



Back-n探测器与电子学

Back-n探测器电子学小组

提纲



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- Back-n现有探测器及物理实验
- 物理需求及探测器需求
- 探测器及电子学进展
- 未来规划

目前开展的物理实验及探测器



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- (n, gamma) : GTAF-II、C6D6、高纯锗
- (n, f) : 裂变室
- (n, lcp) : LPDA、SiC
- 中子照相: CMOS、Micromegas
- 其他: 多球谱仪、液闪、塑闪

未来的探测器升级方案



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- (n, gamma) : **高纯锗阵列**、高纯锗
- (n, f) : **裂变室**
- (n, lcp) : **IPDA**、SiC
- 中子照相: **GMOS**、Micromegas
- 其他探测器谱仪: **液闪导塑** (金刚石、SiC)

高纯锗探测器

反角白光中子源能谱宽：0.3 eV-200 MeV，束流功率相对较强，在宽能区时中子活化的反应道更多，可以更大可能性地得到活化反应特征伽玛。且可以提供高精度的中子飞行时间，适合开展T-PGNAA研究。

瞬发伽玛中子活化分析 (Prompt gamma neutron activation analysis, PGNAA或PGAA) 是一种灵敏的非破坏的核分析技术，具有对各种物质中多种元素的迅速和非破坏性的分析特点，并与仪器中子活化分析具有互补性，应用范围日益广泛。



J-PARC上开展的T-PGNAA研究

实验整体设置图

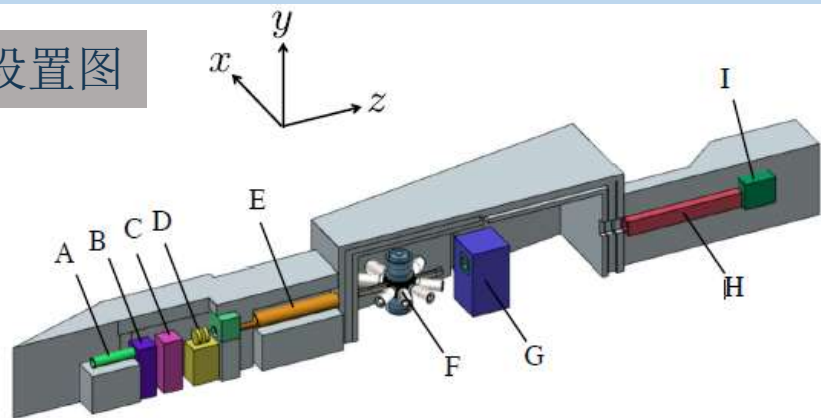


Figure 1. Schematic illustration of the ANNRI installed at the beamline BL04 of the MLF at the J-PARC (A) Collimator, (B) T0-chopper, (C) Neutron filter, (D) Disk chopper, (E) Collimator, (F) Germanium detector assembly, (G) Collimator, (H) Boron resin, and (I) Beam stopper (Iron).

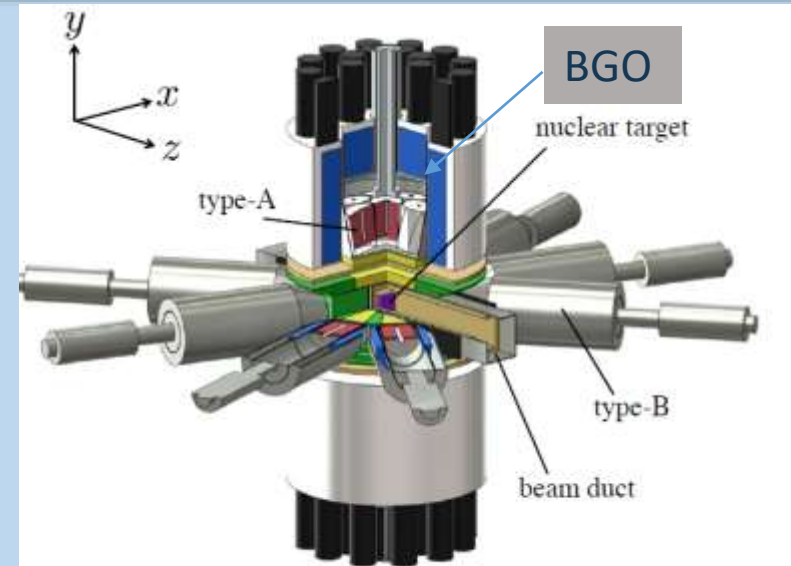


Figure 2. Configuration of the germanium detector assembly.

使用J-PARC的中子束流开展T-PGNAA研究，使用Clover探测器及HPGe探测器进行探测，在Clover探测器及HPGe探测器外围使用BGO探测器作为反康普顿探测器，以保证全能峰的分辨。

J-PARC上开展的T-PGNAA研究

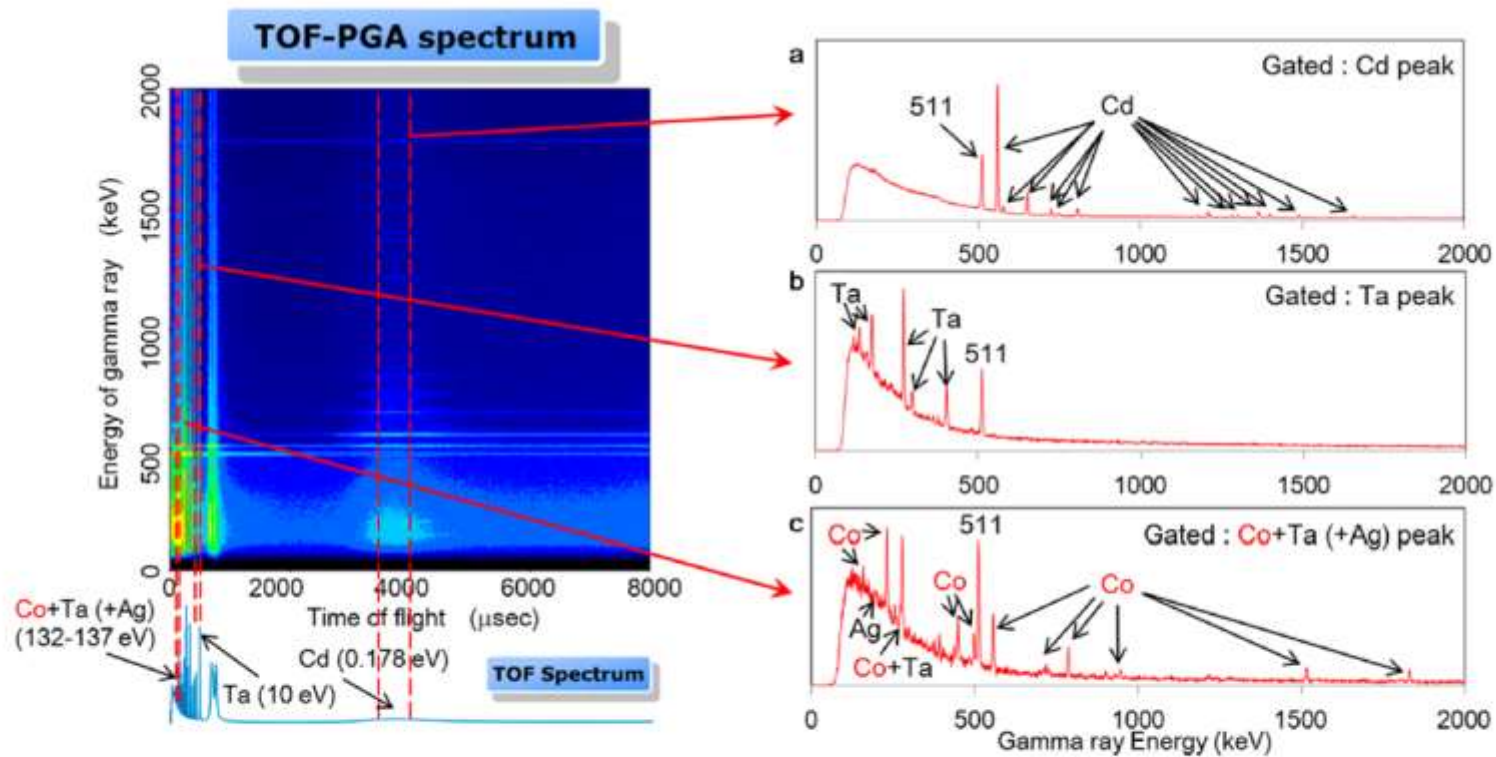


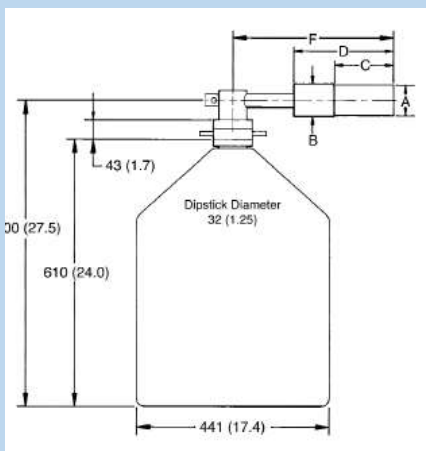
Figure 4. TOF-PGA spectrum analysis by gating on the TOF peaks. The gated PGA spectra are obtained by being gated on the resonance peaks of (a) Cd, (b) Ta, and (c) Co, Ta (and Ag) in the TOF-PGA spectrum for the neutron energy of 0.178, 10, and 132–137 eV, respectively. The SNRs of the gamma-ray peaks of Cd, Ta, Co in the gated PGA spectra (a–c) are significantly improved compared to those in the PGA spectrum (Figure 2a).

探测器方案

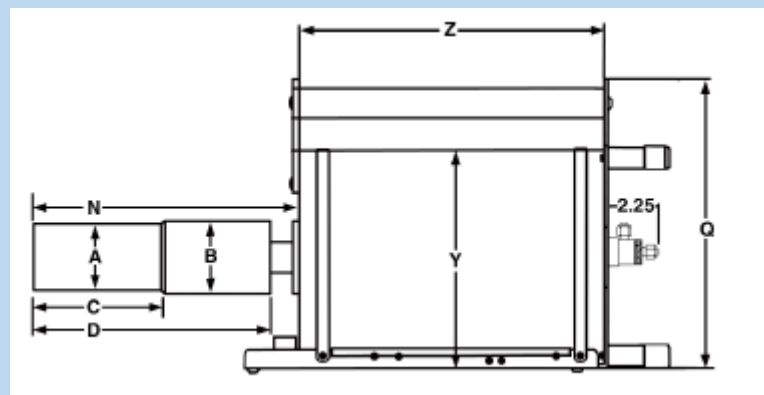


中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- ▶ 计划使用40%或者70%效率高纯锗，并配套相应尺寸的BG0反康探测器。
- ▶ 高纯锗探测器计划使用液氮制冷方式，使用液氮罐罐装液氮。
- ▶ 考虑反康探测器长度，将图中的F段长度相应延长至满足反康探测器安装空间



30 L 液氮罐
预计5-7天罐装一次液氮



高纯锗探测器及液氮罐装配图



7.5 L 液氮罐
预计2天罐装一次液氮



波形数字化采样方案

► 中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室研制。

- 模拟带宽：不低于10MHz（约35ns前沿）
- 采样率：500MSPS（高速波形数字化技术）
- 量化精度：14bit
- 有效位ENOB：好于10.97bit
- 定时方法：dCFD（数字恒比定时）
- 定时精度： $< 1\text{ns}$ (rms)
- 飞行时间TOF测量：TDC@FPGA
- TOF测量精度： $< 1\text{ns}$ (rms)
- 计数率：高纯锗前放（75kcps ORTEC）
- 数据读出：基于PXIe机箱+以太网
- 反康电路

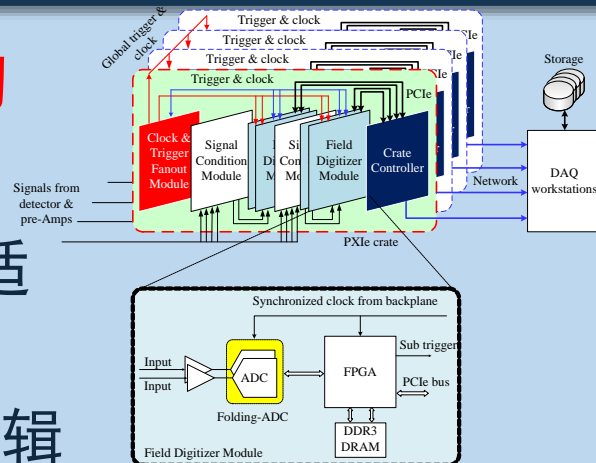
HPGe读出电子学总体方案



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

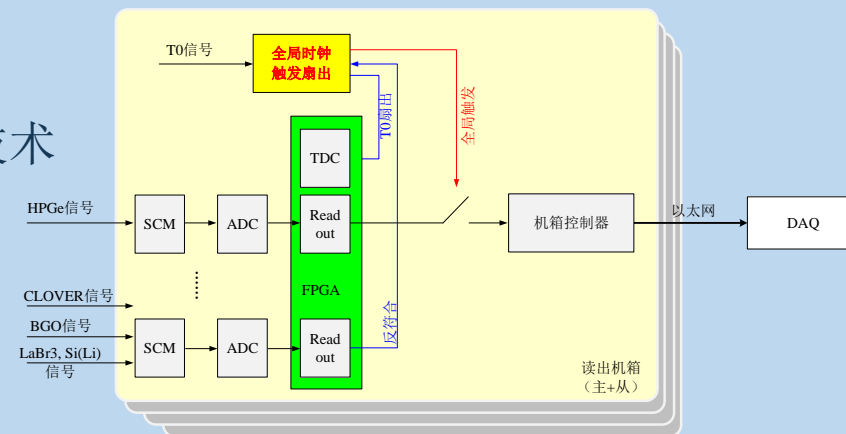
• 基于白光共用电子学的 共性设计

- 信号调理插件SCM设置适配增益
- 波形数字化数据读出逻辑
- 基于FPGA的精密时间测量
- 分布式时钟触发系统
- PXIe平台高速并行读出及软件



• 专用设计

- 高精度高速波形数字化技术
 - 14bit@500Mbps
 - JESD204B高速接口
- 专用FPGA算法:
 - 数字恒比定时技术dCFD
 - 反符合算法
 - 全数字化触发算法



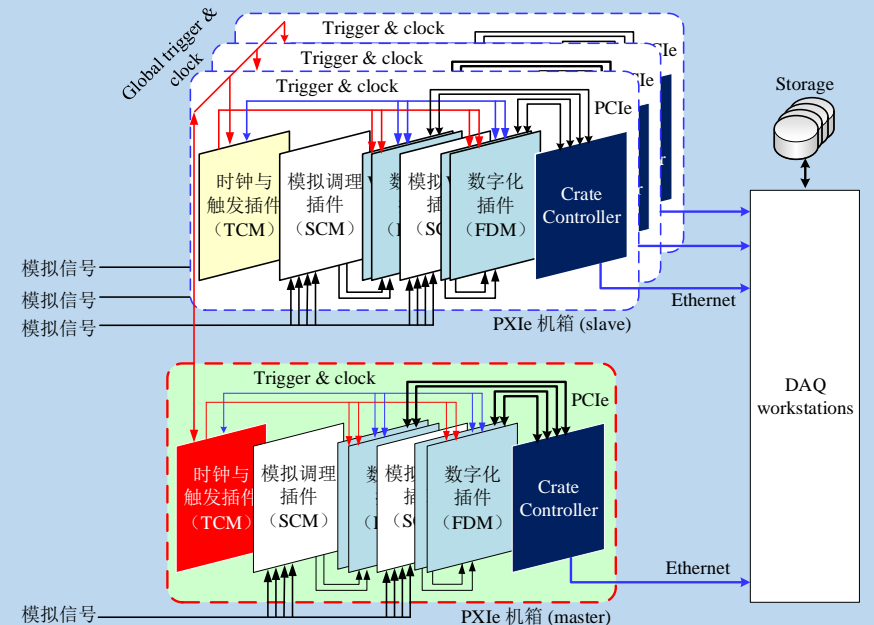
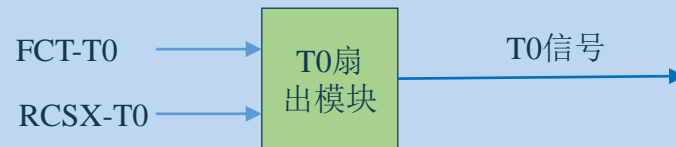
读出系统方案

