



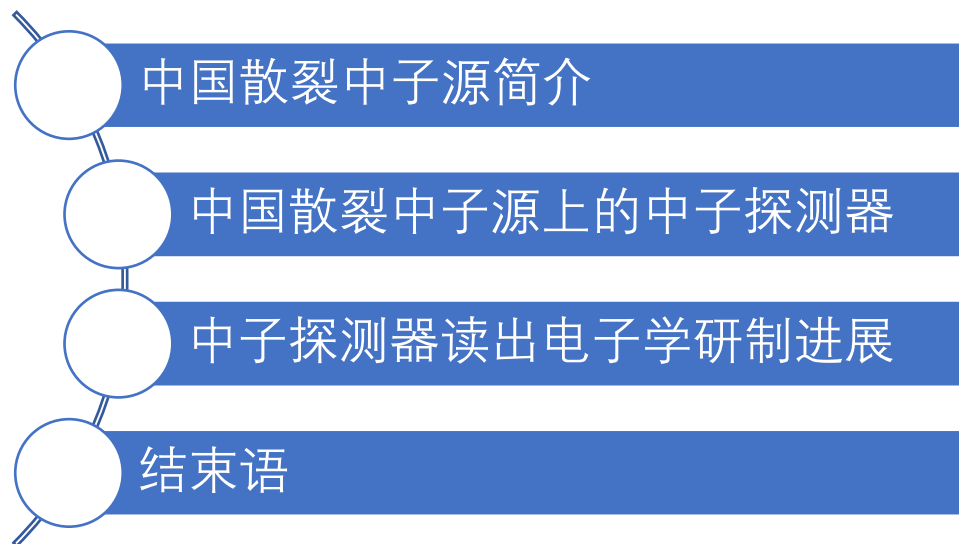
中国散裂中子源中子探测器读出电子学研制进展

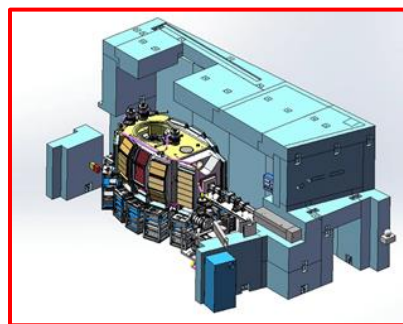
刘洪斌 on behalf of 散裂中子源科学中心-探测器&电子学团队

中国科学院高能物理研究所

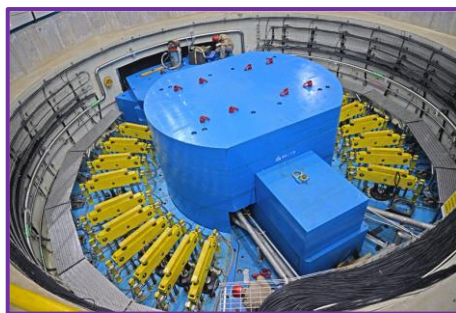
散裂中子源科学中心

2022年08月10日

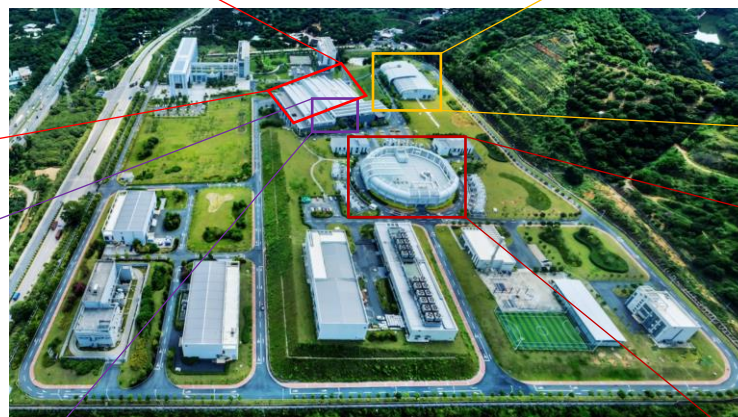




中子谱仪



靶站



中国散裂中子源
广东、东莞



直线加速器

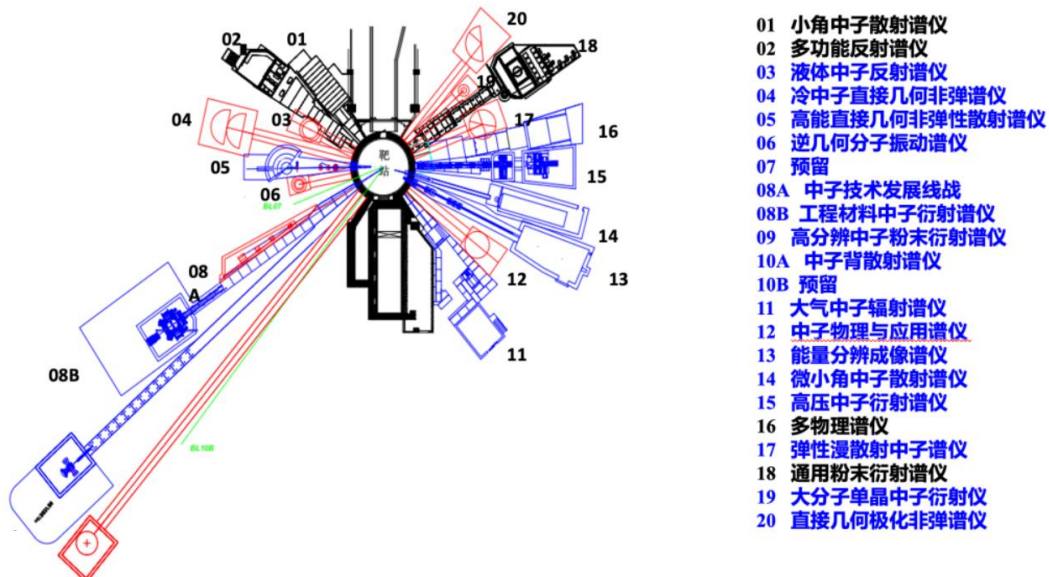


快循环同步加速器

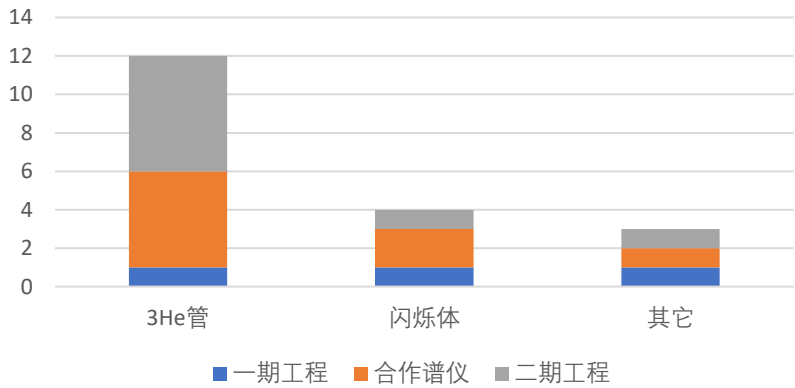


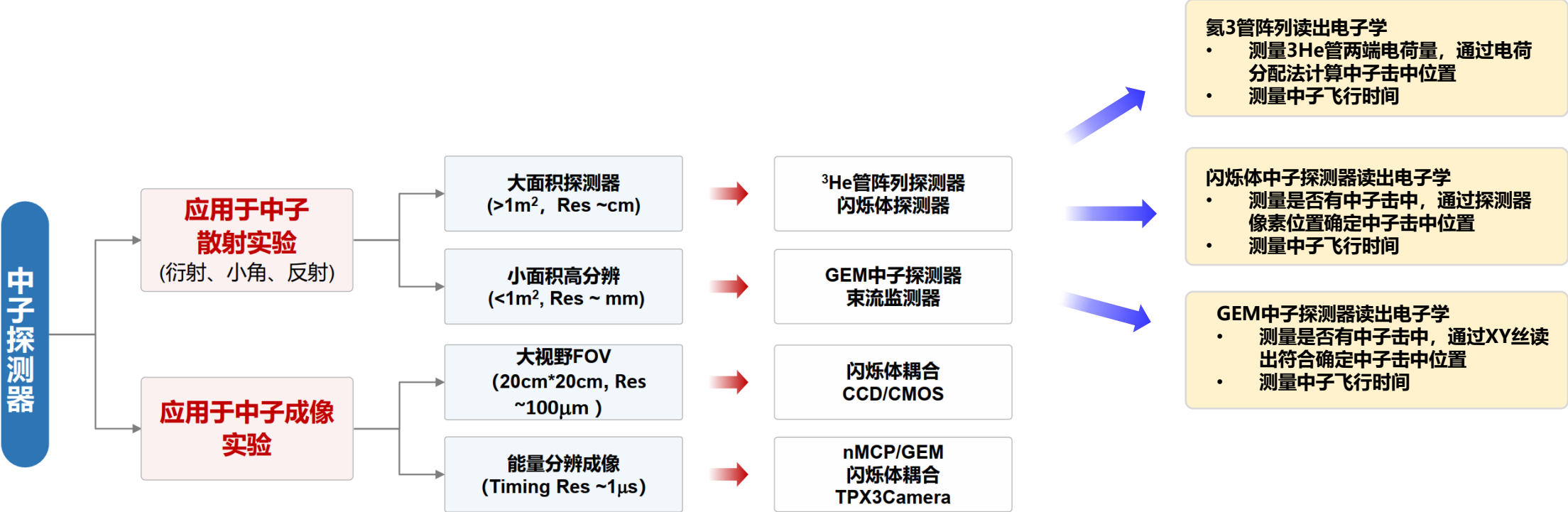
- 主要探测器类型：氦3管位置灵敏探测器、闪烁体中子探测器
- 其它中子探测器：MWPC、GEM等
- 详细探测器相关内容见报告：[中国散裂中子源探测器研制进展](#) by 周健荣

CSNS中子谱仪规划



CSNS中子谱仪中子探测器类型分布

