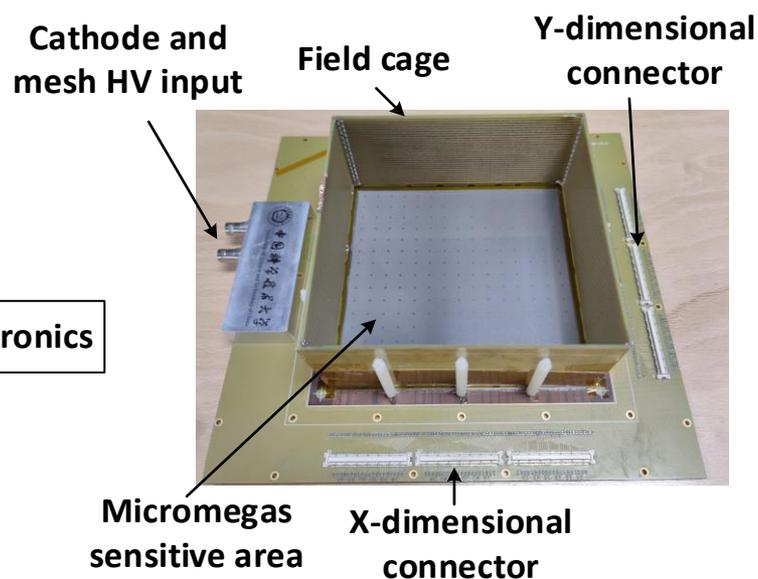
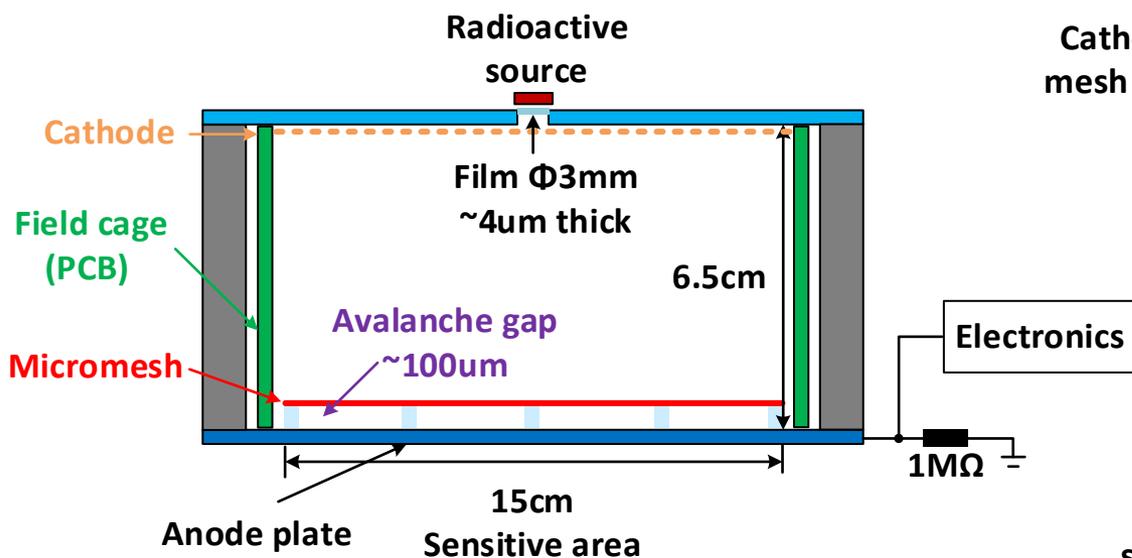


- ◆ 搭建基于Micromegas的原型TPC，探测 α 源
- ◆ 阳极条分为X，Y两维读出
- ◆ 使用多通道波形采样读出电子学



原型TPC设计

- ◆ 灵敏区：15cm × 15cm
- ◆ 高度：6.5cm
- ◆ 顶盖开直径3mm孔形聚乙烯膜窗，以允许α粒子透过
- ◆ TPC内壁四面使用PCB场笼来提供匀强电场



