



高能质子实验终端束斑测量探测器

报告人：易晗

中国科学院高能物理高能所

散裂中子源科学中心

测试束流与先进探测技术研讨会 (TB&D)

2025年8月15日@河南·登封

报告提纲

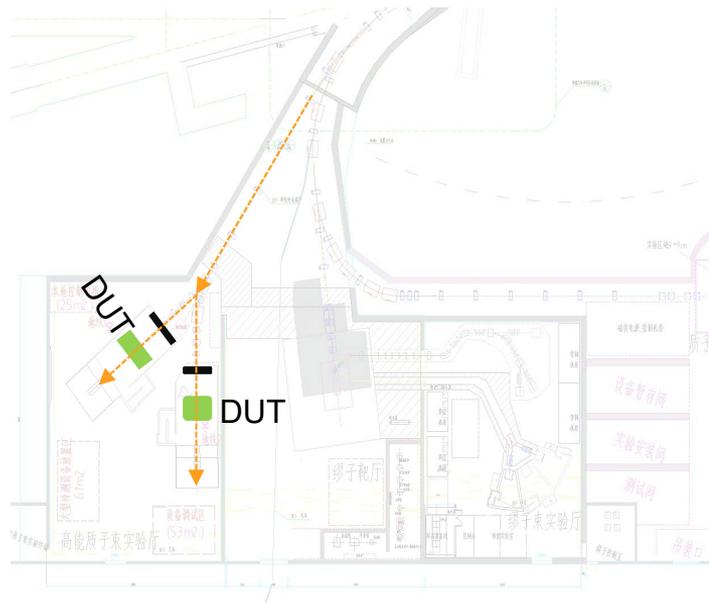
- 研制目标
- 物理设计
- 技术方案
- 研制进展

报告提纲

- 研制目标
- 物理设计
- 技术方案
- 研制进展

束斑测量探测器

- 束斑测量探测器作用：
- 质子束斑分布测量，为束流调试提供参考



proton beam profile detector

验收指标:	位置分辨率	300um
设计指标	计数率	1kHz
	灵敏区面积	10cm*10cm
	电子学通道	512
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV

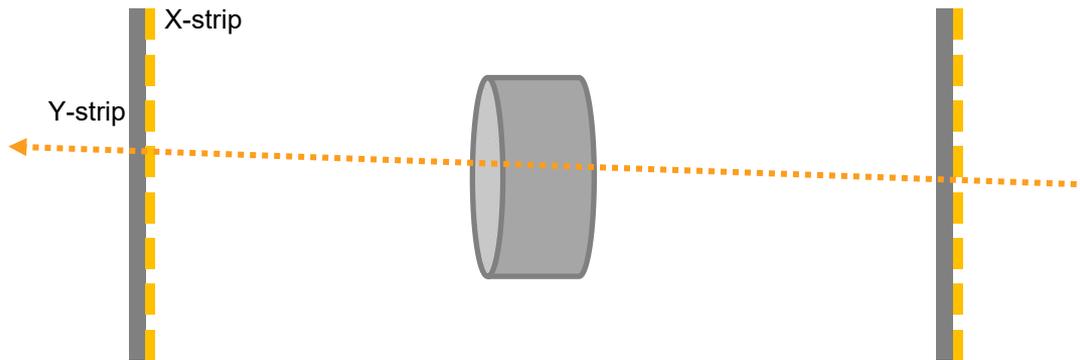
- 指标参数设置依据见后续讨论

报告提纲

- 研制目标
- 物理设计
- 技术方案
- 研制进展

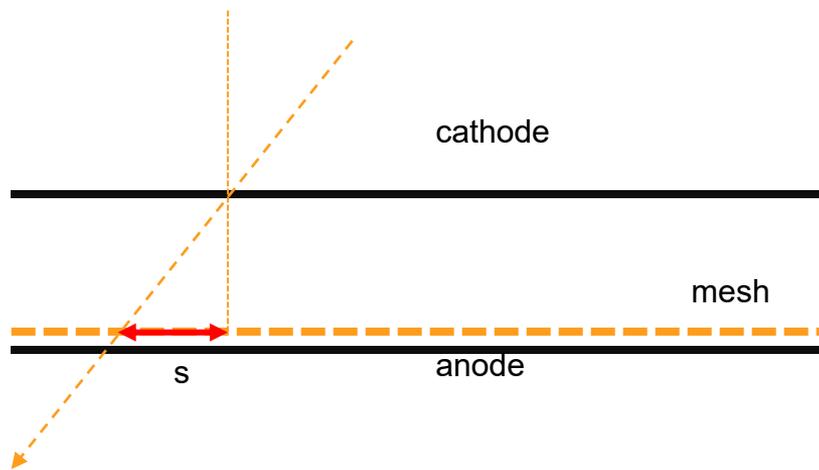
探测器基本方案

- 针对计数率、覆盖面积、位置分辨率等参数，目前的微结构气体探测器技术可满足需求
- 微结构探测器的主要性能参数区间：计数率 $\sim 1\text{MHz}/\text{cm}^2$ 、制作面积 $\sim \text{m}^2$ ，位置分辨 $\sim 10^2\mu\text{m}$ ，增益 $\sim 10^4$
- 考虑本课题组的已有研究基础，采用Micromegas探测器作为束斑测量探测器
- 对于1kHz计算率，单个波形时间窗为1us，两个事例偶然符合概率为0.01%
- 因此可以采用XY交叉阳极条读出方式，减少电子学通道数



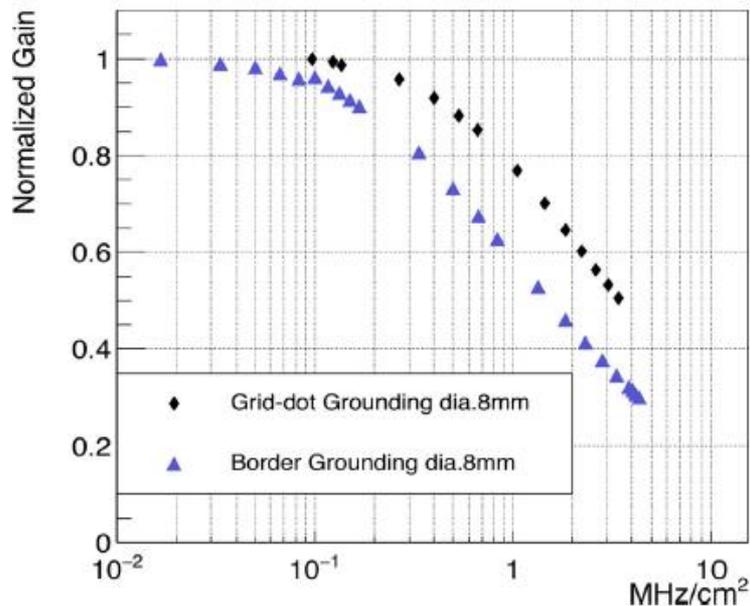
探测器参数估算：漂移区距离

- 对于1.6GeV质子，使用Ar气作为主工作气体主分，能量沉积约为0.3keV/mm
- 设计漂移区距离为3mm，电离产生的cluster数的均值为20， 3σ 下限为6.6，对应的能量沉积为0.3keV，
- 如果探测器增益为 $2E4$ ，对应电荷量为37fC超过常用电子学的测量低阈值，则单个探测器的理论探测效率估算可达99%
- 若漂移区距离为3mm，对于出射角为 5° 的径迹，在XY方向的投影距离为440um，
- 由此产生的位置分辨约126um，再考虑电荷重建的位置分辨率，综合位置分辨可控制在300um