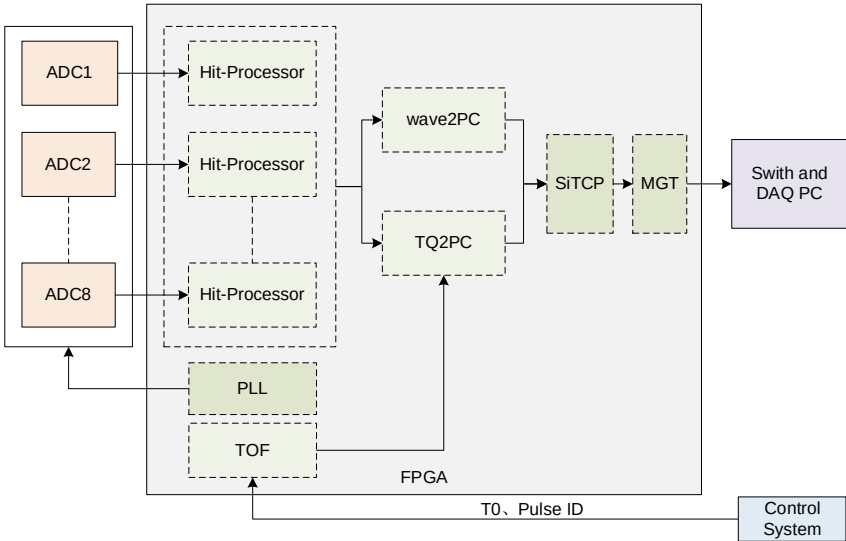
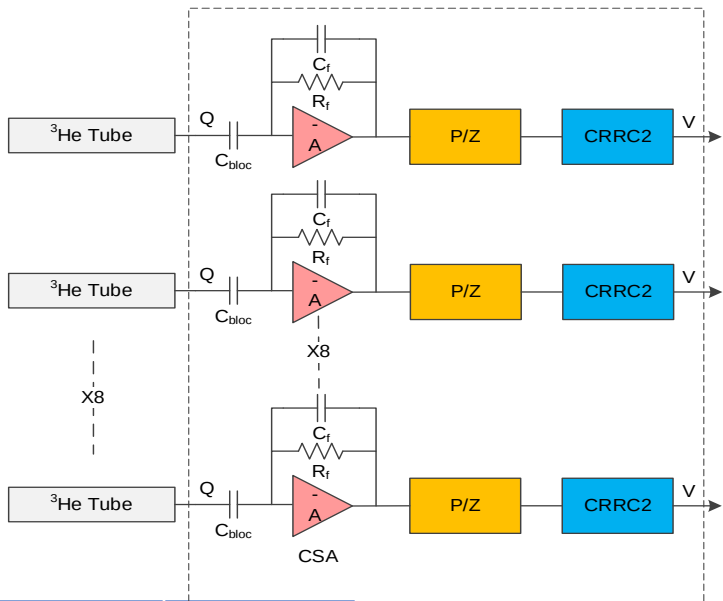




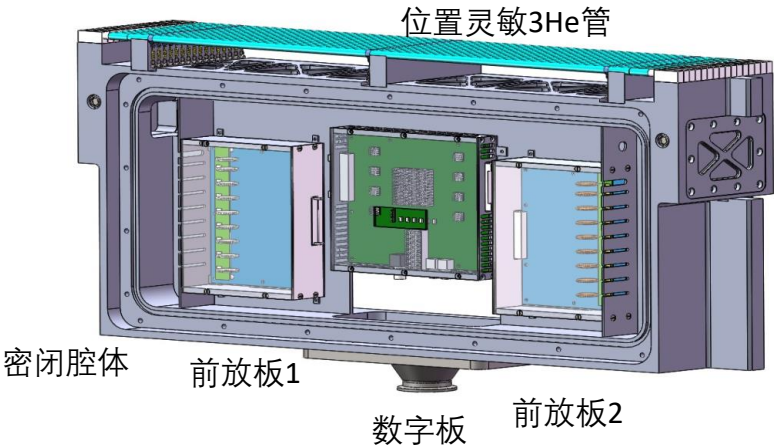
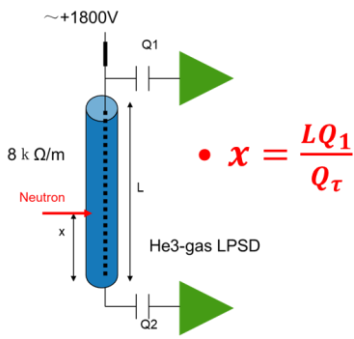
- 中子谱仪主探测器：主要使用 ^3He 管阵列探测器与闪烁体中子探测器
- 中子束流监测器：一般采用GEM中子探测器

读出电子学关键参数要求

- 动态范围: ~ 0.5 pC
- 电荷分辨: < 15 fC
- 时间分辨: < 1 us
- 时间测量范围: > 40 ms
- 积分非线性: < 1%
- 计数率: >20 kHz/ch
- 工作环境: 大气/**真空**

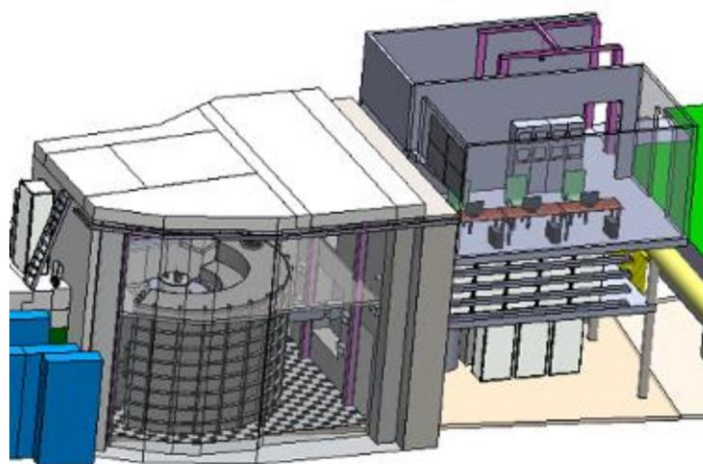
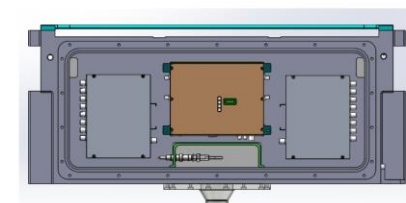
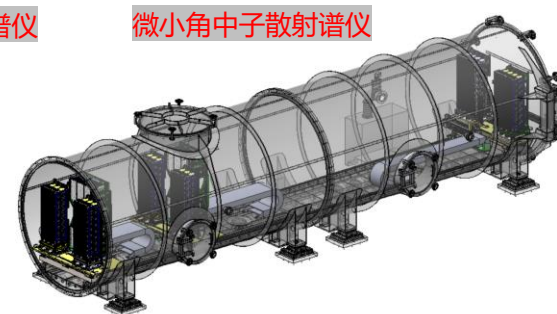
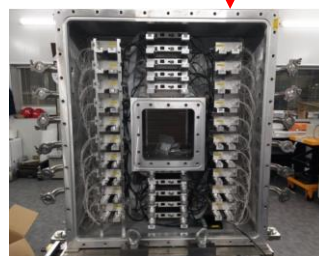
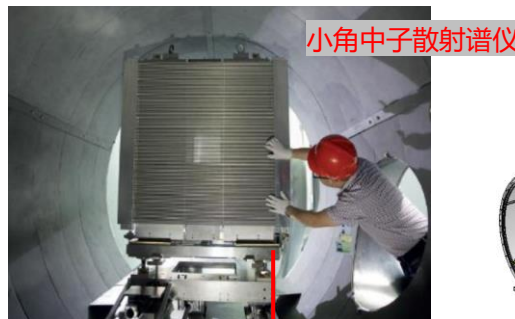


