

国家重点研发计划课题3



用于暗物质探测等实验的 低本底电子学系统研发 2017年度进展

刘树彬

核探测与核电子学国家重点实验室

中国科学技术大学





研究方向



年度进展



经费使用



后续计划

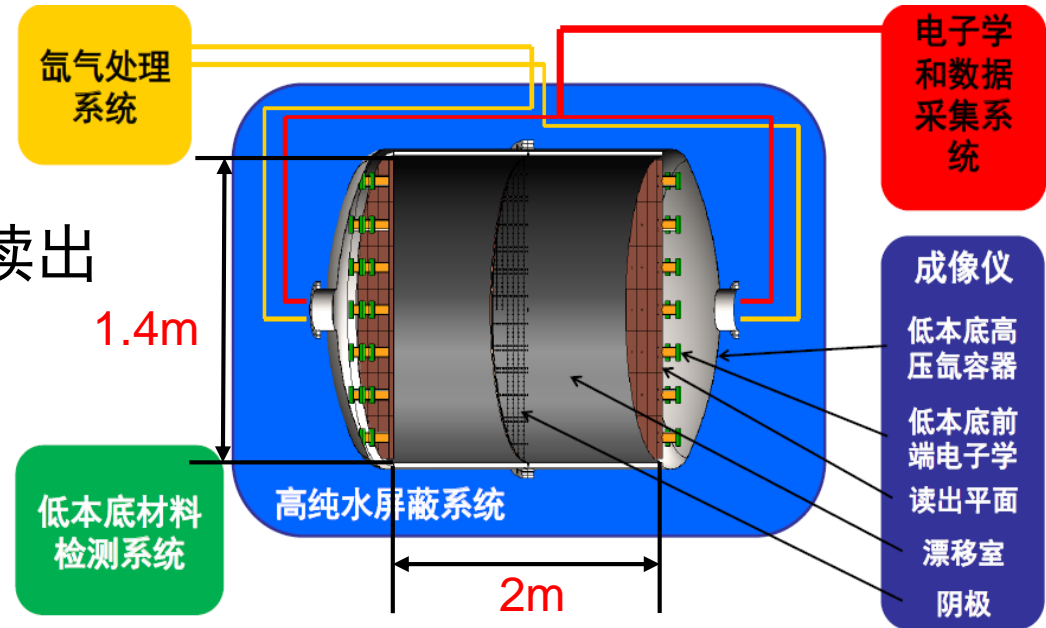
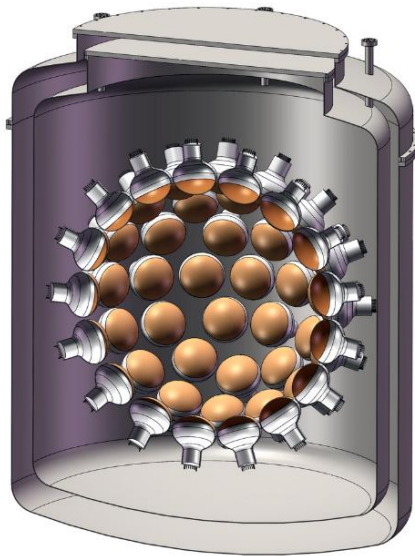


研究内容

- 为课题2、4提供电子学手段支持

➤ 高压气氙TPC

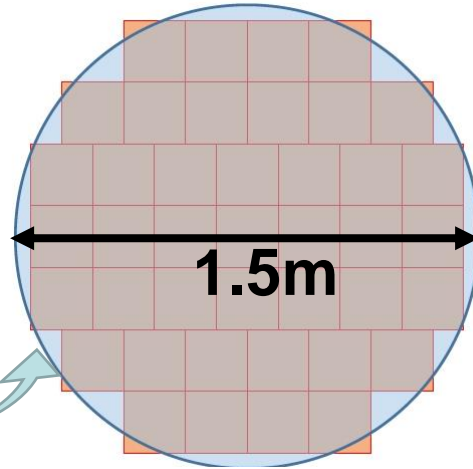
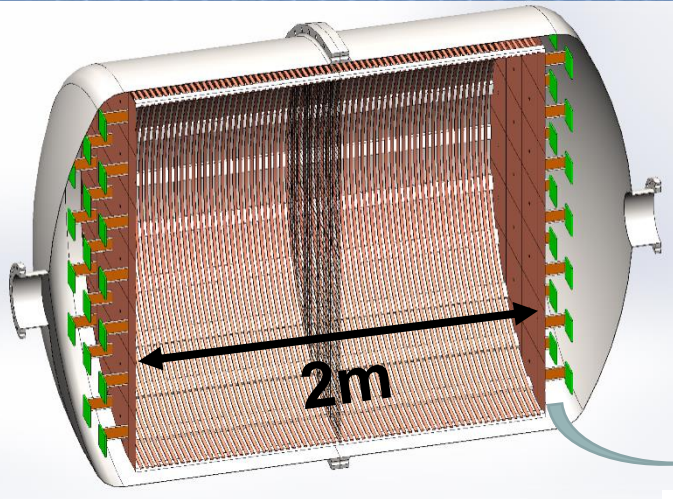
- 高集成度、低本底读出



➤ 液氙探测器PMT

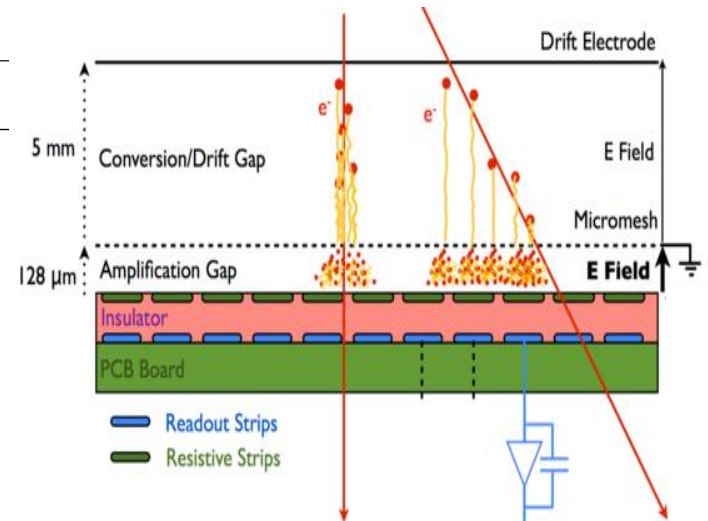
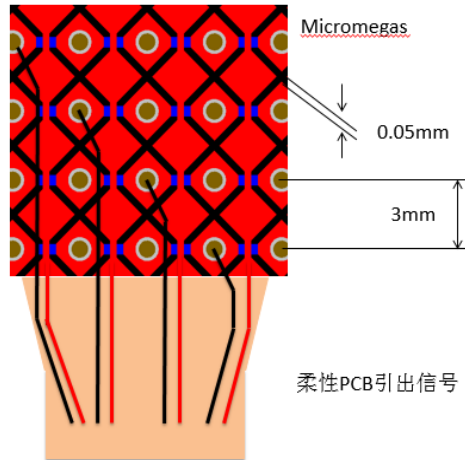
- 波形数字化方法研究

高压气氙TPC读出电子学



- TPC端盖直径: 1.5m
- Micro-bulk Micromegas大小: 20cm × 20cm
=>每端盖需41个
=>共需82个

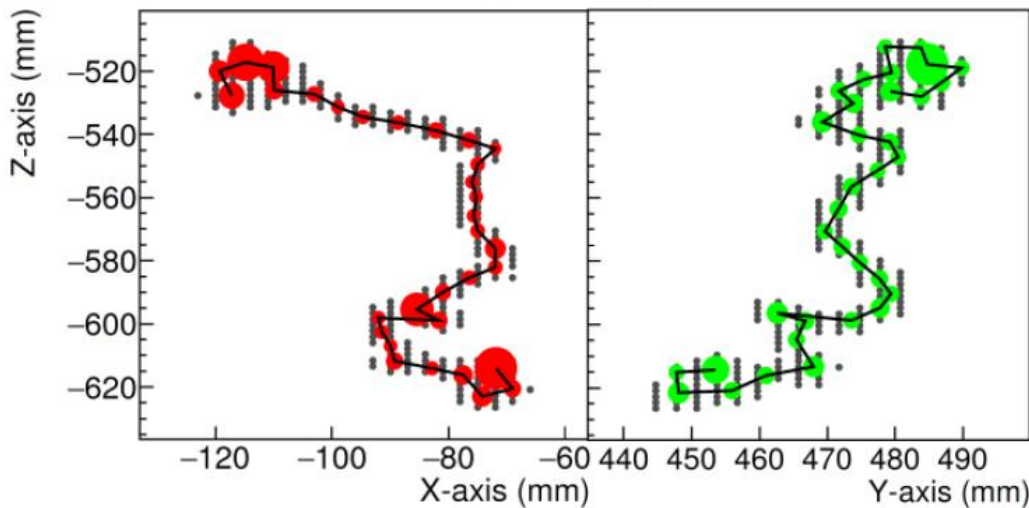
- 读出pad大小: 3mm × 3mm
- 采用二维平行条读出
=> 每个Micromegas需128路阳极条读出
=> 总读出通道数为10496 (任务书6000通道)
=> Mesh信号通道数为82



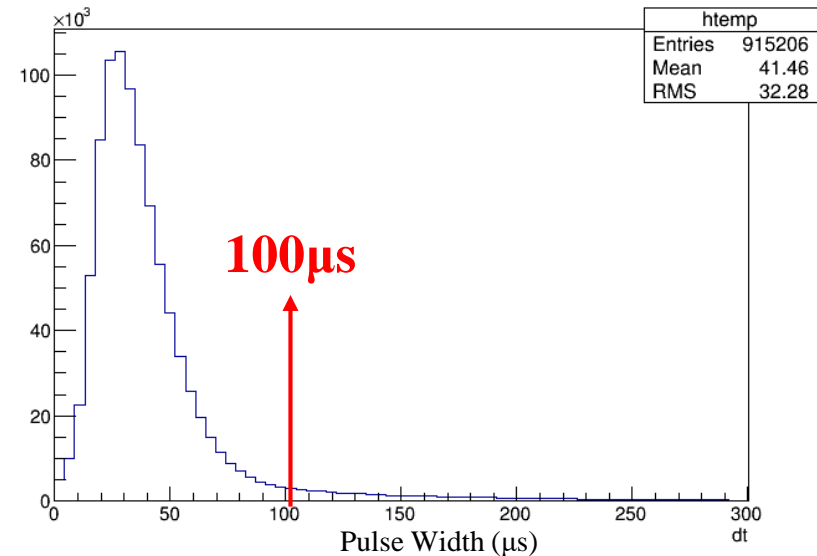
信号特征：脉冲宽度

- ◆ 氙发生无中微子双贝塔衰变的最大径迹长度：~30cm
- ◆ 电子漂移速度：~1.00mm/ μ s @ 10bar
- 物理仿真显示不同事例的脉冲宽度涨落较大
- 95%事例的脉冲宽度小于100 μ s

NLDBD Event

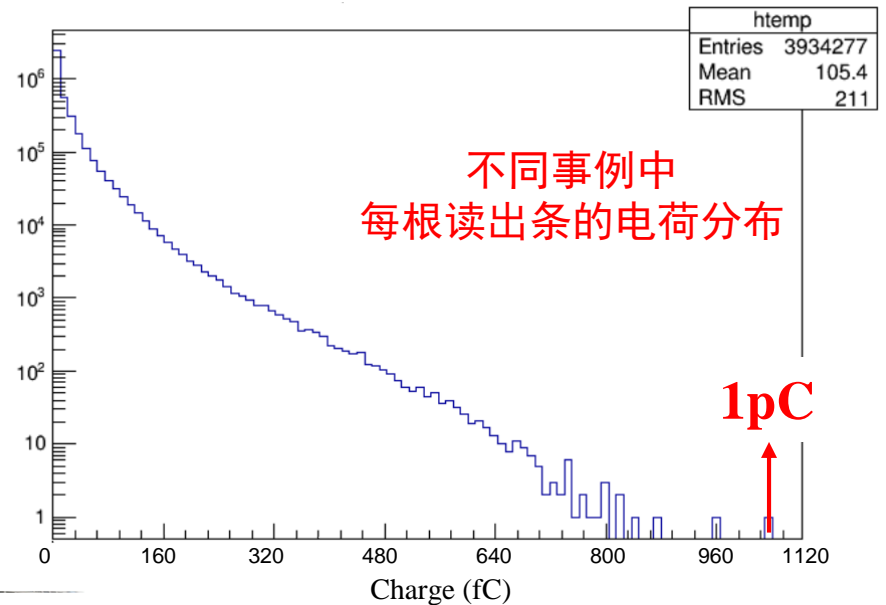
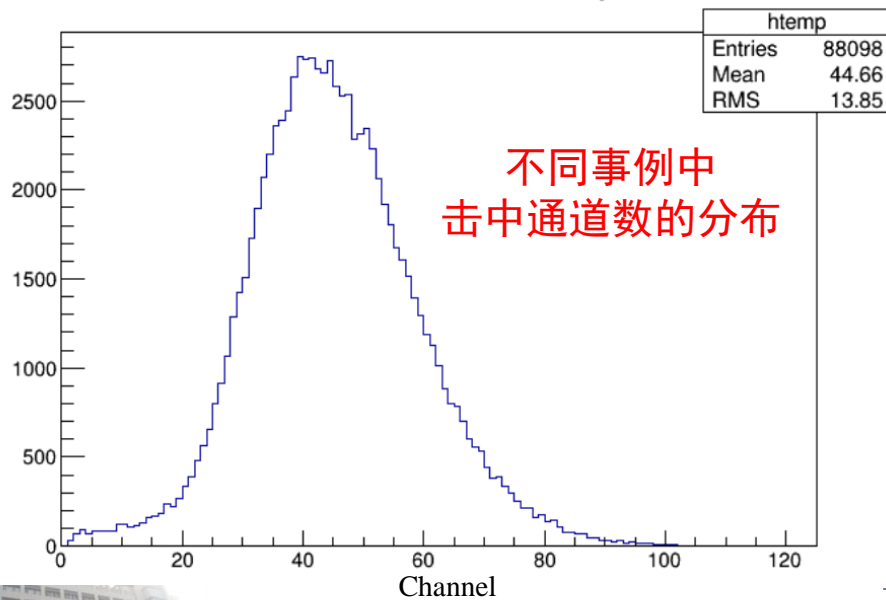


不同事例中脉冲宽度分布



信号特征：电荷量

- ◆ 氙发生无中微子双贝塔衰变的 Q_{ee} 为 2457.8keV ($E_e = 30\text{eV/e}$)
- ◆ 若Micromegas的工作增益 $\text{Gain}_{\text{MM}} = 400$
- $\Rightarrow Q_{\text{total}} = (Q_{ee}/E_e) \cdot \text{Gain}_{\text{MM}} \approx 6.4\text{pC}$
- 物理仿真显示不同事例中每根读出条的电荷量 $Q_{\text{strip}} < 1\text{pC}$





精度要求：非线性、非均匀性、噪声等

- PandaX-III第一阶段的能量分辨率 $\eta_{sys} \sim 3\%$
- 读出电子学的分辨率 $\eta_{elec} \sim 1\%$

$$\eta_{elec} = \sqrt{\eta_{INL}^2 + \eta_{gain}^2 + \eta_{noise}^2 + \eta_{others}^2}$$

