



基于MPGD的时间投影室 读出电子学及系统应用

封常青

中国科学技术大学

核探测与核电子学国家重点实验室

2023-10-14 北京

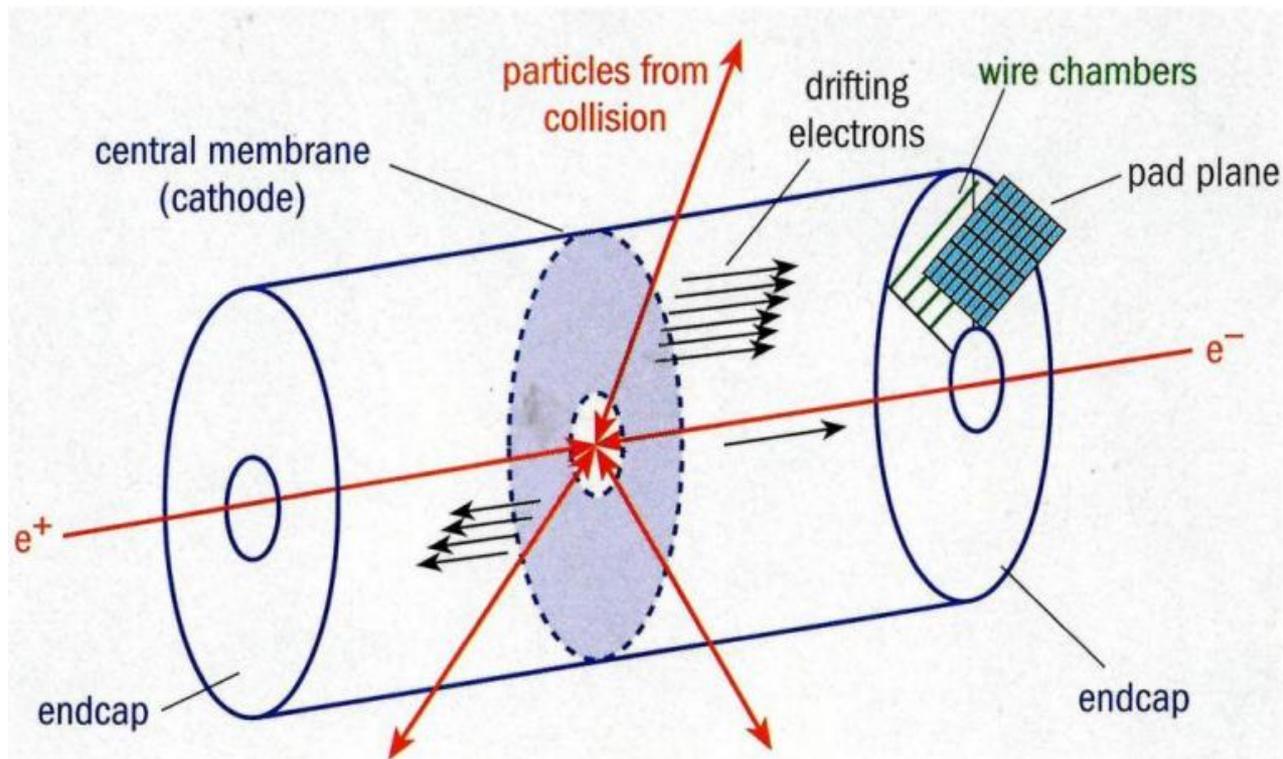
内容提要

- **MPGD-TPC及其读出需求**
- **PandaX-III读出电子学**
- **CSNS Back-n MTPC读出电子学**
- **TPC通用电子学及典型应用**
 - 高分辨宇宙线缪子成像应用
 - 低能核物理实验fMata-TPC应用
- **总结与展望**

时间投影室

(TPC, Time Projection Chamber)

TPC: 一种使带电粒子产生的电离电子在电场中漂移，并通过测量其漂移时间、和投影平面上的空间位置，来实现粒子三维径迹测量的装置

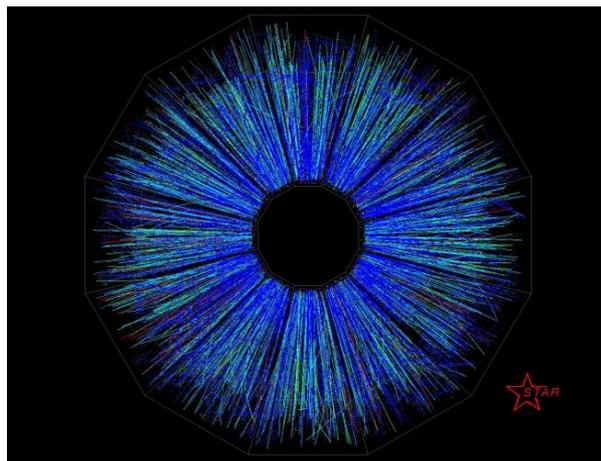
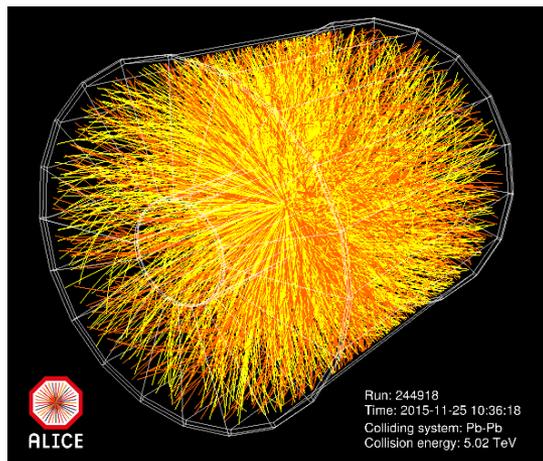


PEP4 TPC, 1976

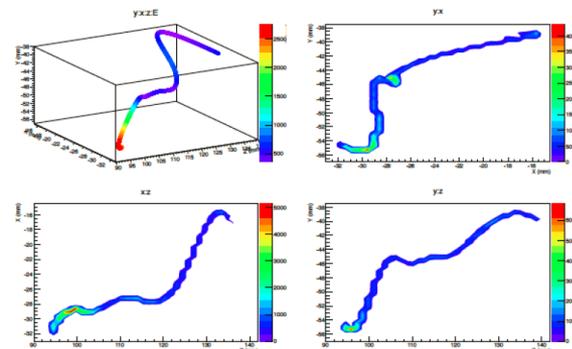
TPC的优点

TPC可看成是一个能高速实时地对带电粒子进行三维“照相”的探测装置

- 能够获得入射粒子（包括反应产生的次级粒子）丰富的物理信息
- 可实现粒子方向（径迹）、能量测量，也能根据 dE/dx 信息实现粒子鉴别

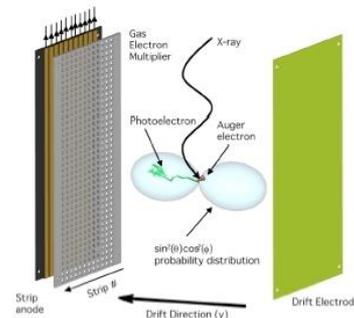
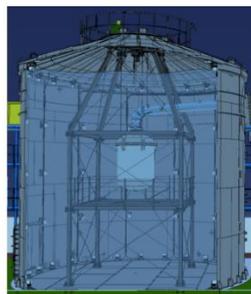
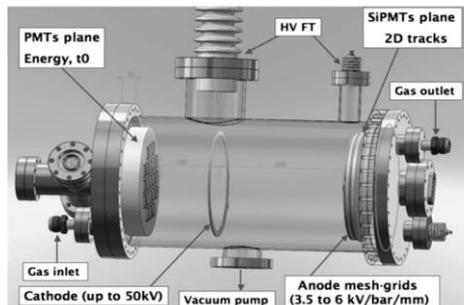
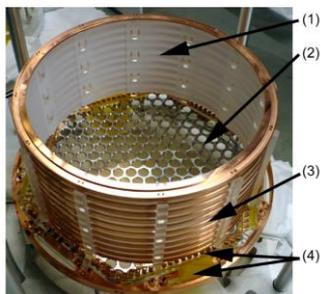


Real track from ^{137}Cs β -ray – reconstructed with SiPMs



DATA! NEXT-DEMO IFIC, Valencia

自1970年代问世之后，被广泛应用于核物理、粒子物理，以及空间天文等领域



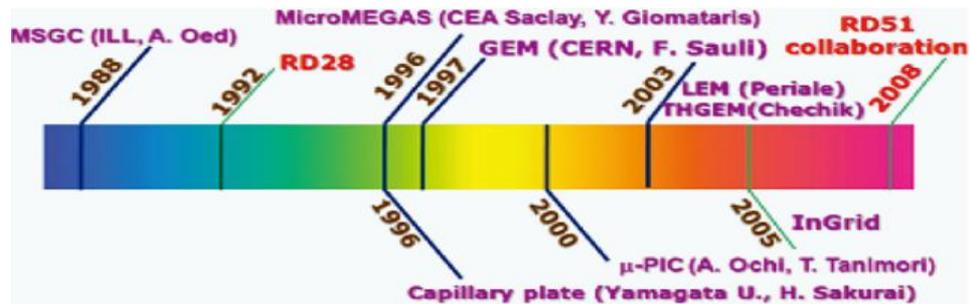
微结构气体探测器 (MPGD)

• 分类

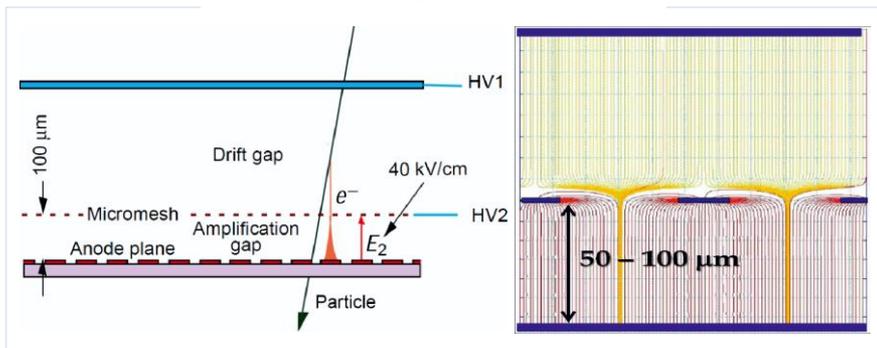
- 基于微网结构: Micromegas等
- 基于微孔结构: GEM、THGEM等

• 优点

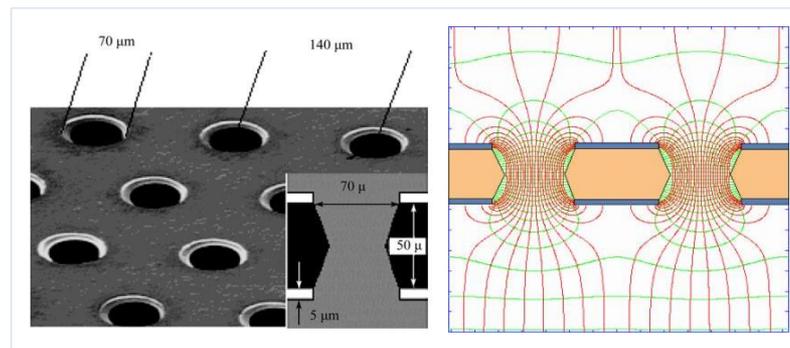
- 空间分辨率高、时间响应较好
- 易于低成本、大面积制作



Micromegas探测器



GEM探测器



■ 基于MPGD的TPC: 继承了MPGD高计数率、高位置分辨、易于大面积制作等优势, 能够实现更复杂应用场景下的带电粒子三维径迹的精密测量

国内的MPGD-TPC 研发情况（初步统计）

科研单位	通道规模	探测器类型	实验背景	备注
上海交通大学	6656	热压接 Micromegas	PandaX-III 0vDBD实验	另含26路 Mesh信号
中国散裂中子源 (Back-n束线)	当前: 1519 下一步: 3038	热压接 Micromegas	MTPC 核数据测量	最终目标: 1-2万路
中国工程物理研究院 (二所)	9216 (4608*2)	GEM	核数据测量	
复旦大学	当前: 2048 下一步: 4096	GEM +Micromegas	fMata-TPC 低能核物理研究	
高能物理研究所	1024	Micromegas	CEPC TPC预研	CEPC需求: 10⁶~10⁸
高能物理研究所	拟建: 10000	Micromegas	台山中微子实验	
北京大学、 中科院近物所	当前: 128 下一步: 1024	THGEM	核物理研究 (不稳定核集团结构)	
中国原子能科学研究院	拟建: 2048	光刻一体化 Micromegas	核数据测量 核物理研究	
中国科学技术大学	当前: 923 下一步: 6154	热压接 Micromegas	MeGaT MeV伽马 空间天文预研	

