



中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

CIAE先进探测技术与高能物理研究进展

李笑梅

代表CERN/ALICE-CIAE探测技术联合实验室

中国原子能科学研究院

2026年4月21日



目 录

01 探测器研制

02 电子学研发

03 ALICE探测器升级

04 ALICE物理分析

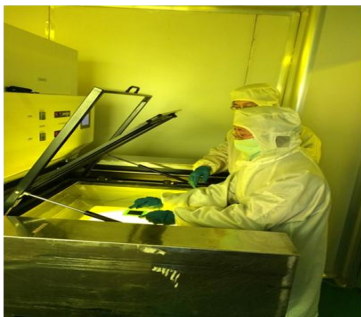
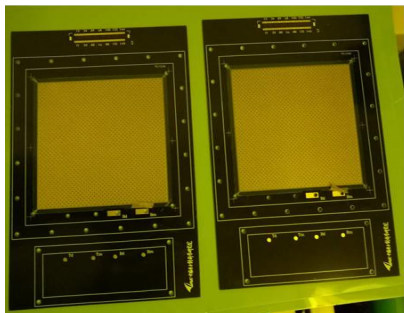
05 研究团队与实验室建设

06 总结与展望

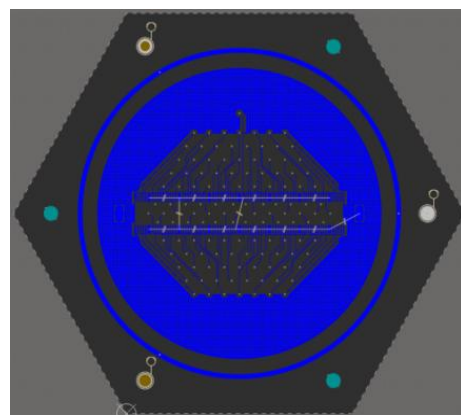
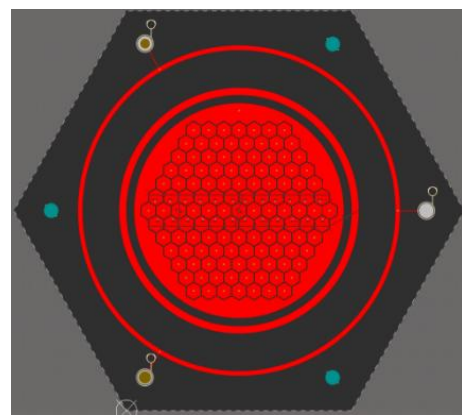
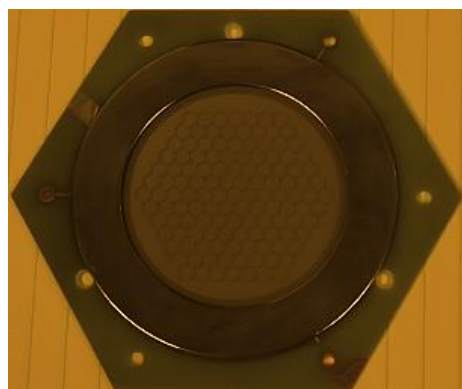
01

探测器研制

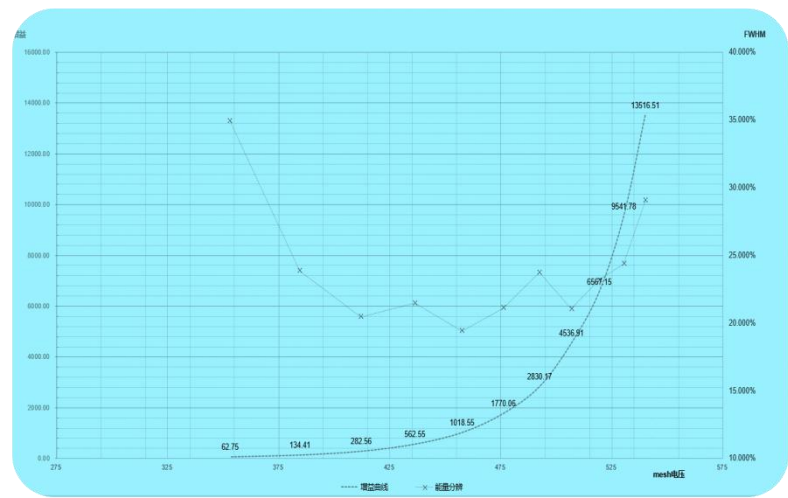
- **首次完成光刻一体化微结构探测器研制，全部工艺国产化并能够进行小批量生产。光刻一体化微结构探测器和传统的微结构探测器相比，具有更好的增益均匀性和分辨率，指标超过欧洲核子中心给出同类探测器标准值。已通过成果鉴定，获得中核集团科学技术奖。**
- **解决多个影响高端探测器性能的问题，掌握大面积、低功耗、低质量光刻一体化微结构探测器关键瓶颈技术；申请专利13项，获得国际专利一项，拥有自主知识产权，现已经成为我国光刻微结构探测器自主研发的中坚力量。**



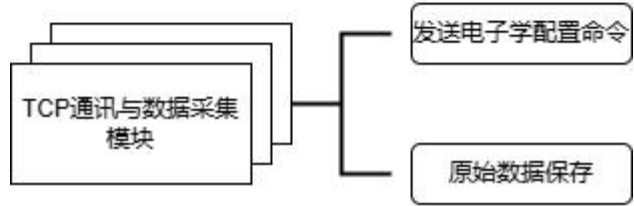
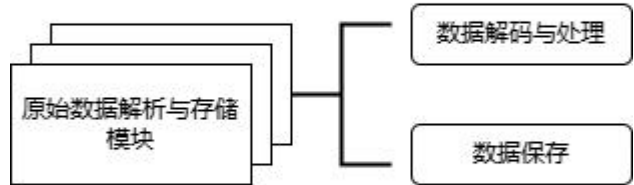
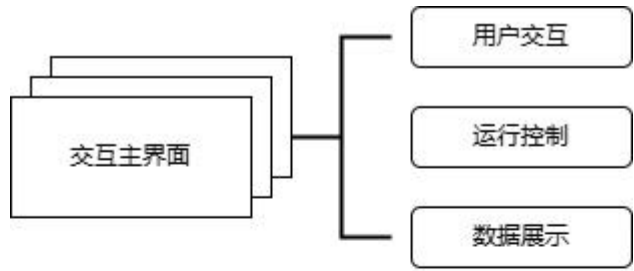
实物图



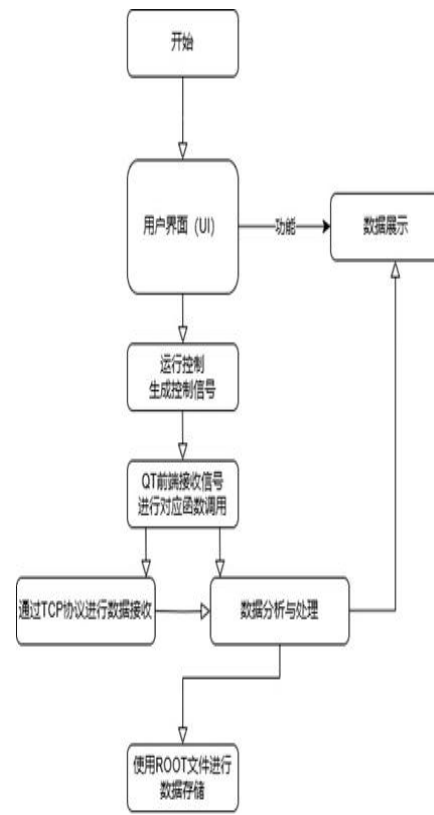
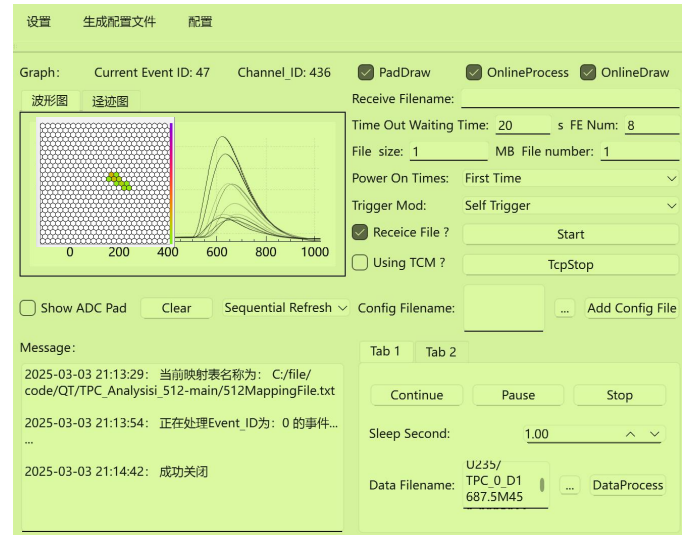
PCB设计图，正面（左）背面（右）