共性化读出架构



系统组成及功能:

- **PXIe机箱**: 数据读出, 为时钟及触发扇出提供背板总线 (**共用**);
- **模拟调理模块 (SCM)**: 对模拟信号进行幅度、带宽、单端转差分调整 (**专用或整合**);
- **波形数字化模块 (FDM)**: 对输入波形进行高速高精度数字化 (**HPGe专用**);
- **触发与时钟模块 (TCM)**: 产生及扇出时钟和触发信号 (**共用**);
- **T0扇出模块 (TFM)**: 对输入的T0信号进行扇出 (**共用**)。



信号数字化模块SDM



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

• 子母板架构

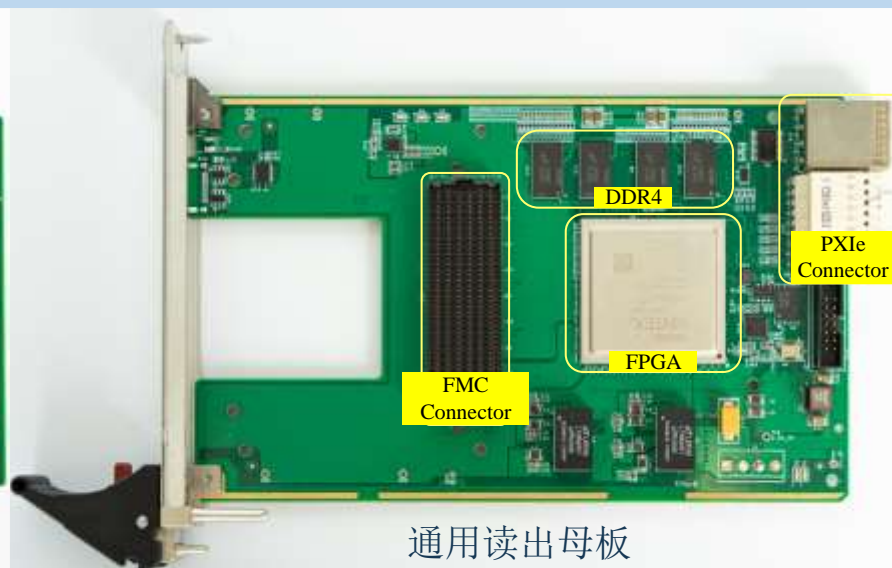
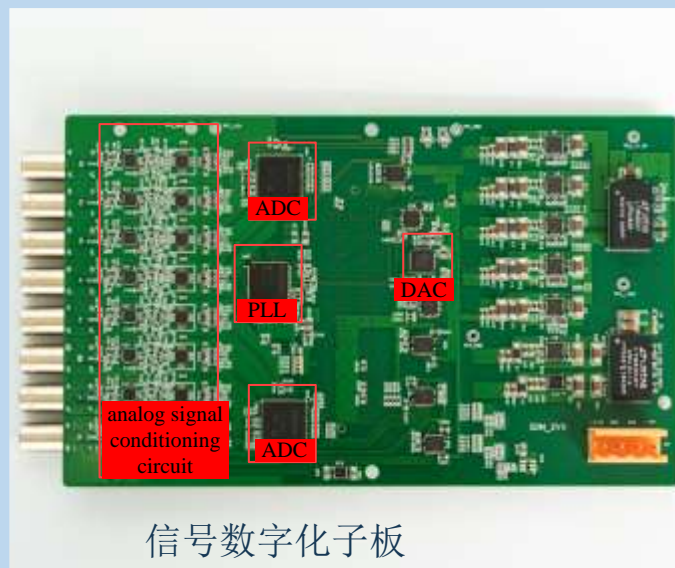
- 便于提高单板集成度
- 根据不同信号特征更换子板，更为灵活

• 子板进行信号调理及波形数字化

- 8通道：14bit@ 500MSPS

母板实现波形数据的接收、处理及上传

- 高性能FPGA，处理能力更强
- 超大容量高速板载缓存DDR4：8Gbit x 4



与探测器联调-串列



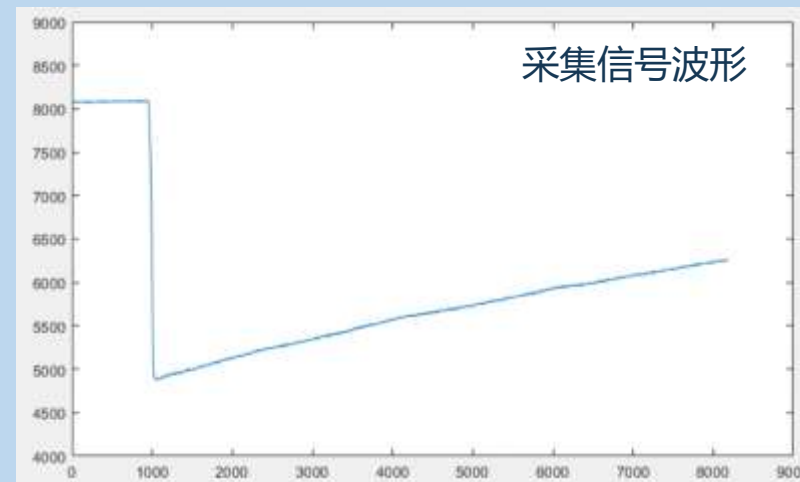
中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- 在计量站与HPGe探测器进行联调
 - 测量 ^{60}Co 放射源： 1173.2keV, 1332.5keV



14bit@ 500MSPS
波形数字化插件
高低压电源
和MCA
HPGe探测器
Canberra 2002CSL

与探测器联调现场图



能量信息提取：使用梯形滤波算法实现梯形成形：2.61keV @1332.5keV

时间信息提取：使用dCFD算法提取波形时间信息，定时精度预期优于8ns；使用PSA算法分析波形，定时精度预期优于4.5ns

总结



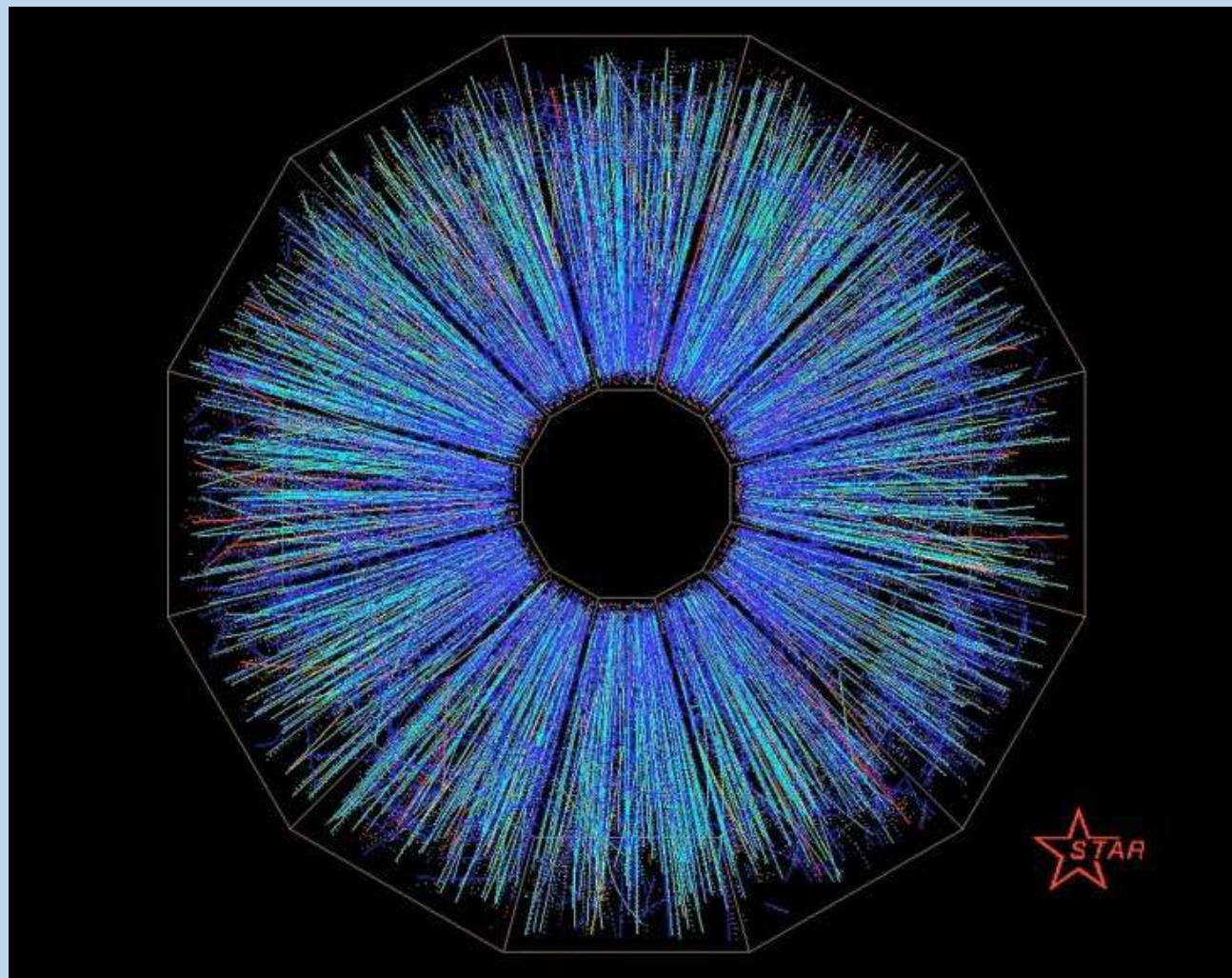
中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- 结合反角白光中子源时间分辨好，中子能谱宽的优势，可以开展飞行时间-瞬发伽玛中子活化分析研究工作。
- 利用高纯锗探测器的高能量分辨，计划使用高纯锗探测器+ BGO反康探测器方式进行研究工作。
- BGO反康探测器计划使用45mm左右厚度。
- 使用晶体管前放作为高纯锗探测器的前放电路，减小饱和信号的测量的影响。
- 中科大开发基于PXIe的波形数字化实现波形采集及全数字化触发算法，高精度提取信号的幅值及时间信息，有利于研究的开展。

TPC探测器

通过测量带电粒子电离出的电子漂移时间结合二维位置灵敏读出，TPC探测器可以重建出非常好的3D粒子径迹，通过粒子能量损失和径迹长度测量，它可以给出元素粒子分辨甚至可以给出轻带电粒子的同位素的分辨。TPC可以覆盖几乎所有粒子的出射角度，并保持较低的物质质量，更适应在较低能量的核反应产物测量。对比传统探测器，TPC具有以下几个明显优势：

1. 具备较强的带电粒子鉴别能力；
2. 可以测量能量极低的次级反应产物；
3. 可以覆盖 4π 立体角，且具备微分截面测量能力。



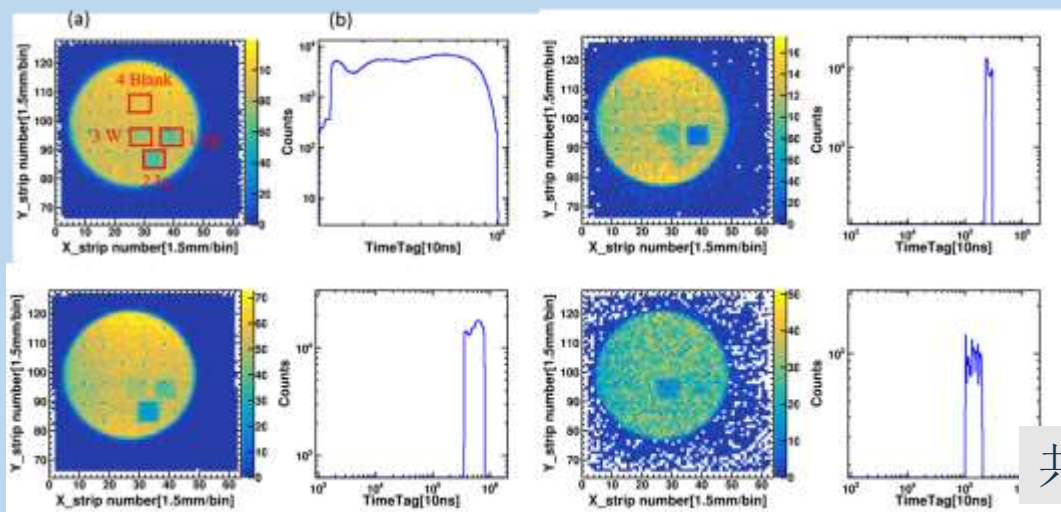
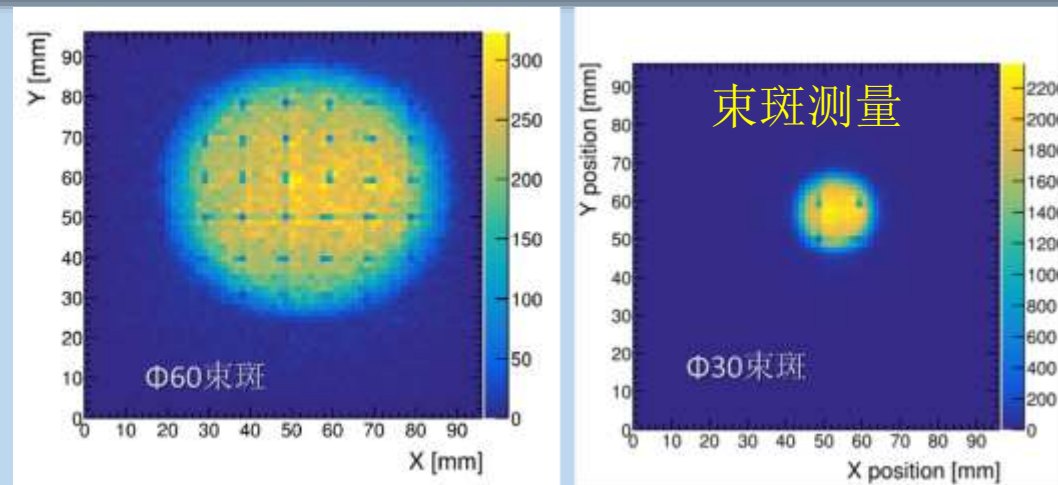
TPC探测器