左：TPC设计概念图

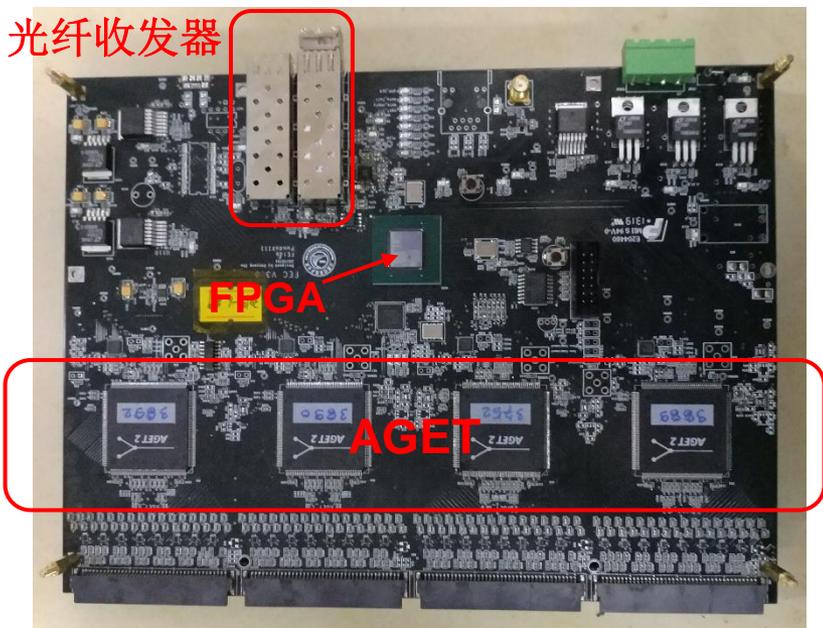
右：未加盖密封前实物图



读出电子学

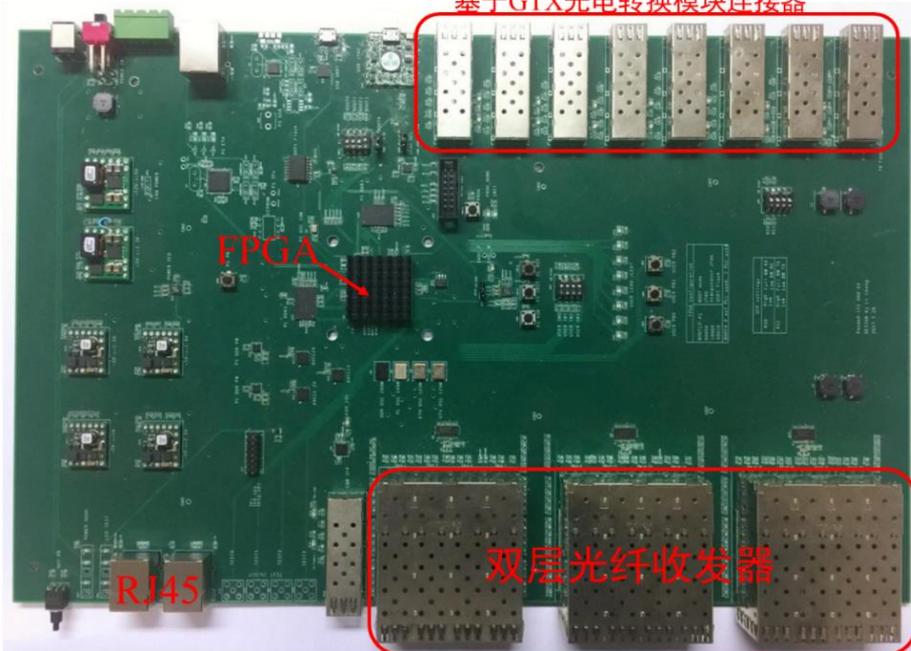
- ◆ 基于AGET芯片的通用多通道读出电子学
- ◆ 由前端电子学板FEC与数据获取板DCM组成
- ◆ 前后端通过光纤互连，后端通过以太网上传数据

