

微结构气体探测器的读出电子学与系统应用

封常青

中国科学技术大学 近代物理系

2026年7月23日，惠州

报告提纲

- **微结构气体探测器 (MPGD) 及其读出需求**
- MPGD的前端电子学与典型集成芯片
- MPGD通用电子学系统相关工作介绍
- 技术前沿展望

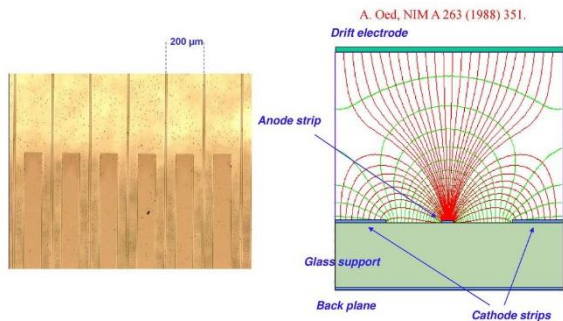
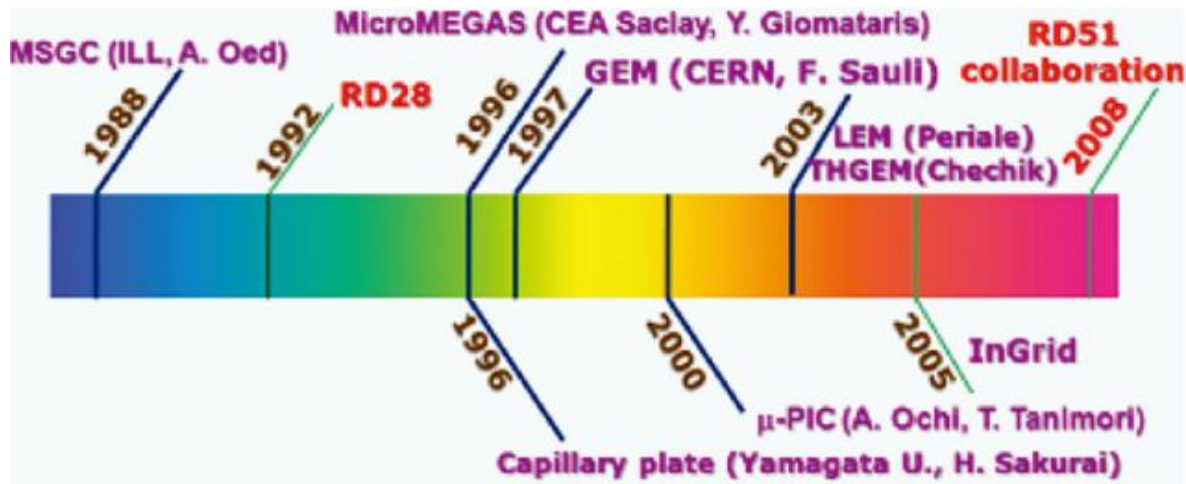
微结构气体探测器 (MPGD, Micro-Pattern Gaseous Detectors)

• 分类

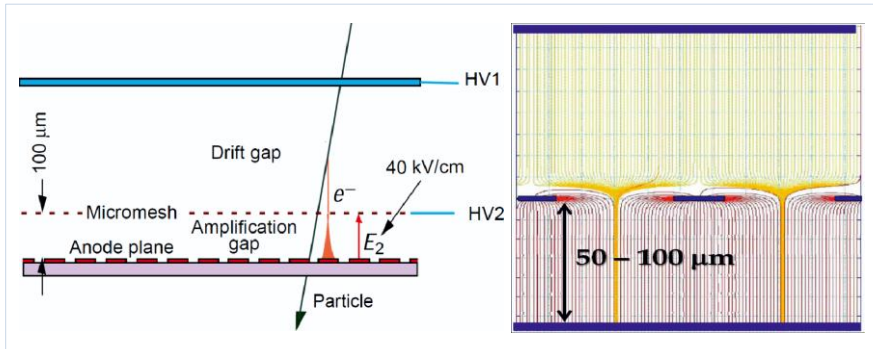
- 微条结构: MSGC等
- 微网结构: Micromegas等
- 微孔结构: GEM、THGEM等

• 优点

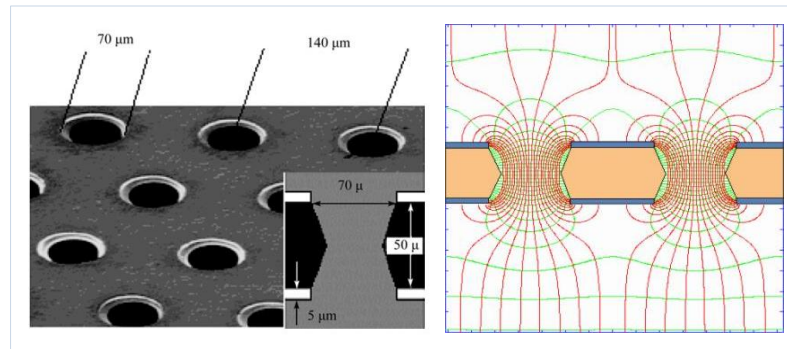
- 高空间分辨率 (数十 μm ~ 百 μm)
- 时间响应较快 (ns级), 计数率高 ($10^6 \text{ mm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 易于低成本、大面积制作



MSGC: Micro-Strip Gas Chambers
(A. Oed, 1988)



Micromegas: Micro-MESH Gaseous Structure
(Y. Glomataris, 1996)



GEM: Gas Electron Multiplier
(F. Sauli, 1997)

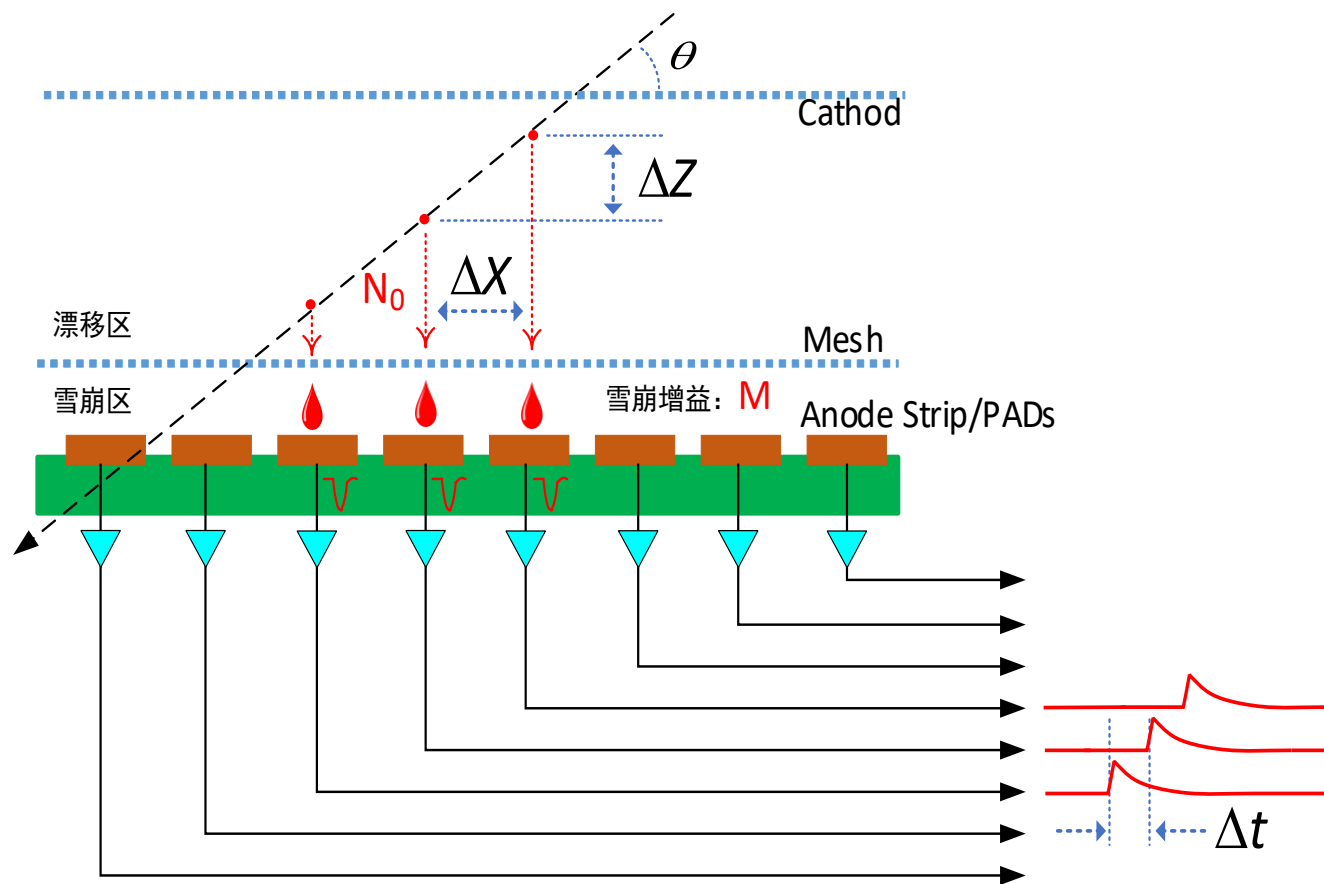
近年来, MPGD在核与粒子物理实验、空间天文、辐射检测等领域得到日益广泛的应用!

MPGD读出电子学的核心功能

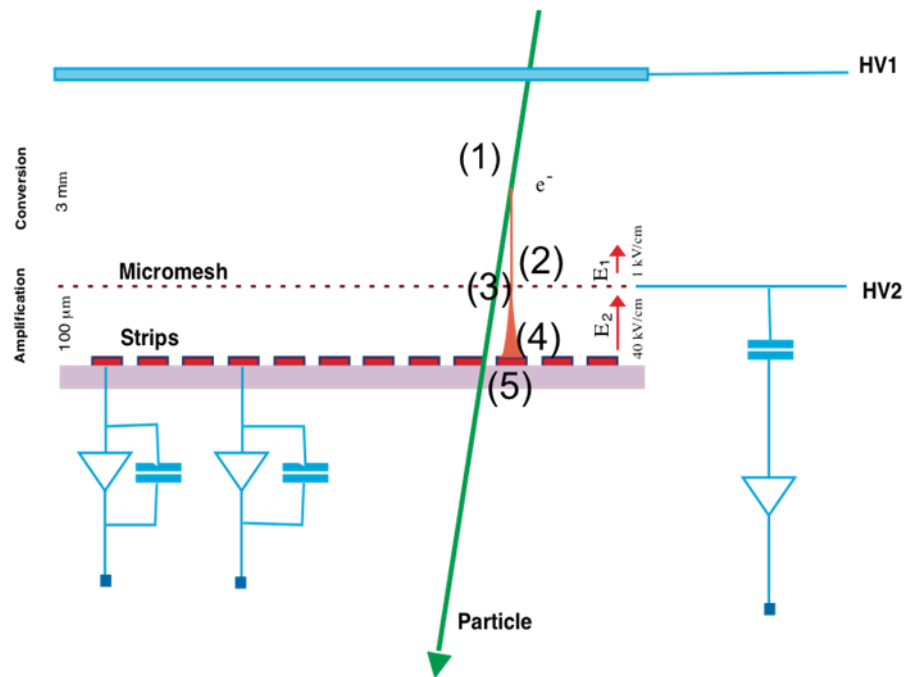
■对探测器的(多路)信号进行模拟放大和数字化处理，并获取其**电荷**、**时间**等信息

□信号的电荷量与粒子在探测器中的能量沉积直接相关

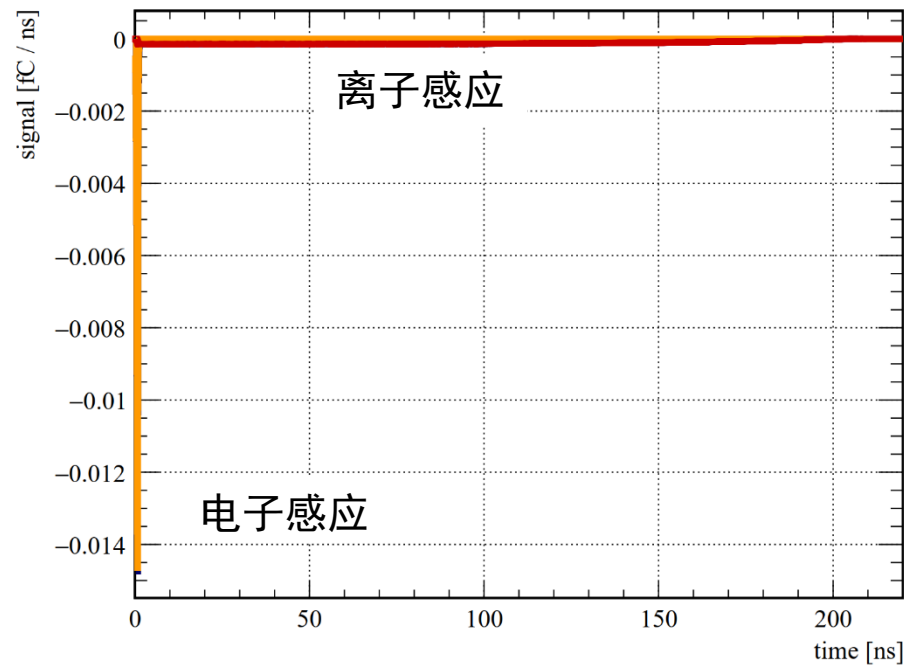
□信号对应的通道编号隐含了粒子与探测器相互作用的位置信息



MPGD信号的波形特点



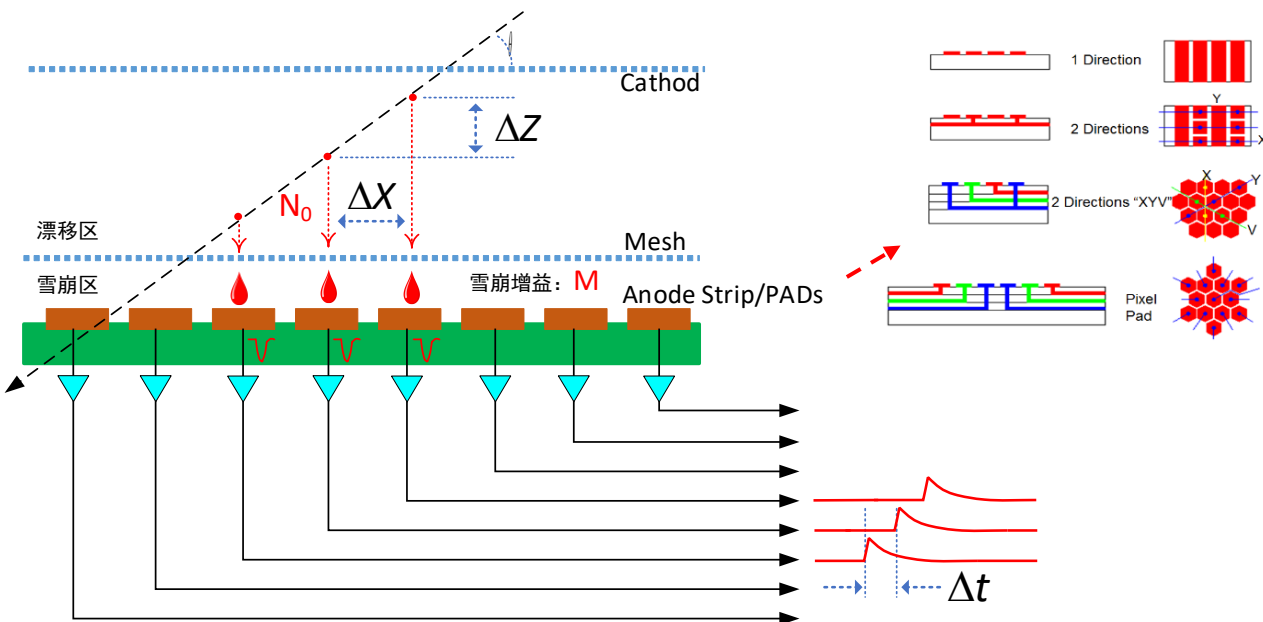
以Micromegas举例



Micromegas阳极信号电流波形

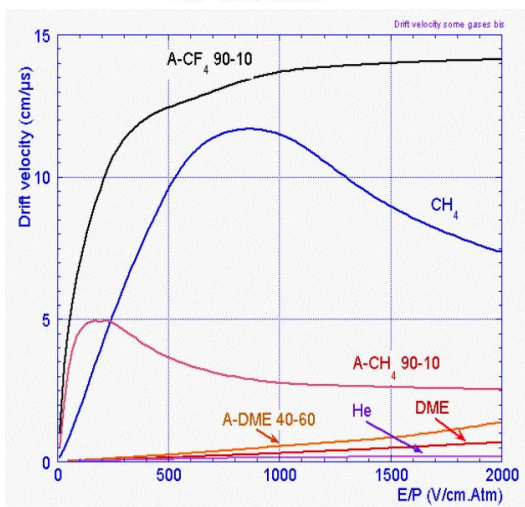
- 雪崩（放大）区的电子、离子在电场作用下运动，在电极上产生感应电流
 - 丝网：正信号，阳极：负信号（**实际应用中主要关注阳极信号**）
 - 丝网信号的电荷量 = 各路阳极信号的电荷量之和
- 感应电流包含快、慢成分，分别由电子、离子漂移贡献，特征时间分别为ns、百ns级
 - 具体由雪崩区电场强度、气隙厚度、工作气体成分/气压等因素综合决定

MPGD信号的时间-空间分布特征

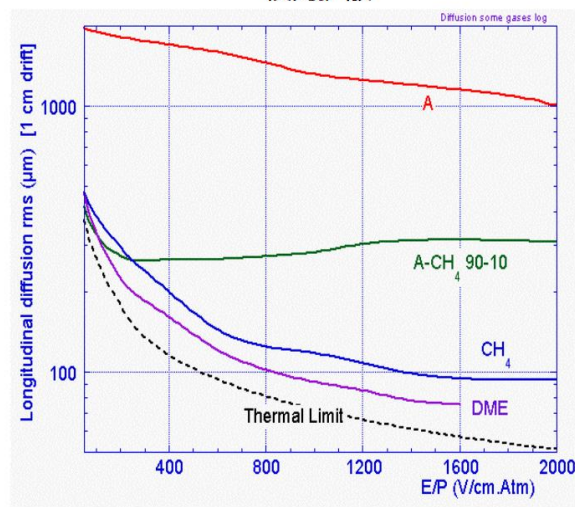


Ref. from: J. Pancin, GANIL/STP

电子漂移速度



横向扩散



- 相邻通道信号的时间差

$$\Delta t = \frac{\Delta Z}{V_{drift}} = \frac{\Delta X \cdot \tan \theta}{V_{drift}} \sim \frac{\Delta X}{V_{drift}}$$

- 假设阳极条间距按1mm，漂移速度按1-5cm/μs，则 $\Delta t \sim 20 - 100\text{ns}$

常规应用中，MPGD对读出电子学的指标要求（以波形采样为例）：

定时精度 ~ns量级，采样率 ~数十MSPS，采样窗口 ~μs量级

MPGD信号的幅度特征

MPGD典型工作气体的电离特性（对MIP粒子）

气体类型	平均电离能 (eV)	dE/dx (keV·cm ⁻¹) (1bar、MIP粒子)	N ₀ (cm ⁻¹)
Ne	30	1.45	50
Ar	25	2.65	106
Xe	22	6.87	312
CH ₄	30	1.61	54
C ₂ H ₆	26	2.91	112
i-C ₄ H ₁₀	26	5.67	220
CO ₂	34	3.35	100
CF ₄	54	6.38	120