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

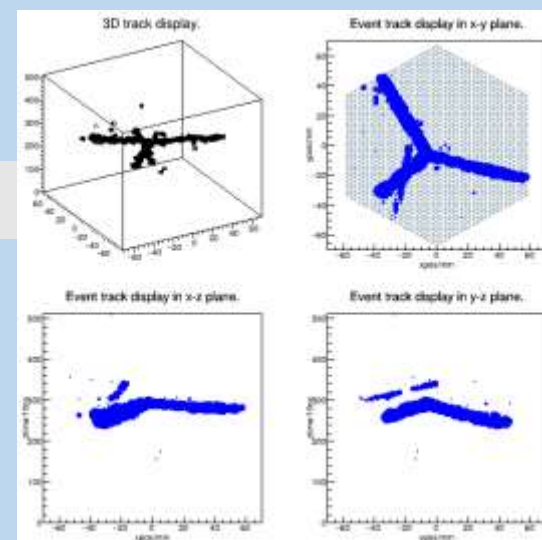
• Back-n目前的困难：空间、时间

- 束流品质测量：束斑、能谱
- 核数据测量：带电粒子、裂变碎片
- 其他相关研究：中子共振照相



粒子鉴别

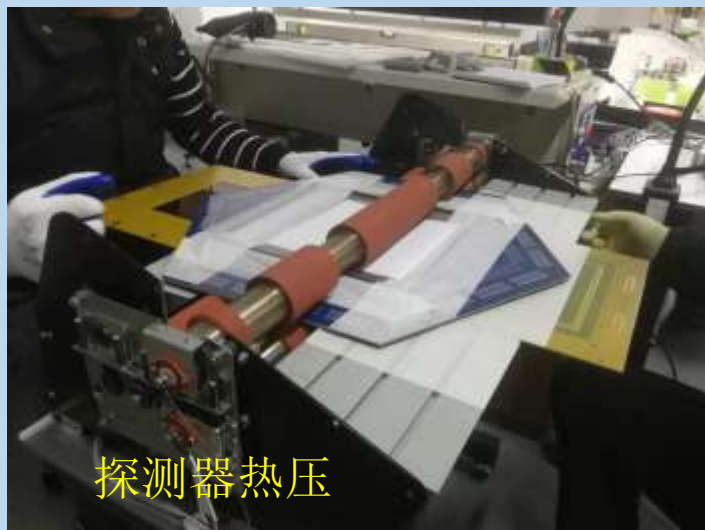
共振成像



TPC探测器制作及实验室测试



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

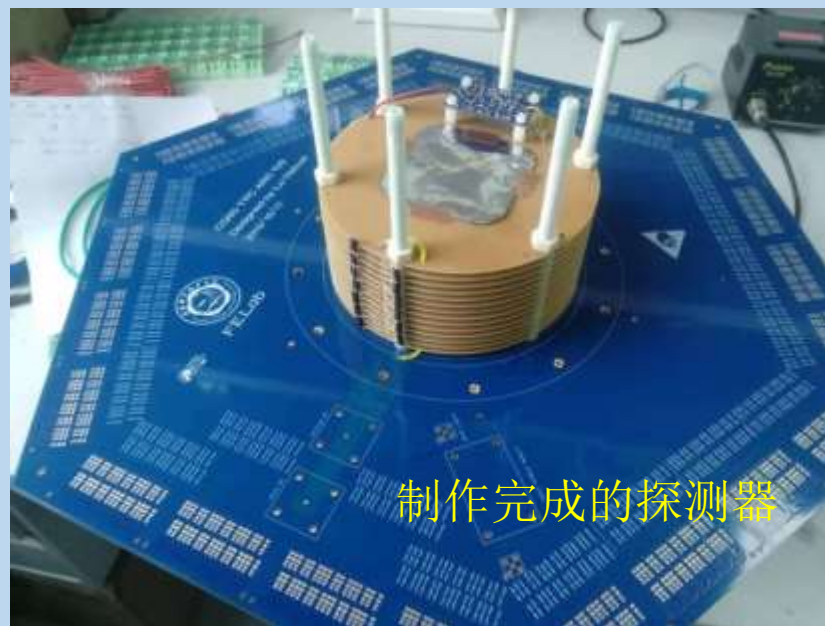


探测器热压



微网切割

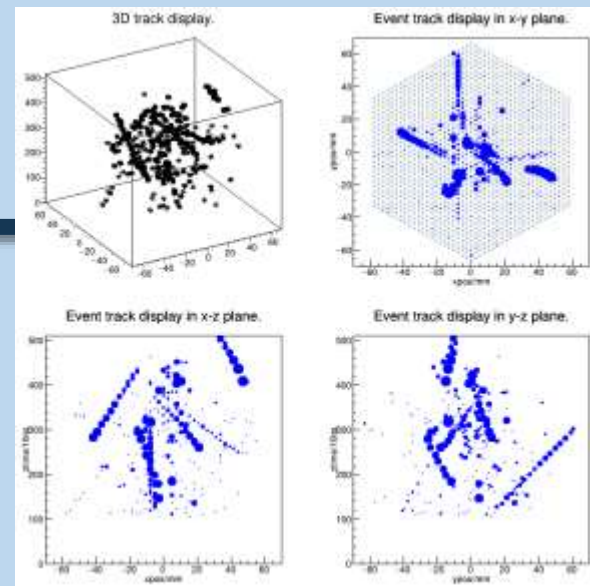
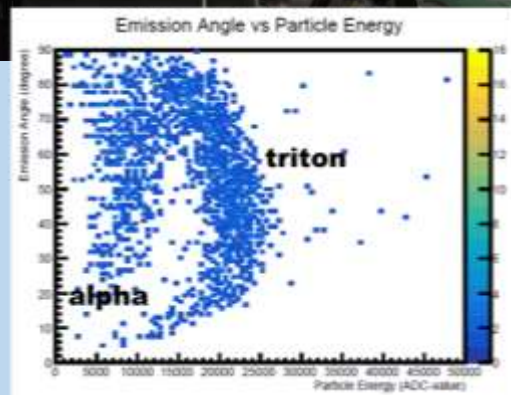
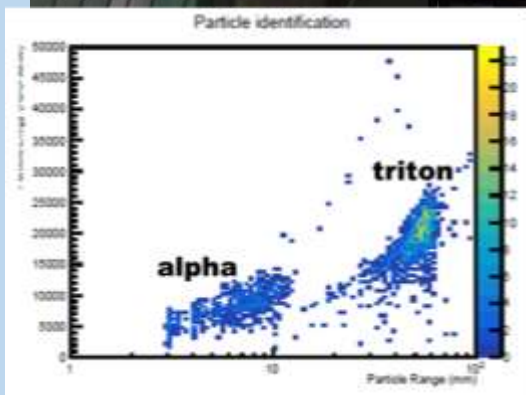
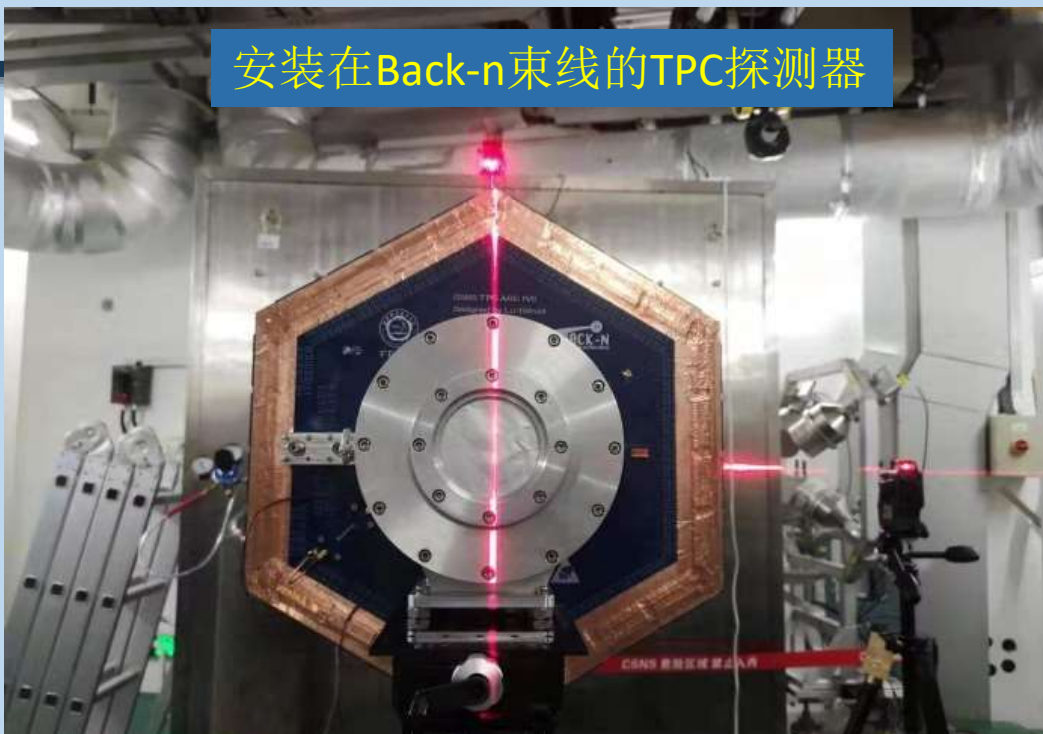
TPC是目前国际上最先进的气体探测器具有高精度的带电粒子3D径迹重建及强大的粒子鉴别能力。Back-n TPC样机探测器共**1519**路，目标是重建次级轻带电粒子，实现高效率、低阈值的带电粒子截面测量。



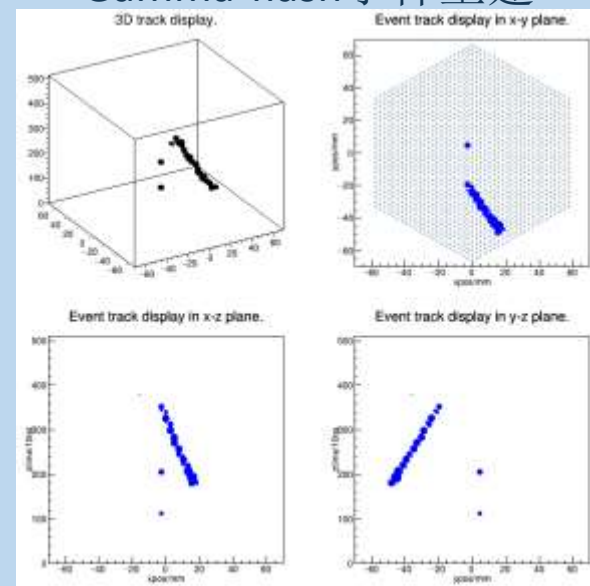
制作完成的探测器

Back-n束流实验 (2020/1)

安装在Back-n束线的TPC探测器



Gamma-flash事件重建



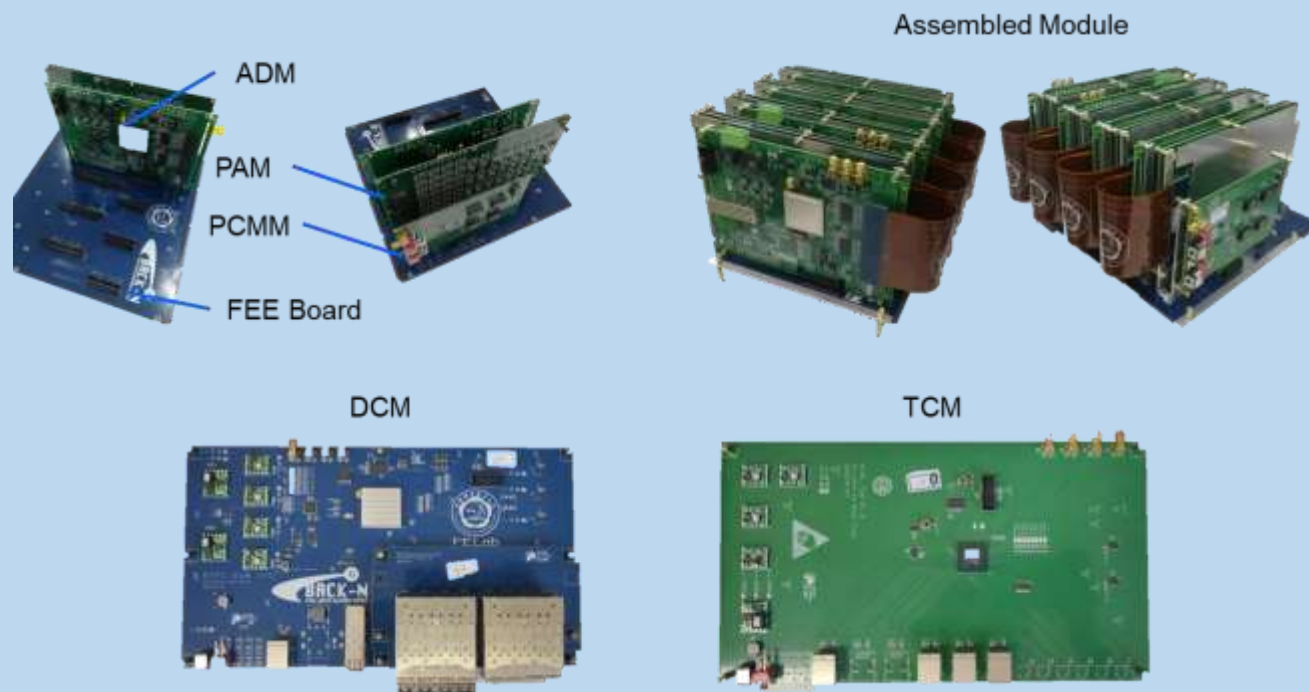
氚事件重建

电子学的改进



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

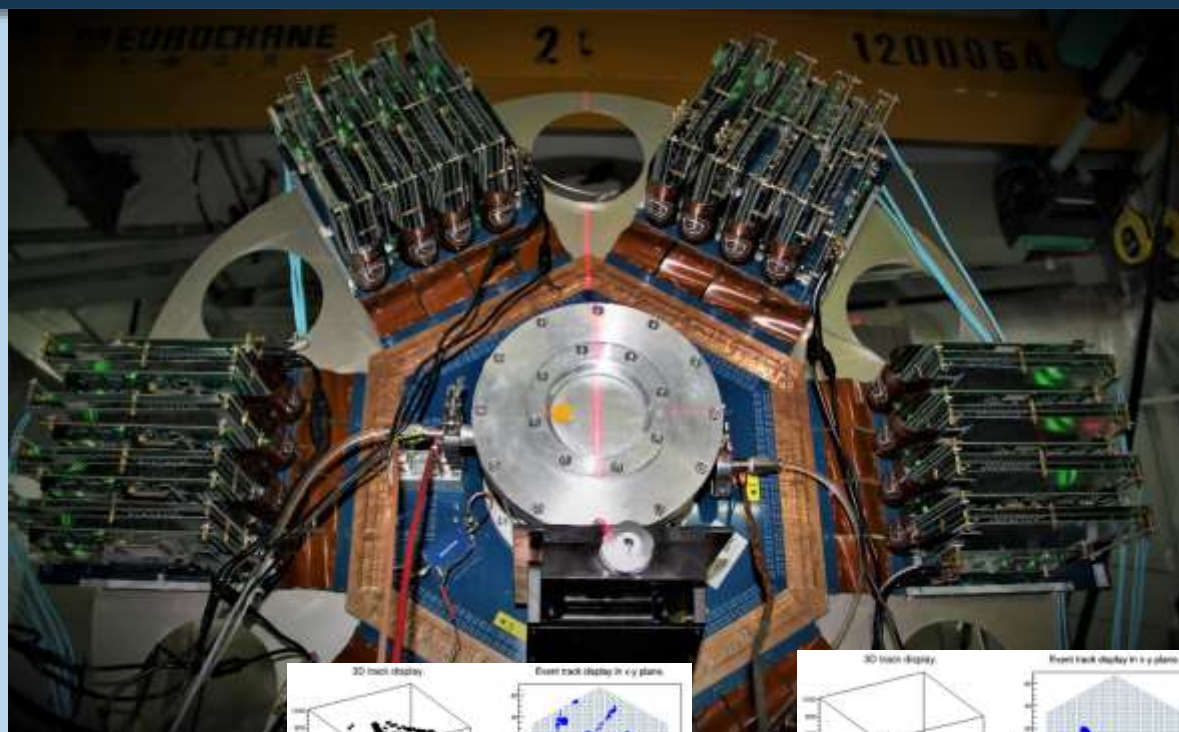
- 基于AGET电子学死时间过长（2.2ms），基于TOF判断中子能量方法失效，在白光中子束线上无法测量较高能量（keV以上）中子
- 新版电子学与中科大联合开发，基于分立器件大幅度提高计数率



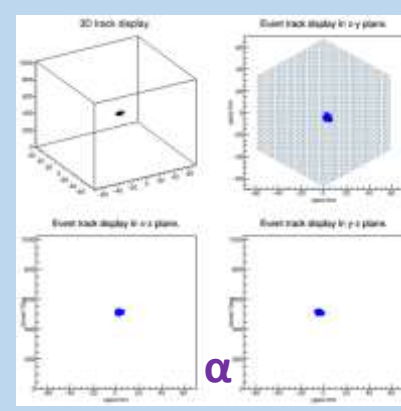
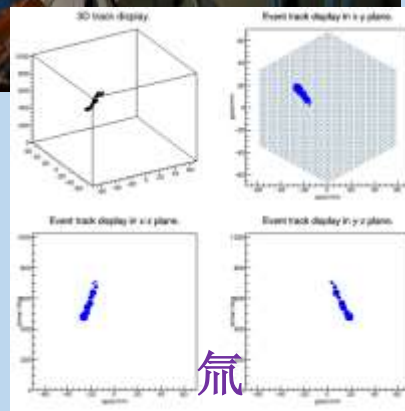
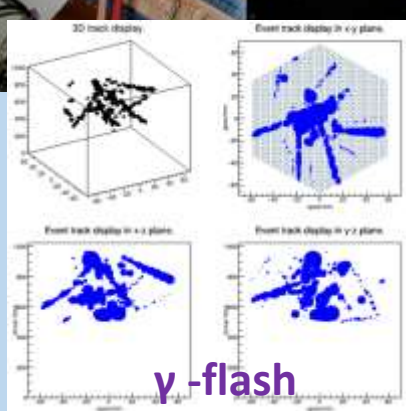
新电子学测试2021. 1-2



