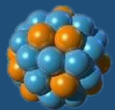


HIRIBL高计数率位置灵敏探测器的研究

报 告 人 : 李旺生
指 导 导 师 : 韦峥老师
合 作 导 师 : 余玉洪/鲁辰桂老师

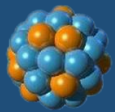
2026年7月24日 • 惠州



I. HIRIBL高计数率位置灵敏探测器现有进展

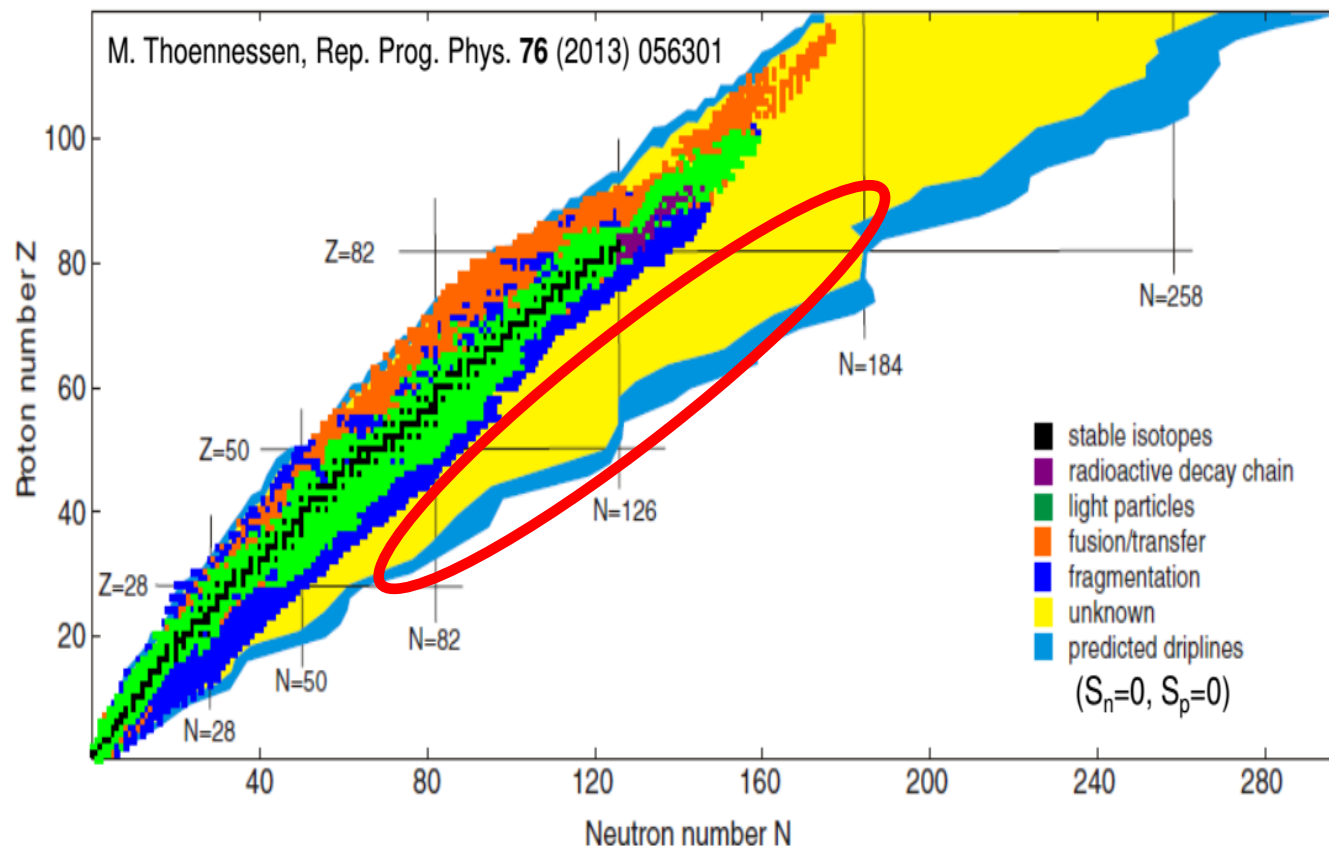
II. 工作展望

獨樹一幟
白強不息



研究背景

已发现放射性核素3000种, 理论预言10000种以上



探索中重质量区核素是当前国际研究的热点

1896年 贝克勒尔发现天然放射性现象

1897年 汤姆生发现了电子

1911年 卢瑟福提出了原子的核模型

1919年 卢瑟福发现了质子

1930年 科克罗夫特和沃尔顿建成高压倍增静电加速器

1931年 劳伦斯建成了回旋加速器

1932年 查德威克发现了中子

1933年 费米提出了中微子假说

1935年 汤川秀树提出了核力的介子理论

1936年 尼.玻尔提出了复合核模型

1938年 哈恩发现了裂变

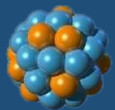
1946年 科斯特建成了电子直线加速器

1949年 梅耶夫人和延森提出了核结构壳模型

1950s 雷恩沃特等提出了核变形理论和集体运动模型

1980s 放射性核束物理兴起

2010s 进入中高能强流放射性核束物理



研究背景

$p \sim U$ 离子束

HIRIBL 弹核碎裂

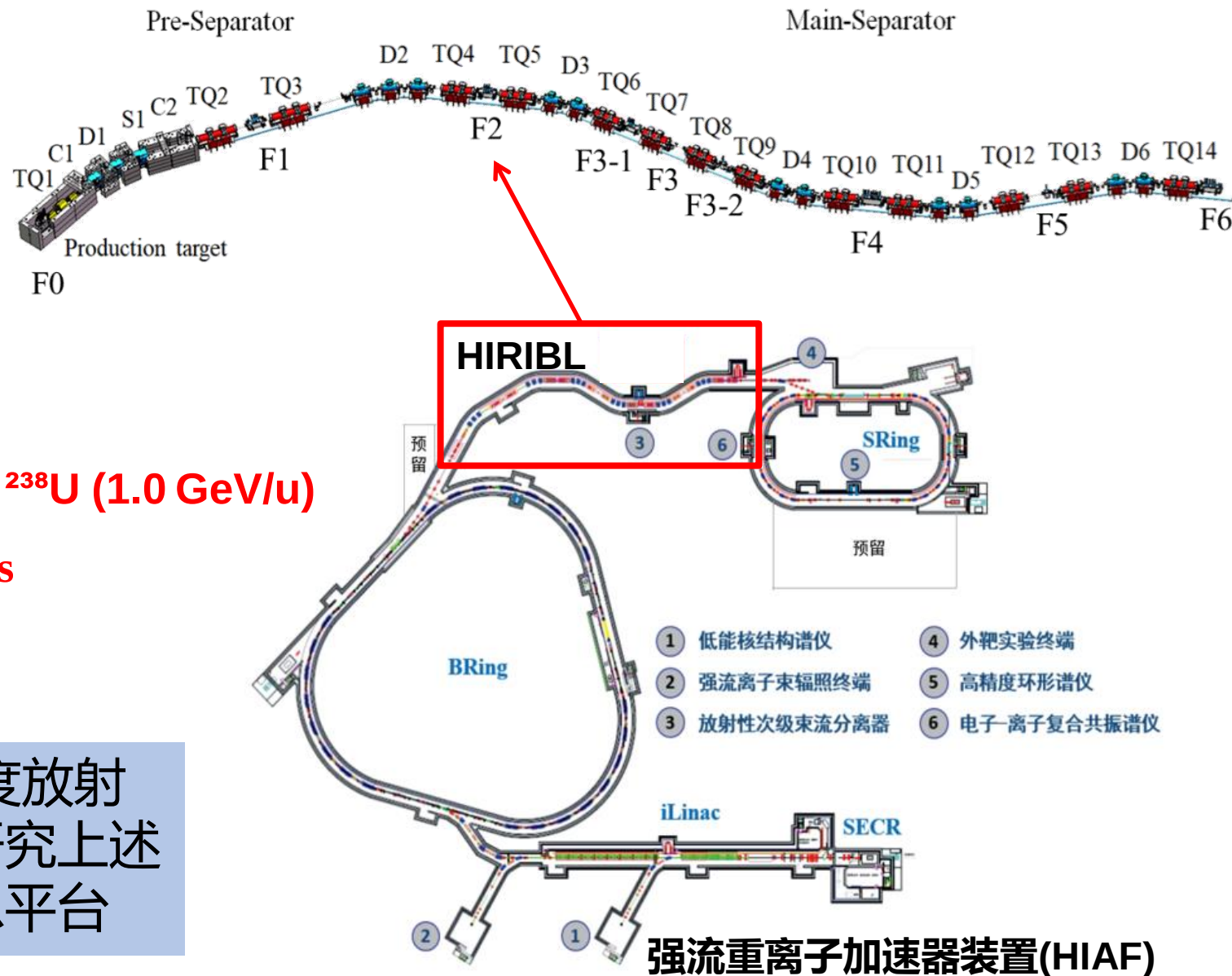
各种稀有
同位素

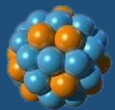
实验研究

高能: p (3.6 GeV), ^{238}U (1.0 GeV/u)