中子谱仪	工程阶段	状态	总电子学通道数	探测器模块类型	工作环境
小角中子散射仪	一期	已建成	240	10管/模块	粗真空
多物理中子谱仪	合作	已建成	1152	8管/模块	大气
微小角中子散射	合作	建设中	512	8管/模块	粗真空
高能非弹中子散射	合作	建设中	264	8管/模块	高真空
高压中子散射	合作	建设中	528	8管/模块	大气
高分辨中子散射	合作	建设中	2880	16管/模块、 8管/模块	大气

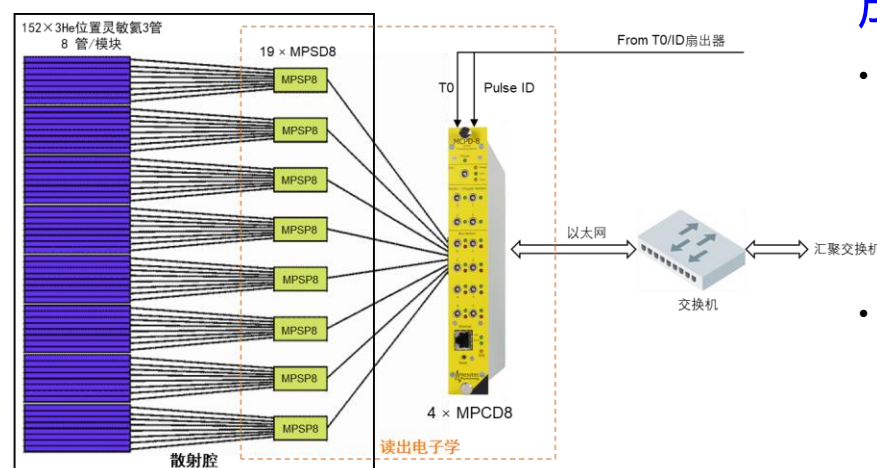


成熟自研方案: 大气、粗真空环境

- 8通道前放板
 - 电荷灵敏前置放大器
 - 极零相消+CRRC成形电路
 - 功耗: $\sim 3.5\text{W}/\text{模块}$, $440\text{mW}/\text{ch}$
- 数字板
 - 接收两块前放板信号, 用于读出8根氦3管
 - 基于Virtex5高性能FPGA
 - 模数转换: $8 \times$ 双通道ADC, 65 Msps , 14bit
 - 数据接口: SiTCP协议, SFP光纤通讯
 - 功耗: $\sim 5\text{W}$
- 真空散热: 密闭电子学腔体+冷气



高能非弹中子散射谱仪

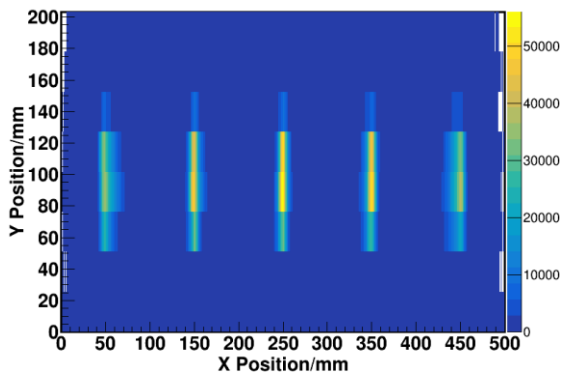
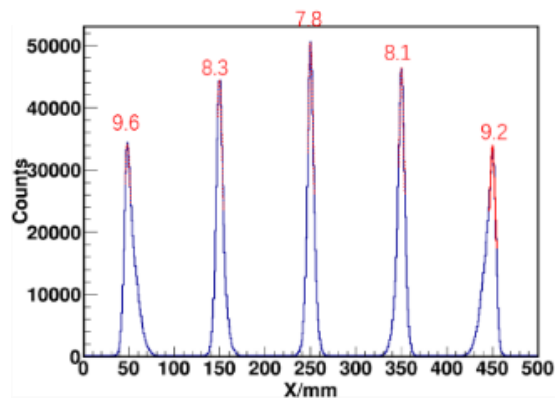


高能非弹中子散射谱仪读出电子学方案

成熟商业方案: 大气 ~ 高真空环境

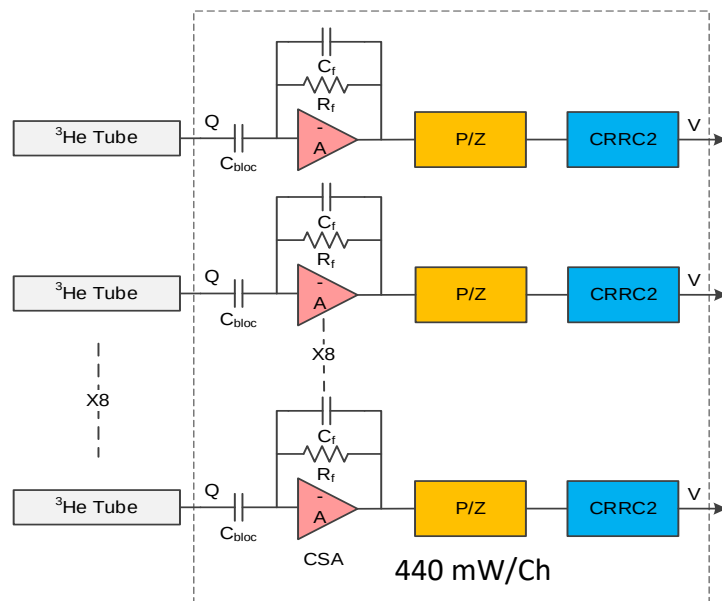
- 16通道前端模块 (可放置于真空中): mesytec MPSP-8+SA
 - 电荷灵敏前置放大器
 - 峰值保持, 模拟选通, $4.25\text{M}@14\text{bit}$ SAR ADC
 - 集成FPGA, 单链路串行数字信号输出
 - 功耗: $\sim 2.4\text{W}/\text{模块}$, $150\text{mW}/\text{ch}$, 支持在真空中直接工作
- 后端模块 (放置于大气中): mesytec MCPD8
 - 接收8个MPSP-8模块数据, 封装时间戳, 打包, 缓存
 - 峰值事例率: $2\text{M}/\text{s}$, 峰值 $6.4\text{M}/\text{s}$
 - 数据接口: 100M 以太网
 - 时间戳精度: 100 ns
 - 功耗: $\sim 4\text{W}$

成熟自研方案 – 束测结果与关键参数

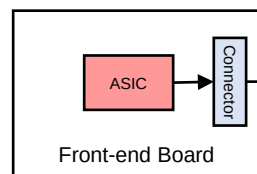


参数	要求	测试结果
输入动态范围	100 - 800 fC	100 - 830 fC
电荷分辨	< 15 fC	< 5 fC
积分非线性	< 1%	< 0.5%
单通道计数率 (瞬时)	> 100KHz	> 100KHz
时间分辨	< 1us	< 20 ns
位置分辨	< 10 mm with 1m tube	< 10 mm