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



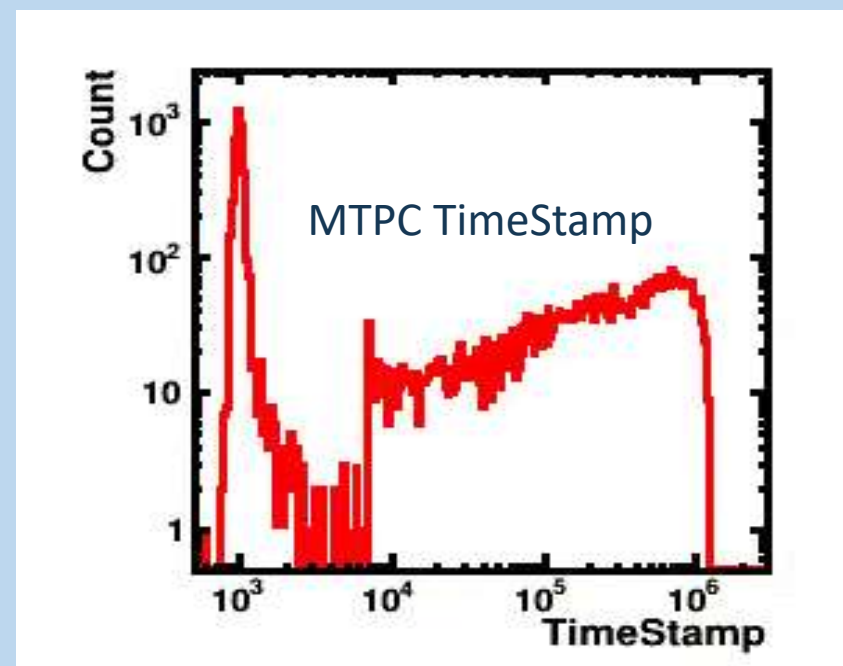
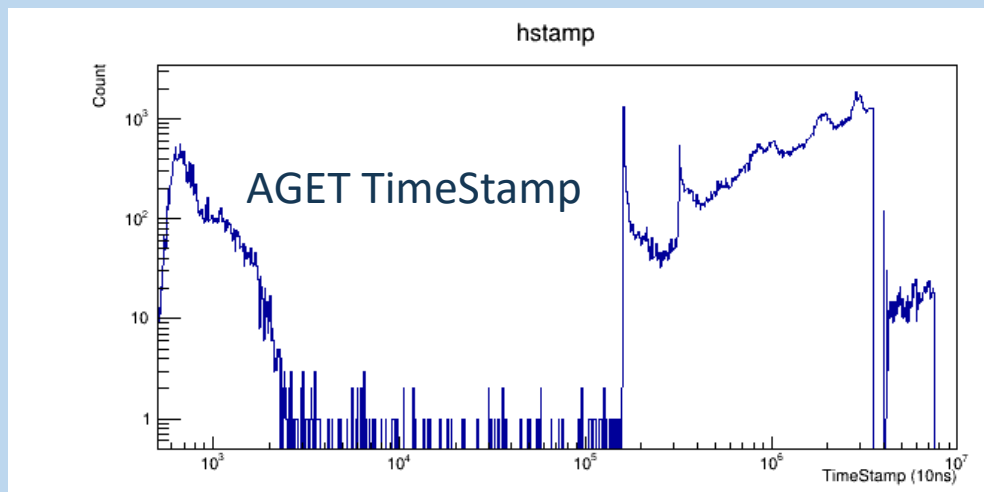
2021年初进行了新版电子学的测试，使用 ${}^6\text{Li}$ 靶测量得到了白光中子束线 γ -flash图像和中子次级产物氚和 α 粒子。



实验初步结果



- TimeStamp分布：
- 2000~7000区间因为trigger时间窗和trigger传输造成的死时间；
- 相比AGET死时间范围减少。2.2ms → 25us



实验数据处理及在线DAQ架设



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- BLUETv0.0→BLUETv1.0 具备了基本功能可以进行数据分析
- 数据量最高570Mb，与实验中心DAQ组建立合作共同开发在线DAQ系统
- 已经着手发布BLUETv2.0（调整框架，cmake工具）



基于所内git托管平台的代码控制



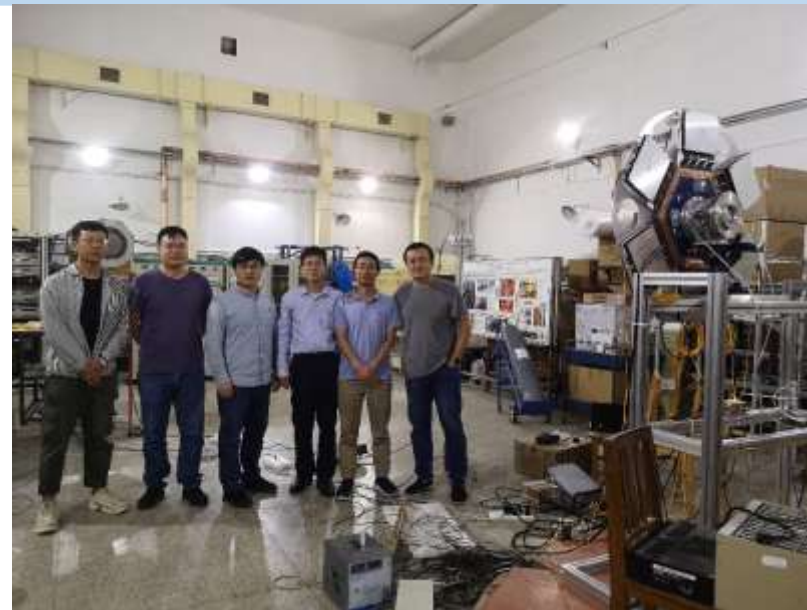
DAQ在线事例显示

北京大学单能TPC实验2021.5

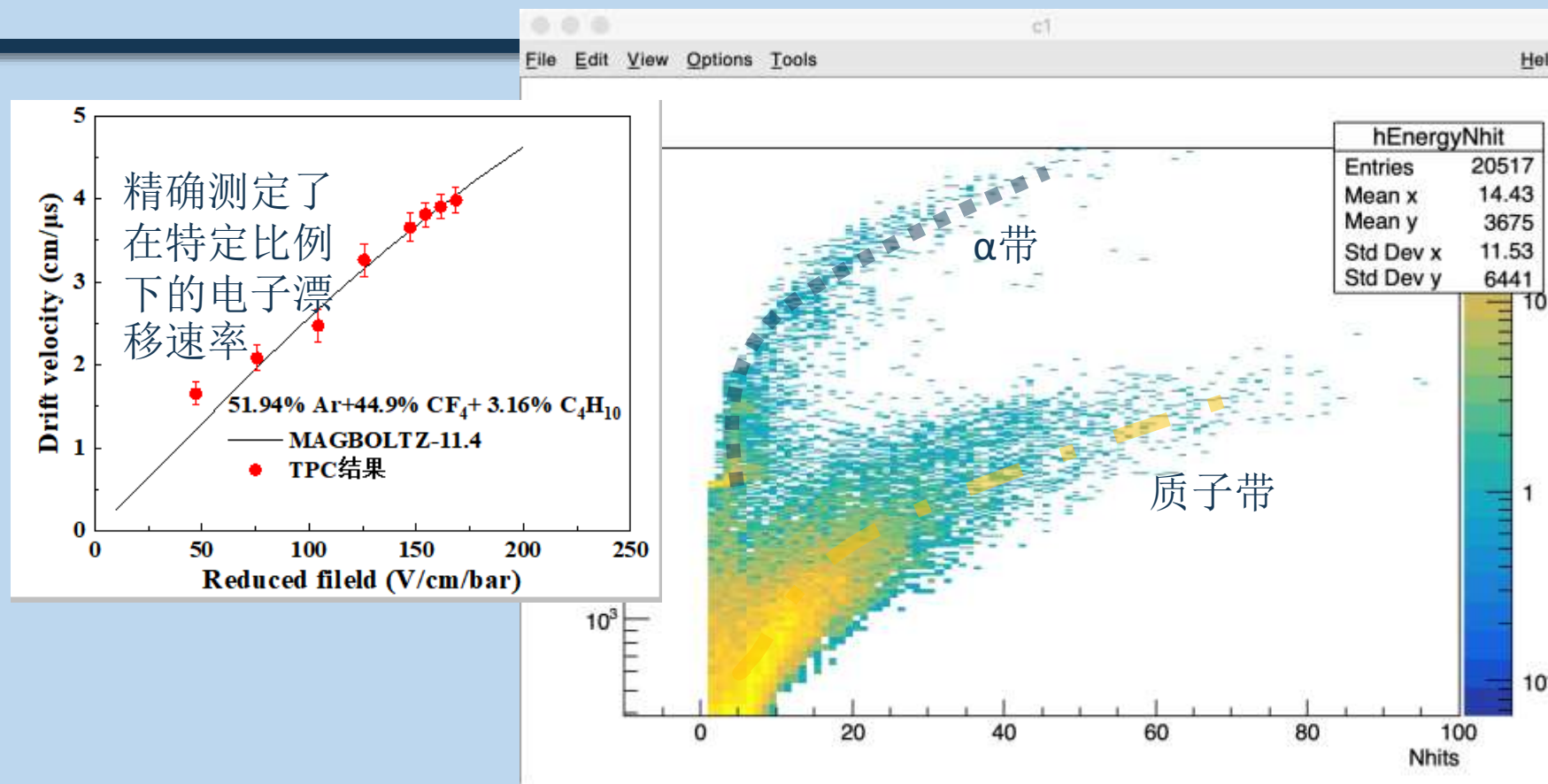


中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- 基于AGET电子学系统（旧物利用）
- 有白光中子束线不具备的优势（单能点、低 γ 本底）
- 北京大学与组内的传统合作基础



初步结果



使用气体作为：探测介质、待测靶、标准对比截面。是对TPC特性的充分利用。正在根据实验结果撰写相关论文。

时间计划



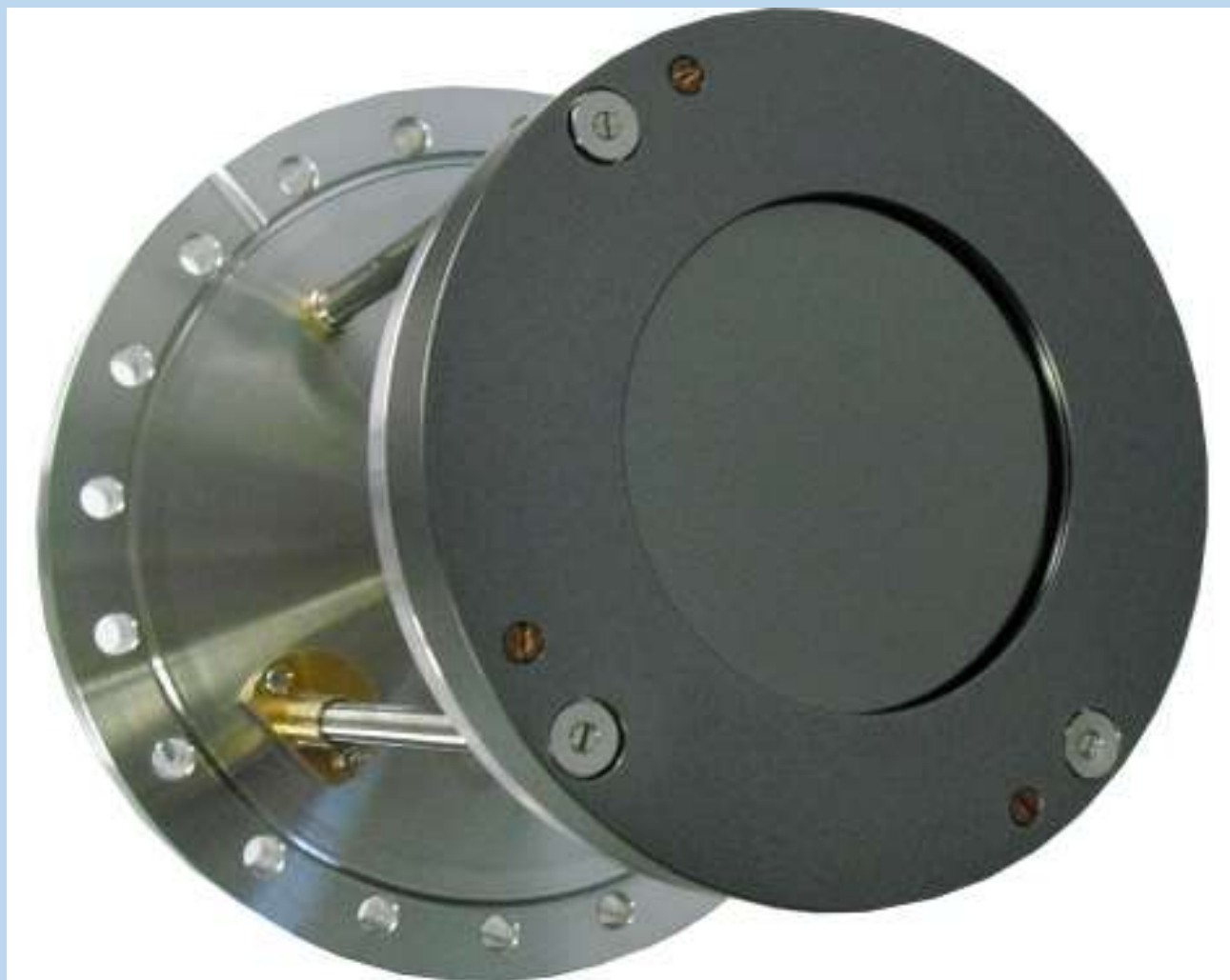
中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- 2021年底进行白光中子束线实验
- 2021年发表TPC探测器及物理结果文章
- 与九院紧密合作，配合完成裂变TPC的工作
- 高低气压TPC改进方案年底完成

中子敏感微通道板

中子敏感微通道板（nMCP）在普通的微通道板内掺入 ^{10}B ，结合高增益微通道板后可以提供100ns以内的时间分辨和小于50微米的位置分辨。对热中子的探测效率也可以达到45%以上，是中子共振成像方法的最主要设备。

美国对我国实施禁运



nMCP研究背景

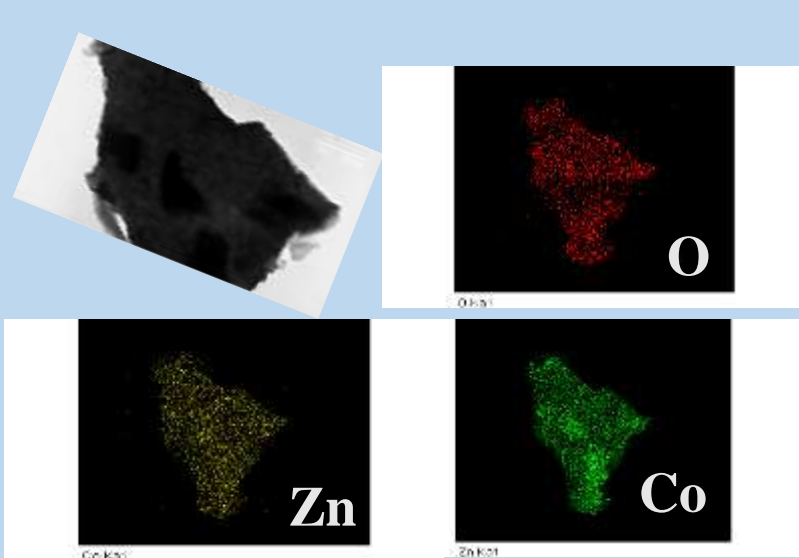


中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

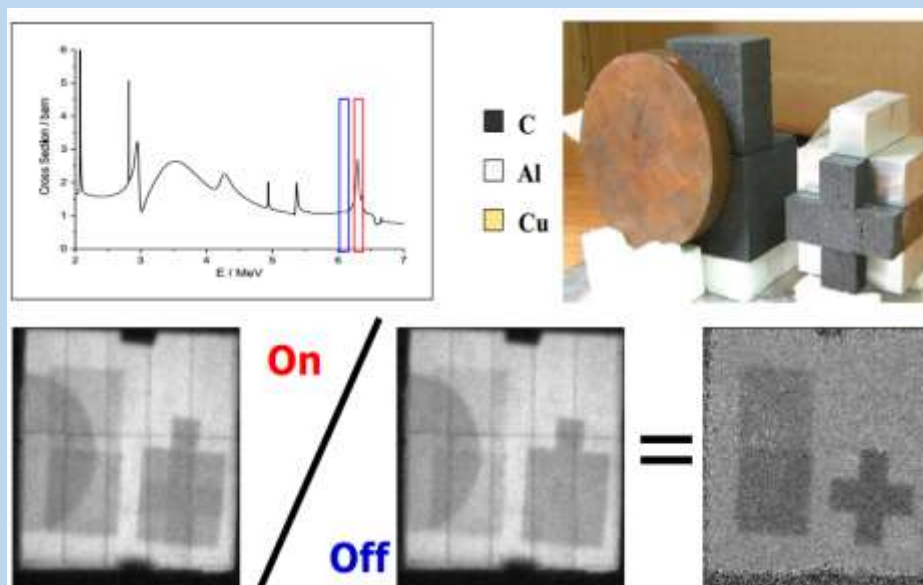
1.白光中子共振成像:

技术目标: 在保证一定位置分辨（如小于1mm）基础上获得每个像素点的中子时间谱

物理目标: 获得样品的透射轮廓，由什么元素组成，每种共振元素的分布情况



元素Mapping



例如：在C、Al、Cu等混合材料中可以利用C元素的快中子共振峰将其单独检测出来并对C元素分布情况进行单独成像

中子共振成像研究意义

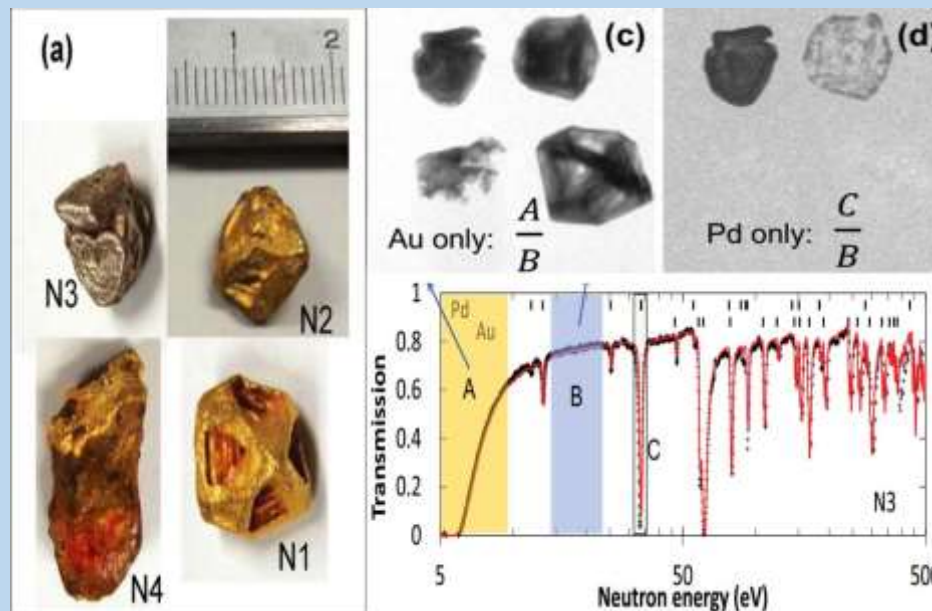


中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



考古：（上）罗马出土的水龙头（左）及其
中子共振核素分析结果

冶金：（右）天然金样品中的Au、Pb元素
含量和位置分析



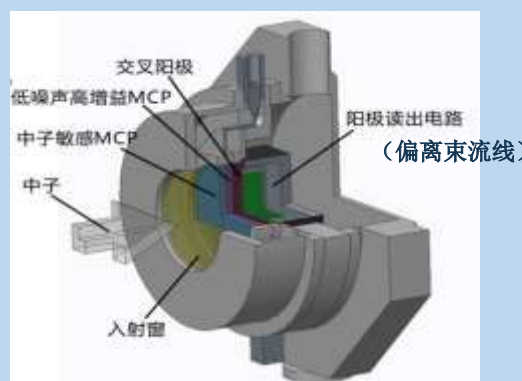
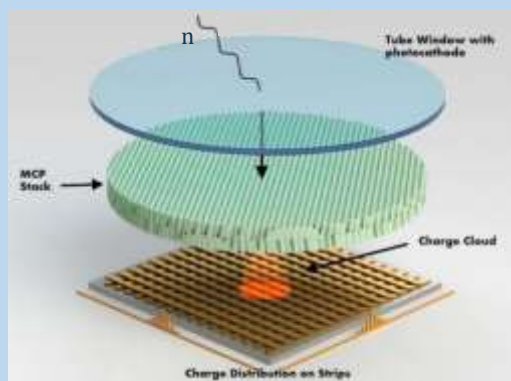
研究价值和意义：可以给出比透射照相更多的被检测物信息，在材料科学、核工业、新能源、考古、冶金、医疗、安检等工业和社会领域有广阔应用前景，特别是在检测放射性同位素、原子序数相近材料、含氢材料、重金属组件和大尺寸部件等方面独具优势。

nMCP优势



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

1. 白光中子源的能谱宽、注量率高、时间结构好，是一个非常适合用于中子照相方面研究的中子源。
2. 我们在白光中子源上开展了基于CMOS相机的透射和共振照相探索实验，取得了部分成功。但是CMOS共振照相仍存在困难和不足：例如高能区共振图像信噪比太差、成像时间太长等。
3. 展望白光源上共振成像各种技术路线，我们认为切实可行的新方案即：——掺硼中子MCP探测技术



优势:

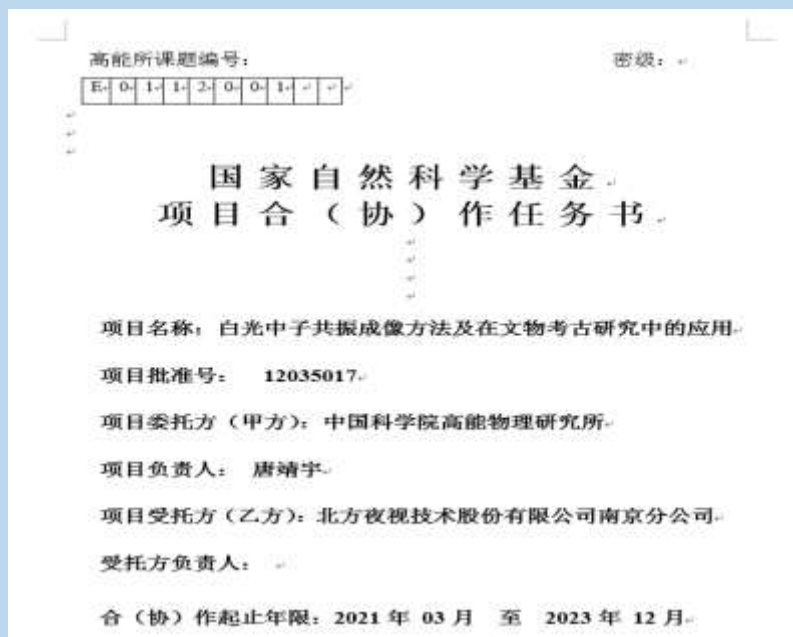
1. 中子探测效率高
2. 位置分辨好 (极限可达到 $10\mu\text{m}$ 以下)
3. 中子事例型读出
4. 耐辐照 (不怕中子束直接照射)
5. 成本、体积、功耗都在可控范围 (电子学路数远小于像素读出)

掺硼中子MCP探测技术进展



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

1. 掺硼中子MCP研制方面



与北方夜视签署了研发含硼MCP合作协议

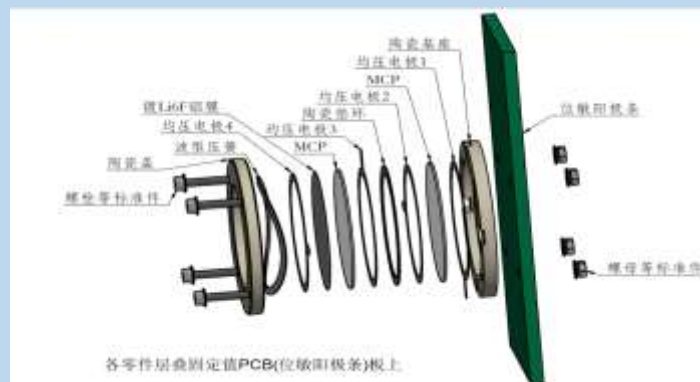
收到了北方夜视第一版含硼MCP的样片:
共3组6片

测试照片

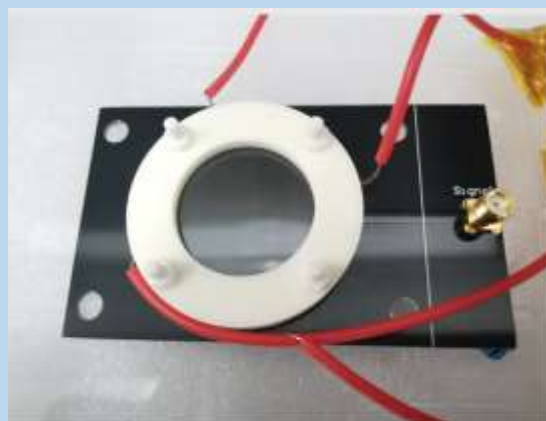


中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

对MCP样片进行了在束测试： MCP组装与测试现场



MCP安装组件结构

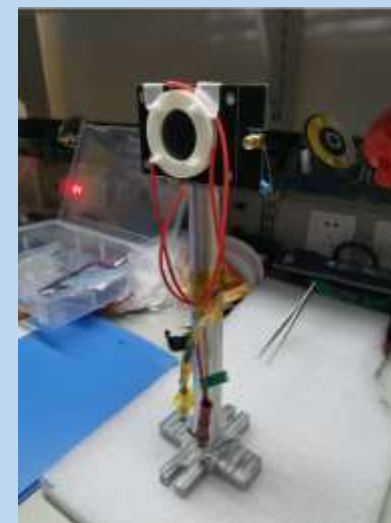


组装后的实物图

两组MCP：普通组 掺10B组

安装在LPDA支架上

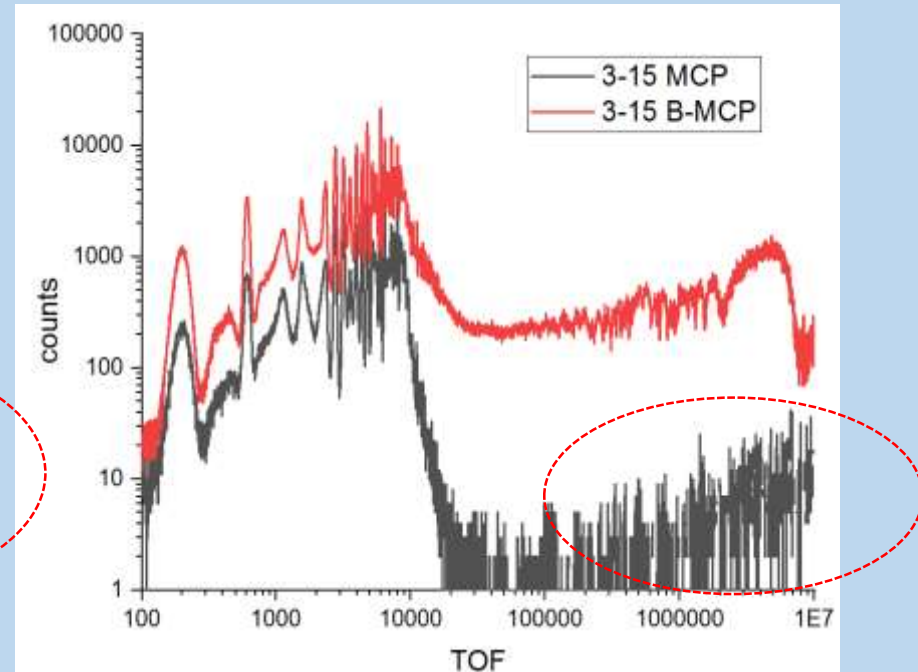
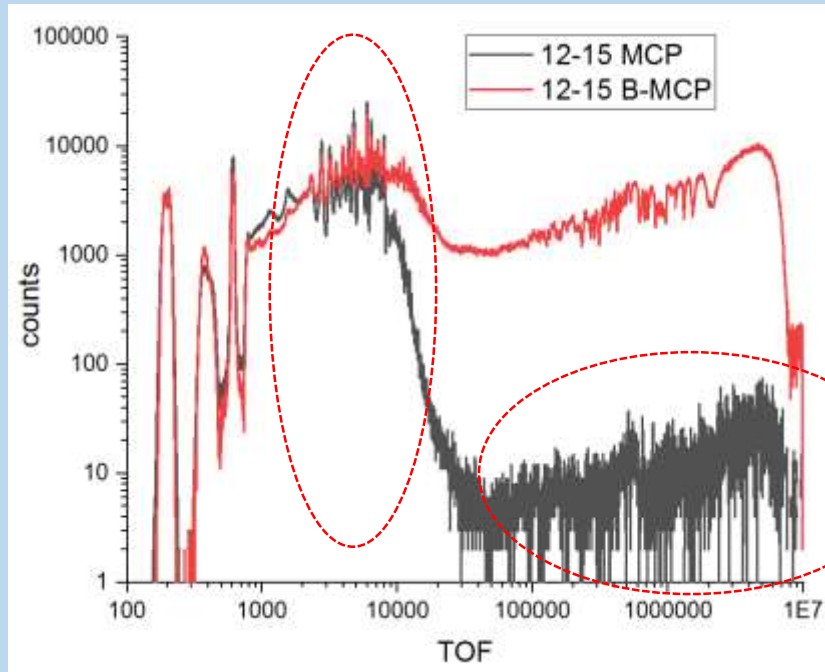
MCP到靶面空间距离58m



测试结果处理与分析：TOF谱



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

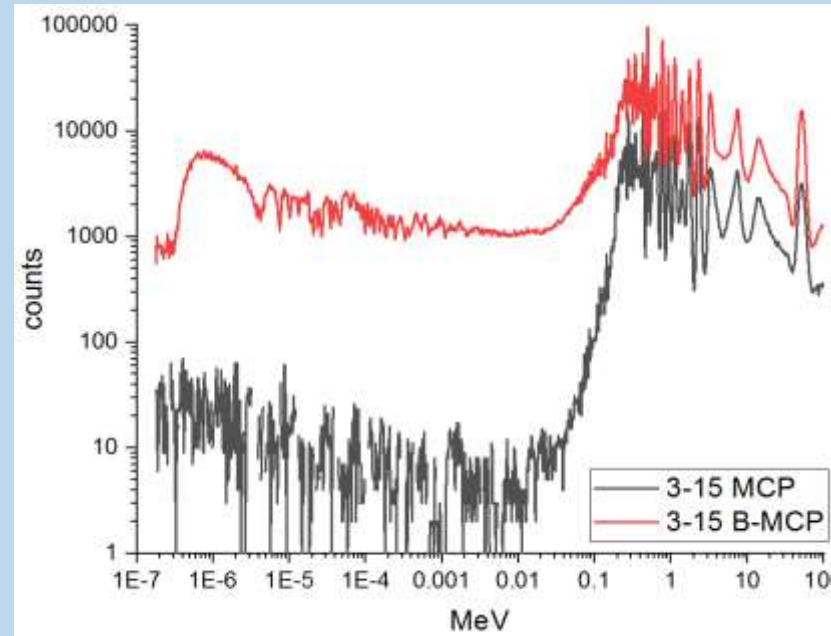
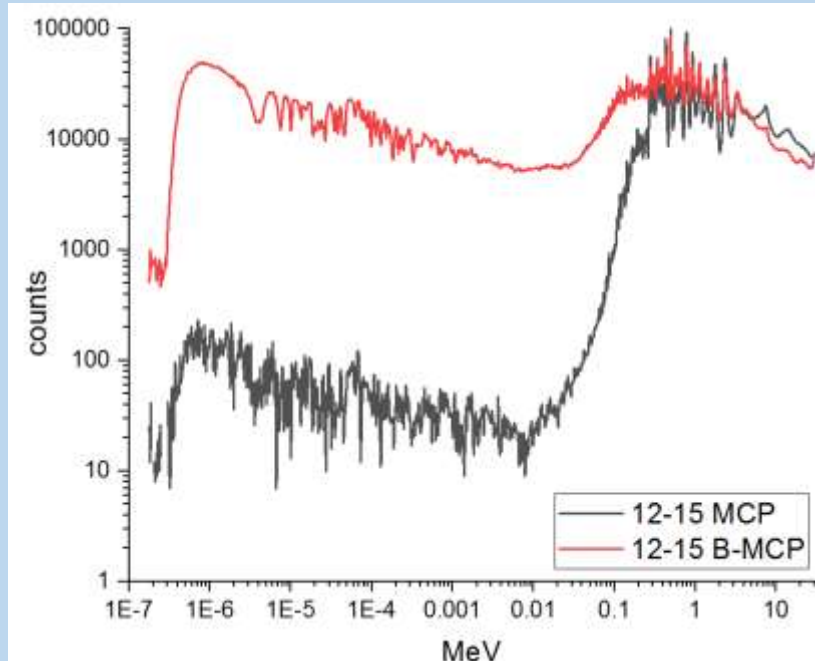