强流: $\sim 1 \times 10^{11}$ pps

HIRIBL高磁刚度放射性束流线将是研究上述中重核素的理想平台





➤ 研究目标

精准的粒子鉴别是开展放射性束物理实验的重要保证

HIRIBL采用Bp-TOF- ΔE 粒子鉴别方法

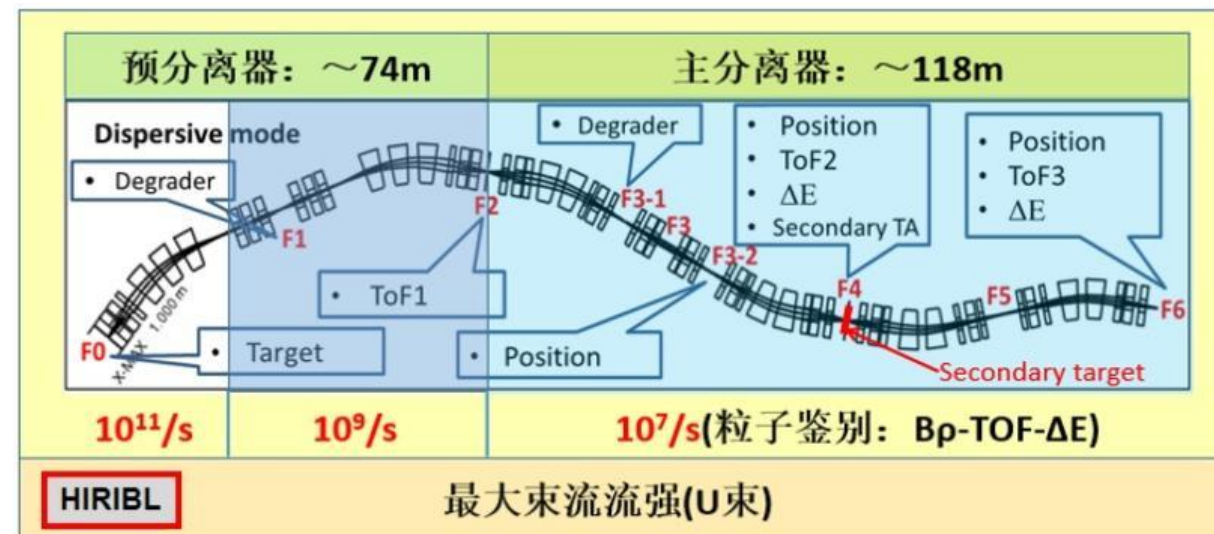
$$\beta = L / (c \cdot TOF)$$

$$F(Z, \beta) = \Delta E \rightarrow Z$$

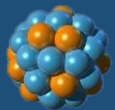
$$\frac{A}{Z} \propto \frac{B\rho}{\beta\gamma}, \quad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

研究目标:

能承受**HIRIBL的高流强**(~10MHz),
位置分辨好($\sigma < 0.5mm$), **探测效率高**的位置探测器



位置	有效面积 (mm ²)	计数率 (Hz)	离子种类
F3-2	~200×20	3.21×10 ⁷	p - U
F4	~200×10	2.57×10 ⁷	p - U
F6	~200×5	8.71×10 ⁶	p - U

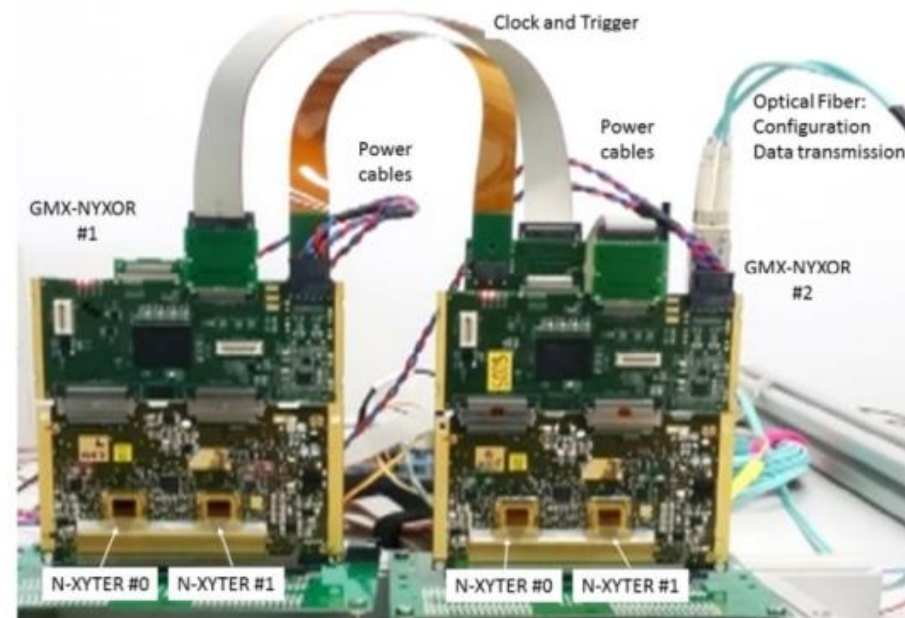
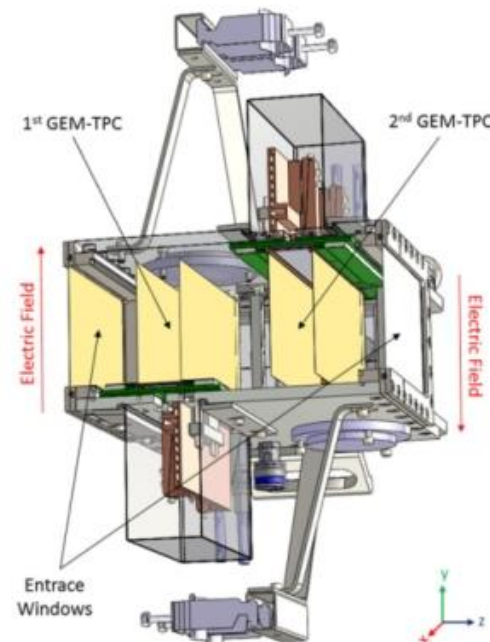


探测器选型

时间投影室TPC: (Time Projection Chamber)

- 优势:
- ✓ 位置分辨好
- ✓ 束流阻挡小
- ✓ 且国外已有高计数率下的成功应用(Super-FRS)

- 问题:
- 电子漂移时间长
- 探测器响应慢
- 高计数率下存在问题
- 需特定设计

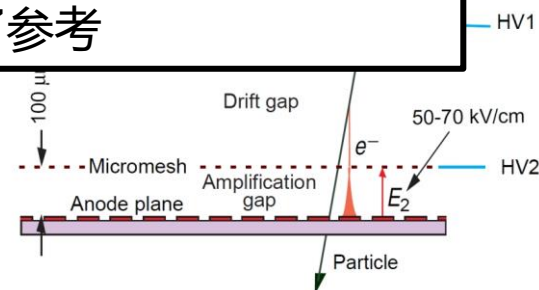
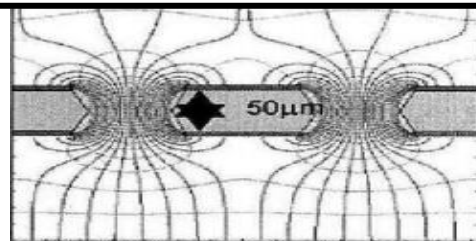


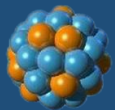
离子反

! MICROME GAS: 位置分辨 $<100\mu\text{m}$

GE
能
订

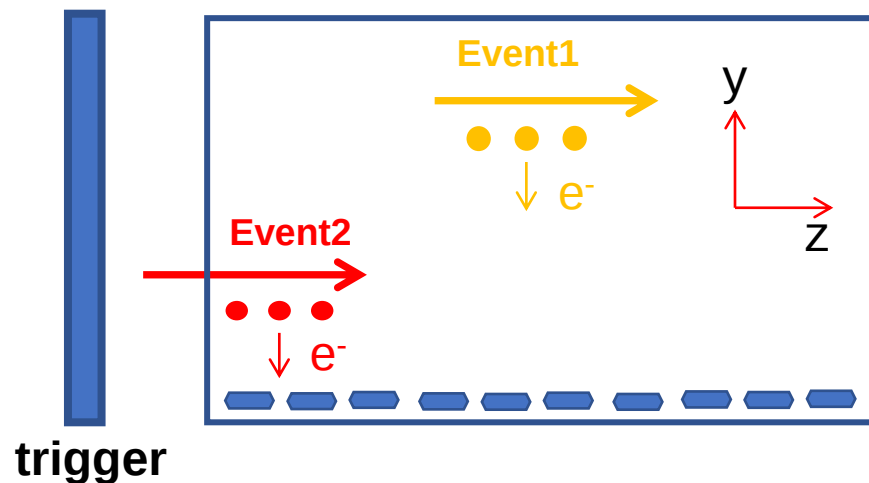
德国GSI的Super-FRS上的位置探测器GEM-TPC与其读出电子学，在束流实验中实现了 7.78MHz 超高计数率下的长时间稳定运行，为后续工作提供了参考



