



# 共用电子学升级方案及成效

汇报人：解立坤 岗位：解决方案总监

合肥中科采象科技有限公司

2025.07.24

# 目录

壹

背景介绍

贰

升级方案

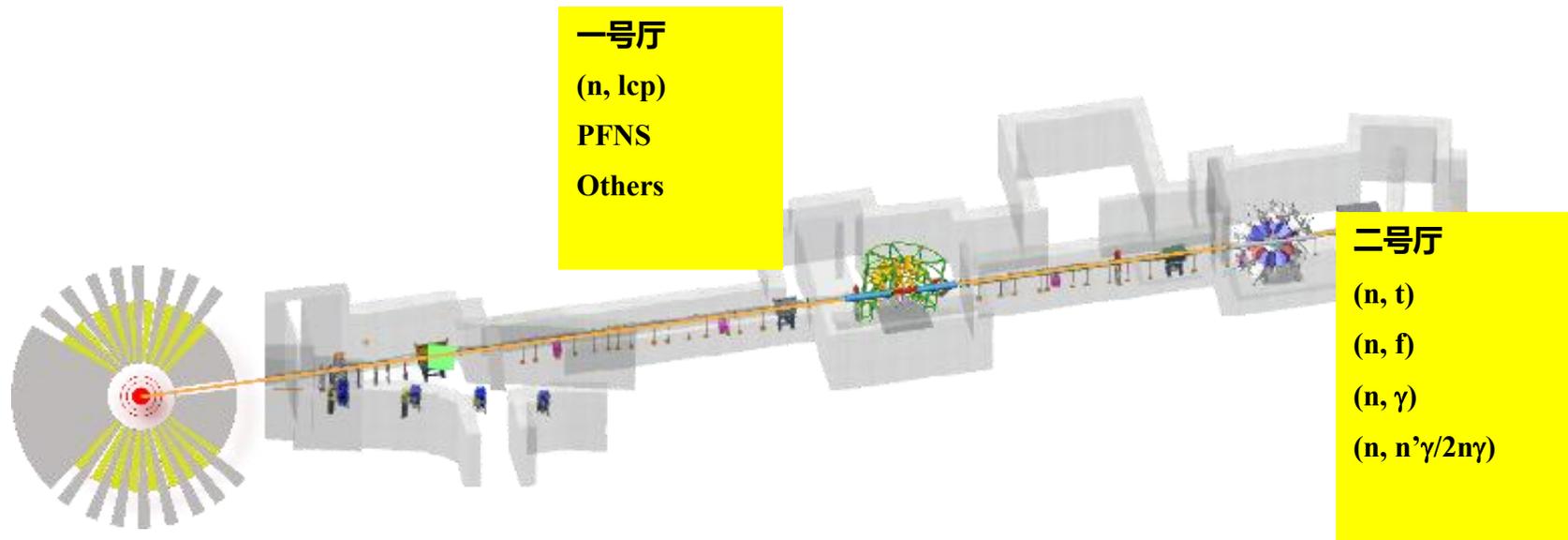
叁

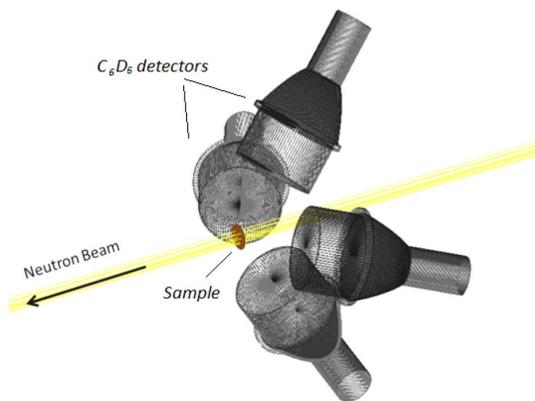
应用成效



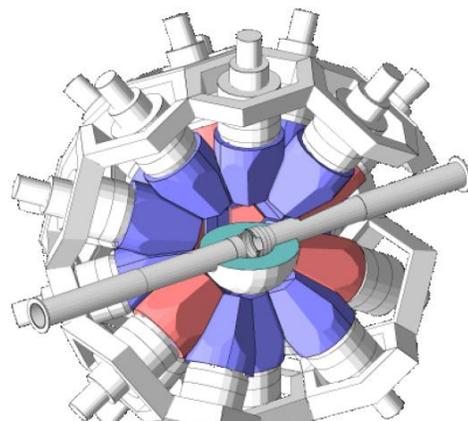
# 一、背景介绍

- 白光中子源是用于开展核数据测量研究的极为重要的平台型装置
  - 当前中国唯一极宽谱（ $0.5\text{eV}-200\text{MeV}$ ）中子实验装置
  - 国际上流强最高的白光中子束线（ $>10^7\text{ n/cm}^2/\text{s}$ ）
- 白光中子源，配备适应各种反应截面测量的不同类型的高性能谱仪，同时发展先进的实验方法，是开展高水平核数据测量研究的重要保证和工作内容。

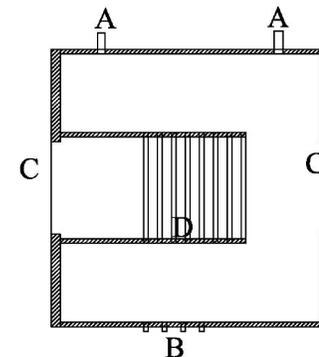




C<sub>6</sub>D<sub>6</sub>谱仪（俘获截面测量）

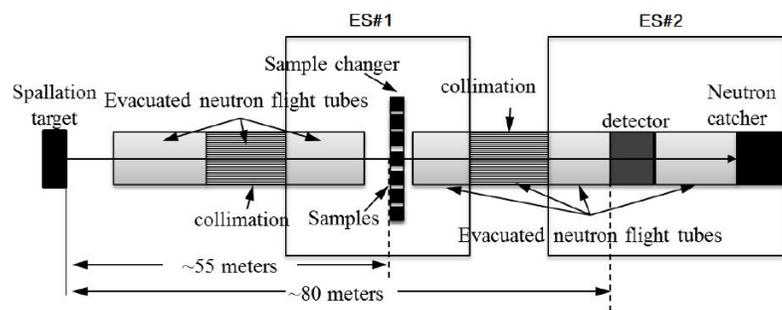


GTAf-II谱仪（全吸收Gamma测量）

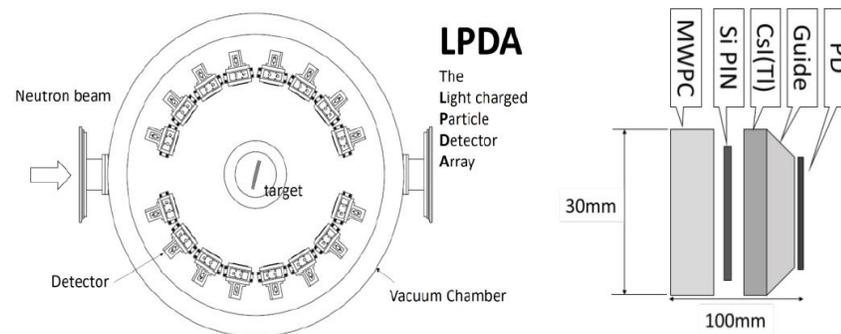


A: Exhaust vents  
 B: BNC connects  
 C: Neutron windows  
 D: Fission cells

FIXM谱仪（裂变截面测量）

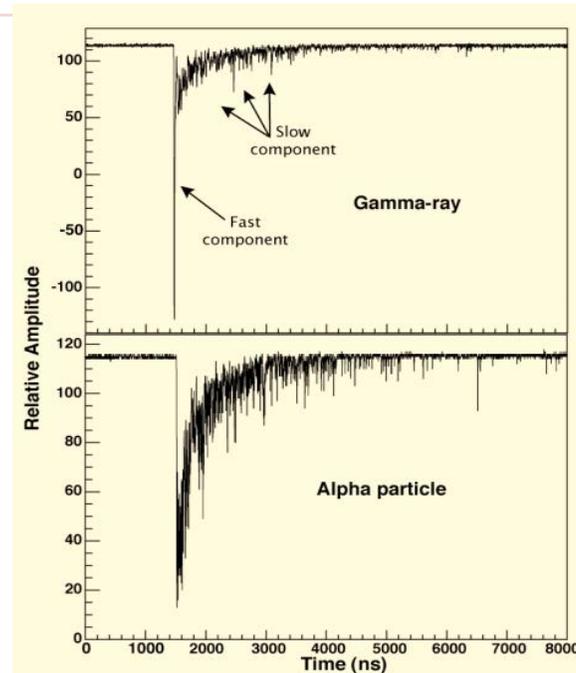
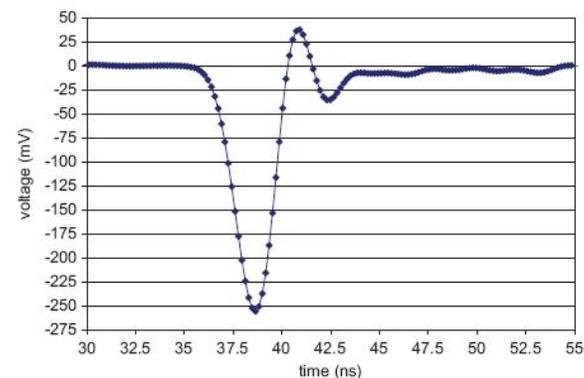


NTOX谱仪（全截面测量）



LPDA谱仪（带电粒子出射）

- 探测器/传感器输出脉冲信号的波形蕴含着所探测事件的最全面、详细和准确的物理信息。
- **能量信息**：信号的波形面积代表着探测器/传感器中沉积的能量，精确测量**波形面积**可以获取这一能量信息。
- **时间信息**：信号波形的前沿则携带着事件发生的时间信息，获取波形的**前沿形状**，可以很方便地外推出事件发生的精确时刻。
- **波形数字化**：直接对探测器输出信号波形进行高速采样并数字化；不再进行传统的电荷积分、成形，对其幅度**数字化获取其电荷（能量）**信息。
- 数字化系统结构简单，**消除了传统电荷积分放大带来的“堆积”效应**，**死时间小**，**适应于高亮度、高事例率**的物理实验。
- 随着实验装置的升级，探测器规模及精度的提高，科学家期望能够实现**更为精确的实验数据、事例率、通道规模、采集精度**等要求，对数据采集系统提出挑战。

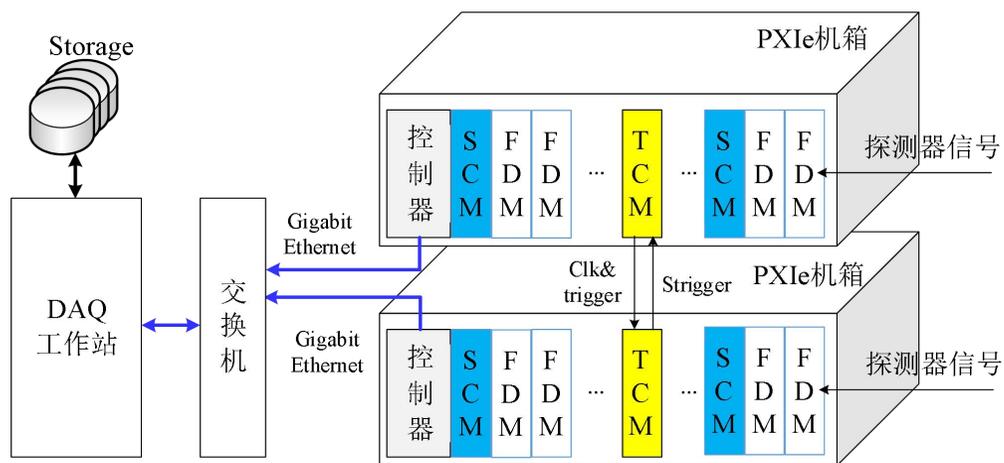
BaF2探测器输出的 $\gamma$ 和 $\alpha$ 信号波形

- **推动力——实验数据的精确测量：**
  - 空间分辨：探测器数量（电子学通道数）
  - 时间分辨：飞行时间、通道同步性能
  - 能量分辨：单通道动态范围、能量测量精度
  - 事例率：打靶周期提高、事例率提高
- **比如Back-n GTAF-II谱仪（对读出电子学要求最高）指标：**
  - 总通道数：40 / 92
  - 单通道动态范围：大于500倍（几十keV~10MeV）
  - 时间测量精度：好于1ns
  - 电子学对单通道 $\gamma$ 射线能量测量误差的贡献小于1%@662keV
  - 有效触发率：大于3kHz
  - 死时间：小于2 $\mu$ s
- **设计挑战**
  - 多通道、高精度数据测量：波形数字化技术
  - 数字化触发技术：灵活、可重载触发算法
  - 高事例率：适配高中子流强所带来的高事例率、高数据率的问题
  - 共性化设计：白光中子源上众多谱仪电子学共性化设计