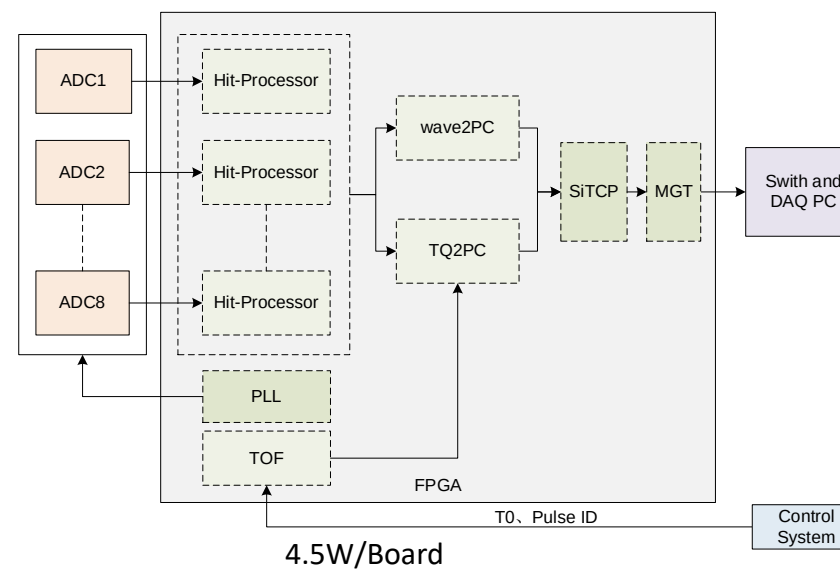
自研高真空方案预研：对标mesytec方案



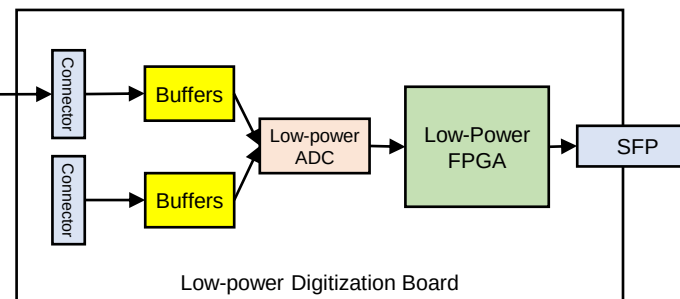
目标: <40 mW/Ch



1. 自研低功耗ASIC

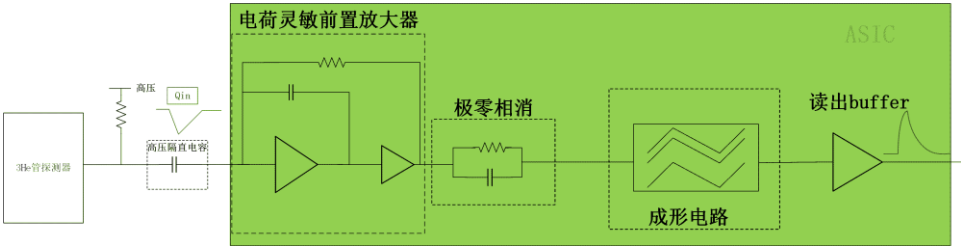


目标: <2 W/Board

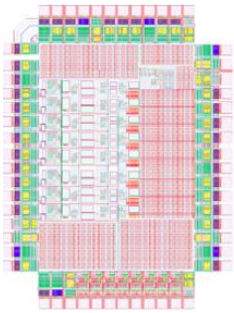


2. 自研低功耗数字化板

高真空方案R&D – 自研低功耗前端ASIC

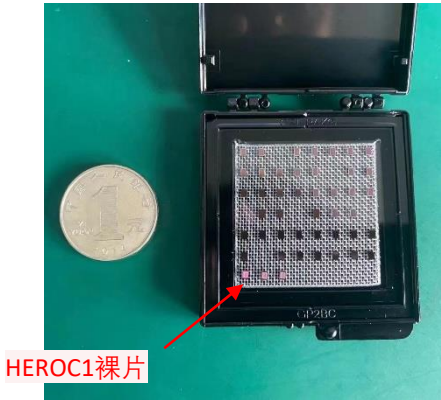


前端ASIC HEROC2 Block Diagram

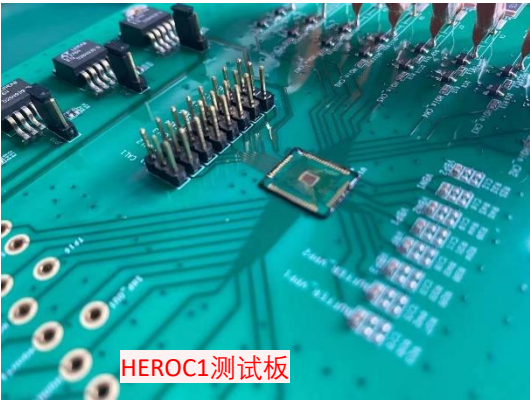


HEROC2 Layout

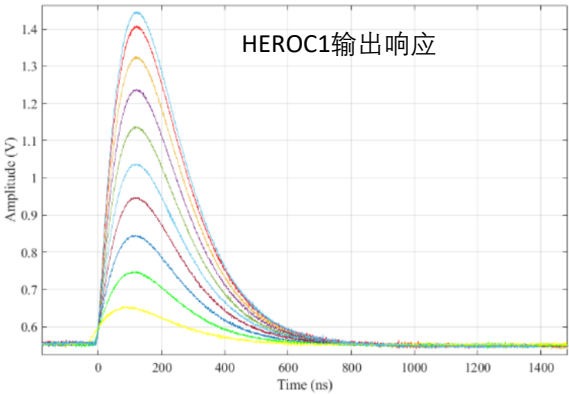
关键参数	测试结果	与分立器件对比
单通道功耗	~ 10 mW	降低90%
等效噪声电荷ENC	0.2 fC @ 15 pF	降低1.5倍
输入动态范围	10 fC – 1 pC	相当
计数率	100 kHz	相当
电荷积分非线性	±3‰	相当