Ref. from: J. Pancin, GANIL/STP

- 信号幅度(电荷量): $Q = ne = N_0 \cdot M \cdot e$
漂移区电离产生的电子数 MPGD增益 单位电荷

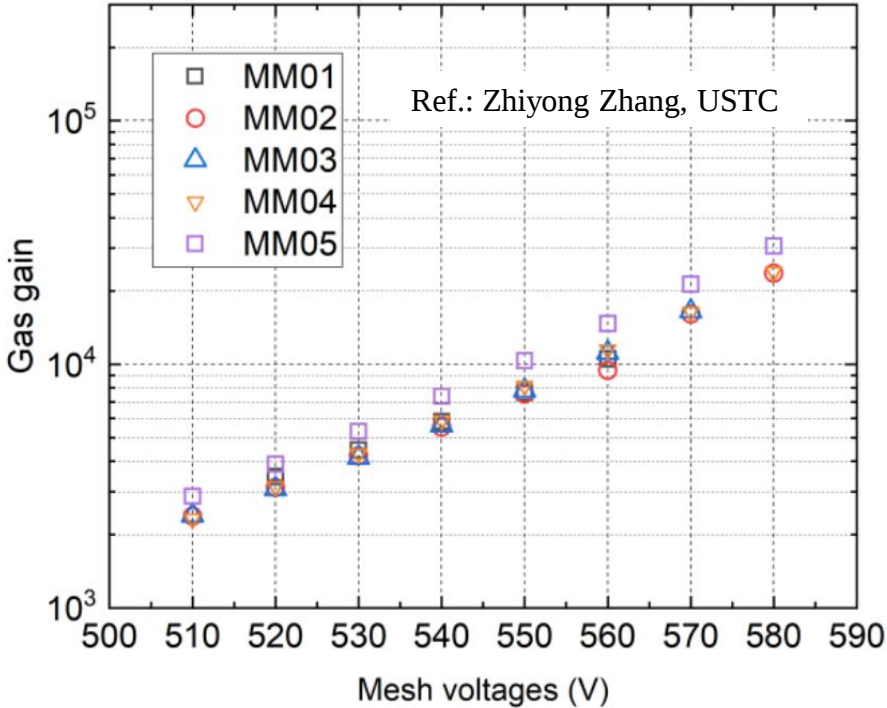


- 假设采用1bar Ar作为工作气体，假定增益典型值为6000，采用1mm的阳极条，则对于MIP信号，

$$Q_{\text{strip}} = (106/10) \times 6000 \text{ e} \approx 10\text{fC}$$

实际信号幅度不仅取决于探测器物理参数，还与粒子种类、能量直接相关

MPGD典型的增益-工作高压曲线



MPGD信号的幅度特征（续）

- 带电粒子在物质中的电离能损（Bethe-Bloch公式）

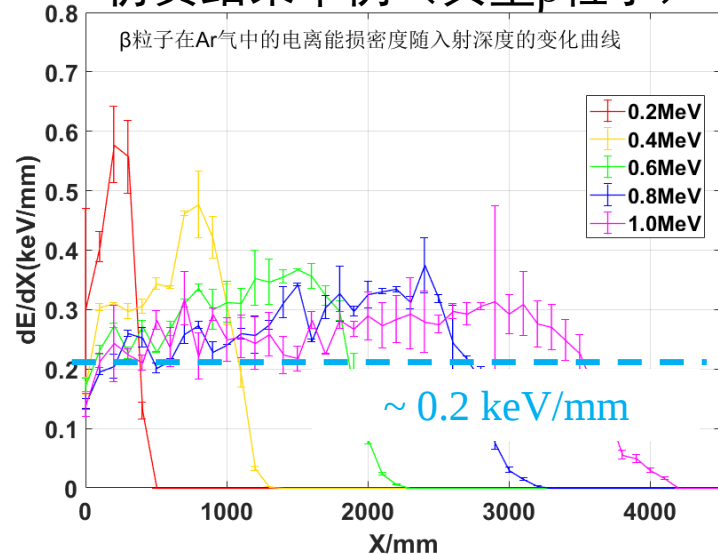
$$\frac{-dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

入射粒子
电荷数

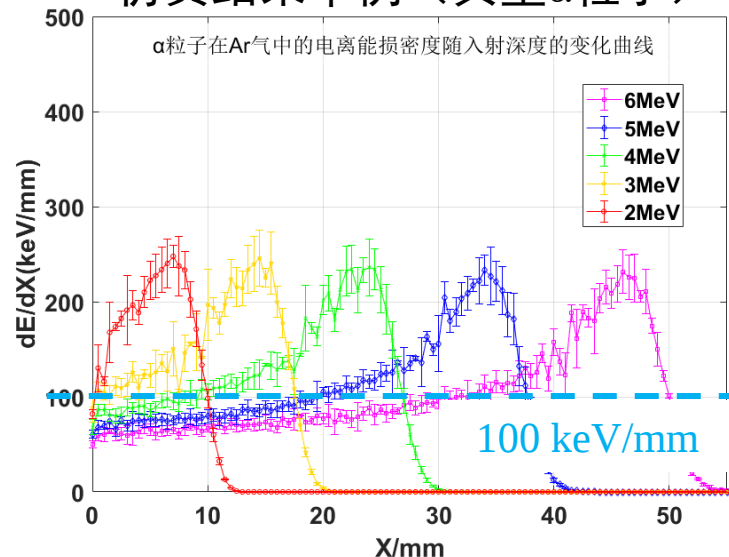
探测器材
料相关

与入射粒子
速度相关

仿真结果举例（典型β粒子）



仿真结果举例（典型α粒子）



■ 具体信号幅度与阳极条（PAD）所对应的径迹中的空间位置有关

■ 同样条件下，如β粒子的信号幅度为10fC，则α信号幅度可达5pC（相差500倍）

■ 对于重离子，信号幅度更大

前端电子学的增益设计至为关键，既要考虑探测器参数，也要考虑具体的物理应用场景

对于大动态范围的应用，很可能还需要考虑通道之间的串扰

MPGD读出电子学面临的挑战

• 低噪声

- 典型MIP信号幅度 $\sim$ fC量级 ($1 \text{ fC} \approx 6000e$) 或更小, 要求电子学噪声应远小于信号幅度
 - 理论上: 如最小拟测信号为1fC, 按5倍信噪比, 要求接探测器之后的系统噪声RMS应达到0.1~0.2fC ($\sim 1000e$)
- 对大面积MPGD, 信号传输路径长 (数十cm), 探测器等效电容大 (数百pF), 电子学的低噪声设计难度更大

• 大动态范围

- 典型的大信号幅度可达数 pC 至数十 pC, 可比最小信号大数千倍 (甚至更多)
- 典型场景: 核物理实验/中子核数据测量 TPC (往往既要测轻带电粒子, 也要测重核碎片)

• 高集成度 (高通道密度、低功耗、低成本)

- 单个探测器模组的通道数为数十到上千路, 系统总规模可高达数千, 乃至万路以上

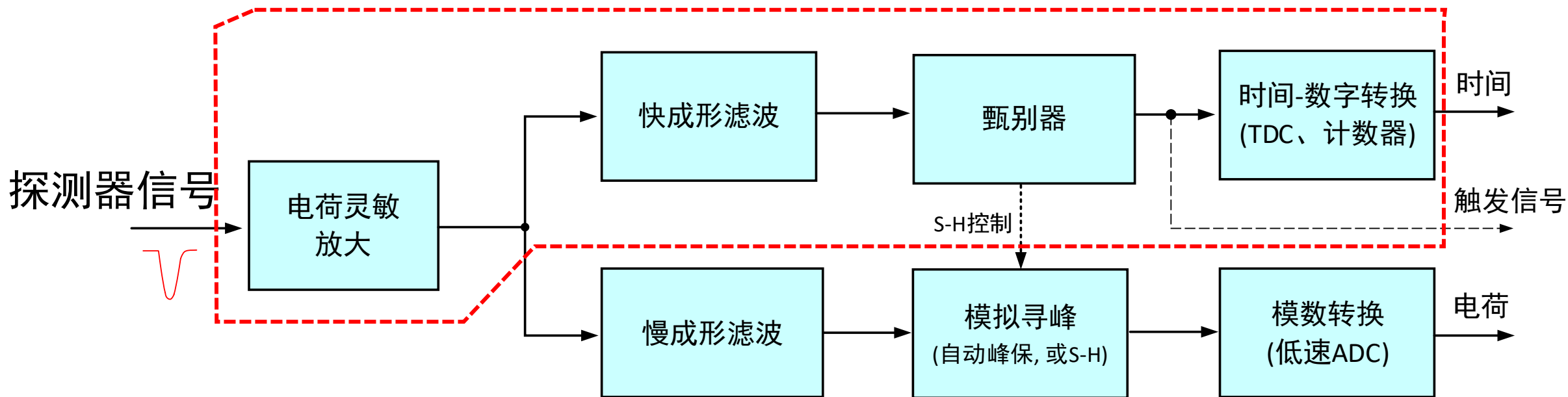
报告提纲

- 微结构气体探测器 (MPGD) 及其读出需求
- **MPGD的前端电子学与典型集成芯片**
- MPGD通用电子学系统相关工作介绍
- 技术前沿展望

MPGD前端电子技术路线

- 技术路线1：电荷灵敏放大 + 模拟寻峰/甄别 (经典技术路线)

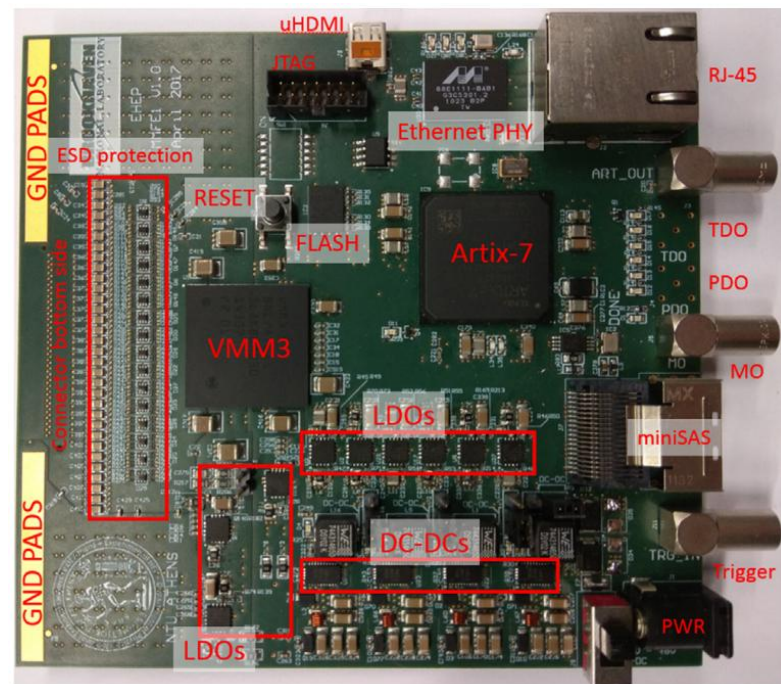
技术路线1的变形：TOT、数字化读出



随着MPGD空间分辨提升、面积增加，对电子学集成度有了更高的要求，
TOT、数字化读出将成为新的趋势

前端读出芯片：VMM

- [illegible]

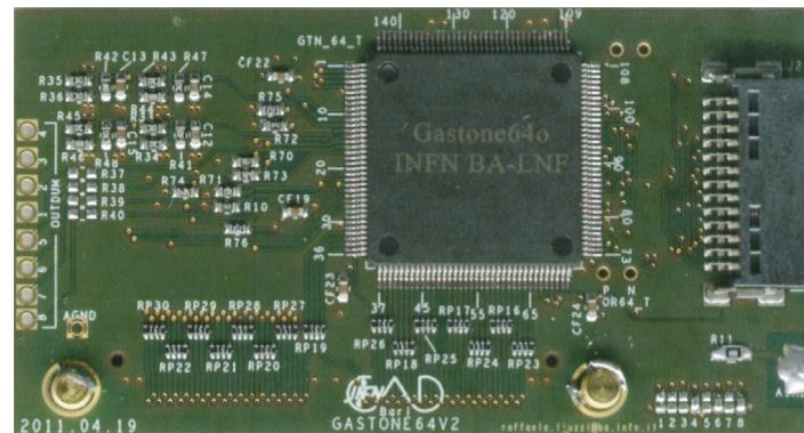
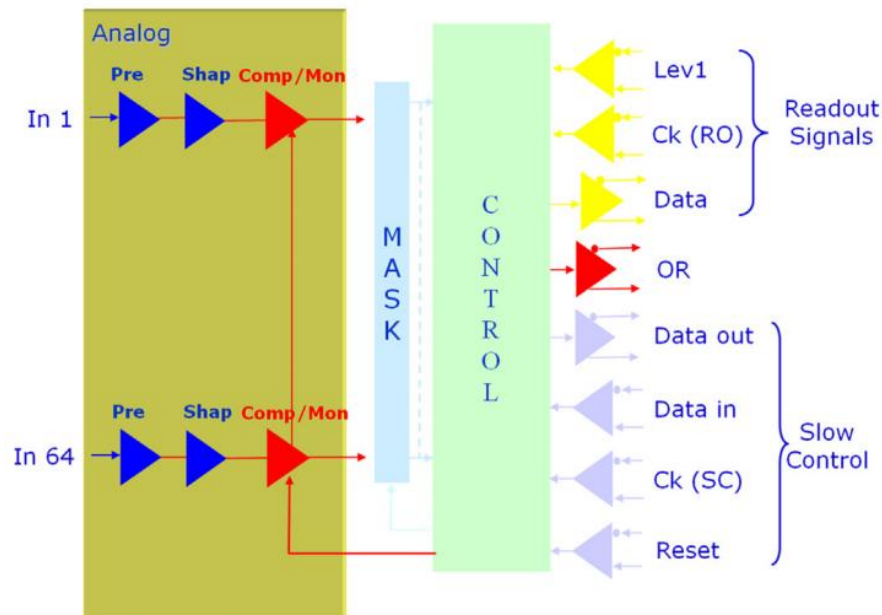


12

KLOE-2 内径迹GEM探测器读出电子学

前端读出芯片：Gastone

- 技术方案：CSA + Shaper+甄别
- 单芯片：64通道
- 增益：16 mV/fC
- 达峰时间：90 ns
- 噪声：800 e⁻ + 40 e⁻ /pF
- 串扰：< 3%
- 功耗：6 mW/ch
- 读出：LVDS (100 Msps)

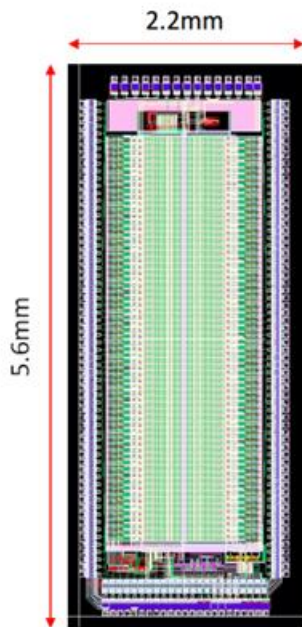
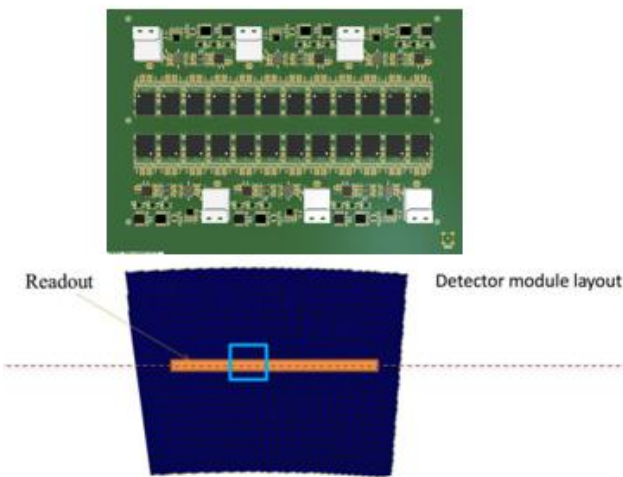
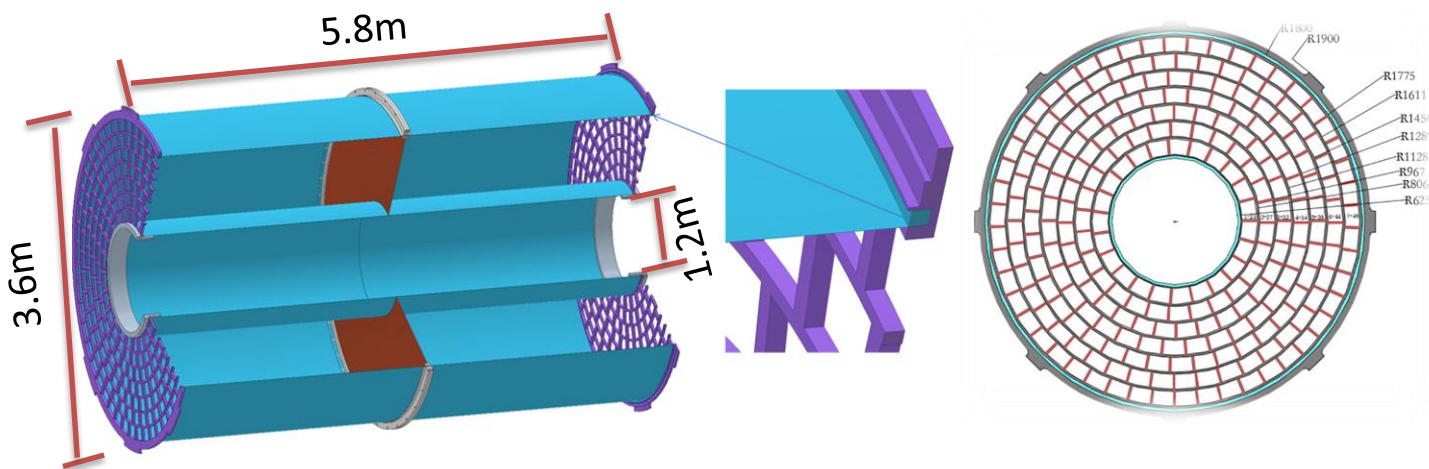


A. Balla, GASTONE64: A new front-end ASIC for the cylindrical GEM Inner Tracker of KLOE-2 experiment at DAΦNE, *NIMA*, 2013

CEPC ref-TDR的TPC读出电子学

前端读出芯片：TEPIX

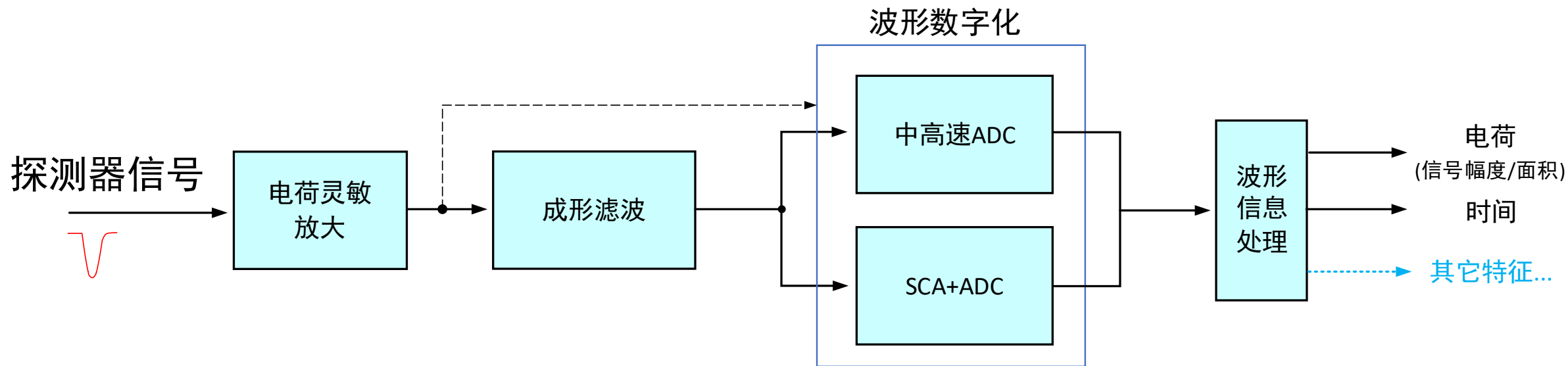
- 技术方案：TOA + TOT
- 单芯片：128通道
- 电子学噪声：100e⁻
- 时间分辨：14bit(5 ns bin)
- 180nm工艺功耗：~200mW/cm²



Total number of channels	30 Million per endplate
Pixel size	500 μm $\times$ 500 μm
Equivalent Noise Charge (ENC)	100 e^-
Dynamic range	20 fC
Charge buffer dynamic range	8-10 bit
Event rate	12 kHz/cm ² max. in low-lumi. Z mode
Event size	64 bit
Readout bandwidth	<10 Gbps per module with compression
Power consumption	<100 mW/cm ²