当前国内MPGD-TPC科研需求蓬勃增长，未来几年新增通道规模将在3万路以上

MPGD-TPC的读出需求分析

• 读出电子学功能需求

- 实现MPGD探测器的阳极（也可能包括阴极、Mesh）信号的读出
- 需要获得的物理信息：各路信号的电荷（Q）、到达时间（T）

• 主要的技术路线

- 1. 电荷灵敏放大 + 模拟成形滤波 + 波形数字化(ADC、SCA)
 - 可进一步利用FPGA进行实时数据处理（或计算机在线/离线处理），提取T、Q
- 2. 电荷灵敏放大 + 波形数字化 + FPGA数据处理（数字滤波、T/Q提取）
- 3. 电荷灵敏放大 + 模拟成形滤波 + 模拟寻峰/甄别 + 数字化（ADC、TDC）

• 读出电子学面临的挑战

- **低噪声**：一般要求 $< 1 \text{ fC}$ （对个别应用，需要达到 0.1 fC ）
- **大动态范围**：对不同带电粒子/核素， dE/dX 差异很大
- **高集成度**：通道规模动辄数千上万
- **高速数据传输**：数据率需达到 $1\sim 10 \text{ Gbps}$ 量级
- **系统规模应可灵活配置**：不同研发阶段，对通道数的需求不同

内容提要

- **MPGD-TPC及其读出需求**
- **PandaX-III读出电子学**
- **CSNS Back-n MTPC读出电子学**
- **TPC通用电子学及典型应用**
 - 高分辨宇宙线缪子成像应用
 - 低能核物理实验Mata-TPC应用
- **总结与展望**

研究背景：PandaX-III 实验

■ 我国首个大型无中微子双贝塔衰变实验

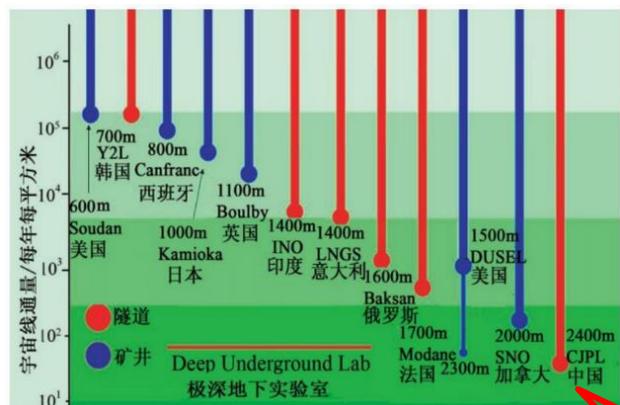
■ 超低本底的工作环境

■ 中国锦屏地下实验室CJPL

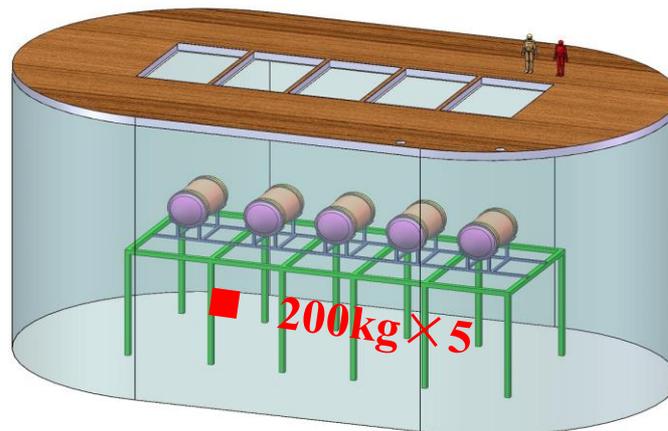
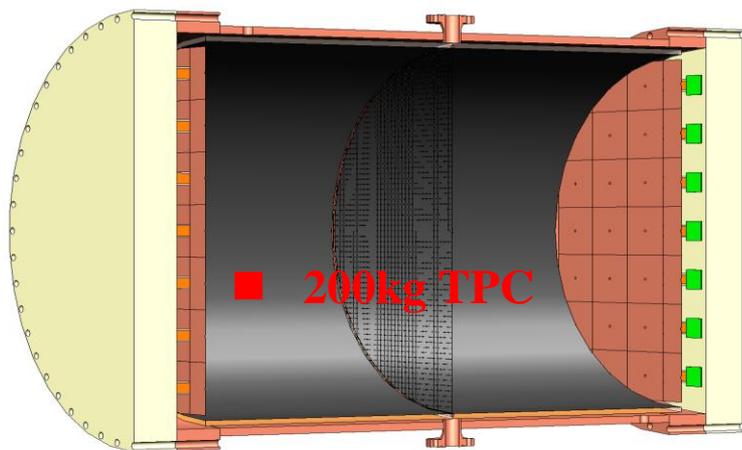
■ 高的能量分辨

■ 一期工程：3%

■ 二期工程：~1%

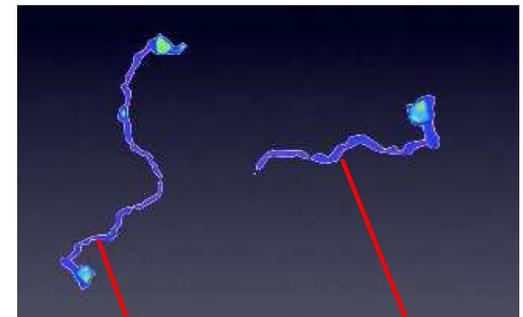
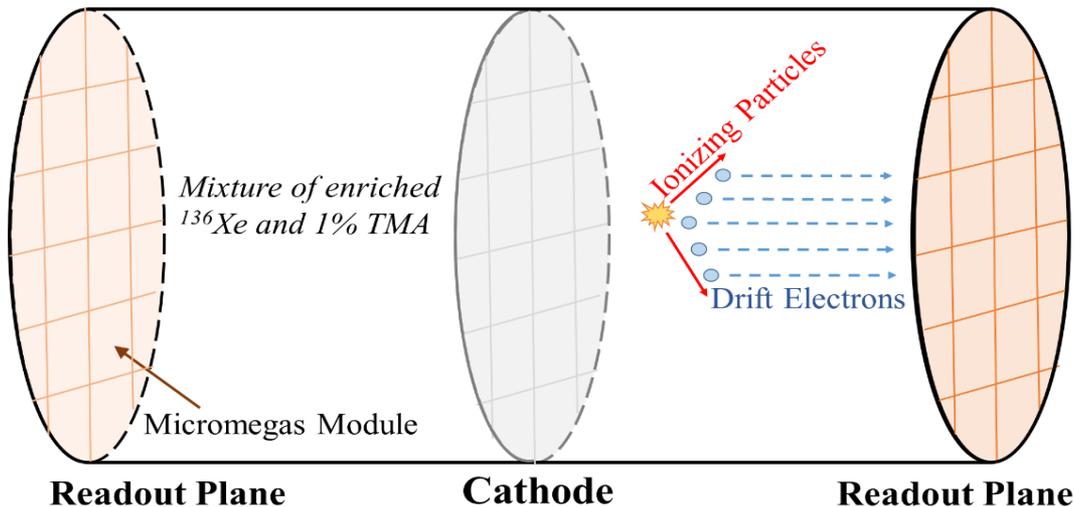
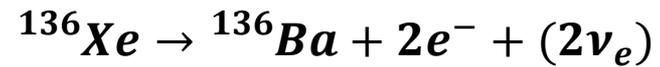


■ CJPL
■ 2400m



PandaX-III TPC探测器

- 对称设计的圆柱形时间投影室 (TPC)
- 工作介质：高压氙气 ($\sim 10\text{bar}$)
- 长度：2米，端盖直径：1.5米
- 端盖探测器：Micromegas



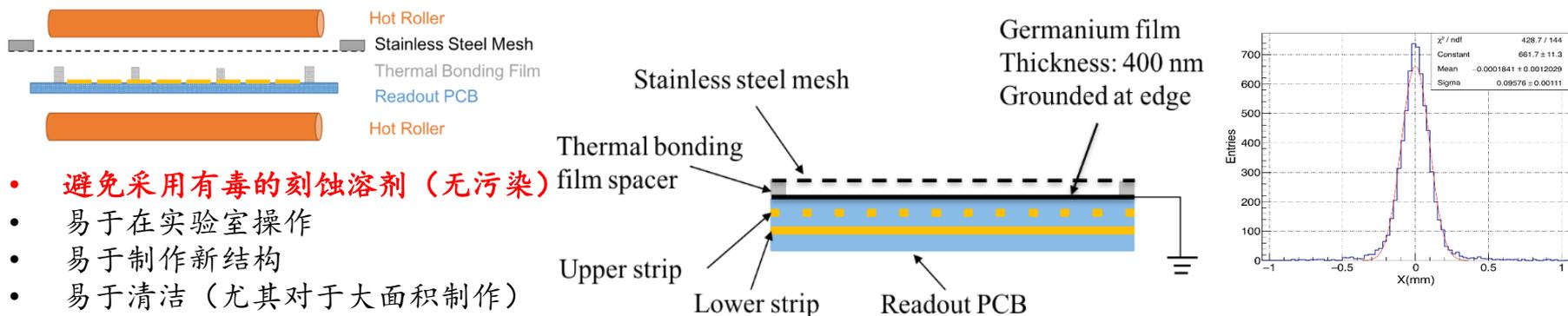
双贝塔衰变 单电子事件

核心探测器：超低本底Micromegas

中科大核探测与核电子学国家重点实验室团队（粒子物理专业）：

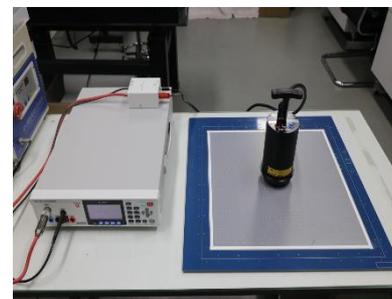
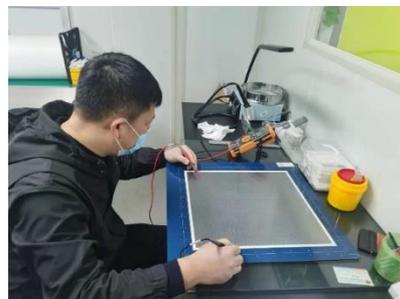
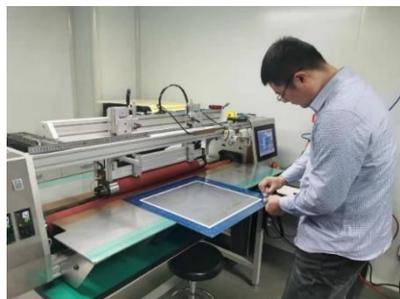
历时十余年，发展了具有自主知识产权的、基于热压接工艺的微网格气体探测器