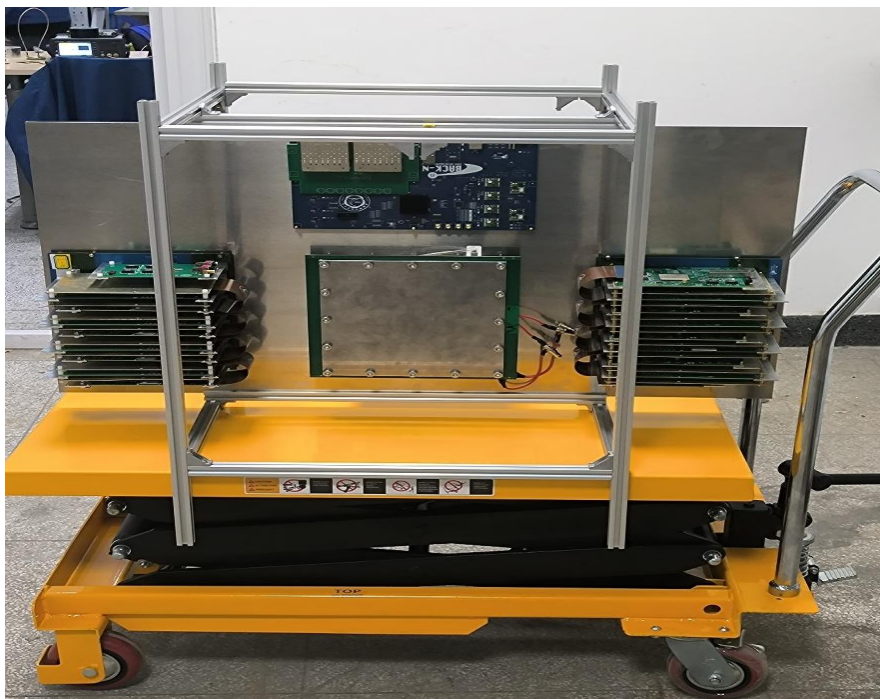
- 对5.9keV的 γ 射线能量分辨率约19%
- 增益10000倍以上



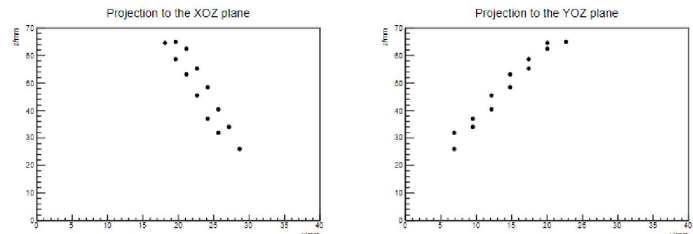
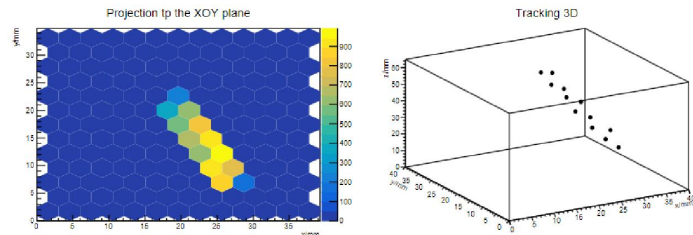
- 基于QT和Root
- 电子学参数控制
- 数据获取
- 数据的在线显示和离线分析



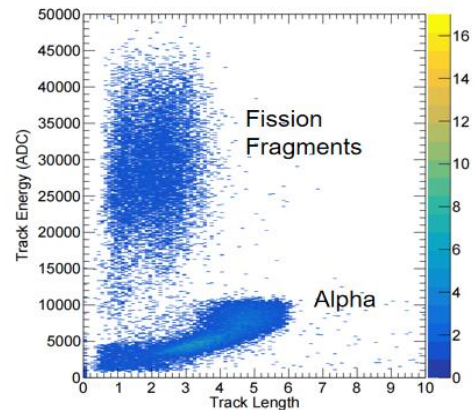
建立三维时间投影仪并进行裂变实验研究

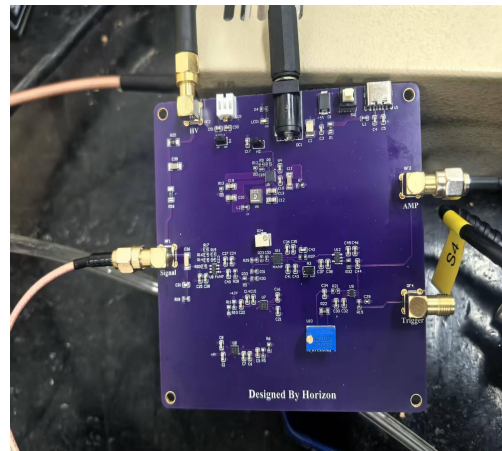
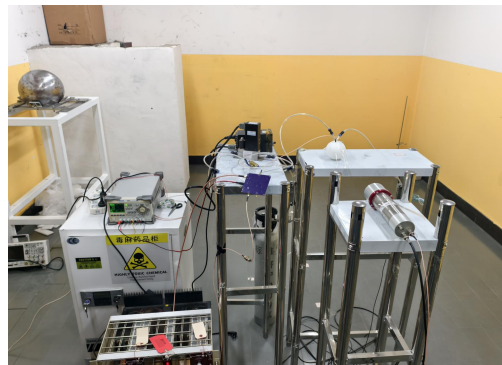


径迹重建



粒子鉴别



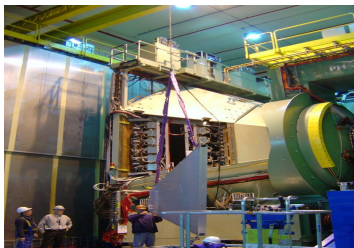


- 电离室和电子学均为实验室自主研发
- 在兰州大学进行快裂变电离室探测器-电子学系统能量和时间分辨测量，电子学性能远好于142B，上升沿时间仅为10.8ns
- 使用BaF2和液闪分别进行了时间符合测量，数据正在分析中

- 通过自主研发与国内单位的合作，实现了光刻微结构探测器和相关电子学的自主可控，解决多个“卡脖子”技术。已经为**原子能院计量站、核数据重点实验室、高能所、中国散裂中子源、欧洲核子中心、美国BNL实验室、法国Saclay实验室**等多个单位研制了探测器、读出和测试系统，广泛应用于多种射线成像、中子探测和裂变数据等方向，为多个国家重要项目提供支撑。



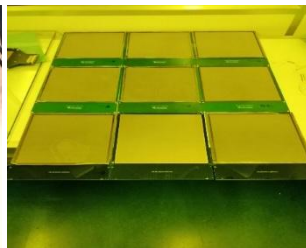
中国环形正负电子对撞机TPC探测器预研和径迹重建研究



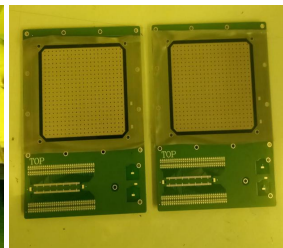
美国PHEIX实验缪子谱仪研制，获得北京市科学技术奖



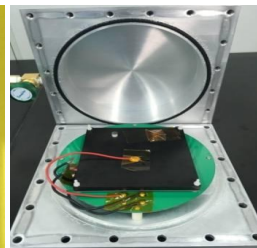
核数据测量专用时间投影室与高集成电子学研制



多种射线成像研究



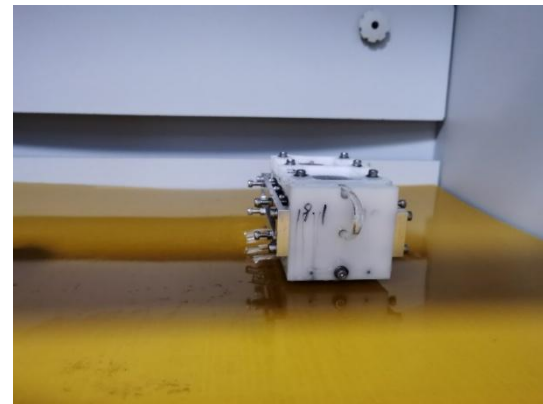
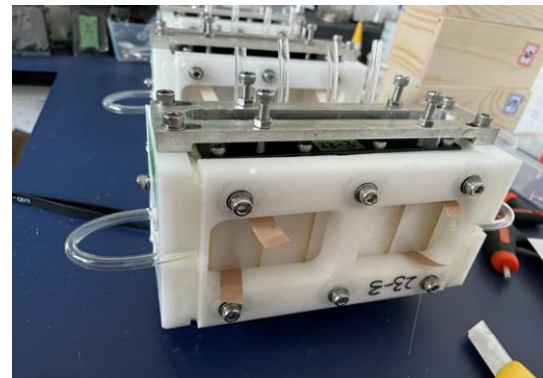
中国散裂中子源束斑监测光刻一体化工艺探测器研制



计量站组织等效正比室读出探测器研制



- 在国家重点研发计划（复旦、北大、原子能院）的支撑下，承担了美国BNL/sPHENIX实验**6.4吨电磁量能器**的研制和生产。。
- 在此基础上，利用国产闪烁光纤和自主可控的探测器技术，实现了**闪烁光纤探测器的国产化**。
- 探测器成品率**97%**（国际平均水平90%），并且具有**批量生产能力**。