光纤收发器



FEC V3

基于GTX光电转换模块连接器



DCM V3



通道复用方案

◆ 为节省电子学通道数，合并连接探测器的阳极条

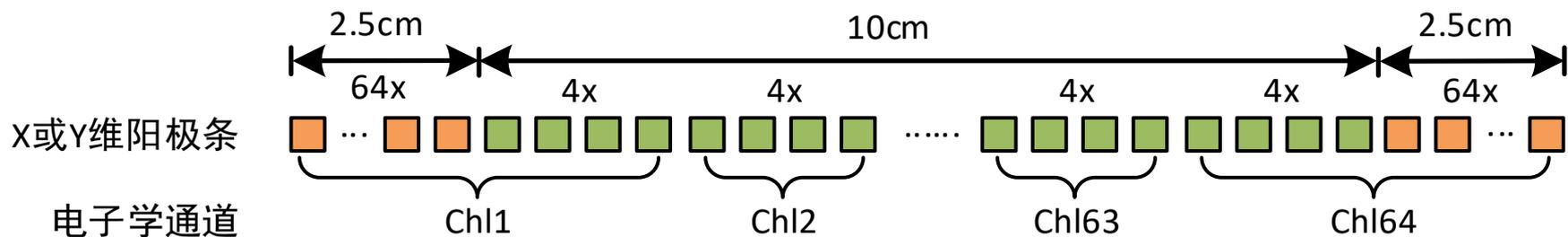
- ◆ 阳极板条间距0.4mm。共384根阳极条，对应15cm的灵敏区边长