MPGD读出电子技术路线

- 技术路线2：电荷灵敏放大 + 波形数字化



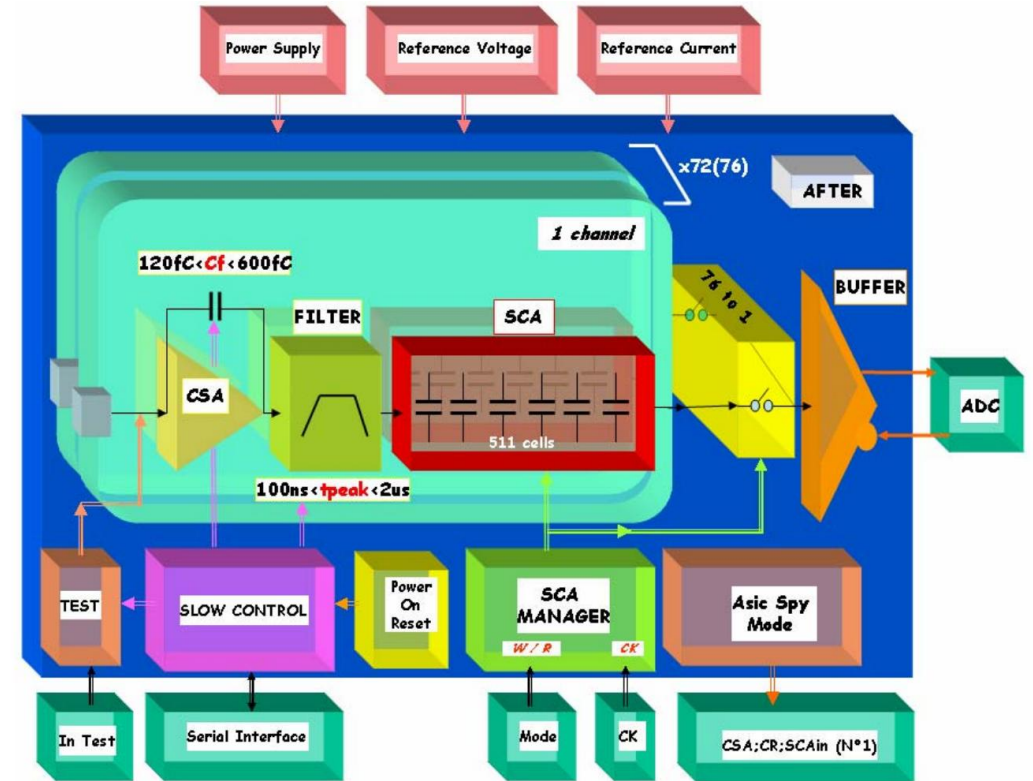
随着ADC、SCA等集成电路技术的成熟，波形数字化得到越来越广泛的应用

利用FPGA或ASIC片内逻辑电路进行信息处理（滤波、特征提取、压缩），也是当前的发展趋势

T2K TPC读出电子学

前端读出芯片：AFTER

Parameter	Value
Number of channels	72
Samples per channel	511
Dynamic Range	2 V / 10 MIPs on 12 bits
MIP charge	12 fC to 60 fC
MIP/Noise ratio	100
Gain	4 values from 4 mV / fC to 18 mV / fC
“Detector” capacitor range	0 pF -40 pF
Peaking Time	100 ns to 2 μ s (16 values)
INL	1% 0-3 MIPs ; 5% 3-10MIPs
Sampling frequency	1 MHz to 100 MHz
Readout frequency	20 MHz to 25 MHz
Polarity of detector signal	Negative (T2K) or Positive
Test	1 among 72 channels or all

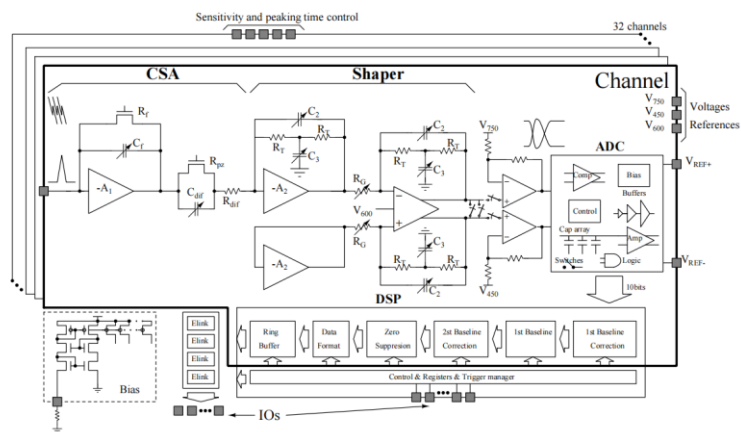


P. Baron *et al.*, "AFTER, an ASIC for the readout of the large T2K time projection chambers.," 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Honolulu, HI, USA, 2007, pp. 1865-1872, doi: 10.1109/NSSMIC.2007.4436521.

ALICE TPC 升级的读出电子学

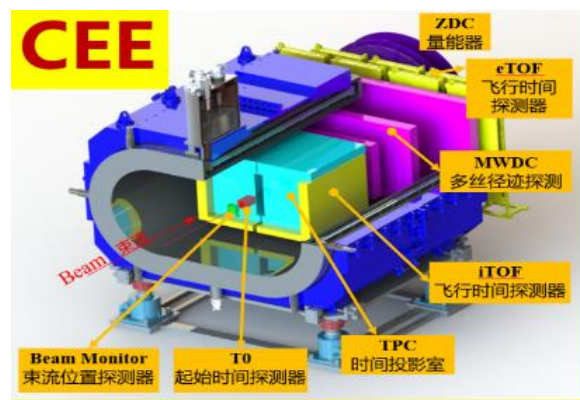
前端读出芯片: SAMPA

- TSMC CMOS 130 nm, 1.25V technology
- 32 channels, Front-end + ADC + DSP
- ADC: 10-bit resolution, 10MS/s, ENOB>9.2
- DSP functions: pedestal removal, baseline shift corrections, zero-suppression
- Data transmission: up to 11 e-link at 320 Mbps to GBTx, SLVS I/O



Robert Münzer, Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber, *NIMA*, 2020

CEE: 低温高密度核物质测量谱仪



也被应用于国内的CEE TPC

CMS硅微条径迹探测器读出电子学

前端读出芯片：APV25

- 单芯片：128通道
- 192 cell analogue pipeline
- 技术方案：CSA + 模拟pipeline cell + 选通 + 差分驱动

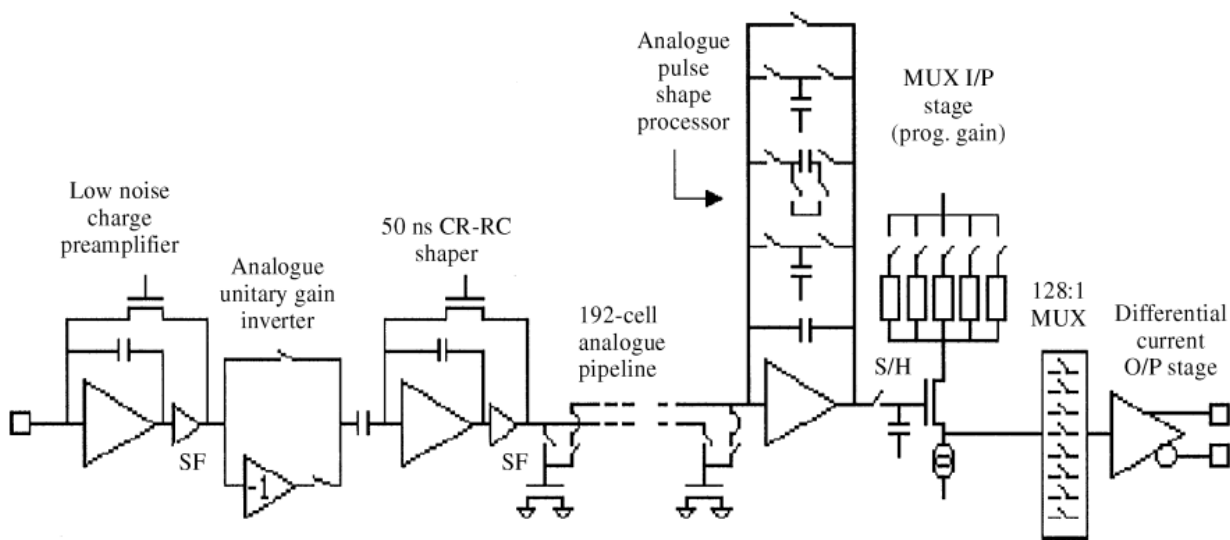
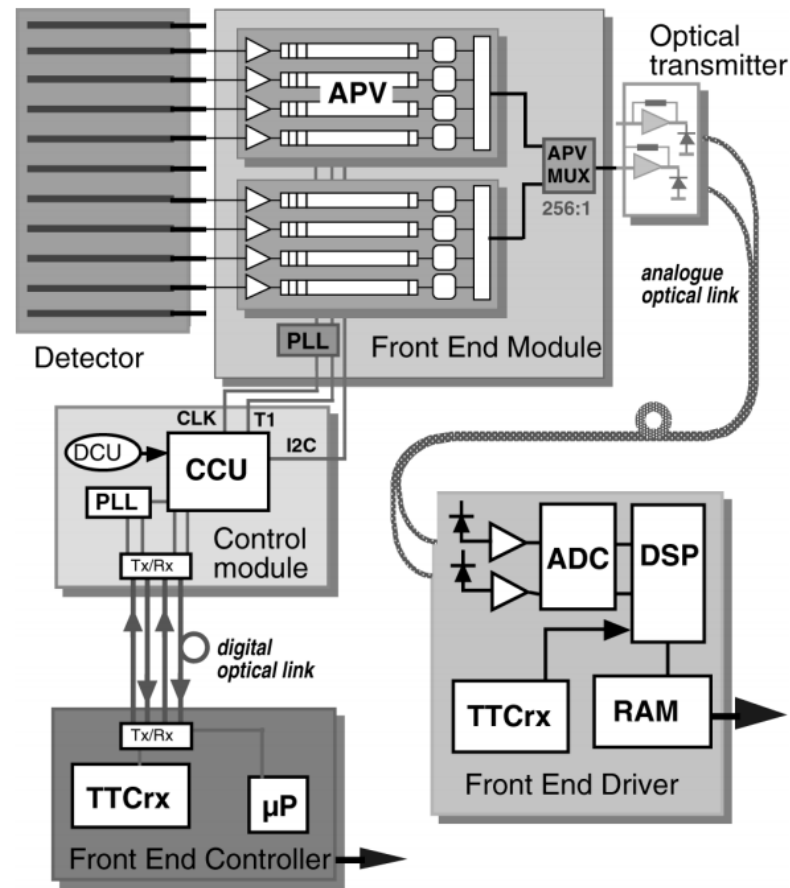


Fig. 1. Block diagram of one channel of the APV25.



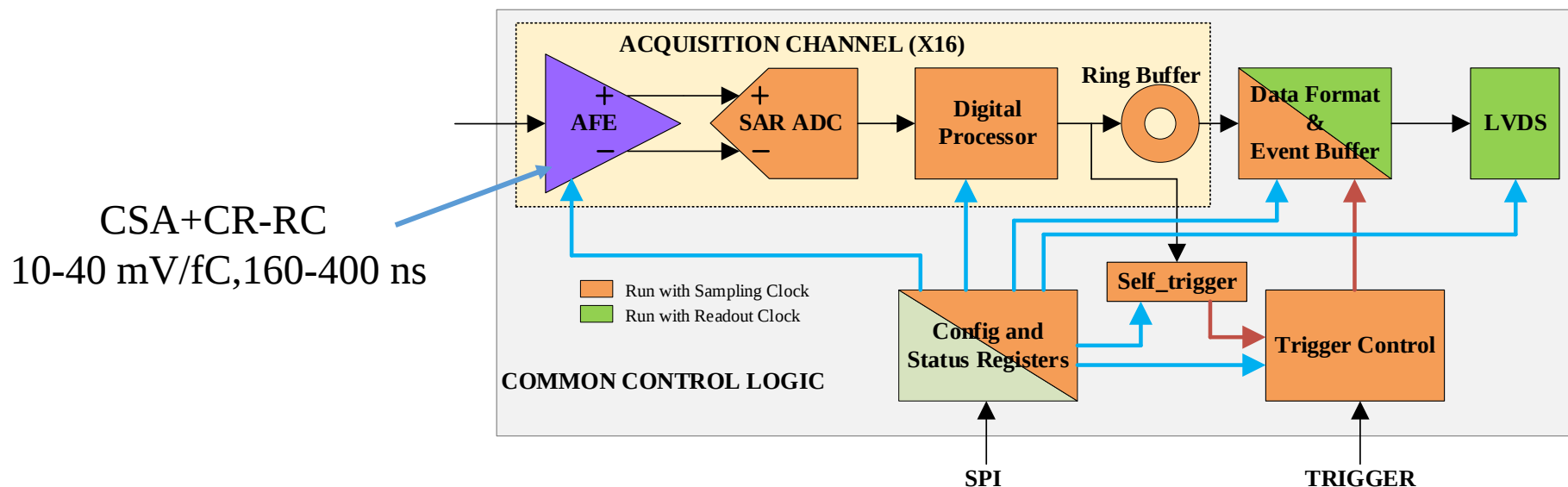
M.J. French, Design and results from the APV25, a deep sub-micron CMOS front-end chip for the CMS tracker, *NIMA*, (2001)

Baird S.A., Design of the Front-End Driver card for CMS Silicon Microstrip Tracker Readout (2000)

(APV25的设计初衷虽然是用于硅微条探测器，但也常被用于MPGD读出，因此本报告也将其作为案例)

清华大学的MPGD读出芯片：WASA

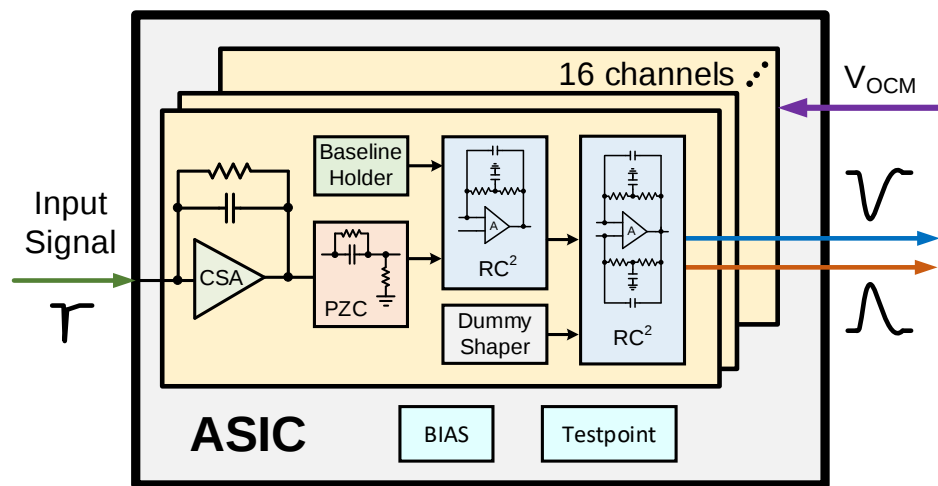
- 技术方案：CSA+模拟CR-RC成形+数字滤波器：基线恢复+数字梯形
- 触发模式：自触发、外触发、外触发加窗
- 二级缓存：Ring buffer+去随机事例缓存器
- 触发延迟：25.6 μs @ 40 MHz（1024采样点），事例缓存深度：4
- 事例大小：1-256采样点
- 读出带宽：3.2 Gbps



来源：清华大学 邓智

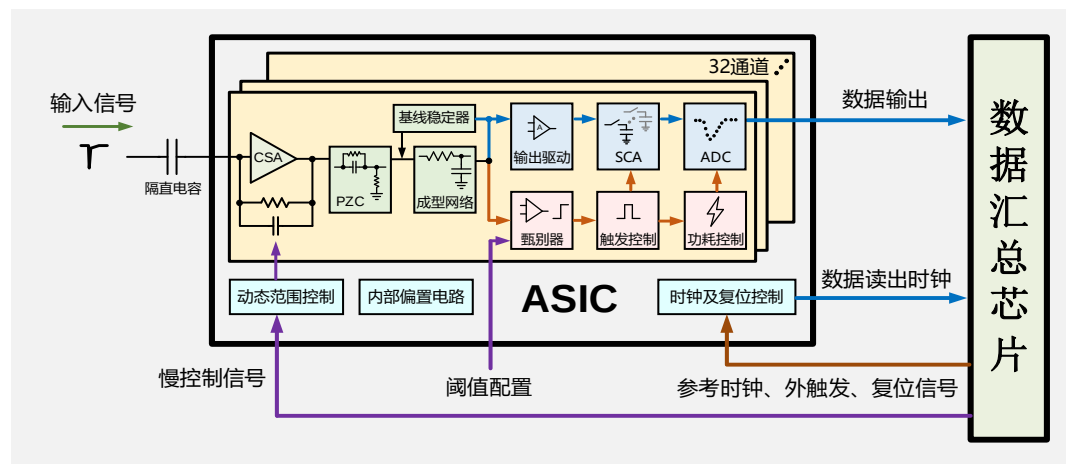
中科大的MPGD读出芯片

- 大动态范围TPC读出芯片
- 单片16通道，具有2pC、10pC两个量程
- 输入电容100 pF时，仍可实现较高的信噪比



16通道模拟输出原型芯片

- STCF PIDB (RICH) 32通道波形数字化芯片
- 单芯片同时包含前端模拟调理电路与ADC
- 同时兼容自触发与外部触发两种工作模式
- 全数字化输出，芯片输出数据可直接送入FPGA



32 通道波形数字化读出原型芯片

来源：中国科学技术大学 赵雷

近代物理研究所的模拟读出芯片：FEAM、FEAT

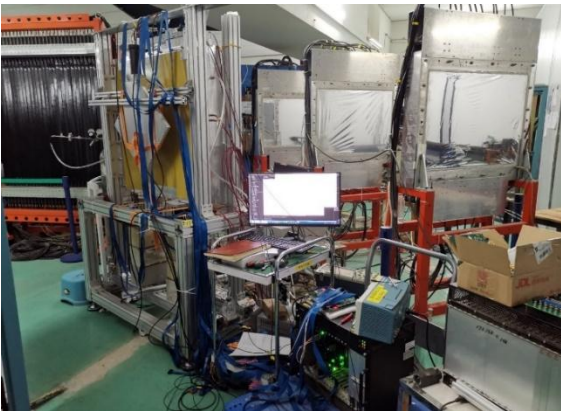
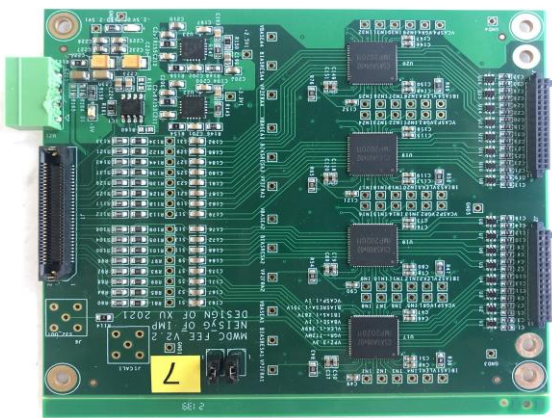
FEAM

性能指标	数据
增益	1mV/fC
动态范围	10fC-1pC可调
成形时间	80ns/160ns/1us
计数率	10kHz
功耗	6.6mW/ch
通道数	8

