

CSR外靶实验零度角量能器 的设计与研制

文良涛（华中师范大学）

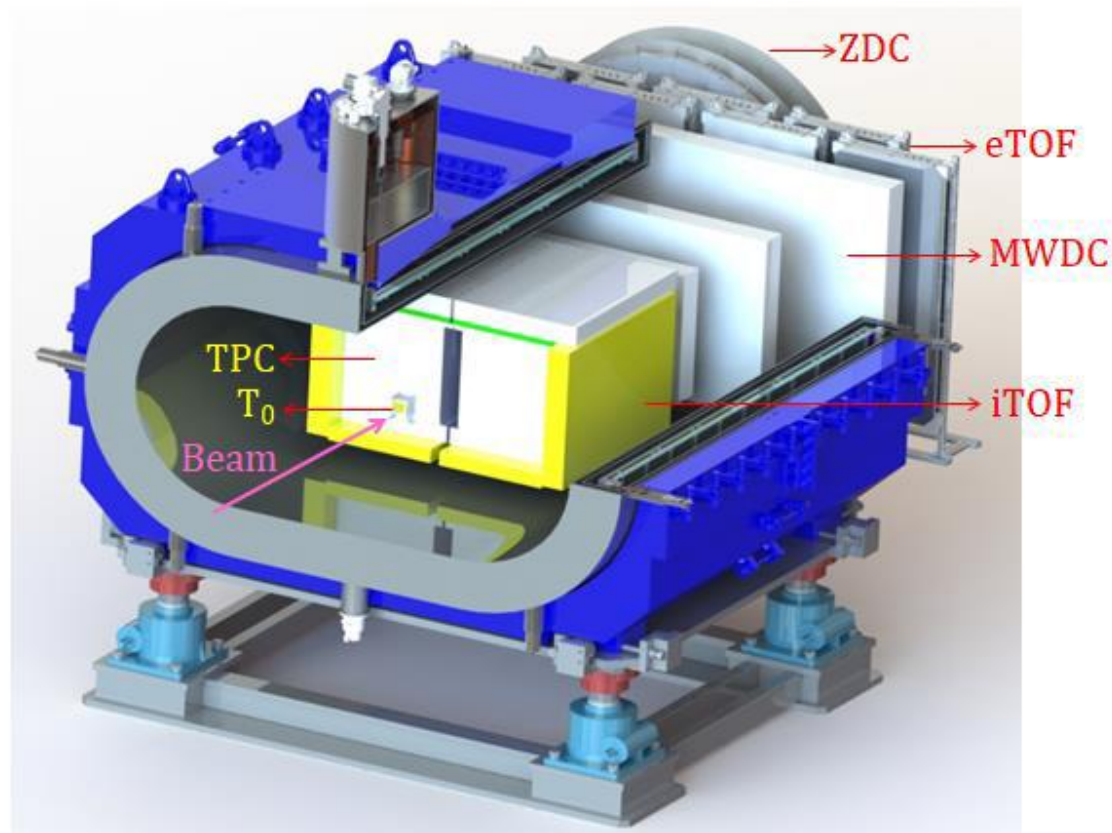
CEE-ZDC课题组

华中师范大学，中国科学院近代物理研究所



报告提纲

- 概述
- 系统总体方案设计
 - 探测器和电子学设计
 - 模拟论证
- 研制进展
 - 探测器研制
 - 电子学研制
 - 工程样机束流测试
- 总结和计划

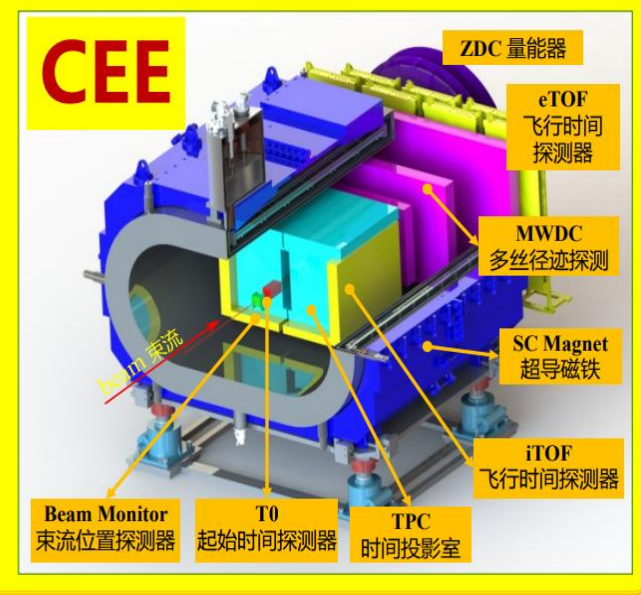




兰州重离子加速器冷却储存环

CEE 谱仪组成 (工程系统) :

- 1) 超导二极磁铁
- 2) 微像素探测器 (BM)
- 3) 时间投影室 (TPC)
- 4) 起始时间探测器和内飞行时间探测器 (T0/iTOF)
- 5) 端盖飞行时间探测器 (eTOF)
- 6) 多丝漂移室 (MWDC)
- 7) 零度量能器 (ZDC)
- 8) 数据获取系统 (DAQ)
- 9) 触发系统 (Trigger)
- 10) 时钟 (Clock)
- 11) 慢控制 (SL Control)
- 12) 技术支持科学应用系统