- ◆ 中间的256根条，每4根条合并连接到一个电子学通道

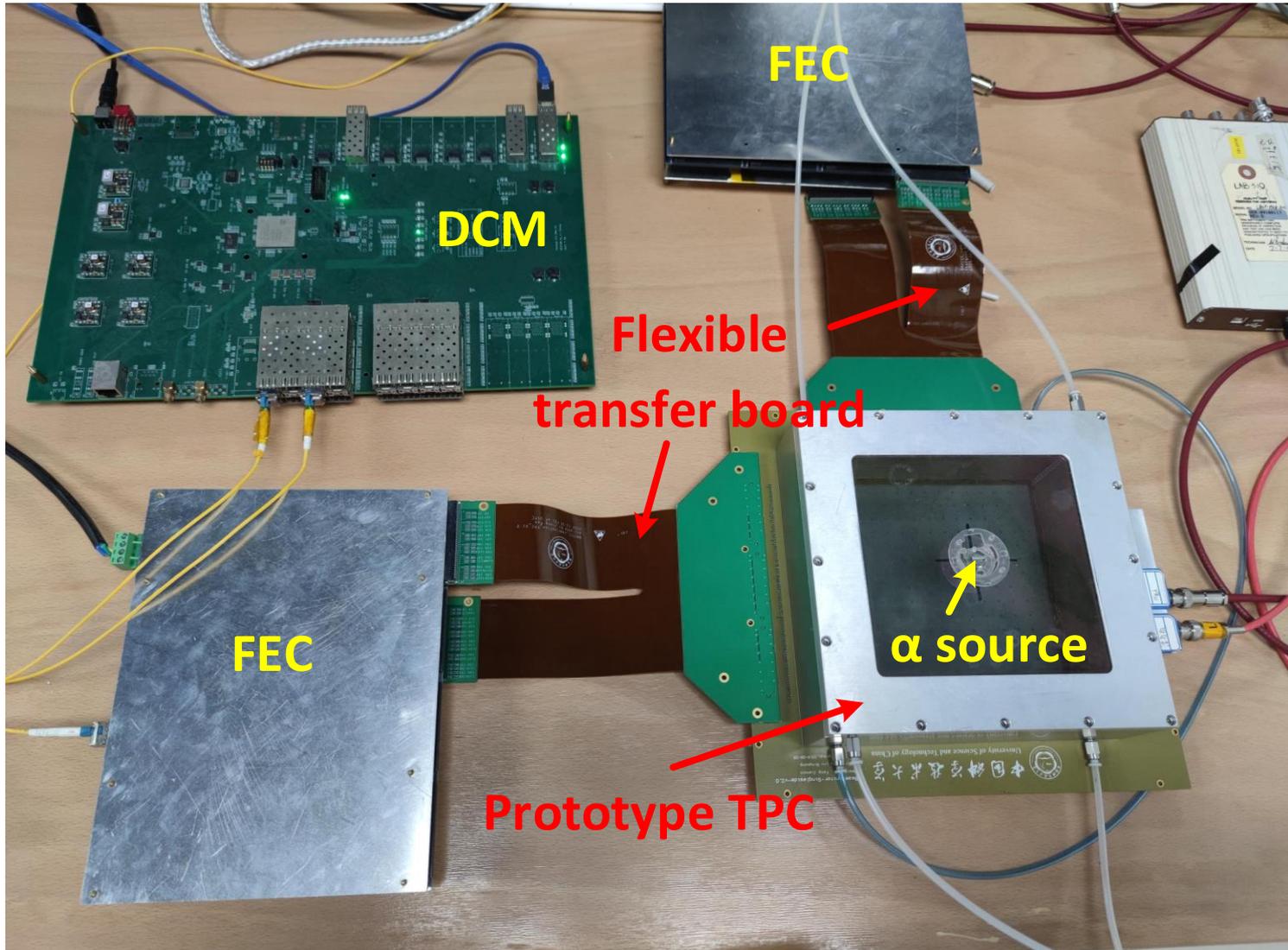
- ◆ 每边的64根条，分别合并连接到对应边缘的电子学通道1和64

◆ 用64路电子学通道实现一个维度384根条的读出

◆ 等效于条间距1.6mm，有效灵敏区为中心10cm×10cm的方形区域