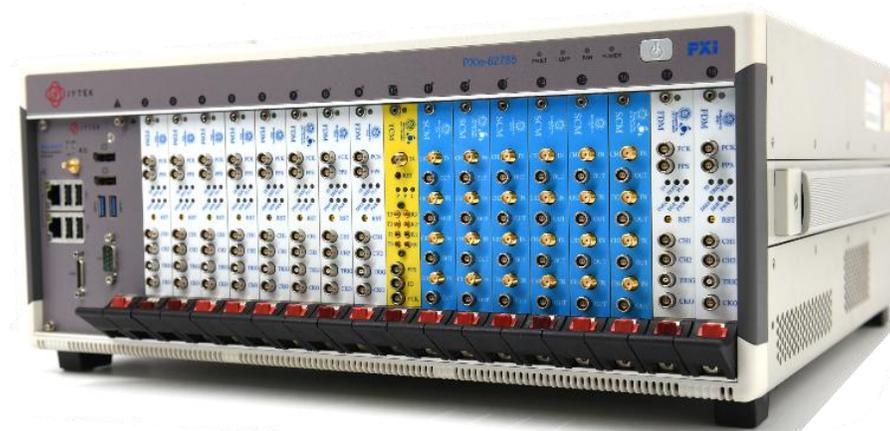
# 1.5 原有共用电子学方案

## ■ 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**）；
- 波形数字化模块（FDM）：对输入波形进行高速高精度数字化（**共用**）；
- 触发与时钟模块（TCM）：产生及扇出时钟和触发信号（**共用**）；
- DAQ软件：控制FDM、TCM实现系统采集需求



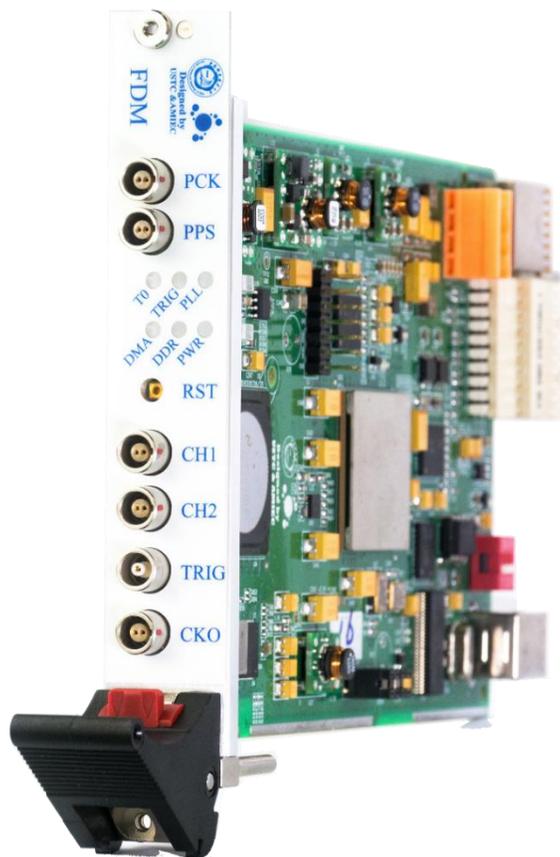
原有共用电子学框图



原有共用电子学照片

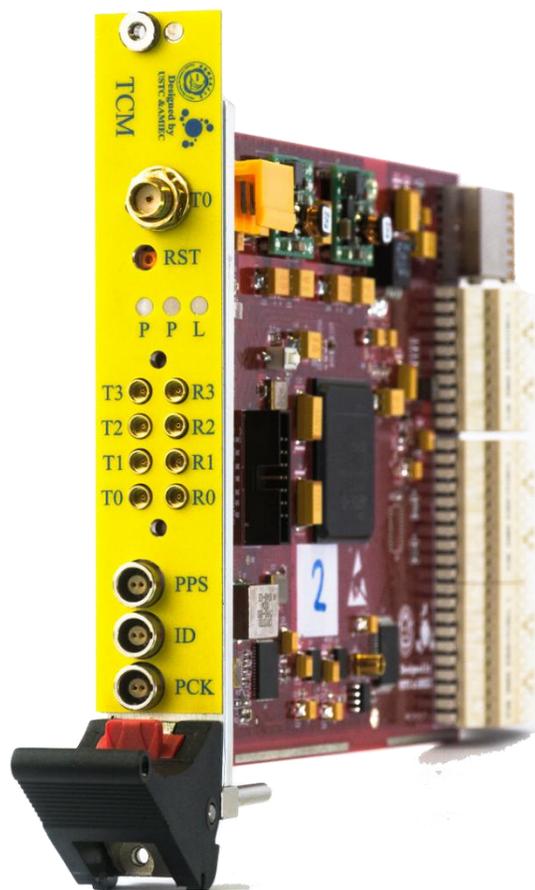


参数名称	参数值	
型号	SCM- C <sub>6</sub> D <sub>6</sub>	SCM-COM
输入信号前沿	>10ns	>10ns
输入信号后沿	<50ns	<100us
信号范围	0 ~ -3V	0 ~ 500mV
插件形式	PXIe 3U	PXIe 3U
通道数	4	4
带宽	大于100 MHz	大于70MHz
输入接口	单端SMA	单端SMA
输出接口	差分LEMO	差分LEMO
输出信号	共模电压: 1.25V 差模电压: -400~400mV	共模电压: 1.25V 差模电压: -400~400mV
功耗	约3W	约3W



FDM实物图

参数名称	参数值
型号	FDM-1G12b
采样率	1GSPS
量化精度	12bit
存储深度	4Gbit
单插件通道数	2
最大缓存长度	每通道32744采样点
Pre_trigger采集长度	16000采样点
插件类型	PXle 3U
触发输入	PXle接口、LEMO
时钟输入	PXle接口、板载、外部
时钟输出	差分LEMO, 125MHz
全局授时接口	PPS/125MHz LVPECL
模拟输入	LEMO、差分 (800mVpp)
调试端口	USB 2.0
数据读出	PXle, gen2,x4lane
在线触发	硬件触发
数字信号处理	FPGA, 可编程
功耗	15W

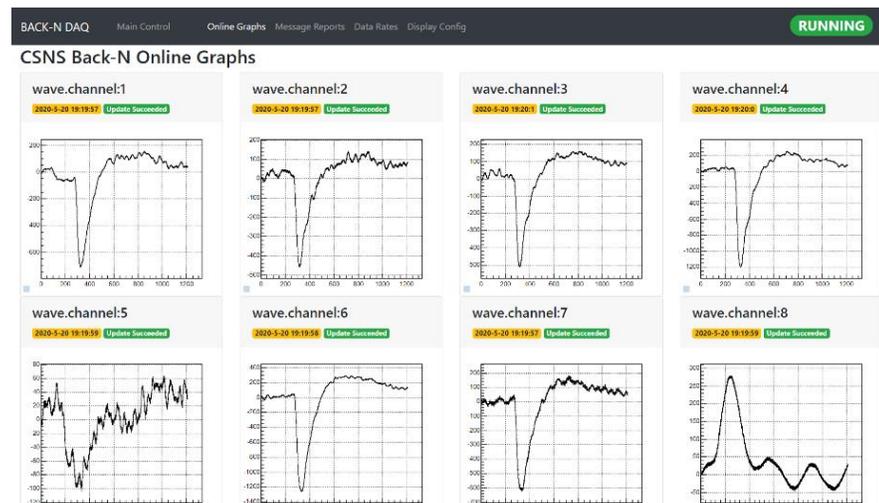
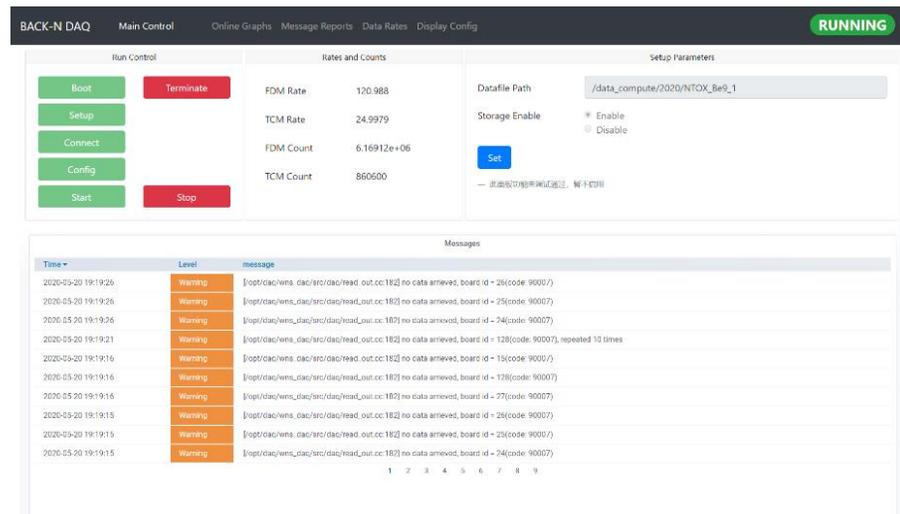


TCM实物图

参数名称	参数值
型号	TCM
TDC 码宽	63ps
扇出时钟频率	125MHz (可重配)
时钟扇出通道数	17 (PXIe DSTARA)
触发扇出通道数	17 (PXIe DSTARB)
时钟数据融合传输通道 (高速串行通道)	4对
插件类型	PXIe 3U
触发输入	PXIe_DSTARC/高速串行通道
时钟输入	PXIe接口、板载、外部
时钟输出	125MHz LVPECL
T0输入	SMA
全局授时接口	PPS/125MHz LVPECL
数据读出	PXIe, gen1,x4lane
数字信号处理	FPGA, 可编程
功耗	约10W

# 1.5. DAQ软件

- 界面包括：
  - 运行控制主界面
    - ◆ 计数率信息
    - ◆ 报错信息
  - 在线图显示界面
    - ◆ 抽样波形
    - ◆ 飞行时间谱
    - ◆ 波形幅度谱
  - 在线参数显示界面
  - 配置界面



## ■ 硬件

### ● 系统集成度、便捷性提升

- ◆ 1个SCM+2个FDM，提供4个采集通道，单PXIe机箱实现20通道
- ◆ SCM硬件切换适配不同谱仪，PXIe插拔可能损坏

### ● 硬件分辨率+缓存提升

- ◆ 原有FDM为12bit，提升至16bit可以支持后续更高精度实验需求
- ◆ 数据采集长度设置限制为32us，需提升至百us支持长信号波形

## ■ 固件

### ● FPGA在线实时处理波形，减少数据量，缩短数据分析时间

- ◆ 全波形导致的数据量大(200MB/s)
- ◆ 离线数据分析时间长 (~数月)