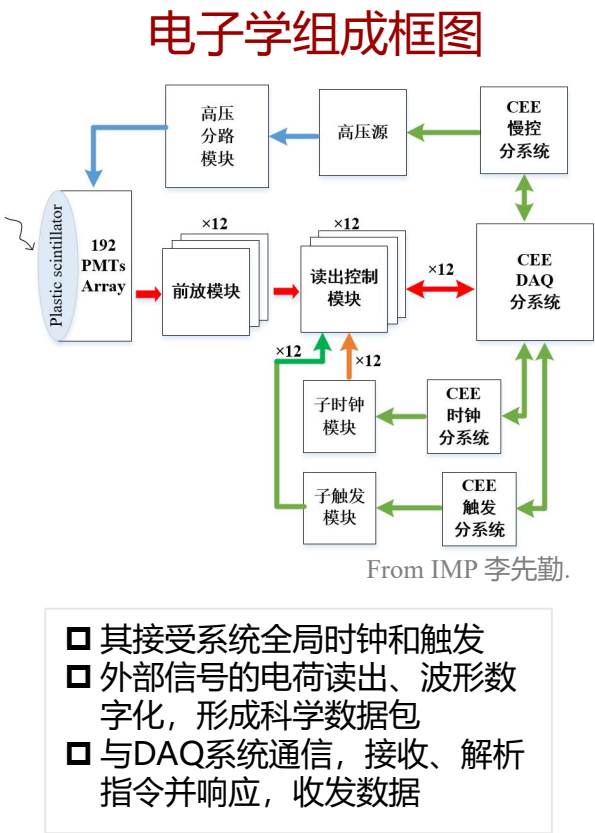
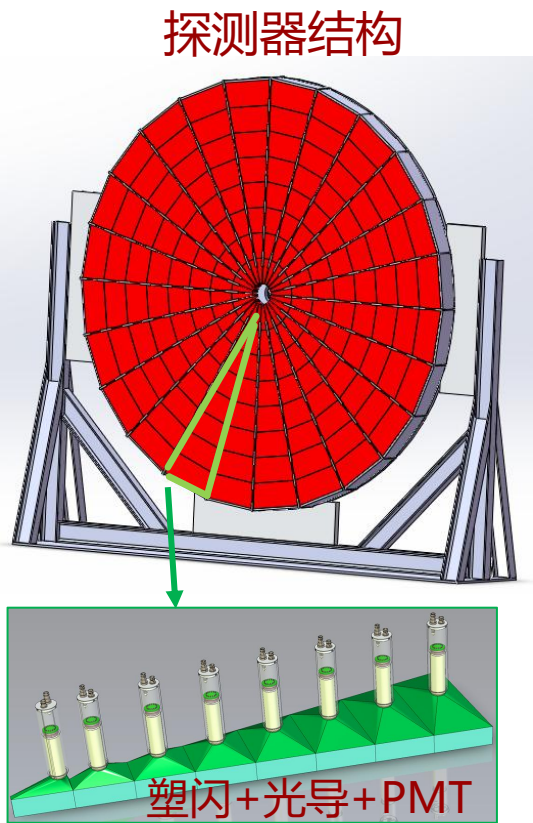
CSR外靶实验(Cooling-Storage-Ring External-target Experiment, CEE)

- CEE基于兰州重离子加速器冷却储存环开发, 是我国第一台将运行于GeV能区的、自主研发的大型核物理实验装置
- CEE是重离子固定靶实验, 使用0.5-1.2GeV的各种离子束流 (可以重至铀) 轰击对应的重离子靶
- 零角度量能器(ZDC)安装在CEE的下游方向, 为轮盘结构, 束流垂直穿过ZDC中心

系统总体方案设计_主要功能和技术指标

➤ ZDC的主要功能是测量带电粒子的能量沉积信息和击中位置信息，**确定核核碰撞中的碰撞中心度和事件平面**，为CEE以后的物理分析提供基本测量量

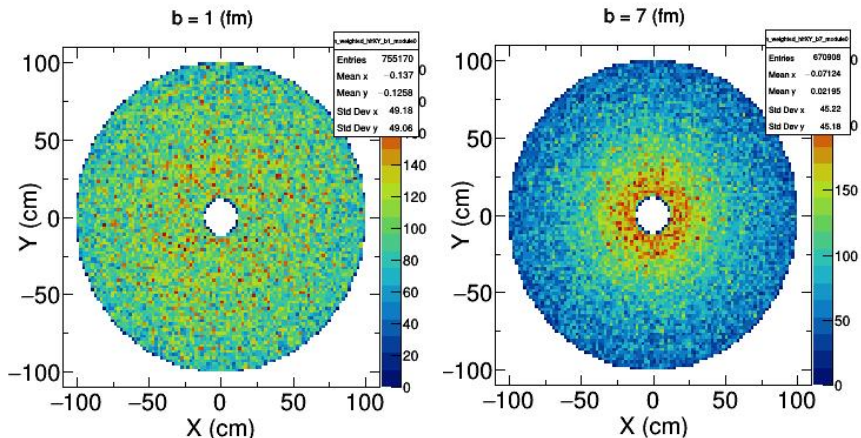
ZDC探测器的几何参数	
探测器数量	1个
探测模块数	192 (24扇区 x 8模块/扇区)
电子学通道道数 (双打拿极输出)	384
最小实验室探测角度	1°
最大实验室探测角度	19°
有效面积	~3 m ²
ZDC主要性能指标	
通道占有度 (模拟)	< 15%
中心度分类效率 (@95%纯度, 模拟)	41% (对心碰撞)、 94% (边缘碰撞)
事件平面分辨率 (一阶, 模拟)	可达90% (500 MeV U+U MB事件)



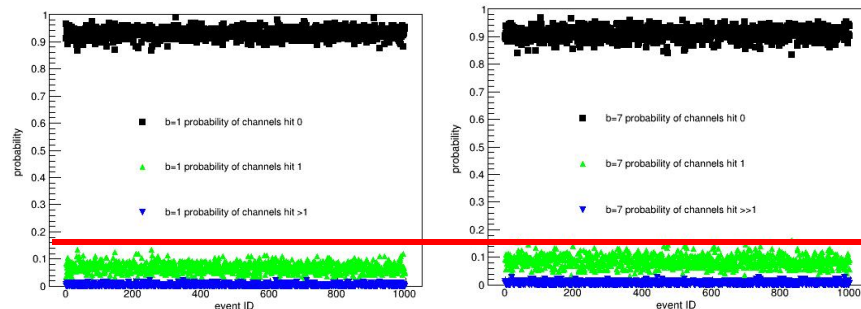
➤ 根据功能目标、模拟结果和总体机械约束条件，确定了ZDC探测器和电子学的设计方案

系统总体方案设计 模拟论证(接受度、通道响应和物理性能)