TPC原型样机系统



目 录



研究背景



样机研制



实验结果



后续计划

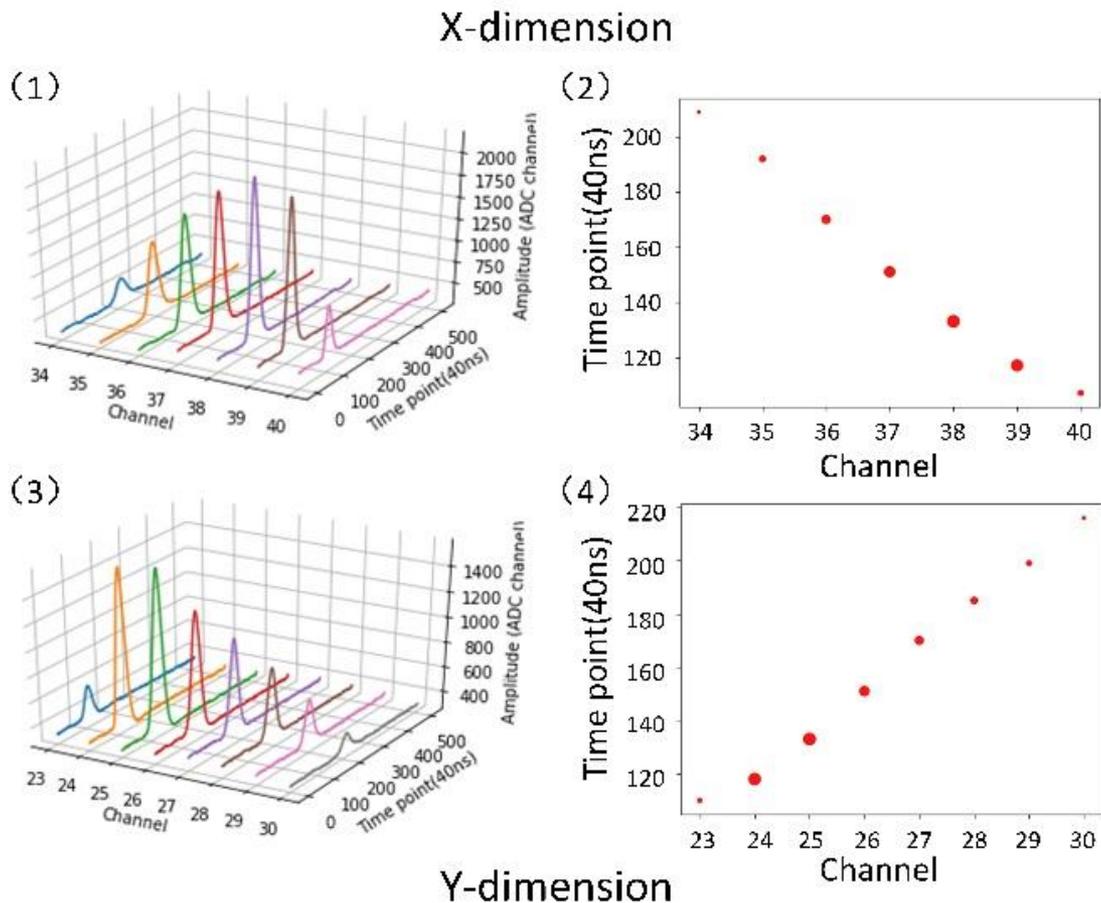


α 源测试结果

◆ 工作气体：95%氙气+5%异丁烷

◆ 采集对象： ^{241}Am 源（5.5MeV α 源）