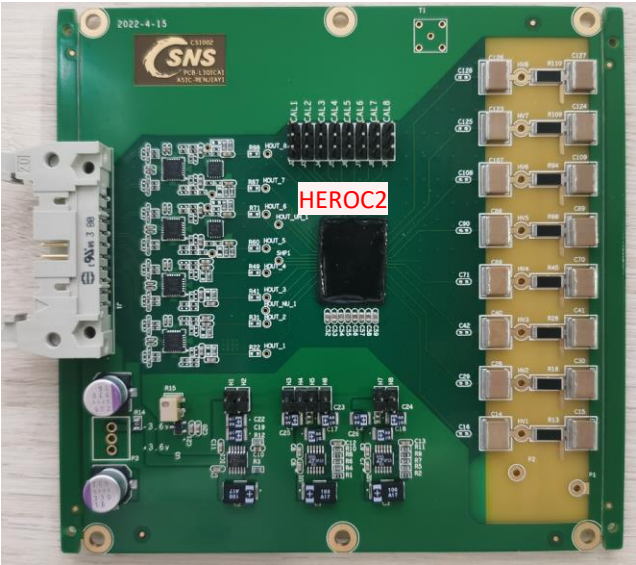
HEROC1裸片



HEROC1测试板



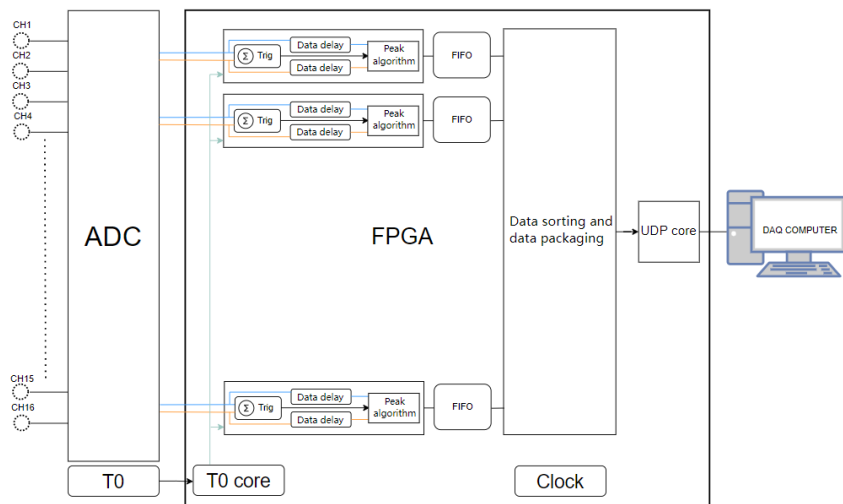
HEROC1输出响应



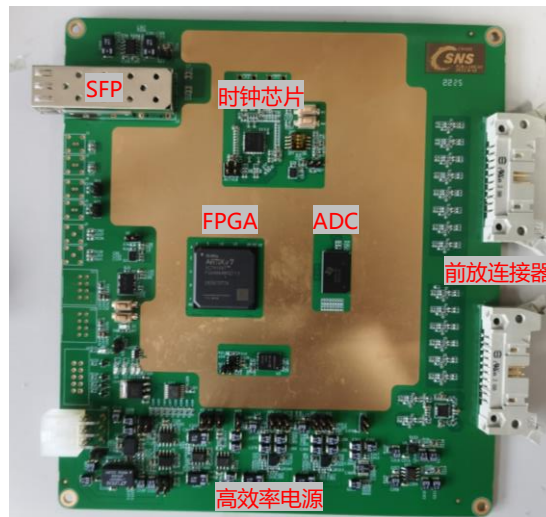
HEROC2前放板

我们非常感谢魏微研究员在此芯片的研究中给予的指导和建议。

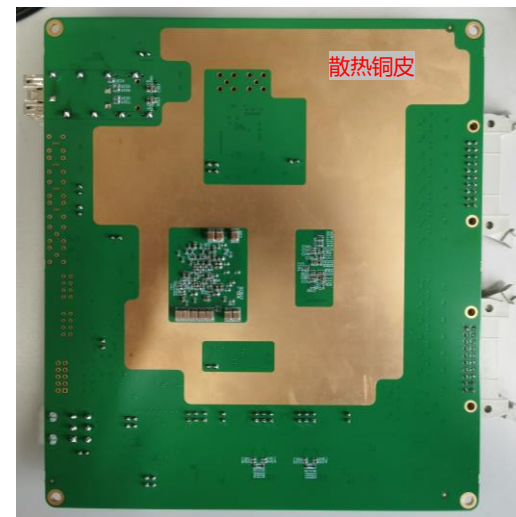
高真空方案R&D – 低功耗数字化板



低功耗数字板框图



低功耗数字板实物图正面



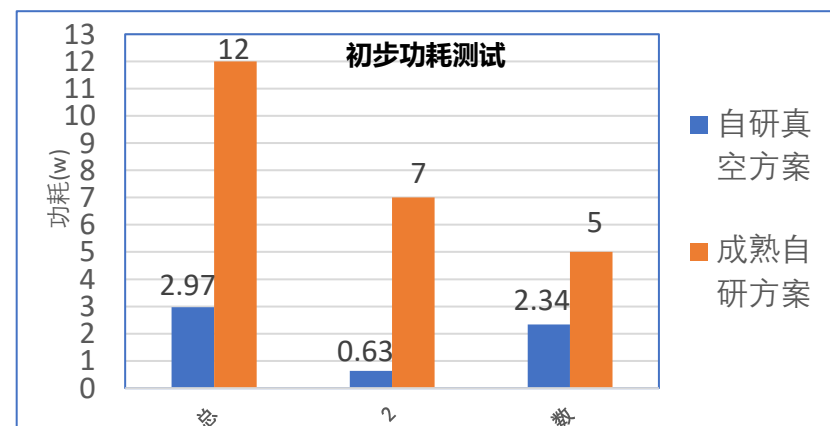
低功耗数字板实物图反面



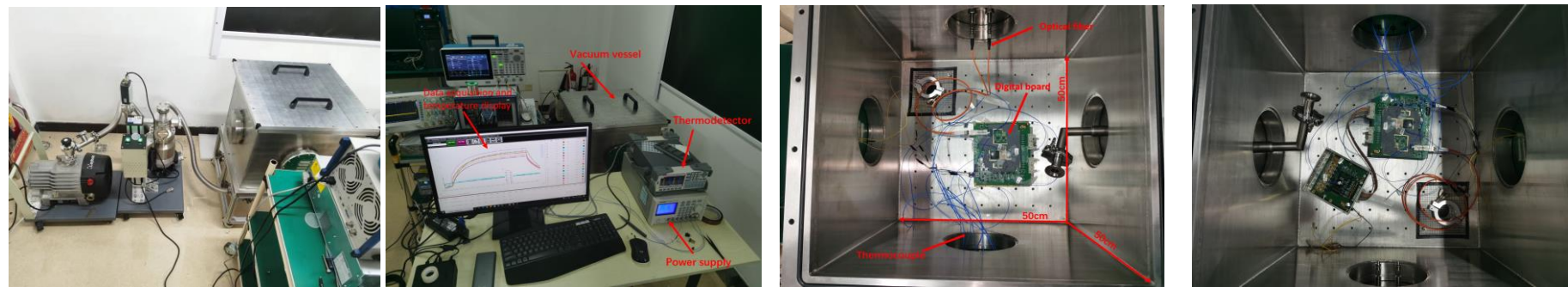
CNC散热外壳

氦3管阵列读出电子学低功耗数字板样机

- 基于低功耗主流FPGA: Artix-7
- 低功耗多通道ADC: TI ADS52J90, 65 Msps@14bit
- 低功耗光链路: 0.6W @ 1.25Gbps
- 高导热PCB设计: 热过孔, GND使用厚铜, 散热铜皮
- 高效率电源: DCDC+LDO, 整体效率 > 85%



高真空方案R&D – 低功耗数字化板初步测试结果



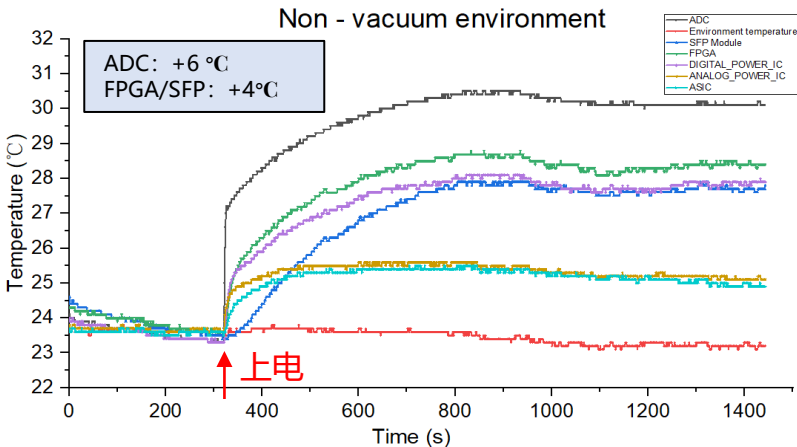
真空测试现场环境

真空腔内部（数字板）

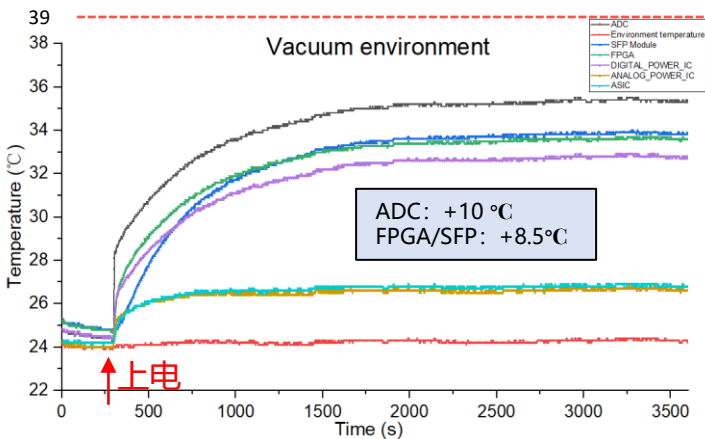
真空腔内部（数字板+模拟板）

测试条件:

- (1) 机械泵抽取真空, 压强小于~2Pa (0.02 mbar)
- (2) 数字板和模拟板使用铜柱支撑, 未使用CNC外壳, 与真空腔无明显热传导路径
- (3) FPGA正常运行固件, UDP数据量660Mbps



室温非真空环境下各器件温度随时间变化



室温真空环境下各器件温度随时间变化

Mesytec 前端模块ADC温度
39 °C (24+15)