探测器参数估算：计数率

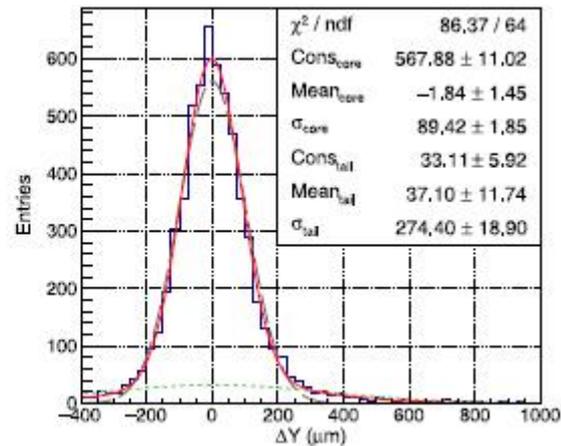
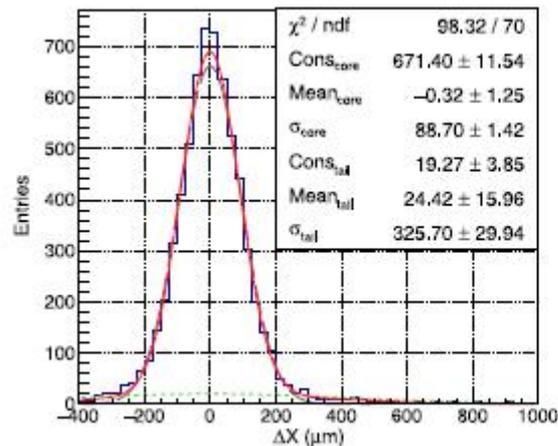
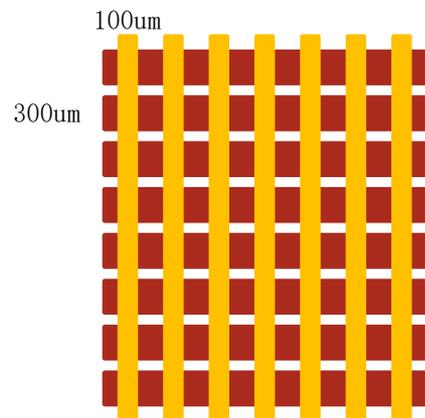
- 实测的计数率性能满足高能质子束的测量需求
- 在高能质子束流强条件下，正离子回流、空间电荷效应、阻性层电荷积累等不影响探测器正常工作
- 前期测试表明目前探测器性能满足计数率要求



Jianxin Feng, et al., A novel resistive anode using a germanium film for Micromegas detectors, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1031 (2022) 166595

探测器参数估算：位置分辨率

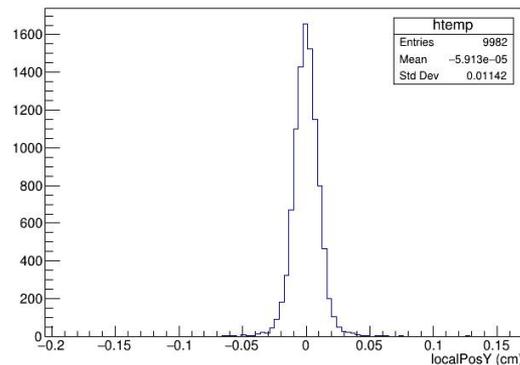
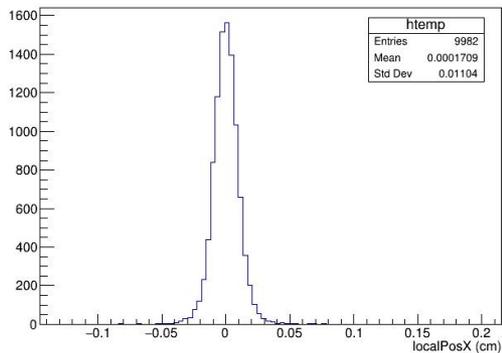
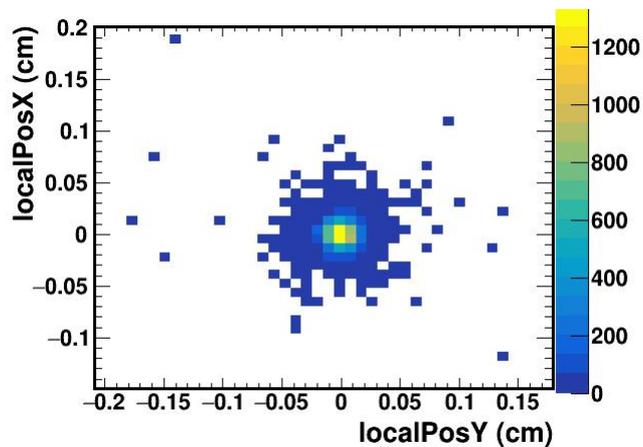
- X条宽80um、Y条宽320um的阳极读出设计
- 5GeV电子测试结果采用双高斯拟合，满足分辨率要求