典型事例：

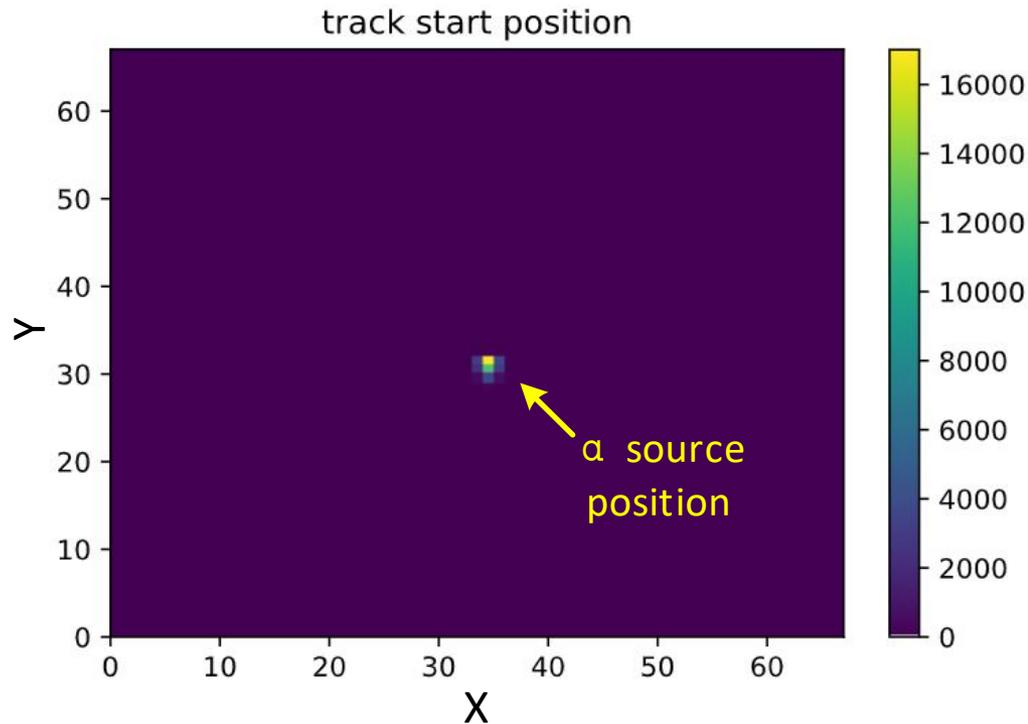


➤ 由布拉格峰特征可判断出径迹入射位置，符合理论



α 源测试结果

◆ 径迹入射位置

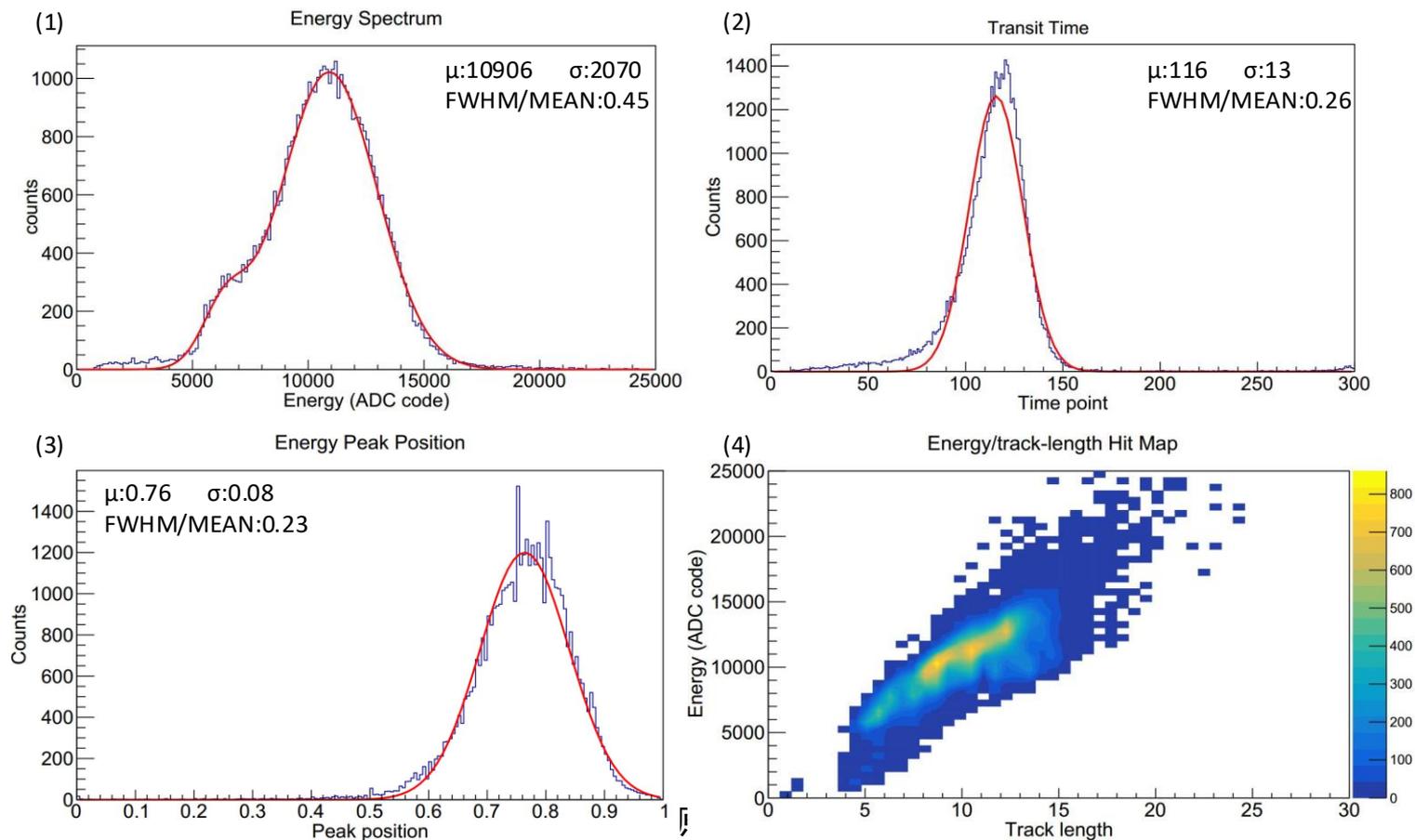


^{241}Am 源 (2min)