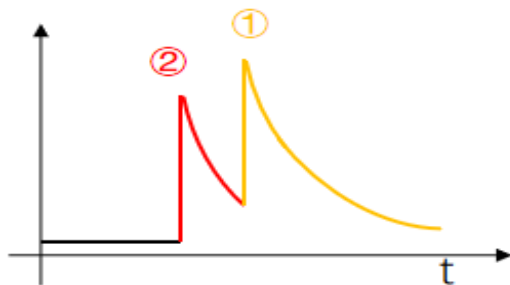


探测器结构

高流强下的挑战



高计数率下，由于电子漂移时间不同，导致事件起始终止时间不匹配



双TPC倒置结构解决了时序混乱问题

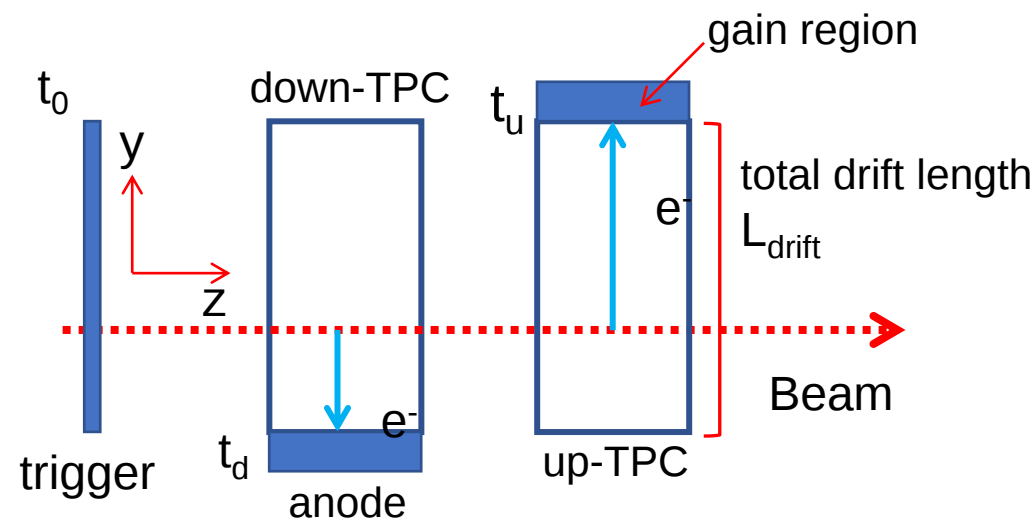
该结构增加了新的约束条件：

$$H = (t_d - t_0) \times v_e + (t_u - t_0) \times v_e$$

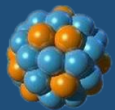
t_d, t_u 为事件被TPC收集的時刻

t_0 为触发時刻

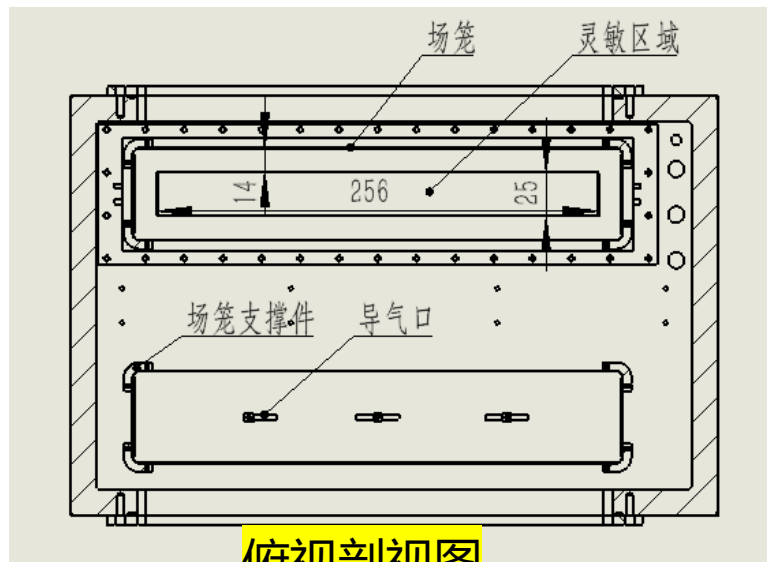
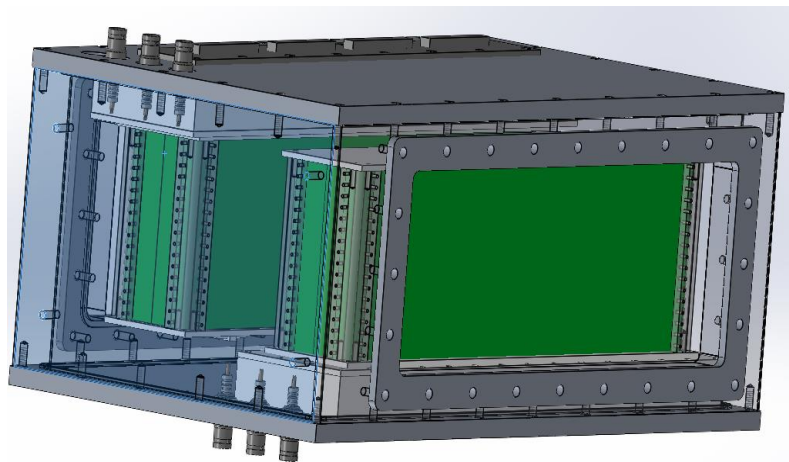
总漂移长度 H =总漂移时间 $\times$ 电子漂移速度 v_e