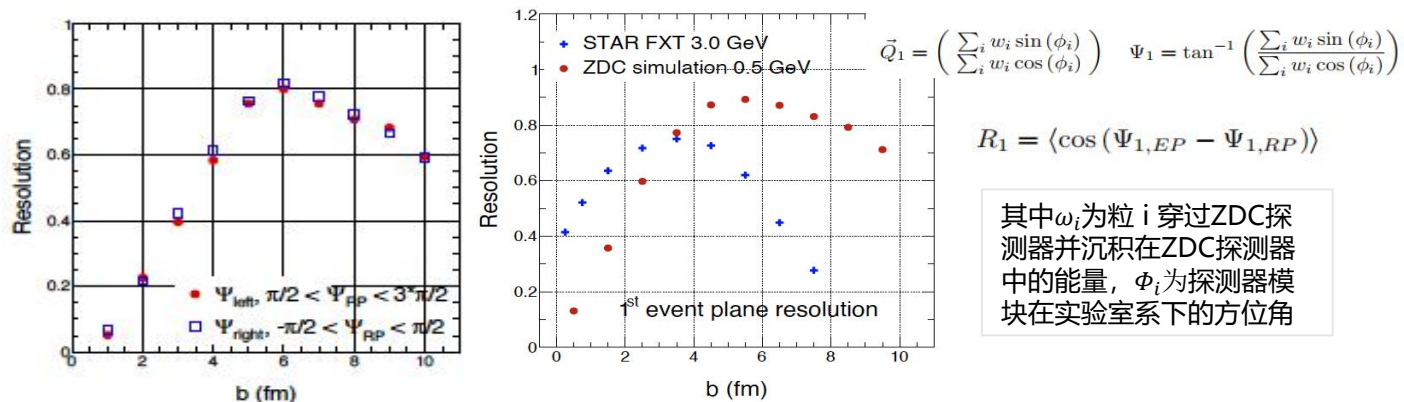
基于500MeV U+U碰撞 IQMD+GEANT模拟数据



粒子接受度(无磁场)

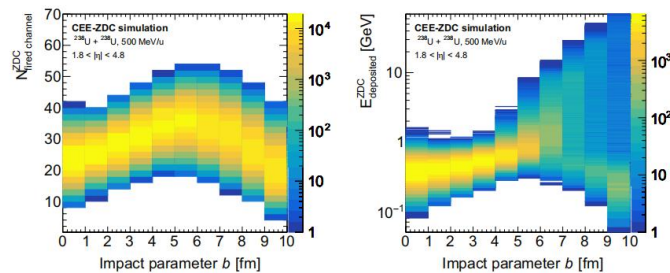


ZDC通道占有度小于15%，事件堆积率低于5%



Liu L K, Pei H, Wang Y P, et al. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34(7): 100.

基于ZDC探测器实现事件平面重建



其中各子环中的沉积能量、
ZDC点火通道数作为输入参数

	中心碰撞 0 < b ≤ 3 fm	偏心碰撞 3 < b ≤ 7 fm	边缘碰撞 7 < b ≤ 10 fm
Efficiency @ Purity > 90%	67%	66%	97%
Efficiency @ Purity > 95%	41%	47%	94%
Efficiency @ Purity > 98%	11%	24%	93%

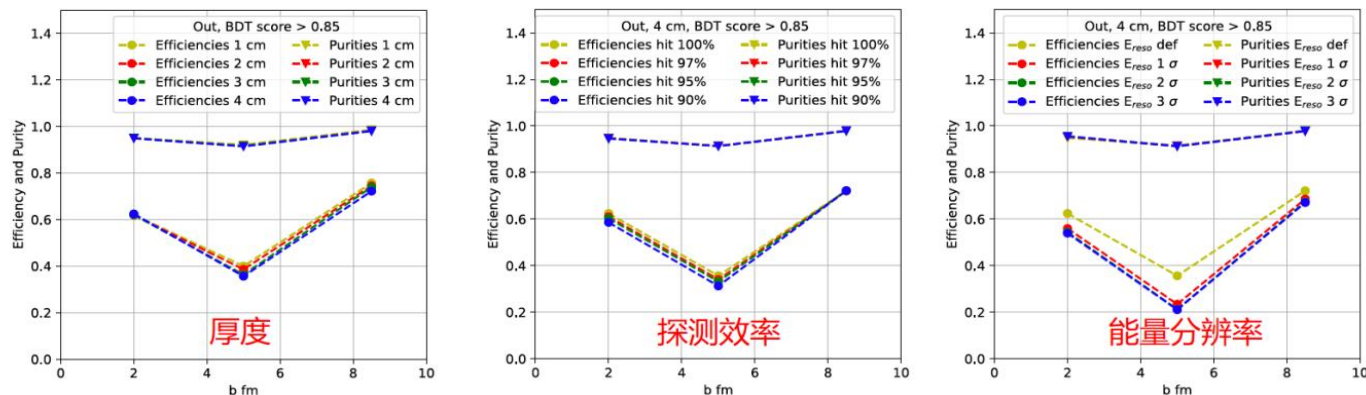
Zhang B, Liu L K, Pei H, et al. Nuclear Science and Techniques, 2023, 34(11): 176.

多分类机器学习算法实现中心度分类

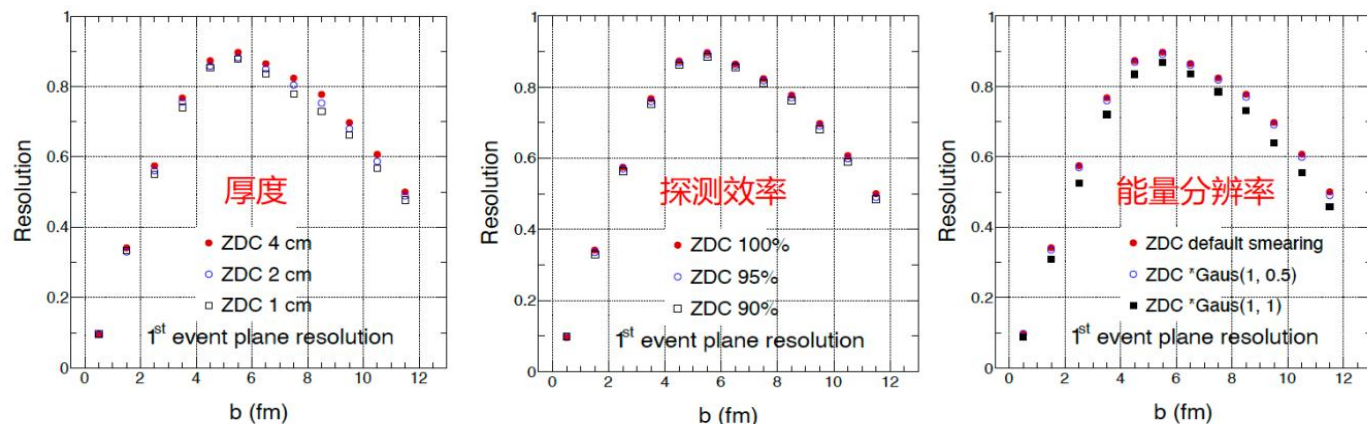
- ✓ ZDC探测器满足重建事件平面和中心度分类的功能需求

系统总体方案设计_模拟论证 (ZDC物理性能对探测器参数的依赖)