在其基础上，进一步发展了超低本底的工艺



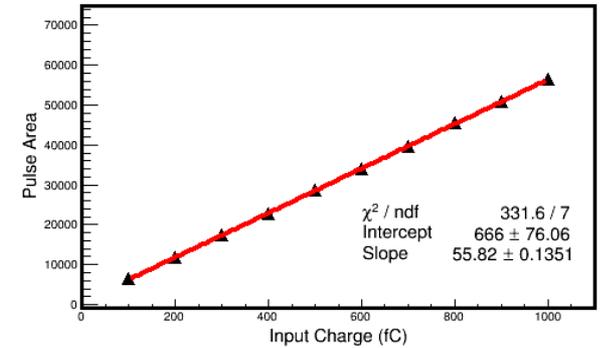
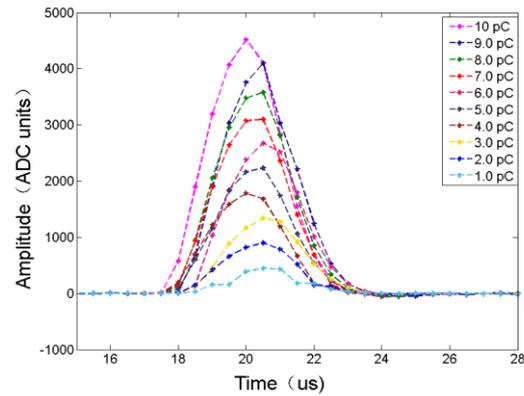
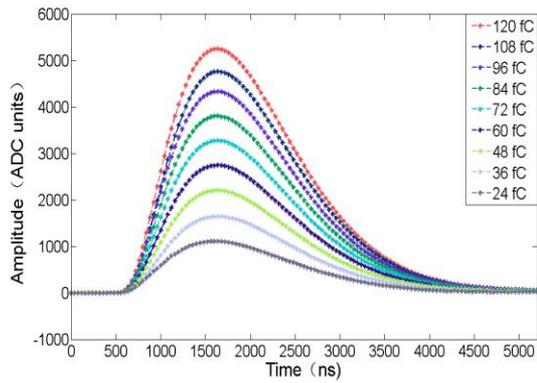
- 避免采用有毒的刻蚀溶剂（无污染）
- 易于在实验室操作
- 易于制作新结构
- 易于清洁（尤其对于大面积制作）
- 成本低廉

DESY束流实测位置分辨可达75 μm 以上（条中心距400 μm ）



见彭云志报告：PandaX-III 实验高压TPC读出的低本底高分Micromegas探测器研制

原型前端电子学研制



后端电子学研制

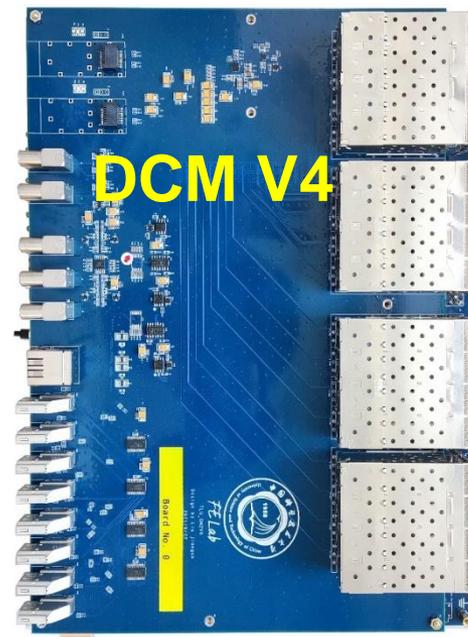
- 同步开展了后端电子学设计
 - 先后完成了三代（共4个版本）后端电子学模块
- 用于实现电子学性能测试、实验数据获取



第一代：原理验证
(2016-2017年)

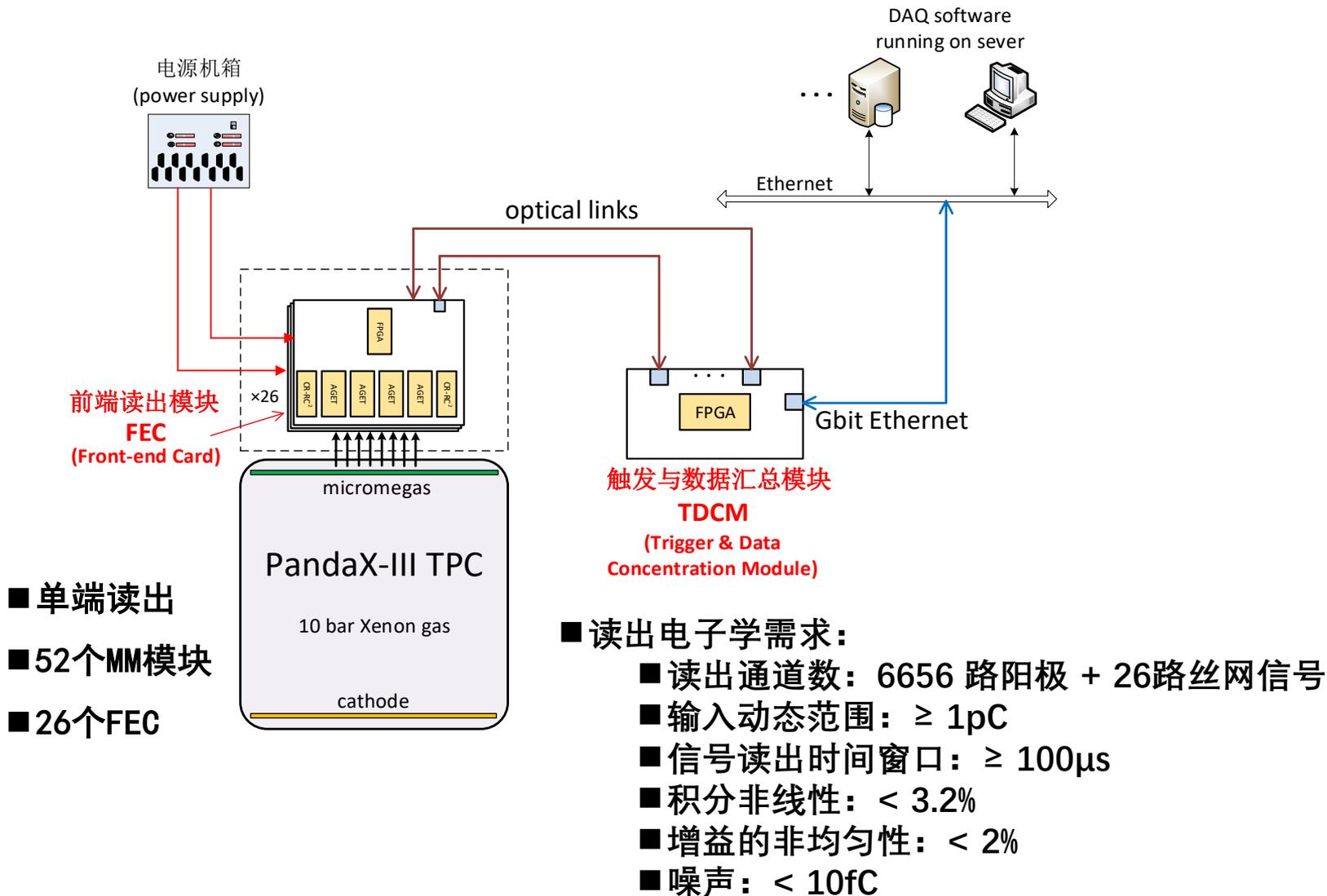


第二代：原型系统
(2018-2019年)



第三代：工程运行
(2021-2022年)

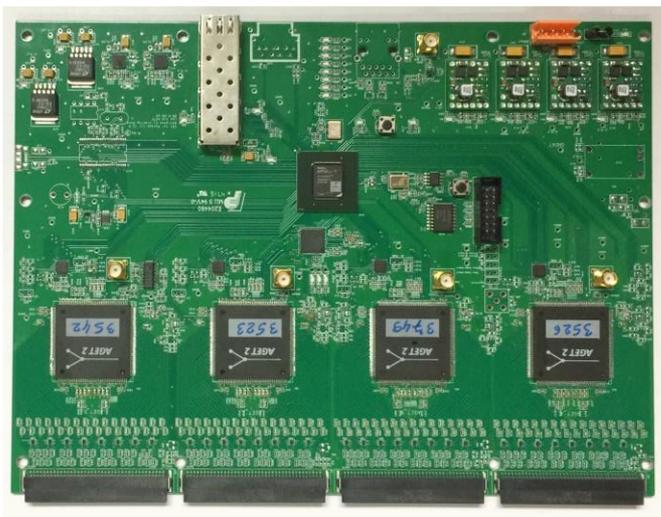
工程读出电子学设计方案



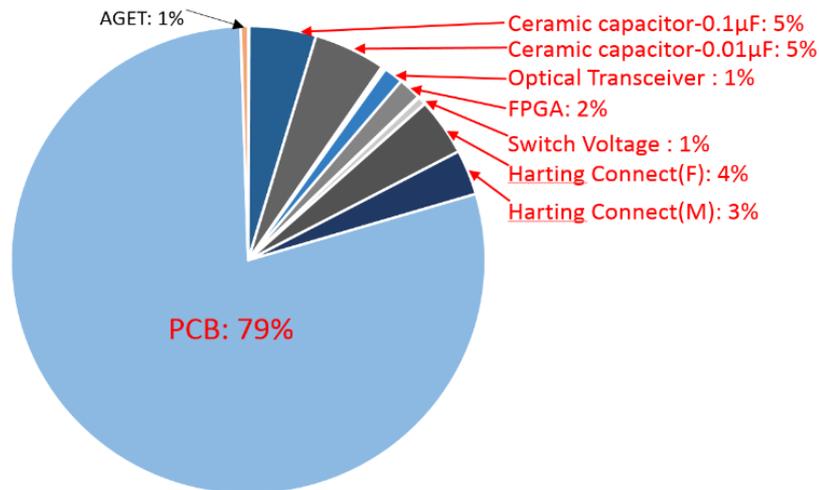
工程难题：读出电子学本底 $< 1\text{Bq/FEC}$

低本底关键技术探索

- 对原型电子学的材料和主要元器件的放射性进行了测试和统计
 - PCB基材是读出电子学放射性的主要来源 (~80%)
 - 电容、连接器等器件也会产生放射性
 - 对多种牌号的PCB材料进行了调研和筛选测试，不存在显著差异