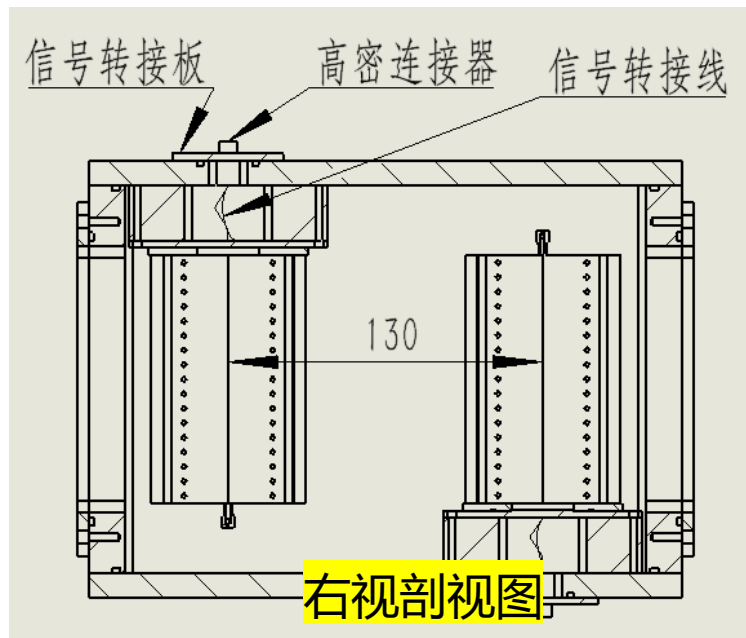
Twins-TPC示意图



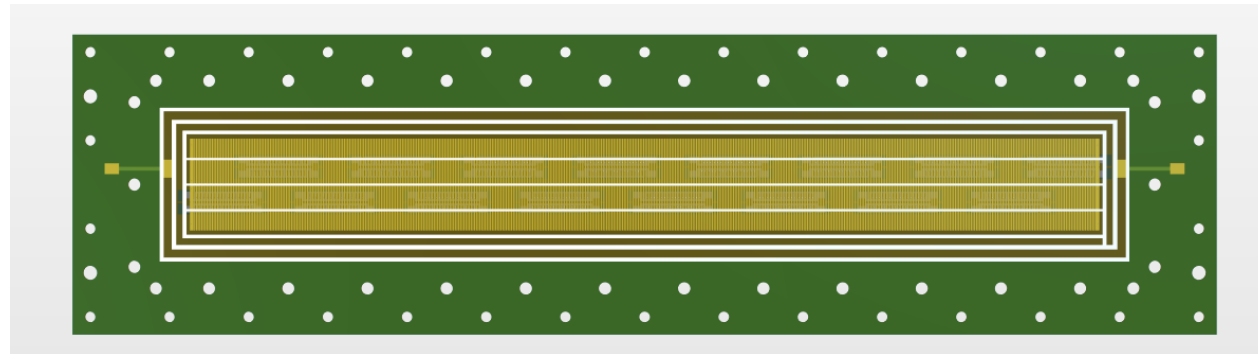
探测器结构



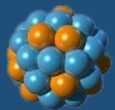
俯视剖视图



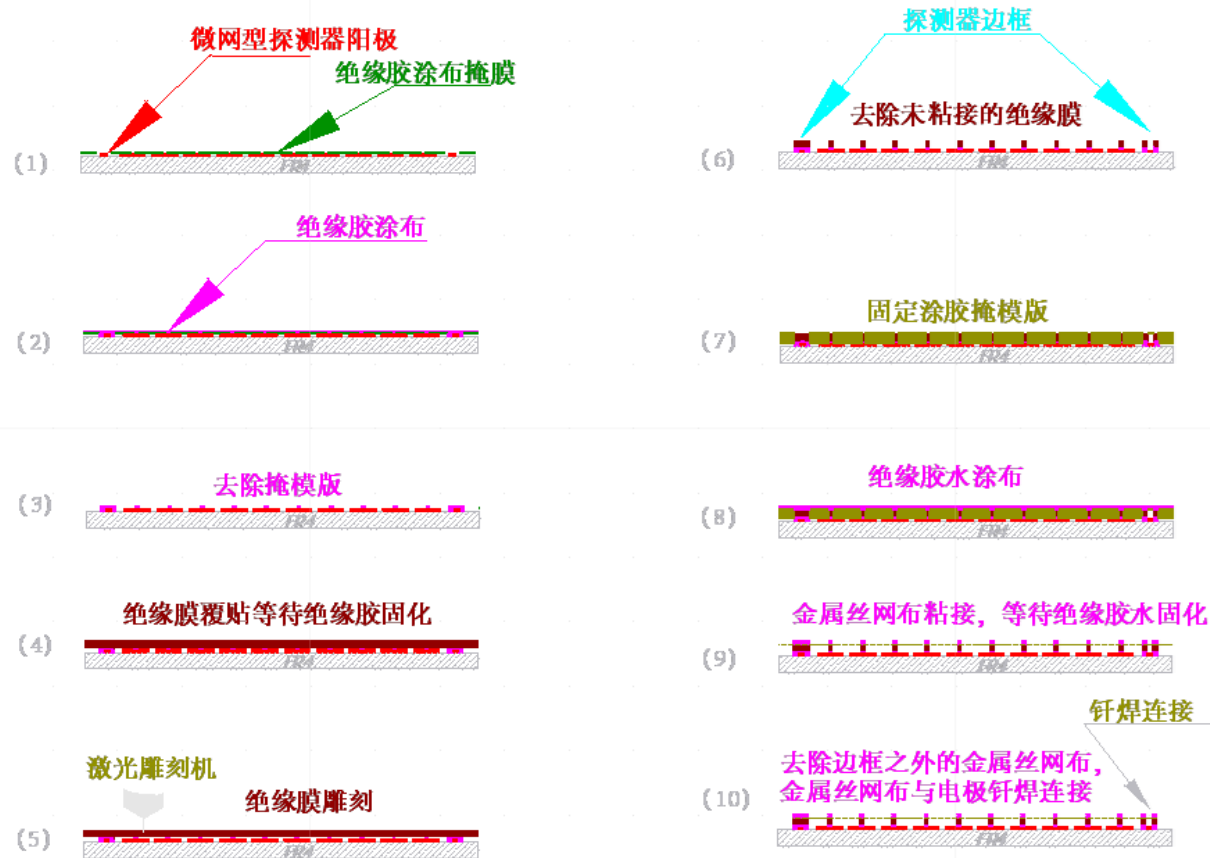
- 场笼 $295(L) \times 64(W) \times 102.4(H)$ mm³
- 场笼中心距130mm
- MICROMEGAS灵敏区面积 $256(L) \times 25(W)$ mm²
- 信号从阳极板背面引出
- 信号经转接板与电子学相连