## ■ 软件

### ● 软件操作提升

- ◆ 原有DAQ通过Config文件进行参数配置，设置便捷性需提升



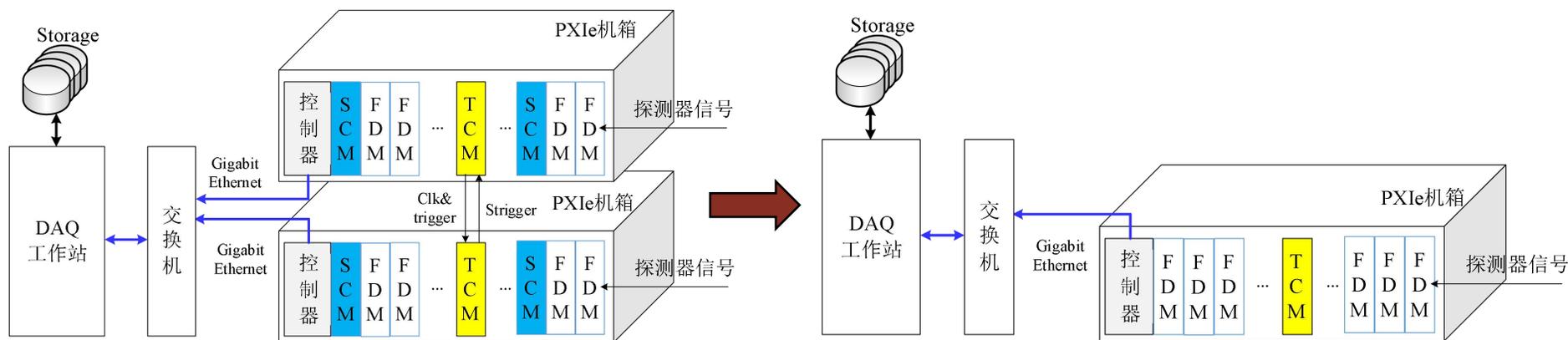
## 二、升级方案

## 2.1 升级共用电子学方案

### ■ 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）；
- 波形数字化模块（FDM）：对输入波形进行高速高精度数字化（共用）；
- 触发与时钟模块（TCM）：产生及扇出时钟和触发信号（共用）；
- DAQ软件：跨平台的多机箱、多板卡控制软件（共用）

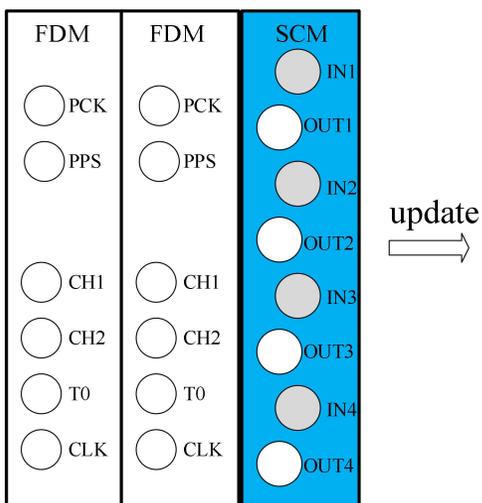
### ■ 模块性能及功能全新升级，系统集成度提升至64ch/机箱



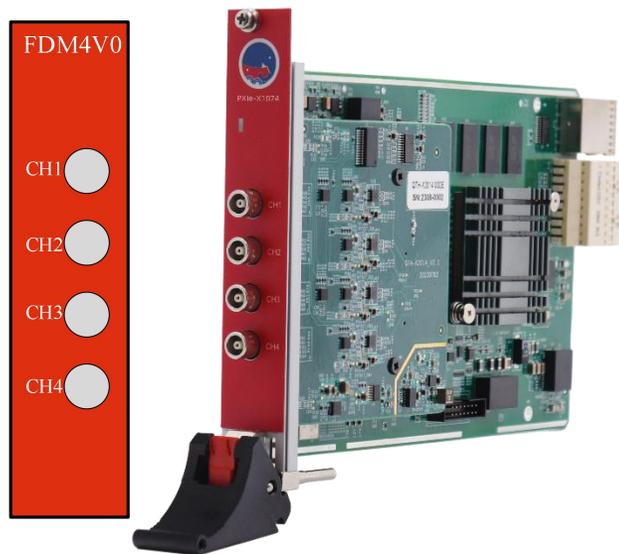
# 2.1. FDM升级

## ■ 升级 FDM = 2x原有FDM + 1x原有SCM

- 性能全面升级
- 在线可调增益
- 在线处理算法



升级示意



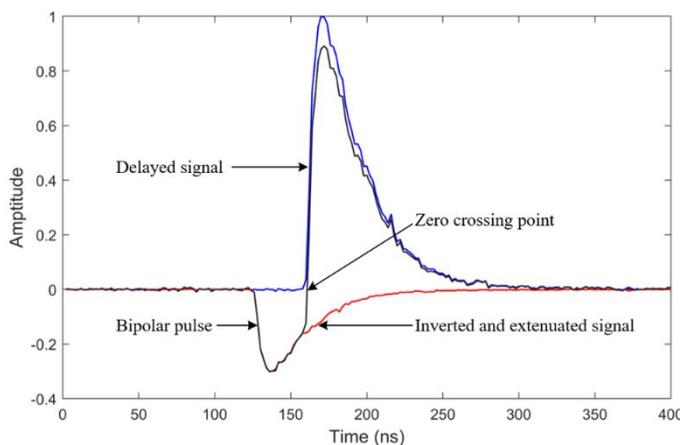
FDM\_V4.0实物图

参数名称	原有FDM	升级FDM
采样率	1GSPS	1GSPS
量化精度	12bit	16bit
存储深度	4Gbit	32Gbit
通道数	2	4
量程	适配SCM	1.3Vpp、3.9Vpp在线可调
最大缓存长度	32us/通道	128us/通道 支持升级500ms/通道
Pre-trigger采集长度	16us	32us
在线触发	S1/S2/S3	S1/S2/S3
在线处理	-	CFD、PSD、QDC

## 2.1.1 FDM在线处理算法

### 数字恒比定时CFD

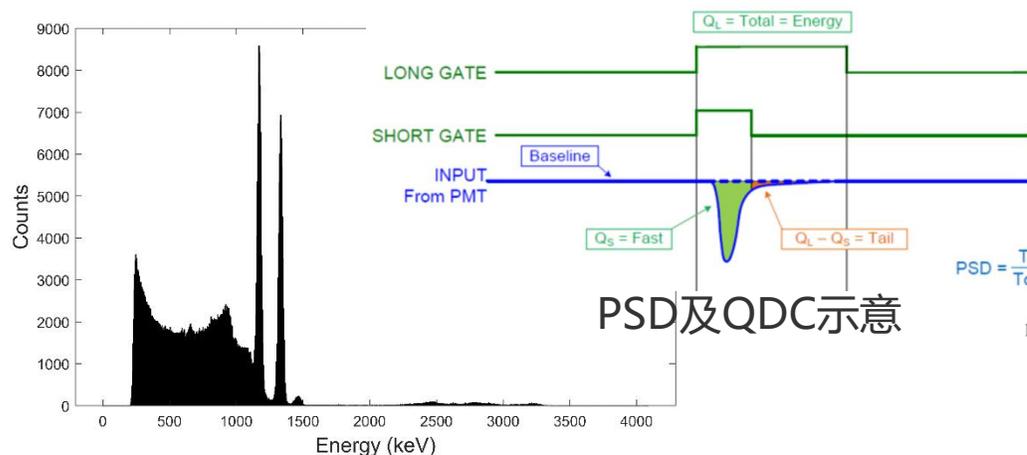
通过延时、衰减运算，实现恒定触发比来检测脉冲信号前沿到达时刻，降低了信号幅度变化对定时结果的影响，减少时间晃动



CFD处理示意

### 电荷积分 QDC

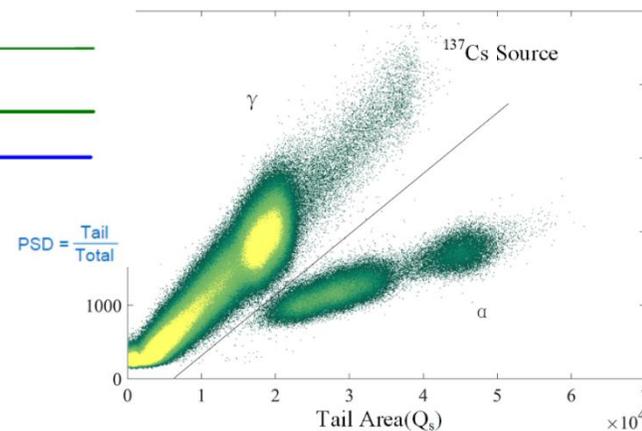
待测粒子沉积至探测器，产生的信号转换为电流脉冲。通过对测量脉冲信号进行积分，可以得到其总电荷量，获取粒子能量信息



QDC获取LaBr<sub>3</sub>能谱 (<sup>60</sup>Co)

### 脉冲波形甄别PSD

利用不同粒子闪烁光快慢成分差异，通过对脉冲波形信号进行长短门积分，计算得到PSD比值进行粒子类型精确甄别



PSD对BaF<sub>2</sub> α/γ 甄别

## 2.1.1 FDM其他型号选型

### ■ 支持100MSPS~10GSPS选型

- 100MSPS低速支持PHA算法，适配于半导体探测器
- 500MSPS~1GSPS低速支持CFD、PSD、QDC算法，适配于闪烁体探测器
- 5GSPS/10GSPS支持获取波形，适配于MCP、APD等快信号获取



PXIe-X1063

4CH、100MSPS、16-bit



PXIe-X1048

8CH、500MSPS、16-bit



PXIe-X1073

4CH、1GSPS、16-bit



PXIe-X1022

2CH、5.2GSPS、12-bit  
1CH、10.4GSPS、12-bit

## 2.1.1 TCM升级

### ■ 升级 TCM

- 支持远距离机箱通讯
- 机箱交互速率提升8倍，降低全局处理时间
- 性能全面升级（5倍）

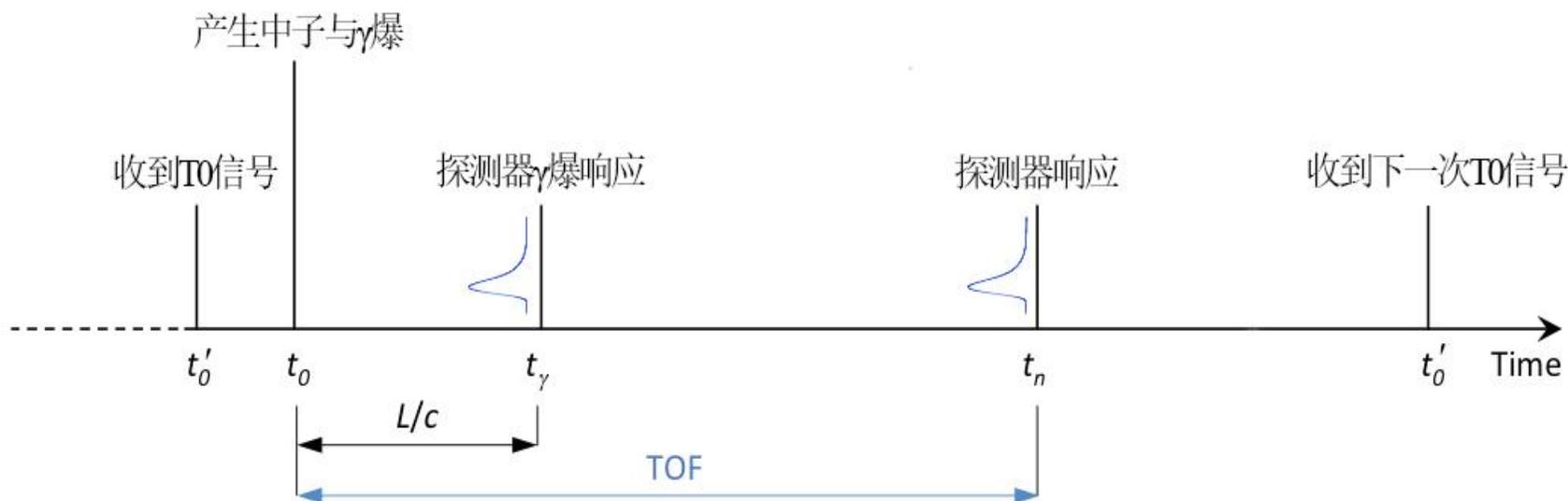


升级TCM实物图

参数名称	原有TCM	升级TCM
TDC码宽	63ps	42ps
FPGA处理资源	75,520逻辑单元 3,780kb RAM	356,160逻辑单元 16,020kb RAM
扇出时钟频率	125MHz	7.8125MHz 适配多款采集模块
机箱间交互	同轴线缆1.25Gbps	光纤 10Gbps
时钟扇出通道数	17对 (PXIe_DSTARA)	17对 (PXIe_DSTARA)
触发交互通道数	17对 (PXIe_DSTARB/C)	17对 (PXIe_DSTARB/C)
T0输入	SMA	SMA
全局WR授时	差分Lemo x2	差分Lemo x2