放射性测试



实测FEC本底 ~ 10 Bq/FEC

低本底关键技术探索

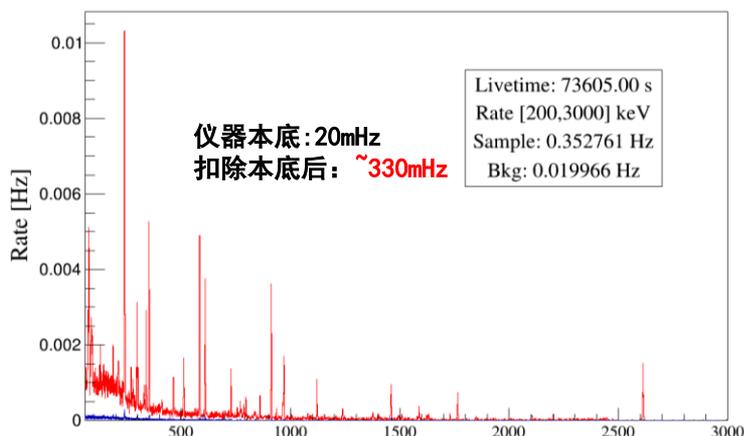
■ 经与PCB工厂技术沟通，提出多层柔性粘接的PCB工艺改进方案

- 将多片聚酰亚胺柔性基材直接粘胶构成多层软板，避免玻璃纤维和固化剂等

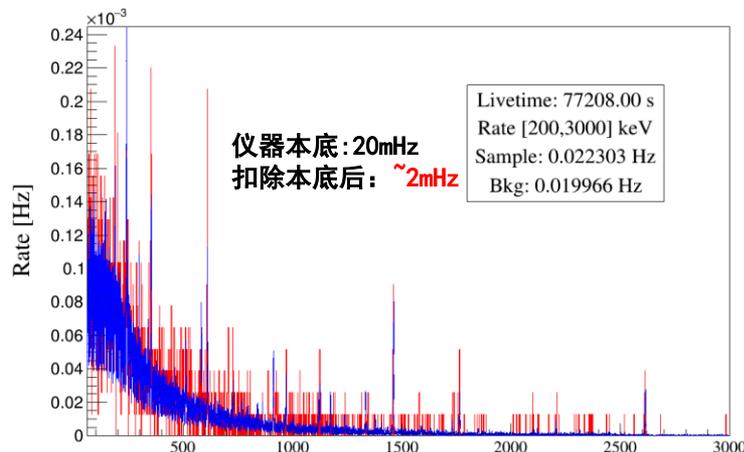
■ 开展信号完整性优化设计，减少电子学模块的层数以适应新工艺极限

- 在保证阻抗控制、信号回流和电磁屏蔽的前提下，将**12层**PCB减少到**8层**

■ 由PCB工厂多次试产，成功制成新型8层电路模块，**实测PCB材料的放射性降低百倍**



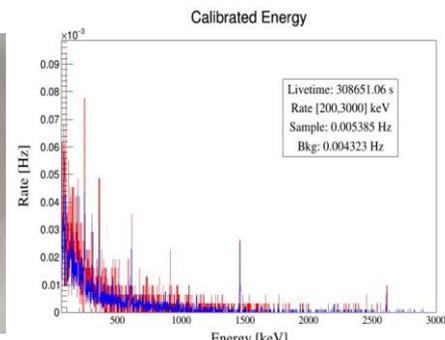
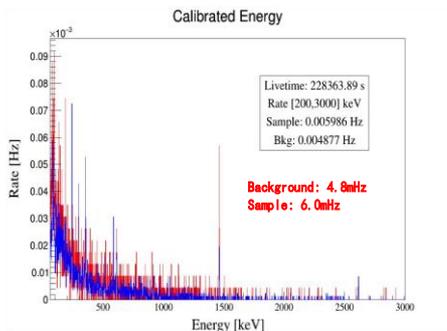
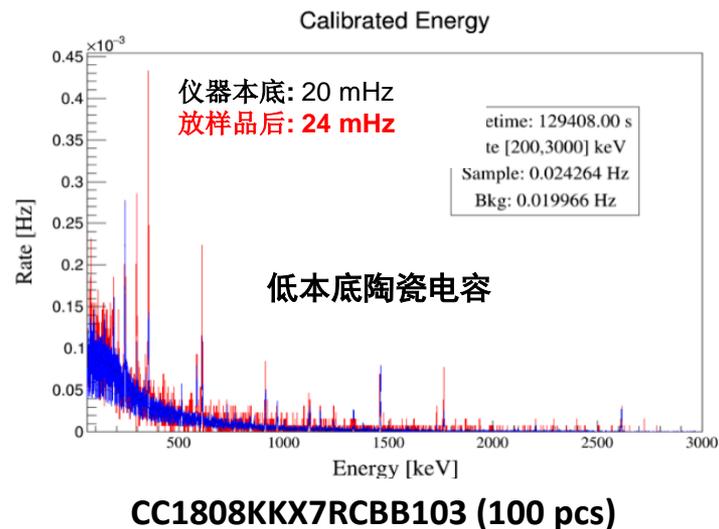
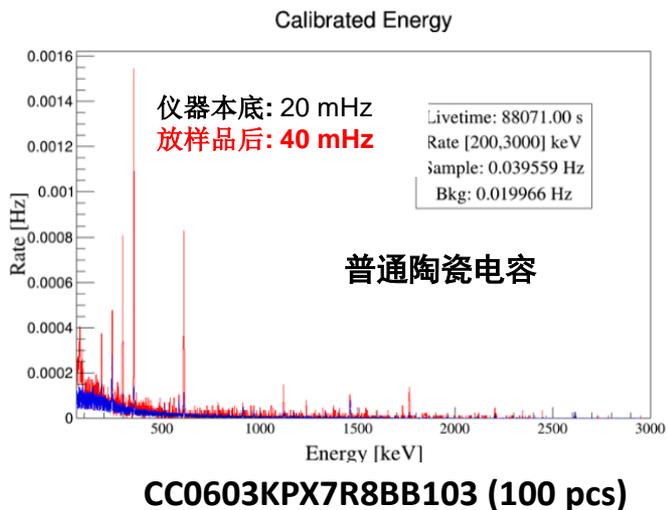
■ 普通FR4基材8层PCB板



■ 改进工艺的8层PCB板

低本底关键技术探索

电容和连接器的低本底改进



低本底线缆连接器

改型后的PCB连接器

PandaX-III 电子学研制成果

■ 基于前述工艺改进，完成了工程版本FEC的研制和批量加工（共6656+1024路）

□ 关键：低本底PCB、低本底电容、低本底连接器

□ 在满足电性能指标的同时，放射性本底降低了10倍以上（低于1Bq/FEC）



低本底电子学模块



实验室测试现场



上海交大TPC联调测试

■ 2022年8、9月，完成了课题级、项目级验收



验收测试方案



验收测评报告

主要验收结论：

■ “时间投影室Micromegas探测器读出电子学系统各项指标达到考核要求”

■ “放射性本底水平满足PandaX-III实验的要求”

内容提要

- **MPGD-TPC及其读出需求**
- **PandaX-III读出电子学**
- **CSNS Back-n MTPC读出电子学**
- **TPC通用电子学及典型应用**
 - 高分辨宇宙线缪子成像应用
 - 低能核物理实验fMata-TPC应用
- **总结与展望**

研究背景：中子核数据测量

■ 中子核数据：描述中子与原子核发生反应的核数据

- 核数据的一个重要类别
- 通过对中子与原子核相互作用过程进行测量与分析而得到
- 在核天体物理、核医学与核能应用等方面都有着不可或缺的作用

■ 我国核数据研究的历史和现状

- 起步：20世纪60年代初
- 1985年前：GENDL-1
- 1985-2000：GENDL-2、GENDL-2.1 （开始用于核电建设）
- 2009：GENDL-3.1 （提高精度、增加核素数目）
- 2020：GENDL-3.2（核素数量由240种增加至272种，数据质量、种类均有大幅提升）
- **当前的核数据精度还需大幅提高！**

实验核数据测量的关键：高性能的中子源 + 先进的测量设备（粒子谱仪）

Back-n白光中子源

- 利用反角方向未充分慢化的中子
 - 能量范围：0.5eV到200MeV，注量率高
 - 在核数据测量方面具有显著优势



装置	LANSCE WNR	CERN n TOF	Back-n
束流能量 (MeV)	800	20000	1600
飞行距离 (m)	7-55	185	55/80
脉冲宽度 (ns)	125	7	52-26000
束流功率 (kW)	80-100	23-36	100
脉冲频率 (Hz)	20	0.278-0.42	25
中子产额 (n/s)	1.0×10^{15}	8.1×10^{14}	2.0×10^{16}



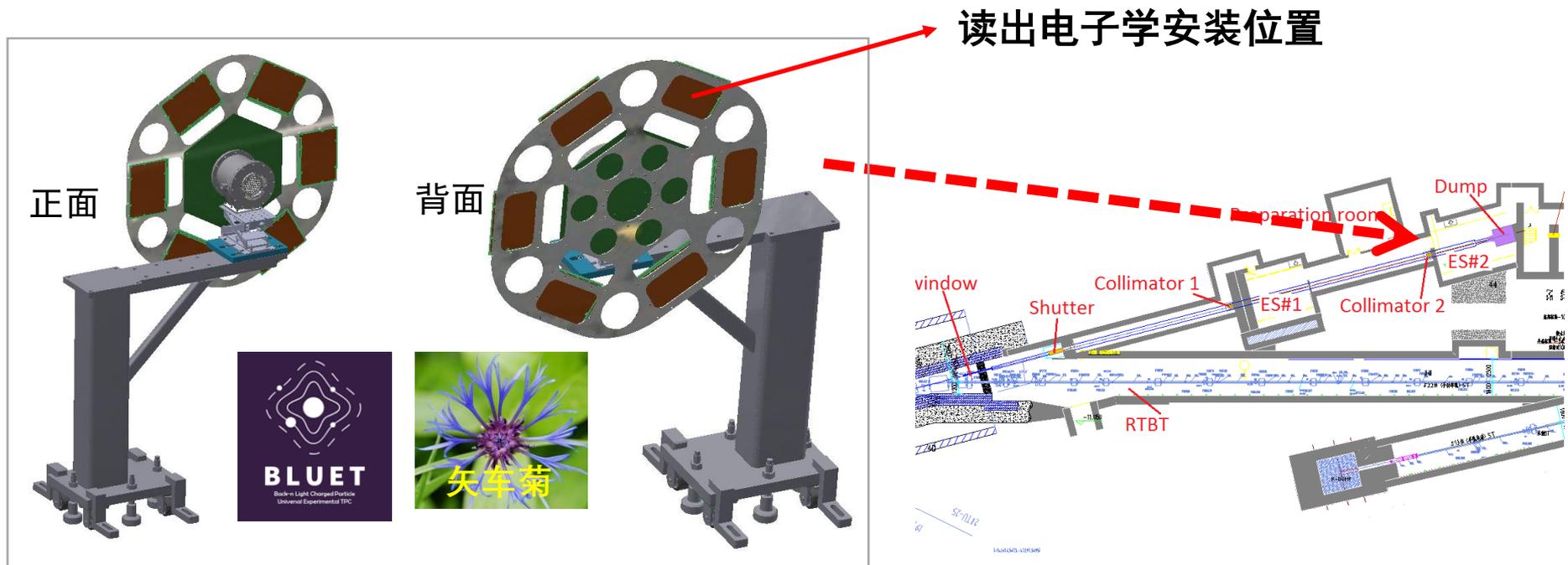
在白光中子束线已建成的背景下，先进的粒子谱仪成为当前的重要任务！

白光中子源多用途TPC (MTPC, Multi-Purpose TPC)