Jianxin Feng, et al., A thermal bonding method for manufacturing Micromegas detectors, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 989 (2021) 164958

探测器参数估计：质量

- 设探测器读出板PCB板厚为500um，模拟50cm距离处1.6GeV质子的分布
- 因为散射带来的位置分辨约为100um水平，需要尽可能降低PCB、入射窗等材料的物质质量

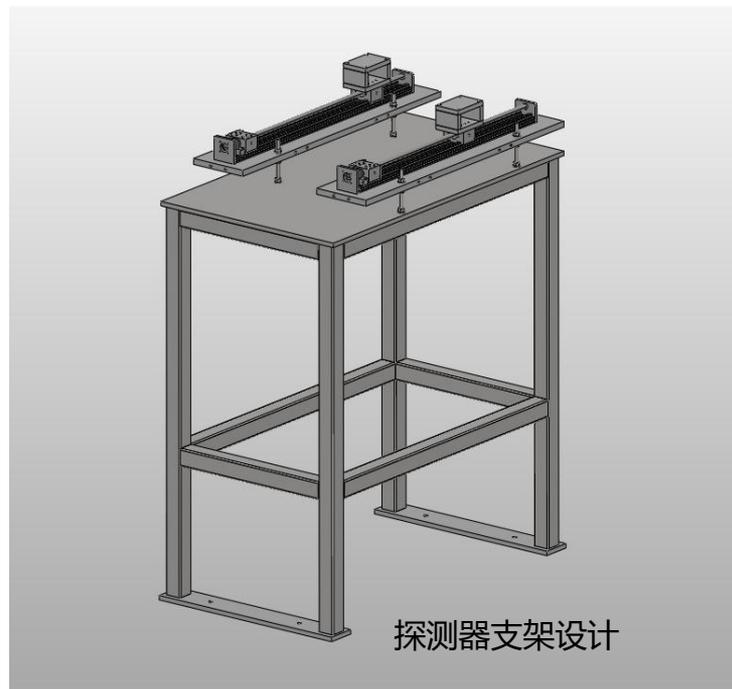
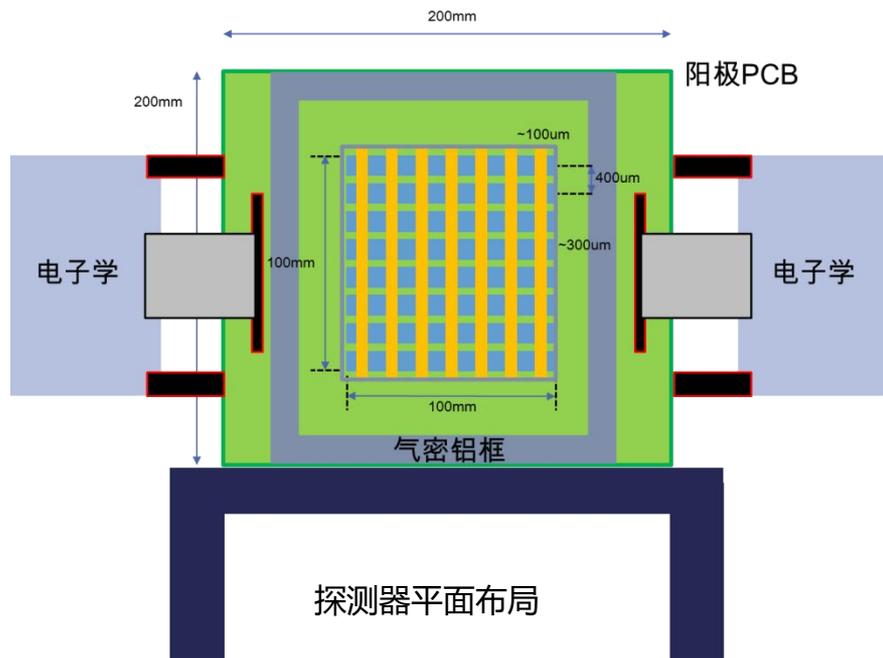