- 大量统计后， α 源径迹入射位置集中在灵敏区中心点，符合 α 源放置位置



α 源测试特征量



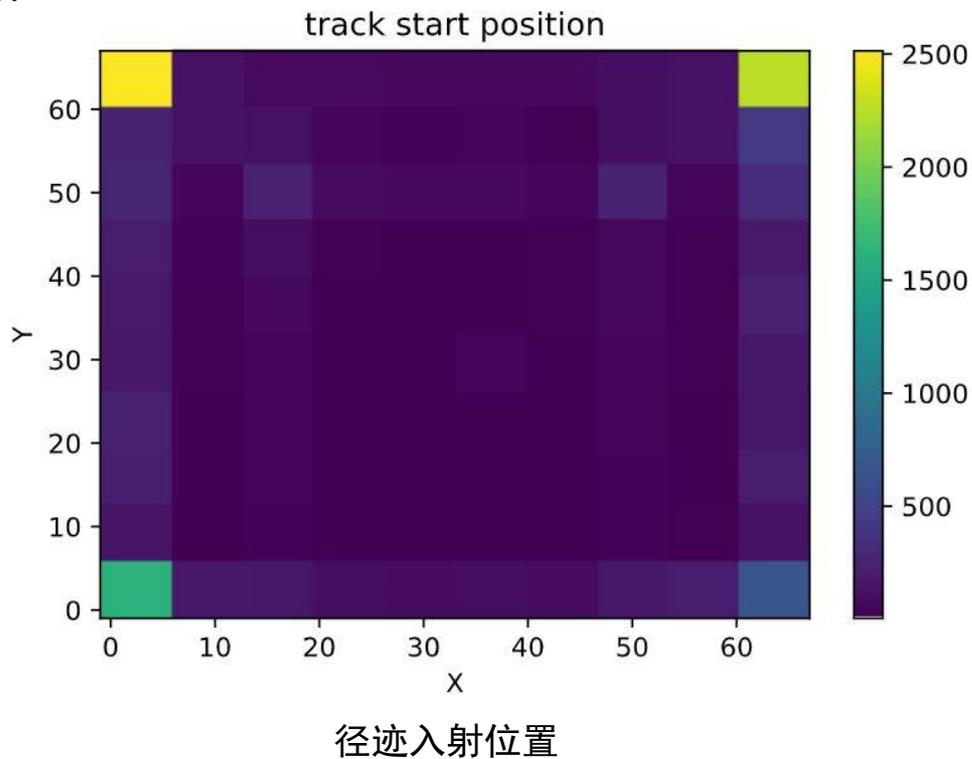
- (1) 能谱； (2) 粒子穿越时间； (3) 能量峰位； (4) 能量/径迹长度关系分布
- 采用双高斯拟合，取主高斯峰的特征以方便构建筛选条件



本底测试结果

◆ 采集对象：实验室环境本底

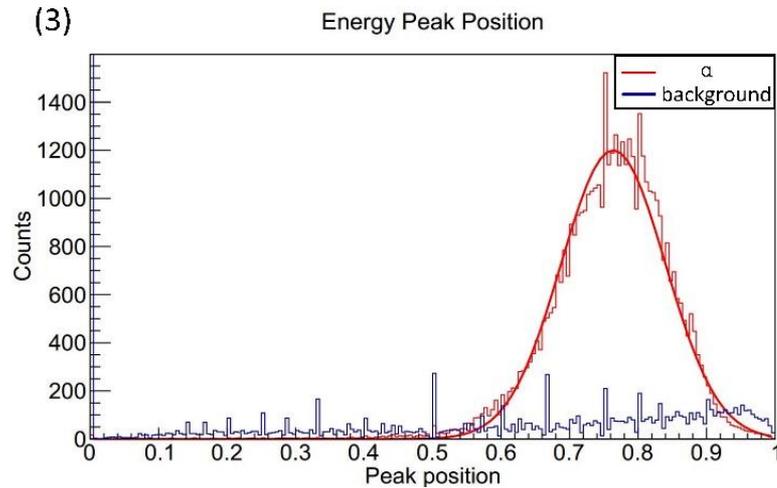
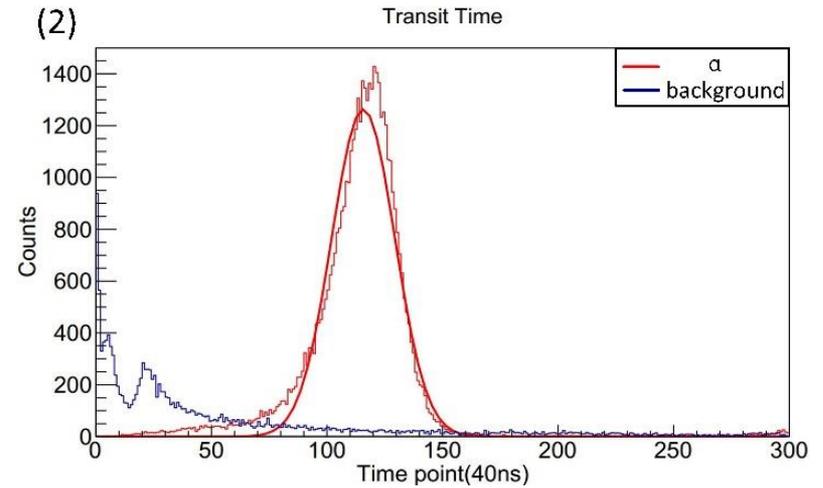
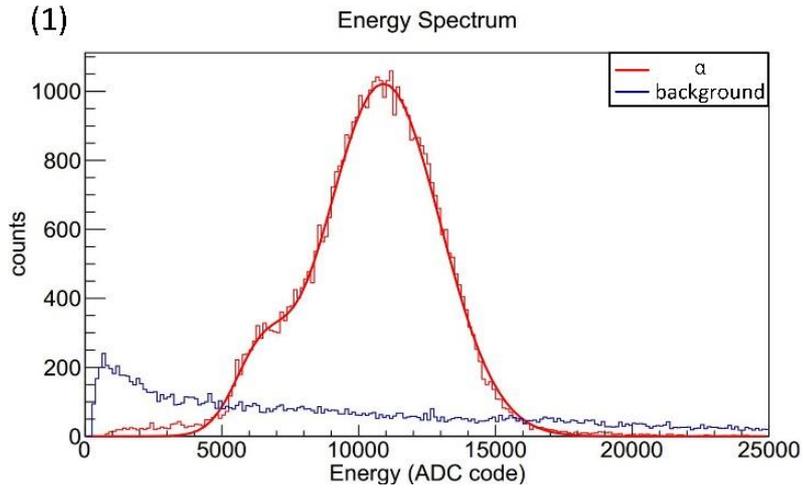
◆ 采集时长：49h