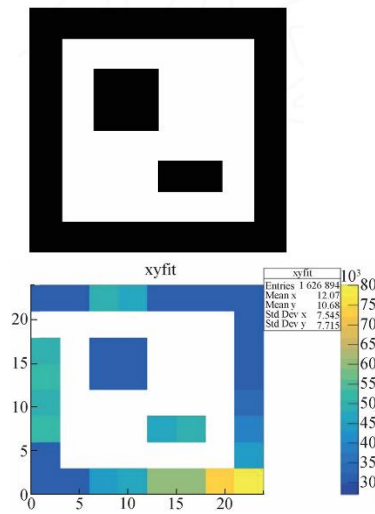
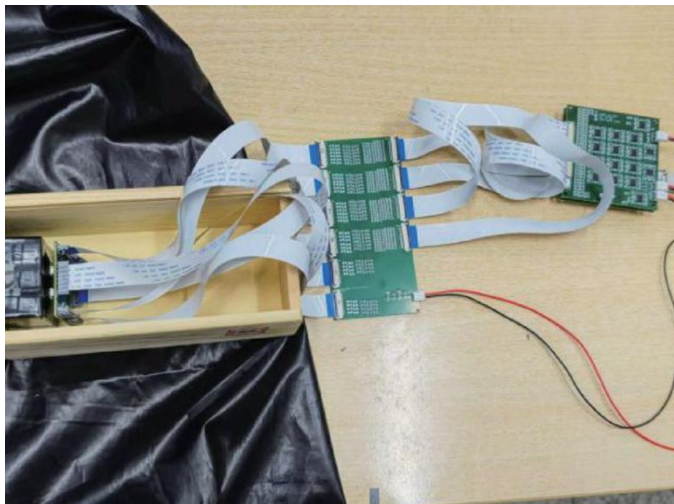
北京研制中心 新型光纤电磁量能器



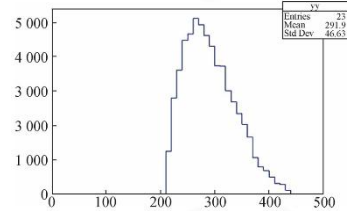
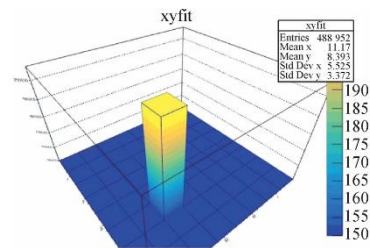
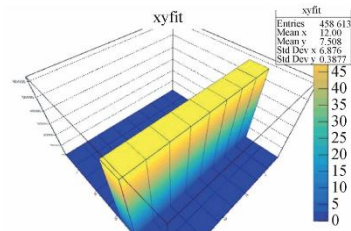
新型闪烁光纤探测器 批量生产



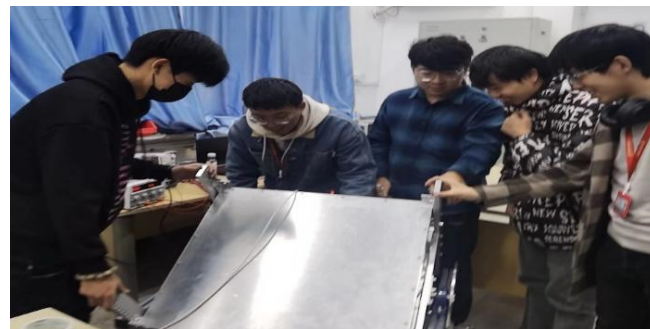
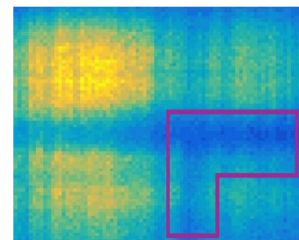
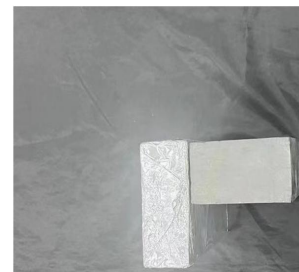
- 利用不同形状遮光层进行了狭缝成像，光成像实验，形状清晰可见
- 使用 ^{241}Am 源进行探测，放置位置可见，并采集 α 能谱



狭缝成像

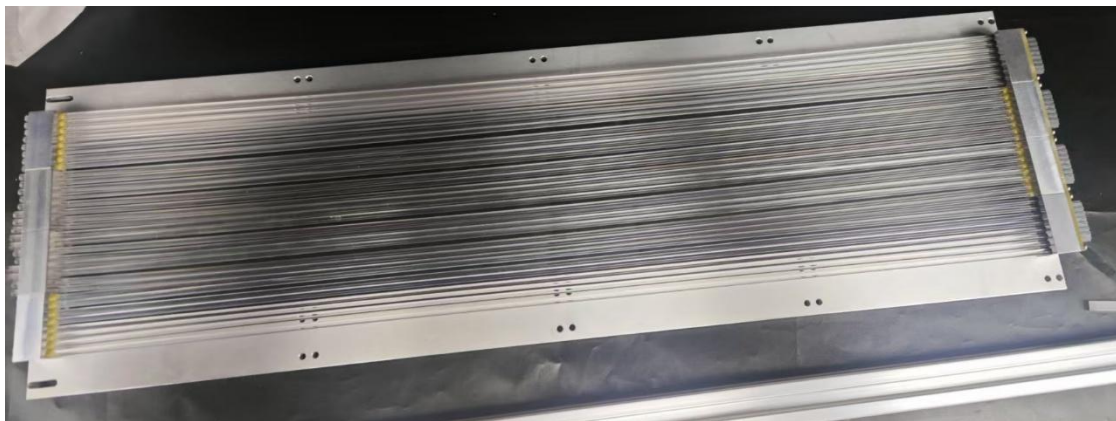
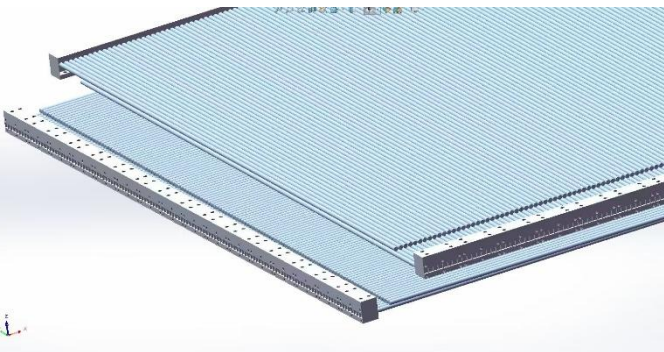
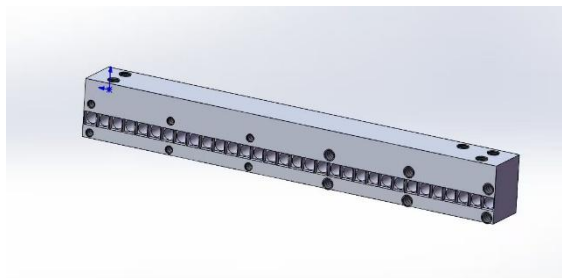


^{241}Am 探测





- 利用塑闪光纤进行高位置灵敏探测器研制
- 进行了小模块的初步组装测试工作，正在进行读出研究





中核集团
CNNC

中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

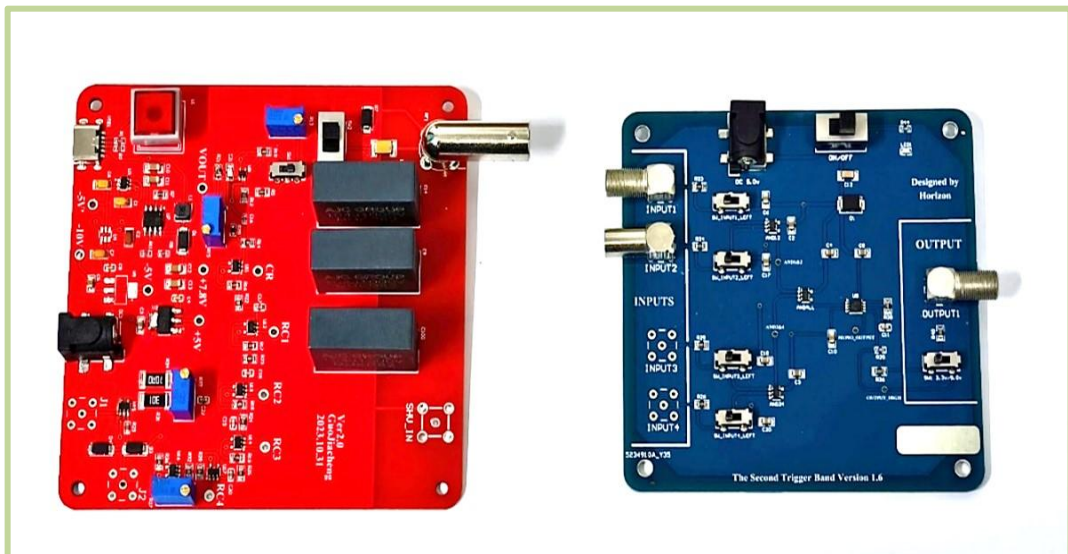
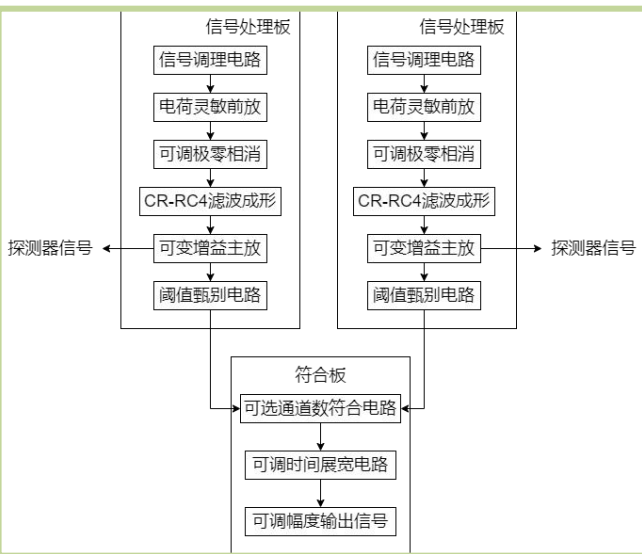
02