## 2.1.1 中子飞行时间 (TOF) 测量

- 测量原理：在高精度全局授时基础上，对T0信号、伽玛爆信号、探测器响应信号打上高精度时间戳（8ns精度），通过信号事例之前的时间差，获得中子飞行时间
  - 高精度的时间数字转换器：基于FPGA的TDC技术（电子学精度15ps RMS）
  - 探测器响应信号：CFD提取精确时刻（电子学精度10ps RMS）
  - 中子飞行时间：CFD时刻-T0时刻+修正（固有传输延时）

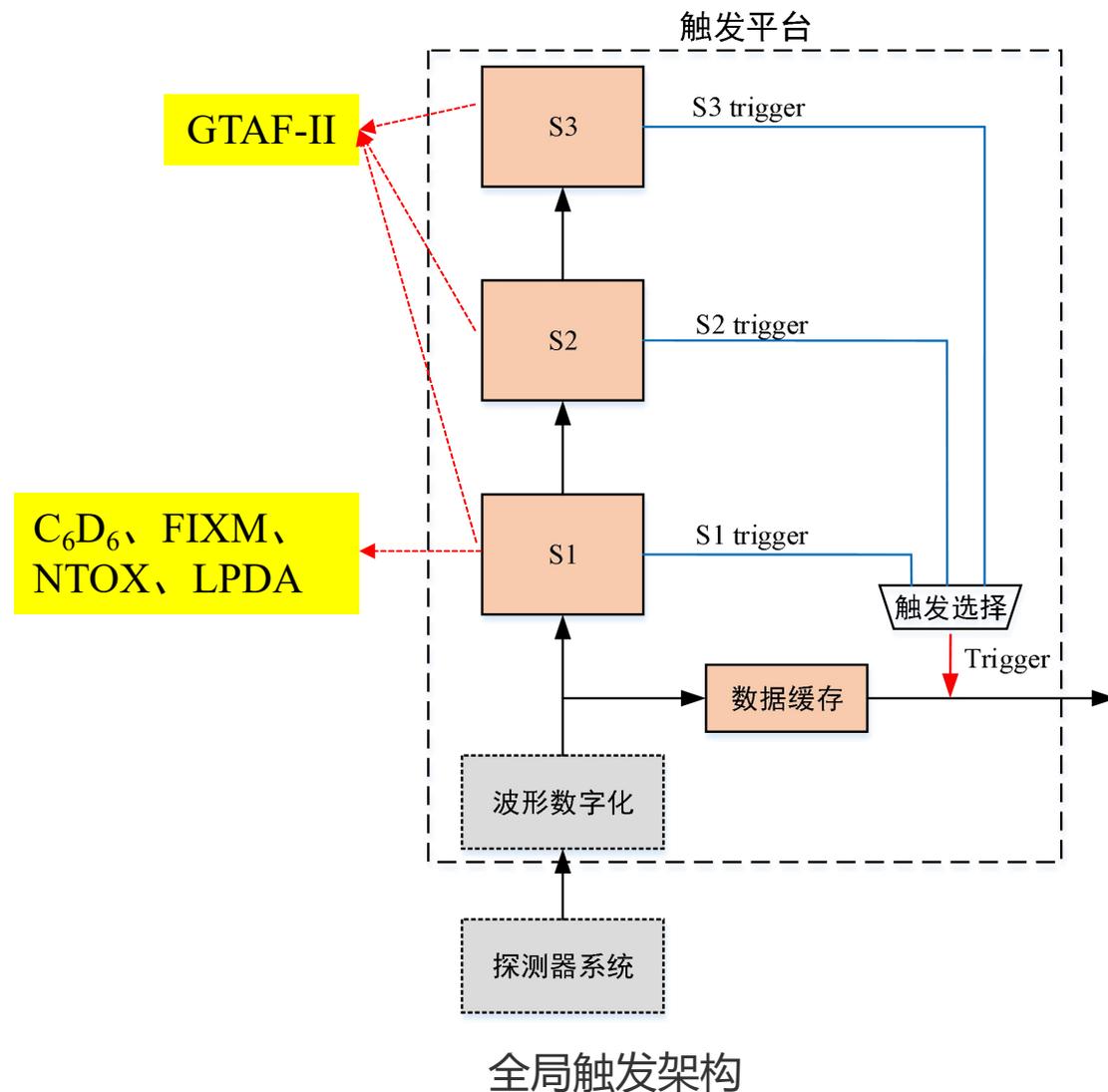


### 架构特点：

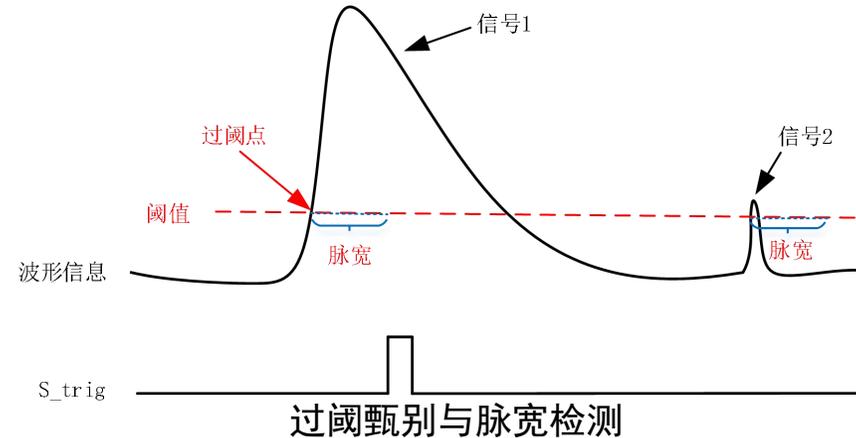
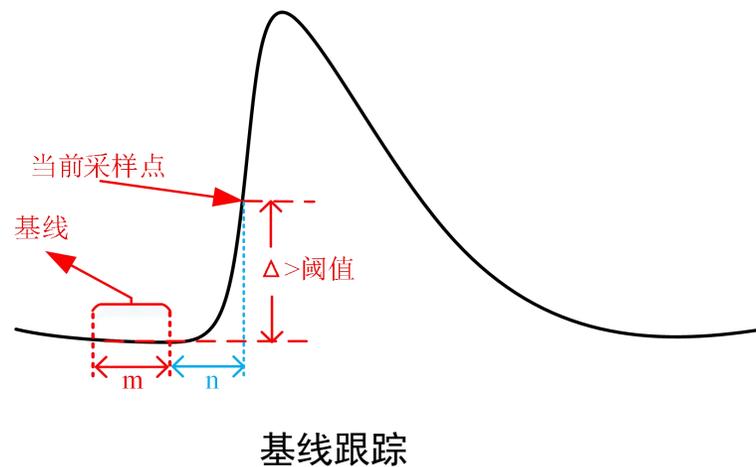
- 全数字化处理
- 触发数据来源：数字化波形
- 触发信息处理：FPGA
- 三级触发架构（S1/S2/S3）
- 工作模式：（灵活配置）
  - ◆ S1、S1/S2、S1/S3、S1/S2/S3

### 各级触发功能：

- S1：基线追踪、数字过阈甄别、脉宽甄别
- S2：脉冲波形甄别（PSD）
- S3：全局触发判选

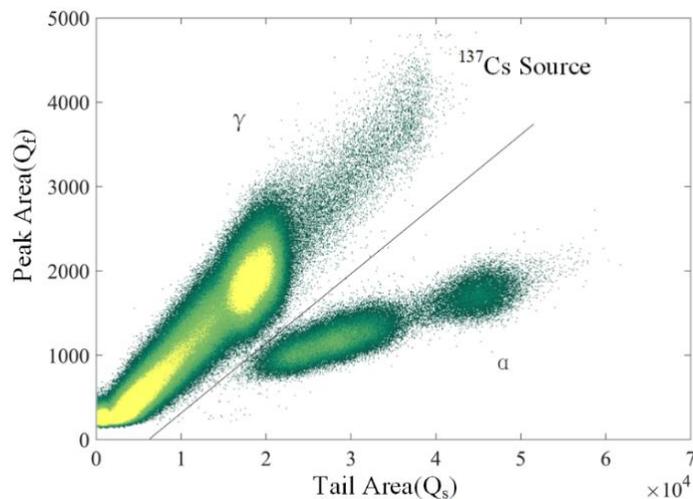


- S1级触发在FDM的FPGA中实现
  - 基线跟踪：选取当前采样点前，m个采样点平均值作为基线
  - 过阈甄别、脉宽检测：超过阈值n个点后，产生S1级触发

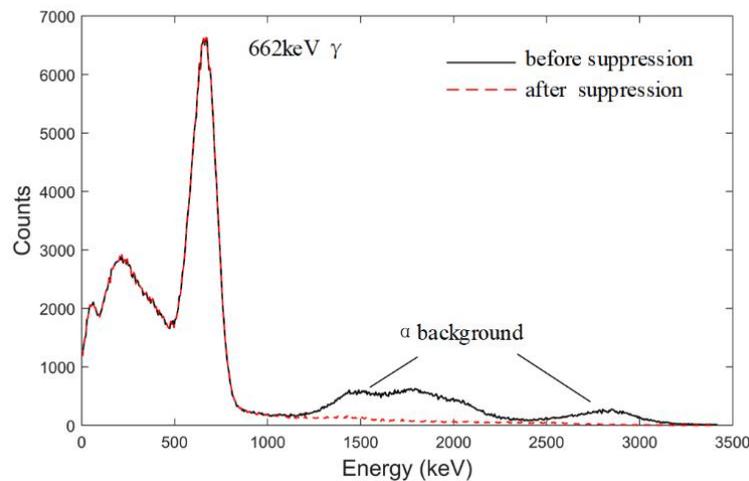


## 2.2.1 S2级触发（同原有）

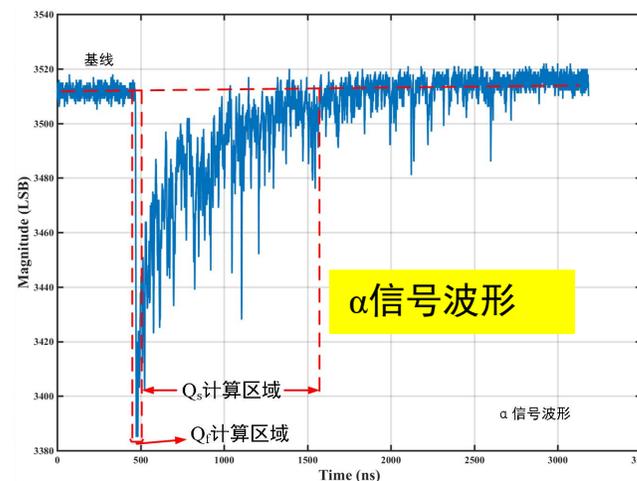
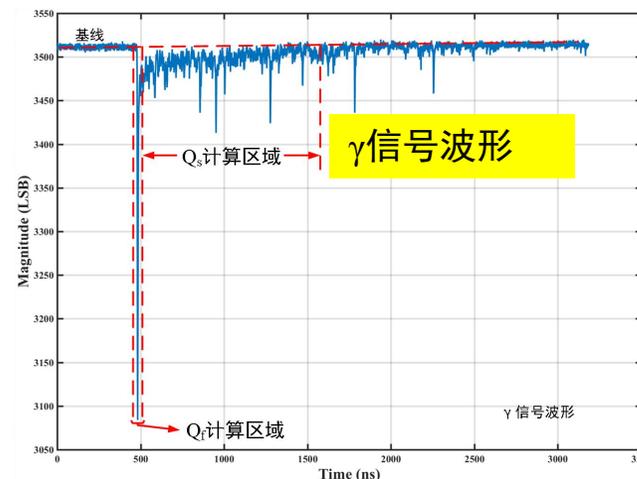
- S2级触发在FDM的FPGA中实现
  - 主要功能：使用PSD方法，剔除 $\alpha$ 本底
  - 划分依据  $y = a x + b$