■主要用途：针对轻带电粒子测量

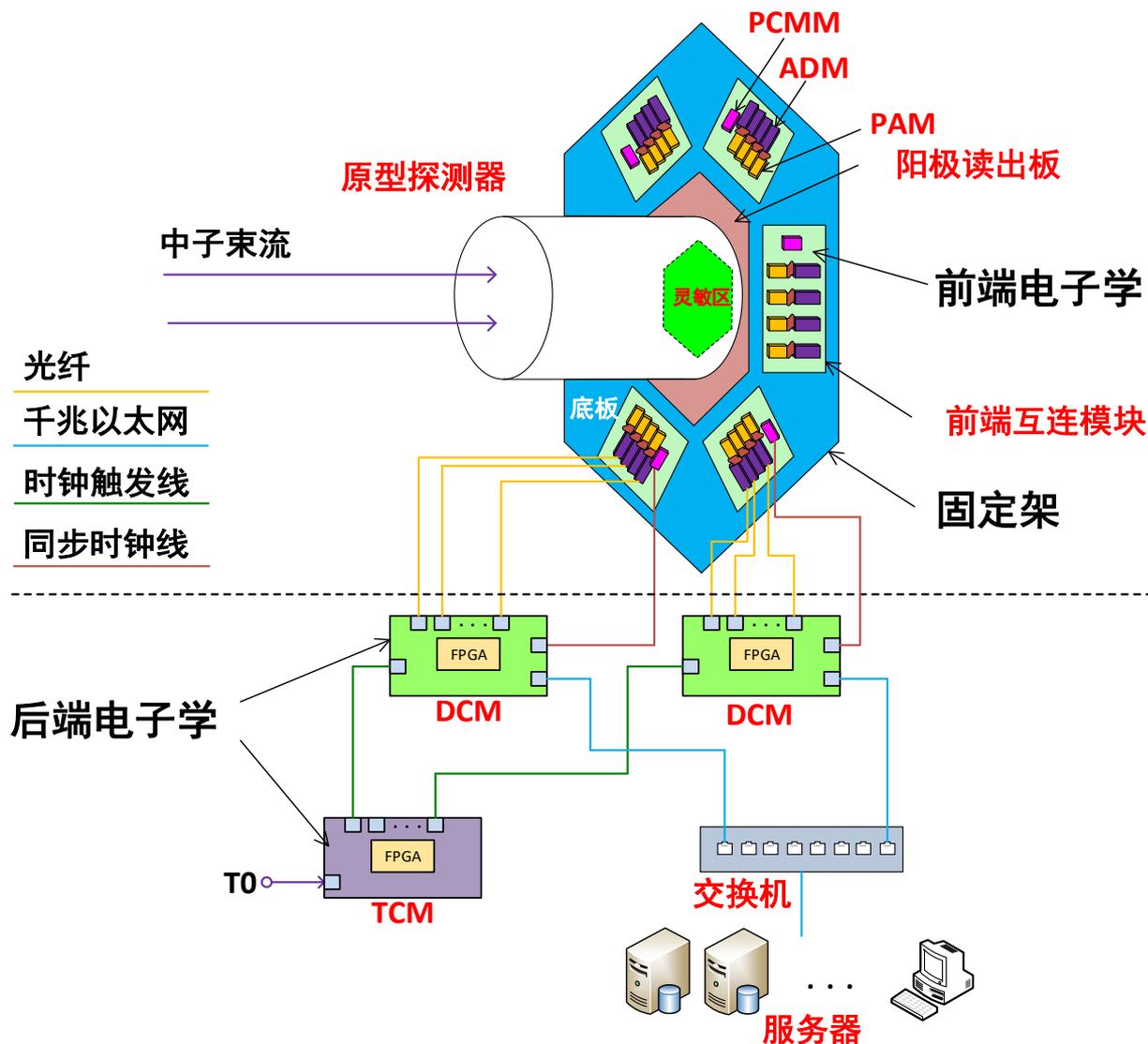
□BLUET: Back-n Light Charged Particle Universal Experimental TPC

■兼顾其他用途：裂变产物测量、中子共振照相、中子束斑测量



见易晗报告：时间投影室及其在物理实验中的应用

原型TPC读出电子学系统方案



原型TPC读出电子学指标需求

电子学需求:

- 读出通道数: 1519路阳极+1路阴极+1路丝网
- 电荷测量范围: 覆盖4.2fC至1.7pC
- 波形采样率: 不低于20MSPS
- 采样窗口: 大于20 μ s
- 通道间同步性: 好于10ns
- 定时精度: 好于10ns
- 读出死时间: **低于50 μ s**

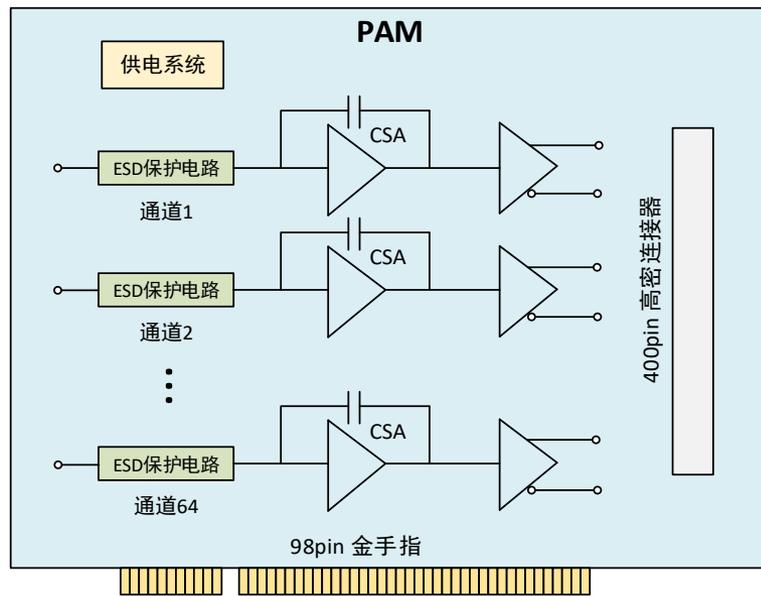
主要的技术挑战:

- 低功耗、高集成度
- 电荷测量范围大
- 死时间短

技术方案: 电荷灵敏放大 + 波形数字化 + FPGA数字化处理

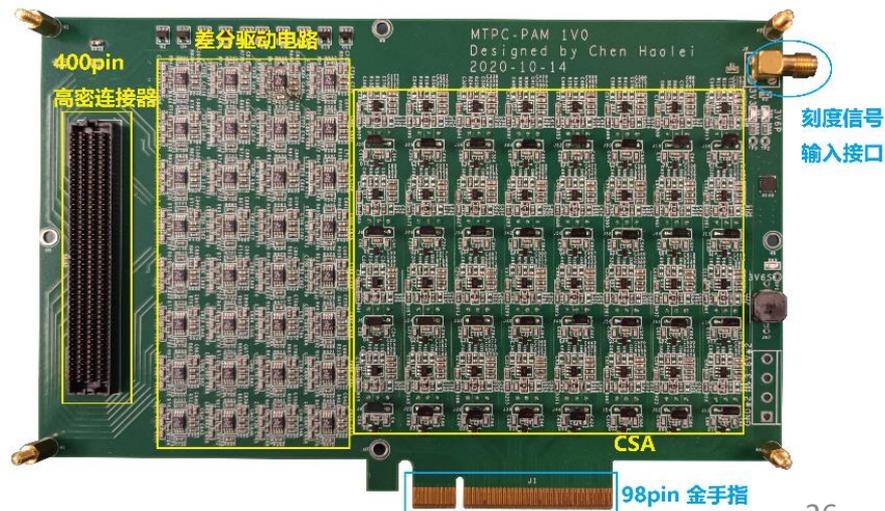
前放模块设计

- 通道数：64路
- 处理方式：电荷收集
- 电荷测量范围：不超过3pC
- 输出信号类型：差分模拟信号
- 尺寸：19.1cm×11.5cm
- **功耗：1W/板**



探测器信号由金手指输入

处理后差分信号由高密连接器输出

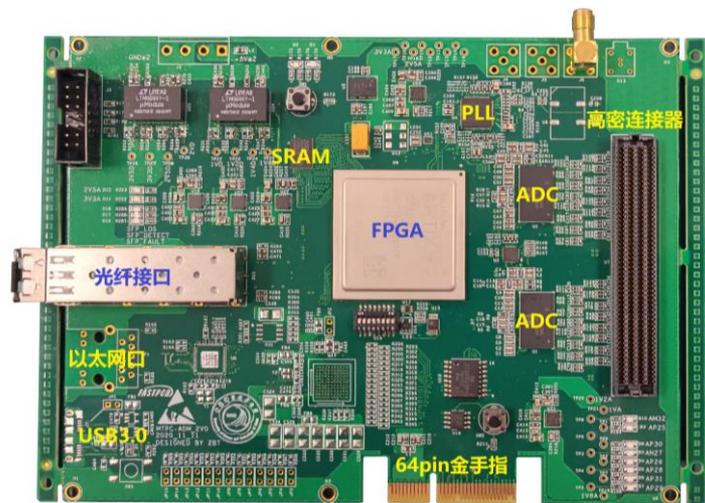
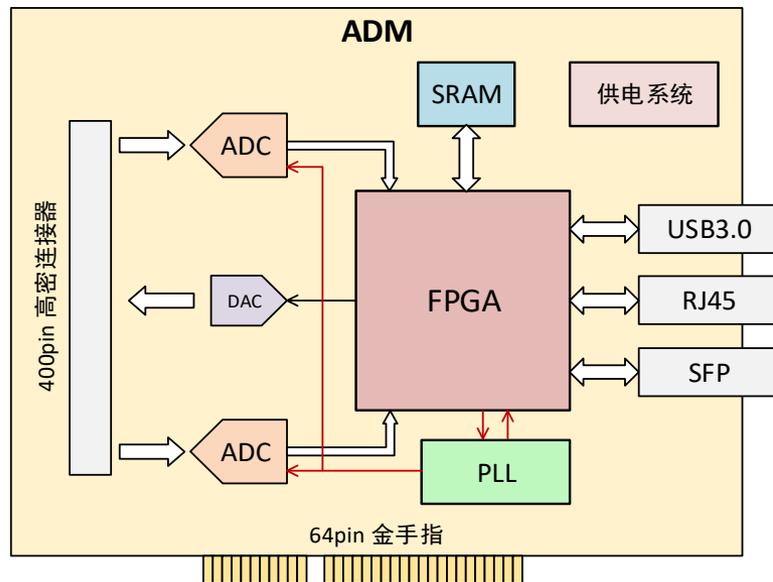


波形数字化模块设计

ADM：模拟-数字转换模块

- 通道数：64路
- 采样率：40MSPS
- 分辨率：12bits
- 输出接口：2.4Gbps光纤链路
- 备用接口：USB3.0、1G Ethernet
- 尺寸：16.5cm×12.7cm
- 功耗：8W/板