基于500MeV U+U 碰撞 IQMD+GEANT模拟数据

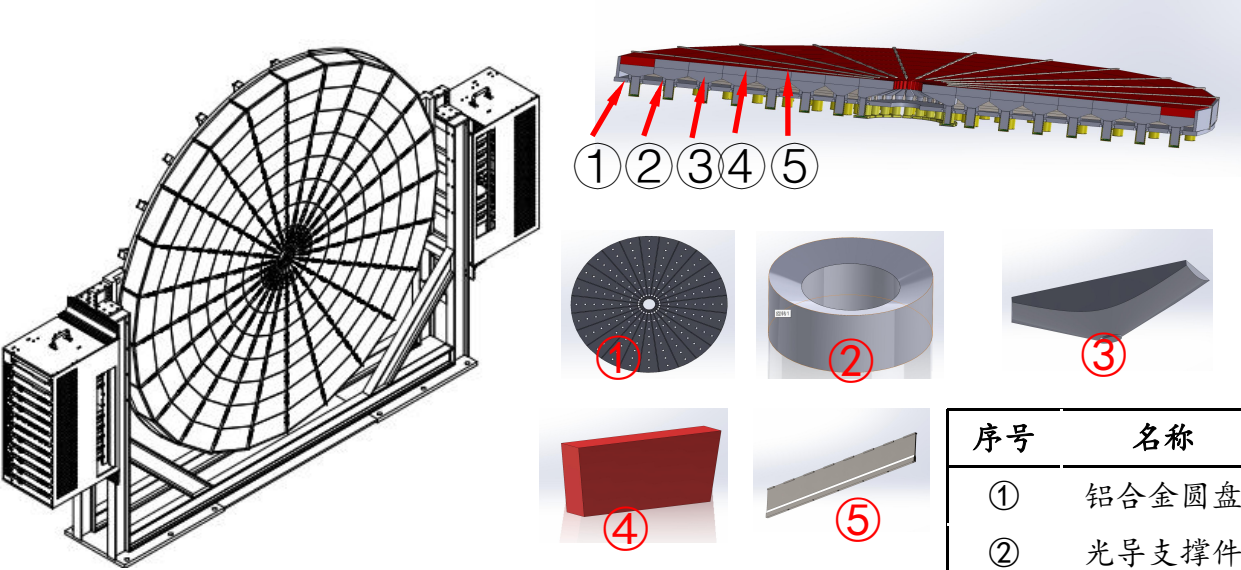


中心度分类纯度和效率对闪烁体厚度(左)、探测效率(中)、能量分辨率(右)的依赖



一阶事件平面分辨率对闪烁体厚度(左)、探测效率(中)、能量分辨率(右)的依赖

- 基于设计方案进行模拟，分析了ZDC物理性能对闪烁体厚度、探测效率、能量分辨率的依赖
- 探测器能量分辨率较高时，中心度分类效率高，时间平面分辨率较好。
- 当闪烁体厚度为4 cm时、事件平面分辨率较好
- ✓ ZDC探测器模块中闪烁体的厚度设计为4 cm

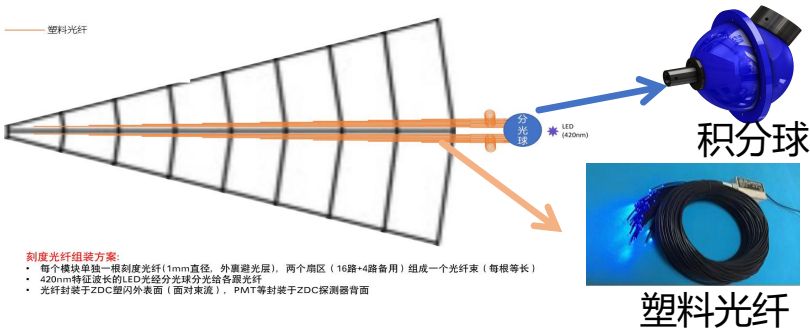


ZDC机械结构

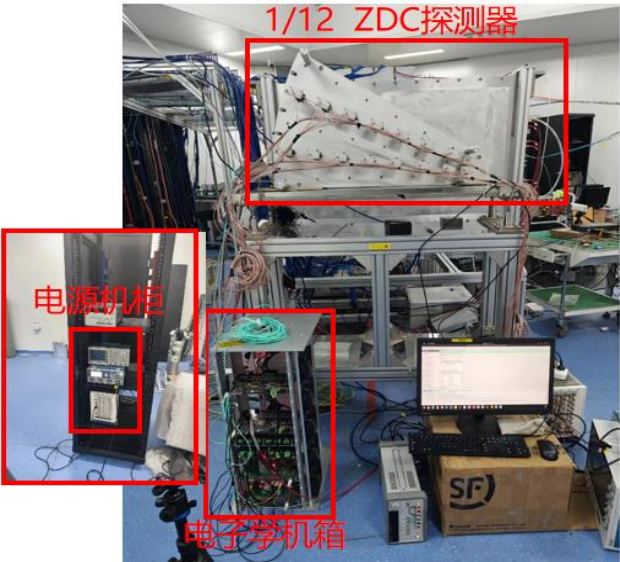
序号	名称
①	铝合金圆盘
②	光导支撑件
③	光导
④	塑闪
⑤	不锈钢压条

- 完成了ZDC主体结构的工程方案设计，包括支撑结构和电子学机箱的设计
- 确定了关键材料，塑闪(EJ-200)→光导(航天有机玻璃)→真空光电倍增管(滨松R3478)
- 刻度方案的设计：监测探测器的性能