PSD对BaF<sub>2</sub>  $\alpha/\gamma$  甄别



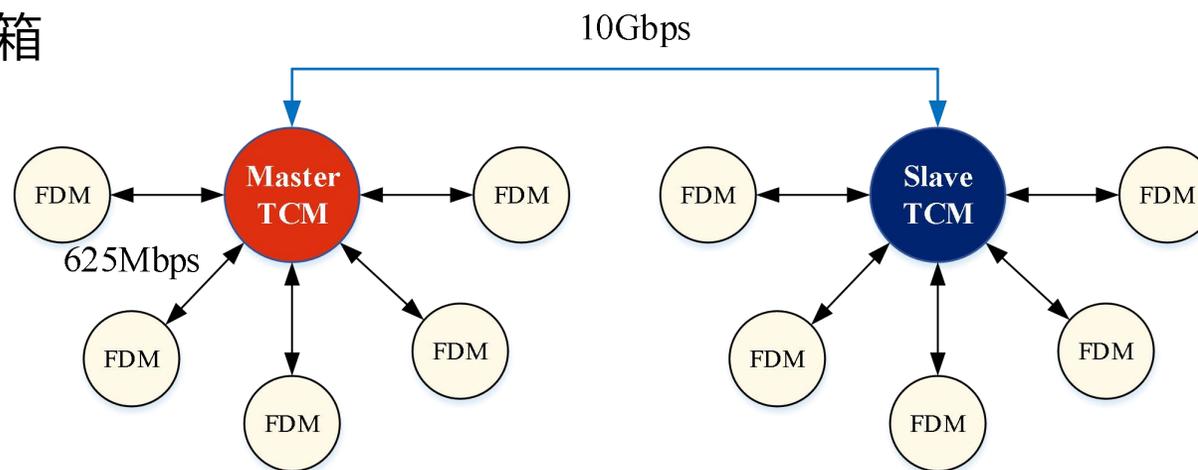
PSD甄别前后能谱



BaF<sub>2</sub>输出 $\gamma$ 及 $\alpha$ 信号波形示例

## 2.2.3 S3级触发-触发交互

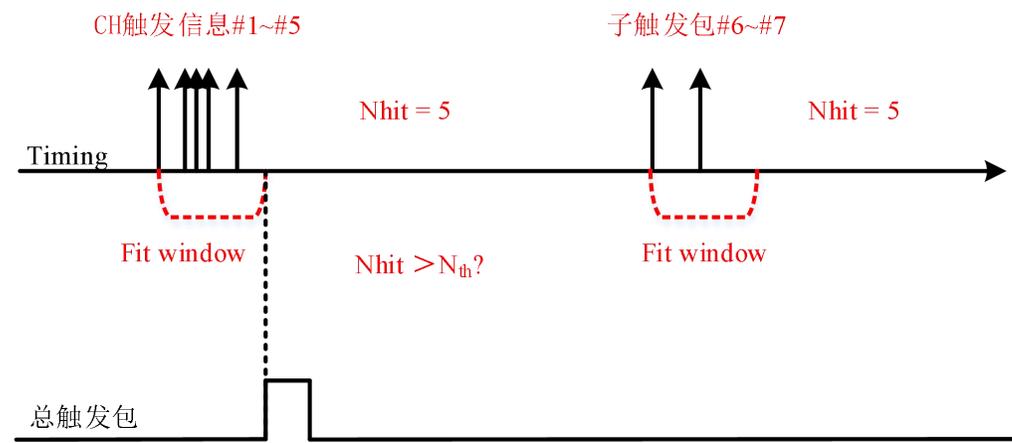
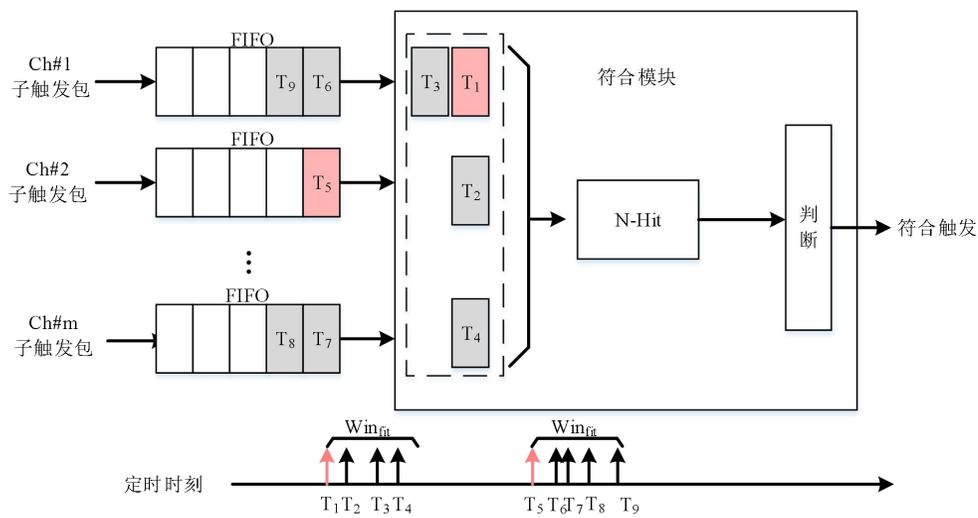
- 机箱间交互：升级至10Gbps
  - 通道：前面板光纤通道
  - 速率：10Gbps
- 机箱内交互：
  - 通道：背板PXIe\_DSTARB/C
  - 速率：625Mbps
- 支持通道数：64/机箱



触发交互示意

## 2.2.3 S3级触发（同原有）

- S3级触发在Master TCM的FPGA中实现
  - 主要功能：根据N-Hit, E-Sum剔除坏事例
  - 目前针对GTAF-II谱仪
  - 触发符合时间窗：TOF时间符合
  - 判选依据：N-Hit, E-Sum
  - 判选输出：全局触发包



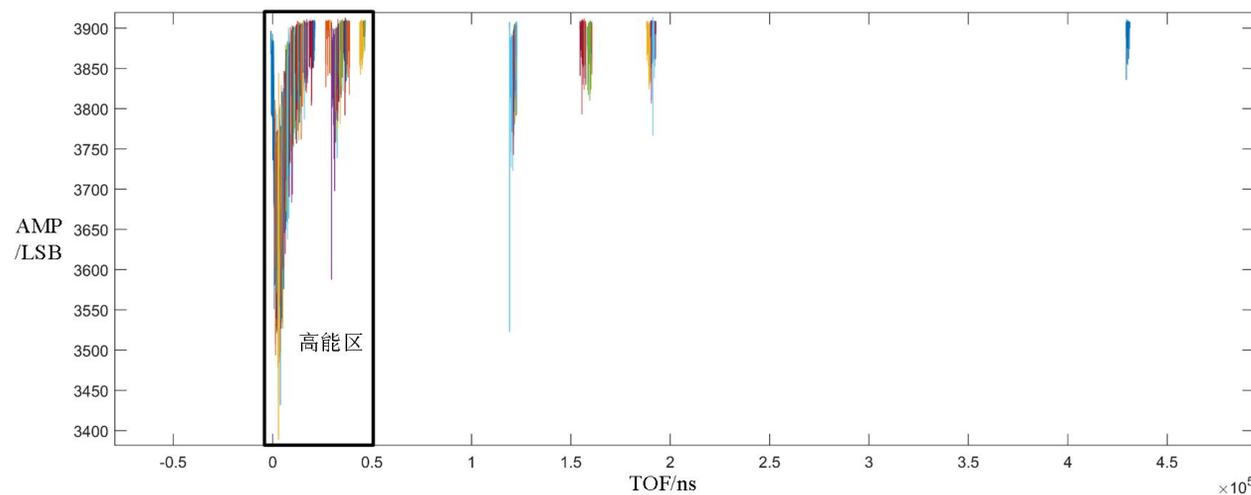
全局触发处理示意

### ■ 上传采集信息

- 固有：通道号，T0\_ID，采集时刻
- 可选：PSD，QDC，CFD信息
- 可选：波形数据

### ■ 高能区模式（可选）

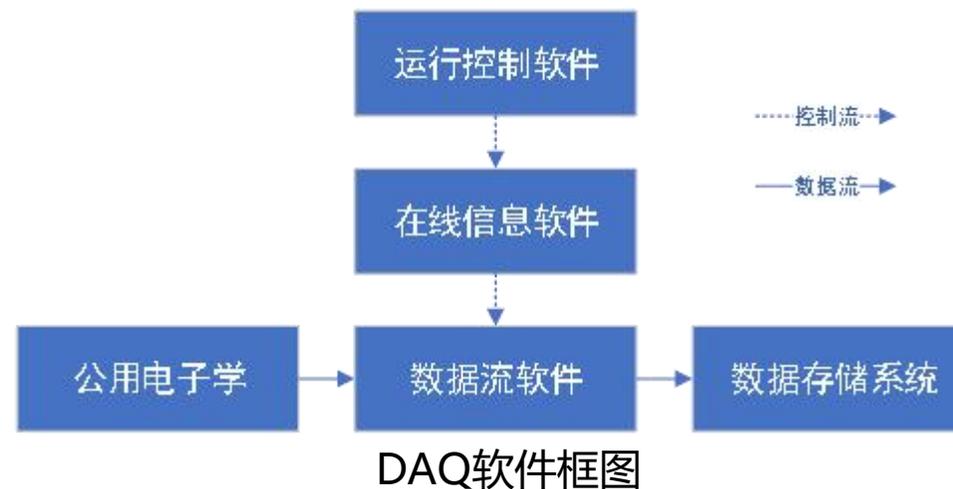
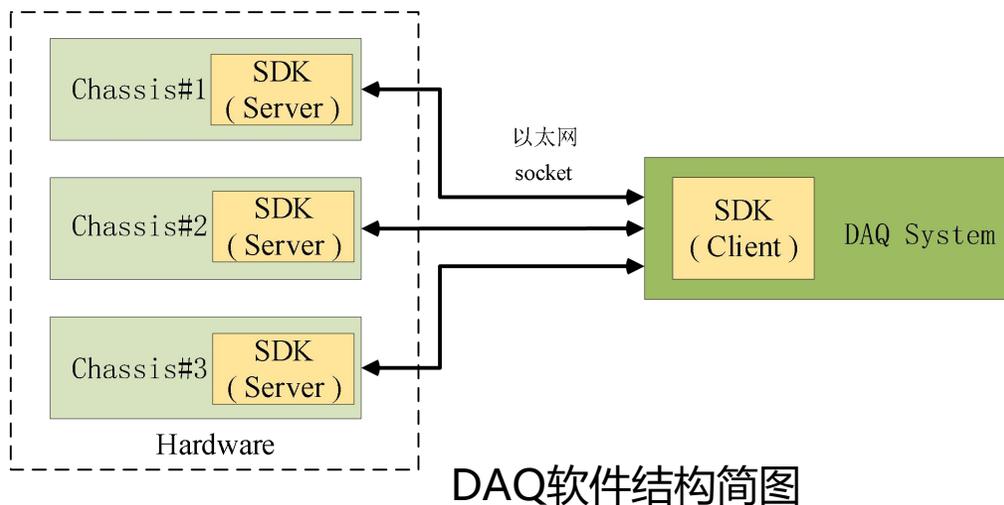
- 基于T0信号做触发，采集60us波形（长度可配至150us）
- 离线处理高能区堆积事例