◆ 假设各项因素贡献均等

- 积分非线性 $\eta_{INL} \sim 0.5\%$ \Rightarrow 积分非线性 $< 3.2\%$
- 增益的非均匀性 $\eta_{gain} \sim 0.5\%$ \Rightarrow 增益的非均匀性 $< 2\%$
- 噪声 $\eta_{noise} \sim 0.5\%$ \Rightarrow 噪声 $< 6fC$
- 其他 $\eta_{others} \sim 0.5\%$





高压气氙TPC探测器电子学需求

- ◆ 读出通道数
 - 阳极条信号：10496路
 - 丝网信号：82路
- ◆ 输入动态范围： $\geq 1\text{pC}$
- ◆ 信号读出时间窗口： $\geq 100\mu\text{s}$
- ◆ 积分非线性： $< 3.2\%$
- ◆ 增益的非均匀性： $< 2\%$
- ◆ 噪声： $< 6\text{fC}$
- 读出电子学需求：高密度、高集成度和低噪声等



液氦探测器PMT波形数字化读出方法

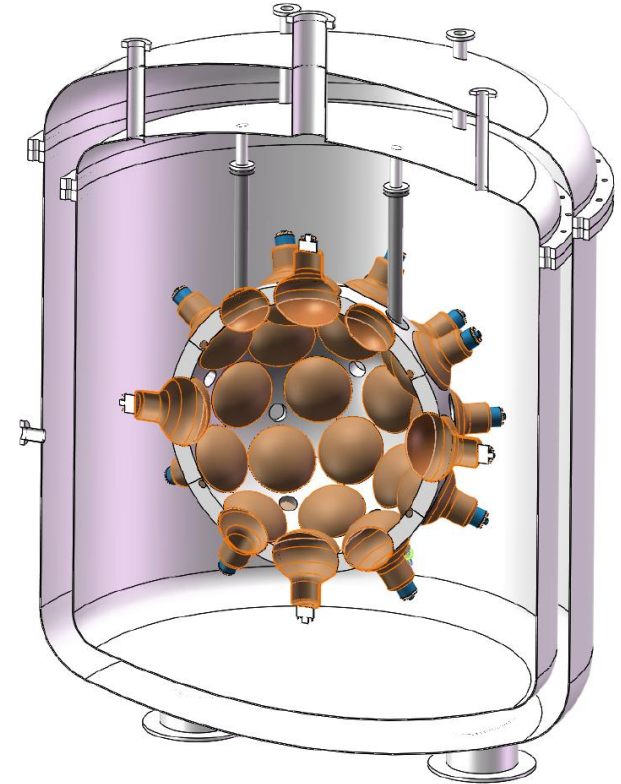


➤ 杜瓦

- 直径1.4m、高1.6m
- ~3吨液氦

➤ PMT探测器输出

- 8吋、3吋PMT按 4π 立体角排布
- 通过2m电缆连接到罐外
- 通道数~100



- 大规模波形数字化读出方法的实现
- 高性能海量数据读出技术



- ◆ 读出通道数
 - 100路
- ◆ 动态范围：
 - S.P.E~200P.E. (5pC~1nC)
- ◆ 模拟带宽：~200MHz
 - S.P.E信号前沿2~3ns
- ◆ 波形数字化指标：12bit@500Msps
- ◆ 信号读出时间窗口： $\geq 10\mu\text{s}$



- 1 研究方向
- 2 年度进展
- 3 经费使用
- 4 后续计划

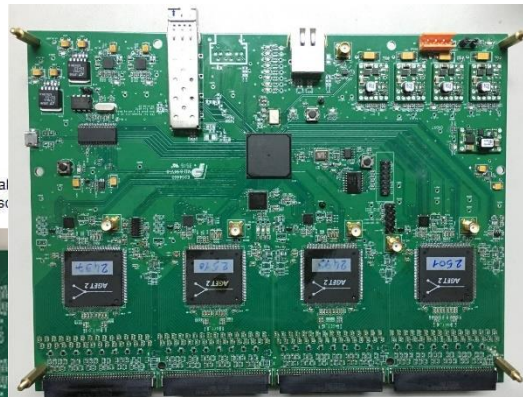


高压气氙TPC读出方向

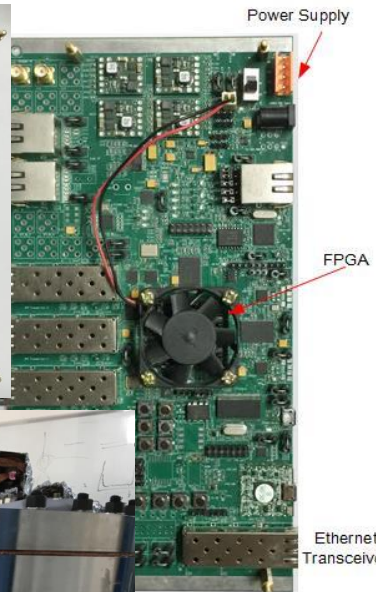
- ASIC芯片选型
- 电子学系统设计
 - 前端读出板
 - 丝网读出板
 - 数据获取板
 -
- 电子学性能测试
 - 实验室测试
 - 探测器联调
- 原型小系统设计和联调



Optical Transc



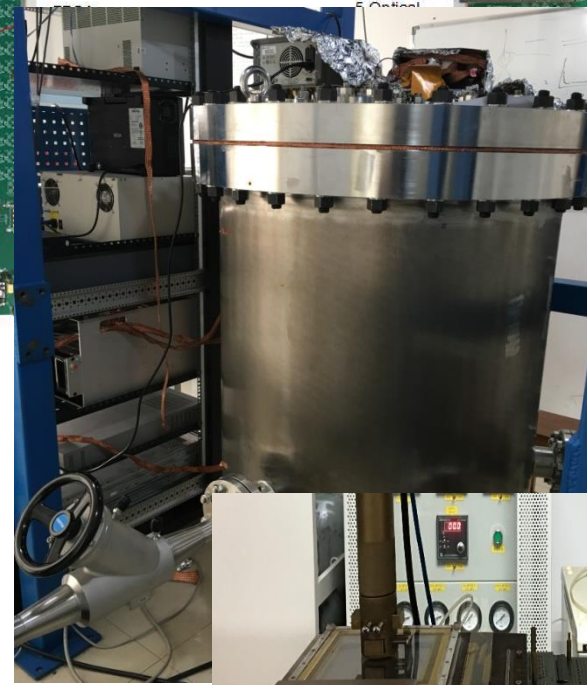
ADCs AD9229
CSA CR-RC2 Shaper



Power Supply

FPGA

Ethernet Transceiver



高压气氙TPC ASIC选型



APV25

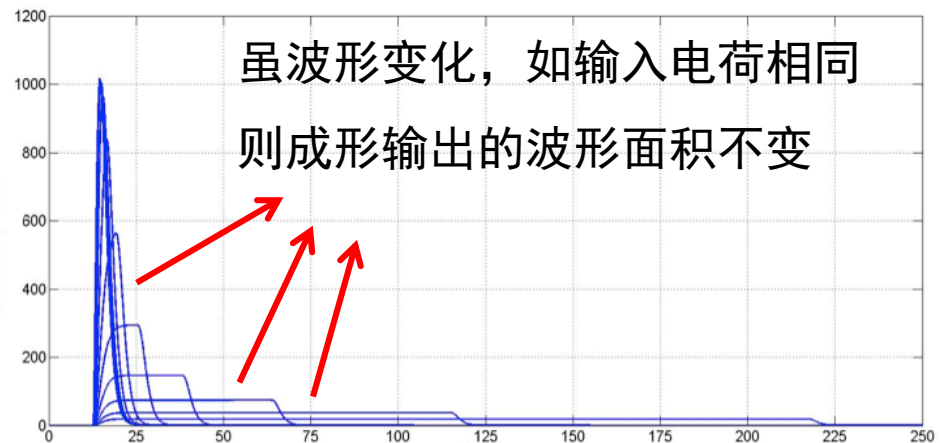


VA140

高压气氙TPC ASIC选型

ASIC	通道数	动态范围	达峰时间	读出方式
APV25	128	20fC (+/-)	50ns-200ns	波形采样
VMM	64	2pC	25-200ns	峰保持
VA140	64	200fC (+/-)	6.5 μ s	峰保持
VA32HDR14.3	32	-20pC	2 μ s	峰保持
AGET	64	10pC (+/-)	50ns-1μs	波形采样

- AGET芯片：电荷灵敏前放
+成形+波形采样
- 输出整个波形的信息，可利用波形面积重建能量信息

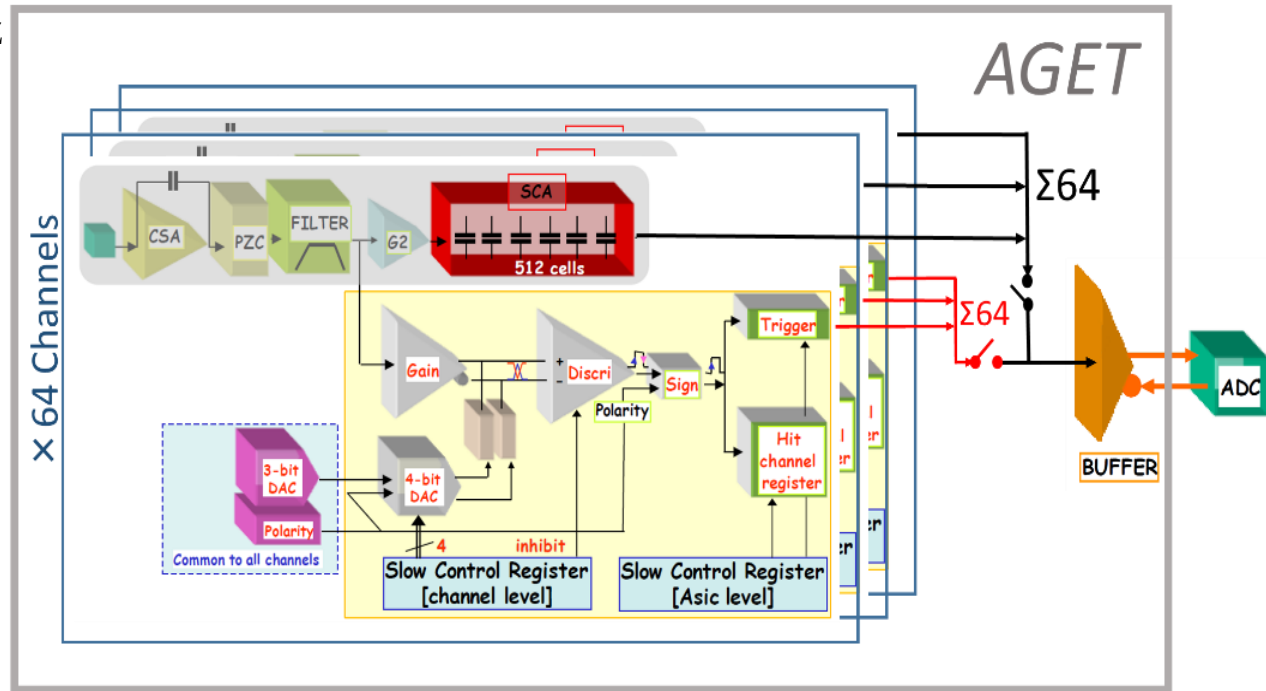


AGET芯片

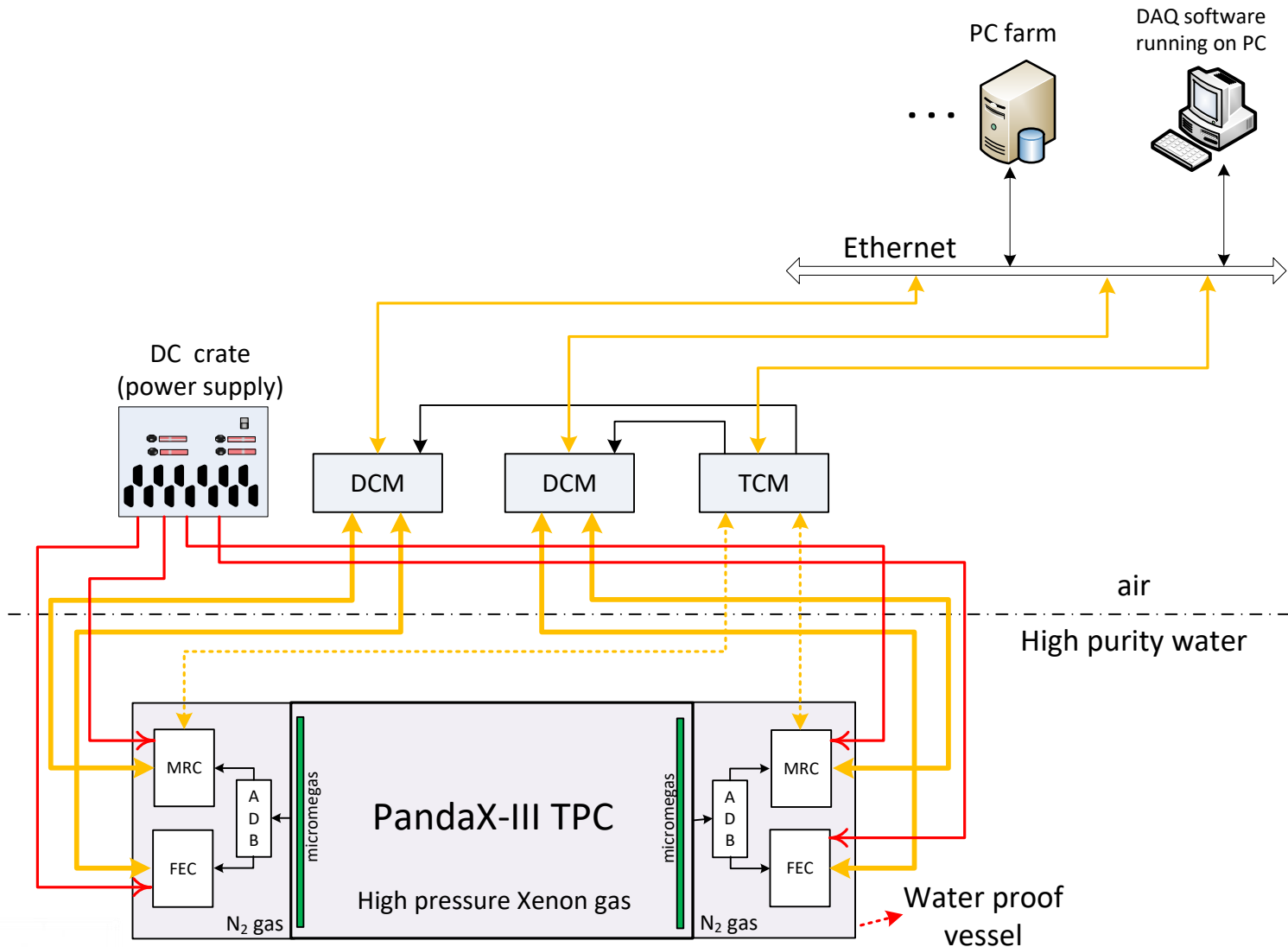
- ❑ 法国Saclay设计的通用TPC读出芯片
- ❑ 通道数：64（每通道512个采样电容）
- ❑ 动态范围: 120fC, 240fC, 1pC, 10pC
- ❑ 达峰时间: 50ns - 1 μ s (16 values)
- ❑ 采样率: 1MHz - 100MHz
- ❑ 读出频率：25MHz