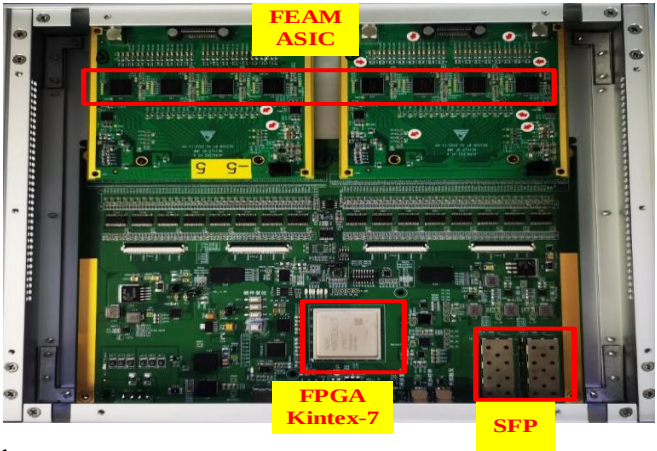
FEAT

性能指标	数据
动态范围	125fC、1pC、2pC、10pC
成形时间	80ns 、160ns
计数率	1MHz
输出	差分输出
通道数	16

FEAM的应用：CEE-MWDC的前端读出



HFRS-TPC的前端读出

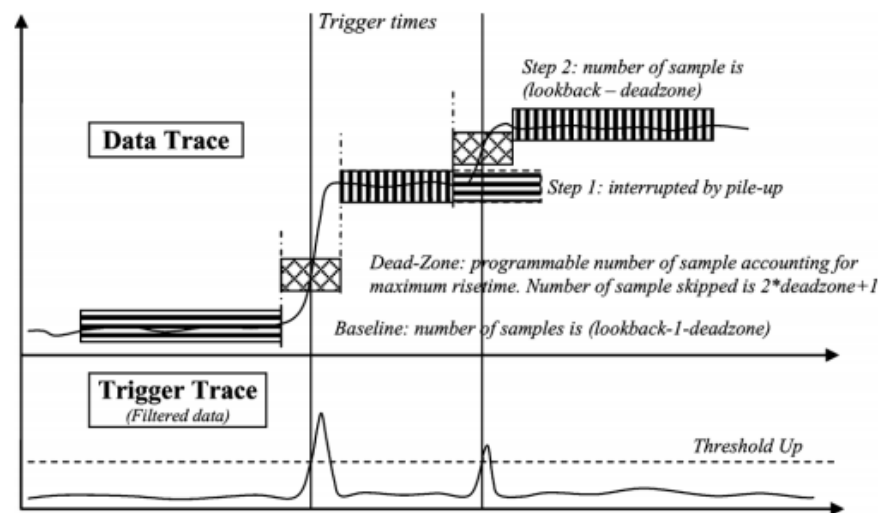
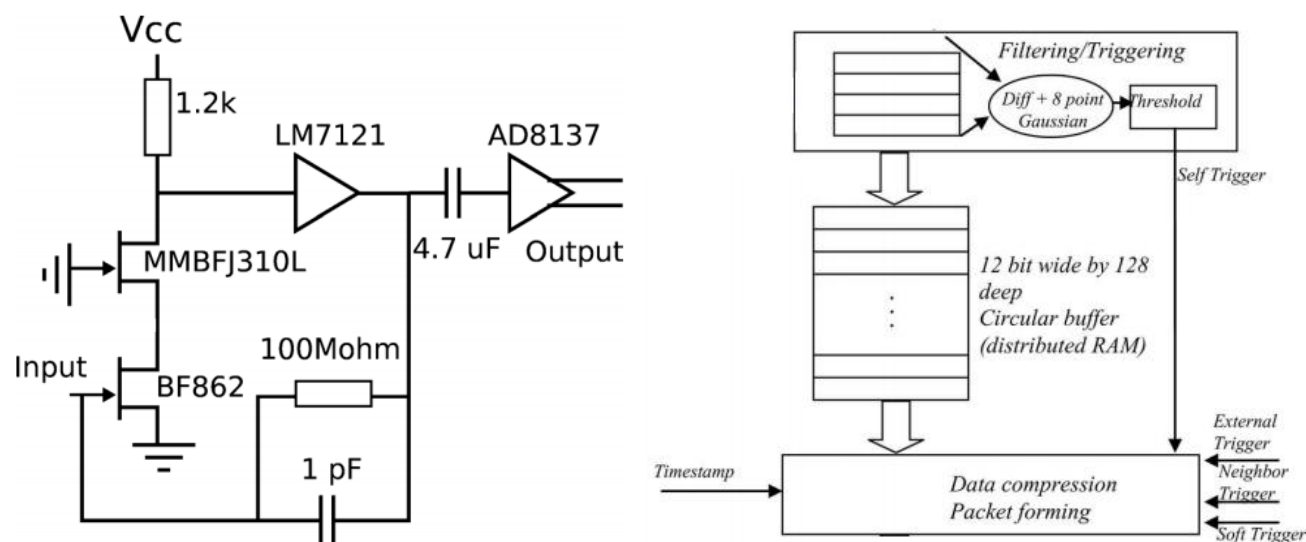


来源：中科院近代物理研究所 干奕

美国NIFFTE实验的TPC读出电子学

- NIFFTE读出电子学系统（基于分立器件）
 - 规模：5952通道（高事例率）
 - 读出技术方案：CSA+数字化+数字滤波
 - 触发方式：通道自触发
 - 数据压缩：幅度、时间提取

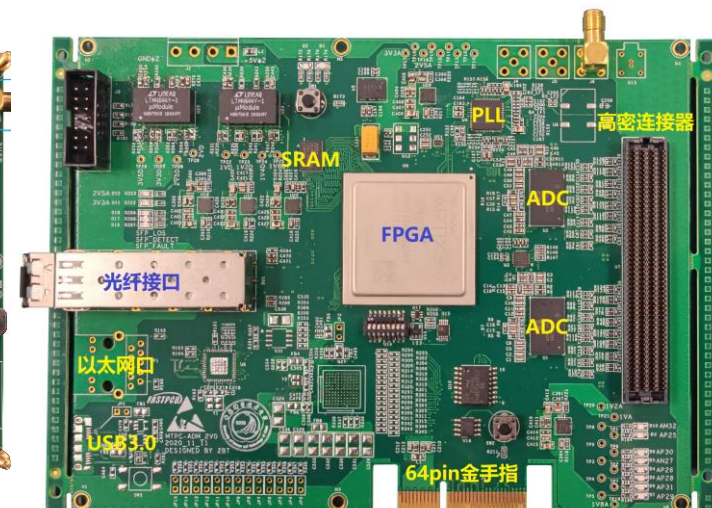
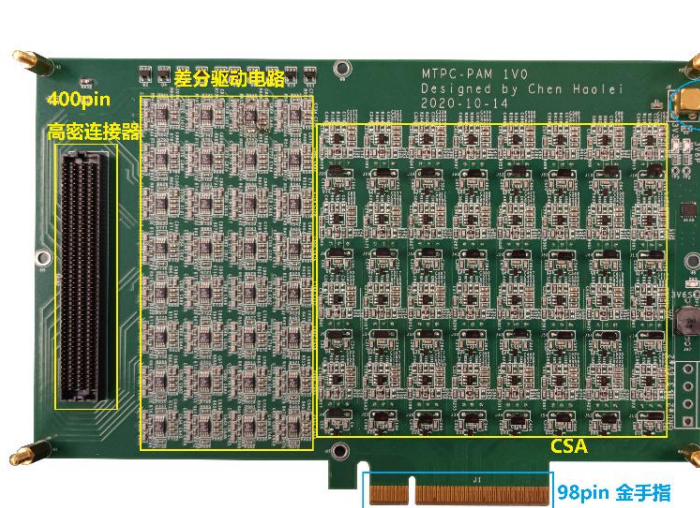
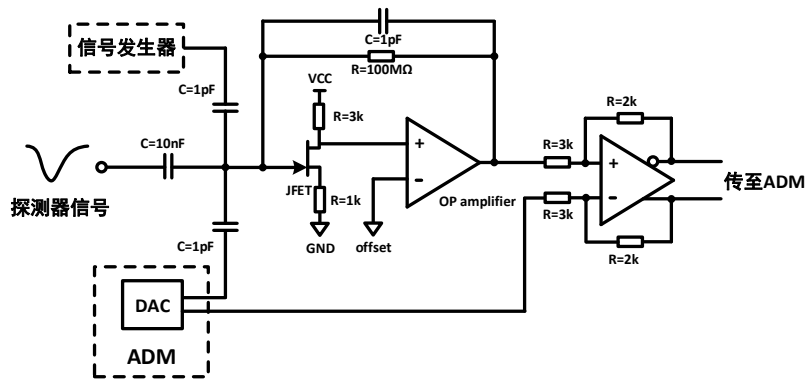
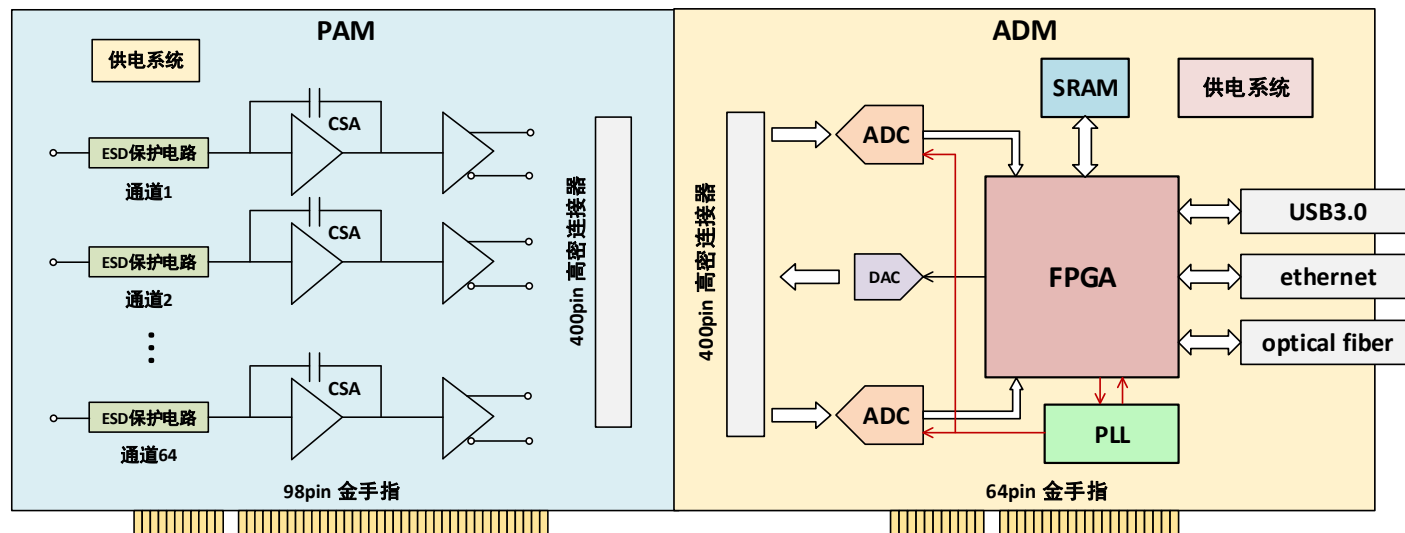
- 模块化设计的架构（可扩展性强）
- 基于分立元件实现CSA（性能调节灵活）
- FPGA数字滤波（集成度高、功耗低）
- 多通道并行数字化及自触发（死时间短）



CSNS Back-n MTPC读出电子学

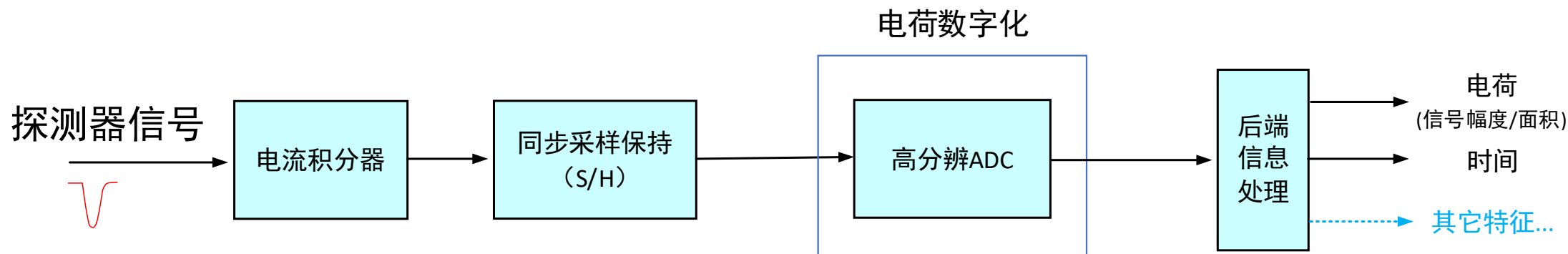
原型MTPC读出电子学：1519路

- 前放模块（PAM）
 - 64通道CSA+差分驱动
- 数字化模块（ADM）
 - 64通道
 - ADC: 40MSPS, 12bit
 - FPGA数字滤波



MPGD读出电子技术路线

- 技术路线3：门控电流积分+ 数字化



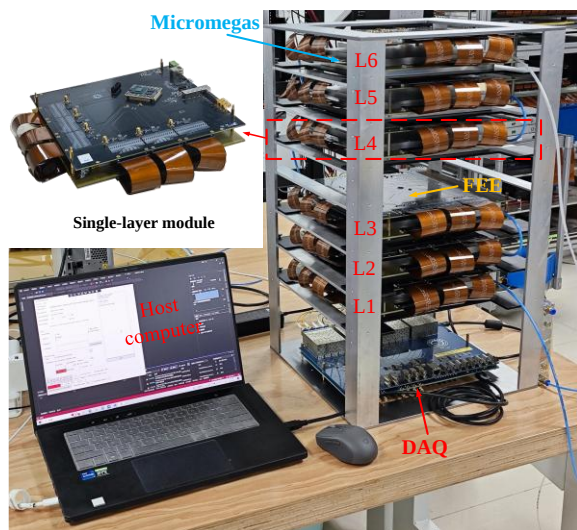
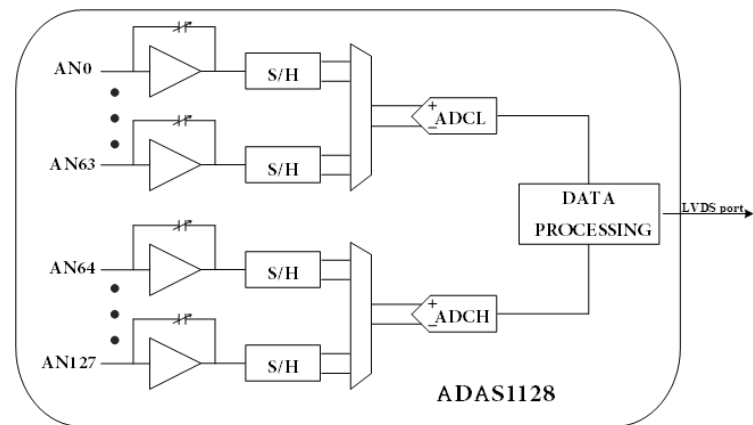
门控积分式电荷数字化具有高集成度、低噪声和大动态范围

适用于对**计数率要求相对较低，但通道规模庞大**的MPGD 的电荷读出与二维成像

中科大基于Micromegas的缪子成像系统读出电子学

前端读出芯片：ADAS1128

- 技术方案：（门控）电流积分 + 数字化
- 单芯片：128 通道
- 积分时间：50.7 ~ 900 μs 可调
- 动态范围：-660 fC ~ 32.23 pC 可调



S. Liu et al., “**FIGURES: A Versatile Readout System for High-Granularity Muography Detectors**,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Oct. 2025

中国科学技术大学，刘树彬、王宇、封常青 等

报告提纲

- 微结构气体探测器 (MPGD) 及其读出需求
- MPGD的前端电子学与典型集成芯片
- **MPGD通用电子学系统相关工作介绍**
- 技术前沿展望

国内的MPGD读出通道需求统计 (2026.7)

单位	当前通道规模	未来通道规模	探测器类型	应用背景	备注
上海交通大学	6656	待定	Micromegas	PandaX-III TPC	
复旦大学	2048	待定	Micromegas	fMata-TPC	
中国散裂中子源	1519 (原型机)	1519×2、 ~20000	Micromegas	MTPC、 束流望远镜	核数据 束流监测
	~3000	>10000	陶瓷GEM	CSNS 中子谱仪	近30台套
中国科学院大学	~1024	待定	THGEM+Micromegas、 气体倍增管	TPC研发、RICH预研、 Migdal效应测量	
中科院近物所	4096、756	~1万路	GEM、Micromegas	核物理实验 TPC	
高能物理研究所	50000、~1000 (原型机)	~10 ⁷ ? ~50万?	Micromegas	CEPC TPC、 台山TAO-TPC	像素读出 ASIC芯片: THU
广西大学	~1024	~6000	THGEM	HERD TRD	CCNU、IMP参与
中国原子能院	>2048	待定	Micromegas	探测器研究、 核数据TPC	
中国科学技术大学	> 5万	> 10万	GEM、Micromegas	缪子成像 (μSTC) 、 STCF预研	

据最新不完全统计：目前国内MPGD的通道规模已超过10万路，未来（3-5年内）有可能将增长到数十万路

国内的MPGD应用现状

近年来，MPGD对读出电子学的需求不断增长

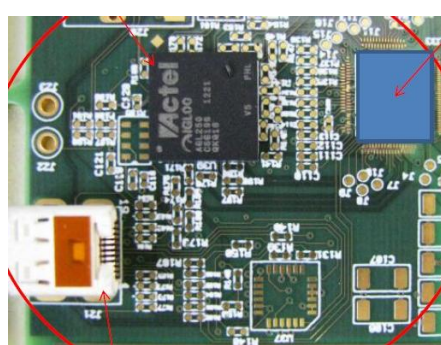
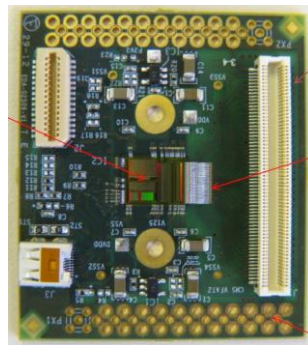
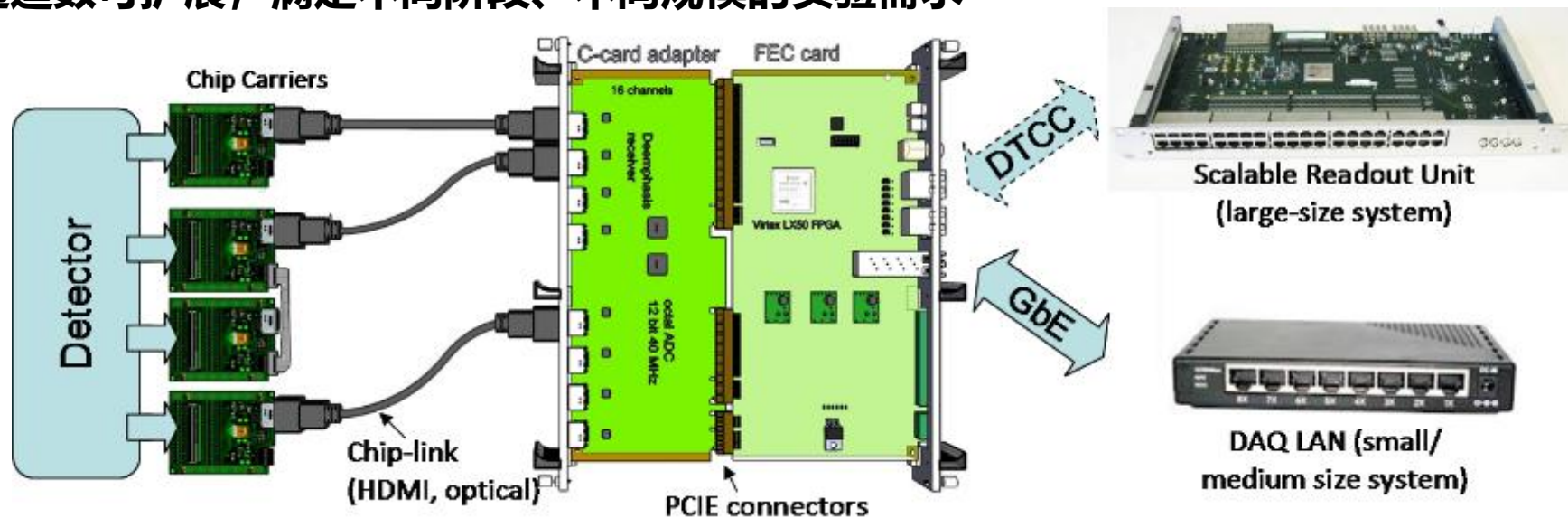
- 应用场景多样化
 - 既有大科学装置的工程需求，也有中小规模实验，以及探测器研发、核技术应用等需求
- 探测器类型丰富
 - Micromegas、GEM、THGEM、 μ RWELL、 μ RGroove 。。。
- 通道规模既有静态差异，也有动态变化
 - 不同的应用场景，科研项目或实验不同的工程阶段，读出通道的规模都可能存在变化
- 现有的商业读出系统（插件模块）难以适应全部需求
 - 如为中小型的实验或探测器研发项目独立定制电子学系统，研制周期长，成本高昂