高能区采集示意

## ■ 数据获取系统DAQ包括

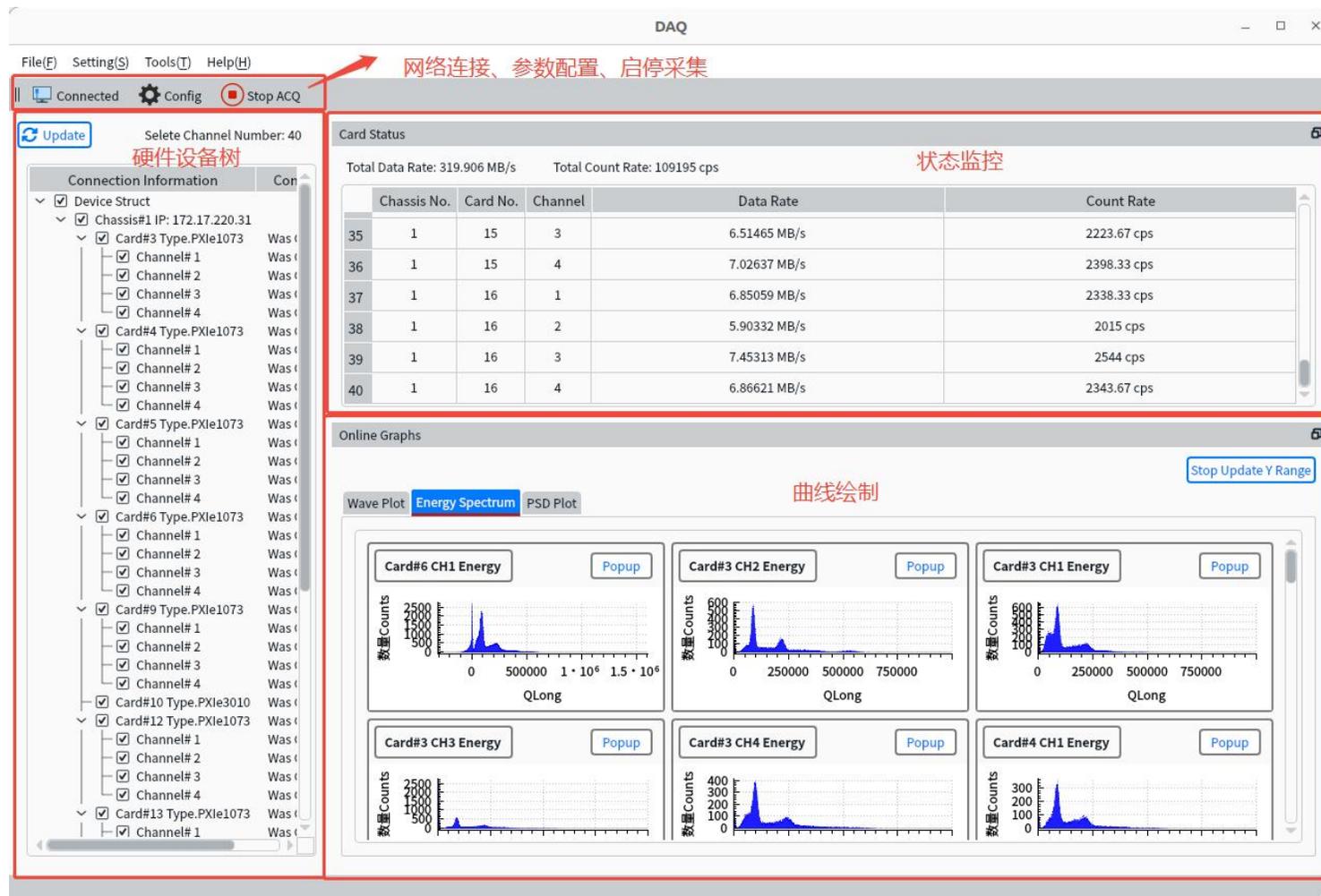
- 数据流软件：应对电子学数据读出、在线数据处理与存储的核心需求
- 在线信息存储软件：为数据流等其它软件模块提供信息发布与获取接口
- 运行控制软件：为用户提供控制界面，调用在线信息存储软件接口，获取并显示当前运行状态，控制实验运行
- 数据存储系统：用于保存实验原始数据



## 2.4.1 DAQ界面

■ 软件主界面如图所示，主要分为以下几个区域：

- 菜单栏：包含文件、设置、工具、帮助等菜单；
- 工具栏：包括网络连接按钮、参数配置按钮、启停采集按钮；
- 硬件设备树：显示当前连接的的实际硬件设备；统计选中的通道数；
- 状态监控列表：显示采集中的通道的实时数据率与计数率；
- 曲线绘制区域：按通道对采集数据进行曲线绘制，当前支持波形图、能谱图、PSD图的绘制；



DAQ操作界面

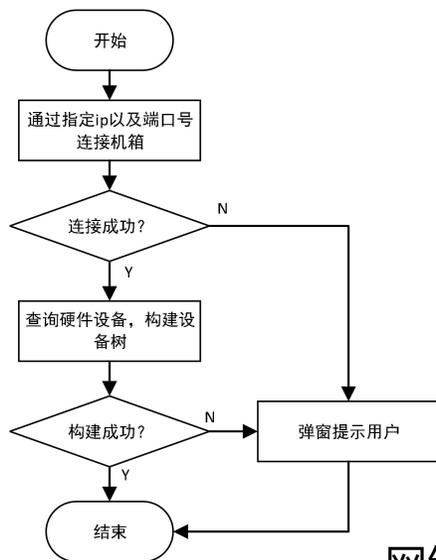
## 2.4.2 设备发现

### ■ 机箱ip配置（支持多机箱）

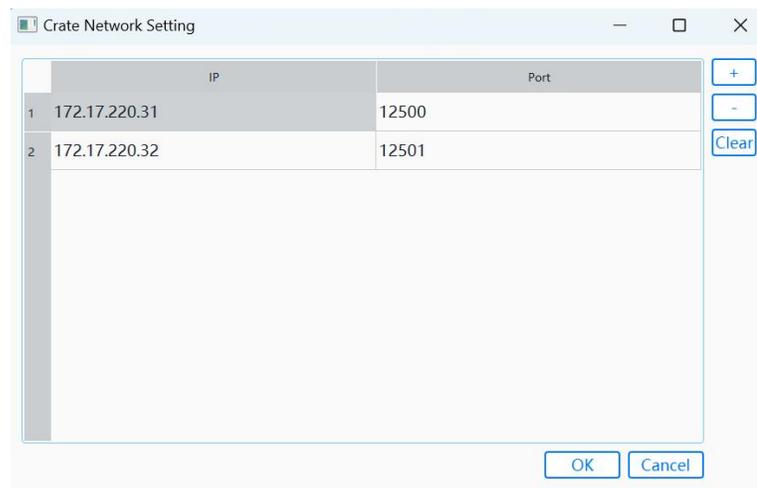
- 在网络参数配置界面进行参数配置，在进行网络连接时，会根据这些参数查询具体设备。

### ■ 网络连接、设备发现

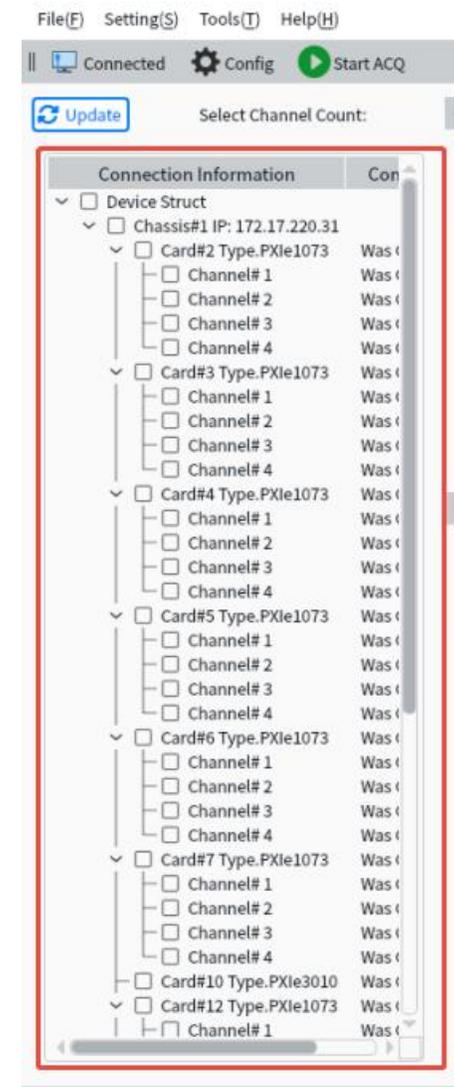
- 参数配置完成后，即可进行网络连接；网络连接成功后自动进入设备发现流程，构建设备树。



网络连接流程



网络参数配置



设备树构建成功

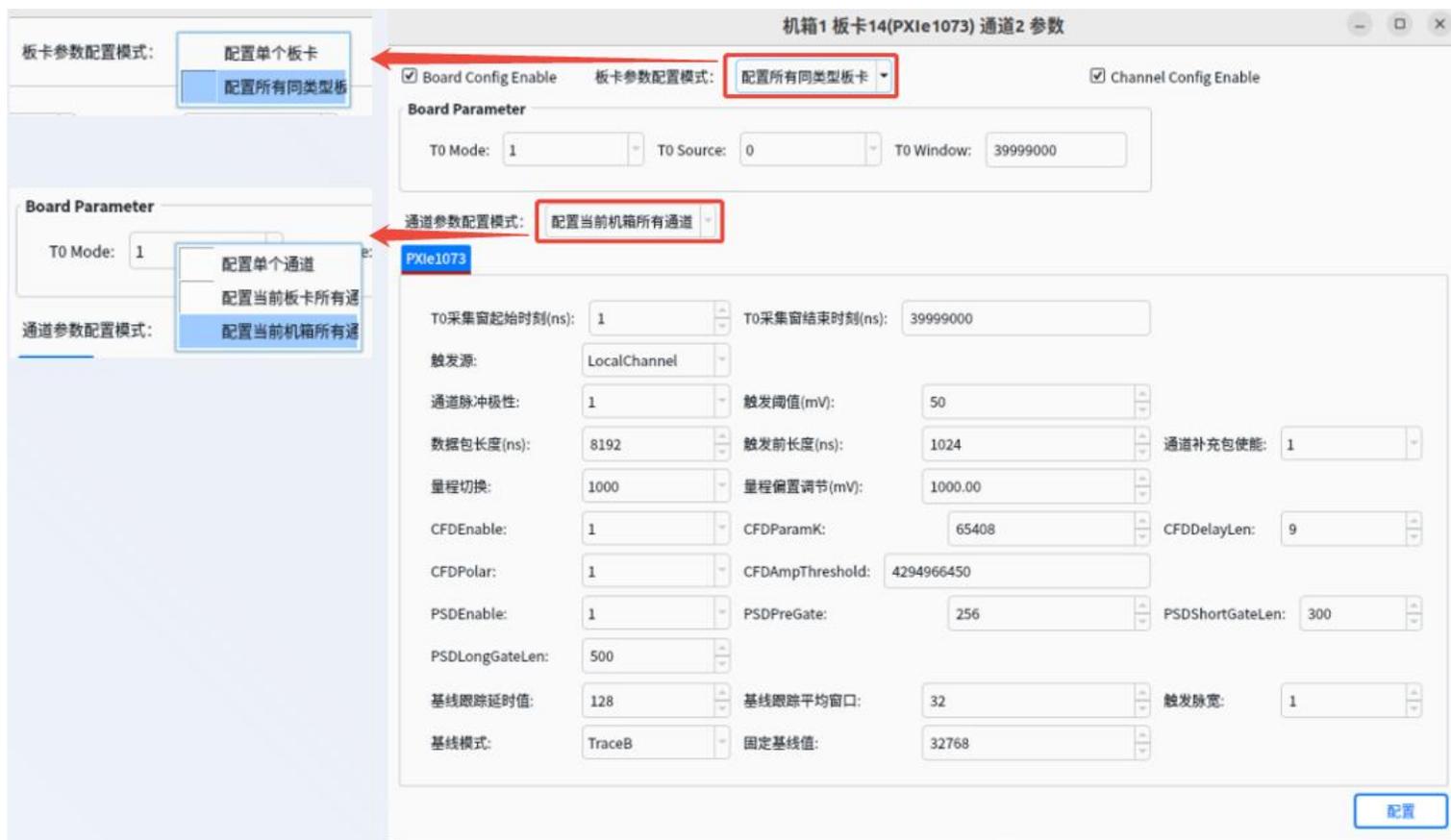
## 2.4.3 参数配置

### ■ 当前参数显示：

- 在当前参数显示界面，将以板卡为单位显示当前的参数配置，可以通过切换机箱或板卡查看相应硬件设备的参数。
- 软件支持不同板卡类型的参数配置，当切换板卡时，界面会根据板卡类型显示不同的参数。