探测器研制单位：华中师范大学物理学院

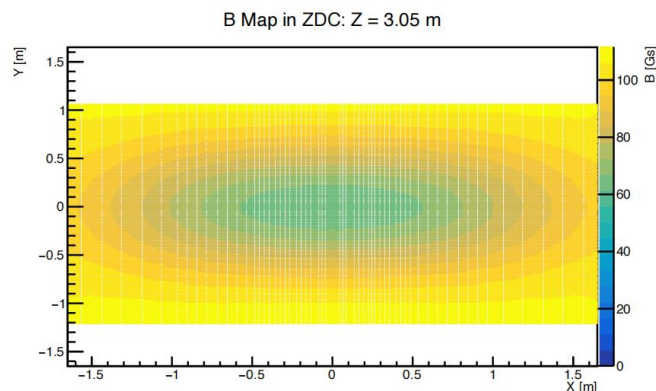


LED刻度方案

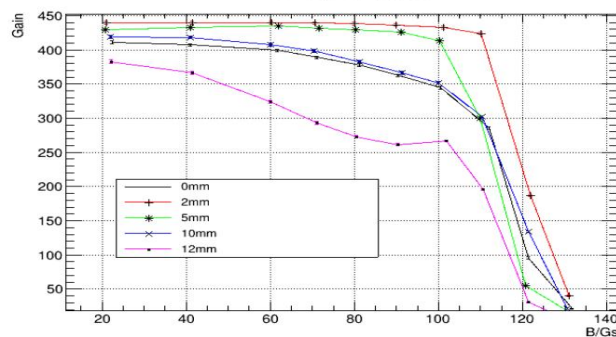


ZDC工程样机

研制进展_研制和测试(抗磁和反射材料选择)



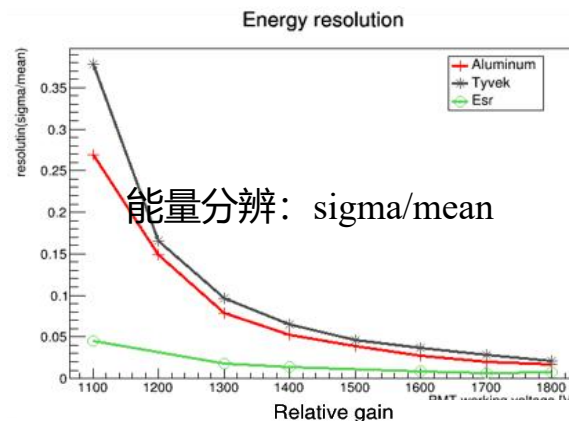
ZDC探测器PMT第一打拿极所在位置的磁场分布
Diamagnetic_test



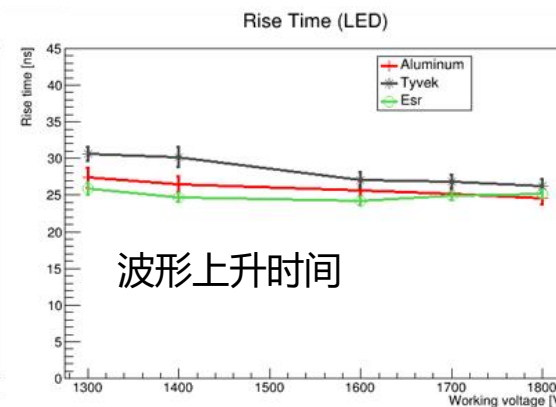
镍铁套筒相对位置对增益的影响

抗磁测试

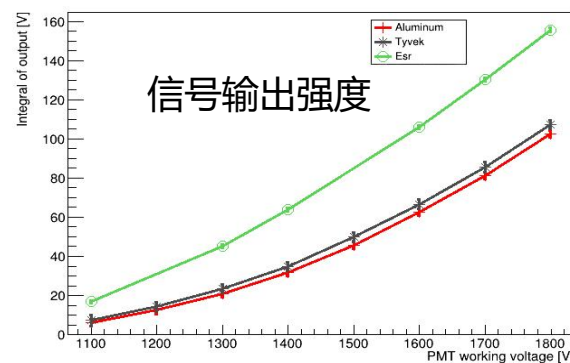
- ✓ ZDC 安装位置的磁场强度约为80高斯，用0.5毫米厚镍铁套筒套住PMT管身，并将镍铁套筒一端伸出光阴窗平面2 mm，并再在外层套上一层碳钢套筒以达到合适的抗磁效果
- ✓ ESR 反射膜的反射性能明显优于铝和杜邦纸，选择ESR反射膜作为反射材料