**研制通用、可扩展的读出电子学，
对于推动MPGD探测器研发，以及中小规模的实验应用，都具有重要意义，
也能更好地支持大科学装置的预研和建设！**

CERN SRS可扩展电子学系统

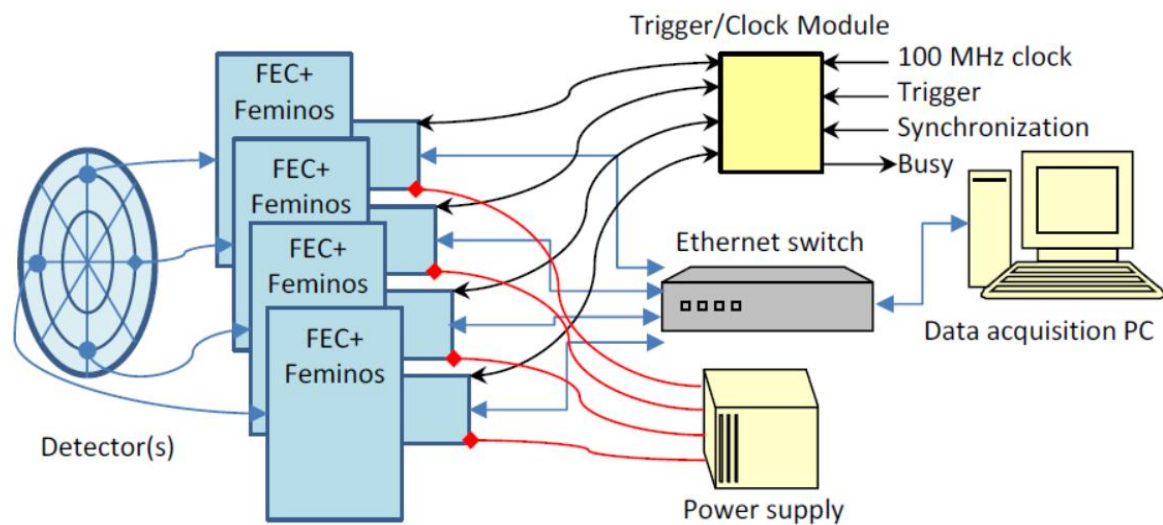
CERN的RD51小组提出了SRS (Scalable Readout System) 的理念

- 可兼容不同ASIC芯片, 满足不同场合的探测器需求
- 通道数可扩展, 满足不同阶段、不同规模的实验需求

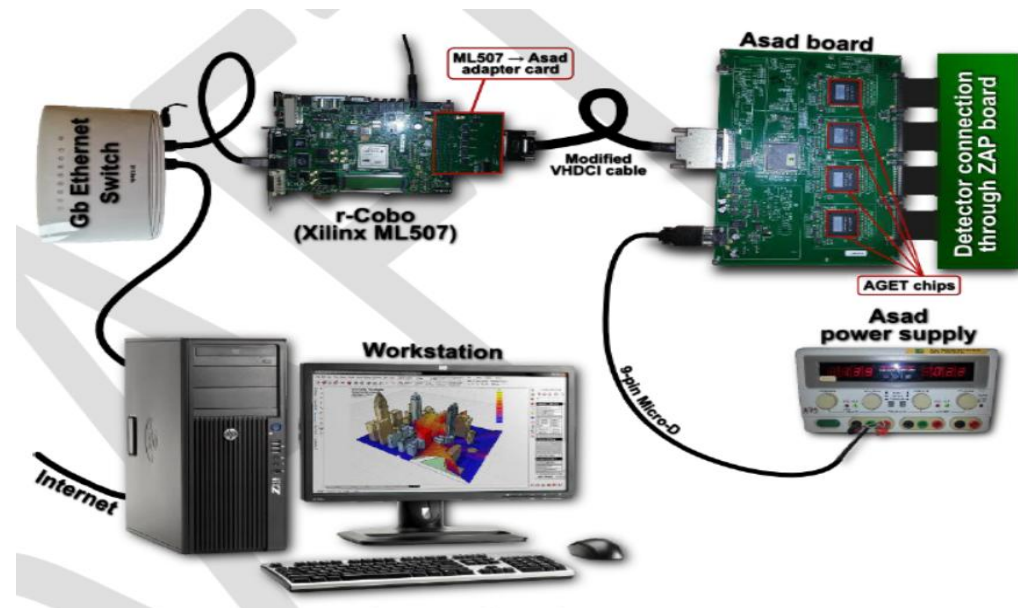


法国Feminos、GET通用读出系统

- 由法国Saclay实验室提出
 - 主要基于该实验室的AFTER、 AGET等系列芯片而开发



Feminos系统



AGET系统

清华大学模块化读出电子学系统——CUBES

- 分布式结构

- 摆脱“控制器+背板+功能插件”的传统结构
- 支持超长物理距离的光纤/铜线连接
- 节点数量任意扩展

- 模块化

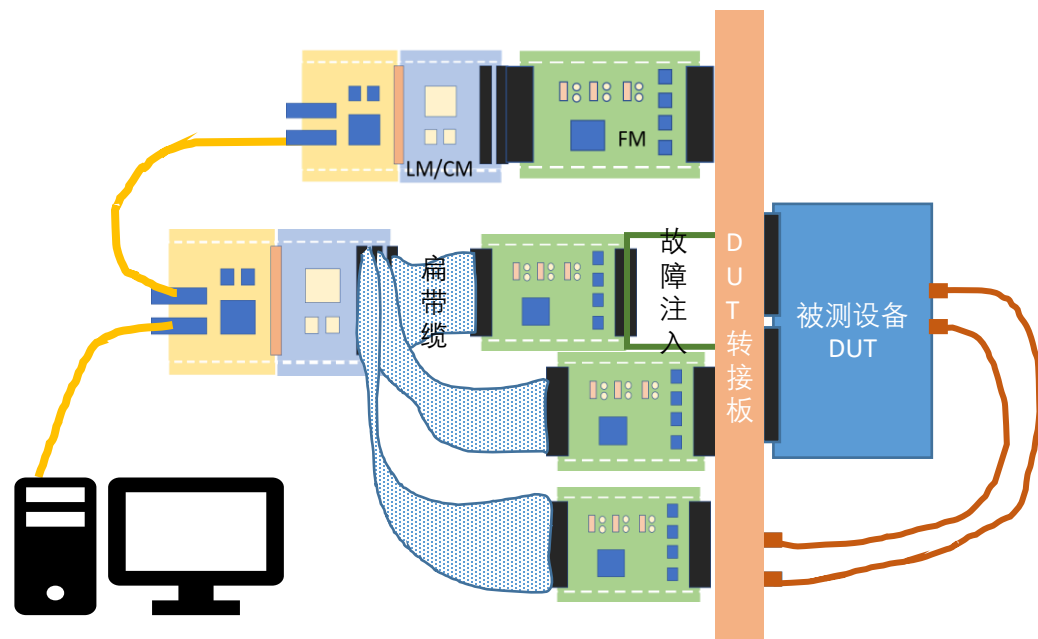
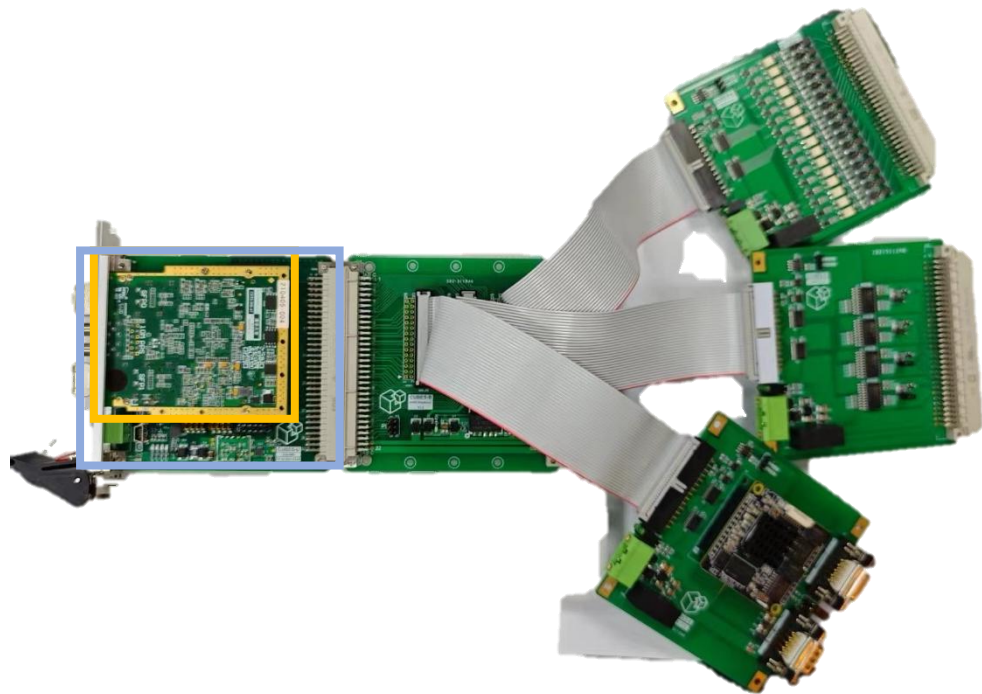
- 按“通信/处理/电气”进行硬件分层，不同层级可互换组合
- 支持柔性连接、定制适配连接

- 全网络连接

- 标准以太网，兼容性好扩展性强

- 时间协同控制

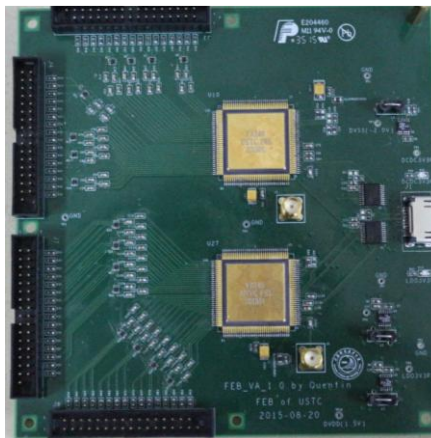
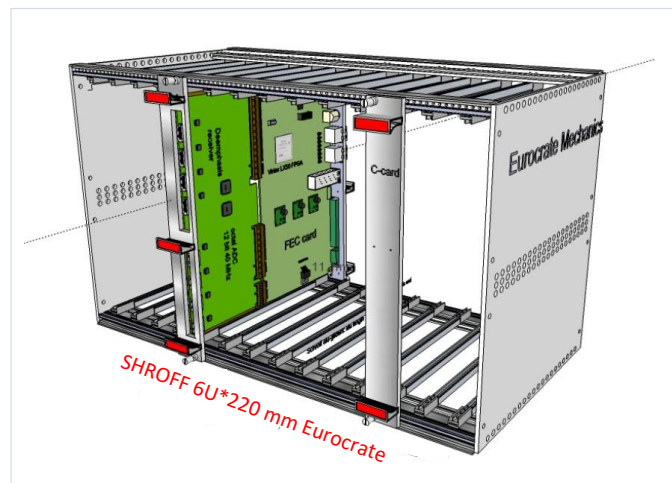
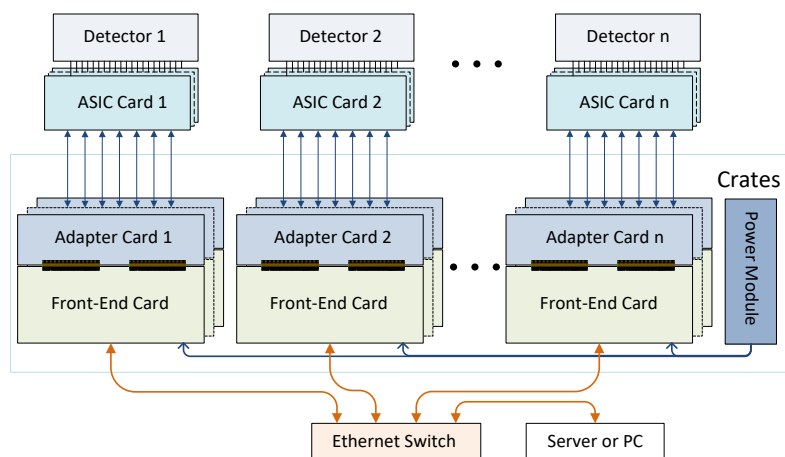
- 全部节点可以达到纳秒级同步
- 支持集成时钟，时间触发和其他基于时间的信号处理



来源：NED2024报告，董建蒙 龚光化 邓智 等

中科大团队的MPGD可扩展电子学前期工作

中科大核探测与核电子学国家重点实验室的电子学团队从2012年就开始了MPGD可扩展读出系统的研究



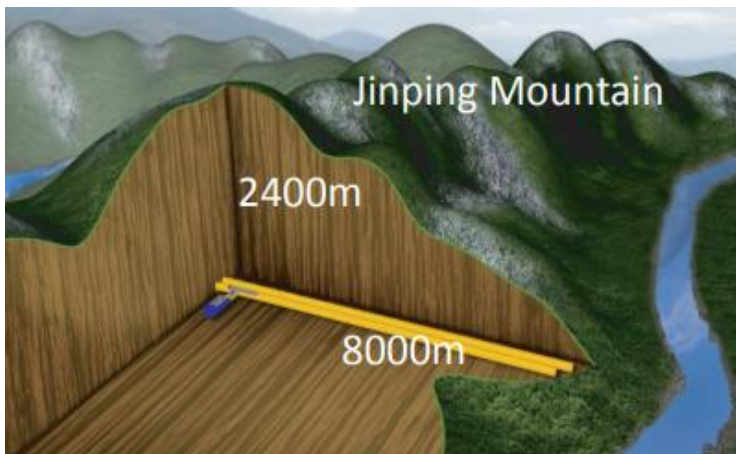
博士学位论文：郑其斌，面向微结构气体探测器的可扩展读出电子学系统研究，2016（导师：安琪、刘树彬）

硕士学位论文：田静，基于AGET芯片的时间投影室前端电子学研究，2016（导师：安琪、封常青）

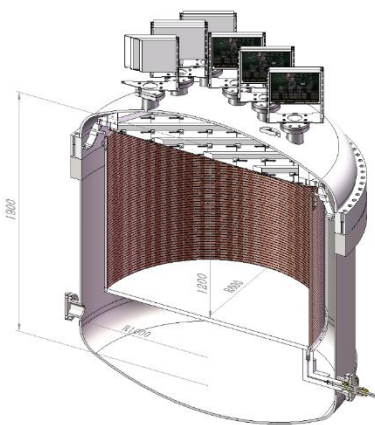
PandaX-III读出电子学

■PandaX-III：大型无中微子双 β 衰变探测实验

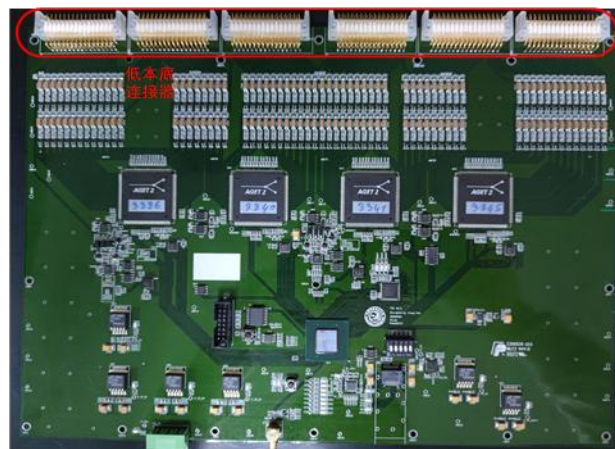
- 对于理解中微子性质，探索标准模型之外的新物理具有重要意义
- 上海交大牵头，计划运行于我国的锦屏地下实验室，2016年得到科技部重点研发计划支持
- 中国科学技术大学是重要参与单位（**报告人作为科研骨干，承担其低本底读出电子学系统的研制任务**）



锦屏地下实验室



PandaX-III TPC装置



PandaX-III低本底前端电子学模块



PandaX-III电子学安装调试

Li C, Feng C Q, Zhu D Y, et al., JINST, 2018.

Danyang Zhu, Shubin Liu, Changqing Feng ,et al., IEEE TNS, 2019.

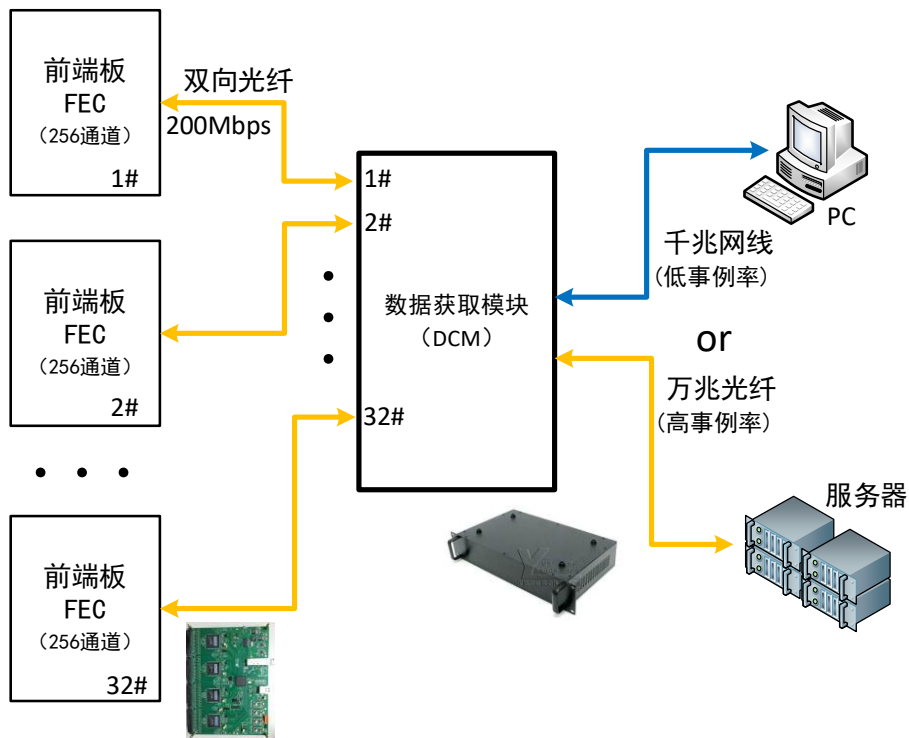
苏杭, PandaX-III实验时间投影室信号读出方法研究[M], 2016 (导师: 封常青)

董家宁, PandaX-III实验前端读出电子学方法研究 [D], 2017 (导师: 刘树彬)

李诚, PandaX-III实验读出电子学系统研究[D], 2018 (导师: 刘树彬 封常青)

第一代USTC MPGD通用电子学：基于AGET-ASIC

- 在PandaX-III电子学基础上，中科大团队开发出第一代MPGD通用电子学系统



- 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

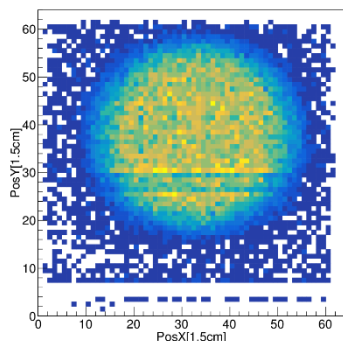


第一代USTC MPGD通用电子学的应用

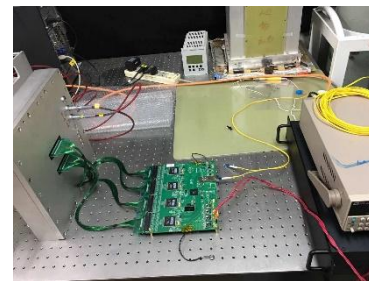
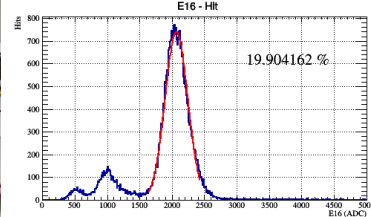
- 被**高能所、近物所、中科院大学、广西大学、散裂中子源**等多家单位成功应用
 - 应用于中科大STCF电子学预研，并多次参与了DESY束流实验
 - 应用于中科大缪子成像研究，并获得学校的学科平台建设的支持