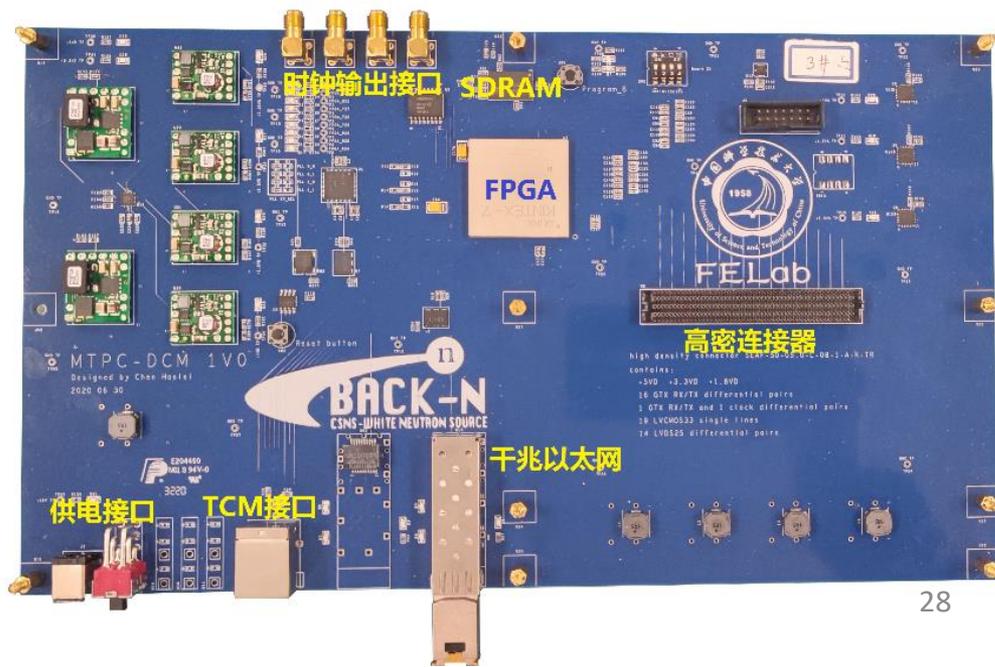
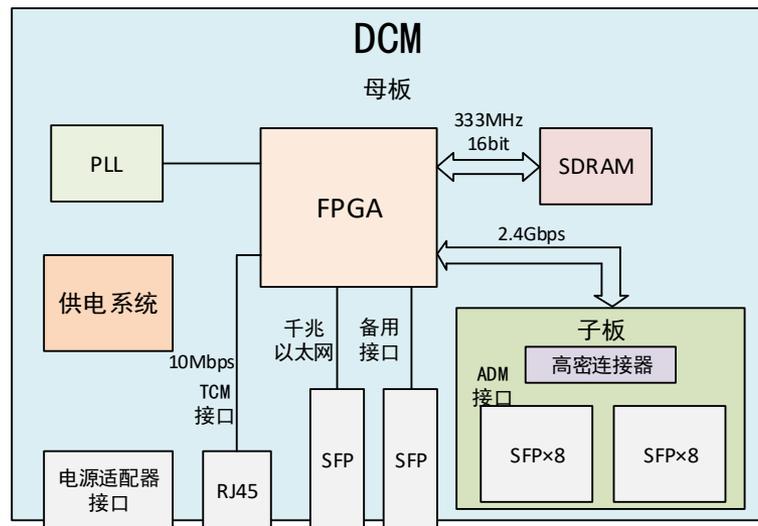
基于两片32通道ADC芯片实现数字化
FPGA内部对64通道进行CR-RC²滤波



数据获取（汇总）模块设计

DCM：数据汇总模块

- 子母板结构
- 上位机数据接口：千兆/万兆以太网
- 前端数据接口：光纤@最多16个（子板）
- 8Gb DDR3L SDRAM缓存
- 12V 5A适配器供电
- 尺寸：30.5cm×17.8cm

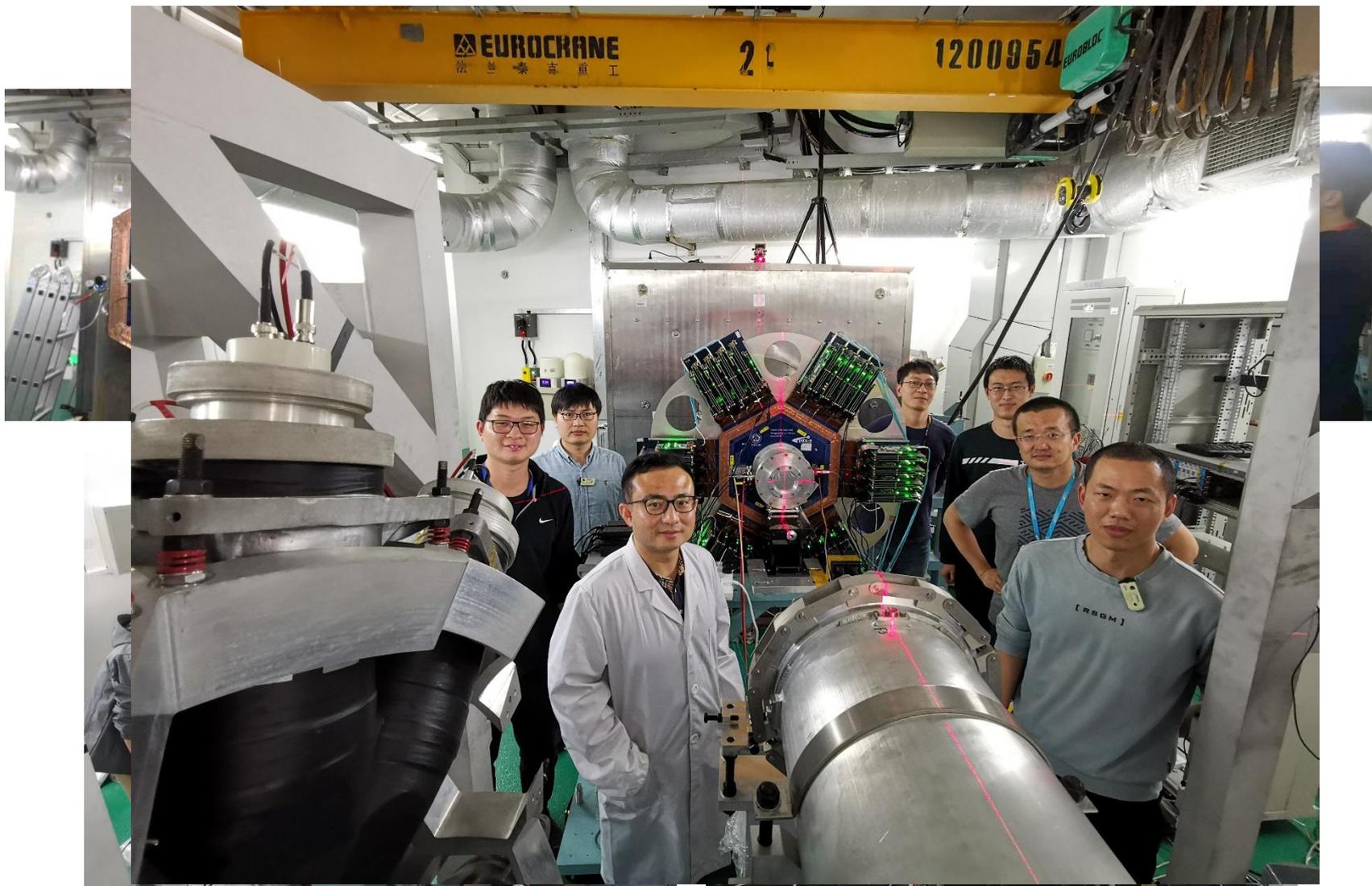


电子学测试结果

	原型探测器读出需求	电子学性能
读出通道数	1521路	1536路
电荷测量性能	信号幅度范围： 4.2fC至1.7pC	噪声RMS: 0.76fC
		动态范围上限: 2.8pC
波形采样率	不低于20MSPS	40MSPS
单次事例采样窗口	覆盖20 μ s	25.6 μ s
通道间同步精度	好于10ns	好于200ps
飞行时间测量精度	好于10ns	好于3ns
死时间	短于50 μ s	约25μs

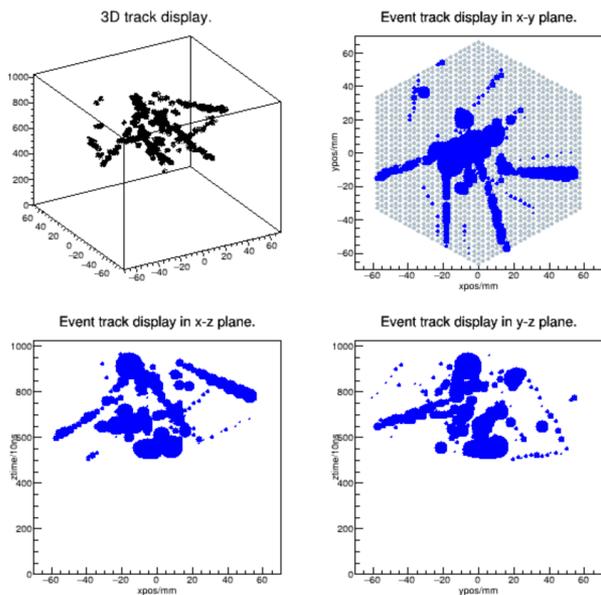
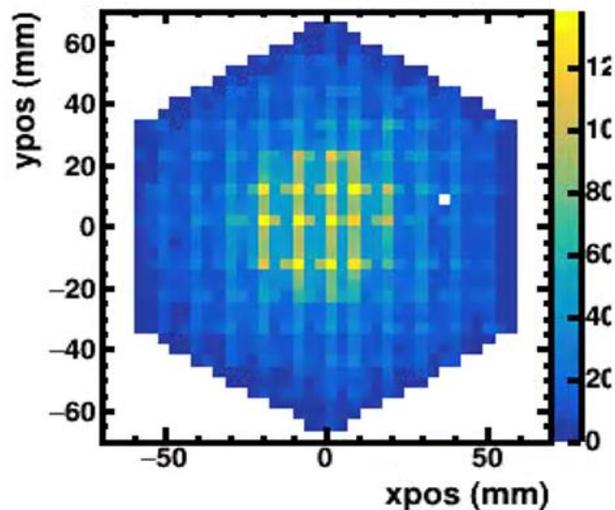
读出电子学各项技术参数满足MTPC读出需求

束流实验 (2021.1)

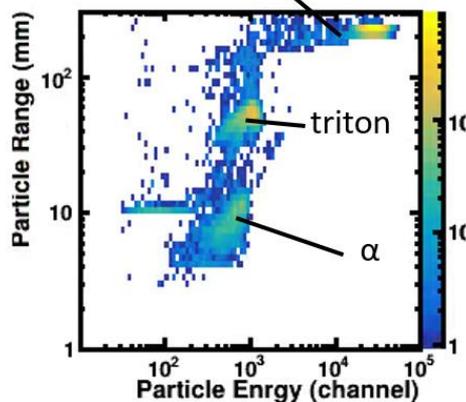


Back-n束流实验 (${}^6\text{Li}$ 靶)

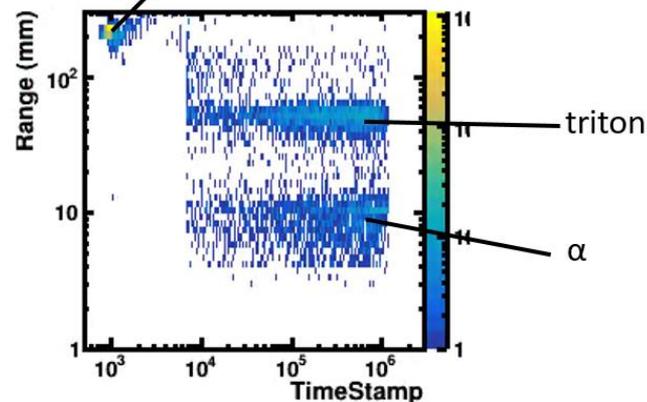
- 所有电子学通道工作正常
- 系统具有良好的粒子径迹测量能力
- 对氚、 α 实现了良好鉴别



