

CSNS白光中子源BaF₂谱仪 全数字化硬件触发方法研究

核探测与核电子学国家重点实验室年会（2017）

曹 平

核探测与核电子学国家重点实验室
中国科学技术大学核科学技术学院

2017年4月11-12日



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences



中国原子能科学研究院
CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY



主要内容

- 一． 研究计划要点
- 二． 研究工作的主要进展
- 三． 研究成果
- 四． 总结

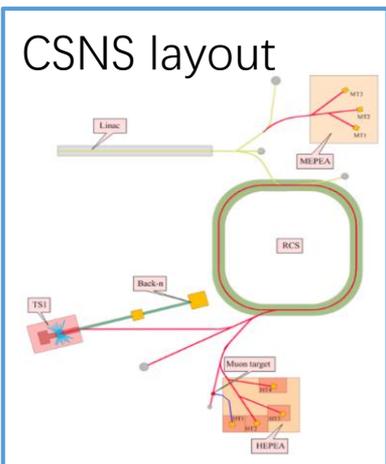
主要内容

- 一 . 研究计划要点
- 二 . 研究工作的主要进展
- 三 . 研究成果
- 四 . 总结

1.1、中国散裂中子源（CSNS）即将建成：东莞



- 设计束流功率：一期100 kW, 升级工程500 kW。
- 项目投资：18.6亿元（国家）+地方配套。
- 计划2017年出束，2018年上半年投入运行。
- 世界4大散裂中子源之一

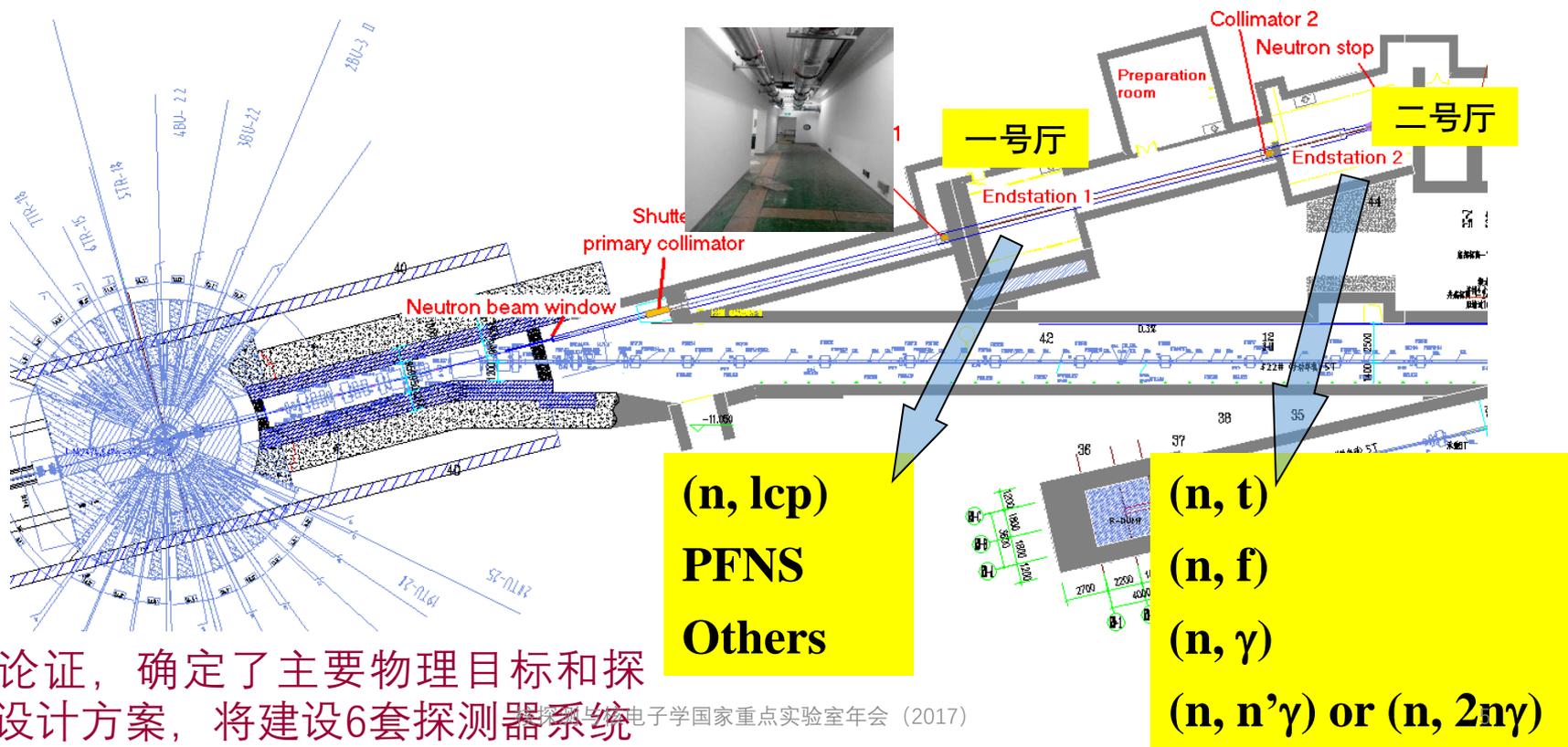


按照国际通常做法，一期实验系统建设较少的大科学装置，均按照支撑面广、用户数量多的原则进行选择。

CSNS一期建设内容包括3台中子散射谱仪（设计为20台），按照上述原则选择了：高通量粉末衍射仪、小角衍射仪、多功能反射仪。同时，为反角白光中子源建设了隧道、实验厅和中子束线。

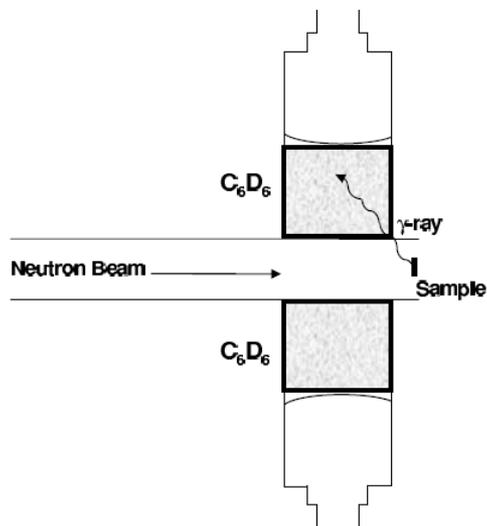
CSNS反角白光中子源初期建设全面开展

- 世界首例沿质子束打靶通道反流的中子束构建的白光中子源
 - 很好的能谱结构和时间结构
- WNS是国际上开展核数据测量实验研究的最重要实验装置
 - 国防核应用、先进核能技术、核天体物理和基础核物理