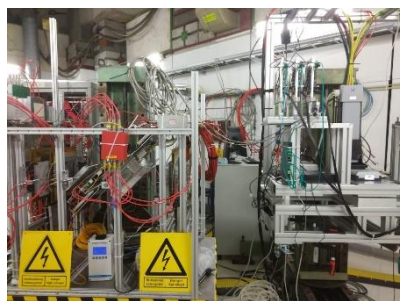
散裂中子源(CSNS)白光束流剖面测量



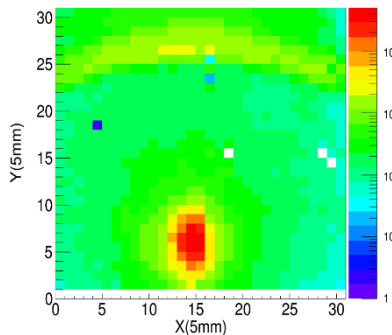
阻性GEM探测器读出（中科院高能所）



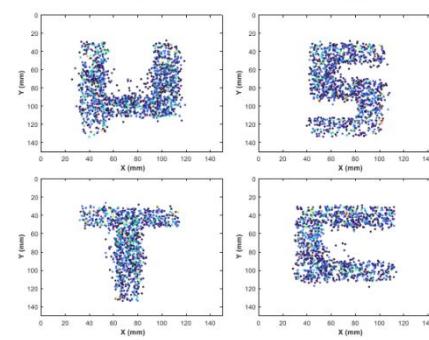
GEM探测器读出（中科院近物所）



STCF DESY束流实验 RHIC探测器预研（中科大）

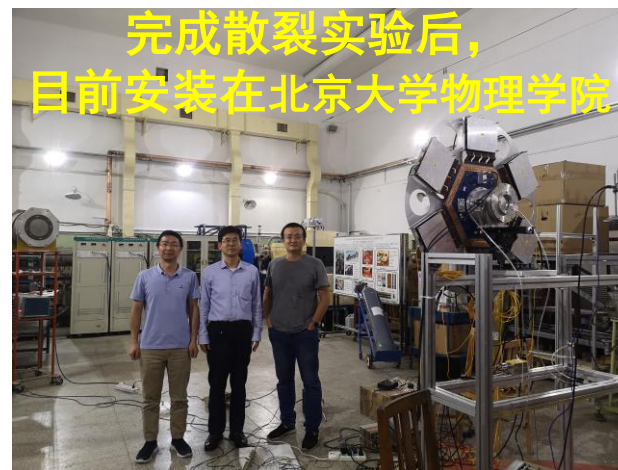
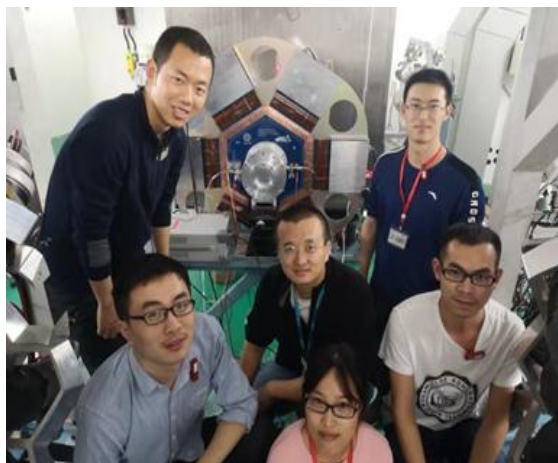
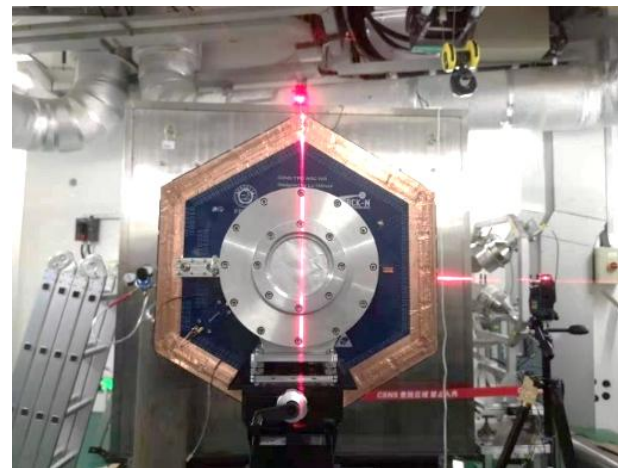
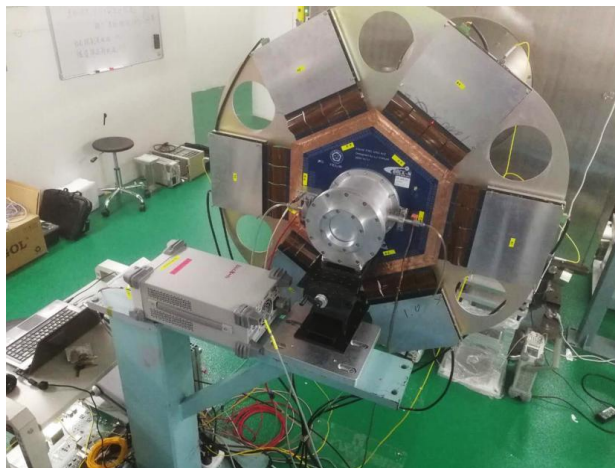
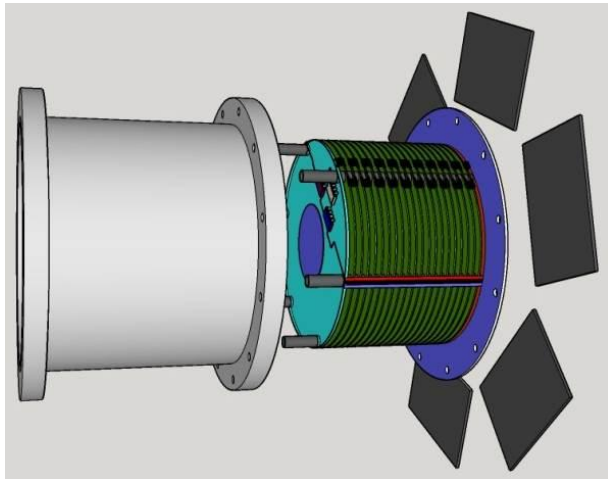


μ STC宇宙线缪子成像系统（中科大）



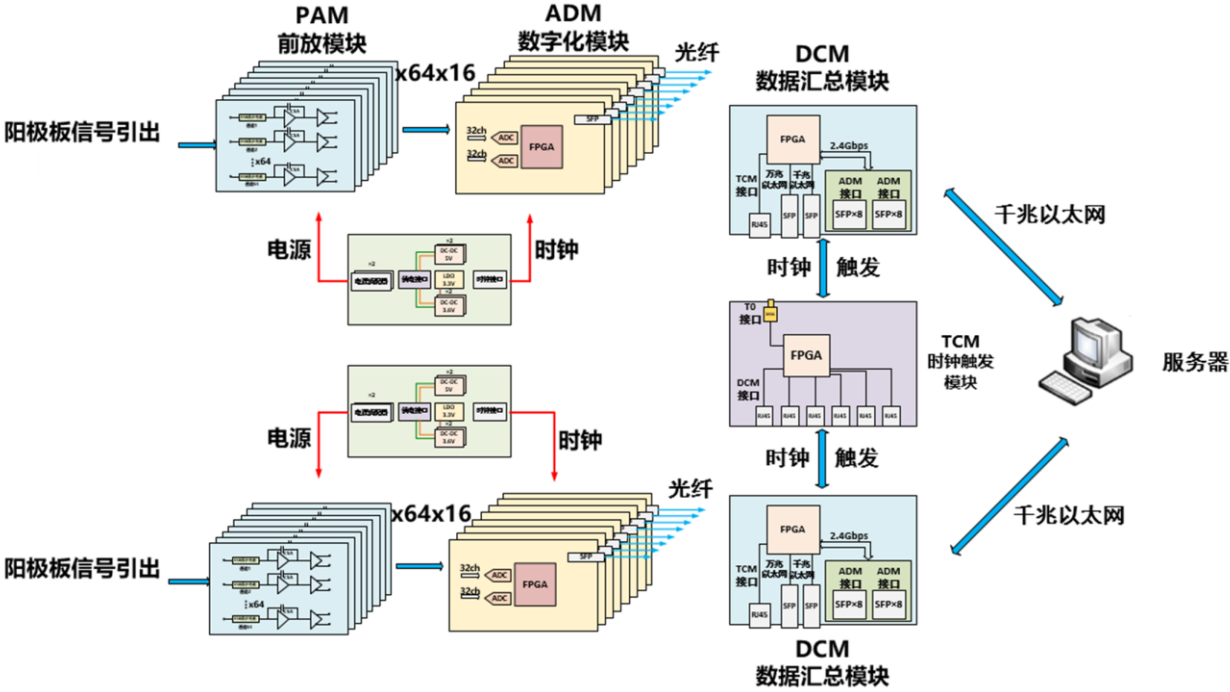
重要应用：CSNS Back-n 原型MTPC的读出

- 实现了原型MTPC 1519路阳极信号的读出，并开展了多次束流实验（2019-2020年）

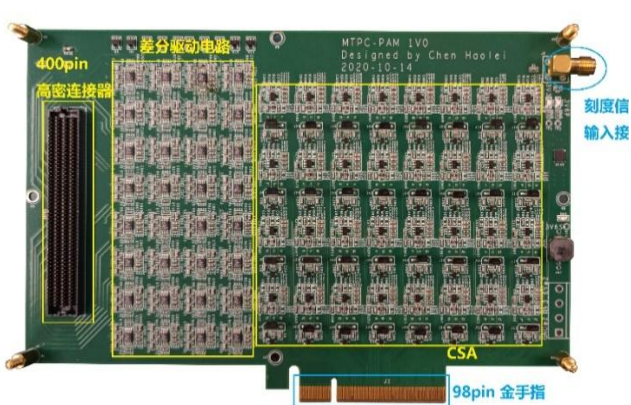


缺点：死时间长（3ms）、数据传输带宽不够，不适用于高计数率的应用，随后发展了第二代读出系统

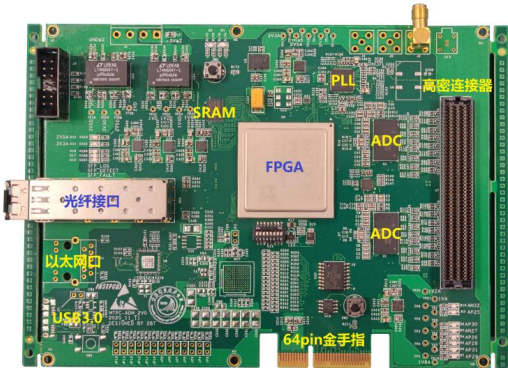
第二代USTC MPGD通用电子学：基于多通道ADC



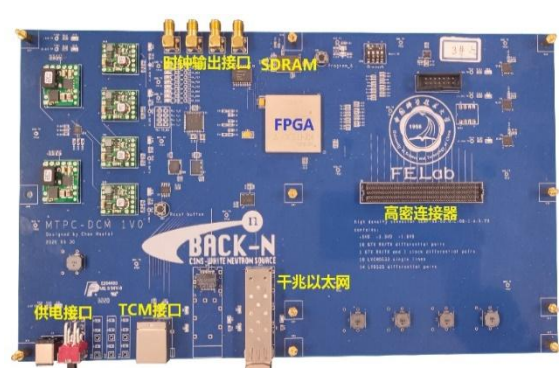
- 系统构成:
 - 前端放大器模块 (PAM/FEB)
 - 64通道, 动态范围可灵活设计
 - 波形数字化模块 (ADM/DPU)
 - 64通道, 采样率40MSPS, 12bit
 - 数据汇总模模块 (DCM)
 - 时钟触发模块 (TCM)
- 系统触发率: $> 40 \text{ kHz}$
- 定时精度好于3ns



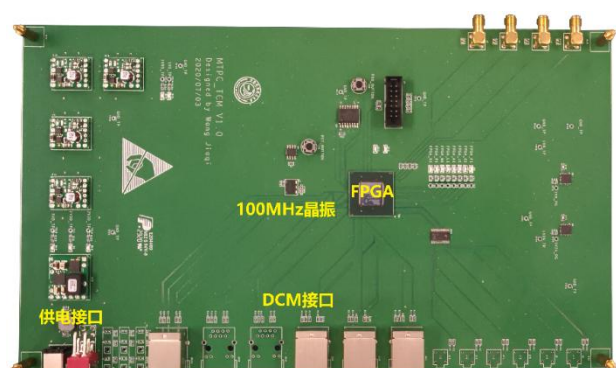
PAM (FEB)



ADM (DPU)



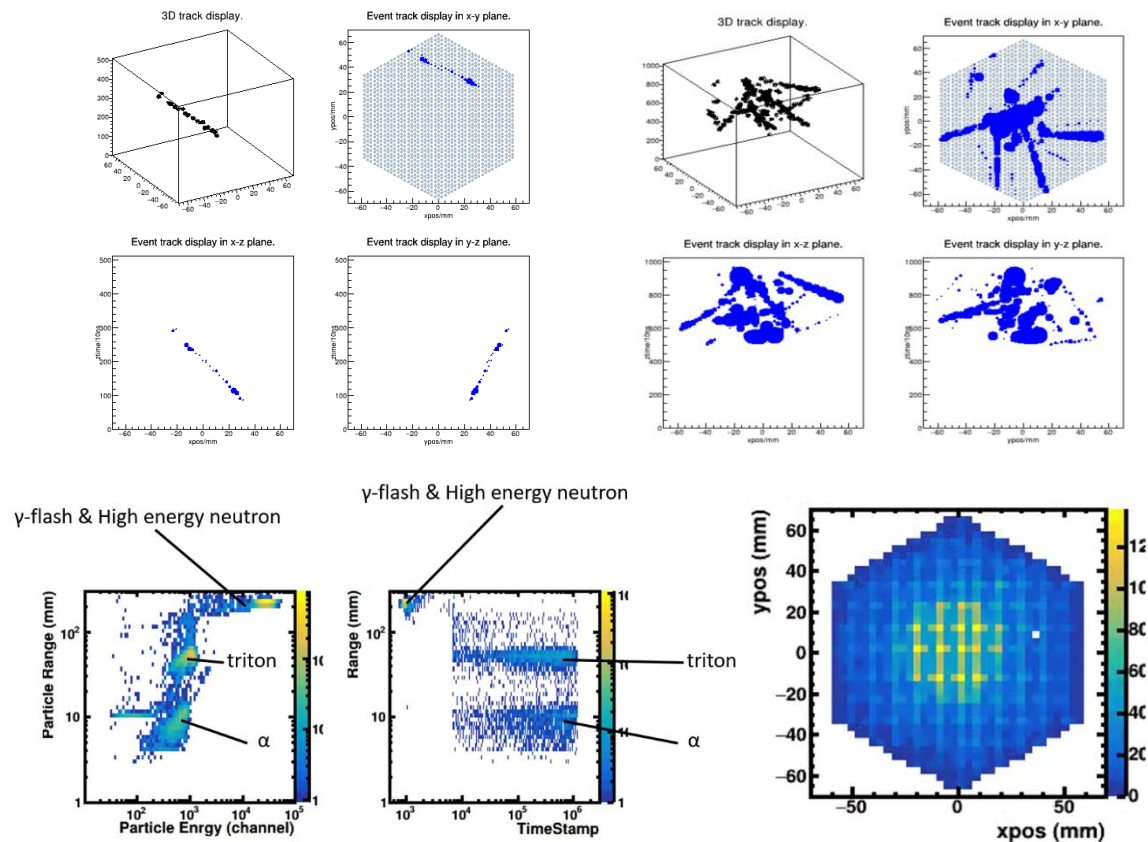
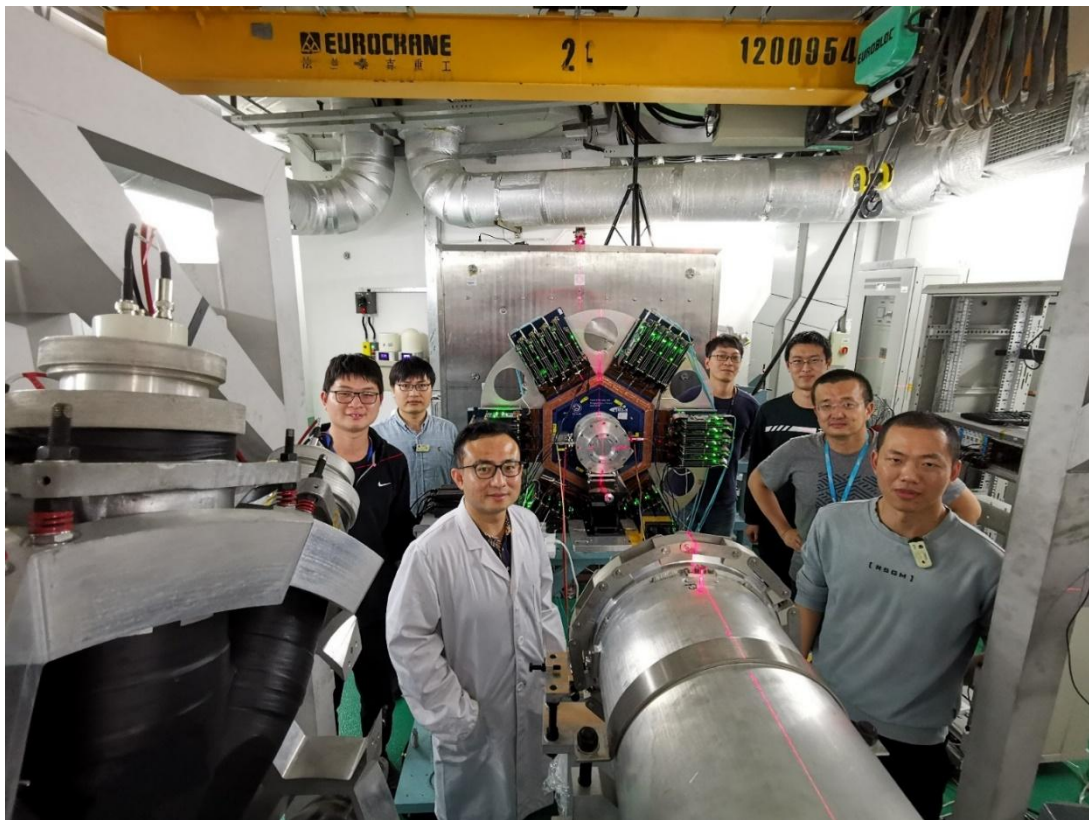
DCM



TCM

重要应用：CSNS Back-n 原型MTPC（升级）的读出

- 配合原型MTPC的升级，实现了1519路阳极信号的读出，并开展了多次束流实验（2021-至今）

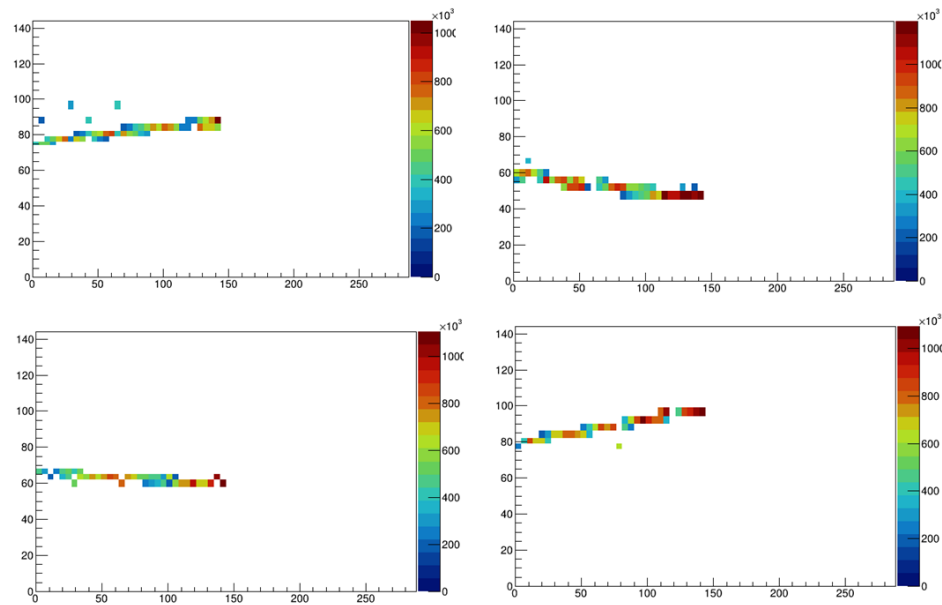
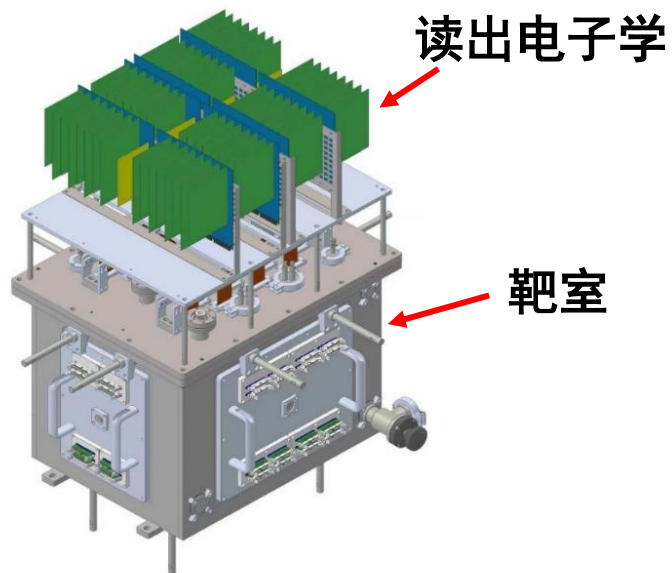


目前正在开展原型MTPC的升级，由单端读出改为双端读出，
阳极信号通道由1519路增加为3038路

重要应用：复旦大学fMata-TPC的读出

- 应用于复旦大学多用途活性靶时间投影室（fMata-TPC）2048路信号的读出
 - 实验应用：低能核物理实验（低通量特殊束流实验）
 - 2023年度完成了实验装置的安装和联调运行