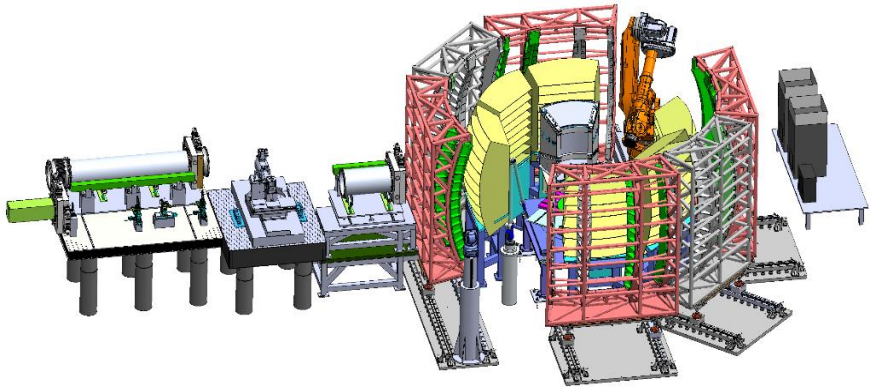
- 模拟板功耗低, 相对于数字板达到热平衡所需要的时间少;
- 与非真空环境相比, 真空环境中电子学需要更长的时间才能够达到热平衡;
- 真空中电子学各器件的温度比非真空环境下要高, 在24°C室温情况下, 电子学温度最高的位置是ADC, 为35.2°C

ADC	功耗	RθJC	RθJB
自用低功耗板	500 mW	14 °C/W	4.9 °C/W
商用mesytec	70 mW	45 °C/W	n.a.

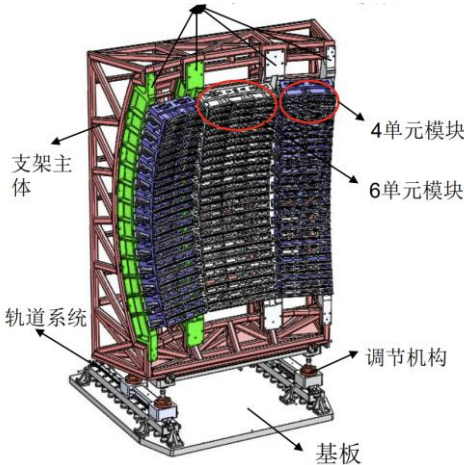
读出电子学关键参数

- 通道数: ~ 十万通道
- 动态范围: ~ 10 ~ 200 mV
- 时间分辨: < 1 us
- 时间测量范围: > 40 ms
- 计数率: >2 kHz/ch
- n/λ甄别能力: 较强
- 工作环境: 大气/真空?

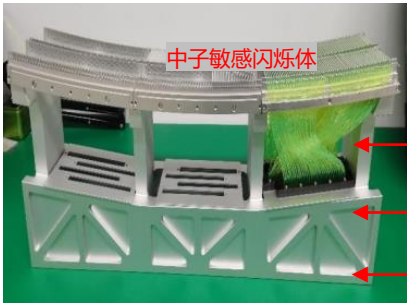
中子谱仪	工程阶段	状态	总电子学通道数	探测器单元	工作环境	方案
通用粉末衍射	一期	已建成	17.28k	90 x 192ch单元	大气	PMT Array ASIC + V5 FPGA
工程应力材料谱仪	合作	调试中	4.48k	70 x 64ch单元	大气	分立PA/SH/CMP + K7 FPGA
能量选择中子成像谱仪 (衍射探测器)	合作	建设中	27.52k	430 x 64ch单元	大气	SIPM ASIC + K7 FPGA



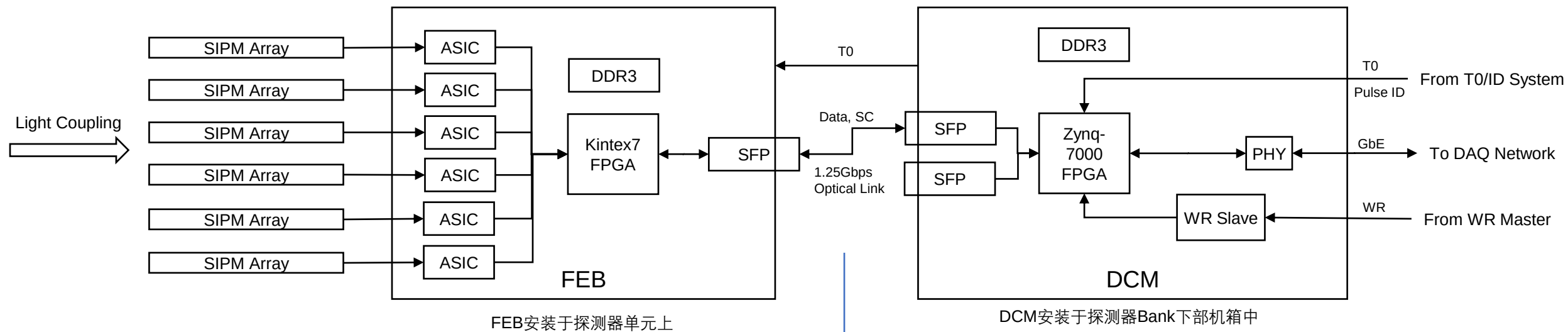
能量选择成像谱仪



探测器Bank

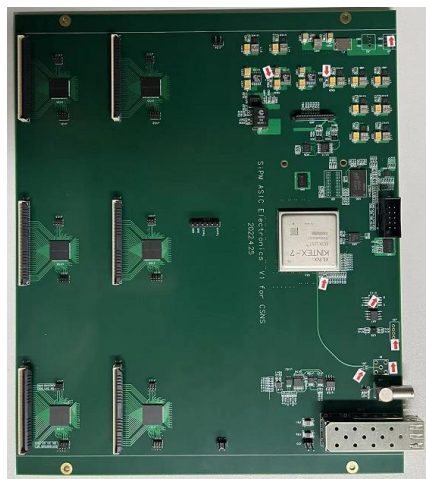


探测器单元



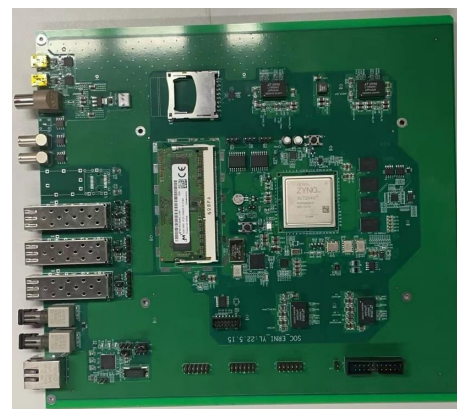
前端电子学板FEB

- 实现2.75万通道测量，需采用ASIC来实现电子学设计；
- ASIC数据处理：单块板子处理6片ASIC，即192路信号；
- SiPM温湿度、高压、电流监测；



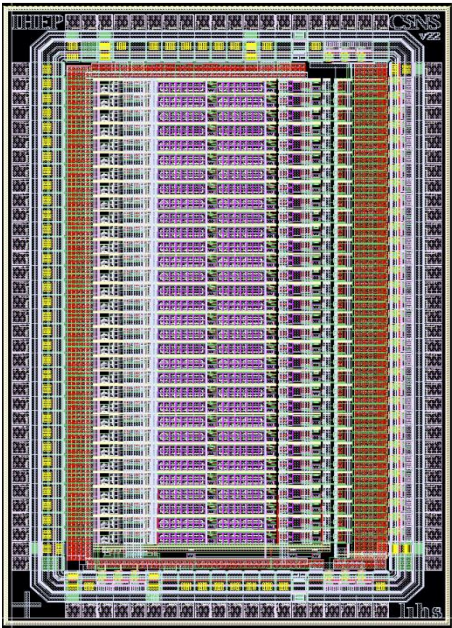
后端数据汇聚板DCM

- FPGA板数据处理：1拖2处理处理两套FPGA板数据，即一个探测器模组384路信号；
- 数据arm端在线解析出PIXID、TOF等信息；
- 数据流监测，数据完整度、掉模块警告信号等；