设置：

- 动态范围：1pC
- 采样单元：512
- 采样率：4MHz-5MHz
- ⇒ 时间窗：128 μ s - 102.4 μ s



TPC读出电子学系统设计



TPC读出电子学系统设计

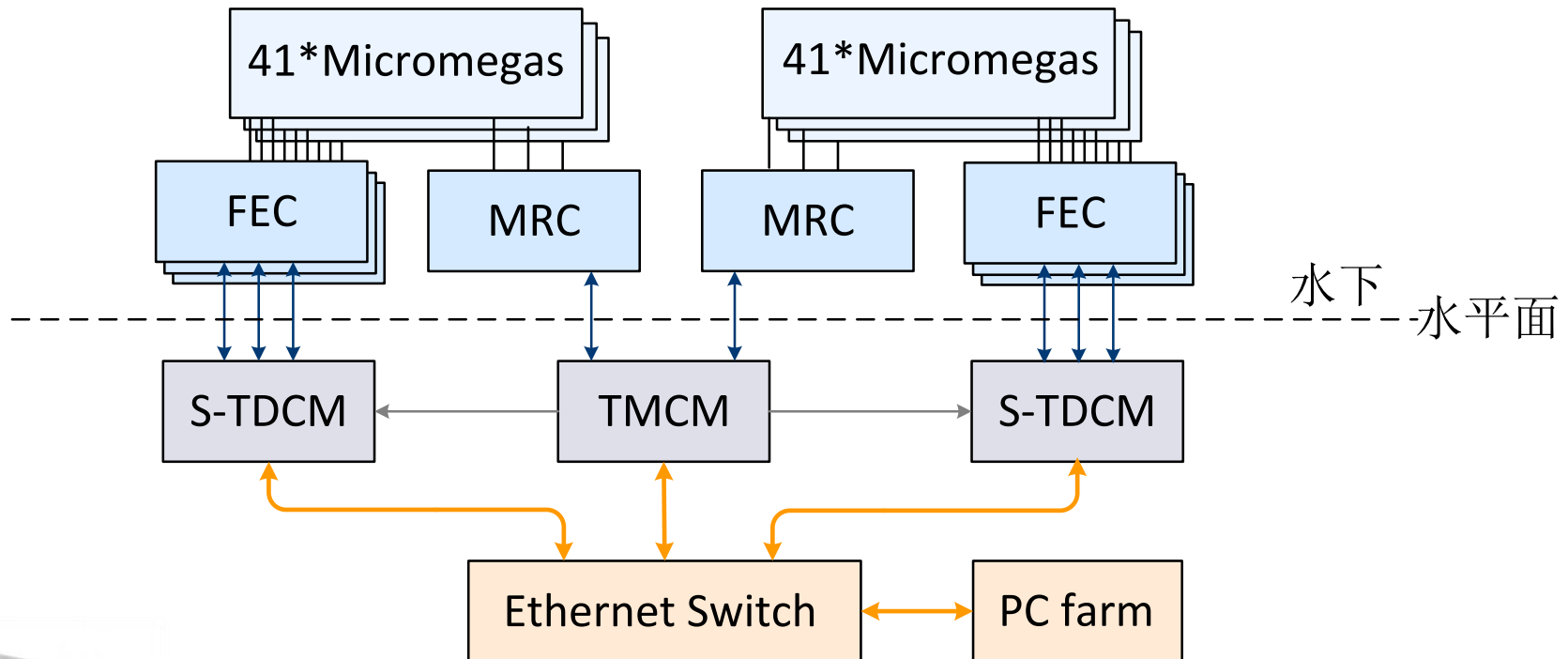
- 自底向上的模块化设计：前端电子学+后端电子学

◆ 前端电子学

- 前端读出板FEC
- 丝网读出板MRC

◆ 后端电子学

- 数据处理模块S-TDCM
- 时钟触发模块TMCM



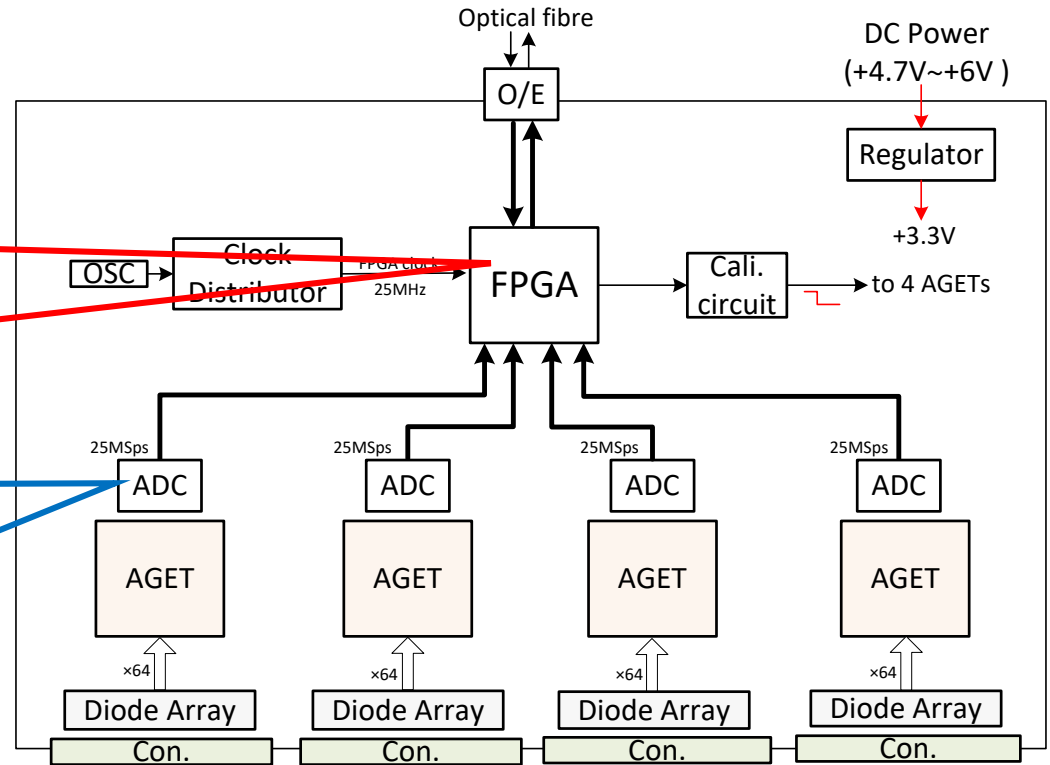
TPC FEC板

Artix-7 XC7A100T

- ❑ 逻辑单元: 101k
- ❑ SRAM: 4.8Mb
- ❑ GTP: 4个

AD9235:

- ❑ 12bit 单通道 ADC
- ❑ 有效位: 11.4 bit
- ❑ 积分非线性: ± 0.7 LSB



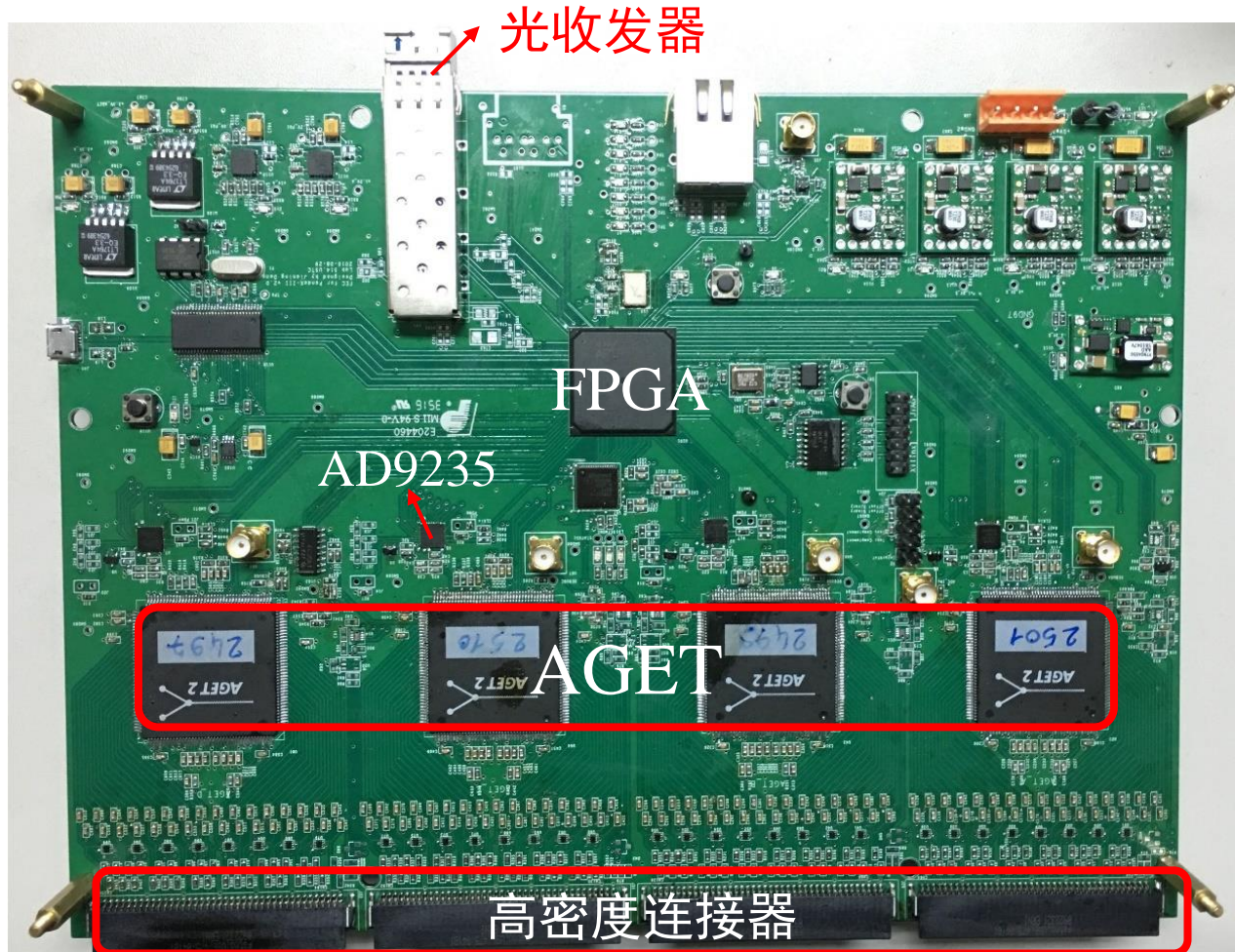
➤ 一块FEC输出通道: 256路, 每一路集成512个SCA单元

➤ 一次事例数据量: 1.57Mb ➤ 事例率: 10Hz

⇒ 数据率: $256 * 512 * 12\text{bit} * 10\text{Hz} = 15.7\text{Mbps}$



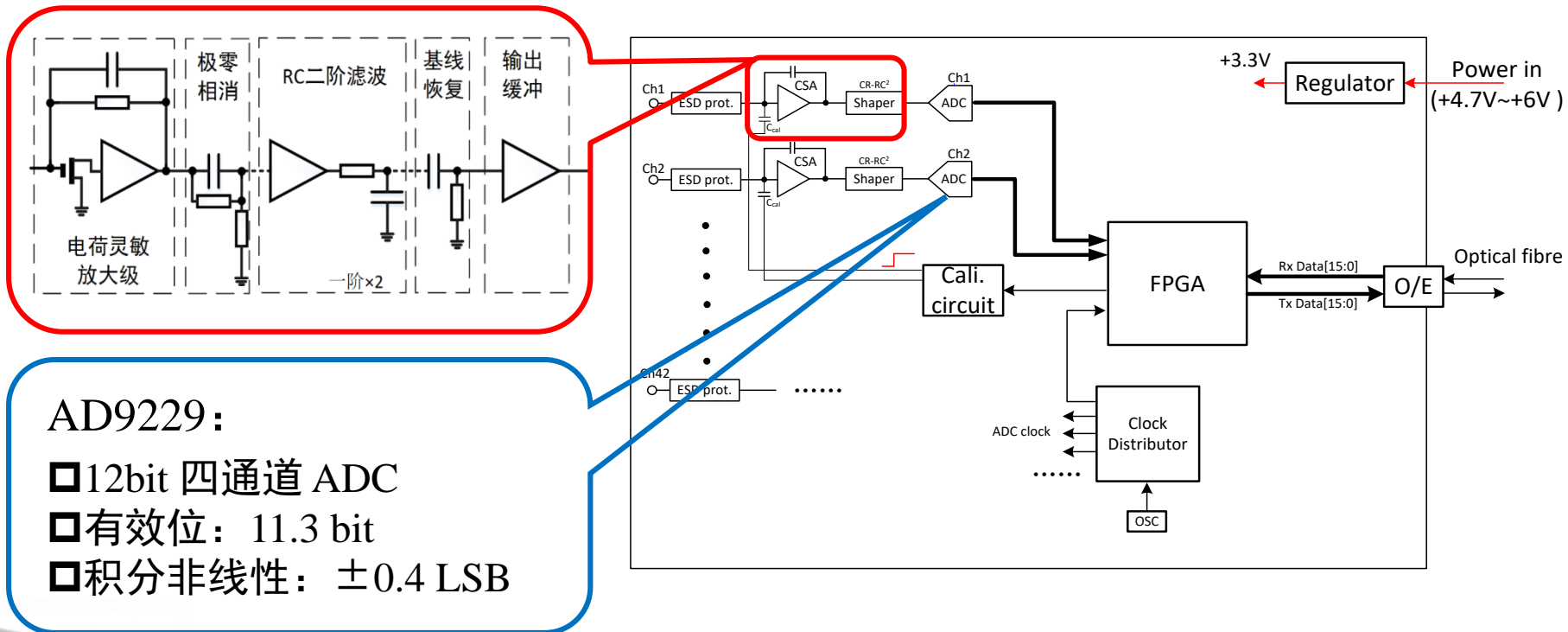
TPC FEC板



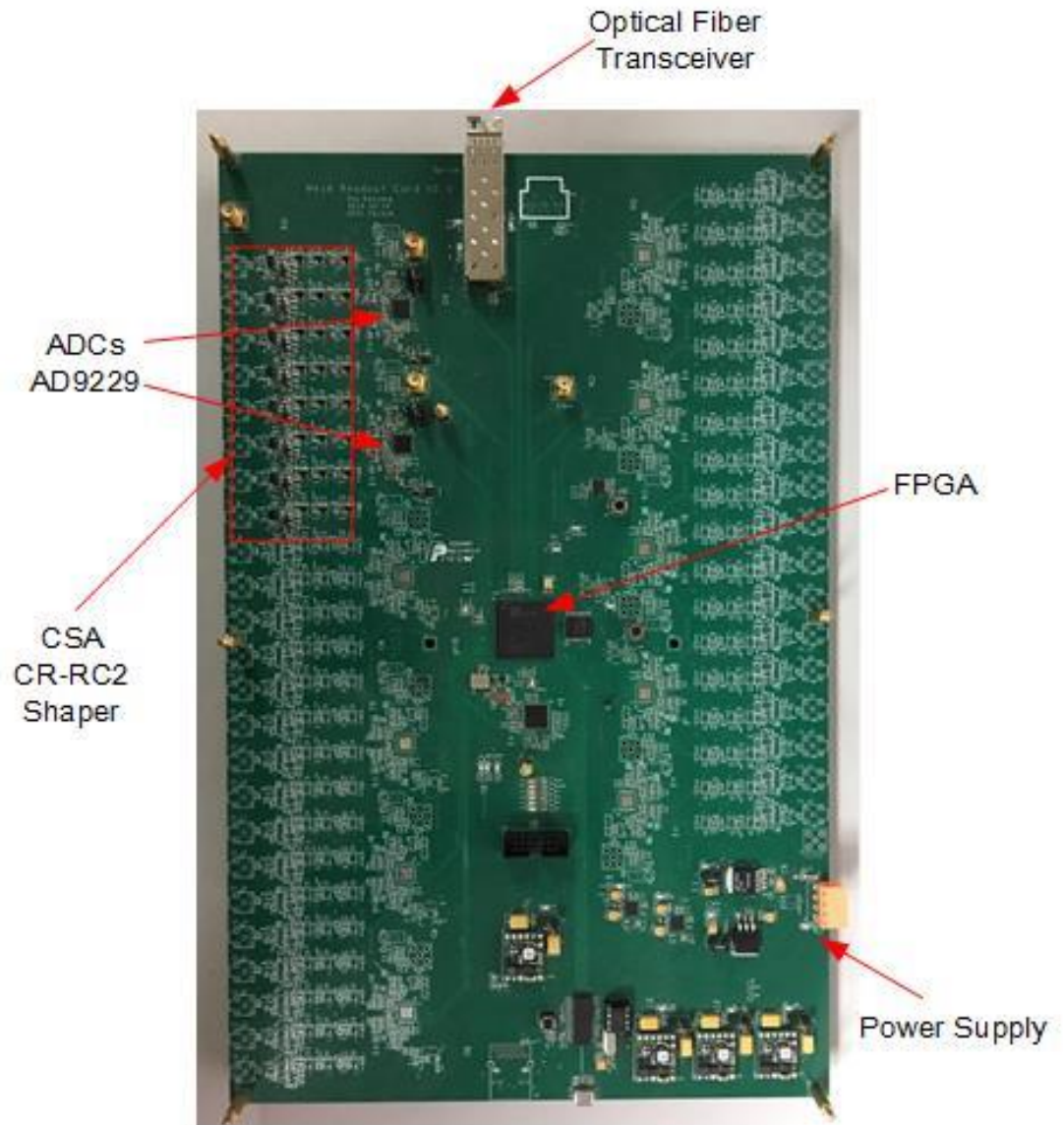
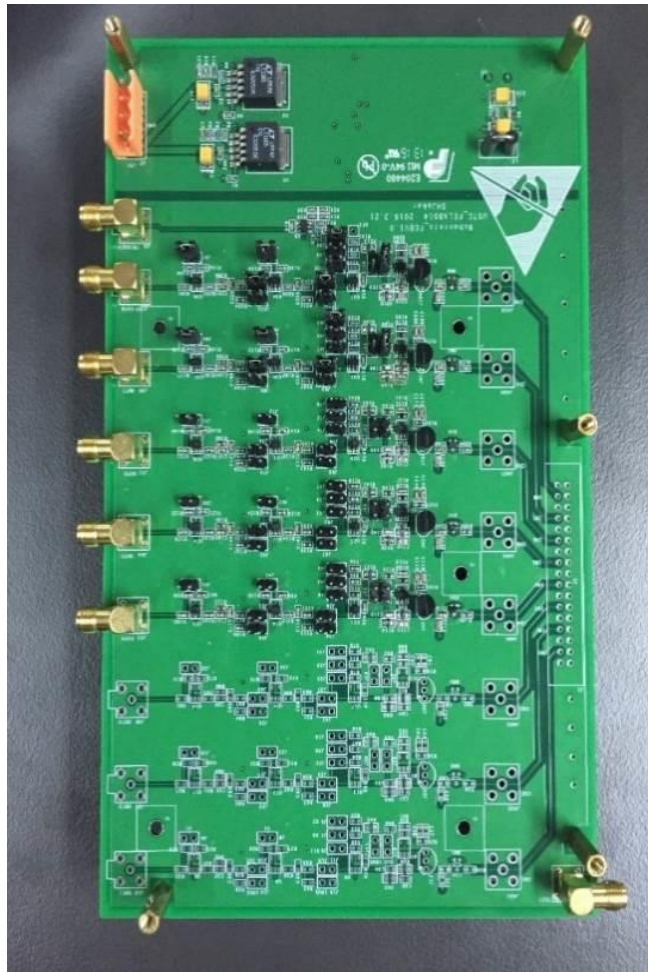
TPC MRC板

◆ 丝网读出板MRC (Mesh Readout Card):

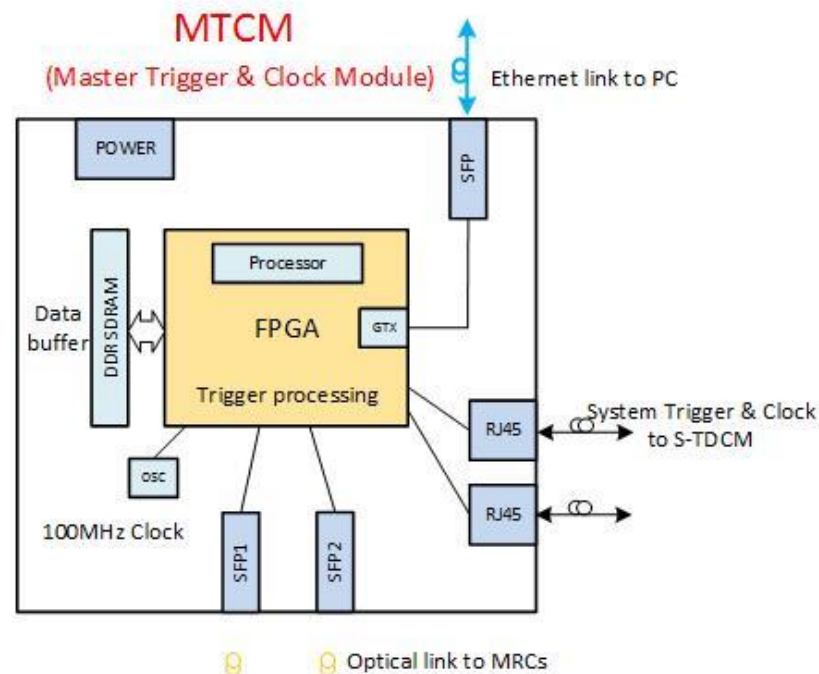
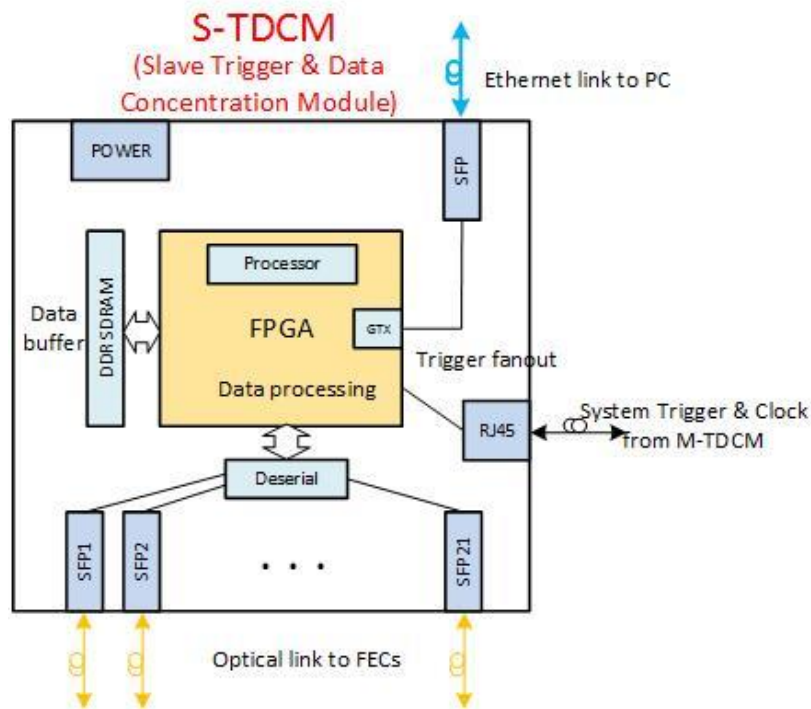
- 基于分立元件，对Micromegas的丝网信号进行读出
- 每块MRC 42通道，TPC每端需1块MRC，两端共需2块MRC



TPC MRC板



◆ 数据处理模块 (S-TDCM) 和时钟触发模块 (MTCM)



- 汇总FEC板实验数据并进行处理
- 负责对FEC板分发时钟、触发命令等

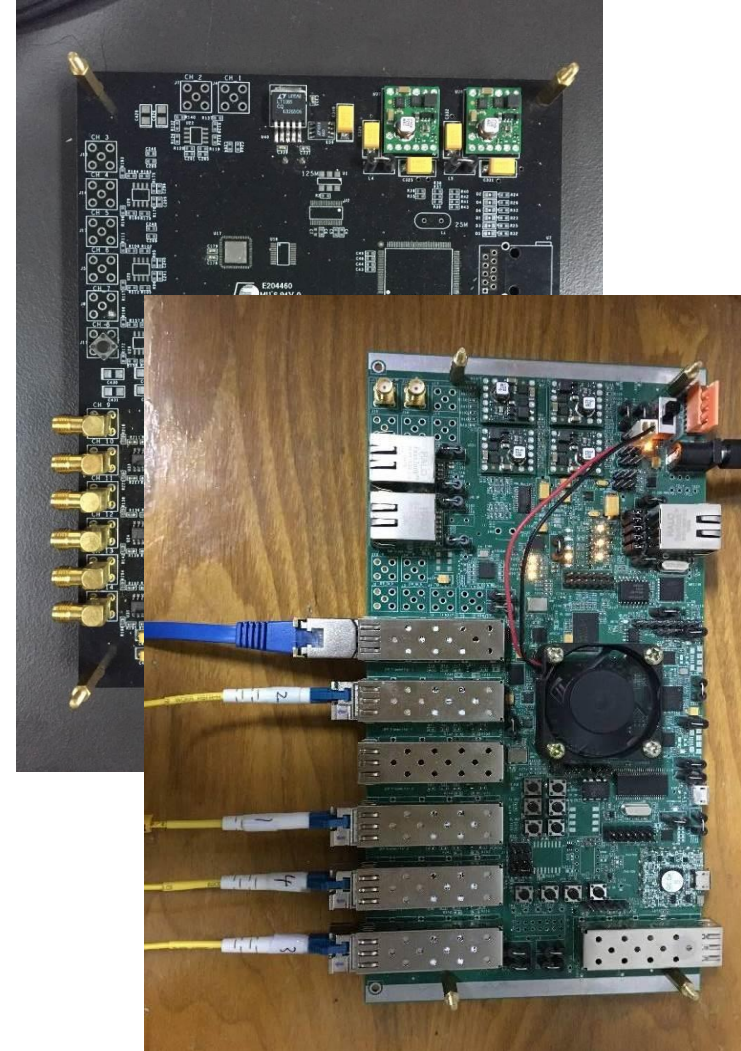
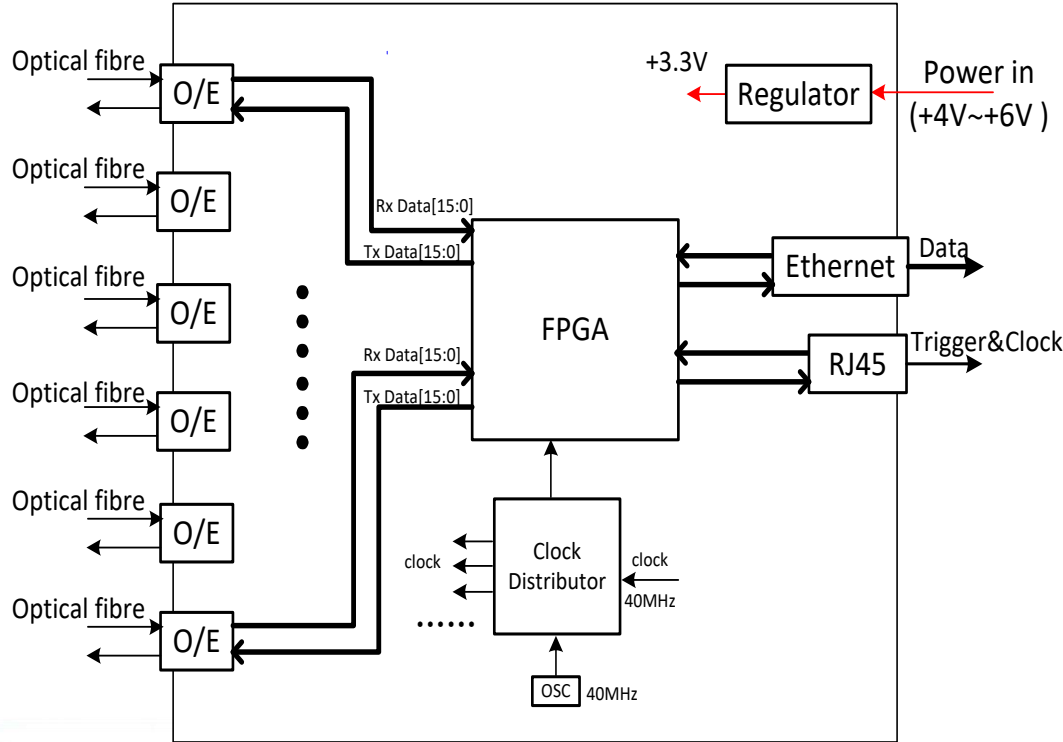
- 产生系统同步时钟
- 接收MRC板的触发信息，产生系统总触发并分发给S-TDCM