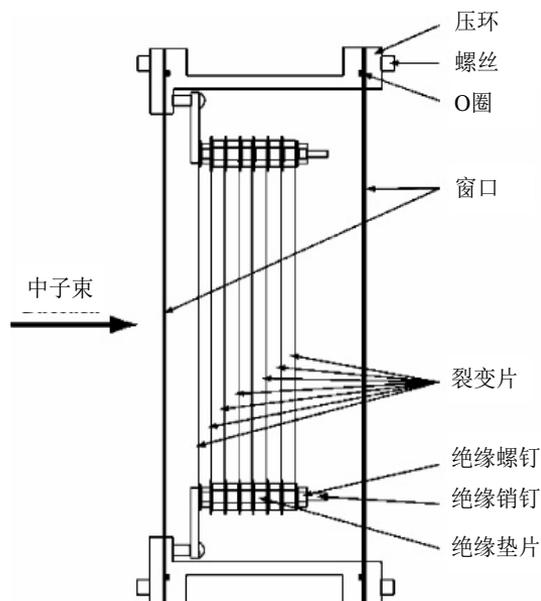


经过论证，确定了主要物理目标和探测器设计方案，将建设6套探测器系统

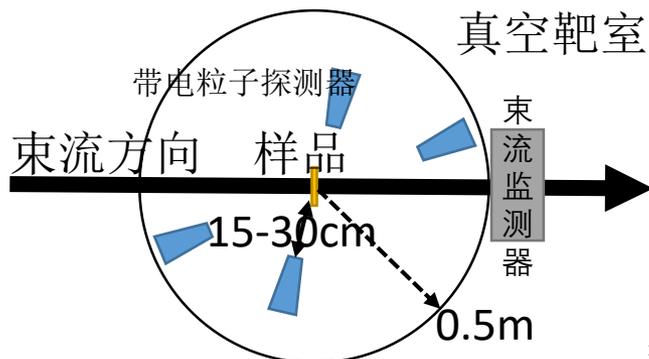
2017年首批实验投入的谱仪



**(n, γ)反应截面测量：
4单元C6D6探测器**

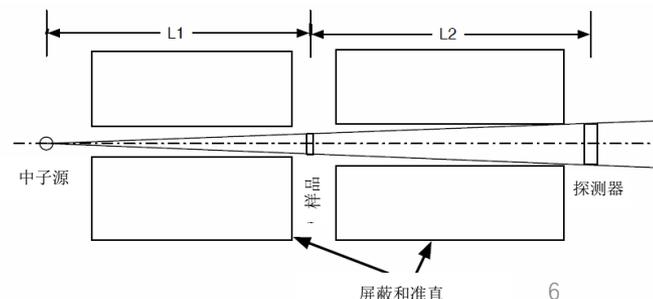


**裂变截面测量：
8层裂变电离室**



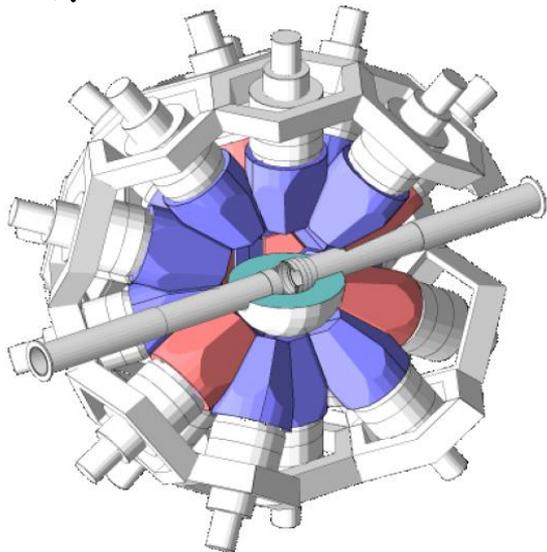
**带电粒子测量：
4单元 ΔE - ΔE -E
探测器**

**全截面测量：
样品架+裂变电离室**

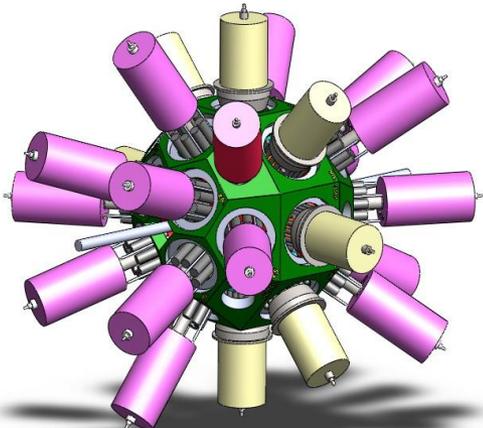


CSNS反角白光中子源规划谱仪 (中期)