γ -flash & High energy neutron



γ -flash & High energy neutron



小结

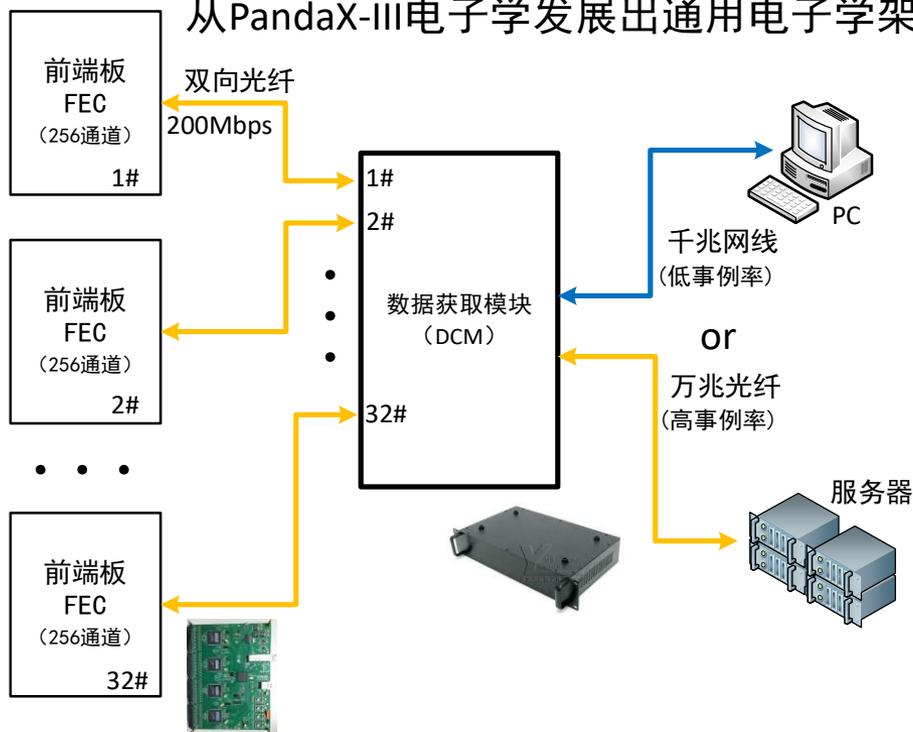
- 利用散裂反角白光中子源的优势，提出了面向中子核数据测量等多种用途的万路级TPC计划，并组建了合作团队
- 研制完成了1519路原型TPC系统，并成功开展了束流实验
 - 该原型TPC也是继美国LANSCE的NIFFTE后**世界上第二台**专门用于测量中子核反应截面数据的专业探测器系统
 - 为更大规模的TPC系统研制奠定了技术基础
- 下一步工作计划
 - 利用原型TPC开展进一步的实验，发表物理结果
 - 目前正在开展电子学升级，**实现两个TPC探测器背靠背双面读出**
 - 希望进一步获得经费支持，启动更大规模的万路级TPC设计

内容提要

- **MPGD-TPC及其读出需求**
- **PandaX-III读出电子学**
- **CSNS Back-n MTPC读出电子学**
- **TPC通用电子学及典型应用**
 - 高分辨宇宙线缪子成像应用
 - 低能核物理实验fMata-TPC应用
- **总结与展望**

基于AGET-ASIC的MPGD通用电子学

从PandaX-III电子学发展出通用电子学架构



- 系统构成：
 - 前端读出板 (FEC)：256通道
 - 数据汇总模块 (DCM)
 - 数据获取软件 (+ 计算机)
- **动态范围：0~120fC/240fC/1pC/10pC**
- **噪声：0.2fC (@120fC量程)**
- 探测器-FEC连接
 - 采用80pin 高密度连接器
- FEC-DAQ连接
 - 单芯双向光纤
- DCM到计算机：千兆以太网、USB3.0
- 单个DCM可支持多达32个FEC (=8192路)
- 可通过采用多个DCM进一步提升通道数



应用：高分辨宇宙线缪子成像

μ STC : μ (muon) Scattering tomography & T ransmission radiography imaging faCility



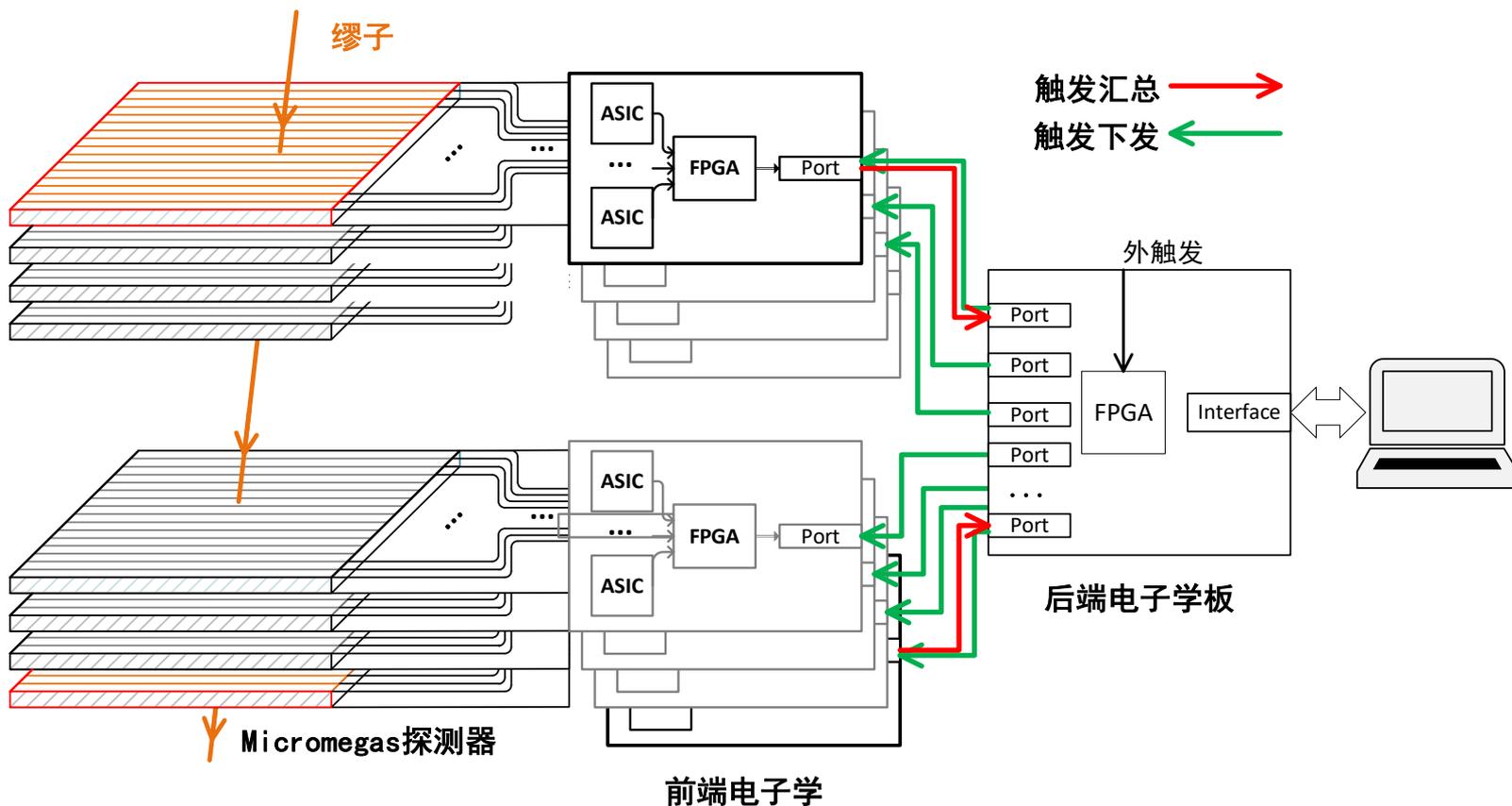
散射成像装置
 μ STC-T



透射成像装置
 μ STC-R

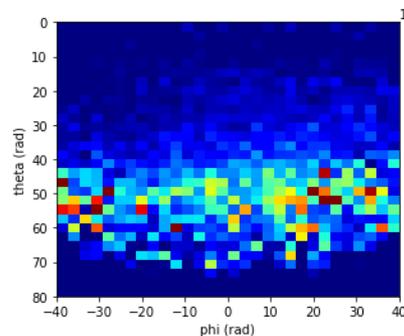
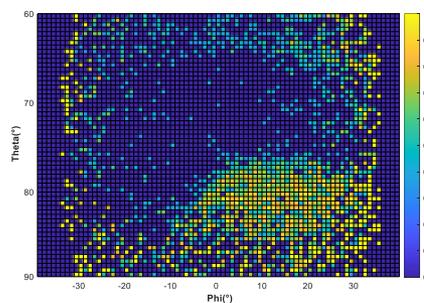
缪子成像装置的读出电子学

- 上万路探测器通道（电子学通道编码复用）
- 适配不同的工作模式：散射、透射、计量学
- 适配不同触发模式

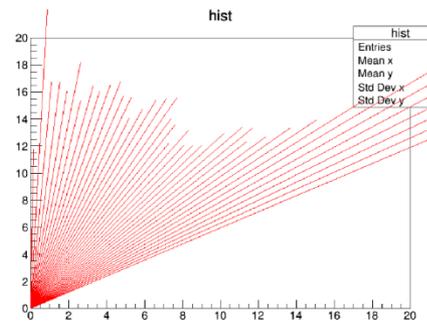


样机成像实验

- 探测器有效面积：40 cm × 40 cm
 - 单层通道数：2048路
- 电子学编码比：8:1

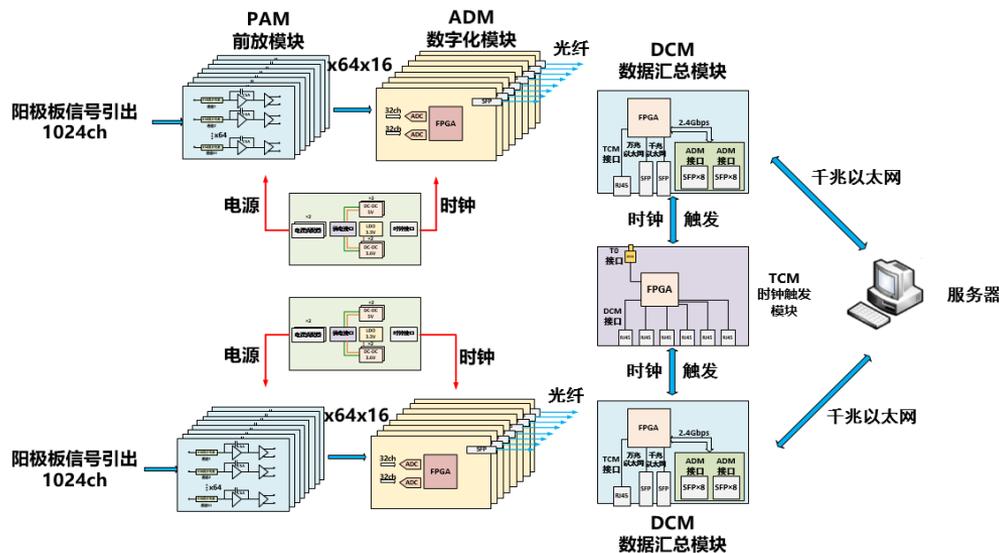


顺着河道方向结果



截面缪子统计分布

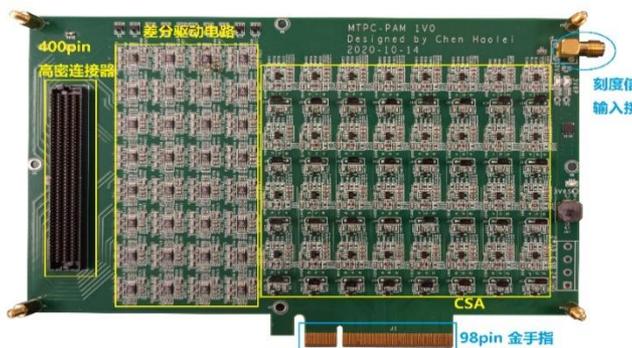
基于分立器件的MPGD通用电子学



■ 系统构成:

- 前端放大器板 (PAM)
- 波形数字化板 (ADM)
- 数据汇总模块 (DCM)
- 数据获取软件 (+ 计算机)

- 等效噪声电荷: $0.76fC$
- 增益非均匀性约2.2%
- 积分非线性均值约0.21%，最大不超过0.35%
- 定时精度好于3ns
- 通道间串扰系数不超过1%