pad周期1mm，共256路，信号从背面引出



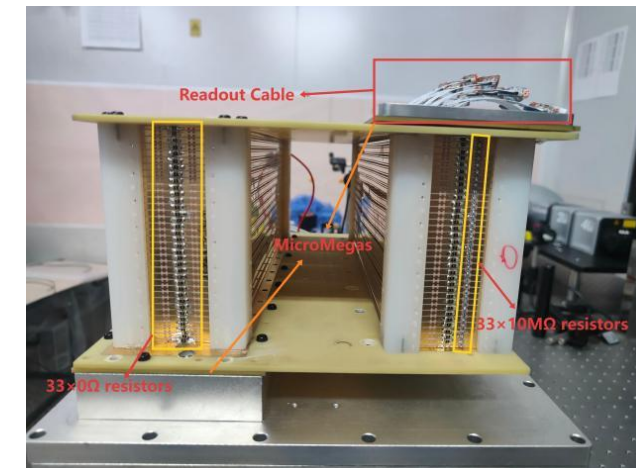
探测器研制



读出探测器Micromegas 研制工艺流程



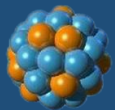
Micromegas实物图



探测器内部结构

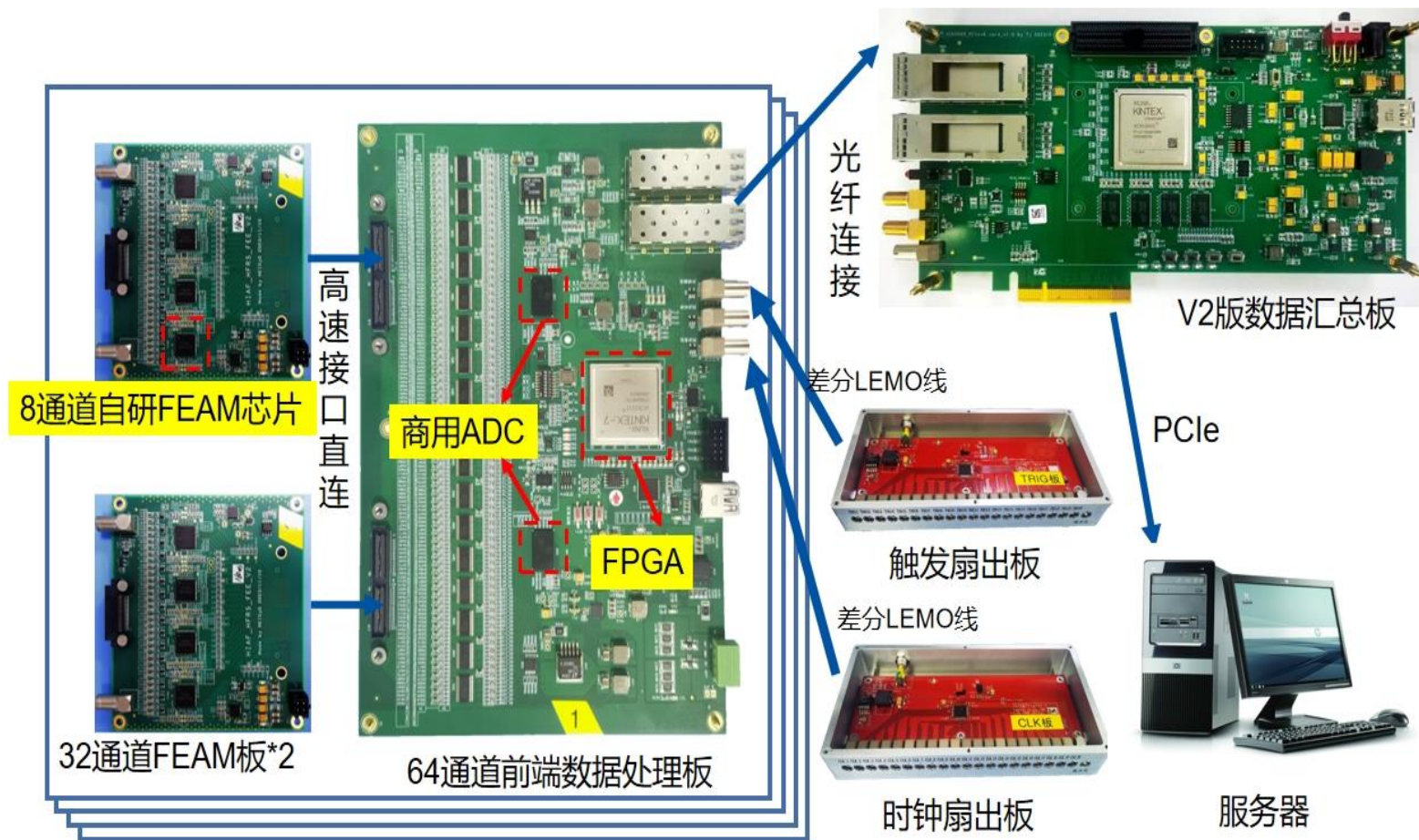


探测器与电子学联合测试图

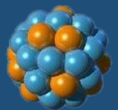


➤ HIRIBL-TPC多路读出电子学的介绍

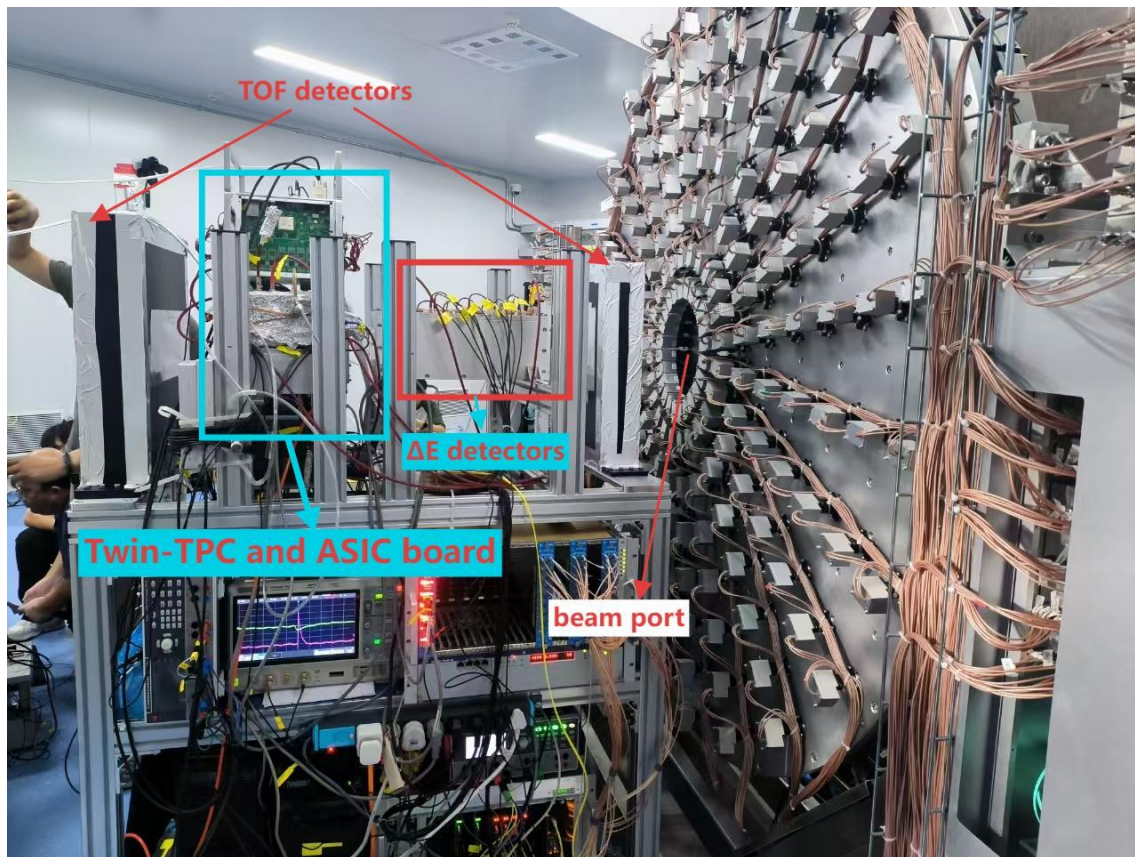
HIRIBL-TPC多路读出电子学由 FEAM+ 多通道 ADC(ADS52J90)+FPGA(Xilinx Kintex-7-325T)构成



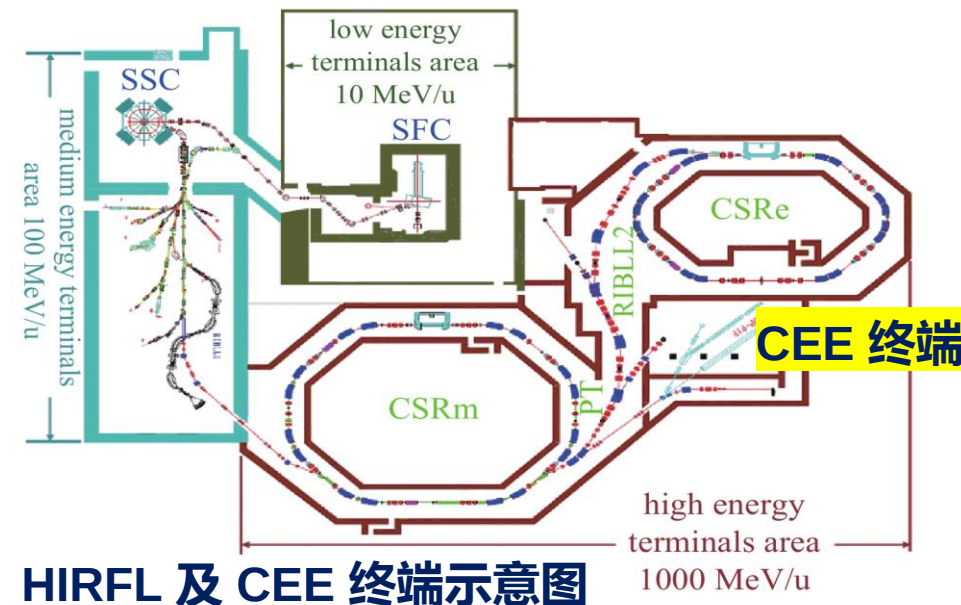
- 自研FEAM芯片
- FEAM前放增益 1pC/V
- 成形时间 160ns
- 采样频率 40MHz
- 单个前端板有64个通道
- 波形采样
- 数据采集
- 光纤传输数据
- 易扩展



位置探测器性能测试



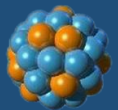
束流测试现场



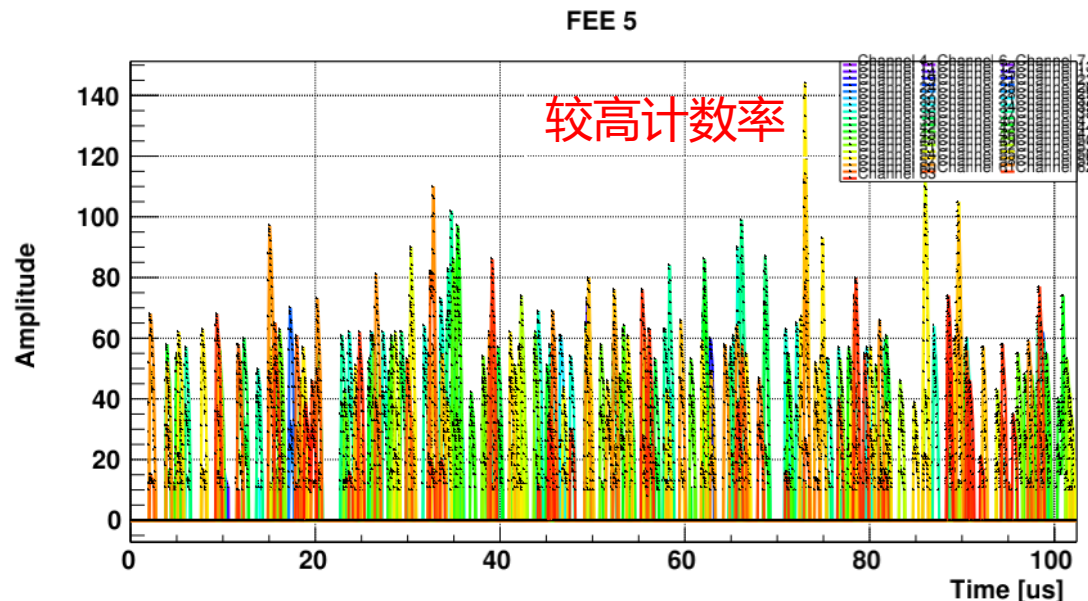
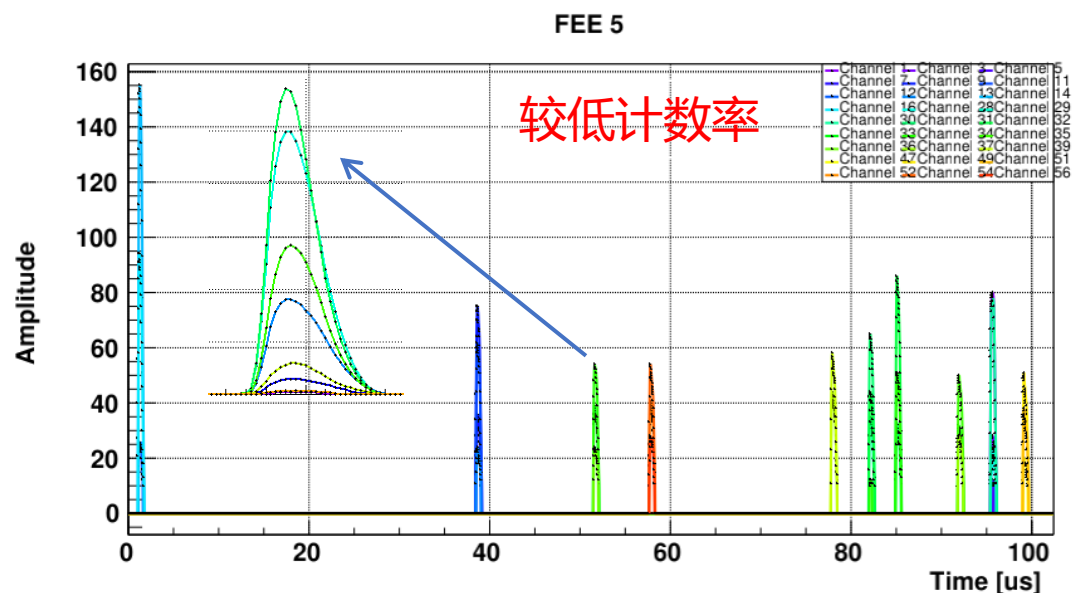
HIRFL 及 CEE 终端示意图

束流测试条件

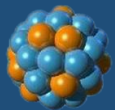
- 束流：
 - 在 HIRFL 的 CEE 实验终端
 - 1.1 GeV/u 的 ^{12}C 束流 (穿过 Fe 靶)
 - 流强最大约 10^7 pps
- 数据采集模式：无触发模式
- 工作气体：Ar + CF₄ (3%) + C₄H₁₀ (2%)
- 工作气压：845 mbar (常压)
- 测试时长：15 天