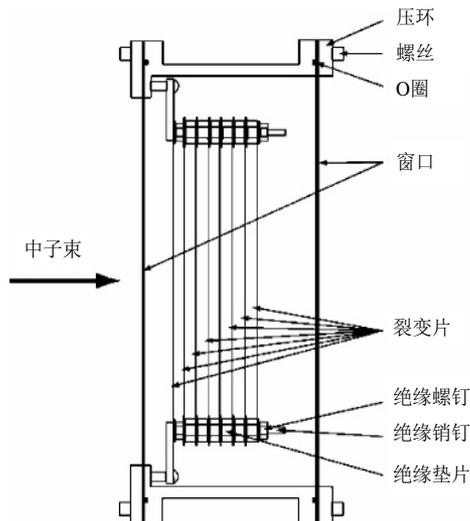
(n,γ)反应截面测量系统



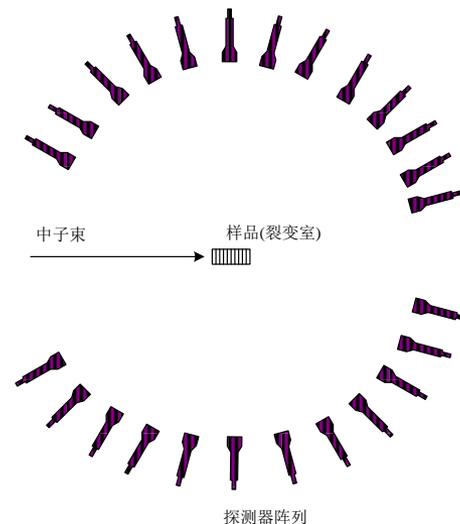
伽玛探测器阵列



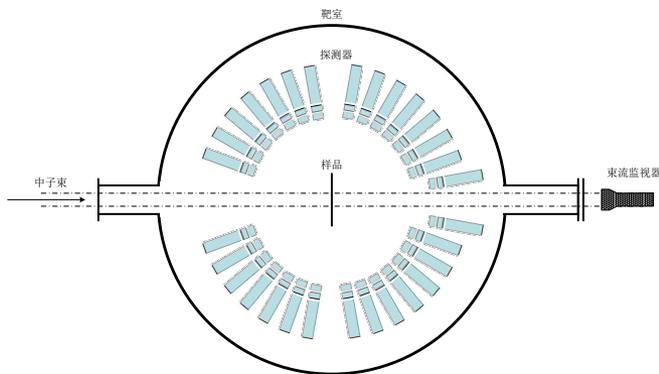
裂变截面测量系统



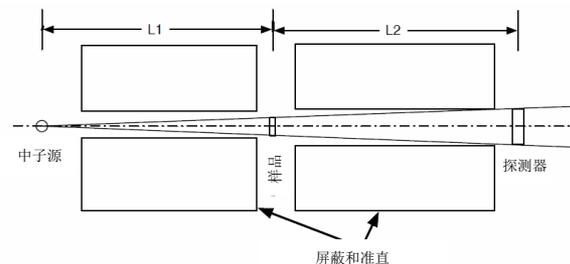
裂变瞬发中子测量系统



带电粒子探测器阵列



全截面测量系统

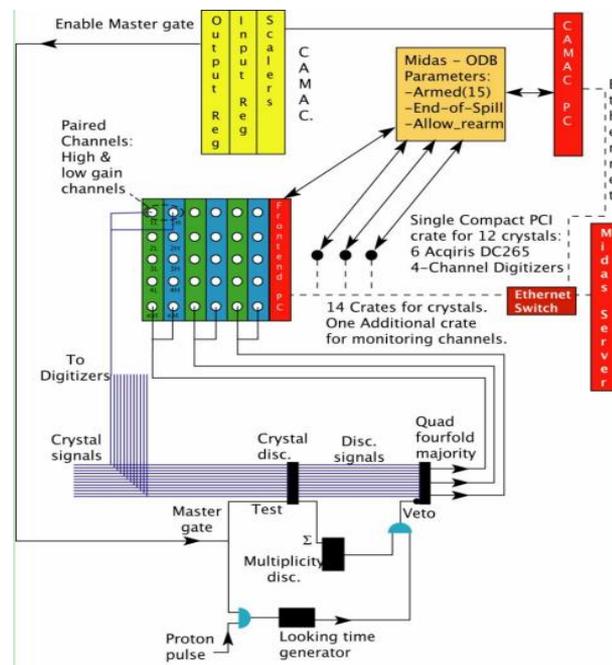


1.2、中子源谱仪读出电子学系统研究现状

- 现状：
 - GTAF、n_TOF、DANCE……
 - 利用波形数字化技术实现脉冲波形甄别（PSD）
 - 商业采集卡：采样率、量化精度有限；采集、触发一体化困难
 - 读出机箱：CAMAC、NIM、CPCI、VME
 - 触发判选：模拟触发+软件算法（触发率低）

- 缺点：
 - 数据读出及处理性能差
 - 系统可扩展性能差
 - 电缆数量太多（模拟、数字）

- 现有读出技术无法适应核物理实验的发展，无法满足白光中子源众多谱仪对读出电子学的共性需求，以及大型谱仪的个性需求



现有数据读出架构

1.3、CSNS-WNS谱仪读出电子学系统设计挑战

- 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：打靶周期降低、事例率提高
- 比如CSNS-WNS BaF₂谱仪（对读出电子学要求最高）指标：
 - 总通道数：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 γ 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 μ s
- 设计挑战
 - 多通道、高精度数据测量：波形数字化技术
 - 高事例率：提高测量效率
 - 共性化设计：白光中子源上众多谱仪电子学共性化设计

1.4、研究内容

- 基于CSNS白光中子源，开展针对BaF₂谱仪的全数字化触发方法的研究：
 - 全数字化平台架构
 - 系统级同步方法
 - 全数字化触发方法及算法
 - 中子源谱仪读出电子学共性化设计

1.5、预期研究成果

- 适合于CSNS-WNS谱仪的全数字化触发共性平台架构
- 全数字化触发方法
- 基于PXIe的原理样机，包含：
 - 波形数字化插件、模拟调理插件、触发时钟插件

主要内容

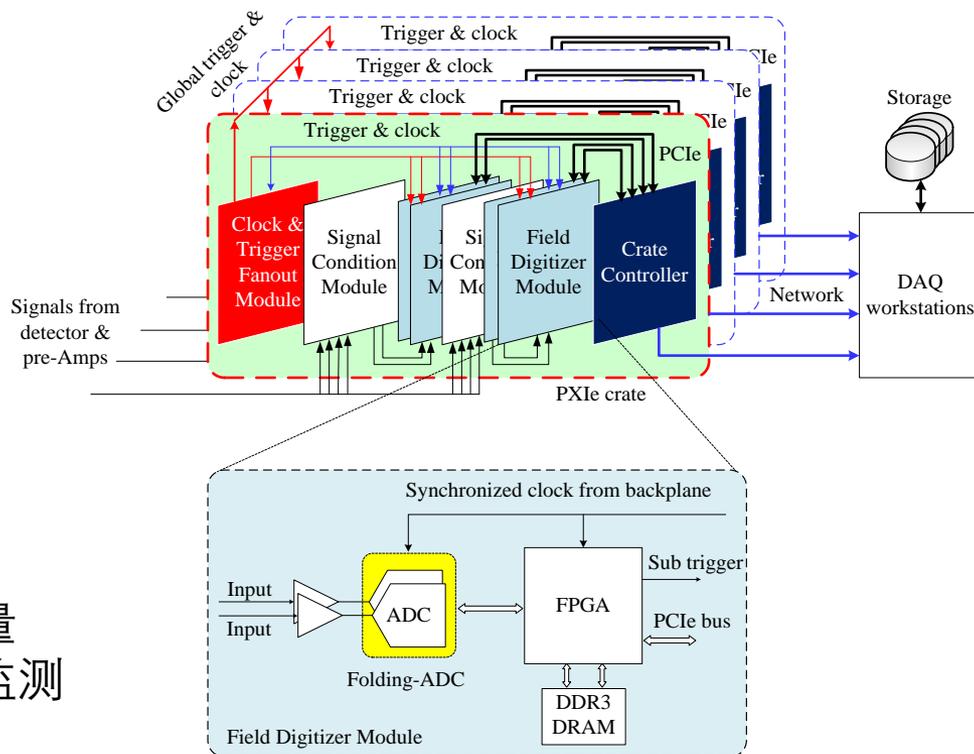
- 一． 研究计划要点
- 二． 研究工作的主要进展
- 三． 研究成果
- 四． 总结

2.2、全数字化平台架构

- 基于PXIe平台的全数字化框架
 - 解决时钟、触发扇出及高速信息交互问题
- 波形数字化插件：FDM
 - 获得精密波形信息
- 模拟调理插件：SCM
 - 适配探测器信号特征
- 触发时钟插件：TCM
 - 触发时钟的处理及扇出

- 多机箱级的信号同步及数据读出
- 分布式网络互连架构
- 具备极高的读出带宽和扩展性能

- BaF₂探测器：俘获截面测量
- C₆D₆探测器：俘获截面测量
- Si-Mon探测器：中子注量探测
- ΔE-E探测器：带电粒子测量
- 多层裂变电离室：中子全截面测量
- 快裂变电离室：中子能谱、束流监测