1. MCP对比差别明显：关心区域（ $50\mu\text{s}$ 以上），B-MCP得到BACK-n能谱轮廓
2. 普通MCP组也有较明显低能区信号响应，——普通MCP含有天然硼元素
3. $6\mu\text{s}$ （ $\sim 0.5\text{MeV}$ 以上），两组形状细节吻合：普通MCP对快中子有响应可能存在 γ -flash的影响

Energy-Counts谱



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



提前完成第一阶段的研发目标（原计划2022年达到此探测效率）
进展比预期好很多！

假设6keV以下能区所有响应都是来自10B:

1. 根据事例率谱估算B-MCP的探测效率: **1eV中子探测效率 > 3.47%**
2. 根据探测效率估算B10含量（面密度）: **>960.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$**

(受噪声影响, MCP加高压未达到理想值, 即探测效率应大于当前测试水平)

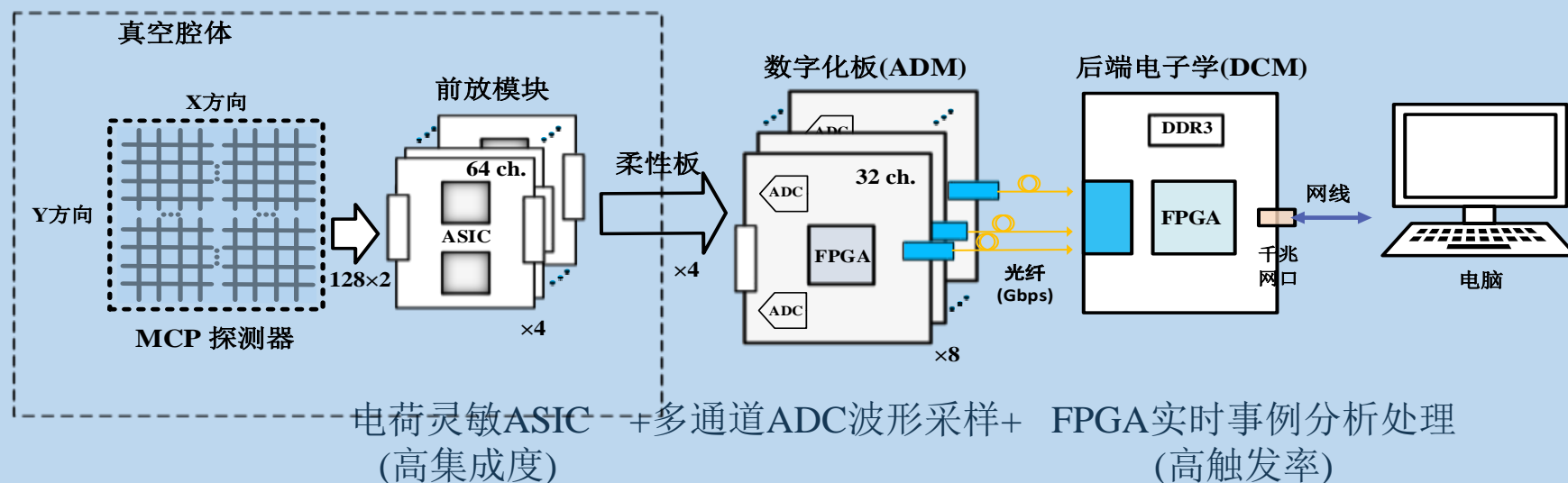
2. 读出电子学方面



由中科大核探测与核电子学国家重点实验室封常青老师课题组承担

探测器读出需求	电子学需求
X、Y维度各128路阳极信号	真空腔内X、Y方向各128通道
MCP增益 10^5	动态范围 100fC
20MeV能区中子精确共振测量	时间分辨好于10ns (RMS)

采取的方案:



当前进展与计划



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

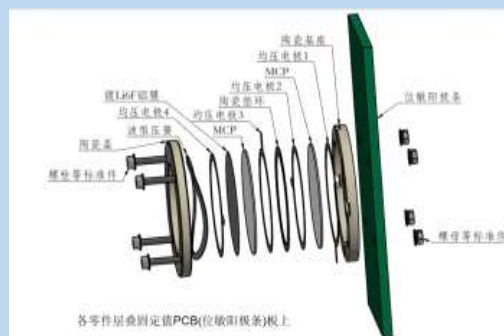
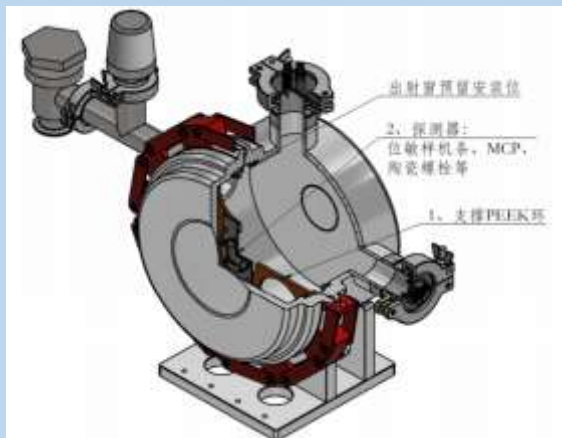
当前进展：

- 6月份已完成阳极板、前放模块、信号转接板（FPC）的原理图设计
- 7月完成了前端电路的PCB设计

计划：

- 8月底前：完成前端电路焊接与测试
- 10月内：完成第一版读出电子学的联合调试
- 12月前：与MCP探测器的联调测试

3. 机械设计与加工方面



完成了机械腔体、MCP组装结构的设计、加工和抽真空测试

当前进展与计划:

1. 目前由亿谦加工的真空靶室真空度较低，正在返厂做进一步处理
2. 根据科大电子学方案和终版MCP尺寸新设计加工一套真空靶室
目前电子学板框架确定，正在进行真空靶室图纸设计



新型半导体探测器

- 极高的耐热、耐辐照能力
- 极高的击穿场强
- 极高的载流子漂移速率
- 极小的探测器电容
- 极快的响应速度
- 极小的漏电流

Property	Silicon	GaAs	4H-SiC	Diamond
Thermal expansion coefficient ($10^{-6}/K$)	2.6	5.9	4.7	1.1
Thermal conductivity [W/(cm·K)]	1.5	0.46	3.7	20
Melting point($^{\circ} C$)	1420	1238	2380	4000
Bandgap(eV)	1.12	1.42	3.3	5.5
Electrical resistivity ($\Omega\cdot cm$)	2.3×10^5	10^8	150	$>10^{11}$
Breakdown Voltage (V/cm)	3×10^5	6×10^6	2×10^7	10^7
Electron mobility ($cm^2/(V\cdot s)$)	1500	8000	100	4500
Hole mobility [$cm^2/(V\cdot s)$]	450	100~3000	120	3800
Saturation velocity of electron($10^7\cdot cm/s$)	1.0	1.0	2.0	2.7
Relative dielectric constant	11.9	13.1	9.7	5.7
Threshold displacement energy/eV	13~20	8~20	21~35	40~50

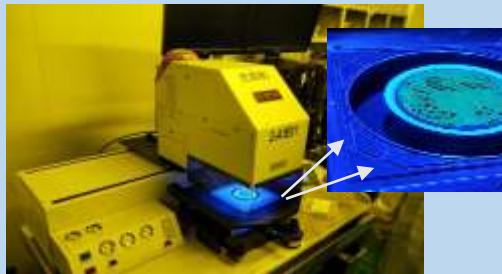
4H-SiC探测器与金刚石探测器



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

制作单位：大连理工大学 微电子学院梁红伟课题组
合作单位：中科院高能所、散裂中子源、
山东元旭、江苏新广联。

完整的探测器制作平台：



光刻



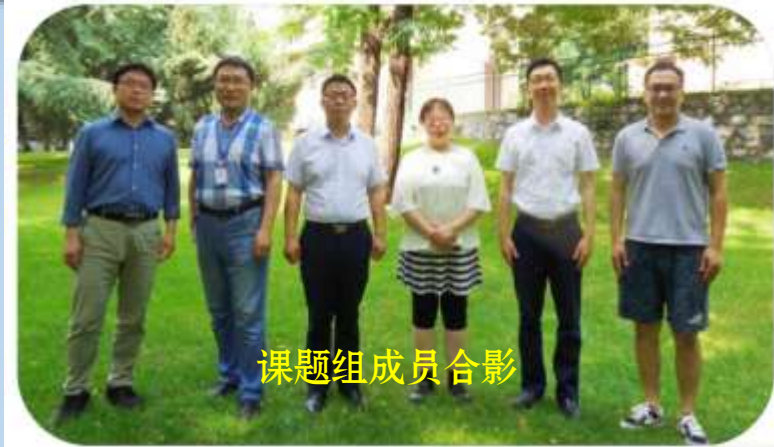
ICP刻蚀刻



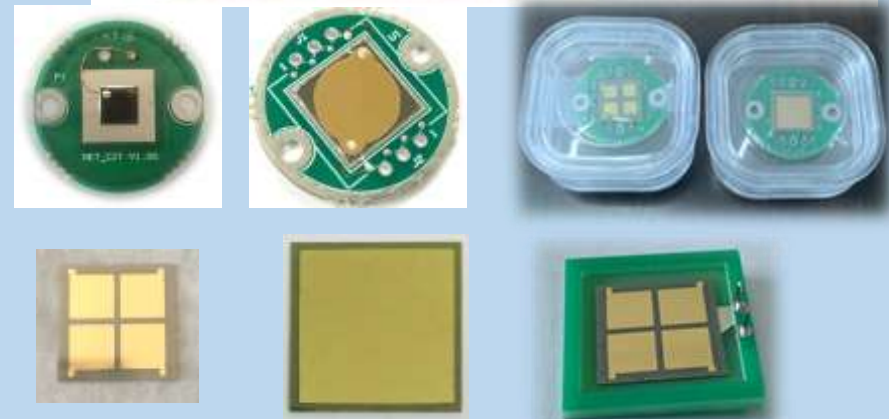
电子束蒸发



PECVD



课题组成员合影



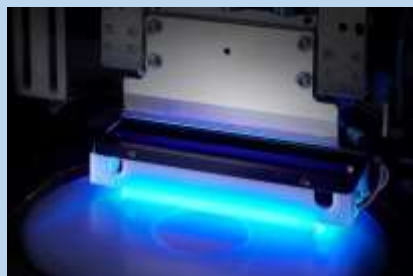
研发中：delta E-E探测器、微条探测器、
X射线探测器、中子探测器以及超快响应探测器

探测器的制备与工艺流程



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

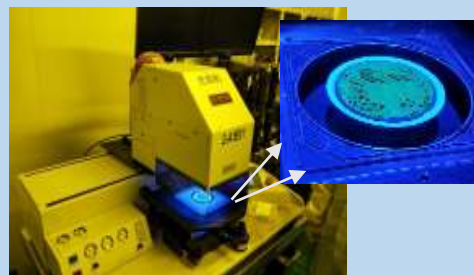
探测器工艺流程



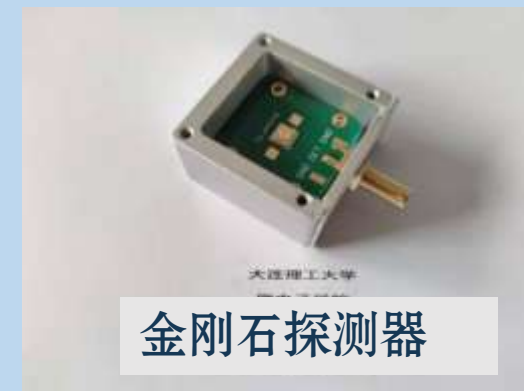
晶圆裂片



标准化清洗、甩干



光刻



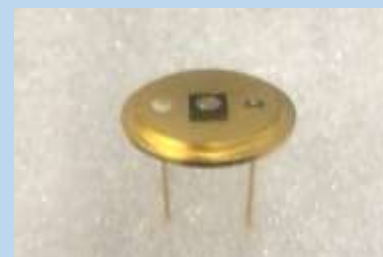
金刚石探测器



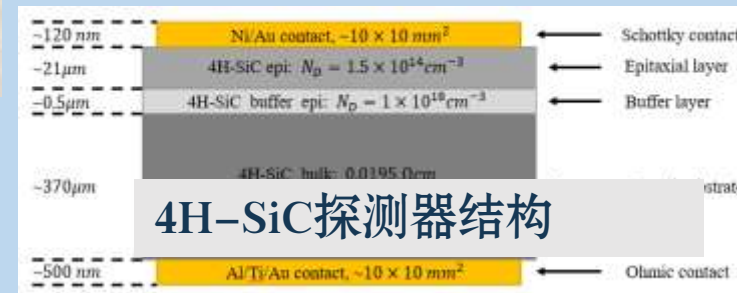
电子束蒸发



高温退火



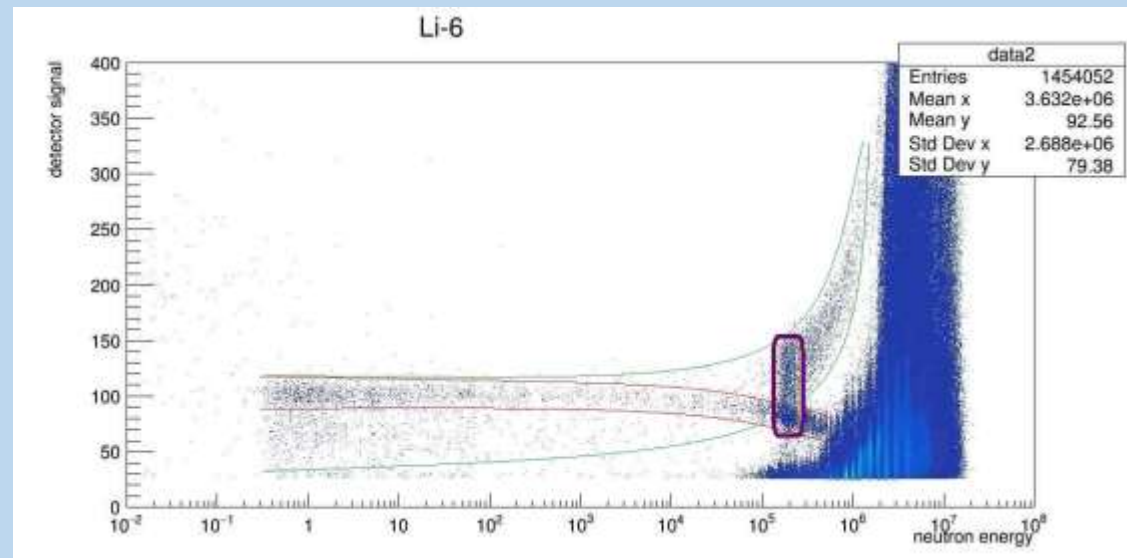
封装



SiC在白光中子实验终端上的测试



SiC探测器中子响应实验图



绿线部分为 α 粒子
红线部分为氚粒子

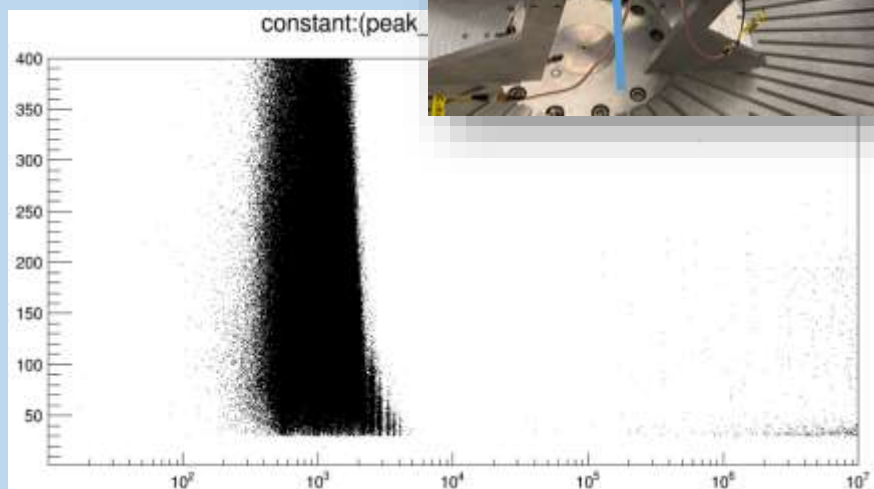
neutron energy - detector
signal 2-D plot with Li-6 target