TPC DAQ板

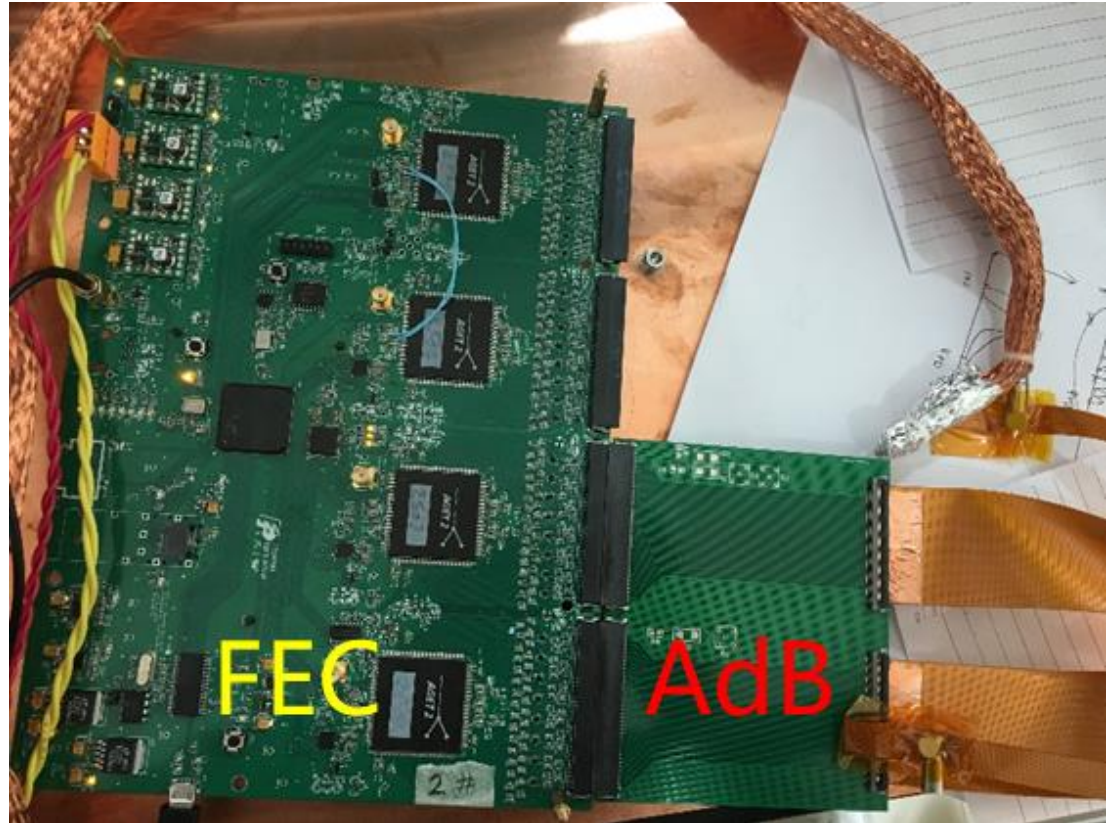
◆ 数据获取板DAQ：集成S-TDCM和MTCM的部分功能

- 6个光纤接口——连接4块FEC和1块MRC
- 通过千兆以太网与PC相连





SMA→高密连接器转接板



探测器→FEC转接板



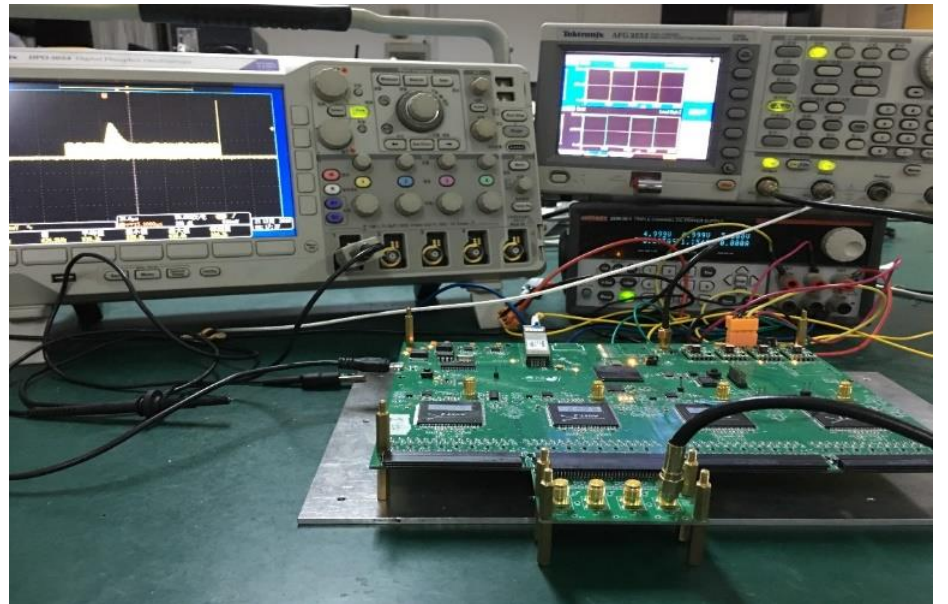
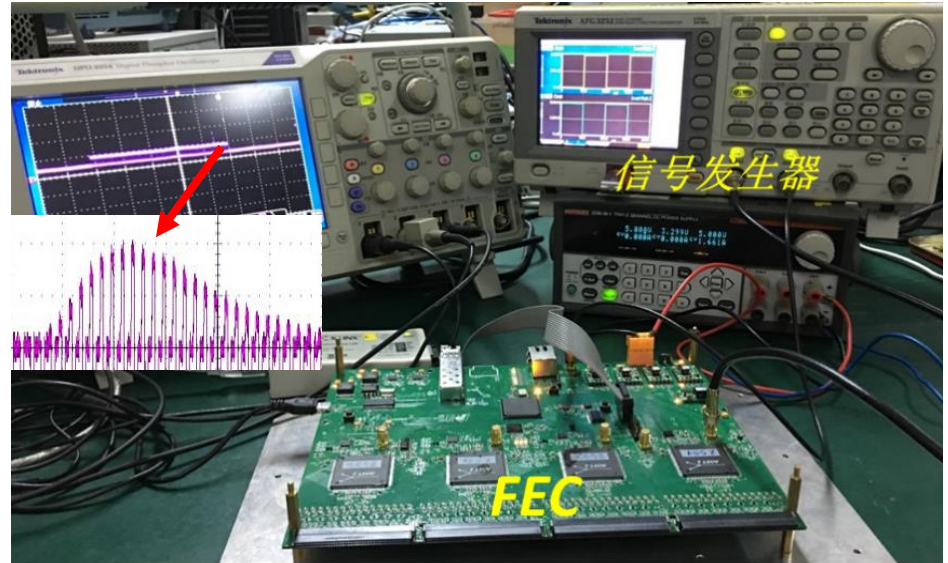
TPC电子学测试



- ◆ 复制完成4块FEC+1块MRC
- ◆ 实现1024路+8路通道的读出
- ◆ 所有通道均工作正常

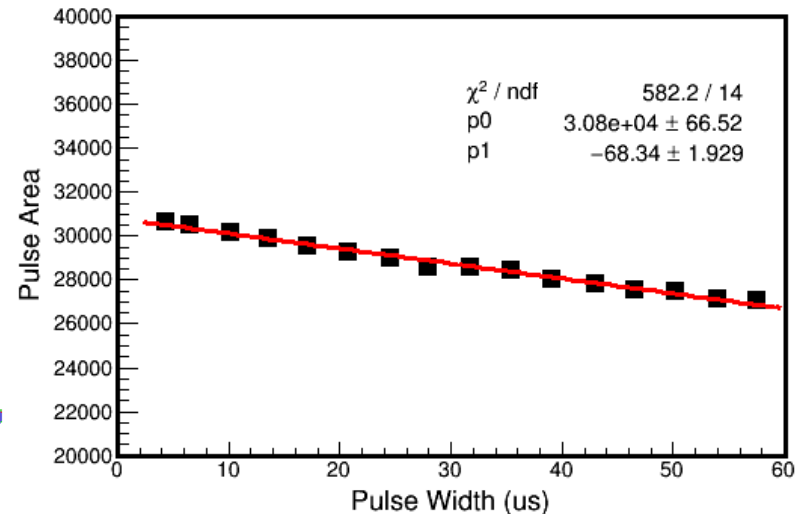
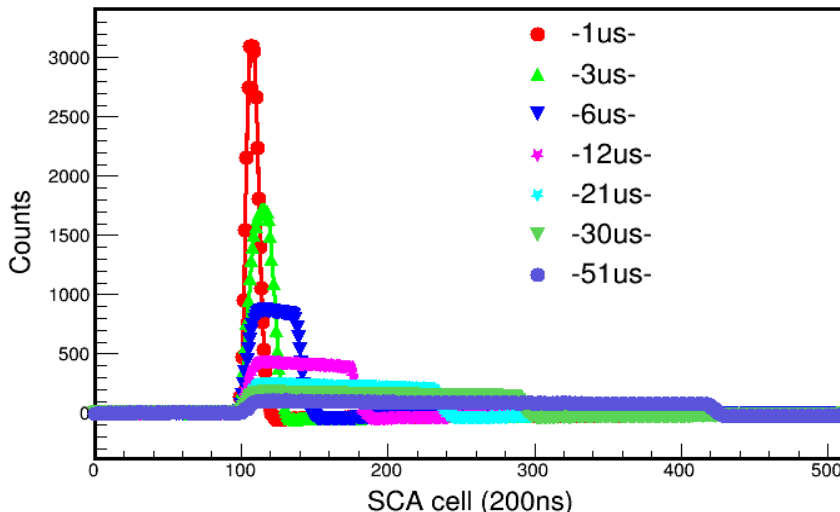
□ 要求：

- ✓ 基线噪声： $< 6fC$
- ✓ 积分非线性： $< 3.2\%$
- ✓ 增益非均匀性： $< 2\%$



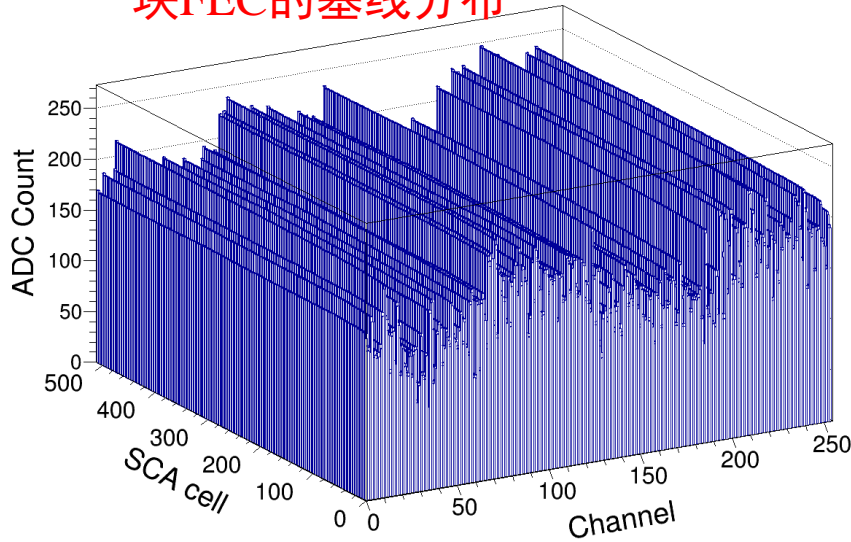
TPC FEC宽脉冲响应

- ◆ FEC的输入信号由信号发生器提供
- ◆ 固定输入电荷量，改变输入脉冲的宽度
 - FEC板对宽脉冲的响应与预期基本相符
 - 输入脉冲越宽，其输出波形的面积越小（面积亏损）
 - ✓ 初步修正，不同宽度脉冲之间的面积误差约0.9%
 - ✓ 一次事例击中多根读出条，总测量误差小于0.3%

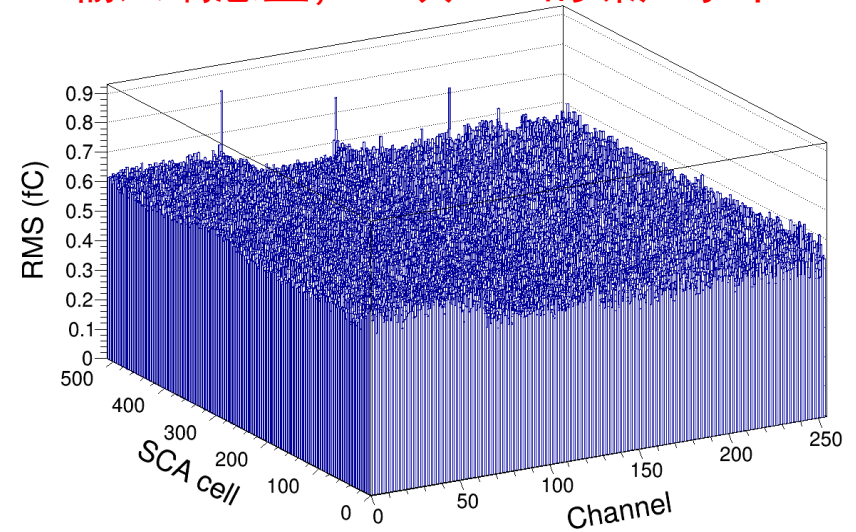


TPC FEC噪声

一块FEC的基线分布



输入端悬空，一块FEC的噪声水平

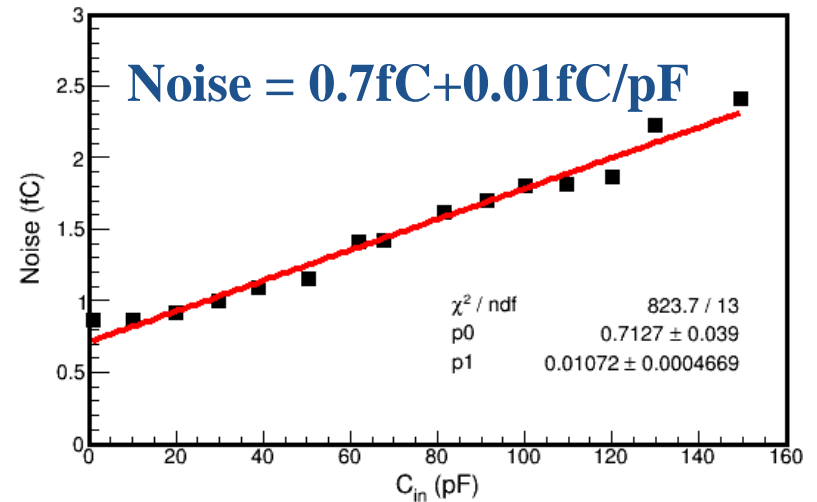


◆ 输入端悬空

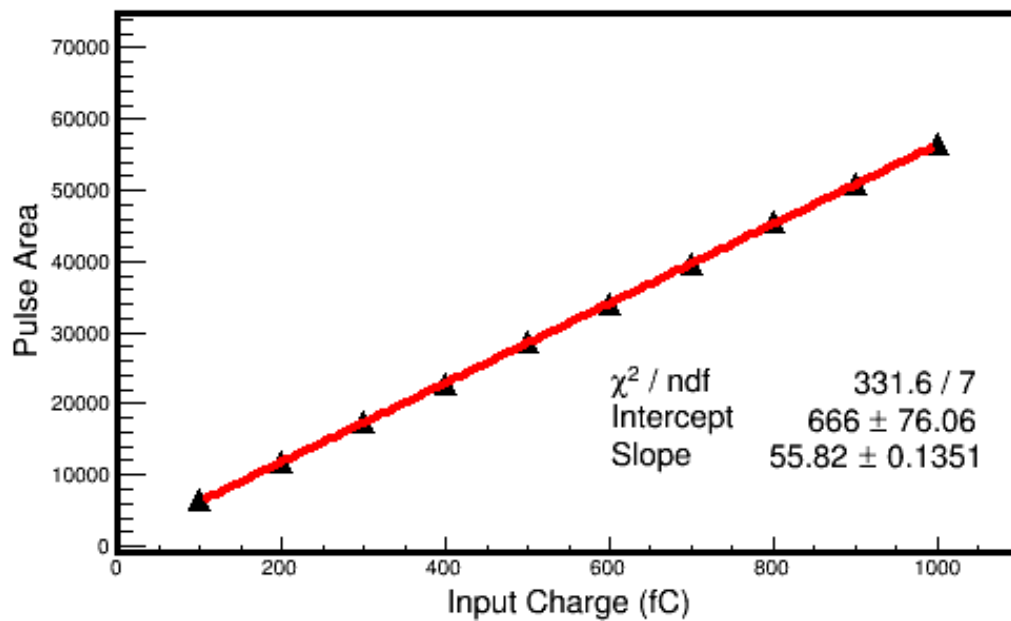
- ✓ 噪声 $< 0.9\text{fC}$ (RMS)