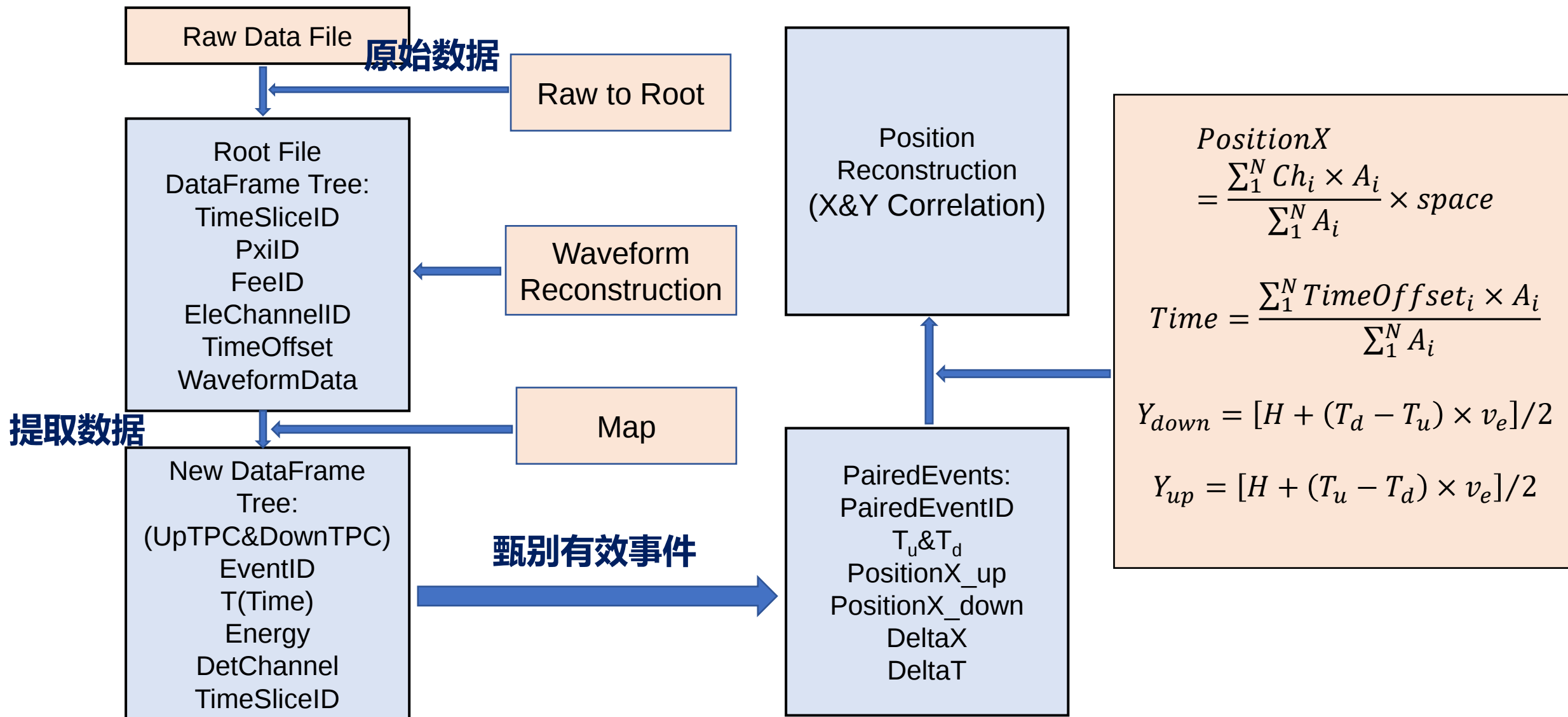
位置探测器性能测试

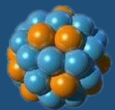


- 在无触发模式中，较低计数率下，事件重建及后续分析依赖 Twins 结构即可完成
- 高计数率下，需要一个Trigger提供 T_0 信息，这在无触发模式下只能由TOF来提供

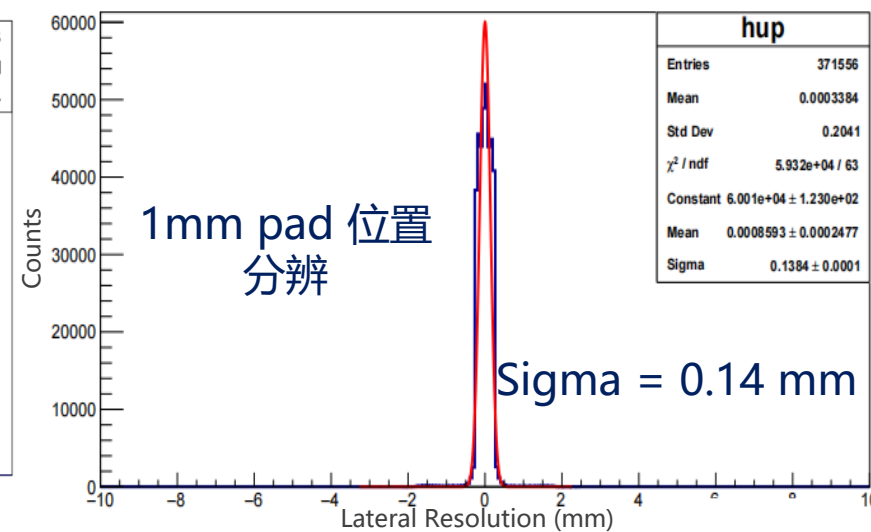
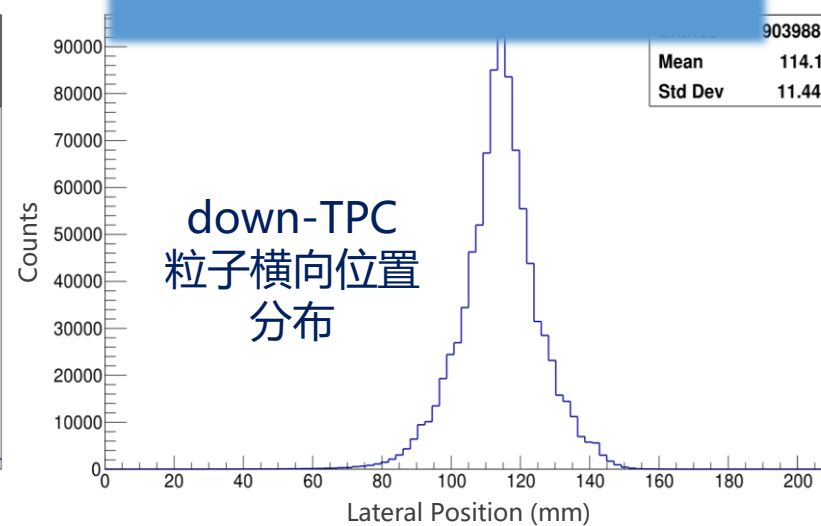
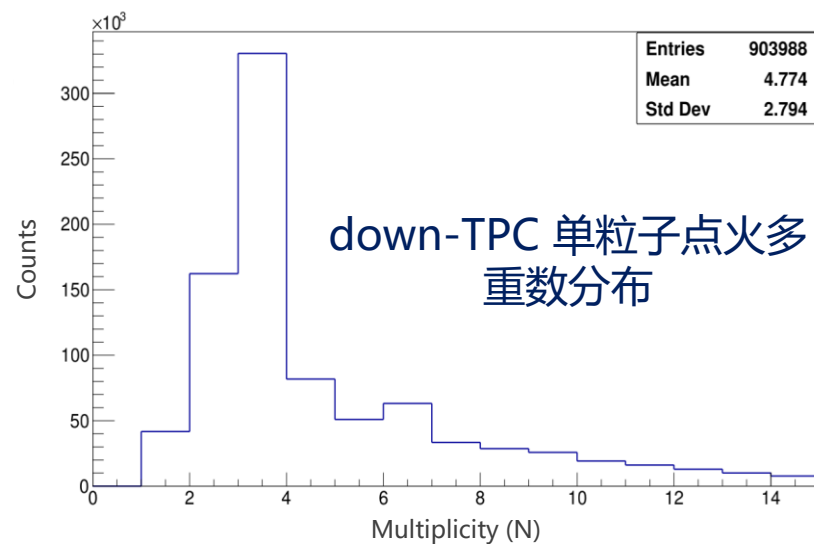
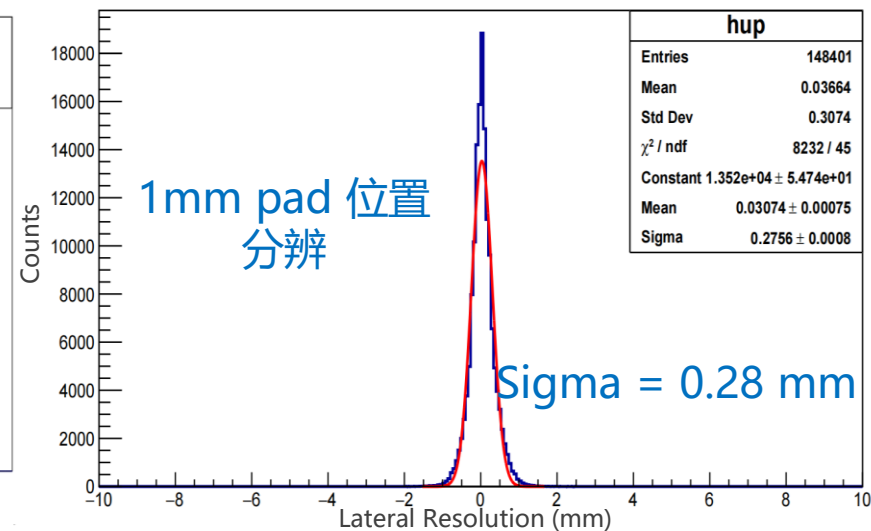
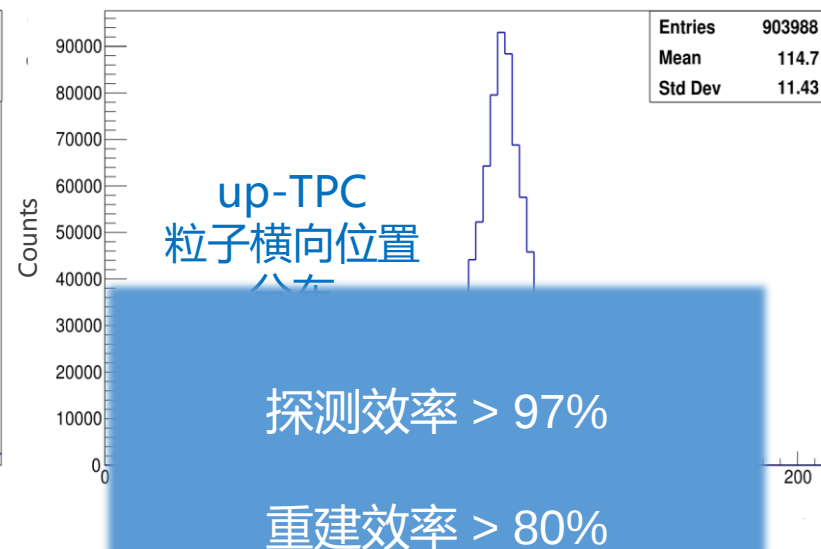
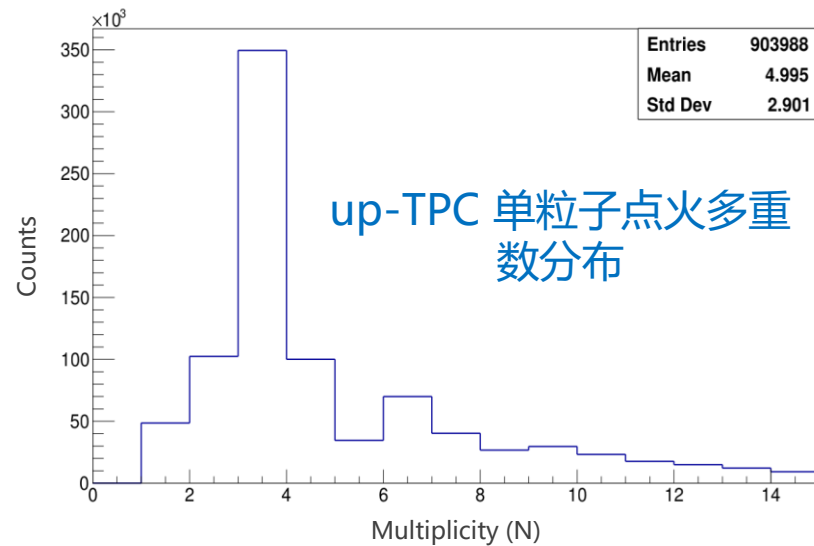