SiC两次实验



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

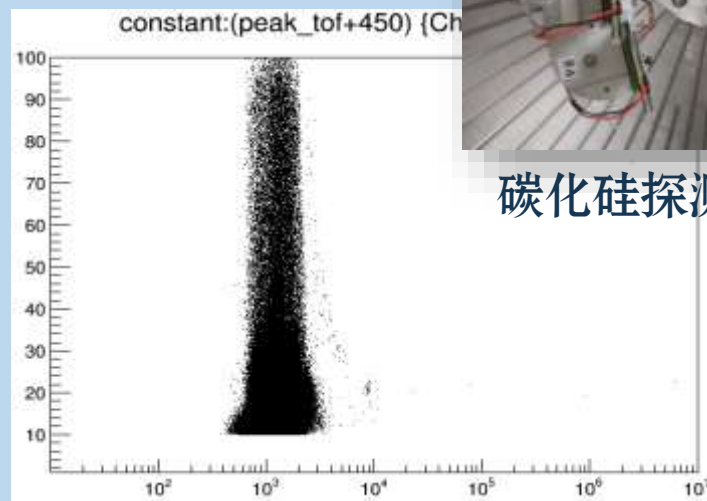
在低能区($10^5 \sim 10^8$ ns)能够观察到100道和200道两团信号,可能是Ni的某种同位素的(n, α)



SiC探测器 $^{63}\text{Ni}(n, \alpha)$ 实验结果

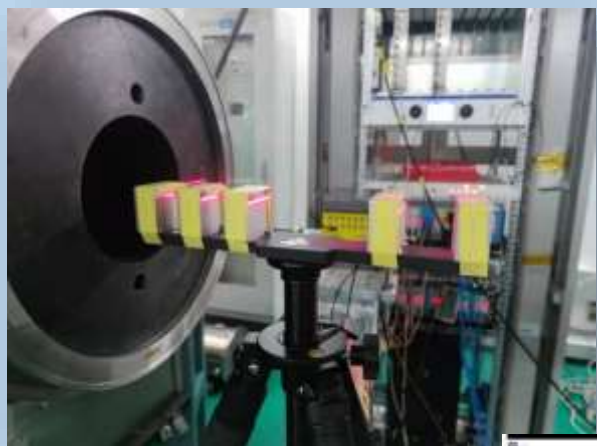


碳化硅探测器 $^{17}\text{O}(n, \alpha)$ 实验图

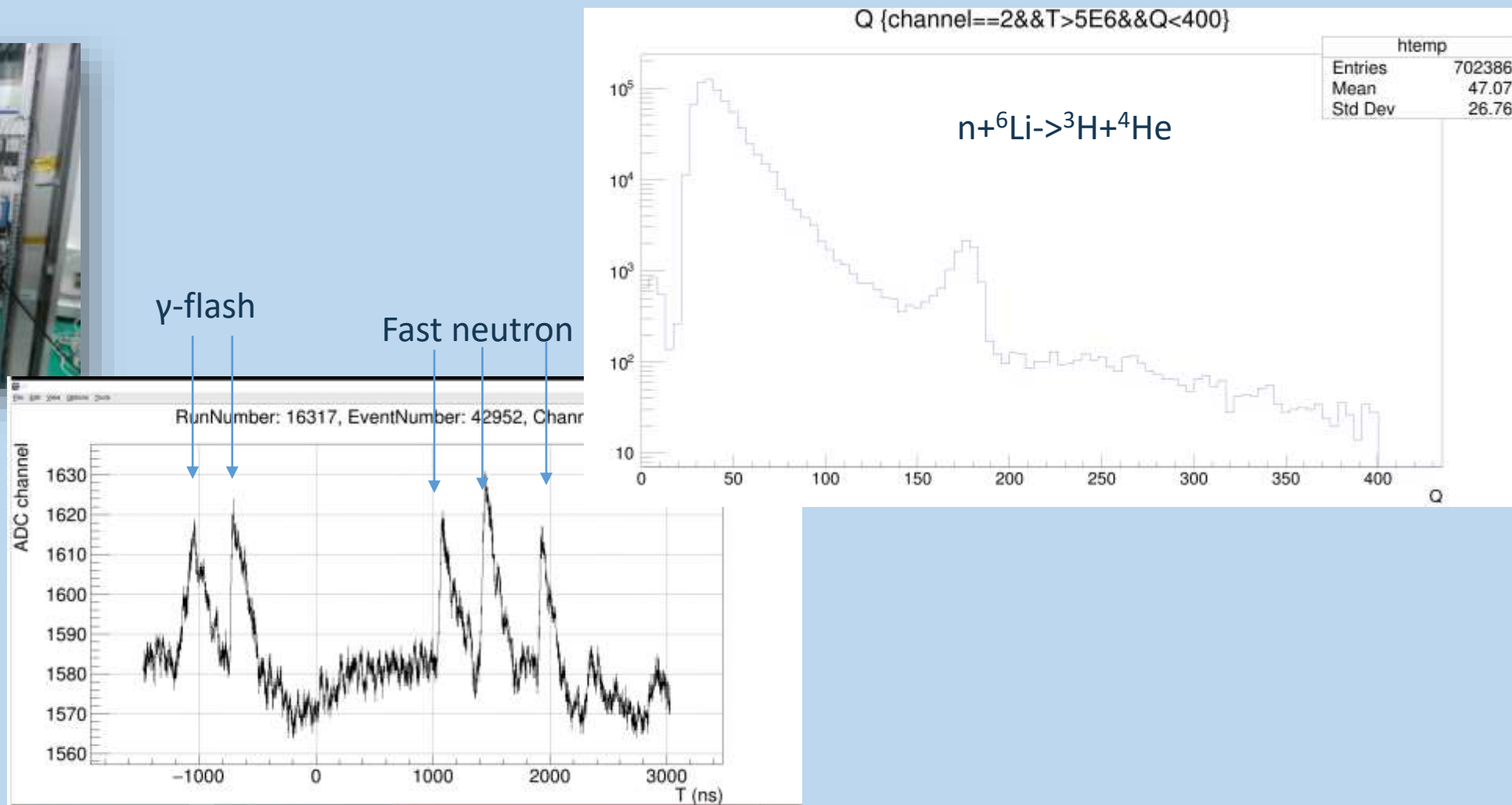


可以看到 $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ 在200~300keV的双峰,以及更高能区的一个事件带,低能区还需要更精确的分析

金刚石在白光中子实验终端上的测试



金刚石探测器白光中子源测试

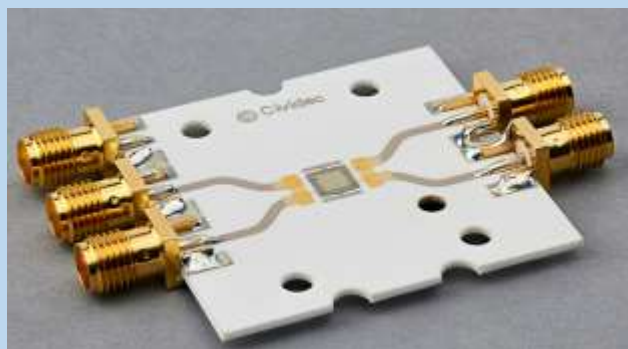


新型半导体规划



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- 性能研究：载流子标准测试系统、辐照终端
- 快响应：金刚石、3D-SiC
- 微结构：像素、 $\Delta E-E$



Cividec 四象限探测器

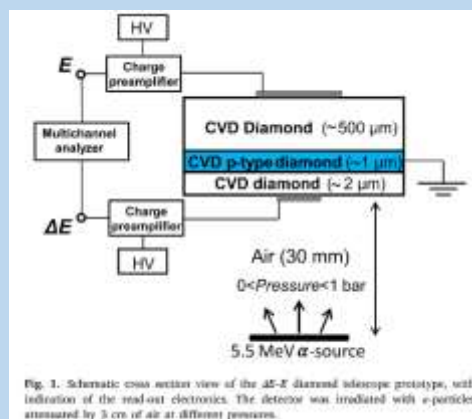
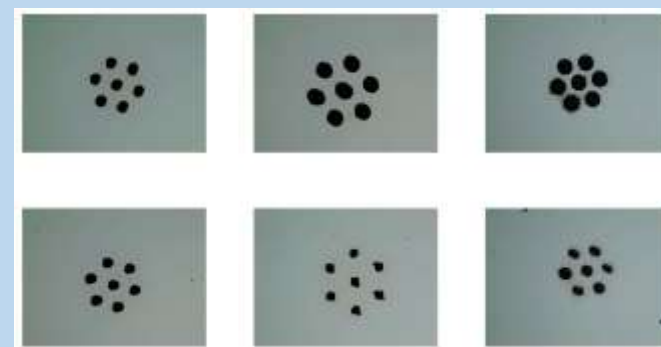


Fig. 1. Schematic cross section view of the $\Delta E-E$ diamond telescope prototype, with indication of the readout electronics. The detector was irradiated with α -particles attenuated by 3 cm of air at different pressures.

文献中金刚石 $\Delta E-E$ 探测器相关工作



碳化硅激光打孔情况



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

其他探测器相关系统

- DAQ系统
- 高低气压系统

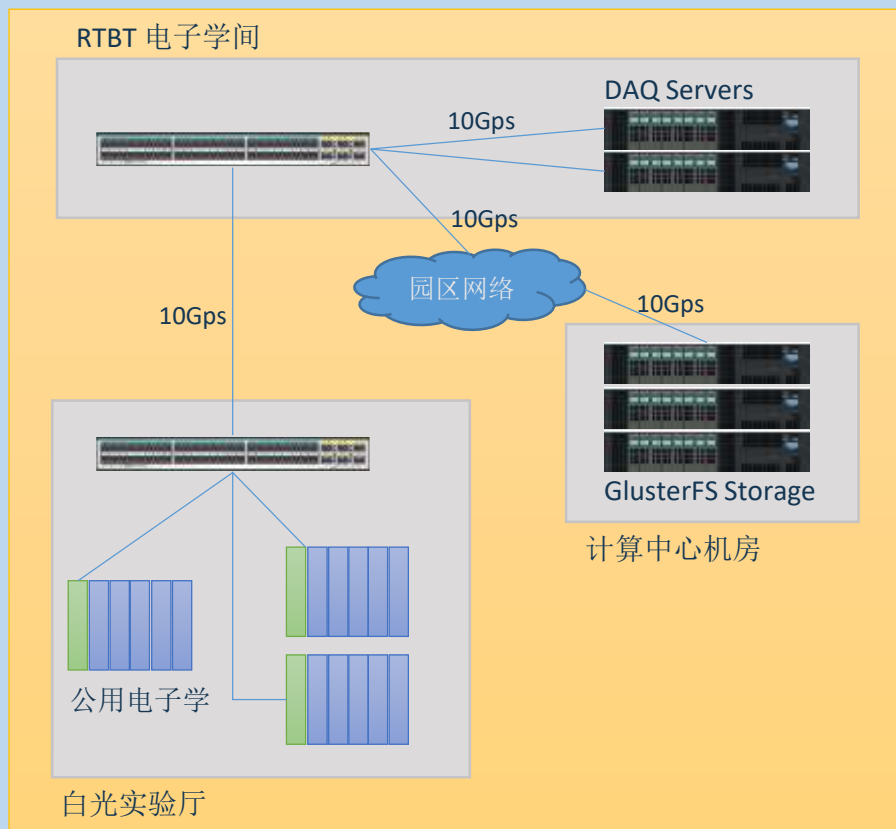


白光中子源数据获取系统



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

硬件系统



数据获取软件



高能物理实验运行监测问题

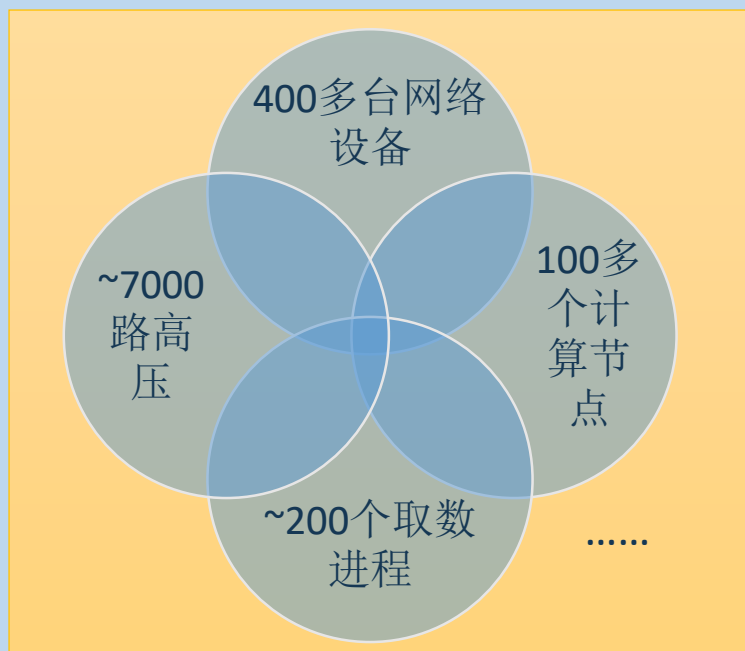
(LHAASO为例)

目前的解决方案：
经验丰富的运行专家！



China Spalla

举例：LHAASO取数相关系统



• 高能物理实验系统是多种硬件、软件、取数进程组成的**复杂系统**

举例：LHAASO运行人员发现问题，反馈给DAQ

- “目前20多个file每小时，之前大概4个文件...”
- “今天00:45左右掉了184台后来又恢复了”
- “今天凌晨2-4，有两个VLAN上的6个FEE无法连接，后恢复，请帮查一下原因，是否自动更换节点啦？”