### ■ 参数配置：

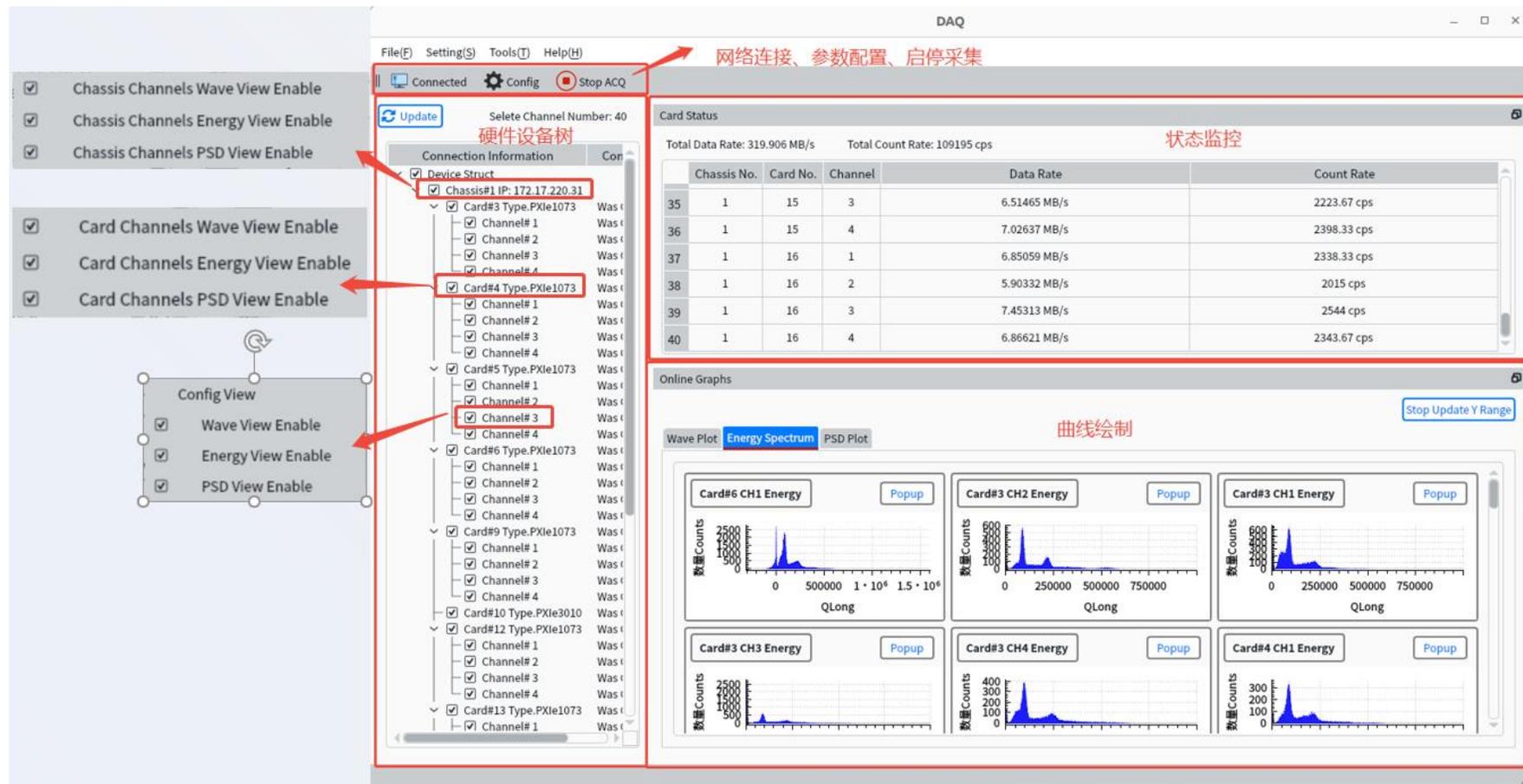
- 参数配置支持板卡参数配置以及通道参数配置，参数配置界面会根据板卡类型的不同，显示不同的参数。
- 板卡参数以及通道参数均支持多种方式配置，支持所有同类型设备一键配置



## 2.4.4 采集流程

- 启动采集：启动采集时，在设备树选中需要进入采集的通道并开始采集，此时状态监控列表开始监控每个通道的数据率和计数率。

- 曲线绘制：在设备树右键点击采集中的设备，即可在右键菜单中控制每一种曲线的绘制使能；进行曲线绘制时，绘制的数据为当前起始时间之后的数据。



The screenshot displays the DAQ software interface with several key components:

- Hardware Device Tree (硬件设备树):** A tree view on the left showing the configuration of various cards and channels. Red boxes highlight 'Chassis#1 IP: 172.17.220.31', 'Card#4 Type: PXIe1073', and 'Channel#3'.
- Configuration Panel (Config View):** A panel on the left with checkboxes for 'Wave View Enable', 'Energy View Enable', and 'PSD View Enable'.
- Status Monitoring (状态监控):** A table showing 'Card Status' with columns for Chassis No., Card No., Channel, Data Rate, and Count Rate. A red box highlights the table.
- Data Visualization (曲线绘制):** A section at the bottom showing 'Online Graphs' with six energy spectrum plots for different channels (e.g., Card#6 CH1 Energy, Card#3 CH2 Energy, etc.).
- Control Buttons:** Buttons for 'Update', 'Connected', 'Config', and 'Stop ACQ' are visible at the top.

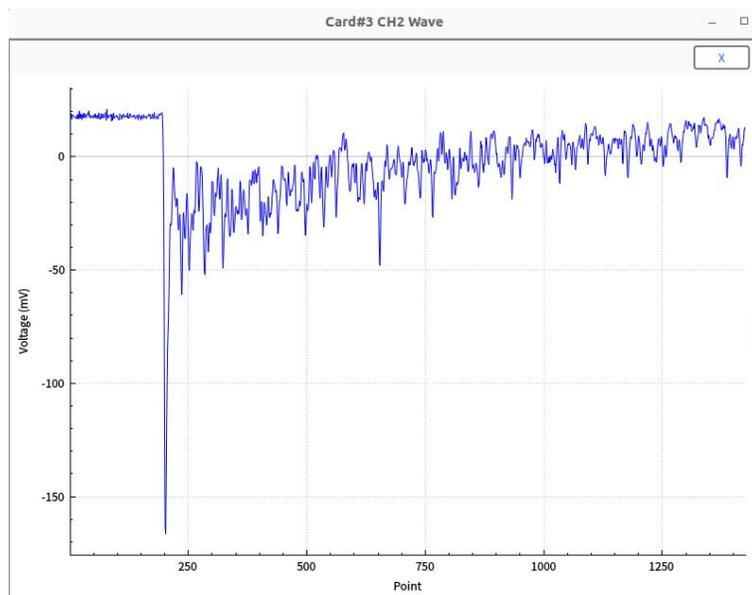
Red arrows point from the text descriptions to the corresponding elements in the software interface.

## 2.4.5 状态监测

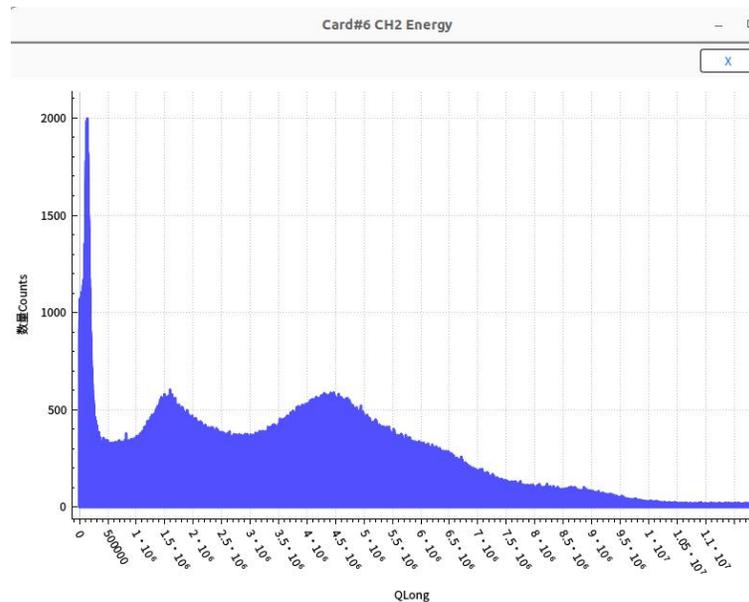
- 各通道及系统 数据量及事例率监测
- 支持将每个通道的波形及能谱绘制显示

Card Status						
Total Data Rate: 319.906 MB/s			Total Count Rate: 109195 cps		状态监控	
	Chassis No.	Card No.	Channel	Data Rate	Count Rate	
35	1	15	3	6.51465 MB/s	2223.67 cps	
36	1	15	4	7.02637 MB/s	2398.33 cps	
37	1	16	1	6.85059 MB/s	2338.33 cps	
38	1	16	2	5.90332 MB/s	2015 cps	
39	1	16	3	7.45313 MB/s	2544 cps	
40	1	16	4	6.86621 MB/s	2343.67 cps	

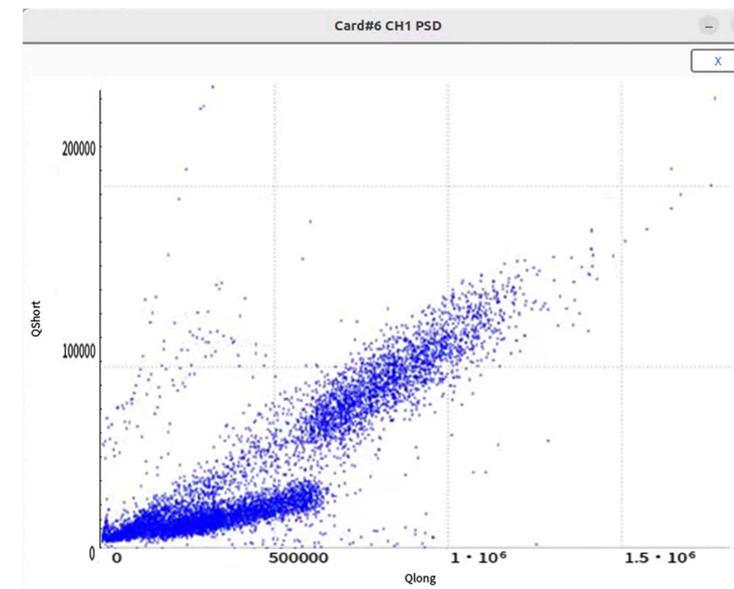
状态监测栏



波形图



能谱图



PSD图

## 2.4.6 多平台、多模式支持

- 可以部署在Windows/Linux，跨平台
- 工作站+机箱模式
  - 长期运行，且数据量较大场景
- 仅机箱模式
  - DAQ可部署在机箱控制器本地，数据存储至控制器/扩展SSD卡内