◆ 输入端接探测器

- ✓ 噪声: $0.7\text{fC} + 0.01\text{fC/pF}$
- ✓ 噪声 $< 1.7\text{fC}$ ($C_{\text{in}} < 100\text{pF}$)
- ✓ 设计指标: 6fC

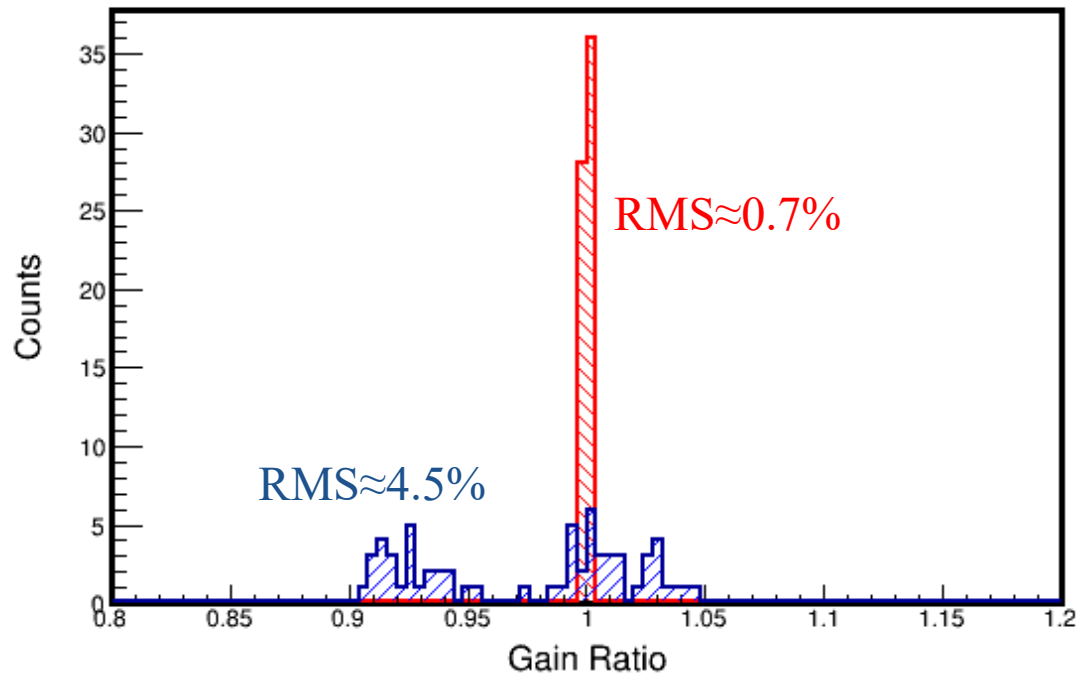


- ◆ FEC的输入信号由信号发生器提供
- ◆ 改变输入脉冲的幅度，从而得到每路通道的输入输出曲线
 - ✓ 积分非线性： $< 2\%$ （设计指标： 3.2% ）

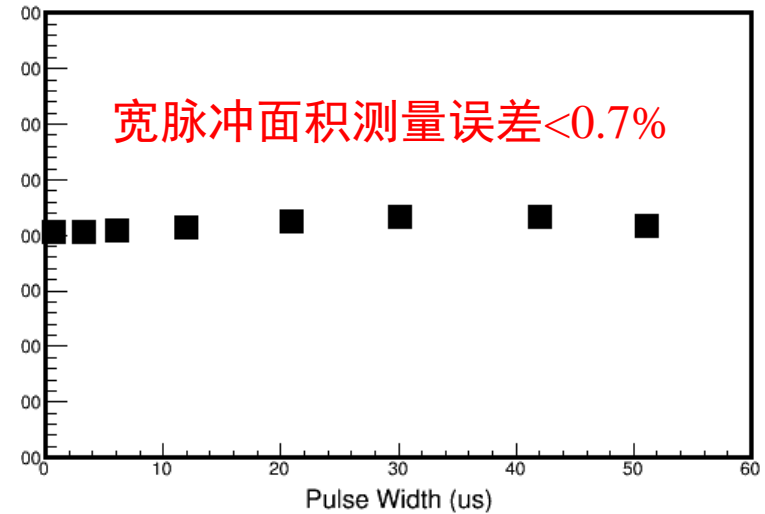
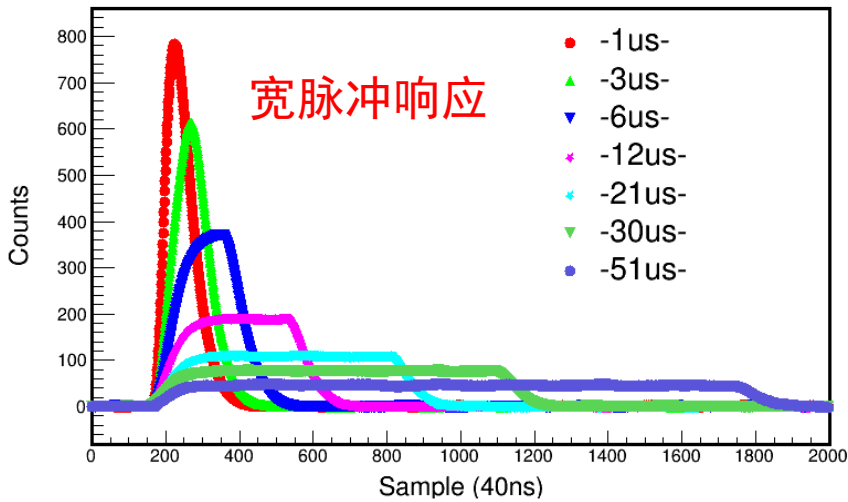
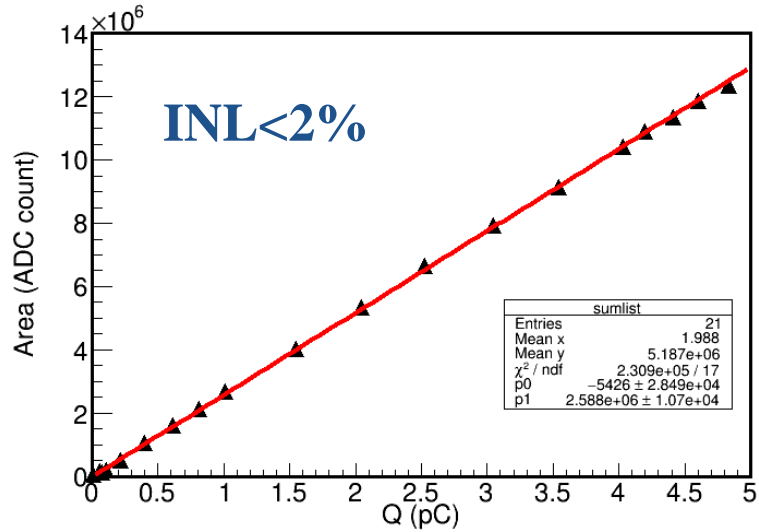
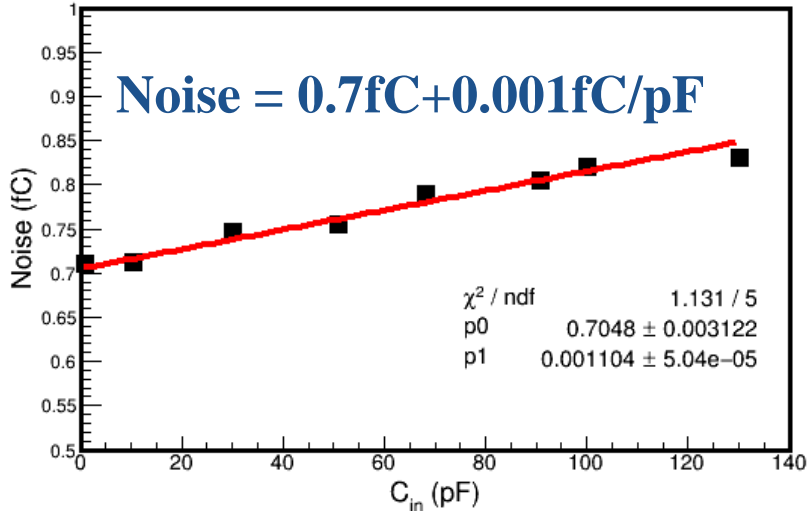


◆ FEC的输入信号由信号发生器提供

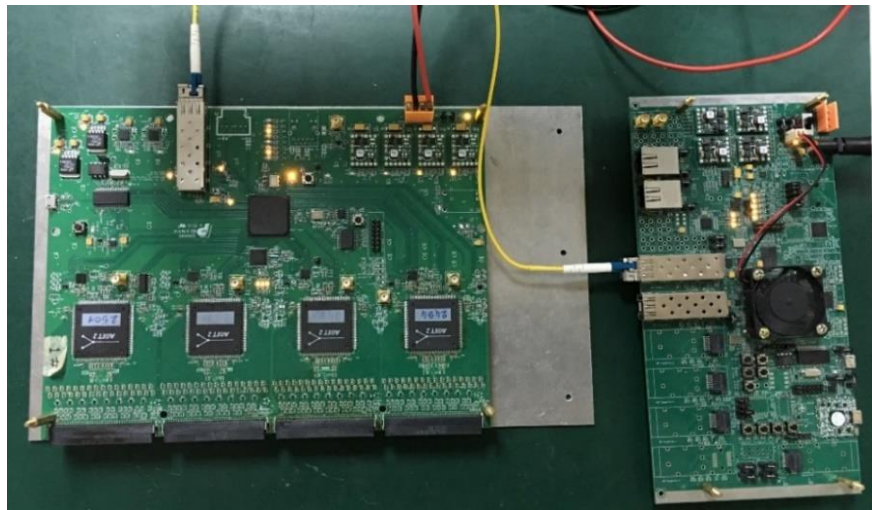
- ✓ 不同通道之间的增益相差较大，可以通过标定进行修正
- ✓ 增益的非均匀性： $\sim 0.7\%$ （设计指标：2%）



TPC MRC相关测试

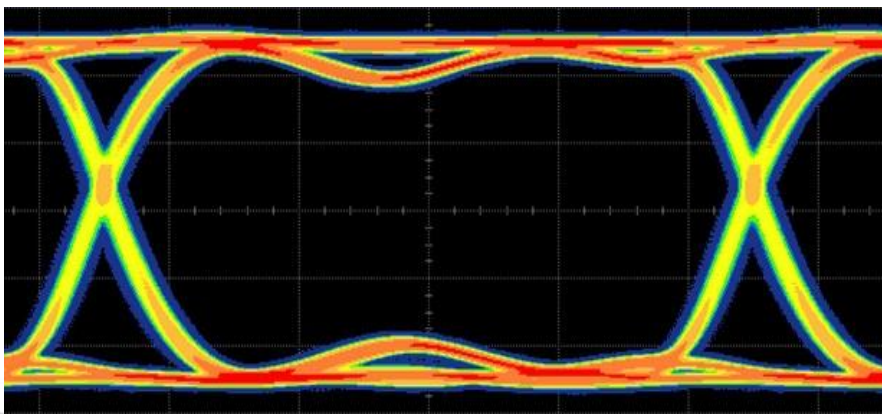


TPC DAQ板测试

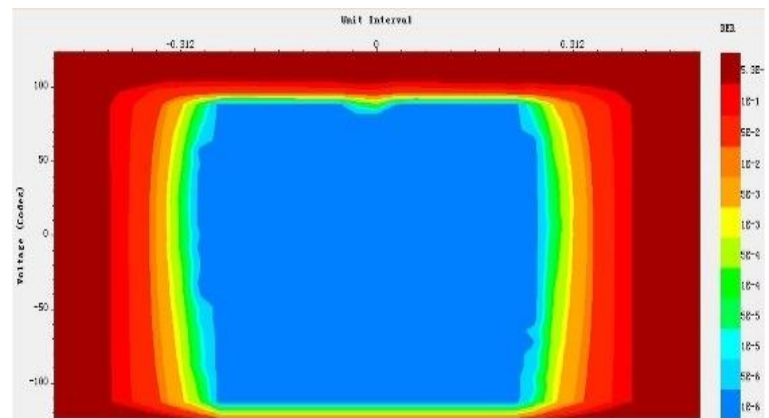


- ◆ 误码率：FEC板产生PRBS7测试码→DAQ
 - ✓ 误码率小于 10^{-14}
- ◆ 以太网传输：DAQ板产生数据→服务器
 - ✓ 有效数据率~700Mbps