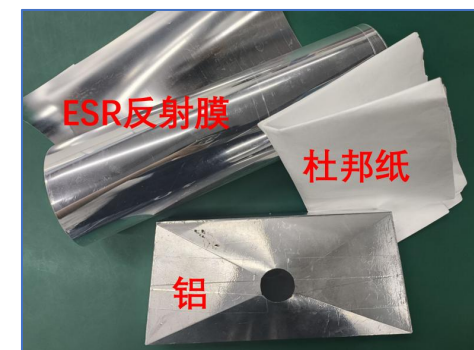
能量分辨: σ/mean



波形上升时间

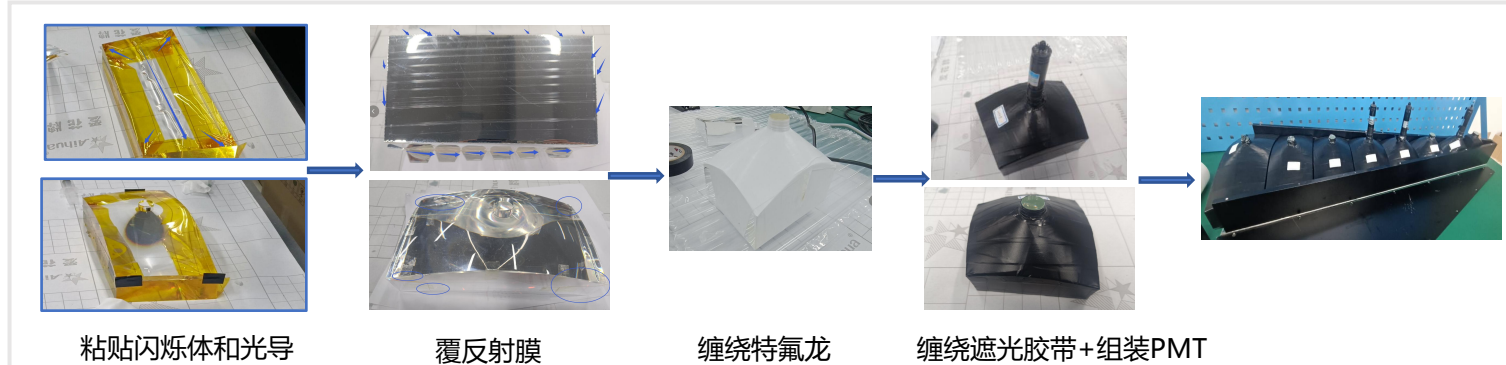


信号输出强度

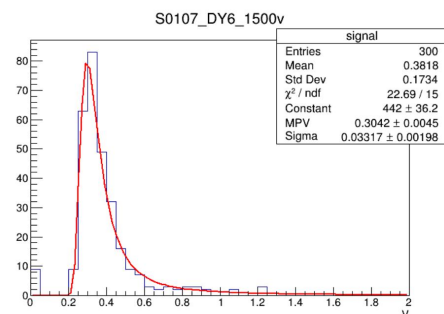
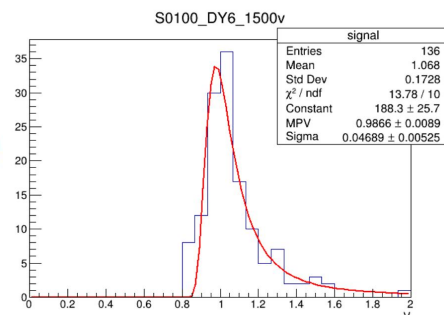
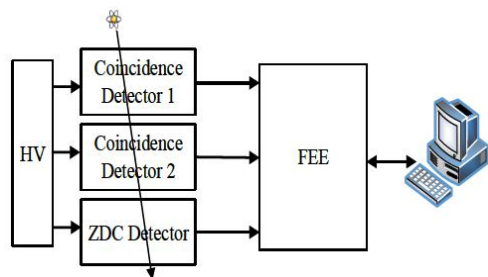


反射材料反射性能对比

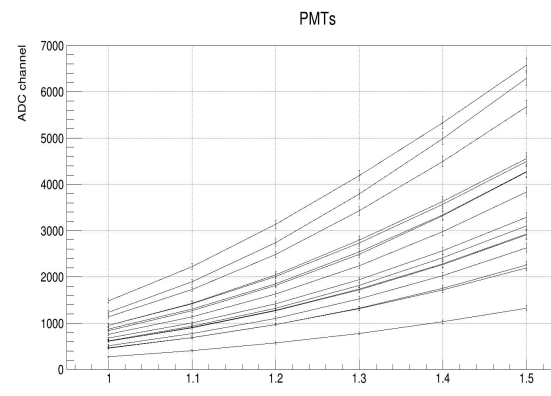
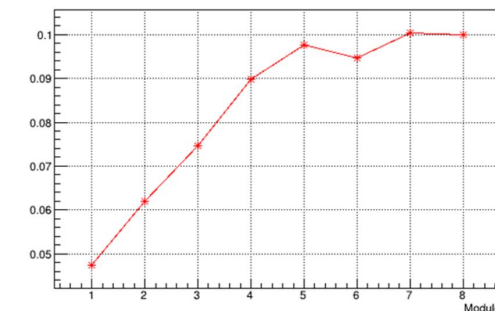
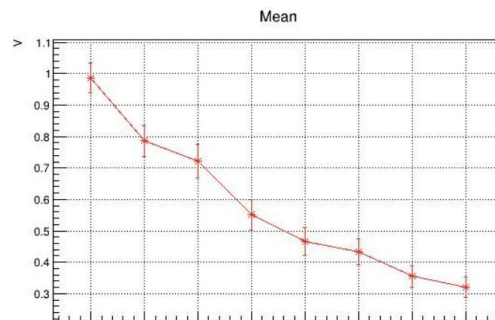
研制进展_研制和测试(组装和单模块测试)



组装流程



符合触发宇宙线测试

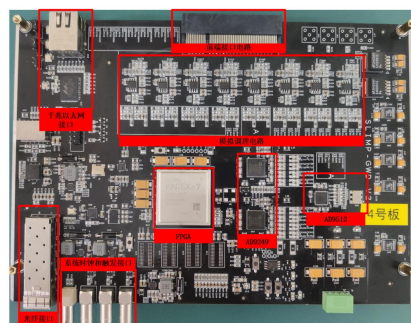


PMT增益测试

- ✓ 定型并**流程化包装工艺**, 严格按照流程包装, 保证探测器模块质量
- ✓ 模块制作完成后需要进行**单模块性能测试**: 遮光、宇宙线测试、增益测试等

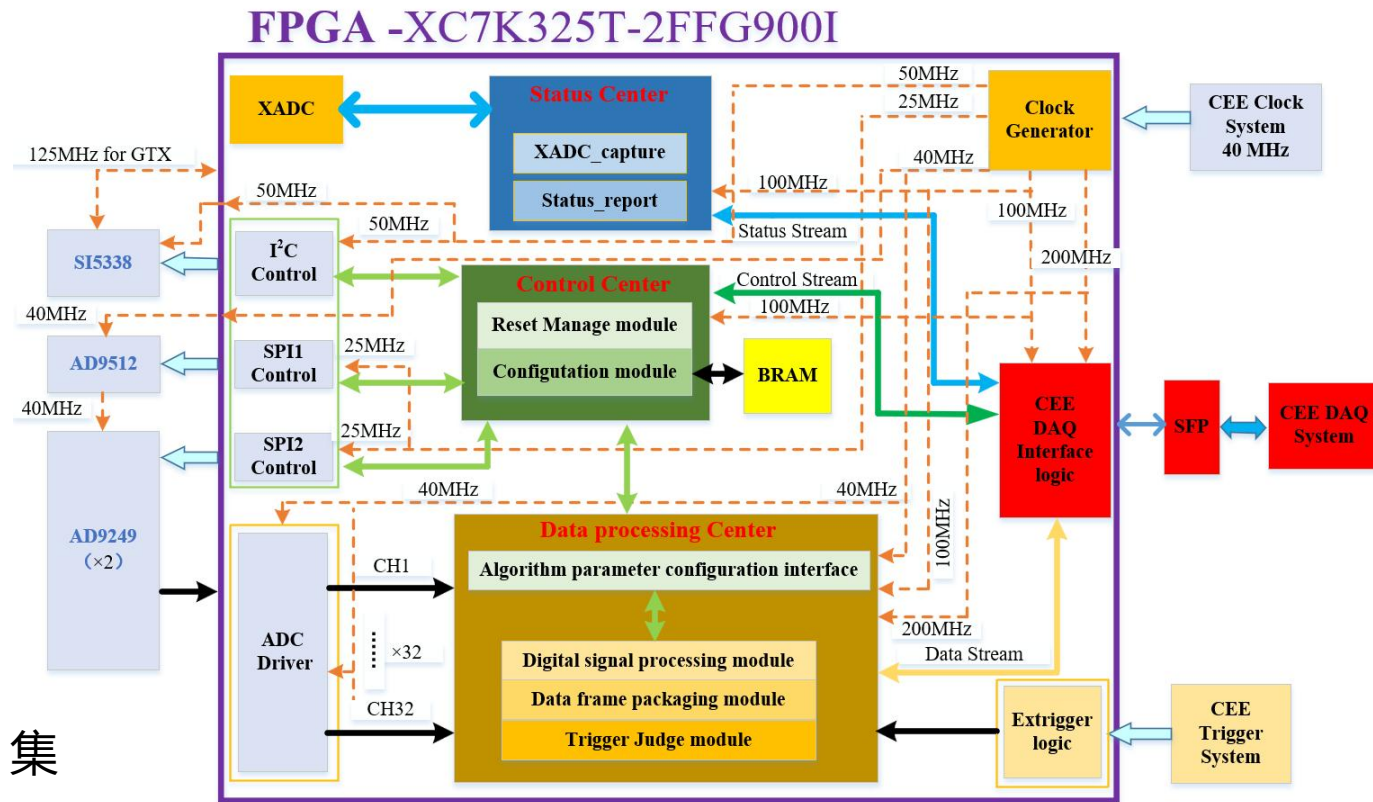
- ✓ 探测效率高于95%
- ✓ 探测器模块的能量分辨率优于10%
- ✓ PMT增益测试用于能量刻度