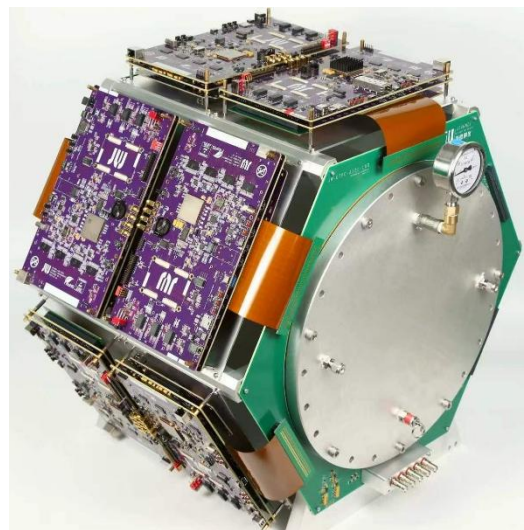
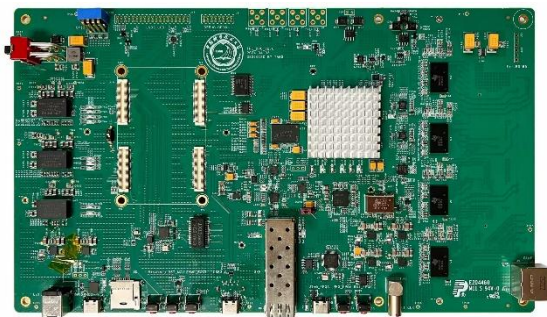
fMata-TPC: Fudan Multi-Purpose Active Target TPC



第三代USTC MPGD通用读出电子学

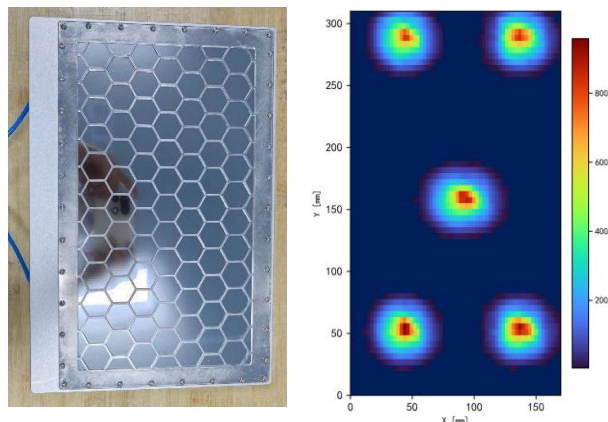
见本次会议汤松松、付学成、杨思哲等的报告

波形读出 (Wave-ROC)



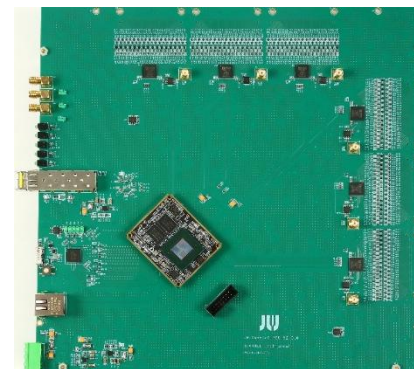
- 优点：高精度（获取完整的物理信息）
- 应用：核数据测量、超低本底辐射检测

数字读出 (Digi-ROC)



- 优点：高计数率 ($>1\text{MHz/ch}$)
- 应用：表面污染测量、中子通量监测

电荷积分读出 (Charge-ROC)



- 优点：高集成度、低功耗
- 应用：宇宙线缪子成像/径迹系统

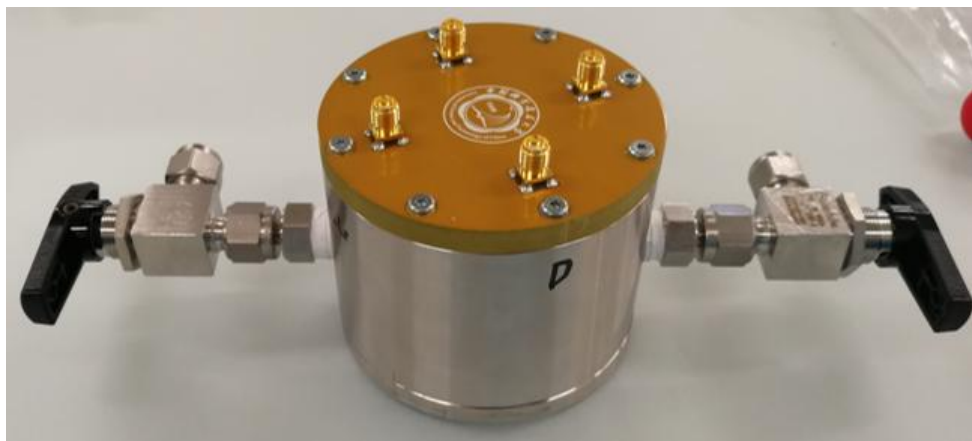
报告提纲

- 微结构气体探测器 (MPGD) 及其读出需求
- MPGD的前端电子学与典型集成芯片
- MPGD通用电子学系统相关工作介绍
- **技术前沿展望**

技术前沿一：高增益、高时间分辨MPGD的读出

基于DLC光阴极的气体光电GEM探测器

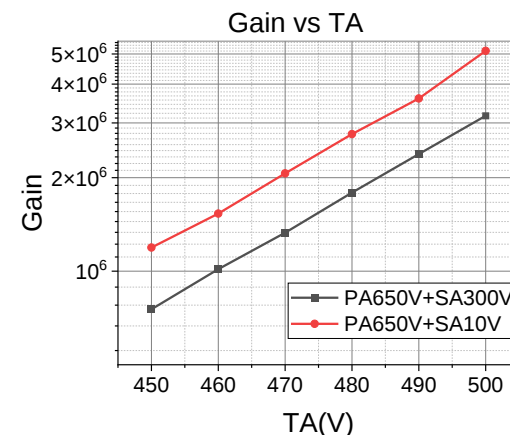
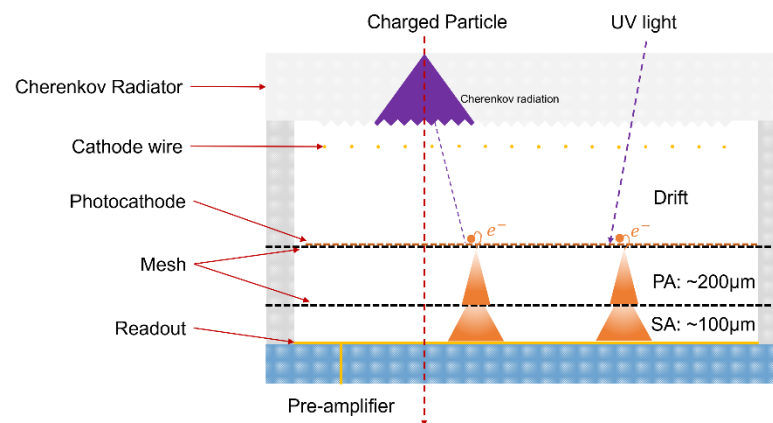
- 实测增益大于 10^6 ，单光电子时间分辨率~60ps



来源：中国科学技术大学 周意

基于多层微网结构的高增益、快时间响应探测器

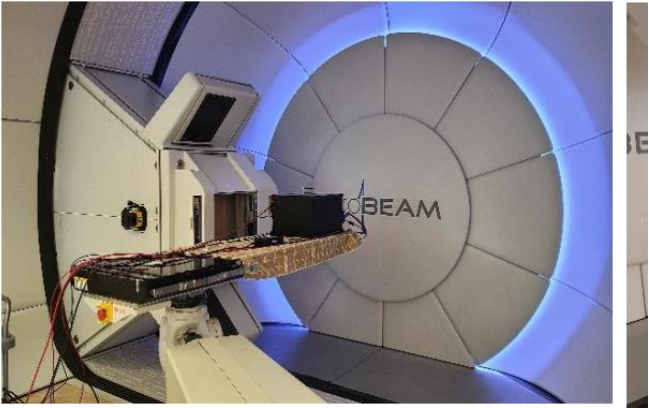
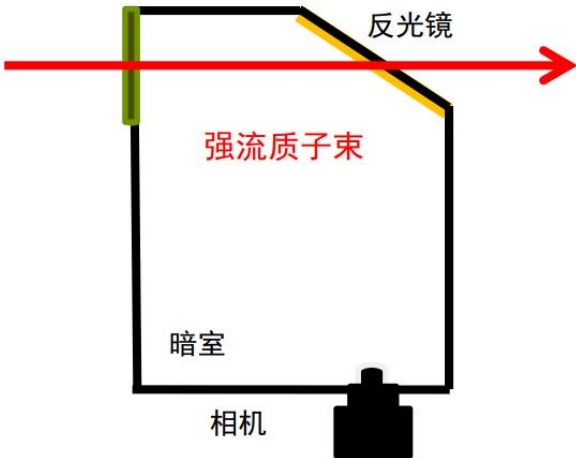
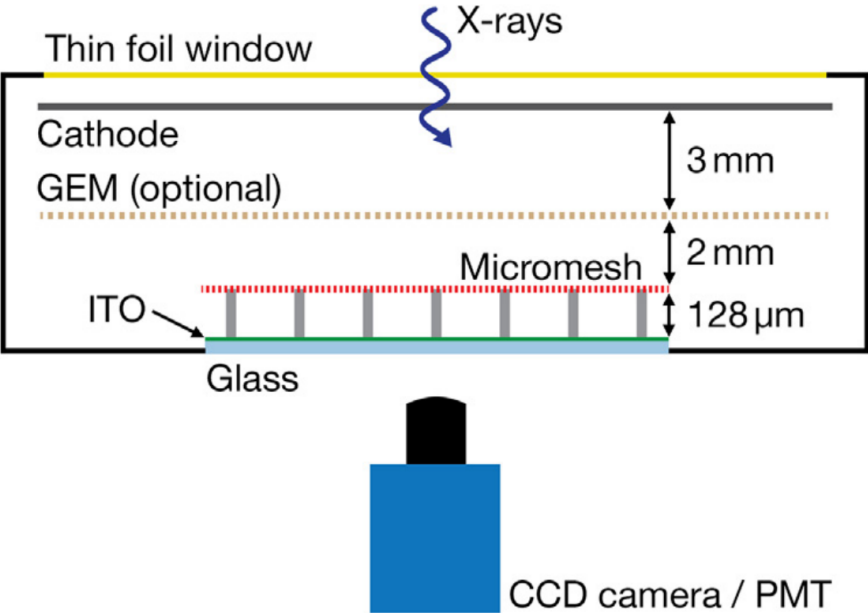
- 实测增益大于 10^6 ，单光电子时间分辨率好于300ps



来源：中国科学技术大学 张志永

有别于常规的MPGD，其信号幅度大、速度快，
可类比于MCP或PMT的读出电子学，按照高速电路设计来考虑
(快前放+高速ADC/高分辨TDC)

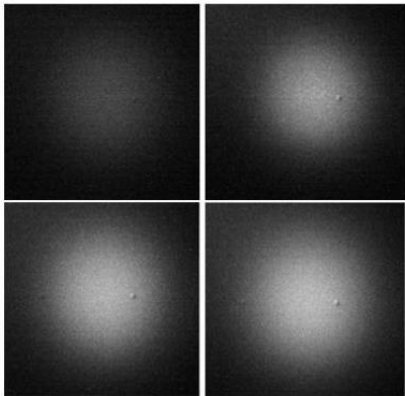
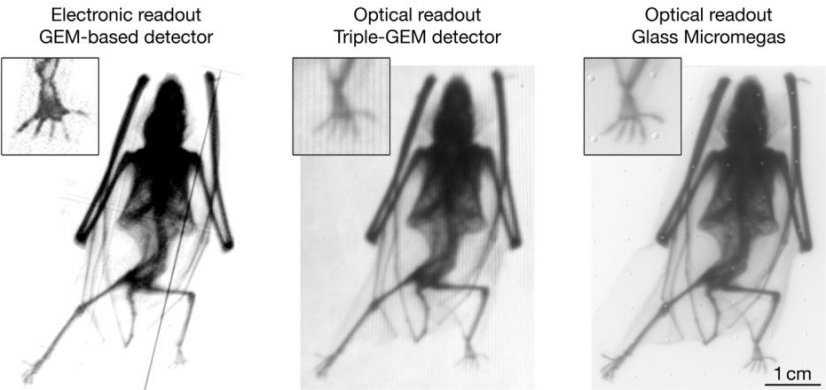
技术前沿二：光放大+CCD/CMOS图像传感器读出



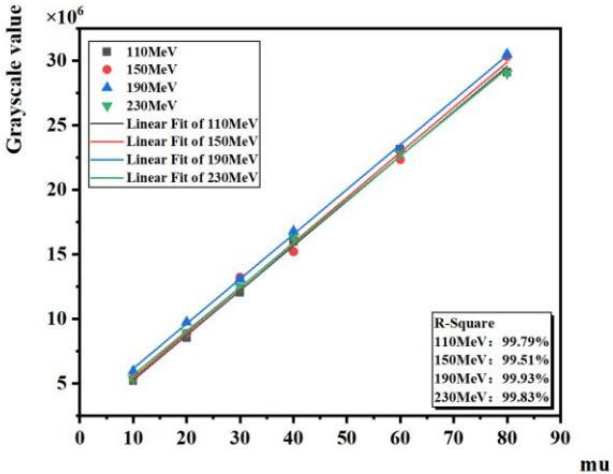
质子束流强监测实验

质子射束成像

质子流强测量线性



110 MeV 能量下不同流强的成像结果，左上右上左下右下依次为 5mu、10mu、20mu、40mu 流强

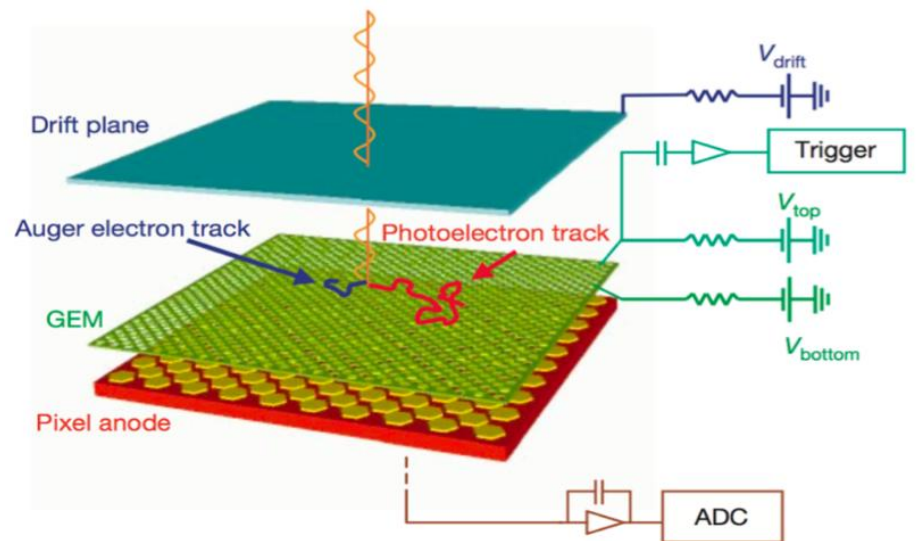


F.M. Brunbauer, et al., NIM A, 2020

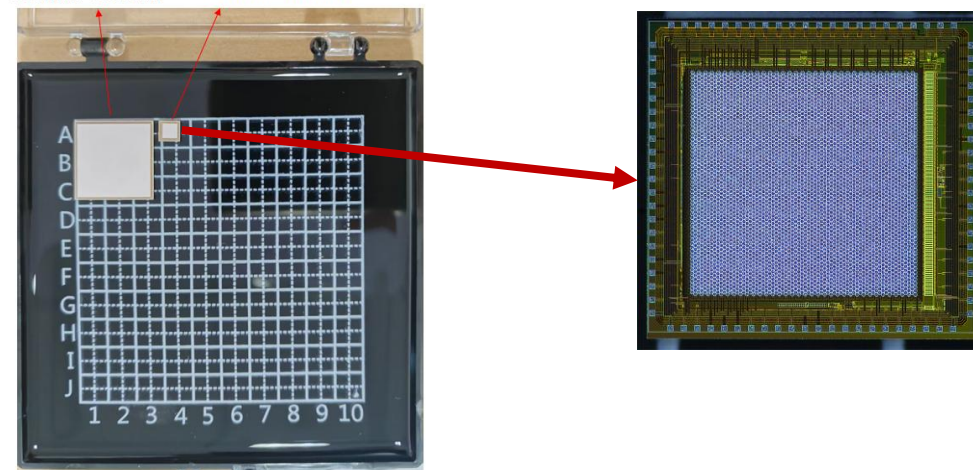
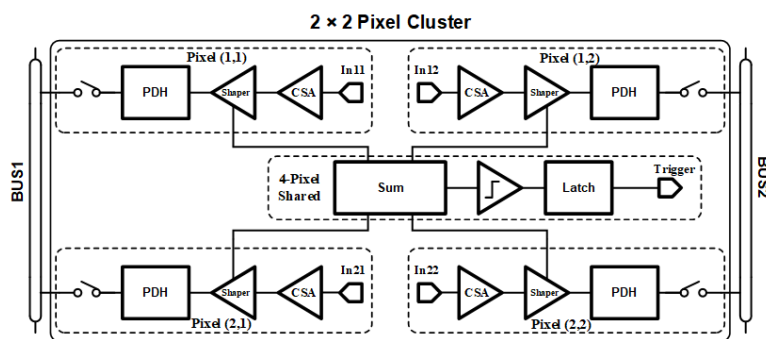
来源：中国科学技术大学 张志永

技术前沿三：MPGD直接读出 (eXTP-PFA气体像素探测器读出)

- 技术方案：CSA + Shaper + 峰保
- 像素阵列：304×352
- 像素间距：50 μm
- 等效噪声：30 e^-
- 最小触发阈值：150 e^-
- 线性动态范围：> 30 ke^-
- 读出频率：10 MHz
- 功耗：2 W



2.a: 304*352阵列, 16.4mm*16.4mm
1.a/b: 60*70阵列, 4.3mm*4.3mm

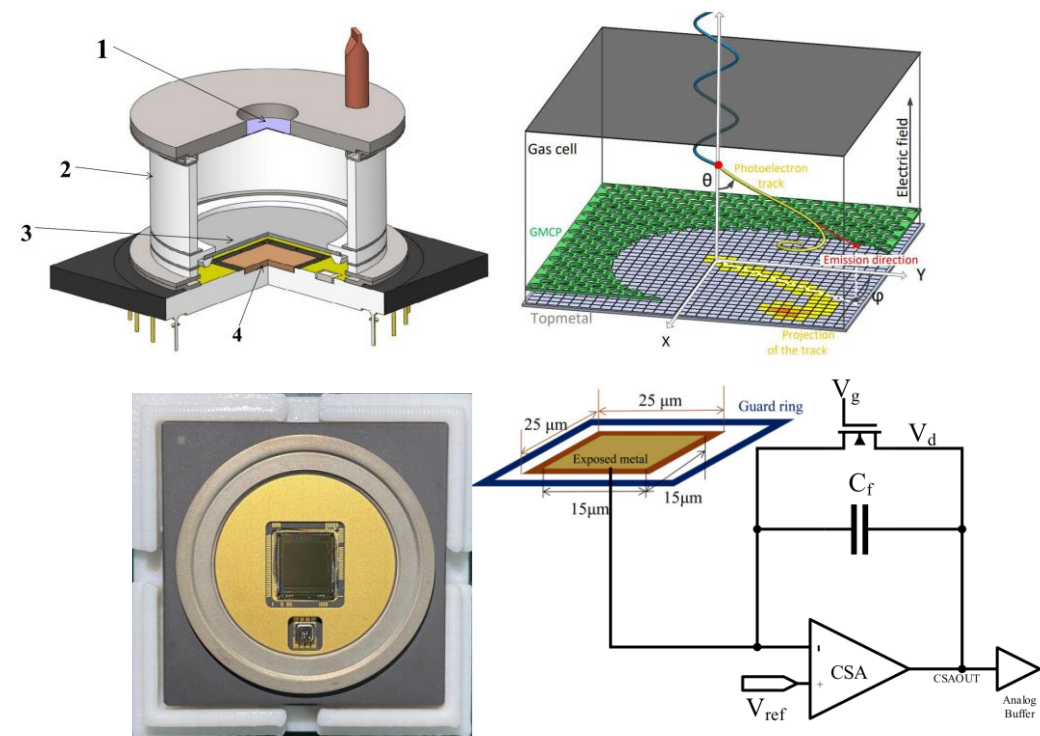


来源：高能物理研究所 姜维春、王科等

技术前沿三：MPGD直接读出 (华中师范大学: Topmetal)