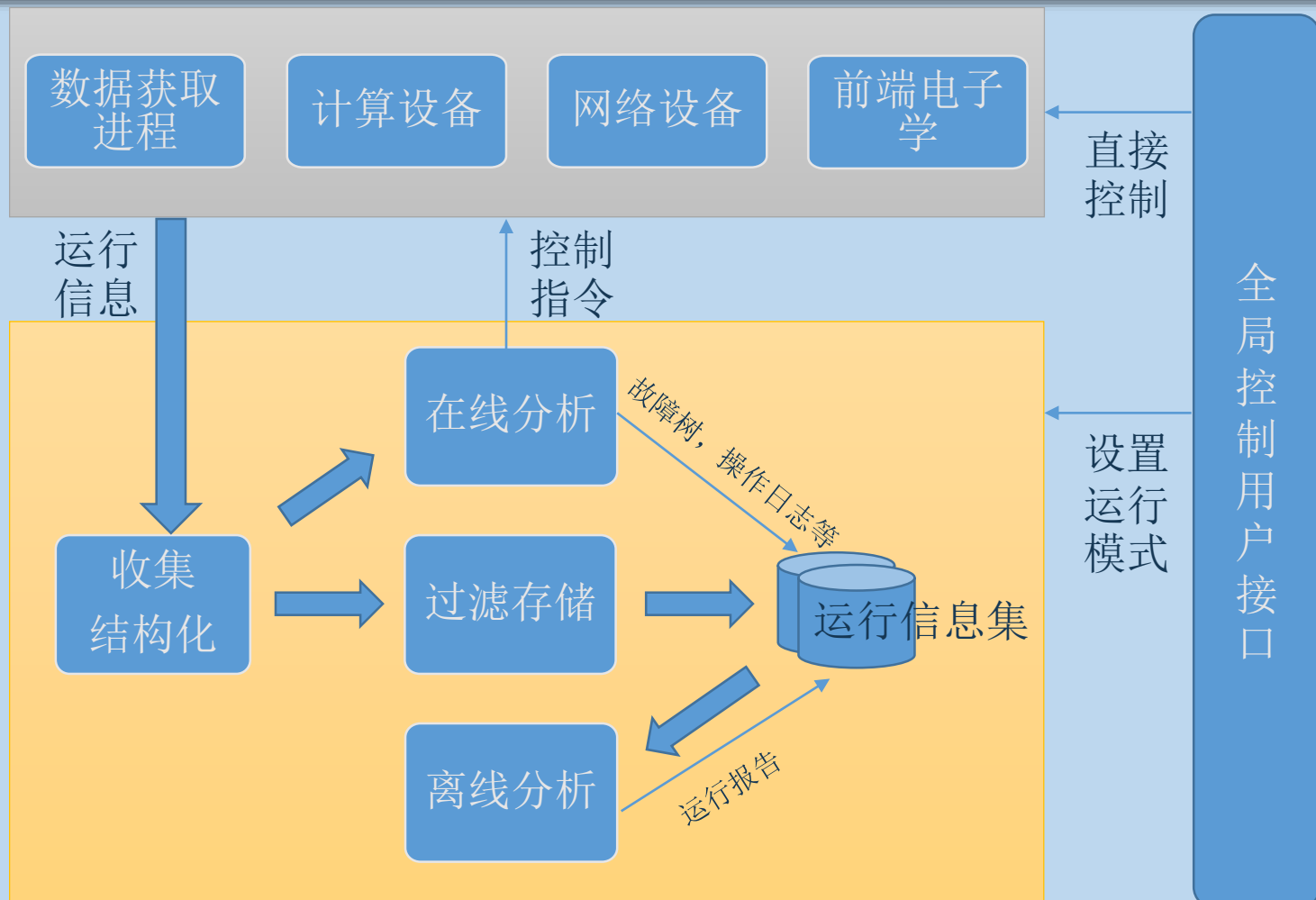


用户只看能到现象，找不到原因

• 各系统日志、状态、报警等信息量大，**故障原因定位困难**

实验控制系统云平台 (ECS-Cloud) 概念设计

实验系统



在线信息系统核心功能

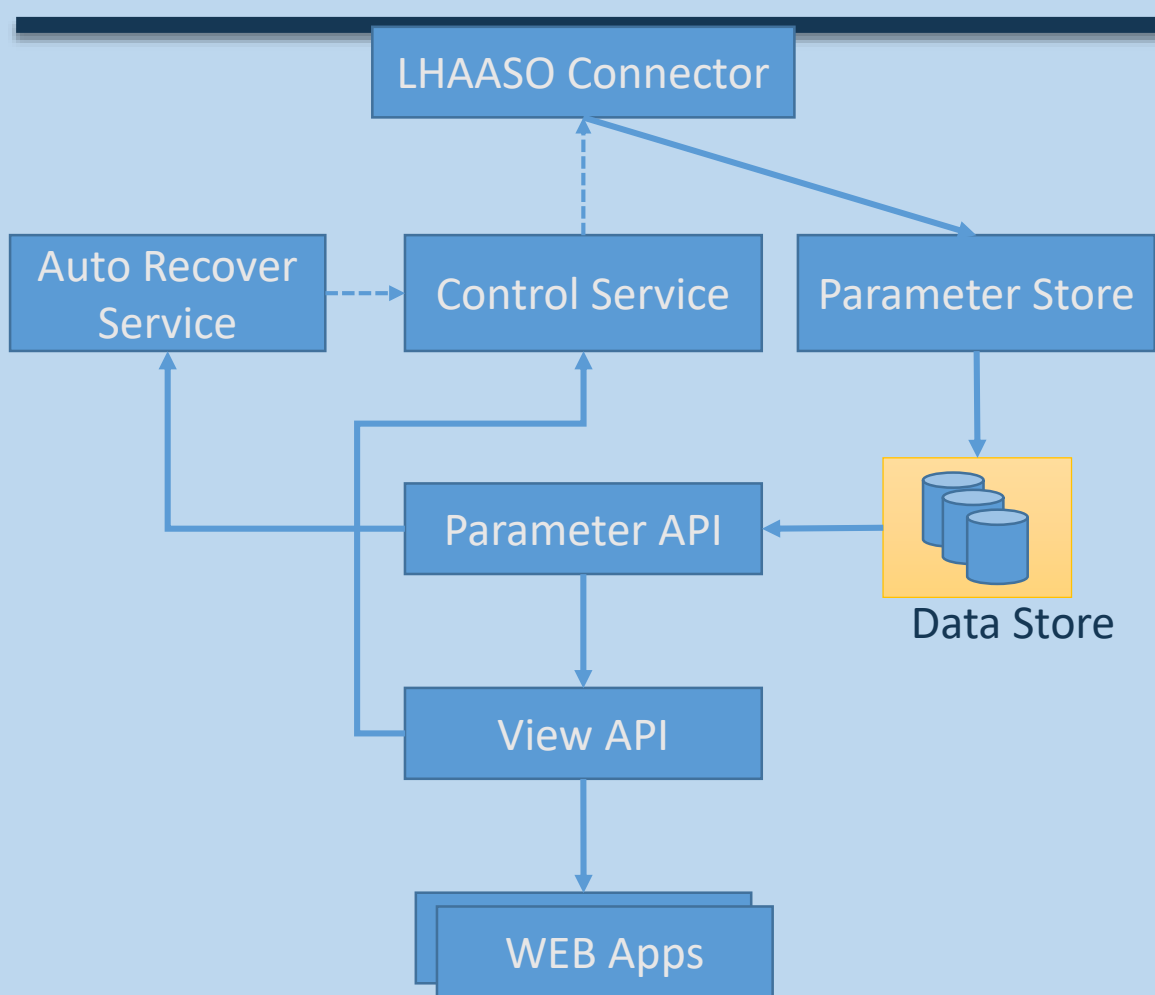
- 在线信息收集 Step 1
- 在线运行状态分析
- 常见故障自动恢复
- 输出运行报告



减轻运行人员负担

实验控制系统云平台 (ECS-Cloud)

初步应用案例：水切伦科夫探测器自动运行与监测



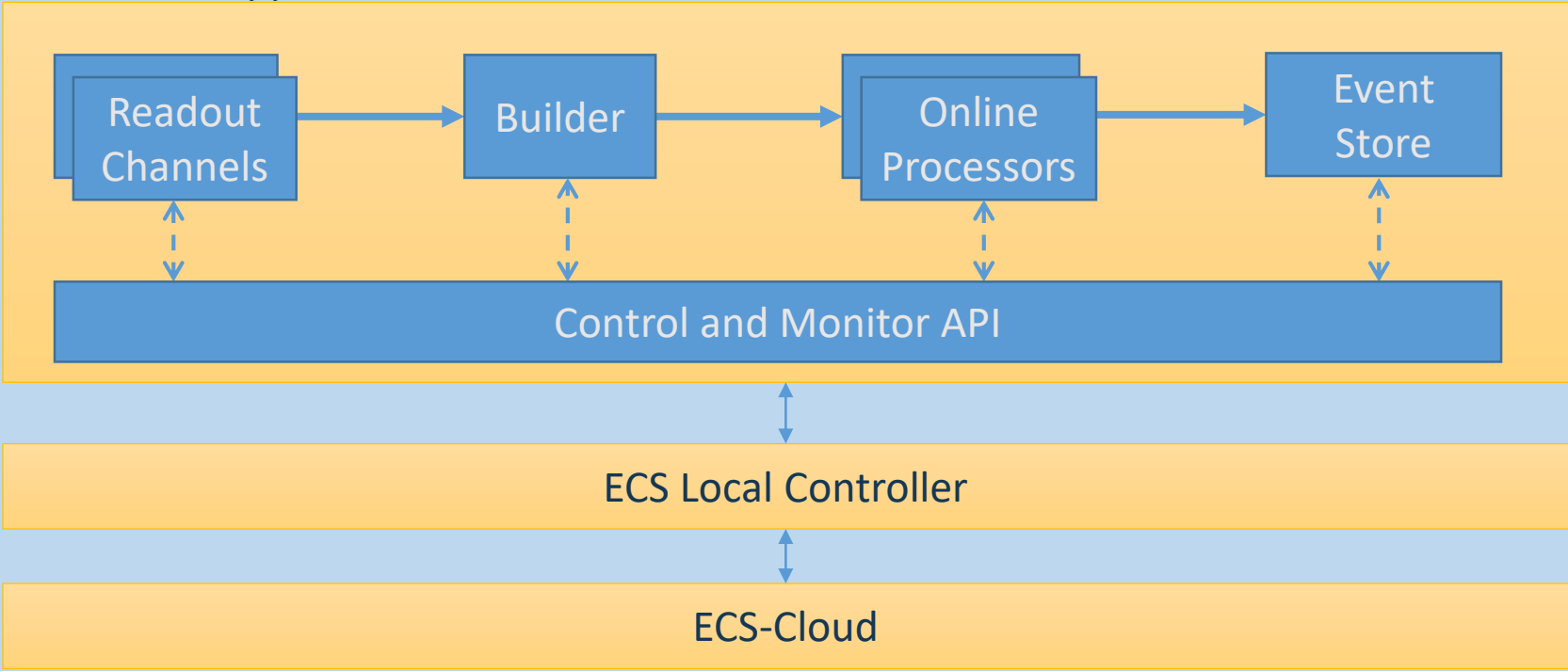
已实现数据获取无人值守运行，常见故障自动恢复！

传统DAQ软件复用模式：软件模块复用与多实验

中国散裂中子源
SNS
Online Separation from Source
TCP DAQ复用模式：ECS-Cloud提供软件服务复用和计算资源共享，统一管理降低运行和开发成本，同时便于增强软件功能，提供更加友好的控制与监测用户接口。

TPC DAQ开发现状与发展计划

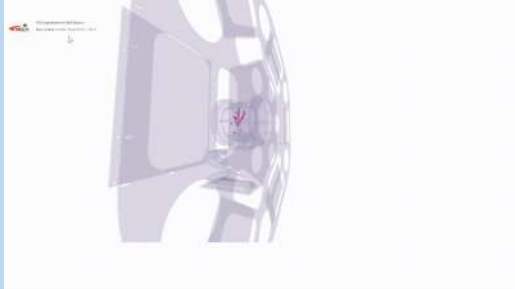
Data Flow Application



TPC Local DAQ
TPC特有应用软件

ECS组件，公共模块
白光实验共享

- TPC Local DAQ 特点
 - 为接入ECS-Cloud，实现开放信息接口
 - 插件式电子学配置接口，通过扩展插件灵活扩展电子学配置功能



高低气压系统设计要求



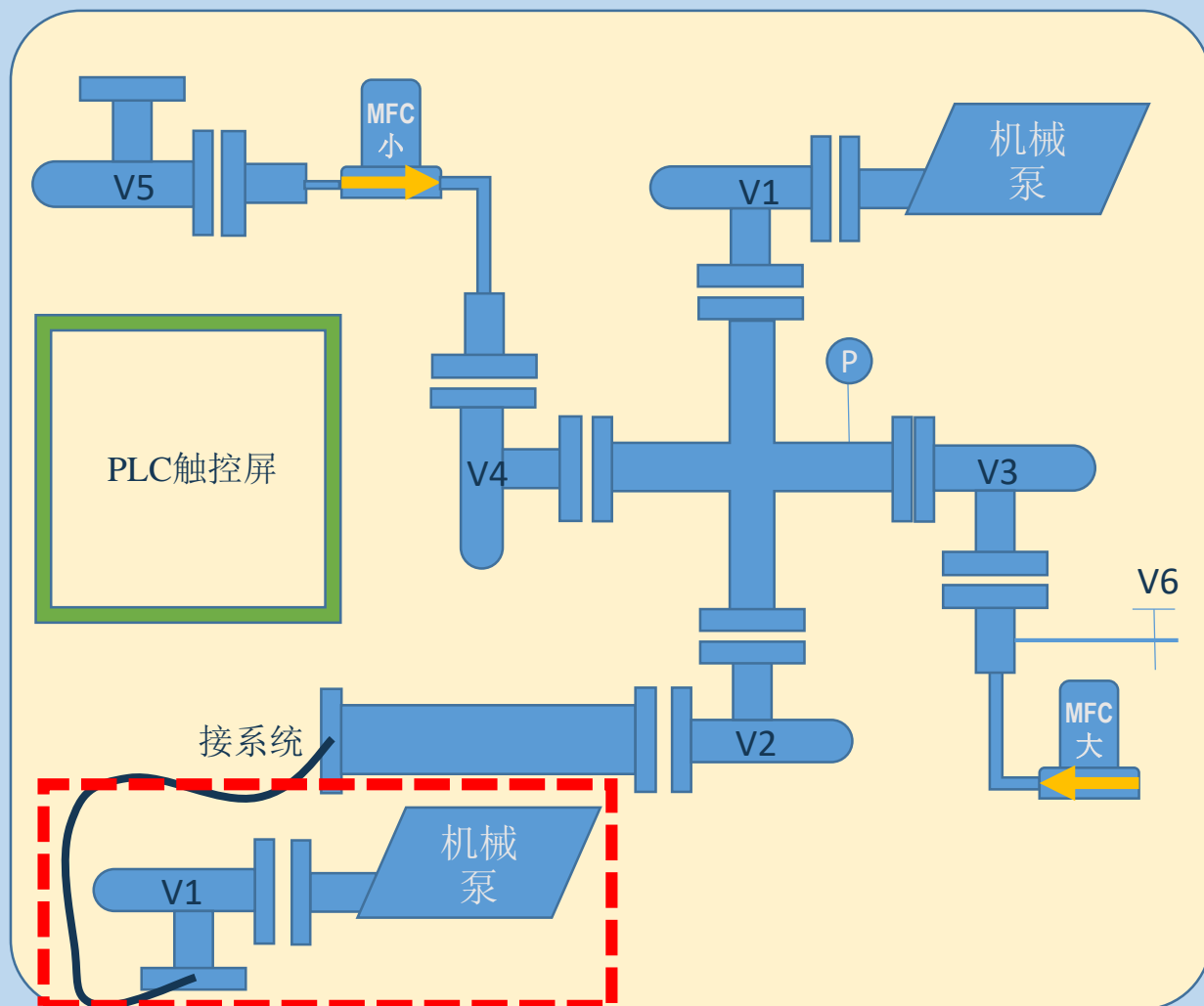
中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

- 1, 低压充气系统 (500–100000Pa)
其中500–5000Pa精度, 10%, >100sccm;
8000Pa, 精度3%, 2000–4000sccm;
10000–100000Pa, 精度1%;
- 2, 高压系统 (0.1–0.5MPa, 精度1%)
- 3, 流气系统 (千Pa级别)
- 4, 混合气体系统 (不同比例的气体按照一定比例混合)

定压充气系统设计方案



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



- 抽极限真空
 - 开机械泵
 - V3、V5关闭，开V1，开V4，MFC_小设置100%，3分钟后关闭V4，MFC_小设为0
 - 开V2，抽压力小于1Pa
- 充正压及恢复
 - 充正压
 - 关V1,开V3，开MFC_大，充至既定压力
 - 关V2，设置MFC_大100%
 - 恢复
 - MFC_大设为0,开V6,P接近大气压时,关V3,V6
 - 开V1,抽压力小于1Pa
- 充负压及恢复
 - 充负压
 - 开V4、V5,抽压力小于50Pa，关V1
 - 开V2，开MFC_小，充至既定压力
 - 关V2，关V5，设置MFC_小为0
 - 恢复
 - 开V1、V2、V4，MFC_小设置100%，抽压力小于1Pa，MFC_小设为0，关闭V4



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

谢谢！

感谢曹平、封常青、张志永、顾旻浩、李强、蒋伟、易晗、李样、孙艳坤、王鹏程、牛梦臣、龙泽、孙康等老师和同学的支持和材料！