◆ 示波器眼图测试



◆ IBERT误码率分析



TPC读出电子学联调



- ◆ 4块FEC板+1块MRC板+1块DAQ板
- ◆ 系统触发率可达280Hz（信号源产生）
 - ✓ 好于10Hz要求

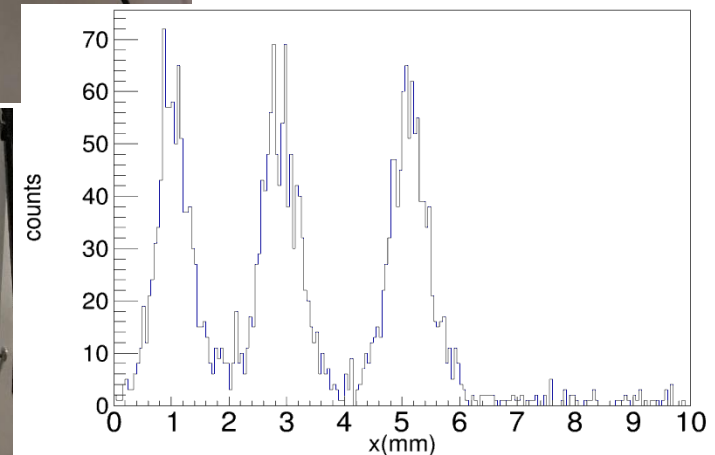
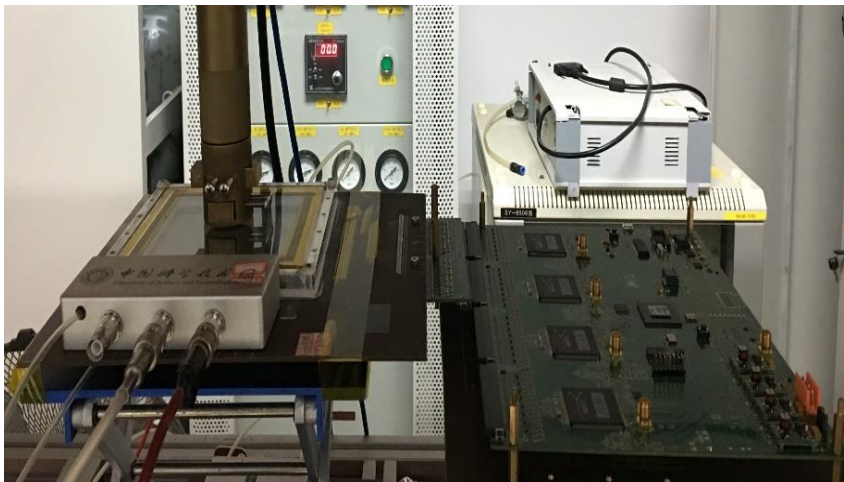
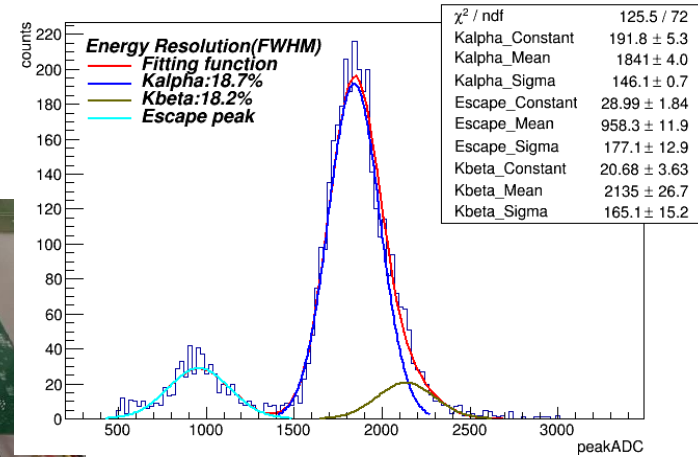
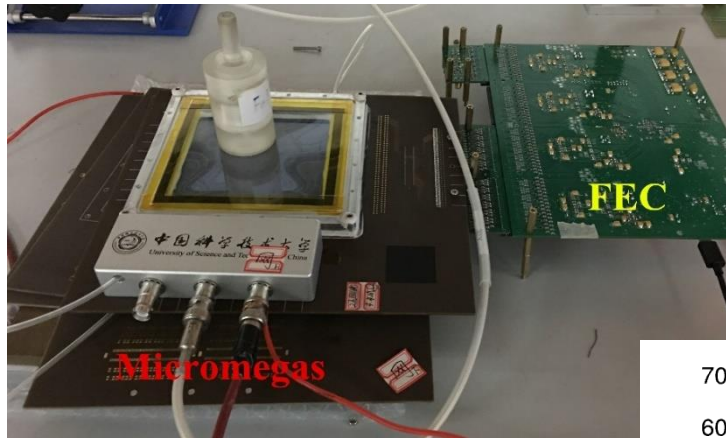


TPC读出电子学与探测器联调

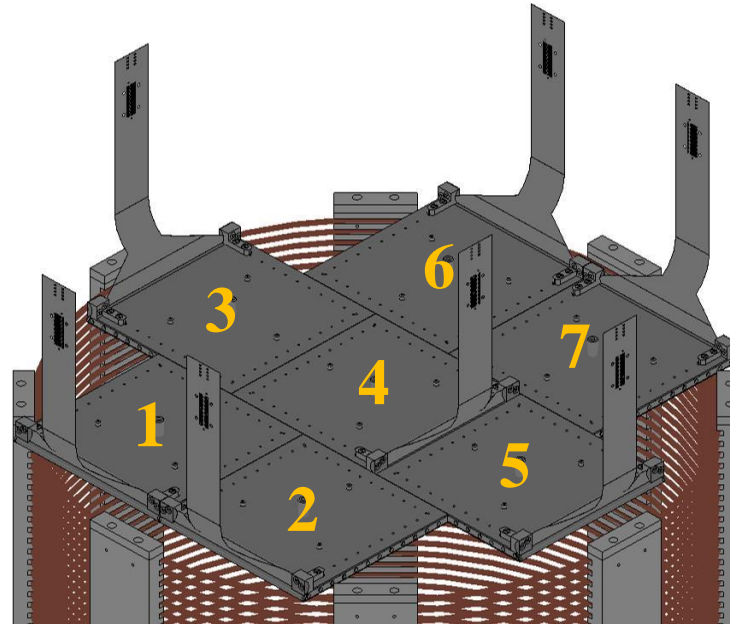
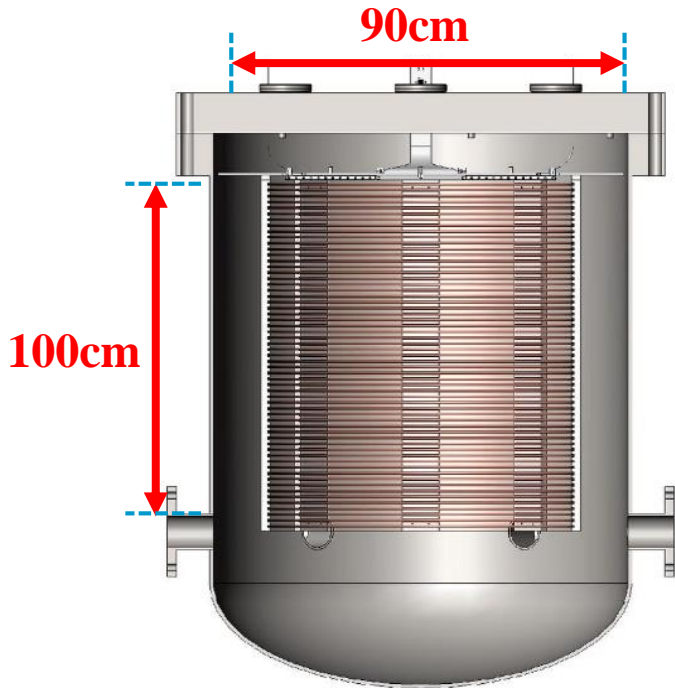
● 四角读出阻性Micromegas

□ 读出：角信号+阳极条信号

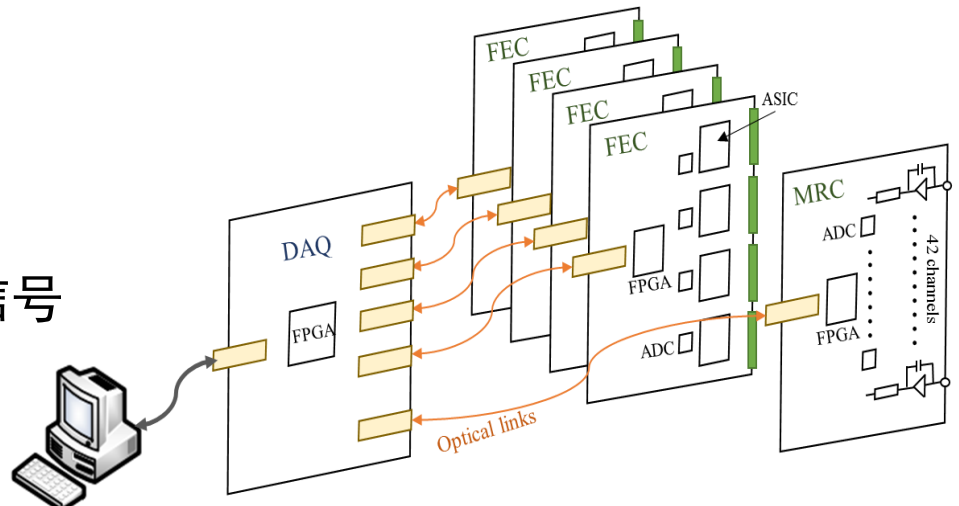
□ 放射源： ^{55}Fe



TPC原型小系统联调

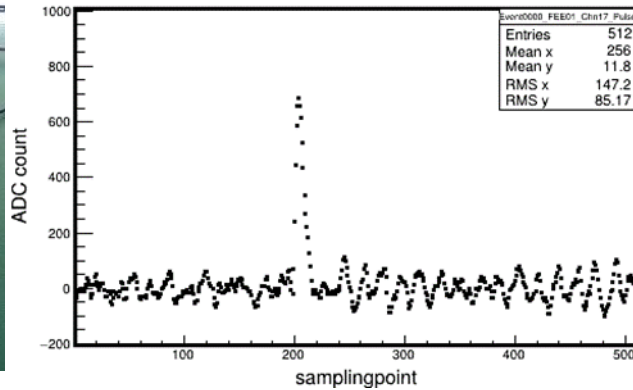
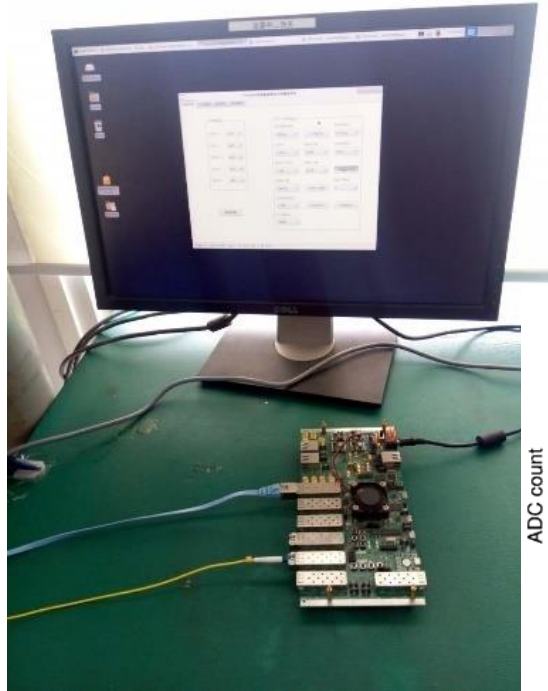


- ◆ 40kg原型时间投影室
- ◆ 端盖读出集成7块Micromegas
 - 896路阳极条信号+7路丝网信号

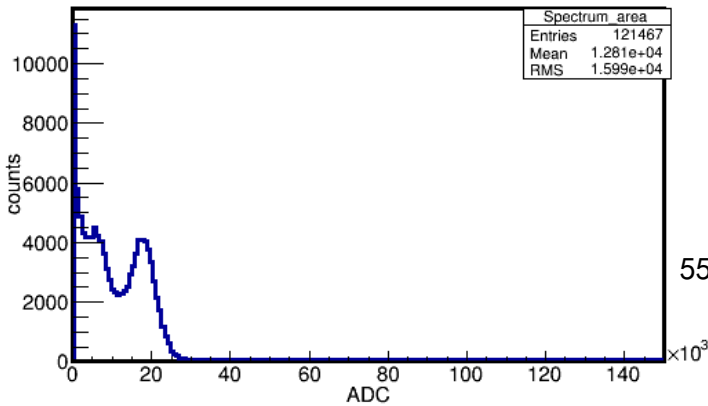


TPC原型小系统联调

◆ 2017年1月、6月



读出通道的典型波形



^{55}Fe 中5.9keV的X射线能谱





高压气氙TPC读出方向小结

参数	任务书指标	第一年目标	现阶段成果	结果
通道数	>6000路	256路	1024路	好于任务书要求
积分非线性	小于2%	小于2%	小于2%	达到任务书要求
噪声	小于10fC	小于10fC	小于6fC	好于任务书要求
系统触发率	>10Hz	>10Hz	>280Hz	好于任务书要求

◆ 任务书成果要求：

➤ 实物

- FEC 5块 + MRC 1块 + DAQ 1块
- 1280路

✓

➤ 方案设计报告

- 读出电子学方案设计报告Ver1.0

✓

➤ 测试报告

- 原型电路测试报告Ver1.0

✓





高压气氙TPC读出方向科研产出

1. Li C, Liu S, Feng C, et al. Design of the FPGA-based Gigabit Serial Link for PandaX-III Prototype TPC[J], Radiation Detection Technology and Methods (已接收) ;
2. 董家宁, PandaX-III实验前端读出电子学方法研究, 中国科学技术大学博士学位论文;
3. 董家宁, PandaX-III TPC Micromegas 前端读出电子学设计进展, 第六届全国微结构气体探测器研讨会, 2016年11月, 北京;
4. 李诚, PandaX-III TPC Micromegas数据读出电子学设计进展, 第六届全国微结构气体探测器研讨会, 2016年11月, 北京;
5. 朱丹阳, PandaX-III TPC MicroMegas Mesh读出电子学设计进展, 第六届全国微结构气体探测器研讨会, 2016年11月, 北京;
6. 董家宁, PandaX-III读出电子学设计, 第十二届全国粒子物理学学术会议, 2016年8月, 合肥;
7. 李诚, Design of the FPGA-based Gigabit Serial Link for PandaX-III Prototype TPC, The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 conference, 2017年5月, 北京;
8. 封常青, Progress of PandaX-III readout electronics, The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017 conference, 2017年5月, 北京



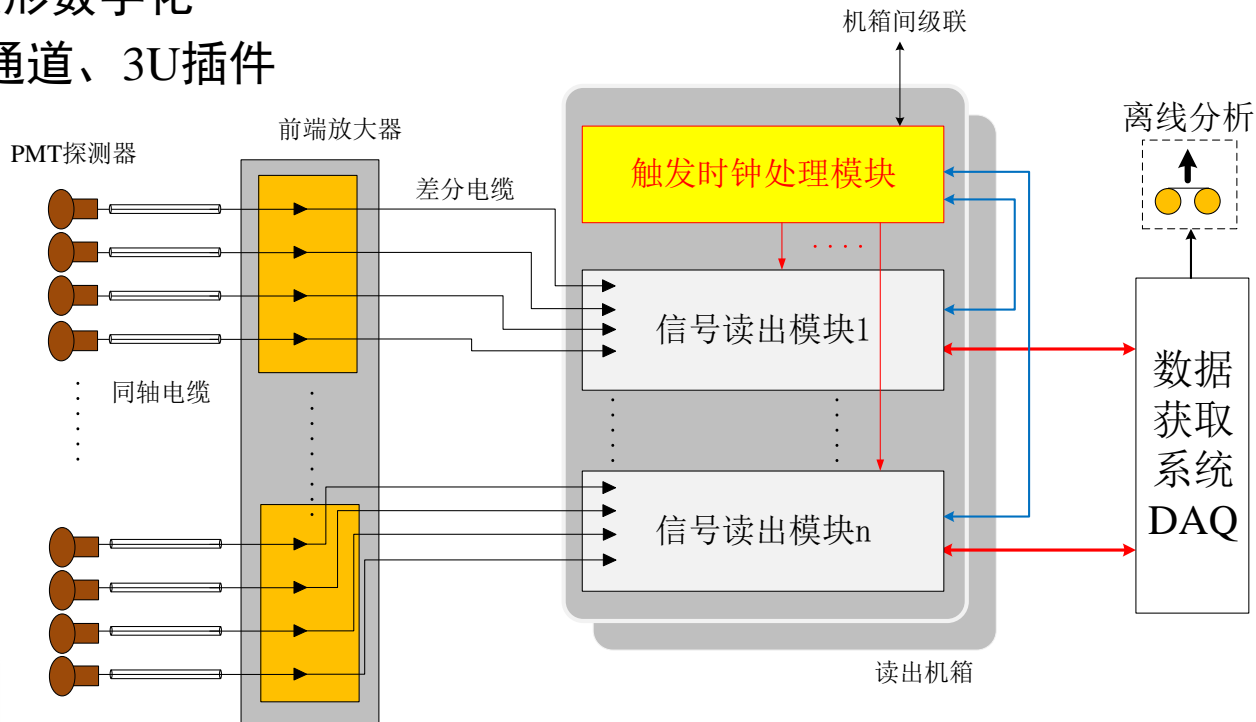
液氦探测器读出方向

- 波形数字化芯片选型
 - 14bit@1GSPS双通道AD9680
- 电子学系统设计
 - 前放
 - 前端数字化模块
 - 时钟及触发处理模块
 -
- 波形数字化原型模块性能测试
 - 实验室测试
 - 探测器联调