电子学研发

1

APVTG 电子学触发系统

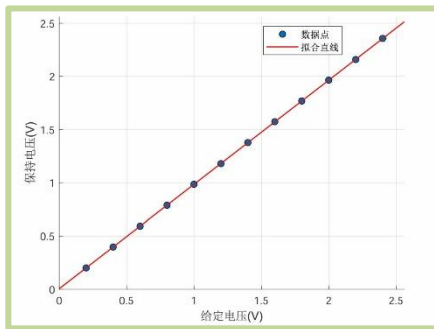
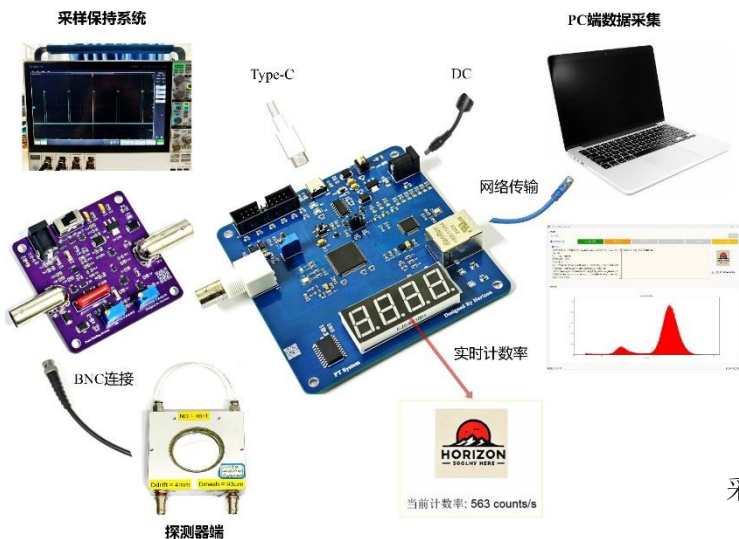
- 四路符合输入，再经过电荷灵敏前放、滤波、主放大器后，经过脉冲幅度甄别单元而后进行符合逻辑运算，输出触发
- 可以对触发电平的宽度进行调整，系统工作在连续触发的模式下



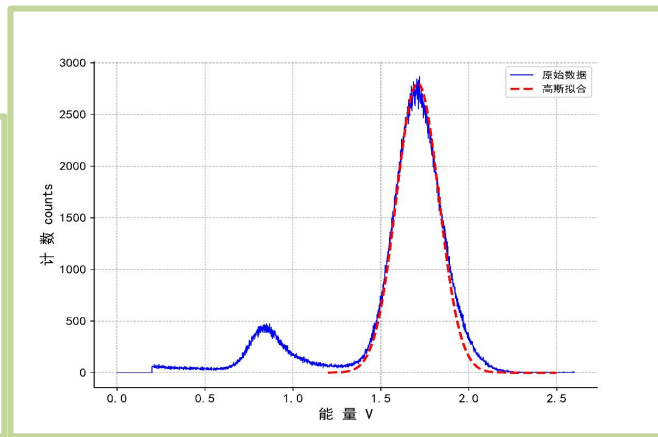
2

ARM架构电子学系统

- 峰值保持+系统核心采集系统+PC端数据采集软件+实时计数获取
- 线性相关系数R2: 0.9999, 积分非线性: 0.061%
- 平均计数率: 550 Sample/s, 整机功耗1.395W



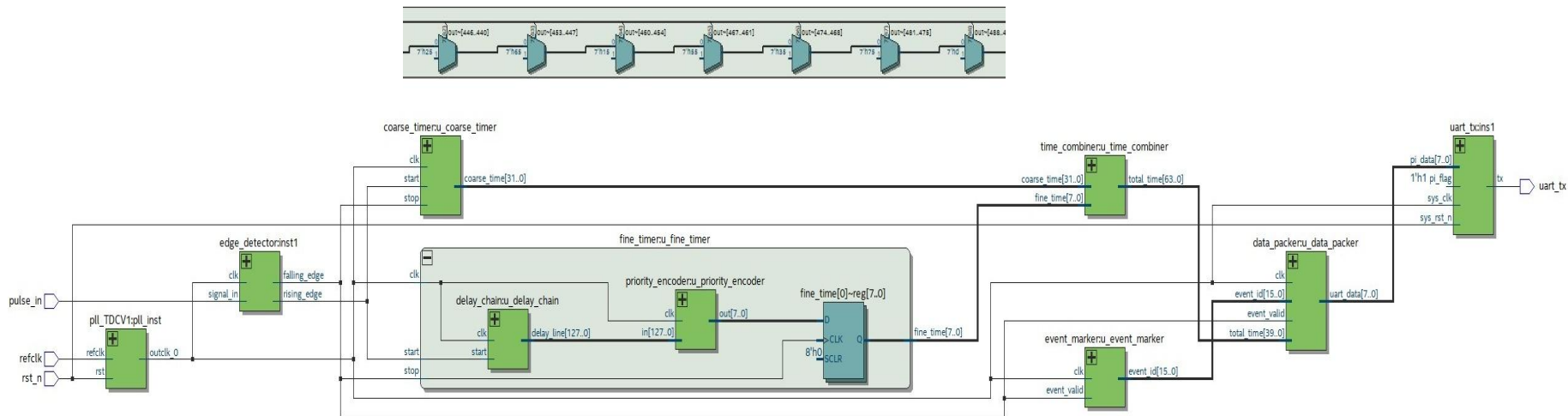
采样保持系统&数据采集系统线性度



55Fe @5.9kev条件下系统测试能谱图

3 FPGA TDC研究

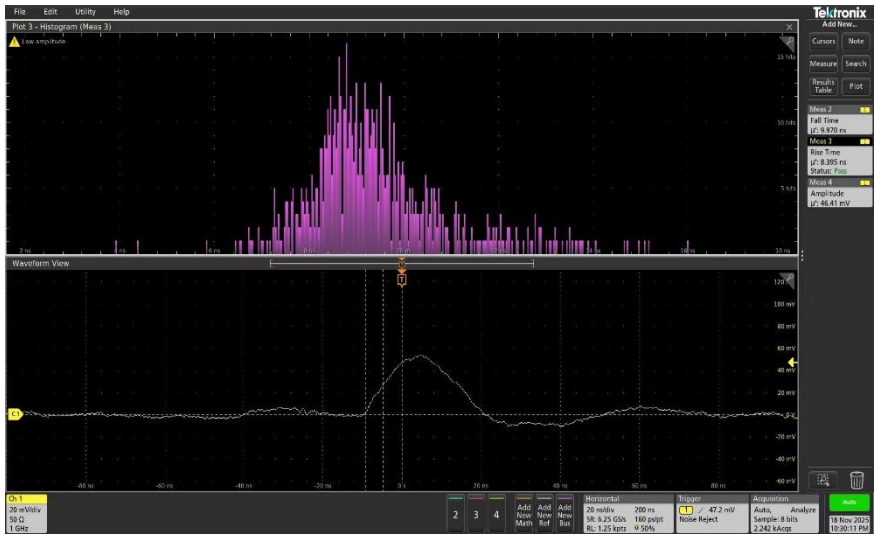
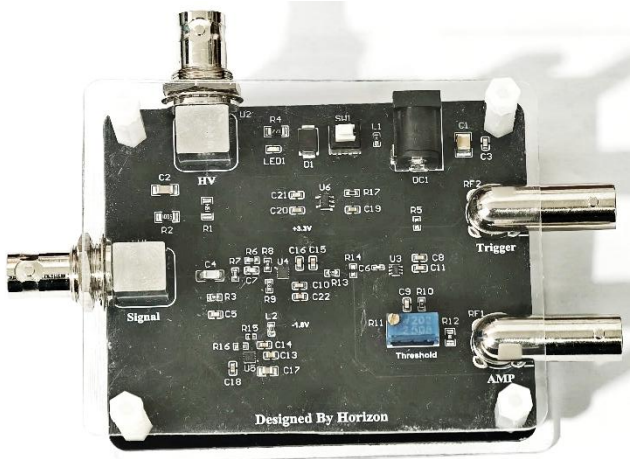
- 粗时间测量 + 细时间插值的高时间分辨、大动态范围的时间数字转换
- 基于FPGA芯片的进位链延时进行延时链构建；单个延时的时间宽度约为58ps