主要组成：电荷灵敏前放(CSA) + 数据读出与控制电路板(RCU)

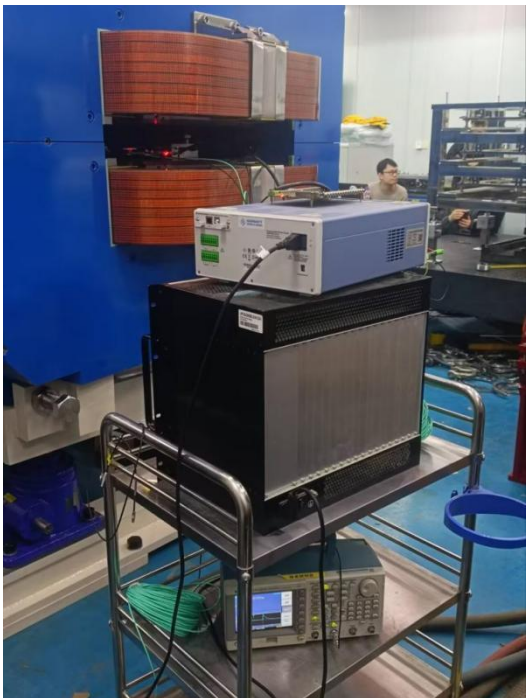


前放模块和读出与控制电路板

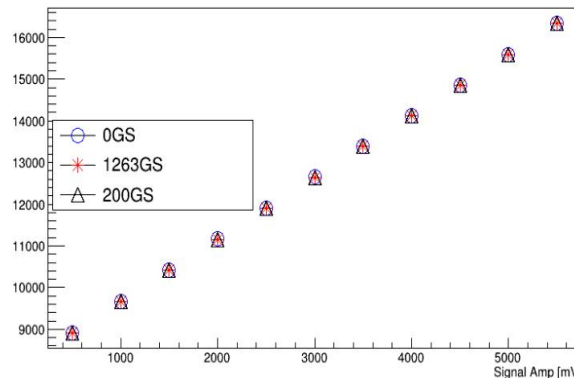
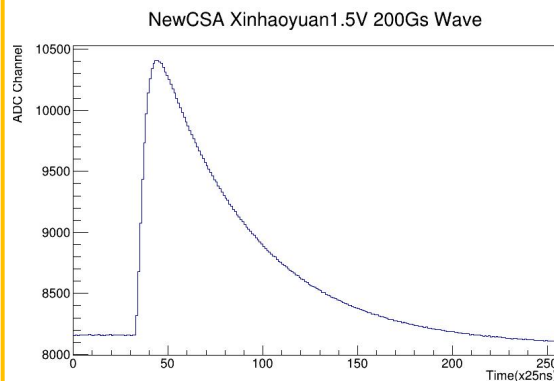
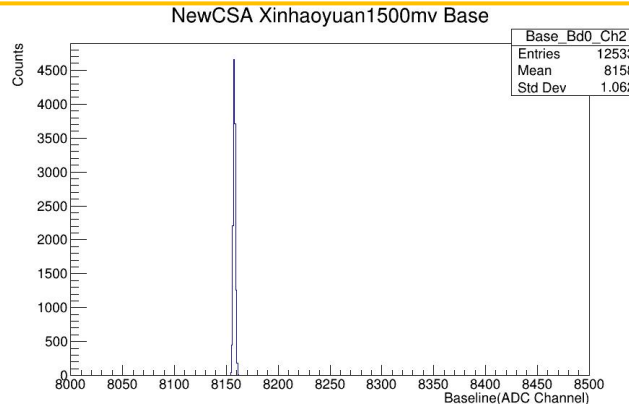
- CSA对PMT输出脉冲信号积分和放大
- 多种可远程在线配置模式
 - ✓ 采集模式：全波形 / 峰值
 - ✓ 触发模式：自触发 / 系统触发
- 32通道14bit ADC连续波形采样（单块RCU）集成在线算法数字信号处理
 - 上升沿检测 / 多点数字滑动滤波器
 - 在线峰值检测 / 多重数触发逻辑判选 / 堆积识别