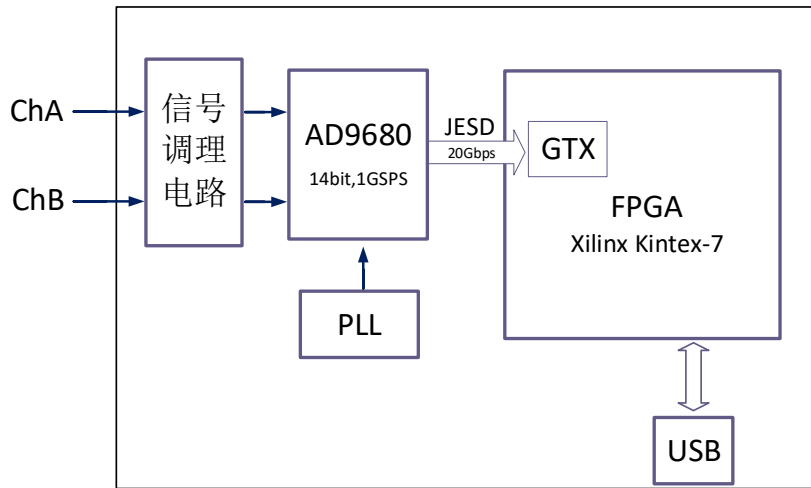


液氩探测器读出电子学系统设计

- 低噪声前放
 - 平衡3吋、8吋PMT输出
 - 驱动长电缆
- 前端数字化模块 (FDM)
 - 实现PMT信号的14bit@1GSPS波形数字化
 - 4通道、3U插件
- 时钟及触发处理模块
 - 保证数据读出的灵活、稳定可靠
 - 主从机箱
- 新型PXIe机箱平台
 - 保证数据读出的灵活、稳定可靠
 - 主从机箱

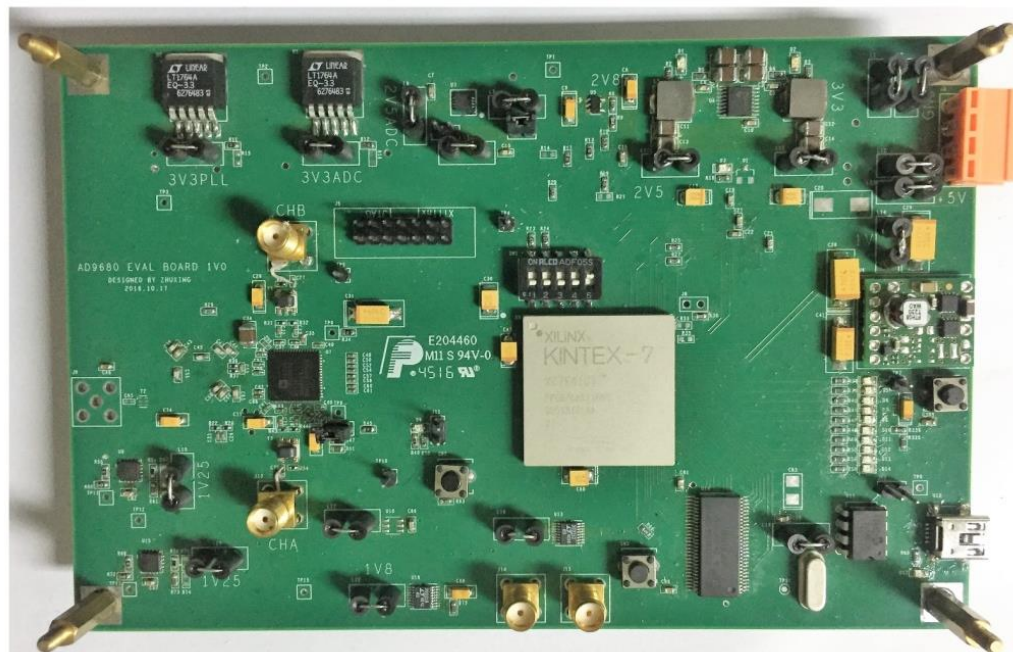


FDM原型设计

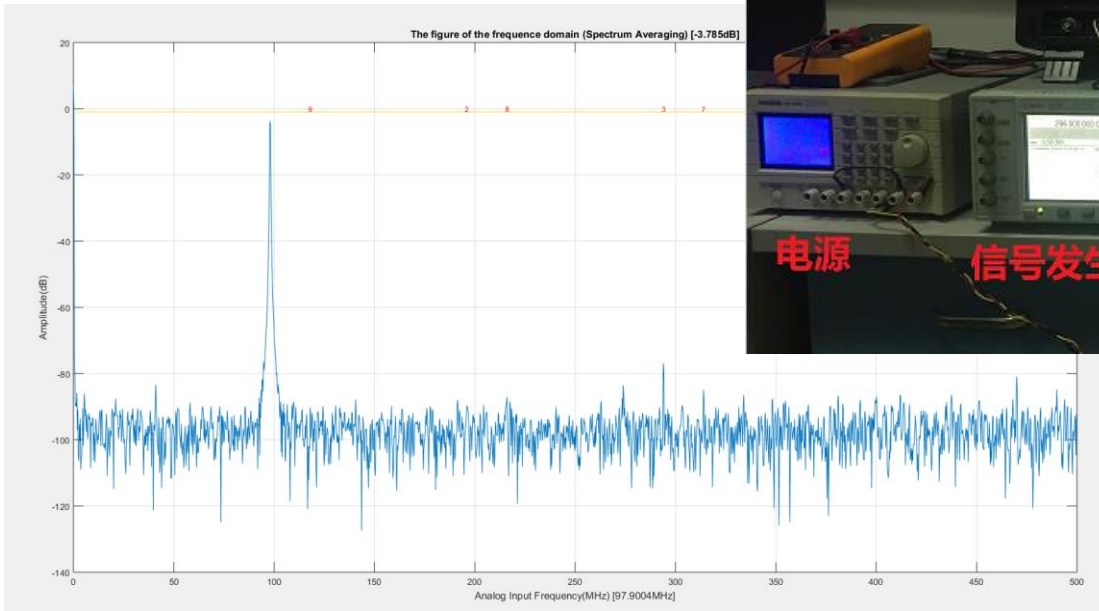


● AD9680

- 14bit@1GSPS
- 双通道
- JESD204B接口



有效位测试

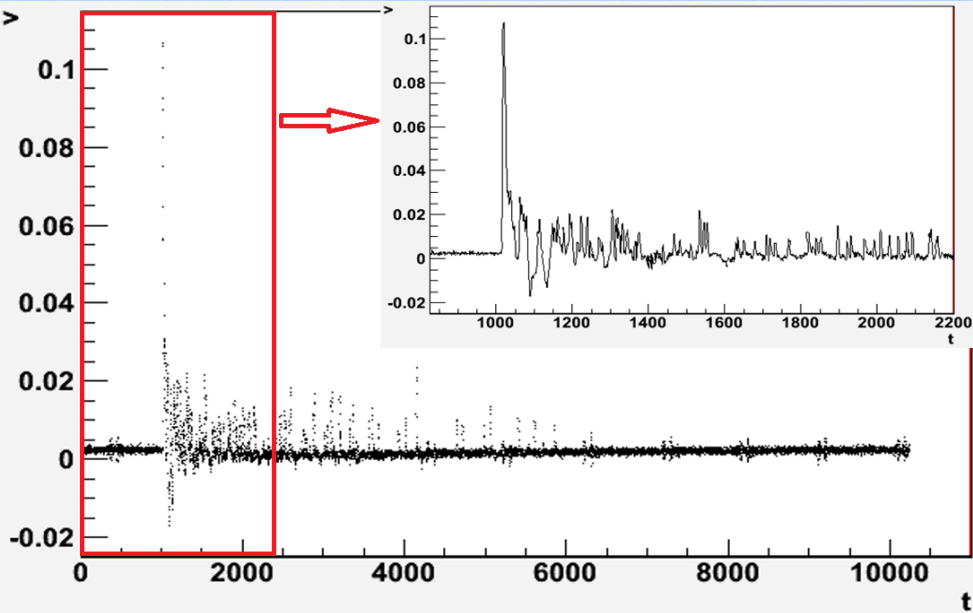


◆ ENOB > 9.5bit

频率/MHz	30.5	98	175	298	378	488
有效位/bit	10.35	10.57	10.18	9.75	9.97	9.91

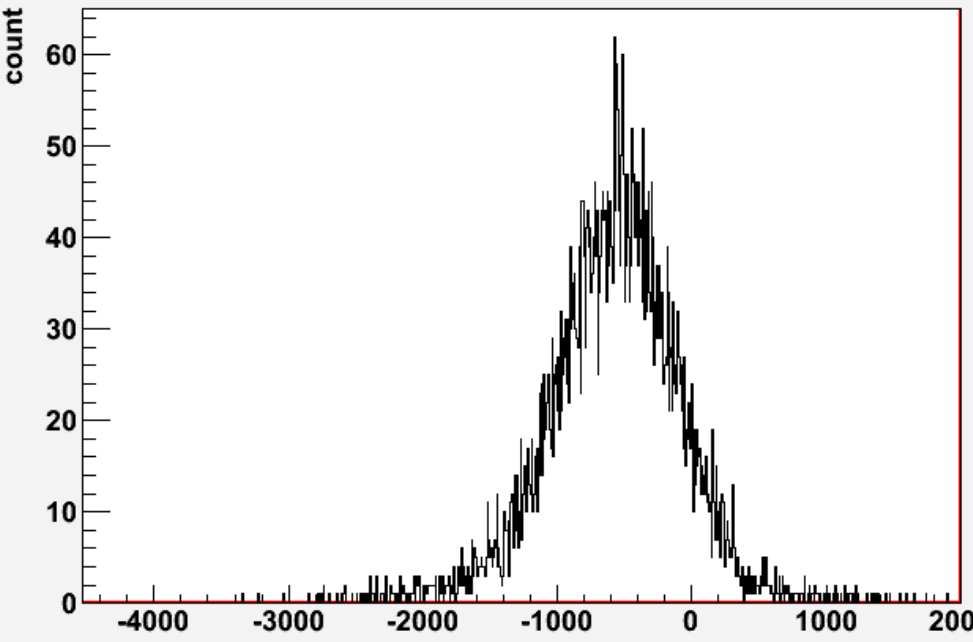


液氦探测器联调



← Na-22事例信号波形

↙ Na-22能谱





液氦探测器读出方向小结

指标	阶段目标	原型电路指标	阶段目标完成度
通道数	2	2	达到任务书指标
采样精度	12位	14位	好于任务书指标
采样率	500MSPS	1GSPS	好于任务书指标
模拟带宽	0-200MHz	大于0-300MHz	好于任务书指标
动态范围	200倍 (5pC-1nC)	>200倍	达到任务书指标

◆ 任务书成果要求：

- 实物 ✓
 - FDM原型电路
 - 2路
- 方案设计报告 ✓
 - 读出电子学原型设计报告Ver1.0
- 测试报告 ✓
 - 原型电路测试报告Ver1.0



1

研究方向

2

年度进展

3

经费使用

4

后续计划





经费执行

预算科目名称	专项经费	已到位	已支出
直接费用总额	726.40	524.16	95.59
1、设备费	34.53	24.92	4.23
(1) 购置设备费	34.53	24.92	4.23
(2) 研制设备费	0.00	0.00	0.00
(3) 设备改造与租赁费	0.00	0.00	0.00
2、材料费	342.44	247.10	77.05
3、测试化验加工及计算分析费	90.15	65.05	0.75
4、燃料动力费	46.32	33.42	0.00
5、差旅费	80.00	57.73	6.36
6、会议费	10.00	7.22	0.00
7、国际合作与交流费	50.00	36.08	0.00
8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	14.96	10.79	0.00
9、劳务费	53.00	38.24	7.20
10、专家咨询费	5.00	3.61	0.00
11、其他支出	0.00	0.00	0.00





经费使用说明

1. 设备费： ¥ 4.23万
 - 采购Wiener NIM 600LCE一套
 - 即将采购NI PXIe机箱及零槽控制器2套、SRS机箱

2. 材料费： ¥ 77.05万
 - AGET 200片， 72.07万
 - 其他芯片， 4.98万

3. 加工费： ¥ 0.75万
 - 各型电路板制板、焊接

4. 差旅费： ¥ 6.36万
 - 北京、上海联调、讨论

5. 劳务费： ¥ 7.20万
 - 研究生助研费/劳务、外聘/退休教工劳务

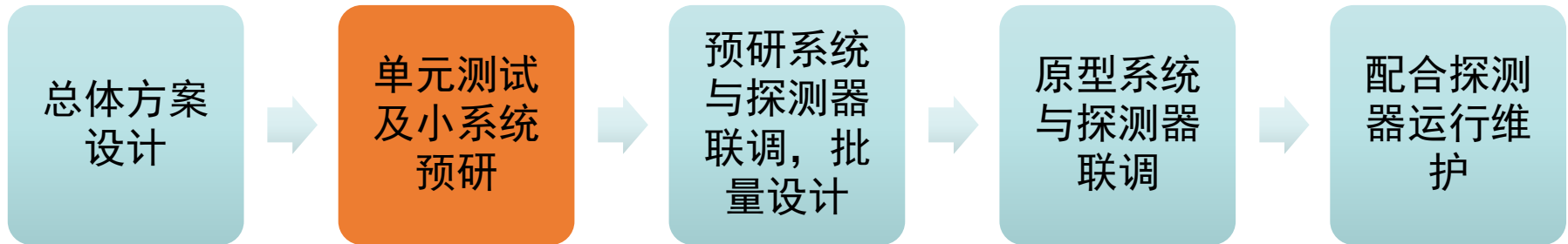


- 1 研究方向
- 2 年度进展
- 3 经费使用
- 4 后续计划





研究计划



中期检查（2018.06）：

完成小系统（气氙：1000通道/液氙：8通道）预研、测试以及与探测器模块的联调

课题结题（2021.06）：

完成原型系统（200公斤高压气氙TPC——10,496通道、吨量级液氙探测器——100通道）研制，并与探测器联调、运行获取实验数据



- 高压气氙TPC方向
 - 完善与原型小系统探测器联调（2017.10）
 - FEC、DAQ与S-TDCM互通联调（2017年底）
 - 开展MTCM模块设计
 - 根据材料低本底研究，开展FEC、MRC复制
- 液氙探测器方向
 - 开展前置放大器原型设计
 - 开展基于PXIe平台的4通道FDM设计
 - 开展时钟与触发处理模块原型设计





感谢各位专家
聆听并指导!