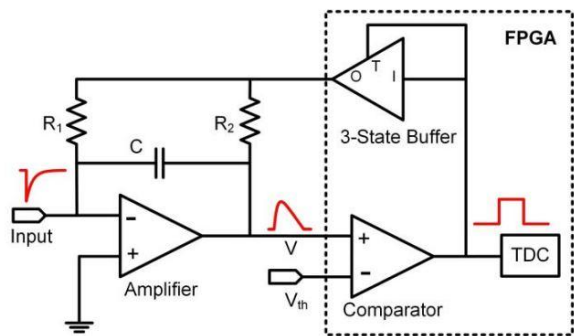
4 快时间分辨裂变电离室前端电子学

- 基于高速定时比较器搭建
- 信噪比良好 ($> 50: 1$) , 能够实现高速定时的功能, 上升沿时间7ns



5 FPGA线性放电法 多通道SiPM读出电子学

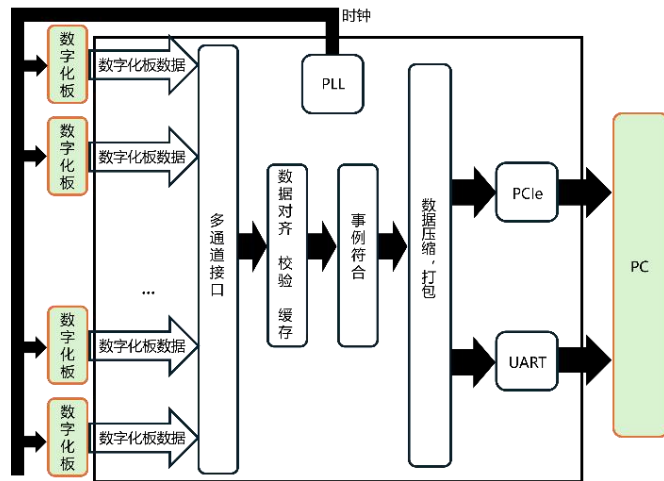
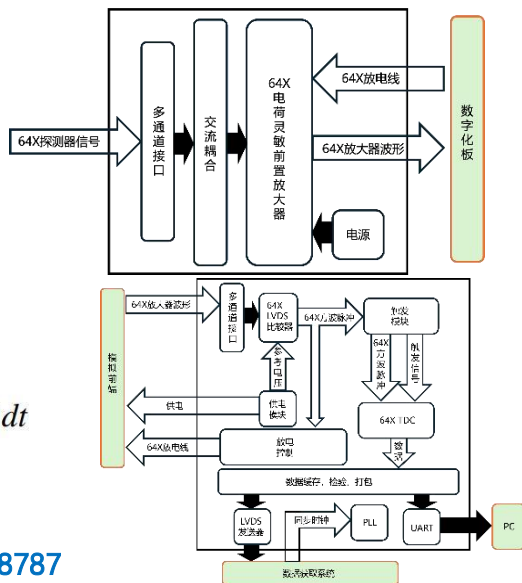
- 模拟前端 + FPGA电荷数字化 + FPGA多通道DAQ
- 最大1024通道数字化, 动态范围百pC, 线性度99%, 通道不一致性小于2%



$$\int_0^{T_{start}} \frac{V}{R_1 + R_2} dt + \int_{T_{start}}^{T_{end}} \frac{U_0}{R_1} dt + CV_{th} = \int_0^{T_{end}} i(t) dt$$

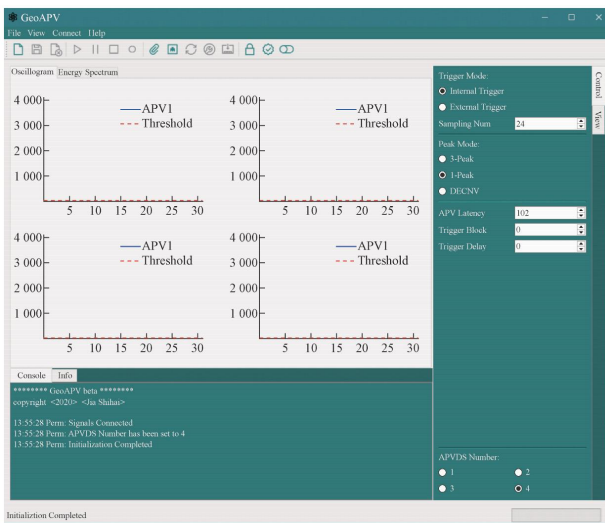
$$\frac{U_0}{R_1} (T_{end} - T_{start}) \approx \int_0^{T_{end}} i(t) dt \approx Q$$

TNS. 2017. 2648787



6 气体探测器高集成电子学

- 128通道芯片模拟前端+ADC FPGA数字化+FPGA多通道DAQ
- 适用于气体探测器，最大2048通道数字化





中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

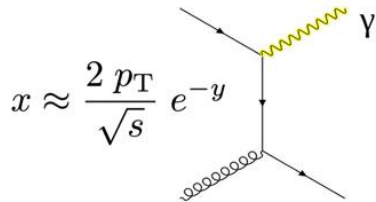
03 ALICE探测器升级

1

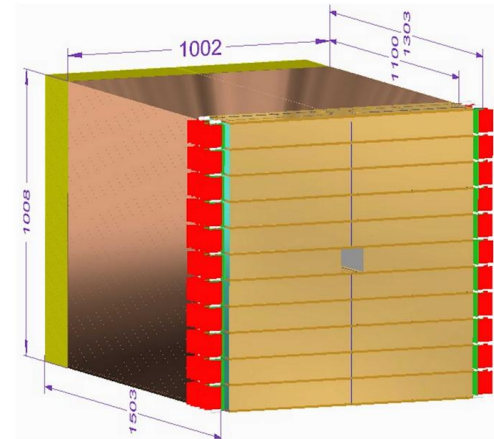
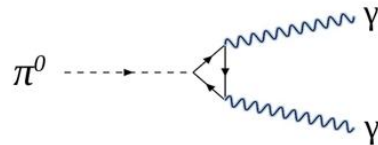
ALICE RUN4 前向量能器 (FoCal) 升级

- FoCal物理目标为前向区域**小-x物理**
- 孤立光子作为部分子分布函数 (PDFs) 的探针
- 存在 π^0 衰变背景, 需要双光子区分

Isolated photons (signal)

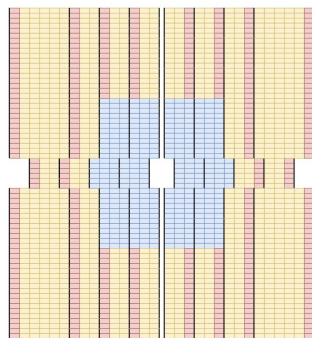
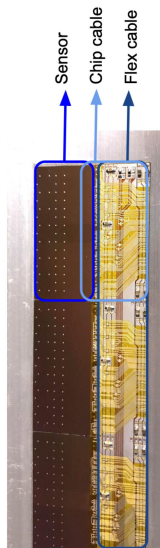
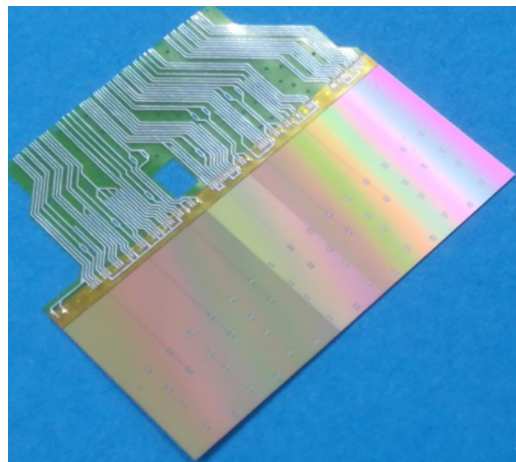


π^0 decay (background)

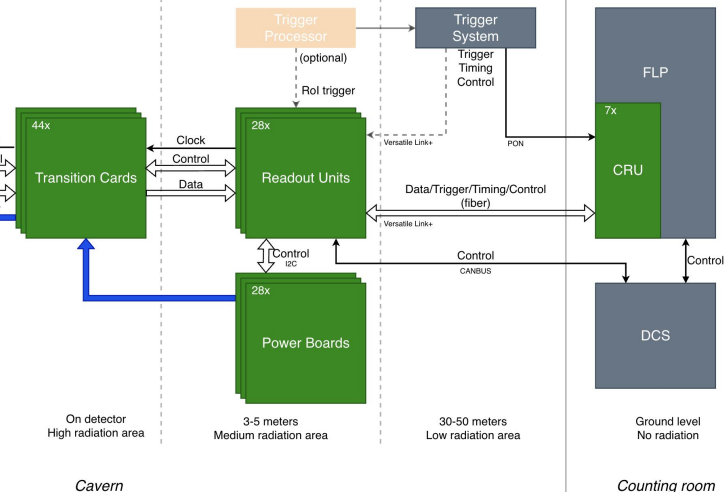


2 FoCal-E 像素层探测器及读出电子学

- ALPIDE芯片尺寸: $3 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 1024 x 512 pixels 像素尺寸 ~ $30 \times 30 \mu\text{m}^2$
- FoCal 像素层ALPIDE分别工作在三个模式
- 相比内径迹系统, FoCal读出链路采用全新的IpGBT和VTRX+以及KCU085