一种架构，解决CSN-WNS几乎所有谱仪信号读出及触发处理

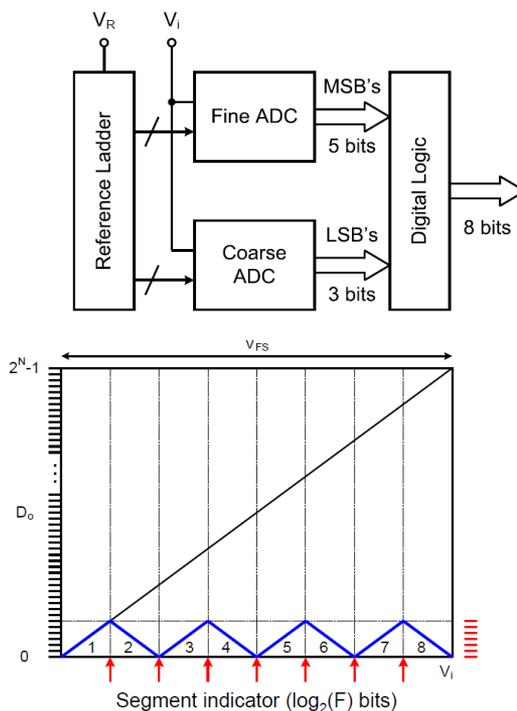
系统构成

序号	项目	PXIE 3U机箱	PXI 6U机箱	CPCI机箱
1	通道数	92模拟通道、前放	92模拟通道、前放	92模拟通道、前放
2	AD模块数	46块, 每块2通道	23块、每块4通道	23块、每块4通道
3	触发板数	4块触发时钟	6块子触发 3块主触发	6块子触发 3块主触发
4	时钟板数	无 (包含在触发板)	1块主时钟 3块从时钟	1块主时钟 3块从时钟
5	模拟扇出板数	0	12块, 每块8通道	12块, 每块8通道
6	机箱数	4台PXIE 3U机箱	3台PXI 6U机箱, 1台NIM机箱	3台PXI 6U机箱, 1台NIM机箱
7	电缆数量	92 (A) +8 (D)	305 (A) +29 (D)	305 (A) +54 (D)

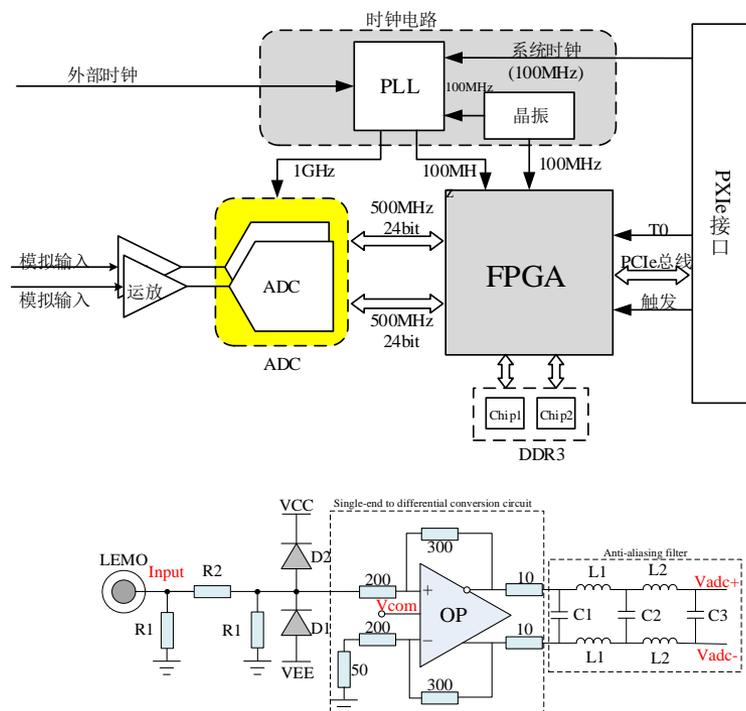
PXIE平台的使用, 大大简化了系统设计, 减少电缆的使用

2.3、大动态范围、高采样率的波形数字化技术

- 基于新型折叠式ADC (Folding) 方法：实现大动态范围的高速波形数字化技术：采样率、量化精度、功耗的折中
- 大动态范围探测器信号的直接量化处理：12bit@1GSPS (摒弃高低Gain技术)
- 基于FPGA的高性能数据处理：高速数据 (单模块24Gbps) 的实时处理、在线零压缩、编解码、协议及读出处理



折叠型 (Folding) ADC

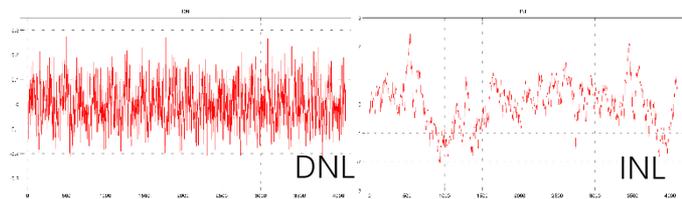
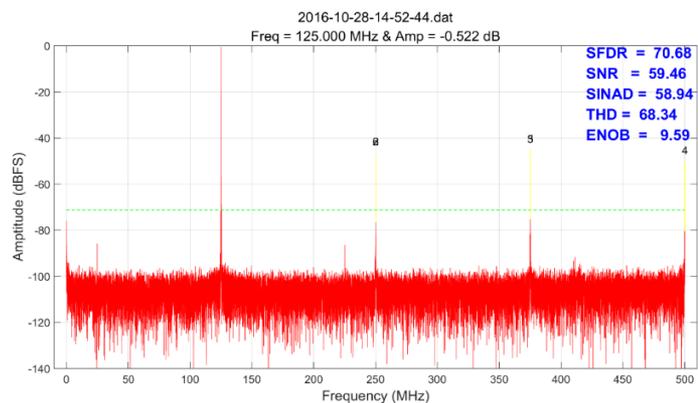