- 本底事例入射位置则多分布在四边和四角上，大概率是由TPC外壁放出的 α 粒子
- 可以很好的通过入射位置来对目标事例进行区分



本底特征量对比

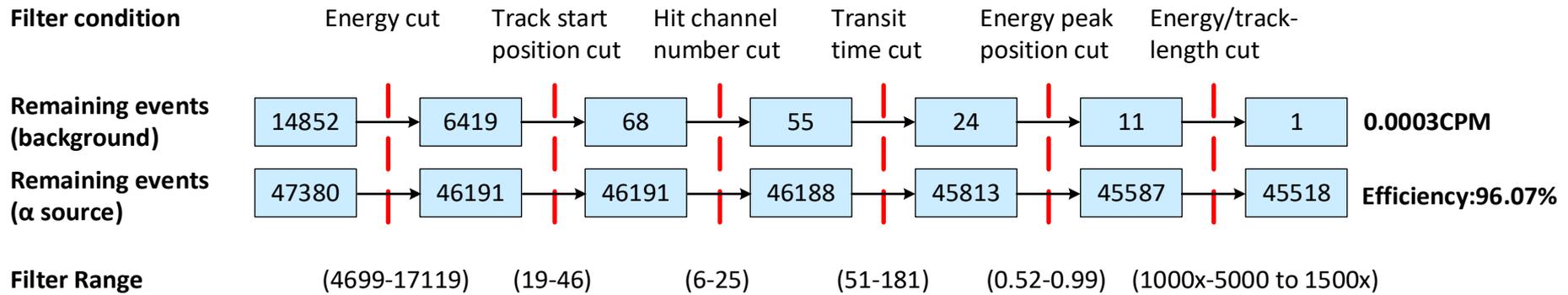


➤ 与 α 源特征差异明显



筛除结果

- ◆ 利用之前获取的 α 源特征信息，构造筛选条件
- ◆ 分别对本底和 α 源的结果进行筛除



- 多条件筛选后仅剩余1个本底事例，本底率 $\leq 0.0016\text{CPM}$ （95%置信度）
- α 源依然保留着96%的筛选效率

约为MPC-9604（ $\leq 0.05\text{CPM}$ ）的1/30！



目 录



研究背景



样机研制



实验结果



后续计划



后续计划

◆ 探测器改良方案

- ◆ 改良阳极板和场笼结构提高能量分辨
- ◆ 测量 α 的同时，实现 β 的低本底测量和区分

◆ 工程样机设计

- ◆ 新探测器TPC搭建
- ◆ 基于国产ASIC的新多通道波形读出电子学设计



谢谢！