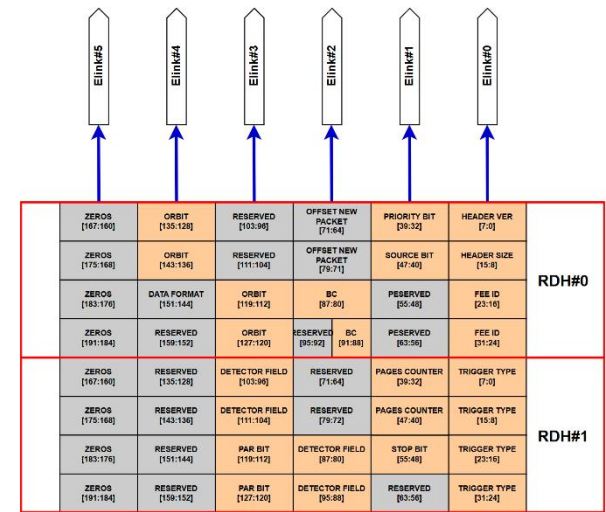
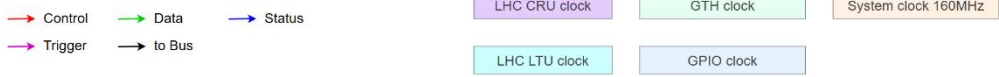
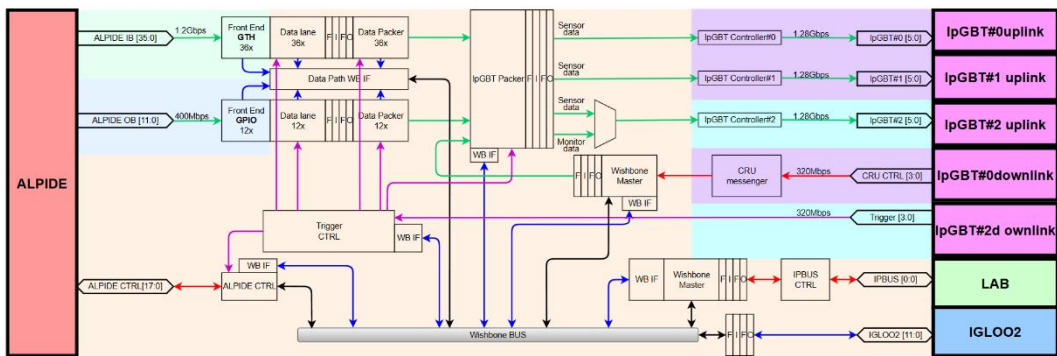


ALPIDE modes:
 Inner Barrel
 Outer Barrel Master
 Outer Barrel Slave



3 FoCal-E 像素层读出电子学固件开发

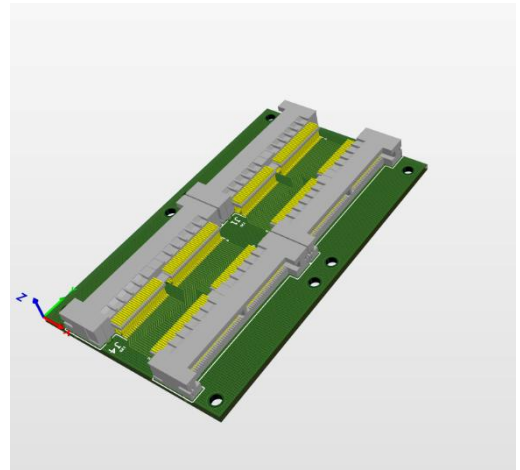
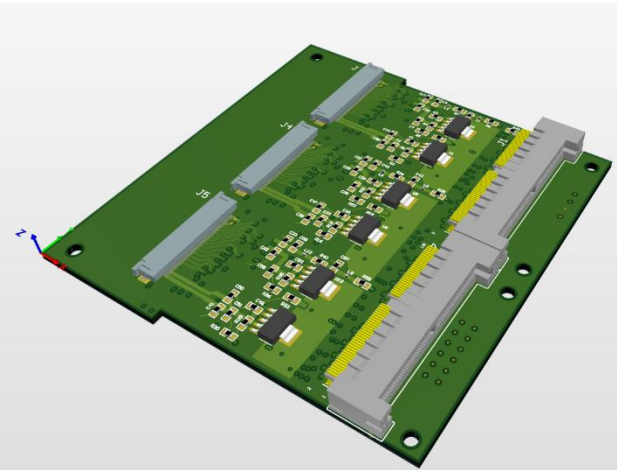
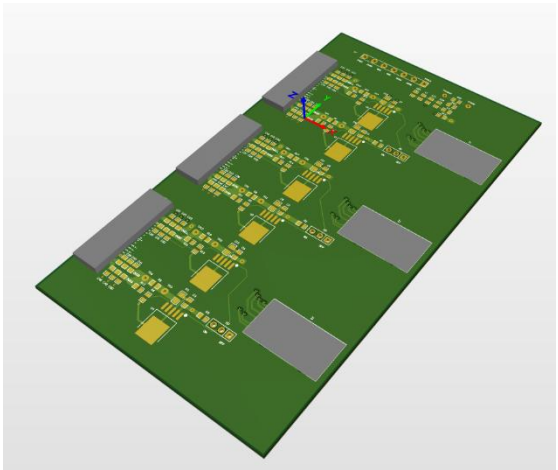
- 像素层读出单元主FPGA功能升级，IpGBT数据打包模块采用分通道直接传输方式，有效提高数据传输系统在辐射环境下的稳定性
- FoCal像素层数据传输格式采用IpGBT协议，确定了上行数据包传输形式和下行触发传输格式





4 FoCal-E 像素层读出电子学硬件研发

- 完成了mini转接板的PCB设计，送至挪威卑尔根大学对现有的FoCal ALPIDE string进行测试
- 完成了FoCal转接板和集线板的PCB设计，针对机械结构要求的变化进行多次改版升级





中国原子能科学研究院

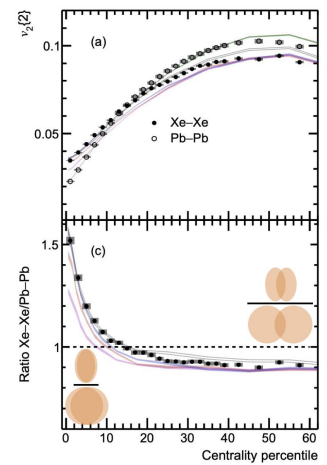
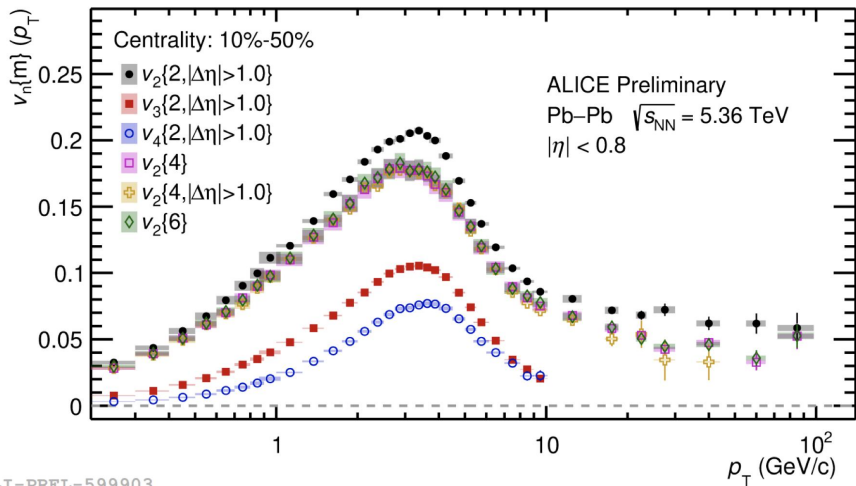
CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

04 ALICE物理分析

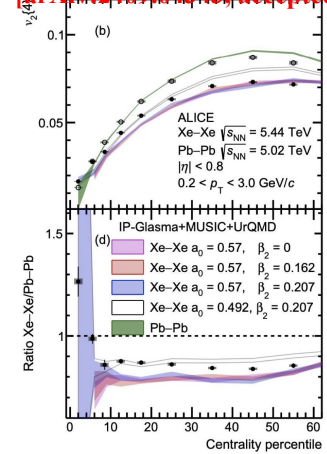
1

LHC ALICE RUN3中Pb-Pb碰撞各向异性流测量

- Run 3 首次各向异性流结果
- 解决 Run 2 与 Run 3 长期不一致问题
- 展示 ALICE 在各向异性流测量中的能力
- 测量扩展到高 p_T



[arXiv:2409.04343, accepted by PLB]

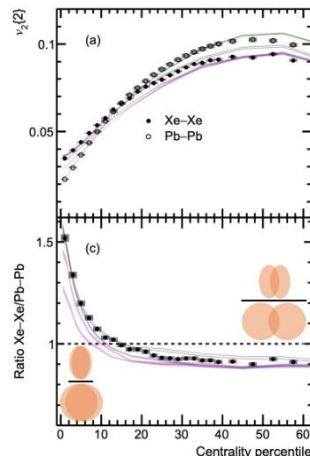
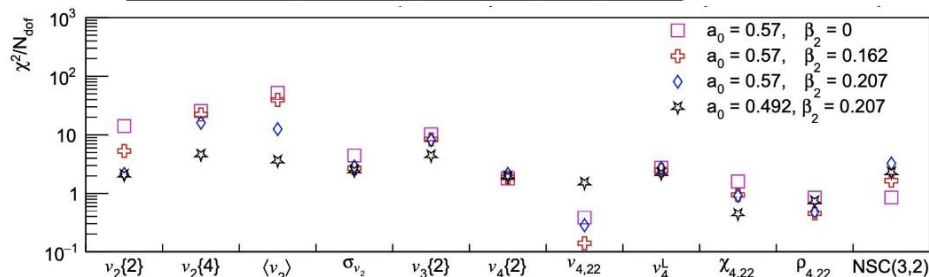