波形数字化插件结构

用于白光中子源谱仪的波形数字化插件

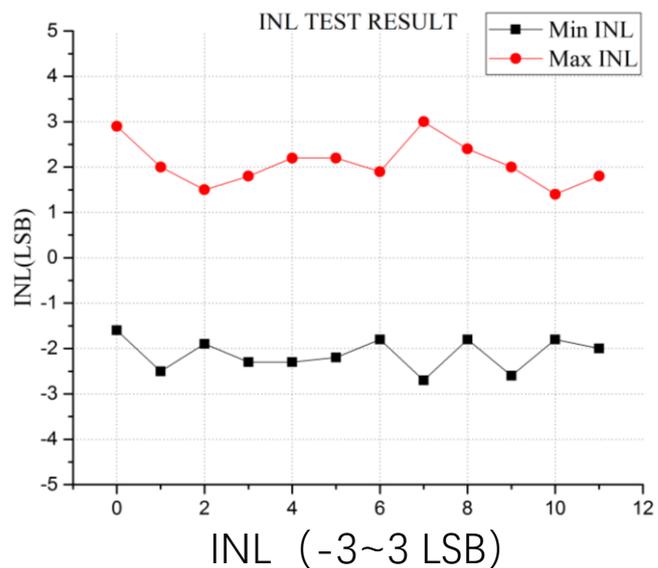
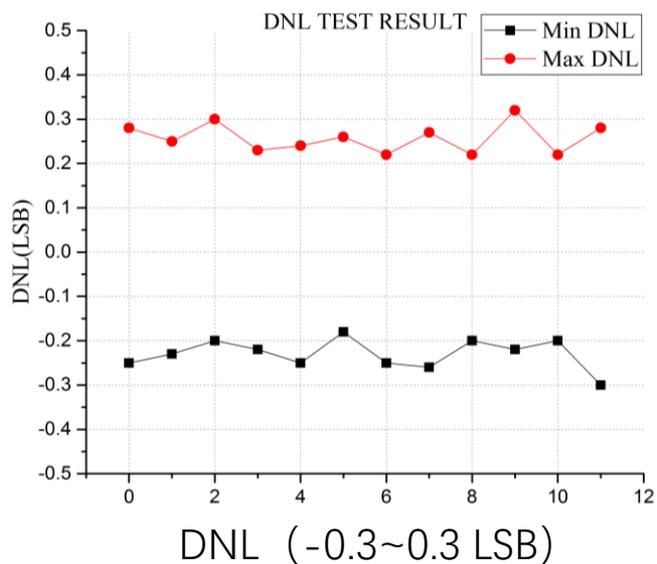
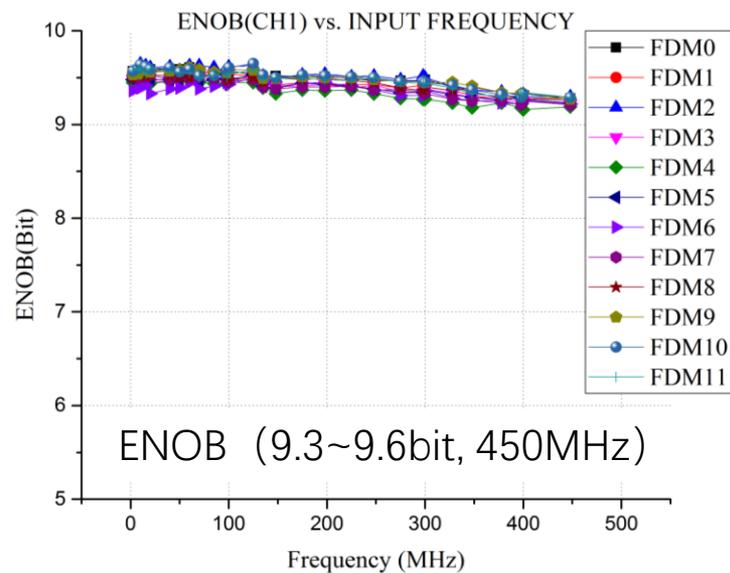
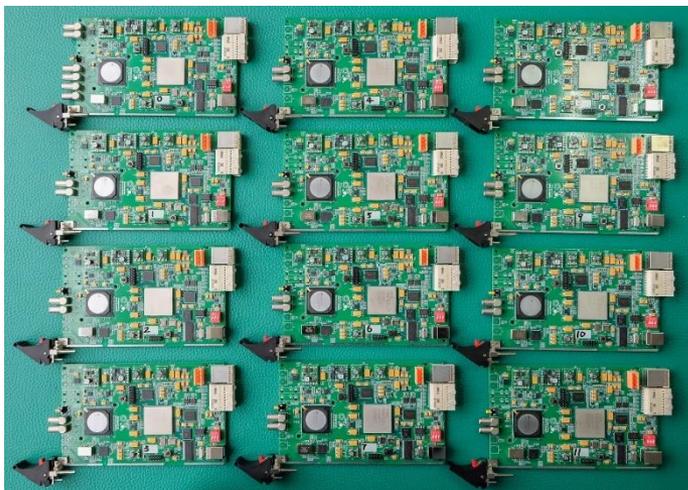
主要技术指标：

参数	描述
采样率、量化精度	1GSPS、12bit
有效位	100MHz : 9.60 bit 198MHz : 9.50 bit 300MHz : 9.40 bit 400MHz : 9.30 bit
模拟带宽	2.8GHZ
存储深度	2×4Gbit DDR3乒乓
单插件通道数	2
插件类型	PXle 3U
触发输入	PXIE DSTAR/LVPECL ; 外部 LVTTTL (单端LEMO)
时钟输入	PXle DSTAR/LVPECL、板载、外 部LVPECL (差分LEMO)
时钟输出	LVPECL 125MHz (差分LEMO)
全局授时接口	秒脉冲PPS/125MHz LVPECL (差分LEMO)
模拟输入	800mVpp (差分LEMO)
调试端口	USB 2.0
数据读出	PXle, gen2,×4lane
在线触发	硬件触发
数字信号处理	FPGA, 可编程
设备驱动	Linux 2.6



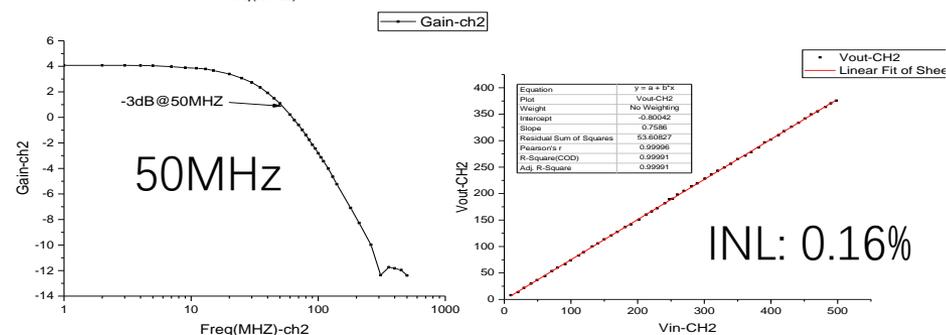
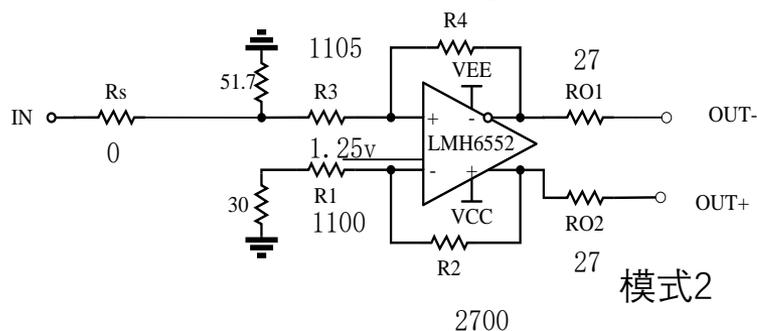
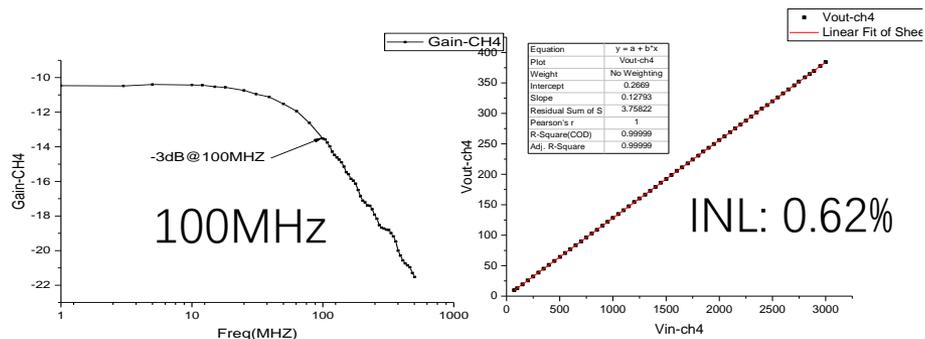
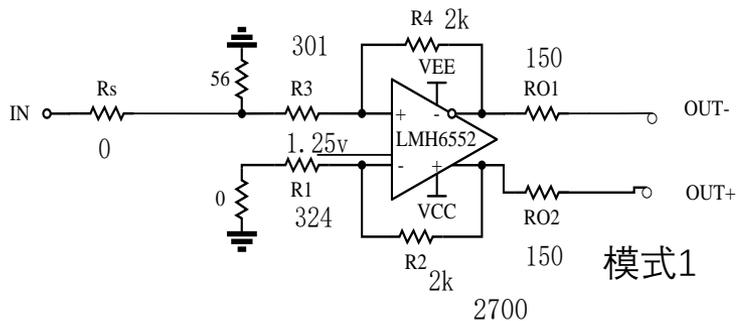
电路实物及性能指标