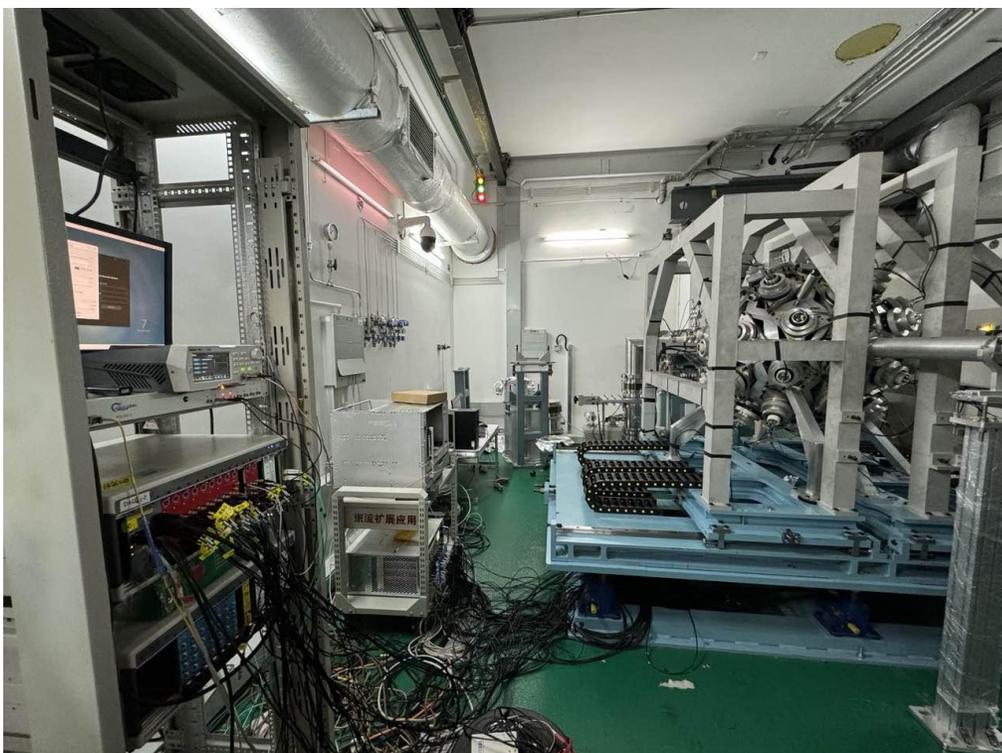


## 三、应用成效

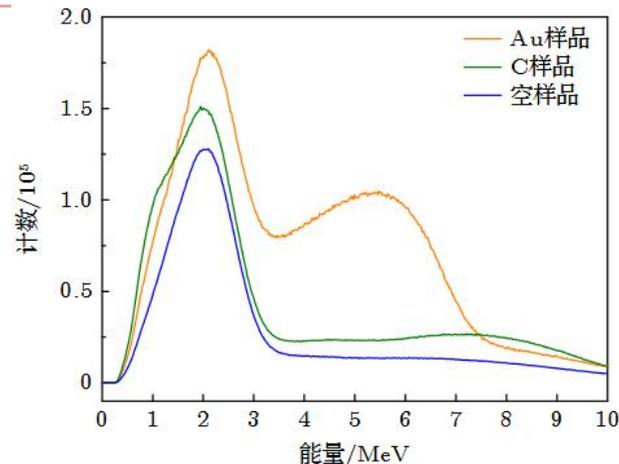
# 3

## 在束实验

- 25年4月份进行升级后在束验证，测量Au样品
  - 初步分析数据符合预期



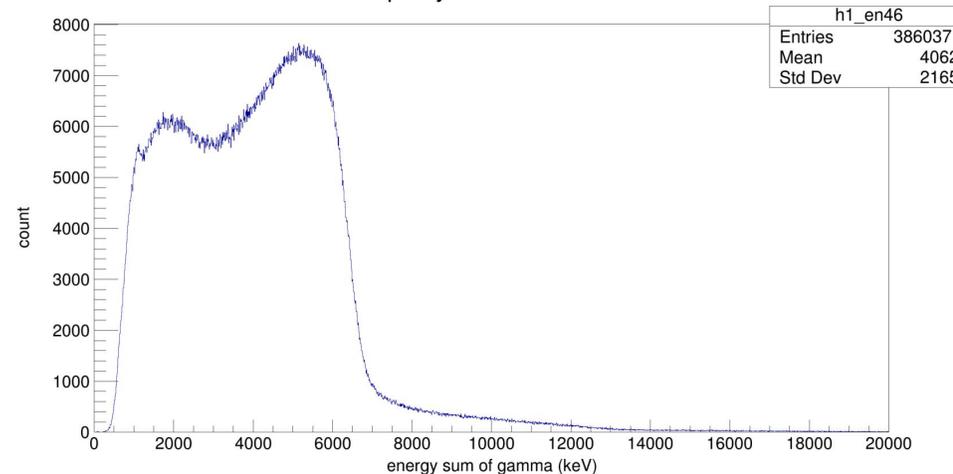
在束测量现场



HAOTIAN, L, QIWEI Z, XICHAO R. The measurement and resonance analysis of  $^{93}\text{Nb}(n, g)^{94}\text{Nb}$ [DS/OL]. Science Data Bank, 2025: 46306521256 bytes, 2 files

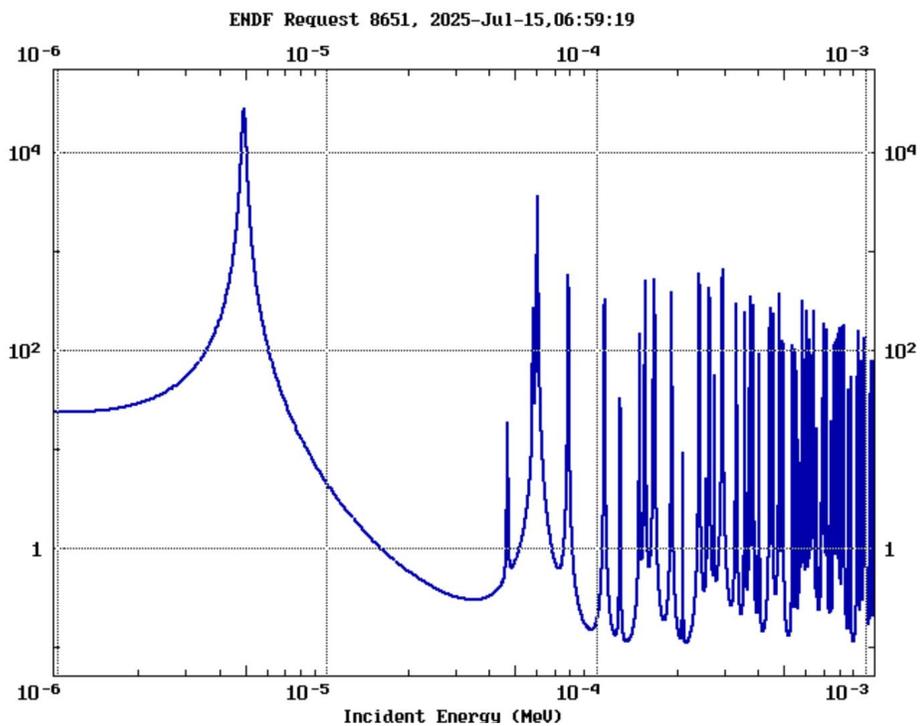
### GTAf-II原有测量结果

multiplicity>1 & 4eV<en<6eV

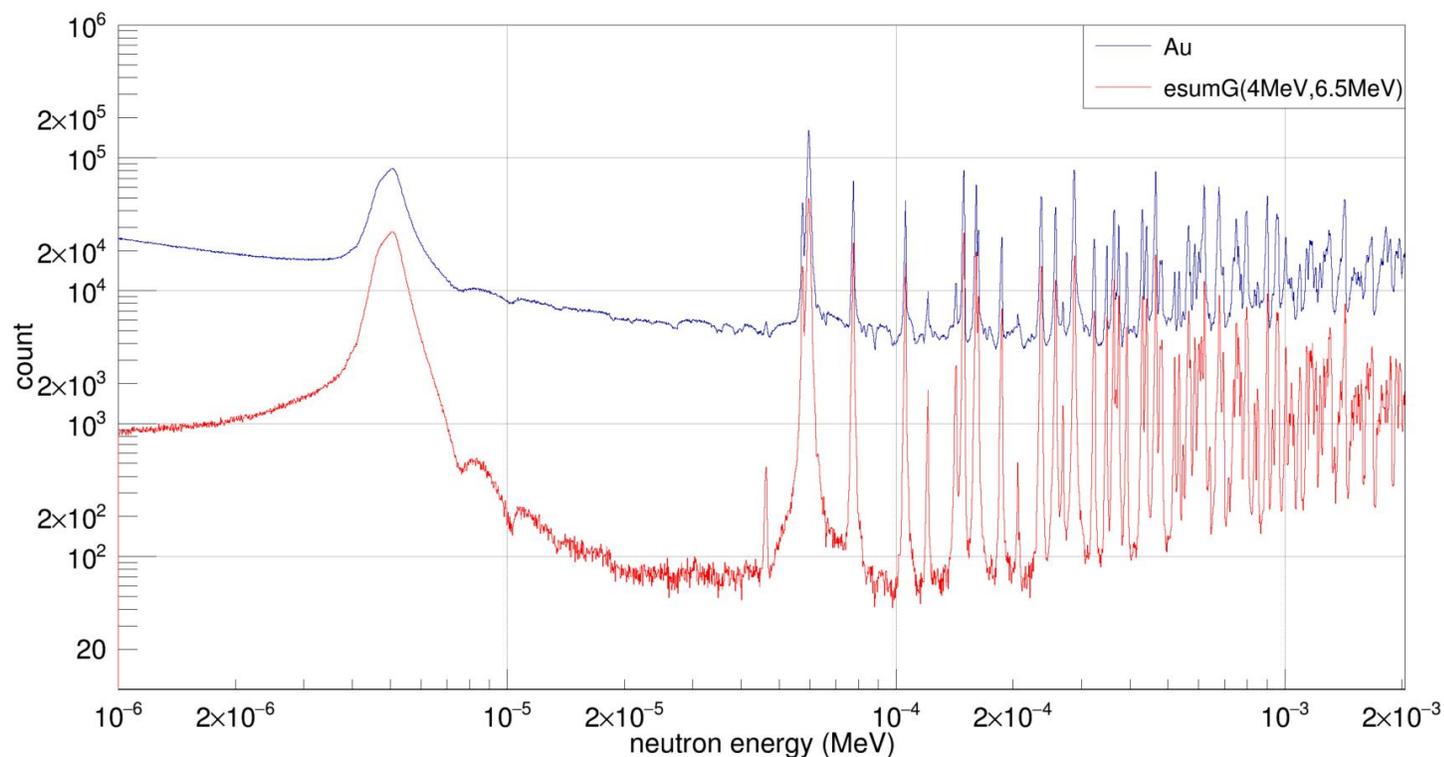


实验数据分析结果

■ 实验数据与ENDF数据库基本相符，待进一步详细分析



ENDF数据库



实验数据分析结果

- 进一步分析数据
  - 进行数据算法状态确认
  
- 系统持续优化
  - 优化触发算法，降低BaF<sub>2</sub>信号拖尾毛刺误触发
  - 确保可以获取到符合预期的实验数据
  
- 多板卡适配
  - 适配PXIe-X1063，支持HPGe探测器获取



**谢谢！  
感谢白光合作组的支持！**



**解决科学与工程数据采集问题，  
完整捕捉每一份数据的价值**