2 LHC RUN3中Xe-Xe碰撞各向异性流测量

- 测量Xe-Xe碰撞下的各向异性流
- 与流体力学模型IP-Glasma+MUSIC+UrQMD对比展示了不同观测量对 ^{129}Xe 核形变参数的敏感性, 为进一步确定 ^{129}Xe 参数提供了实验依据

Nucleus	R_0^{WS} (fm)	a^{WS} (fm)	β_2^{WS}	β_4^{WS}
$^{208}\text{Pb}(\text{default})$	6.647	0.537	0.006	0
$^{129}\text{Xe}(1)$	5.601	0.492	0.207	-0.003
$^{129}\text{Xe}(2)$	5.601	0.57	0.207	-0.003
$^{129}\text{Xe}(3)$	5.601	0.57	0.162	-0.003
$^{129}\text{Xe}(4)$	5.601	0.57	0	-0.003

ALICE, *Phys.Lett.B* 869 (2025) 139855





3

LHC RUN3中O-O和Ne-Ne碰撞各向异性流测量

- 利用相似大小的碰撞系统，其比值可以突出碰撞初态的不同
- 椭圆流在O-O和Ne-Ne的不同 \rightarrow ^{16}O 核和 ^{20}Ne 核的形变程度不同 \rightarrow 集体行为 (QGP) 的信号
- 同时在不同模型的对比中我们也发现了次核子结构的大小会显著影响结果

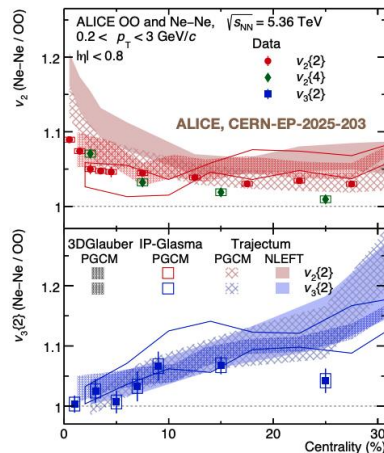
Oxygen



Neon

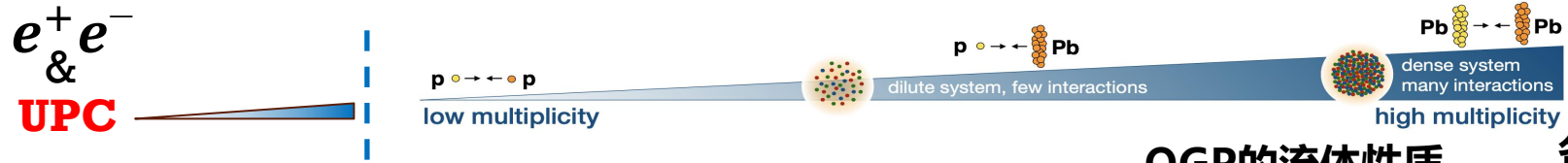


Submitted to PRL

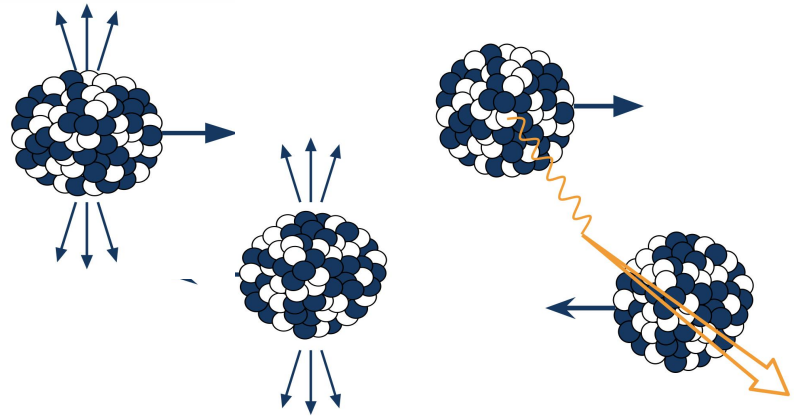


4 ALICE实验中超边缘碰撞系统 (UPC) 的各向异性流测量

已知在pp, p-Pb, Pb-Pb对撞系统中, 存在QGP形成信号

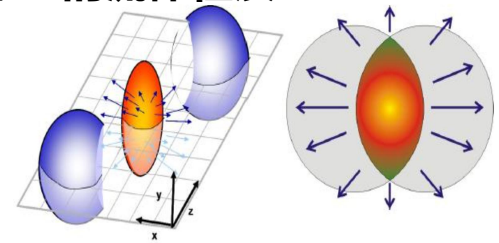


两核子不发生直接接触, 但存在相互作用 (UPC)



QGP的流体性质

各向异性流

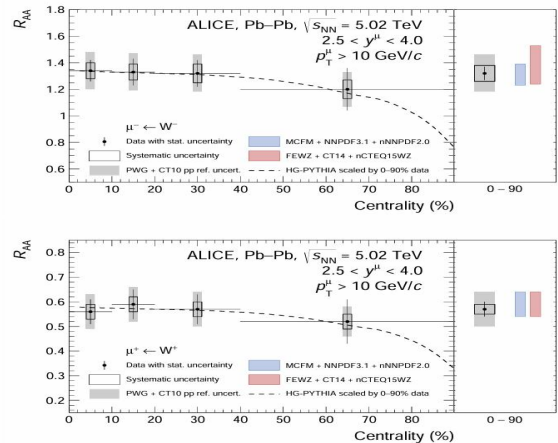
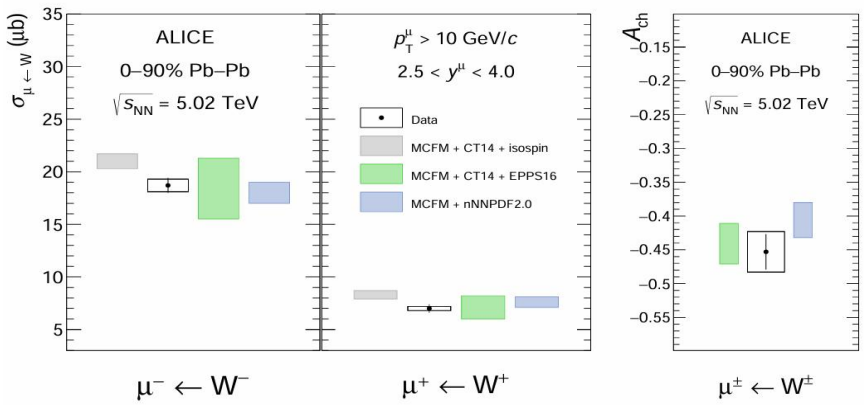


研究目标及意义:

- 测量UPC中的粒子关联函数, 及各向异性流
- 探究UPC中是否存在QGP信号
- 探究重离子对撞中, UPC和电磁相互作用
- 除2019年ATLAS成果外, 极少的工作
- ALICE实验上的首次测量

5 W玻色子测量

- 测量W玻色子在PbPb对撞中前向快速区域的核修正因子
- 测量W玻色子在PbPb对撞中前向快速区域的截面
- 在LHC能量下利用各向异性流研究核结构进行升级后的ALICE实验数据分析，同时将这些先进的分析方法应用到中低能核物理实验中，并进一步加强机器学习等人工智能方法在数据模拟与分析中的应用。





中国原子能科学研究院

中核集团
CNNC

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

05

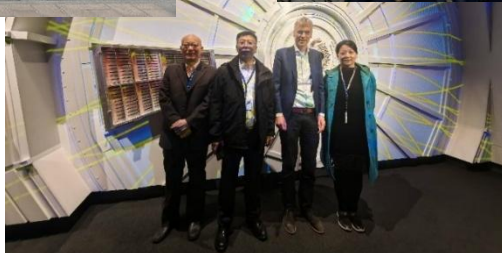
研究团队与 实验室建设



- 团队目前由科研人员和青年学生组成约二十人组成。大部分成员有海外学习的经历，大家在实验模拟、探测器研制与测试、实验研究和数据分析等方面各有所长；同时也有享受国务院政府特殊津贴的老一代研究人员。
- 研究方向受到了研究生们的欢迎，在读研究生10余名，多名学生在国际合作中发挥重要作用，在多个国际重要会议上做科研报告，并以第一作者在高水平杂志发表文章和申请专利。

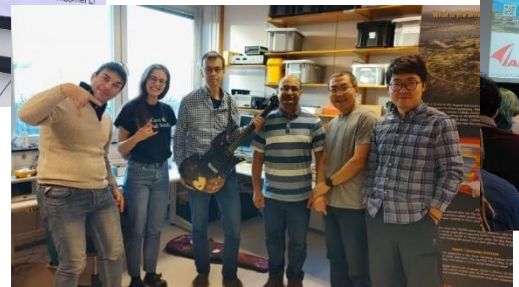
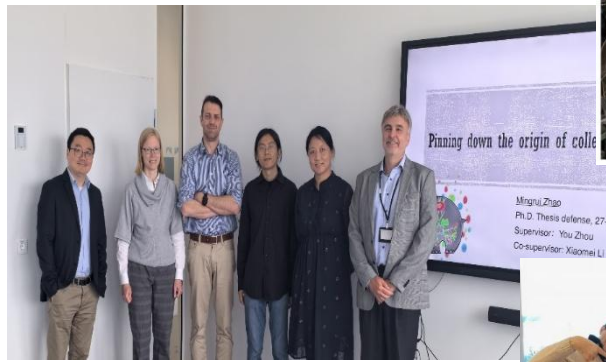