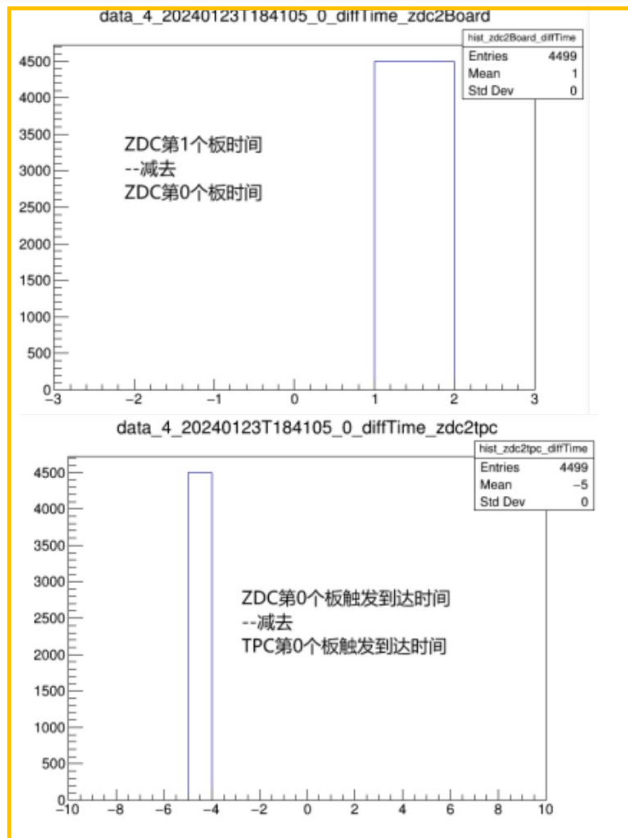
读出控制单元逻辑框图



电子学抗磁测试



电子学采数、基线、线性

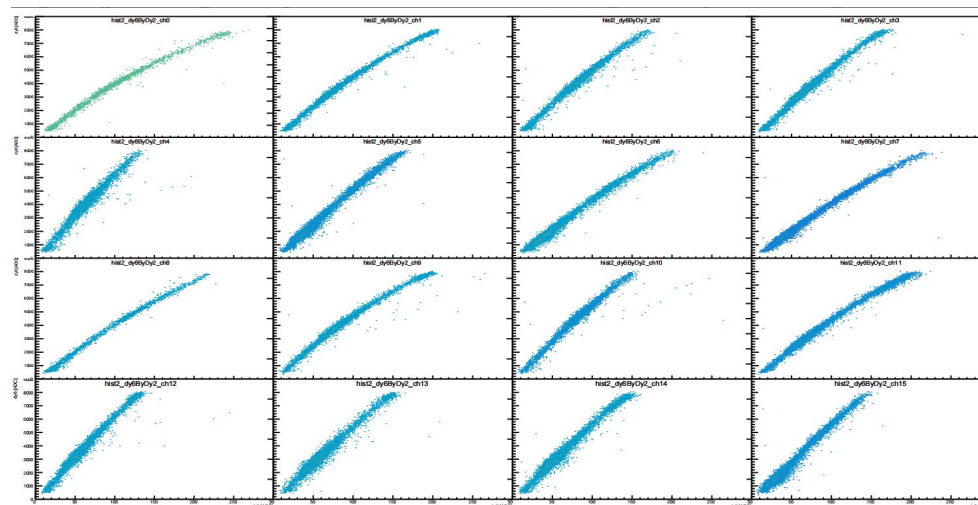


RCU时间戳对齐分析

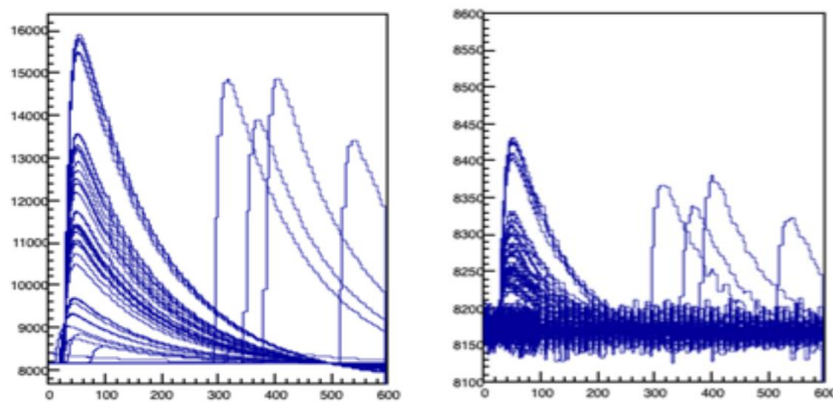
- ✓ RCU和CSA在1.3特斯拉的强磁场环境下正常工作，保持稳定的基线和良好的线性
- ✓ 电子学接入CEE系统之后能正常工作，能够实现预期的功能



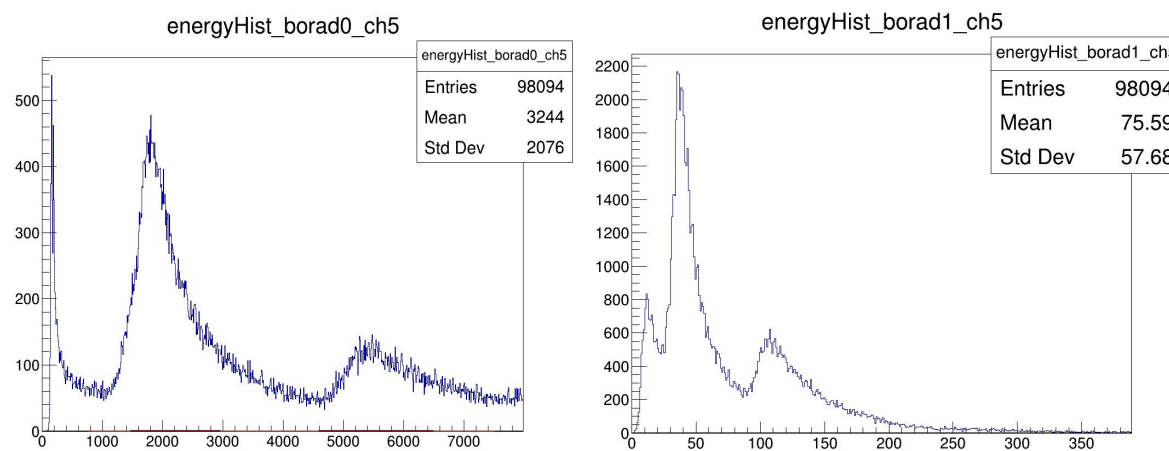
2024年5月束流测试现场(350MeV Kr+Fe)



PMT第6打拿极与第2打拿极信号输出关系



束流测试波形：DY6波形(左)、DY2波形(右)



束流测试能谱：DY6能谱(左)、DY2能谱(右)

总结和计划

➤ 总结:

- ✓ CEE实验计划于2024年底完成系统总装，并于2025年开展实验取数
- ✓ 设计了CEE-ZDC探测器的结构并开展了物理模拟，ZDC探测器将为CEE实验中核核碰撞事件提供高分辨率的事件平面重建和高效率的中心度确定
- ✓ 已完成ZDC探测器及其读出电子学工程样机的设计与研制，其在宇宙线和束流测试中运行稳定，探测器各项性能达到设计指标

➤ 计划:

- ZDC将于2024年年底完成批产及联调，按时完成CEE系统集成

Thanks!