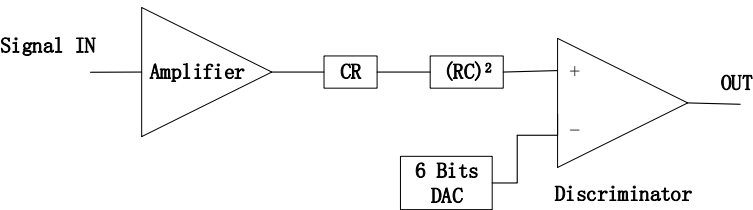
闪烁体中子探测器读出电子学 - 前端电子学板

SiPM ASIC Designed by 高能所-李怀申



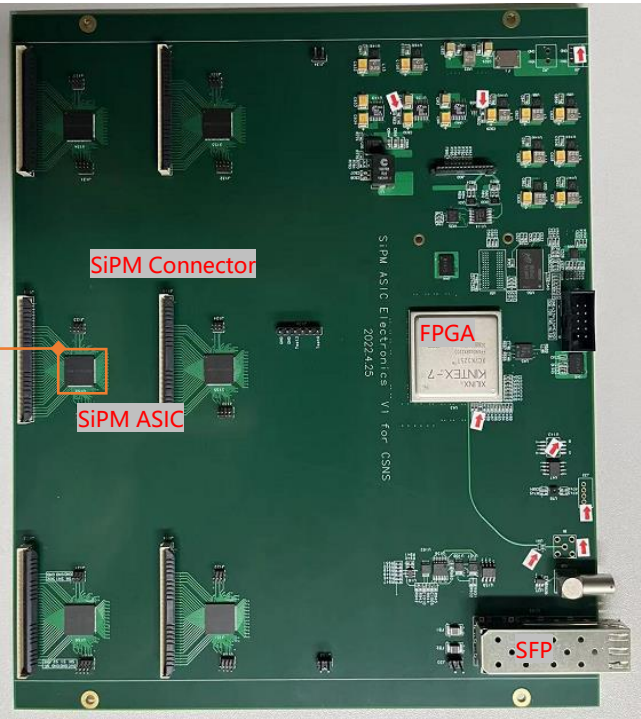
SiPM ASIC Layout

SiPM ASIC 通道结构框图



Specification	Value	Description
Process	0.18μm CMOS, 1P6M	
Peaking Time	200ns/400ns	
RMS@input	~0.5mV	@1nF, 27℃ 增益
High rate performance	>200kHz	Could be higher next version
Signal polarity	Positive input	Also could be Negative
Linear range	~120mV	INL better than 1%
Power dissipation	<1.5mA@1.8V/channel	
Channels	32channels per die	
Pad Num.	110, including 2 NC Pad	

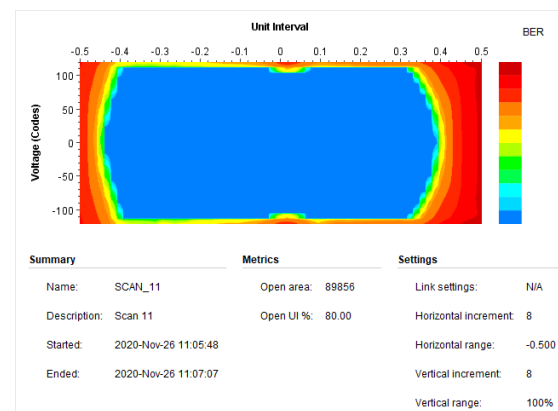
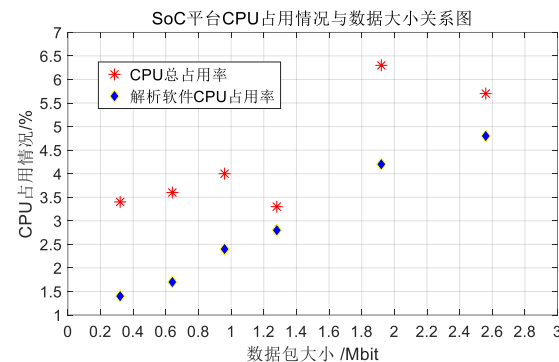
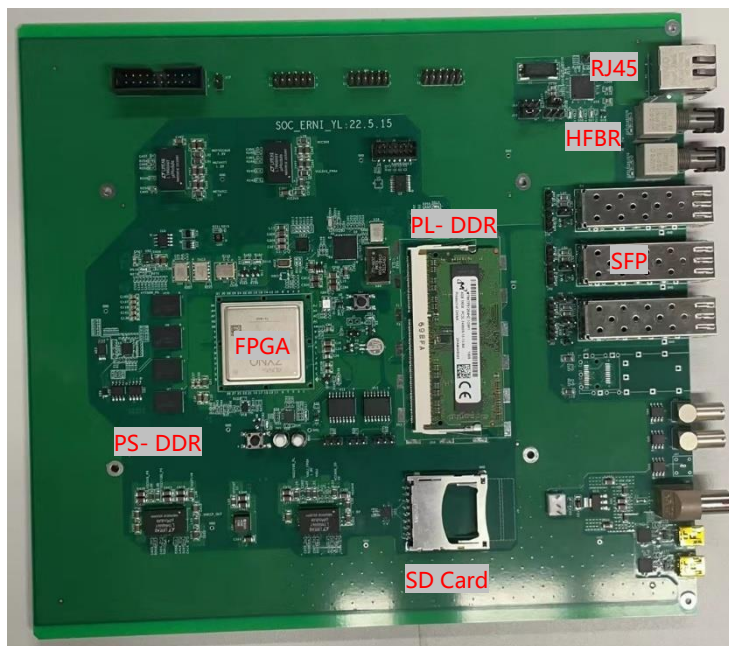
SiPM ASIC关键参数



前端电子学板FEB原理样机

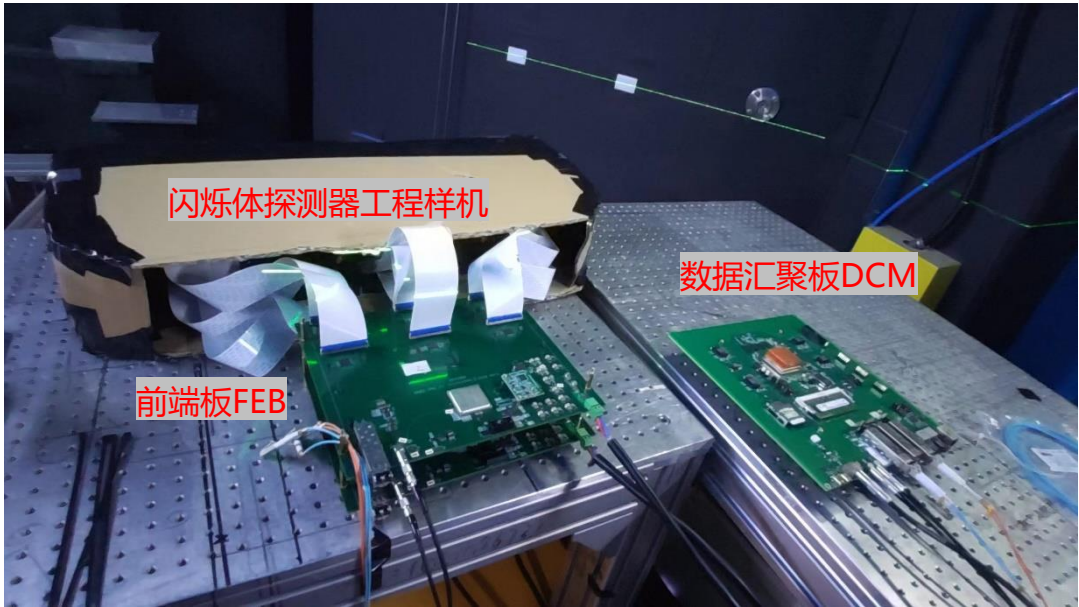
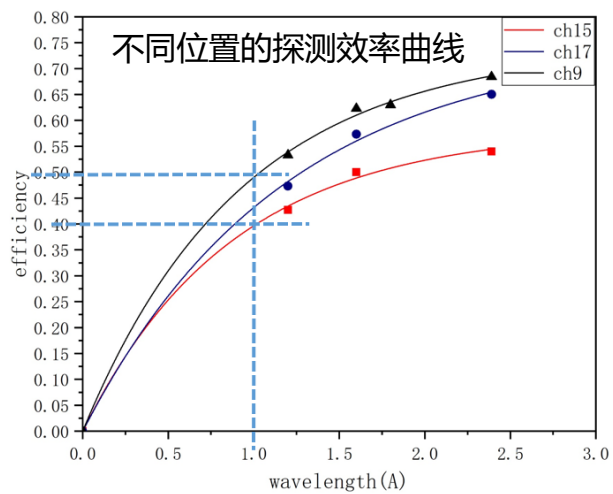
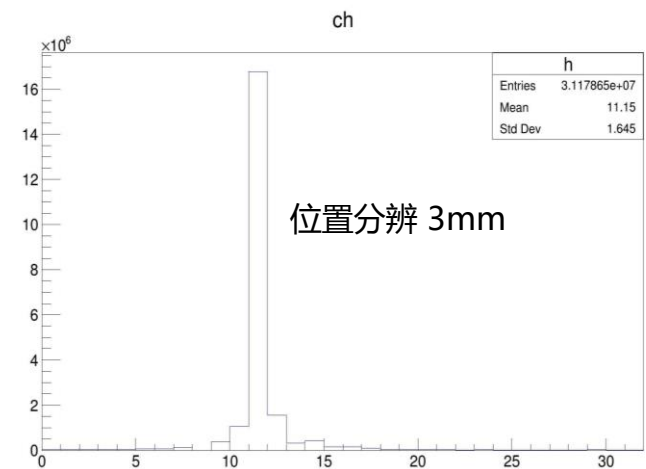
- 基于自主研发的SiPM ASIC，设计了前端电子学工程样机
- 192通道/板，可以同时处理6个SiPM线列