- 原子能院与国际顶尖实验室欧洲核子中心的合作，引起了各级领导的关注，中国核学会、中核集团科访团等都曾访问CERN/ALICE实验，并慰问了原子能院参加ALICE实验人员。
- 欧洲科学院院士、德国物理学会主席、丹麦物理学会主席，CERN/ALICE实验发言人、多个探测器专家访问原子能院。





- 与多个国家联合培养研究生，形成**一支稳定的海外人才后备队伍**，支持各级人才引进计划。
- 以大科学实验国际合作为依托，掌握**顶尖探测器技术**，培养**高端探测器，电子学和物理分析人才**。



ALICE Run Manager (19 Aug - 1 Sep): Peiyu Li



Peiyu is a Ph.D. student from the China Institute of Atomic Energy in Beijing. Previously, she worked on the R&D of Micro Pattern Gas Detectors, focusing on

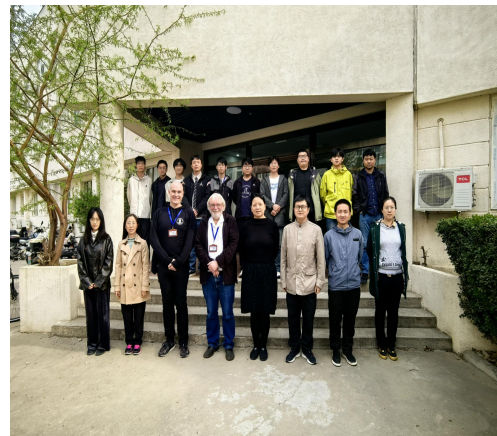
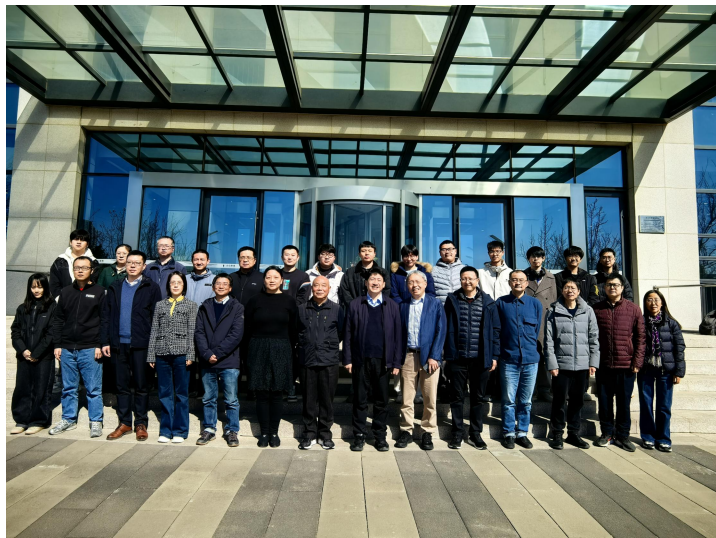


欧洲核子中心（CERN）作为全球最大的粒子物理实验室在夸克-胶子等离子体探测、高精度探测器技术及大规模数据分析领域处于全球领先地位。

基于双方长期高水平合作的背景，原子能院与ALICE实验签署长期合作协议，建立CERN/ALICE-CIAE探测技术联合实验室，于2026年1月28日正式启动。

联合实验室主要研究方向：

- **先进探测器和电子学研发：** 主要研究内容包括光刻微结构探测研制、闪烁光纤高位置灵敏探测器研发、硅像素探测器电子学研发等。
- **先进探测器和电子学应用研究：** 实现先进探测器的国产化，并推动其产业化发展。
- **相对论重离子碰撞实验与数据分析：** 主要方向是相对论重离子碰撞实验分析与物理研究，目前实验室在CERN/ALICE实验多个重要实验数据分析中起核心作用。



- 实验室成立后邀请外宾访问8人次，举办多场讲座
- 主办ALICE实验合作组会议一次，探测器研讨会两次





- 核数据**全国**重点实验室具备**5000多平方米**独立集中的科研及办公场地，在中核北京科技园综合科研楼以研究团队为核心建立了面向高端应用的探测技术联合实验室。
- 实验室地理位置优越，配套设施齐全，附近有多家核仪器公司，方便进行成果转化。



实验室科研办公楼



中核北京科技园综合科研楼



中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

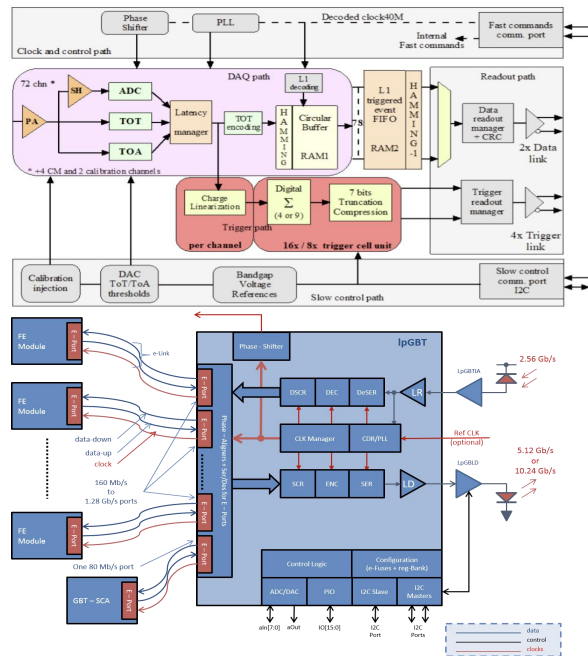
06

总结与展望



- 原子能院中高能物理组在ALICE物理分析，探测器升级上与CERN等国外单位长期合作，**在国际合作组中正在发挥重要的作用**
- 通过国际合作和联合开发的方式，将国内外大科学装置上最先进的探测技术和电子学技术**应用到国家发展的需求中**组内研发了多种探测器，在大科学装置得到了应用验证，并进行了更多应用实验探索
- 组内研发的电子学正在大装置和各种实验上发挥作用

多类型高集成数字化电子学系统



高集成数字化电子学系统研发
 (适用于气体探测器和硅探测器)

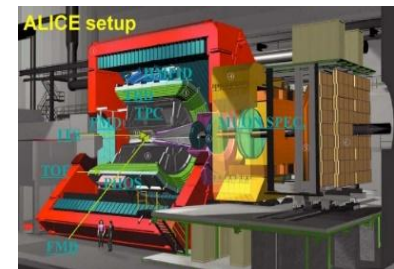
SiPM电子学系统研发
 (适用于闪烁体探测器)

ALICE FoCAL电子学研发
 (适用于气体探测器和硅探测器)

参加的大科学实验国际合作几乎涵盖了**欧美俄中所有的中高能物理大科学实验**，并且在探测器研制和物理研究方面做出具有自己特色的工作，成为中核集团的对外合作的窗口。



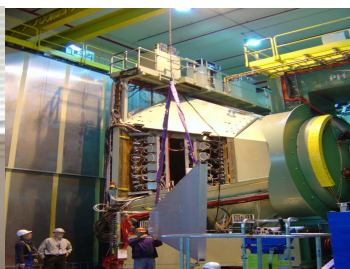
NICA是俄罗斯目前正在建的最重要的大科学装置之一，中国加入NICA项目，不仅会促进科学技术的共同发展，而且也是对中俄双边合作协议的响应。因为我院在探测器研究方面的优势，李笑梅研究员当选为NICA/SPD国际合作实验技术委员会委员。



欧洲核子中心
ALICE实验探测器
合作研究



向法国Saclay所
长赠送微结构探测
器自动测试系统



美国PHEIX实验缪
子谱仪研制，获得
北京市科学技术奖



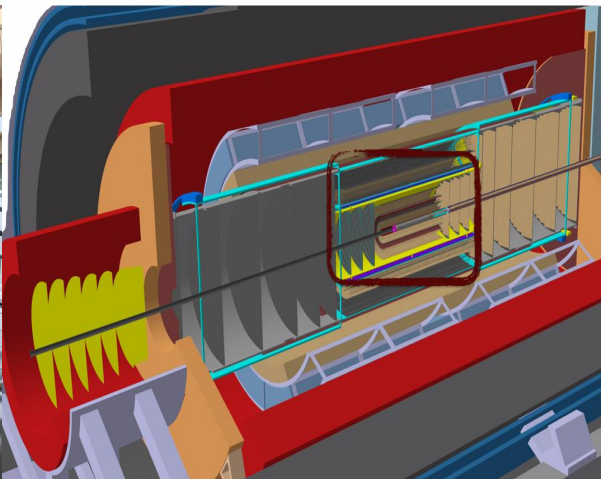
美国BNL/sPHEIX
实验新型电磁量能
器研制与物理研究



美国Jlab实验大面积
GEM探测器与自旋物
理实验合作研究



- 参加ALICE3升级项目中内径迹探测器集成
- 成为国产硅像素芯片的模块集成单位之一
- 发展硅像素探测器的应用





衷心感谢各位专家意见和建议!