动态及静态性能指标



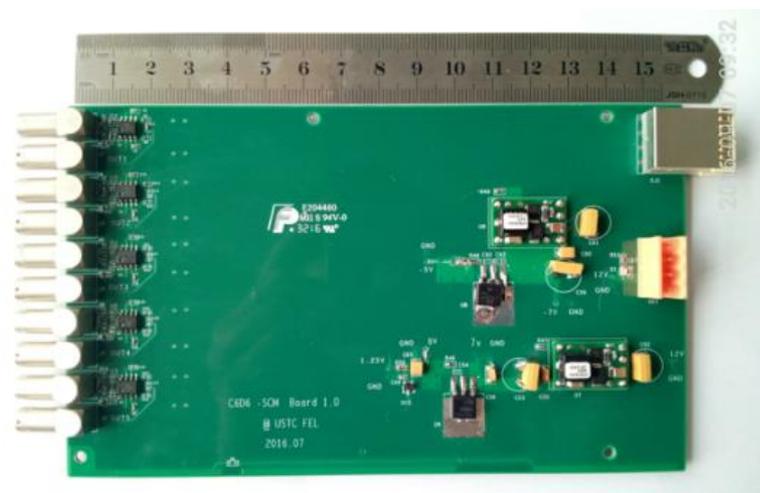
2.4、信号调理模块

- 完成探测器前置放大器与后端数字化直接的信号适配
- 单端输入：连接前置放大器
- 差分输出：连接波形数字化插件
- 模式1：C6D6 (0~-3000mV输入, 5ns前沿)
- 模式2：Si-mon、带电粒子、多层裂变电离室、快裂变室 (0~500mV输入, 10ns前沿)



公用电子学信号调理插件及主要参数

主要技术指标：



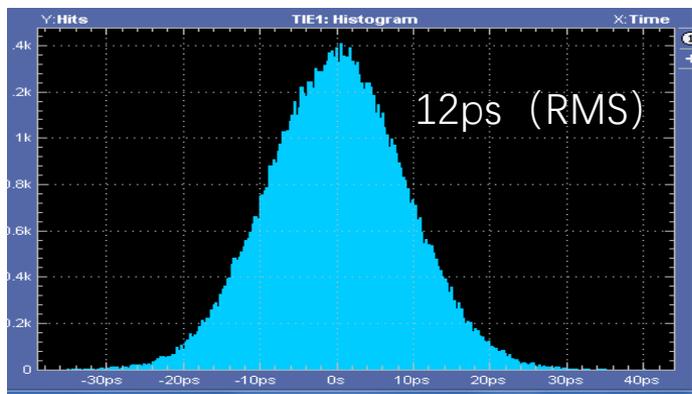
电路实物图

参数	描述
型号	SCM
输入信号前沿	5ns (模式1) 10ns (模式2)
输入信号后沿	100us
信号范围	模式1：0~-3V 模式2：0-500mV
插件形式	PX1e 3U
通道数	5
输入接口	单端LEMO、SMA
输出接口	差分LEMO
输出信号	共模电压：1.25V 差模电压：-400~400mV
功耗	<1W

触发时钟插件



电路实物图



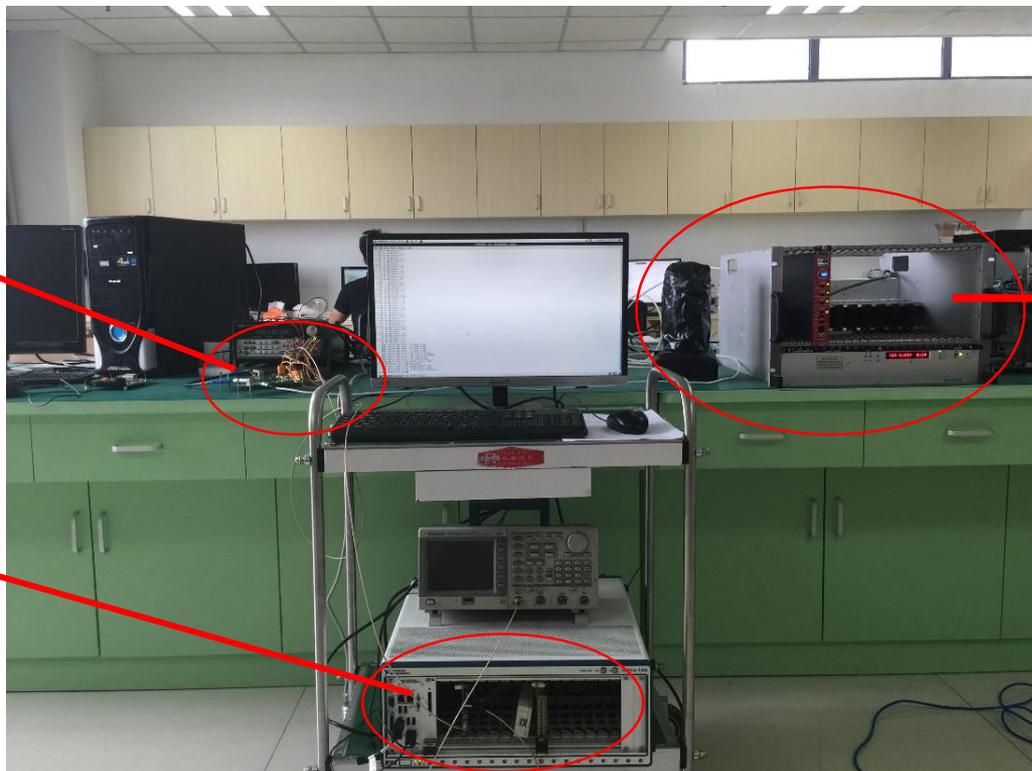
时钟性能

主要技术指标：

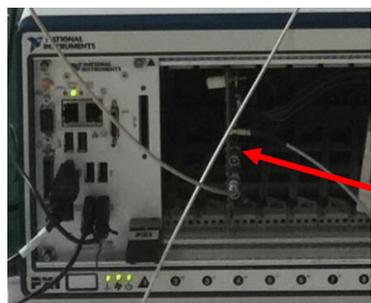
参数	描述
型号	TCM
插件类型	PXIe 3U
触发输入	PXIE接口、LEMO
触发方式	内触发、外触发
触发算法	数字触发，可编程
触发通道数	16
时钟输入	PXIe DSTAR、板载、外部LVPECL（差分LEMO）
全局授时接口	秒脉冲PPS/LVPECL（差分LEMO）
数字ID信息输入	LVPECL（差分LEMO）
T0输入	单端LVPECL（单端LEMO）
时钟频率	125MHz
时钟通道数	16
触发时钟融合输入	单端LVPECL×4通道（单端MMCX）、机箱间长距离同步
触发时钟融合输出	单端LVPECL×4通道（单端MMCX）、机箱间长距离同步
数据IO	PXIe, gen2,×4lane
设备驱动	Linux 2.6