应用：fMata-TPC多用途活性靶时间投影室

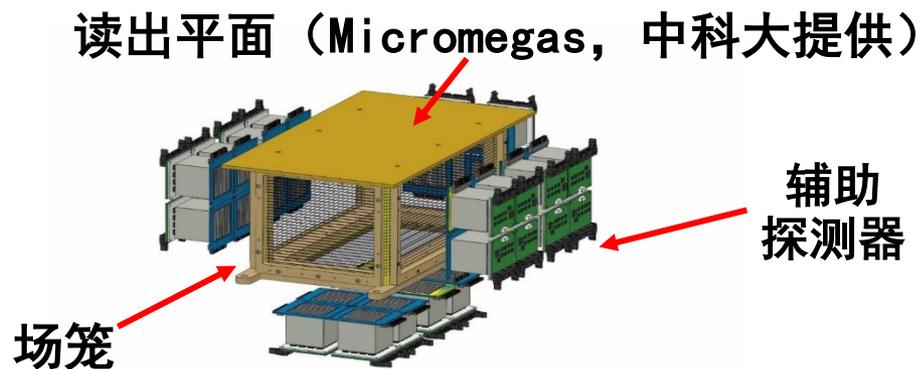
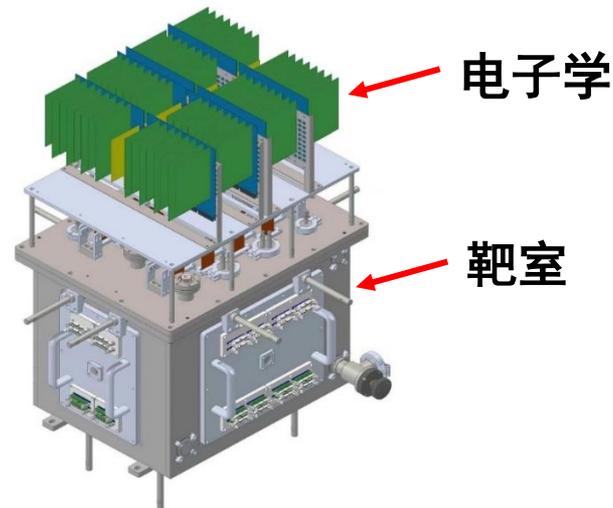
(Fudan Multi-Purpose Active Target TPC)

□主要用途：

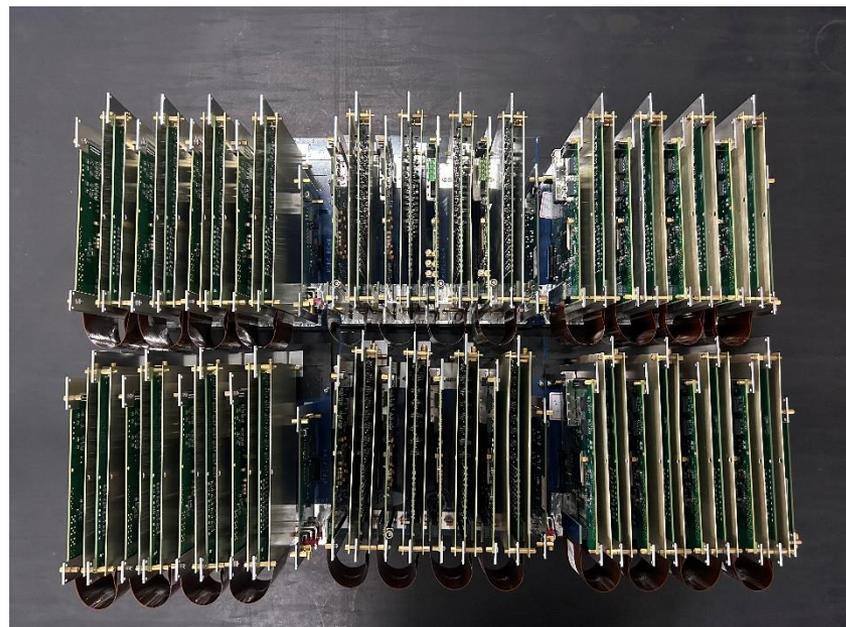
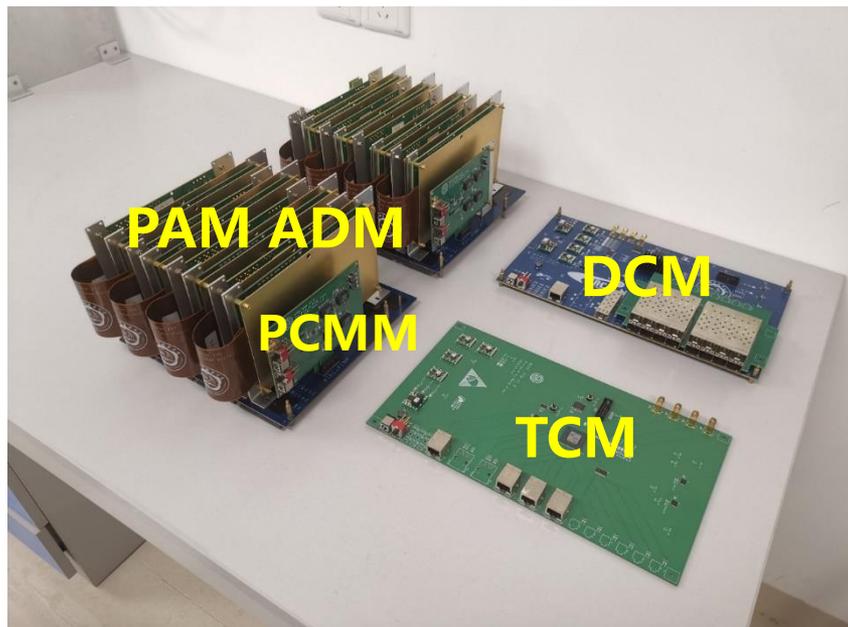
- 针对伽马束流和稀有同位素束流，开展低能核物理研究实验

□Active Target TPC的构成

- 靶室
- 场笼
- 读出平面 (MicroMegas)
- 辅助探测器 (DSSD+CsI 探测器)



电子学模块批量研制

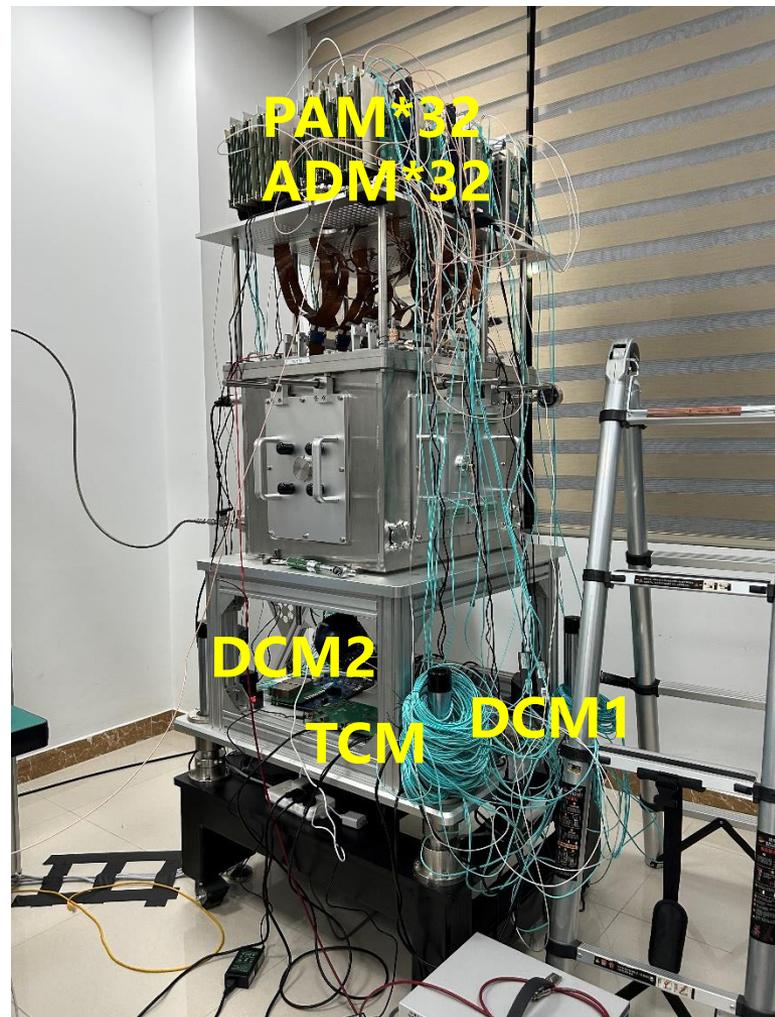
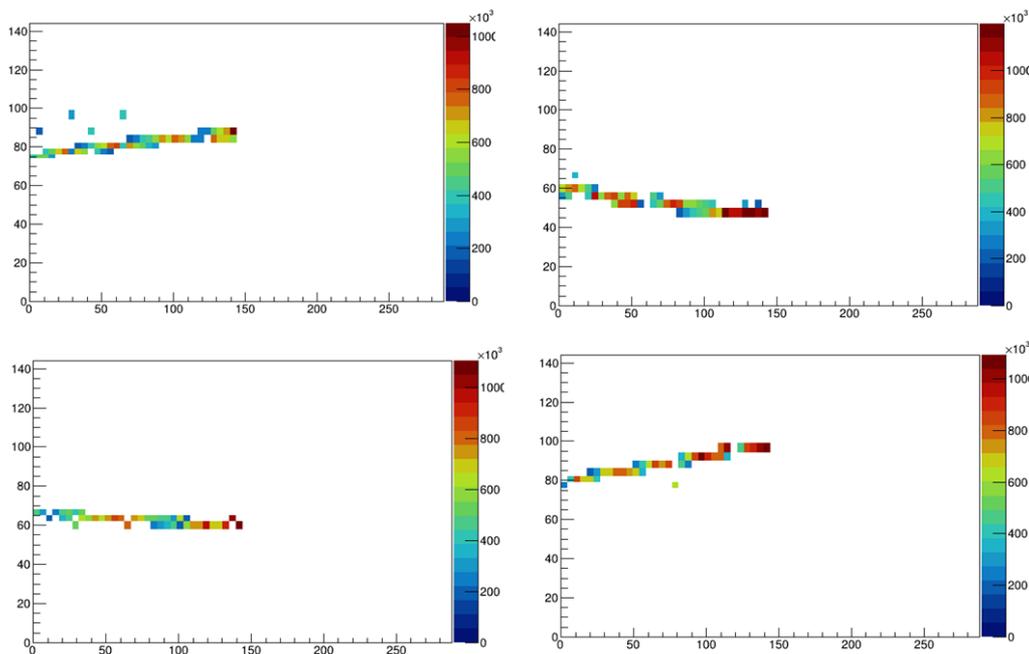


32块PAM、32块ADM、8块PCMM、2块DCM、1块TCM，共计75个电路模块

构成2048路 TPC读出系统

初步联调：放射源测试

- 组装完成2048路TPC系统
- 开展了放射源测试 (^{241}Am α 源)



验证了读出系统对带电粒子的测量功能

总结与展望

■总结

- 完成了针对Micromegas TPC的通用、可扩展电子学系统的研制
- 该系统已在中子核数据测量实验、低能核物理实验中开展初步应用

■下一步工作计划

- 通用读出电子学系统的优化改进
 - ◆期待采用国产读出ASIC，提高系统集成度，降低功耗
- 配合物理和探测器需求，合作开展更大规模的TPC系统的研制

后续工作还在开展中，
希望得到各位同行的指导和进一步的支持！