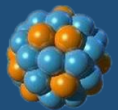
➤ 较低计数率下数据处理框架





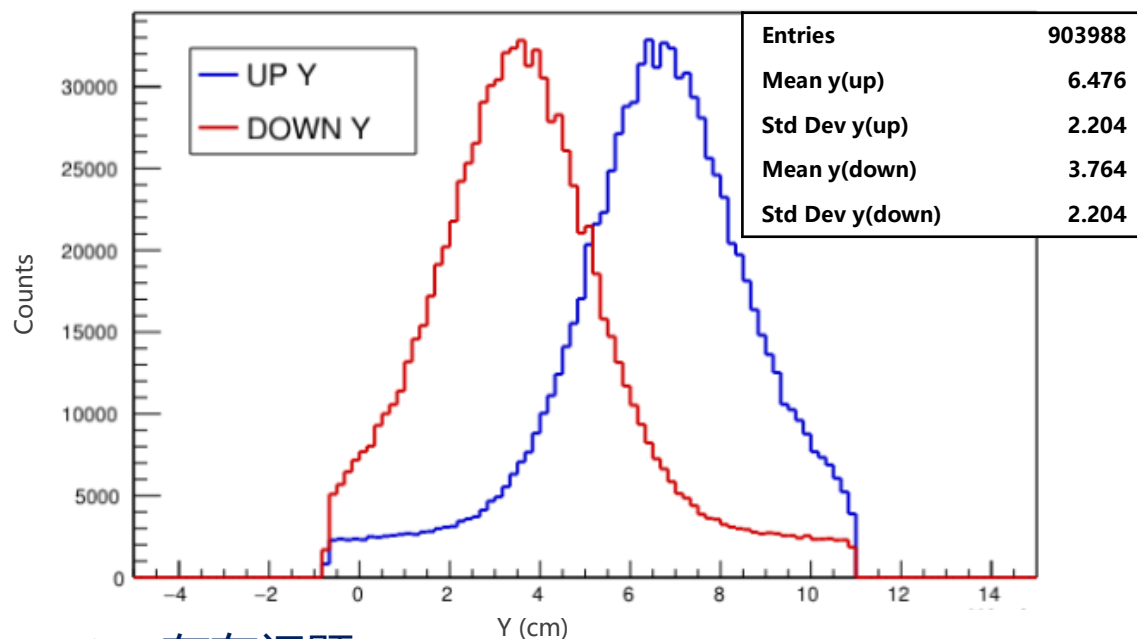
入射粒子位置分析





入射粒子位置分析

Y-position Distribution



存在问题:

Q1 存在部分杂散粒子

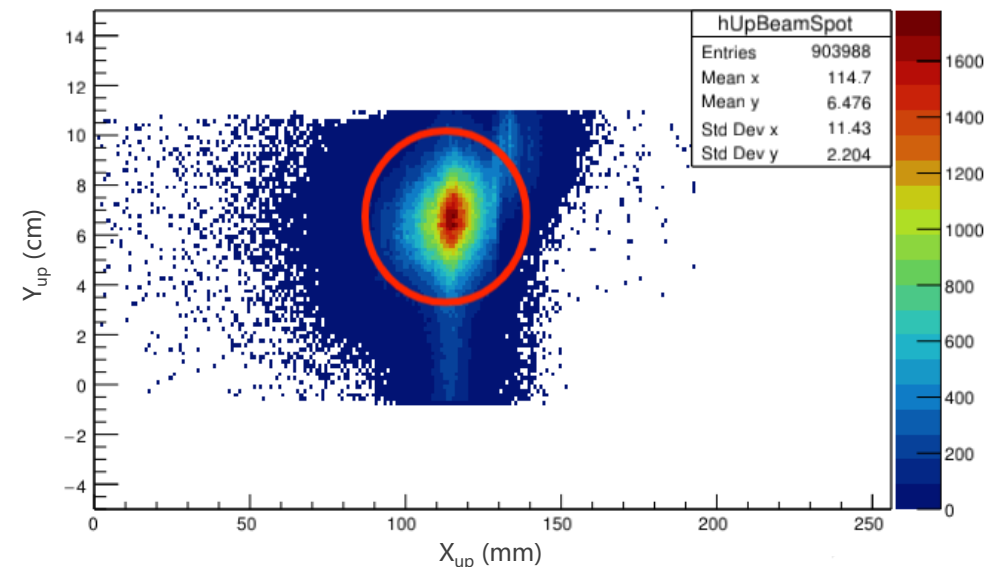
Q2 Y向分布略微超出探测器接收面

原因分析:

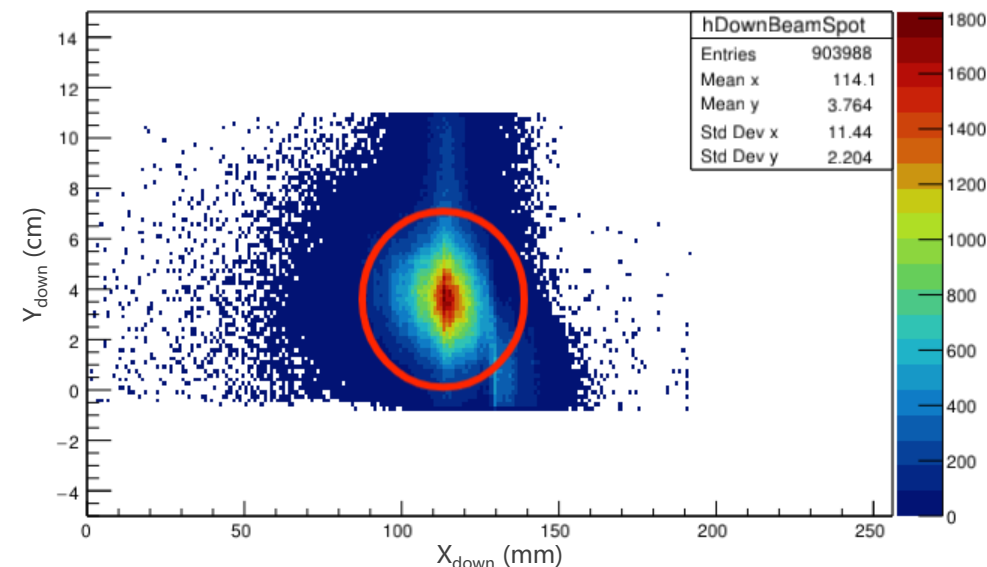
A1 数据处理算法需优化&&过阈噪声引起的误触发

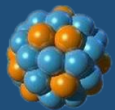
A2 数据处理算法需优化&&电子漂移速度的实验值与理想值存在偏差

UP TPC Beam Spot



DOWN TPC Beam Spot

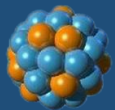




I. HIRIBL高计数率位置灵敏探测器现有进展

II. 工作展望

獨樹一幟
白強不息



➤ 数据处理框架的完善

a. 低计数率环境下

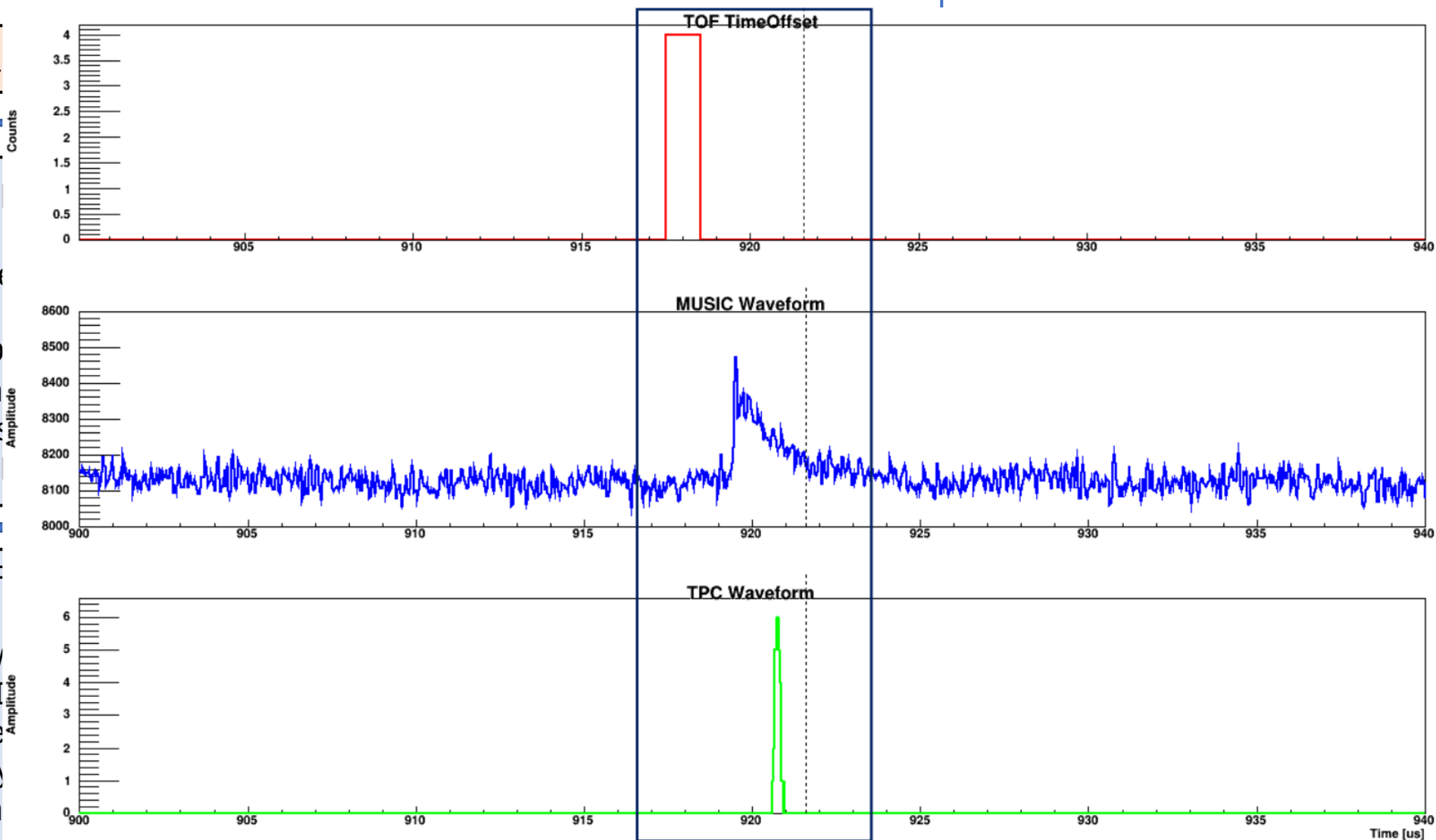
Raw Data

Counts

Root File
DataFrame
TimeSlice
PxID
FeeID
EleChannel
TimeOffset
Waveform

①

New DataFrame
Tree:
(UpTPC&DownTPC)
EventID
T(Time)
Energy
DetChannel
TimeSliceID



滤噪声hits

方式

提取方式

进行配对

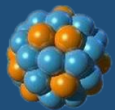
条件

供触发 T_0

精确位置重

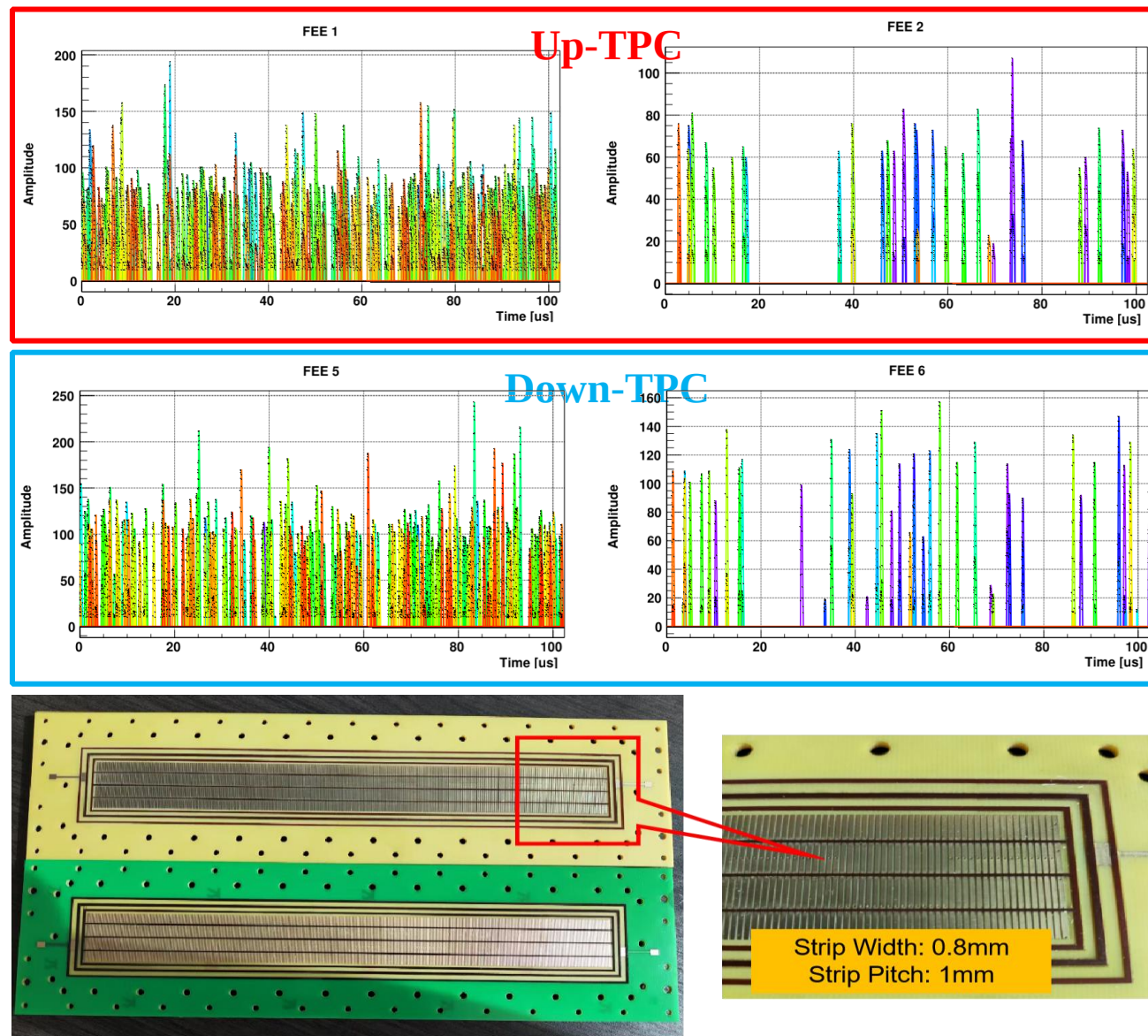
$+ (t_u - t_0)$

下的粒子鉴



➤ 探测器优化与标定

- 系统刻度漂移速度与扩散系数，为数据处理提供准确参数
- 系统优化 TPC 工作气体及电子输运参数，实现合理占空比，有效减少高计数率下的信号堆积
- 建立连续正离子反馈抑制技术方案，减小空间电荷对探测性能的影响
- 系统建立仿真与实验相结合的高计数率TPC探测器优化方法，为未来强流放射性束流线探测器设计提供通用技术路线。





兰州大学
LANZHOU UNIVERSITY



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

谢谢各位专家 敬请批评指正

报告人：李旺生

2026年7月24日

Thanks!