2.6、宇宙线测试

前置放大器、
模拟扇出板

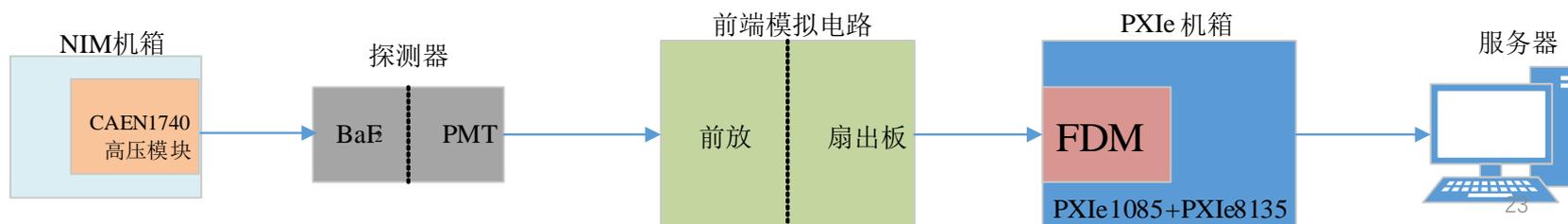


BaF₂探测器
及高压模块



PXIe机箱、
波形数字化模块

宇宙线测试平台



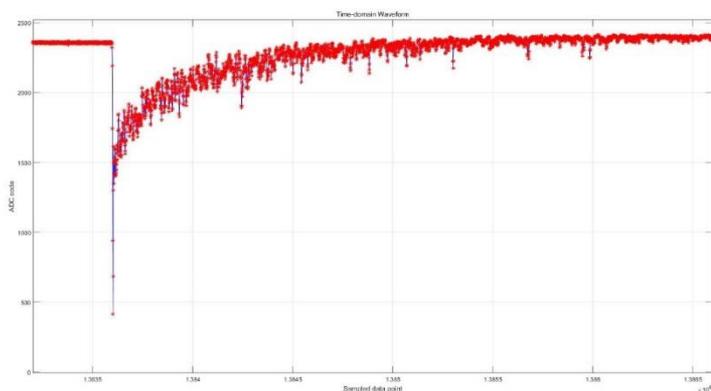
测试环境

- 系统包含：BaF2晶体+光电倍增管、前置放大器、模拟扇出板、波形数字化模块、PXIe机箱、数据采集软件；
- 光电倍增管型号：Photonis XP2020Q，阳极上升时间1.6ns、半高宽3.7ns、渡越时间28ns；
- 高压模块：CEAN1740，-1800V、PMT增益约 10^7
- 示波器，泰克DPO5104 10GSps/1GHz
- 波形数字化模块采集探测器信号波形，1GHz @ 12bit
- 直接用PXIe机箱控制器端软件获得数据，用Matlab进行分析；
- GUI进行数据统计。
- 波形数字化插件采用自触发工作模式：
 - 选择保存过阈的数据段（4000点）
 - 脉宽过阈甄别： $>24\text{ns}$
- Linux系统：Cent OS