CXPD: X射线偏振探测立方星

- 广西大学(刘宏邦)牵头，华中师范大学、中科院大学等参与
- 气体MCP + Topmetal-II
- 像素数量：72×72, 中心距：83μm



Zongwang Fan , et al., IEEE TNS, 2023
Hui Wang, Dong Wang, et al., NST, 2023

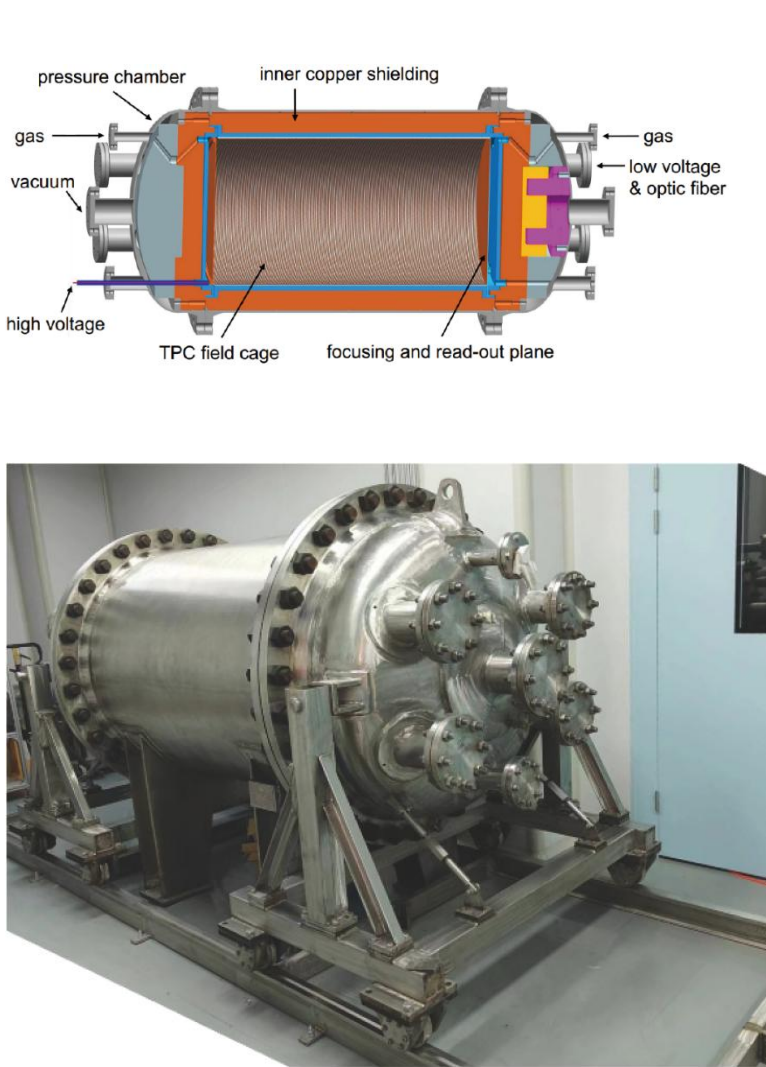
CEE-BM (Beam Monitor) 前端读出

性能指标	数据
增益	188mV/fC、50mV/fC、10mV/fC
成形时间	<1us
计数率	1MHz
通道数	180 (100 μm*1mm 线阵)
输出	通道地址、到达时间
读出方式	优先级读出

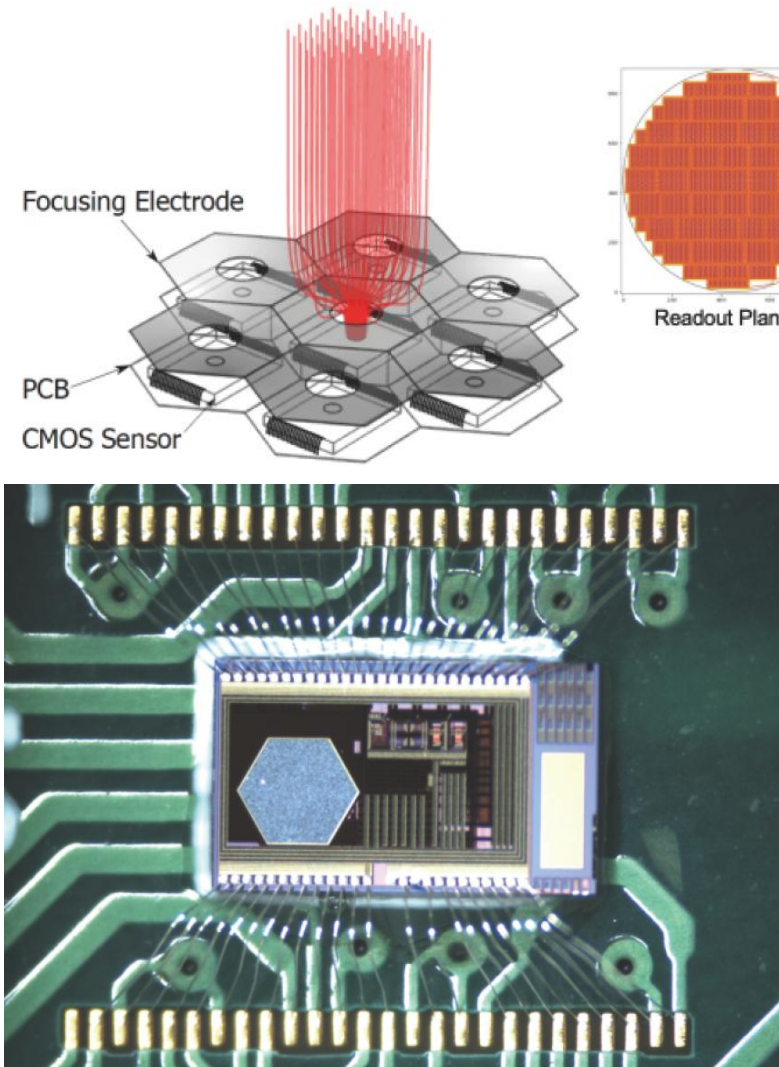


来源：华中师范大学 孙向明

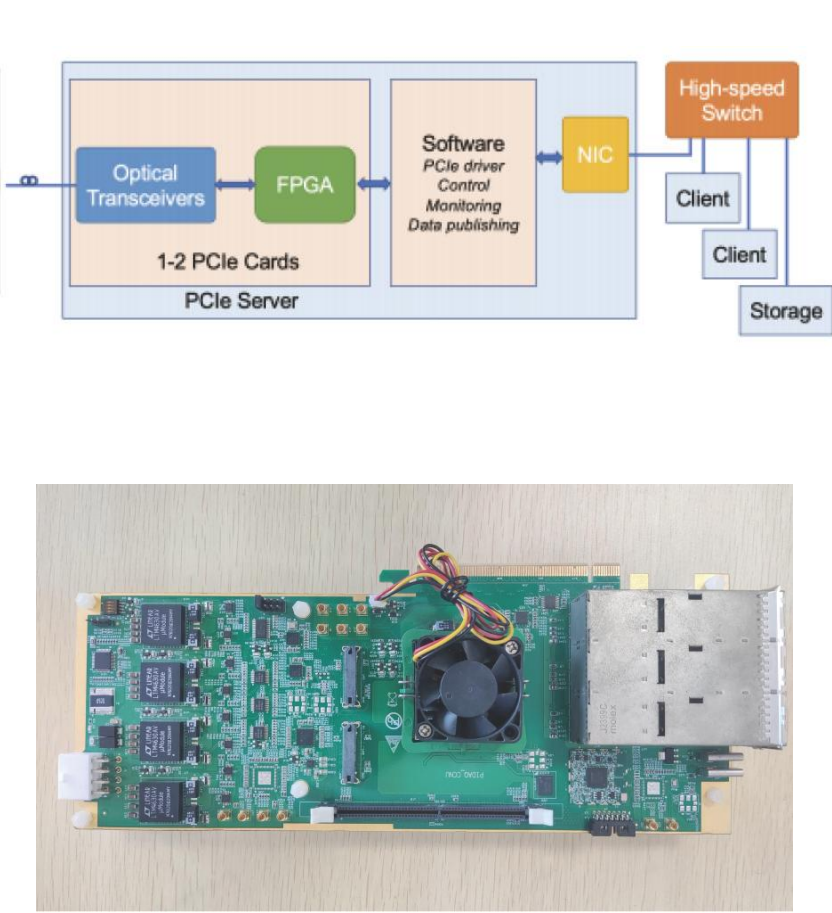
技术前沿三：MPGD直接读出 (NvDEx 无中微子双贝塔衰变实验)



高压时间投影室



低噪声 CMOS 读出芯片 (Topmetal)

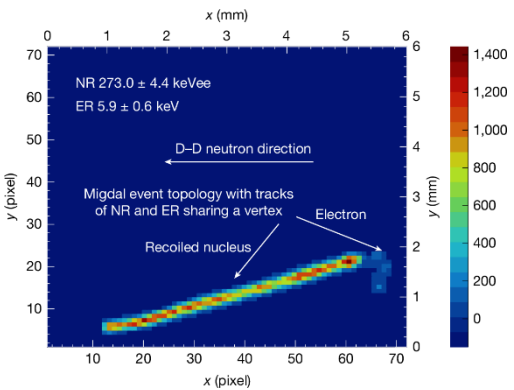
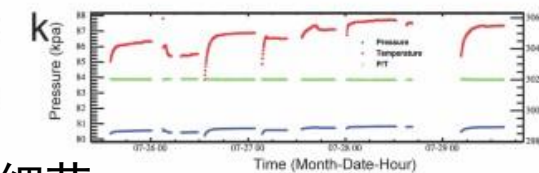
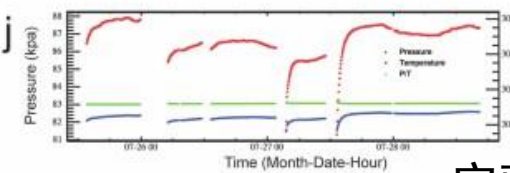
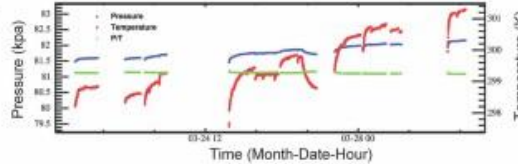
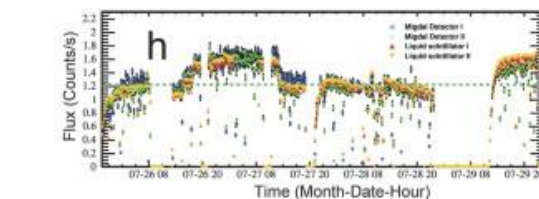
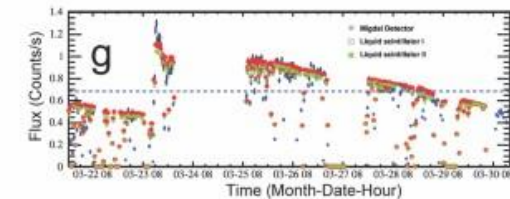
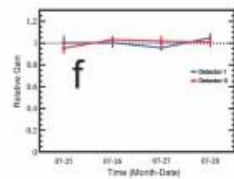
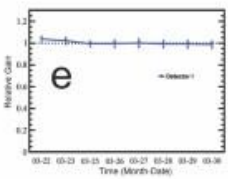
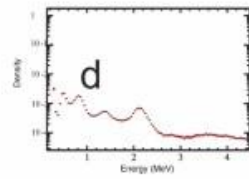
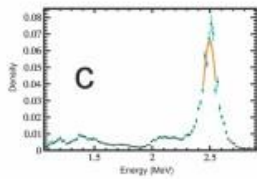
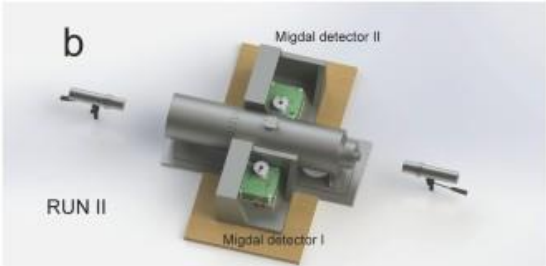
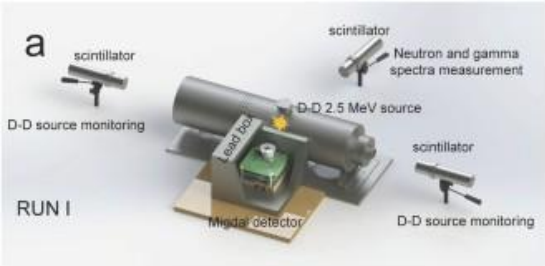
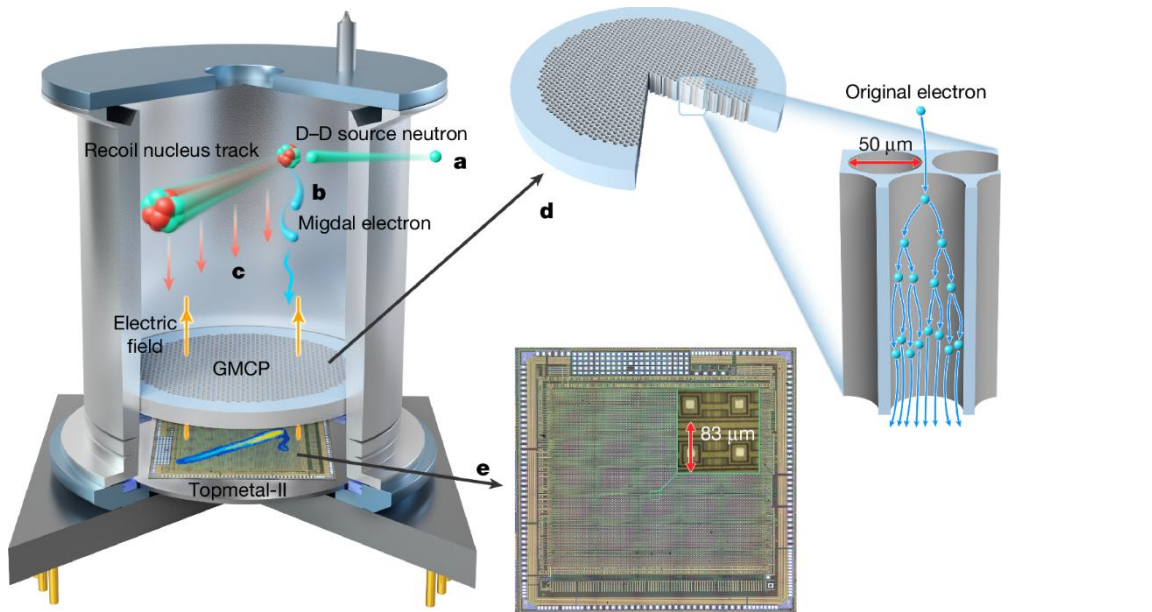


系统读出架构

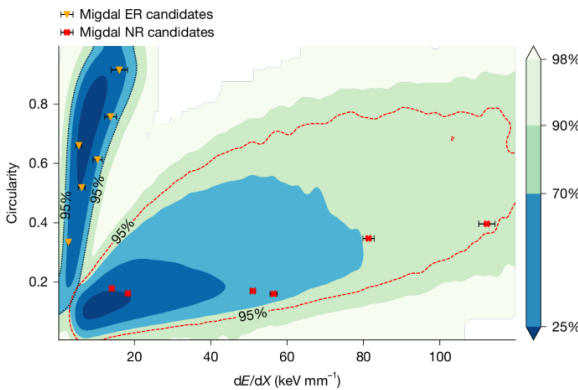
来源：锦屏实验室

X.-G. Cao, Y.-L. Chang, K. Chen, E. Ciuffoli, et al. (NvDEx-100 Collaboration), “NvDEx-100 conceptual design report,” *Nuclear Science and Techniques*, vol. 35, article 3, 2024. DOI: 10.1007/s41365-023-01360-7.

技术前沿三：MPGD直接读出 (Migdal 效应的直接实验观测)



Migdal 事例



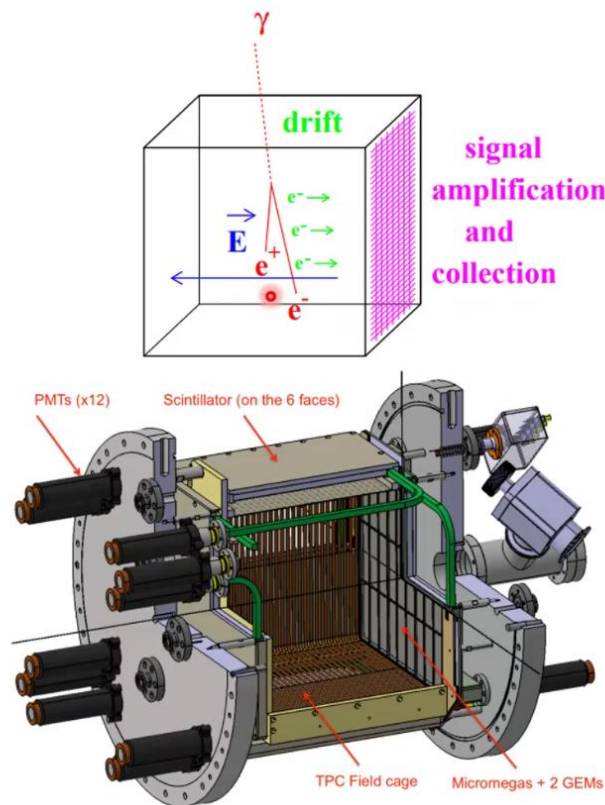
径迹特征分布

实验细节

D. Yi *et al.*, "Direct observation of the Migdal effect induced by neutron bombardment," *Nature*, vol. 649, no. 8097, pp. 580–583, Jan. 2026, doi: [10.1038/s41586-025-09918-8](https://doi.org/10.1038/s41586-025-09918-8). (中国科学院大学 郑阳恒/刘倩 团队, 像素读出芯片: 华中师范大学 Topmetal)

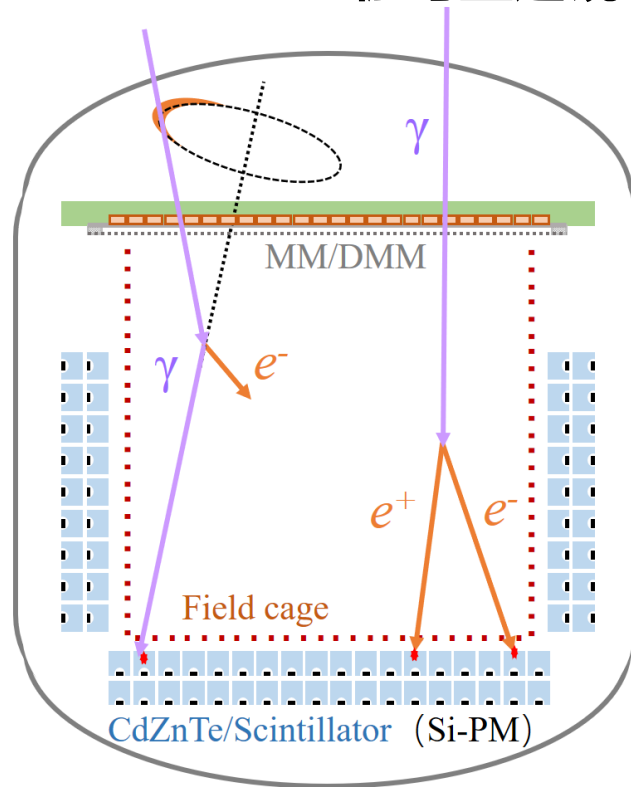
技术前沿四：面向空间探测的大尺寸、高气压TPC读出

HARPO: TPC伽马偏振测量仪



TPC体积: $(30\text{ cm})^3$, 5 bar

MeGaT: MeV伽马望远镜



来源:

MeGaT合作组 (张志永等)

能段: 0.3MeV-100MeV

角分辨:

2° @662keV;

0.5° @100MeV

气压: 3-10 bar

TPC体积: 样机 $(30\text{ cm})^3 \rightarrow$ 未来 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 80\text{ cm}$

Denis Bernard, HARPO: a TPC as a gamma-ray telescope and polarimeter, *Proceedings of SPIE*, 2014

对读出电子学的集成度、功耗、空间环境可靠性都将是全新的挑战！

**本报告部分素材来自于多家兄弟单位的同仁，
在此致以诚挚的谢意！**

感谢各合作单位（团队）在MPGD读出电子学方向给予的支持！

谢谢！