闪烁体中子探测器读出电子学 – 数据汇聚板DCM



- 数据汇聚板DCM用于接受两块FEB数据，处理384通道信号
- SoC平台数据处理速度要好于50Mb/s
- GTX链路性能: 眼图张开面积80%，误码率低于 10^{-12}
- CPU占用率: 7%

闪烁体中子探测器读出电子学 – 联调测试



参数	要求	测试结果
输入动态范围	10mV ~ 150 mV	10 mV ~ 200 mV
积分非线性	< 3%	2.5%
单通道计数率	> 2KHz	> 3KHz
时间分辨	< 1us	~ 10 ns
位置分辨	<= 3mm	3mm

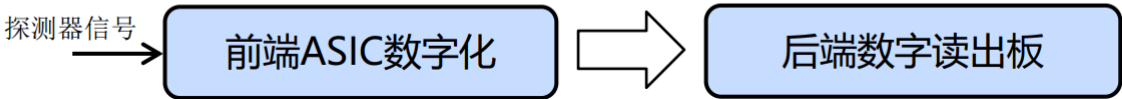
➤ 研制背景

- GEM探测器：具有面积大、高分辨、高计数率等优点，适用于作为中子探测器



GEM探测器进展

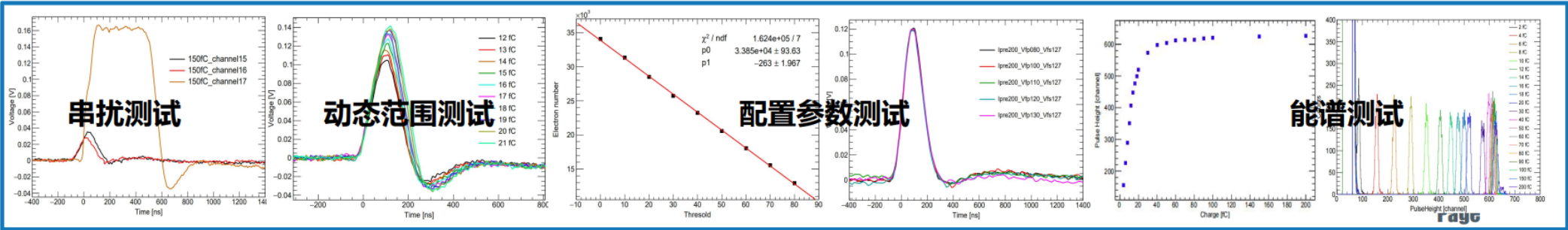
➤ 电子学方案设计 (100*100GEM探测器)



- 前端ASIC：AS2.0，集成到探测器机械内部，单个ASIC实现64路读出，共需两块ASIC
- 传输线：采用68芯的屏蔽线缆
- 数字板：实现ASIC数据的串并转换，通过FPGA实现中子符合算法

电子学设计要求	
通道数	128路
读出方式	二维读出
动态范围	1~200fC
时间分辨	100ns
位置分辨	好于5mm
最高计数率	1M以上

➤ 芯片测试 (AS2.0@Heidelberg)

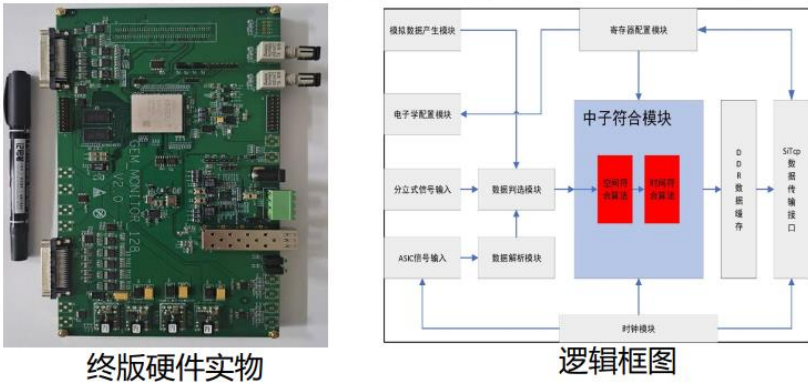


➤ 数字读出板设计

硬件：低噪声电子学系统
优化系统噪声设计@阈值可达到117

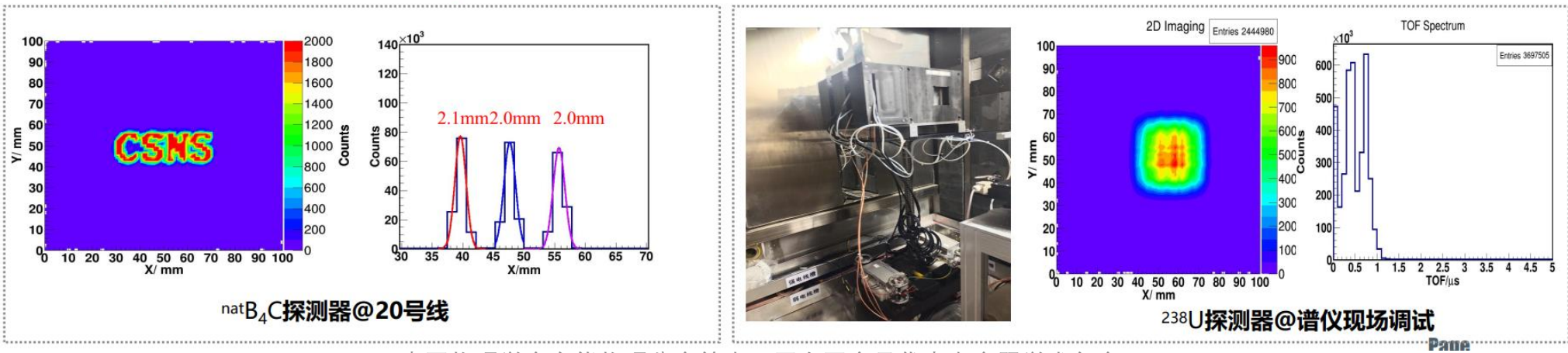


固件：优化符合算法，降低系统死时间@100ns；
灵活调整着火条数和符合时间，降低r-flash对位置影响



➤ 谱仪工程任务—大气中子辐照谱仪

- 满足快中子测量需求
- 束线 γ -flash强，尽可能抑制 γ -flash对中子探测的影响



- 依托散裂中子源一期、合作谱仪工程建设，散裂中子源科学中心探测器&电子学团队自主研发了多种主流中子谱仪探测器读出电子学方案，性能指标与国际先进水平相当，满足了实际工程需求；
- 瞄准散裂中子源二期工程的迫切需求，开展了能在真空中工作的中子谱仪探测器读出电子学研发，在低功耗ASIC芯片以及数字读出板上取得了初步进展；