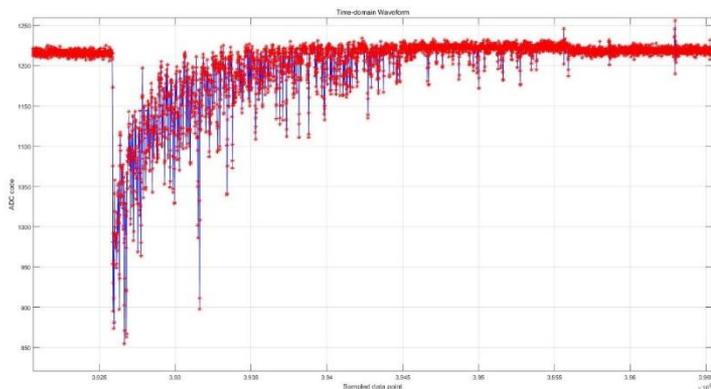
测试结果

- 采集到的宇宙射线及 α 粒子特征明显，证明系统联试成功；
- GUI的CH9实现了事例统计功能。

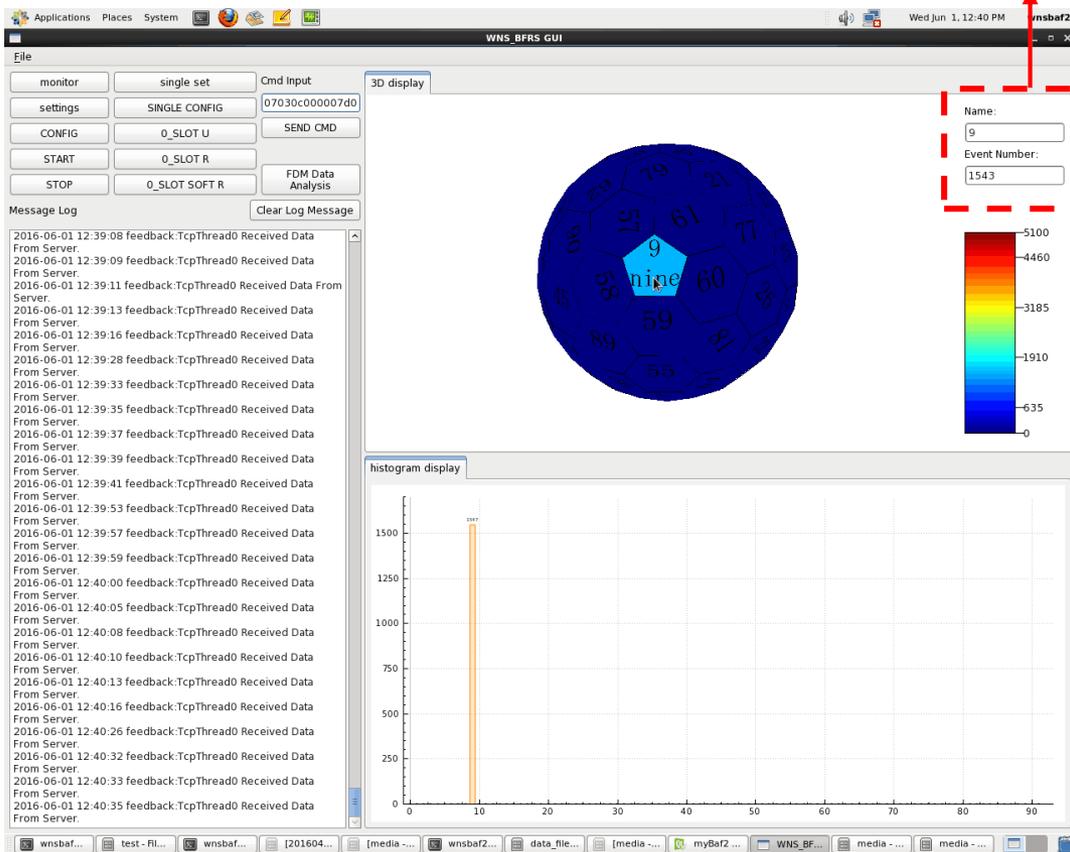
通道号及
采集到的事例数



宇宙线波形

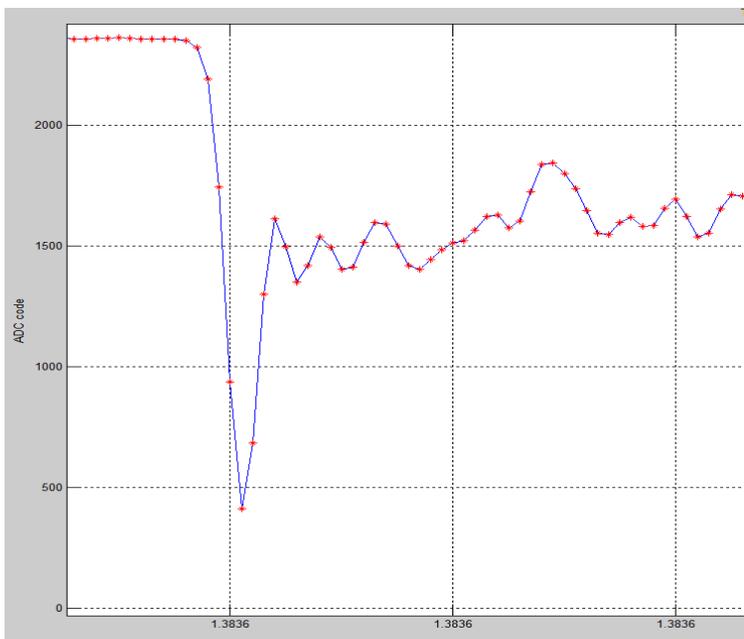


α 粒子波形

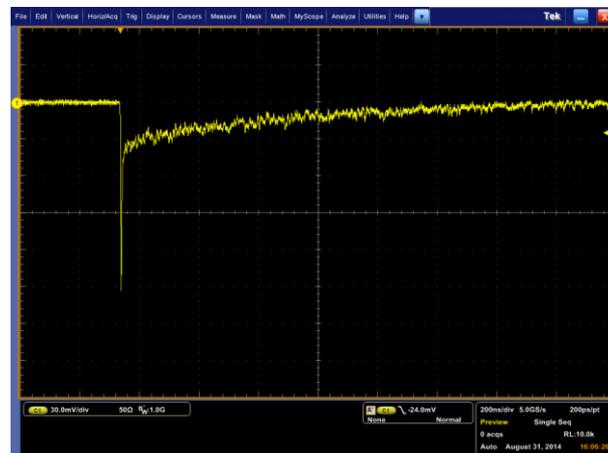


测试结果

- 分别用示波器和波形数字化模块采集宇宙线
- 信号前沿采集到4个点，与示波器（10GSps/1GHz BW）采集结果相当



波形数字化模块测试：前沿4个点



示波器测试：慢成分约1 μ s



示波器测试：快成分约4ns

主要内容

- 一 . 研究计划要点
- 二 . 研究工作的主要进展
- 三 . 研究成果
- 四 . 总结

研究成果：学术论文

- 2篇SCI期刊论文：已发表
- 3篇SCI期刊论文：审稿中
- 2篇国际会议论文：TIPP 2017
 - Deliang Zhang, Ping Cao, et al., System Design of Precisely Digitizing and Reading out for CSNS-WNS BaF₂ Spectrometer, *Chinese Physics C*, 2017, V41(2): 026102
 - Bing He, Ping Cao, De-Liang-Zhang, Qi Wang, Ya-Xi Zhang, Xin-Cheng Qi, Qi An, Clock Distributing for BaF₂ Readout Electronics at CSNS-WNS. *Chinese Physics C*, 2017, V41(1): 016104
 - Qi Wang, Ping Cao, Deliang Zhang, et al., Prototype of Field Waveform Digitizer for BaF₂ Detector Array at CSNS-WNS, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (二审中)
 - Di Jiang, Ping Cao, Bing He, Deliang Zhang, et al., Trigger System Prototype for BaF₂ Detector Array Readout Electronics at CSNS-WNS, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (三审中)
 - Yaxi Zhang, Ping Cao, Qi Wang, Deliang Zhang, et al., Evaluation Software for BaF₂ Detector Array Electronics at CSNS-WNS, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (二审中)
 - Yanli Chen, Ping Cao, et al., Generalized Signal Conditioning Module for Spectrometers at CSNS-WNS, TIPP, Beijing, 2017
 - Xincheng Qi, Xiru Huang, Ping Cao, et al., Research of Front-end Signal Conditioning for BaF₂ Detector at CSNS-WNS, TIPP, Beijing, 2017

研究成果：学生培养

- 博士：1名
- 硕士：2名
- 本科：2名
 - 张德良，CSNS-WNS BaF2谱仪信号读出方法，中国科学技术大学博士论文，2016.6
 - 何兵，白光中子源BaF2探测器读出电子学时钟触发系统研究，中国科学技术大学硕士论文，2016.6
 - 陈彦丽，基于 C_6D_6 探测器的中子俘获截面测量读出电子学系统研制，中国科学技术大学硕士论文，2017.6
 - 吉旭阳，散裂中子源中白光中子源T0信号扇出电路的设计，中国科学技术大学本科论文，2017.6
 - 杨尚衡，白光中子源中波形数字化模块ADC性能的测试，中国科学技术大学本科论文，2017.6

研究成果：课题资助

- 获得2016年科技部重点研发计划资助
 - 课题名称：高事例率的数字化触发技术研究
 - 所属项目：白光中子源实验技术研究
 - 所属专项：大科学装置前沿研究
 - 课题编号：2016YFA0401602
 - 课题经费：530万
- 承担单位：
 - 中国科学技术大学（牵头单位）：负责课题总体运行及电子学系统的研制
 - 中科院高能物理研究所：负责探测器前端电子学及数据获取技术
 - 中国原子能科学研究院：负责与探测器的联合调试和性能评估
- 承担人员：
 - 课题负责人：曹平
 - 高级职称：7人、中级职称：2人、博士后：1人、初级职称：1人
 - 博士研究生：5人、硕士研究生：8人



五年研究计划

主要内容

- 一 . 研究计划要点
- 二 . 研究工作的主要进展
- 三 . 研究成果
- 四 . 总结

总结

- 完成课题预期研究任务
 - 波形数字化模块：12bit@1GSPS
 - 时钟精度：好于12ps (RMS)
 - 基于波形数字化的全数字化触发方法：需全局同步的触发、时钟架构的支持
 - 基于PXIe的全数字化平台框架，既解决BaF₂的数据读出，也解决CSNS-WNS其它谱仪的共性读出问题
- 研究成果：
 - 读出电子学电路原型，包括：FDM、TCM、SCM
 - 5篇SCI期刊论文（其中3篇处于审稿中，minor revision）
 - 2篇TIPP国际会议论文，北京，2017.5.22-26
 - 5篇学位论文：1博士+2硕士+2本科
 - 获得2016年科技部重点研发计划资助
- 下一步工作
 - 在科技部项目资助下，进一步完成全数字化触发方法的具体实现和验证（方法和基础平台）
 - 与协作单位共同开展探测器联调及首批物理实验，42通道BaF₂谱仪的安装和物理实验

感谢重点实验室对本课题的支持！！

谢谢！

University of Science and Technology of China

核探测与核电子学国家重点实验室

中国科学技术大学



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