报告提纲

- 研制目标
- 物理设计
- 技术方案
- 研制进展

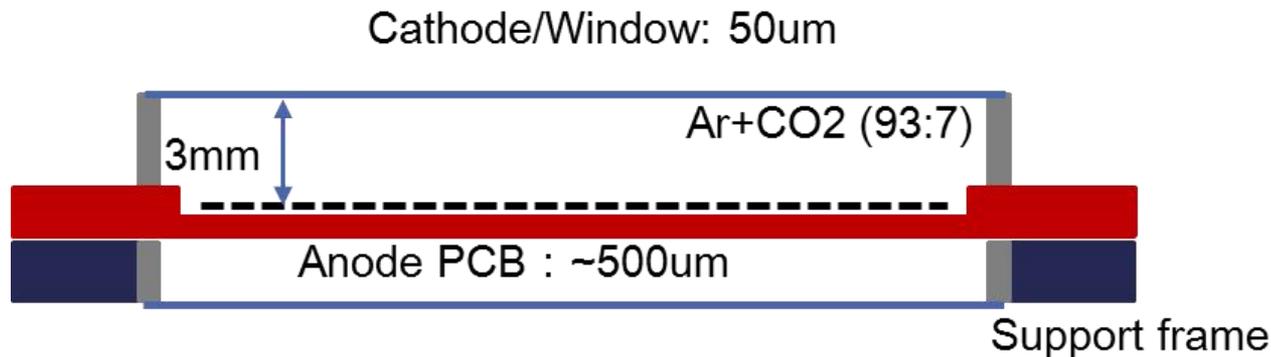
阳极读出设计

- xy交叉阳极条设计，每个方向256读出条，可实现~100um空间分辨
- x方向读出条位于第一层PCB介质下层，宽宽~100um
- y方向读出条位于第二层PCB介质下层，条宽~300um
- 阳极读出灵敏区面积~100mm*100mm



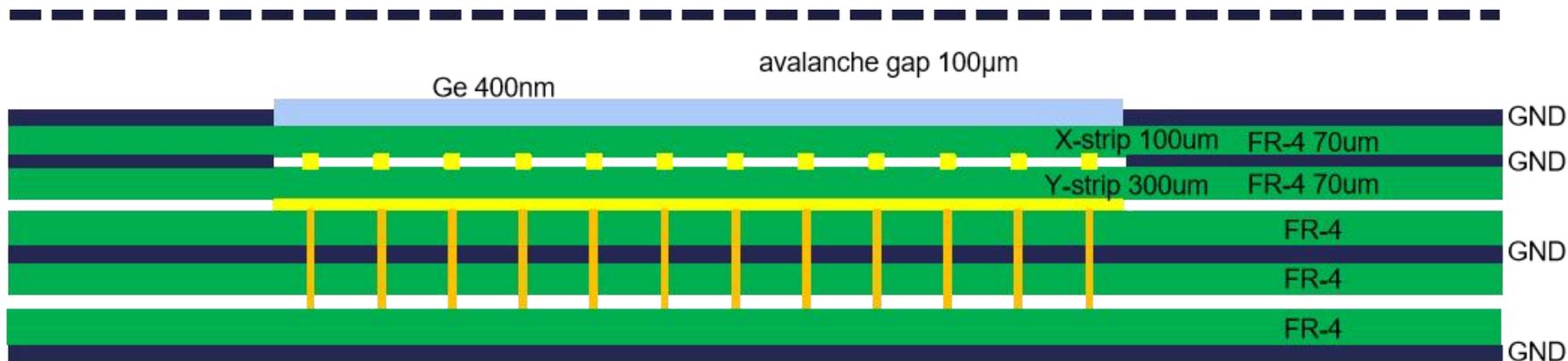
探测器结构设计

- 阳极板采用500um（或更薄）PCB，减小物质量
- 为保证PCB刚性及Micromegas结构稳定性，PCB四周加支撑结构
- 入射窗同时作为阴极结构，阳极读出板同时做气密结构，减小物质量
- 流光工作模式，工作气压1atm



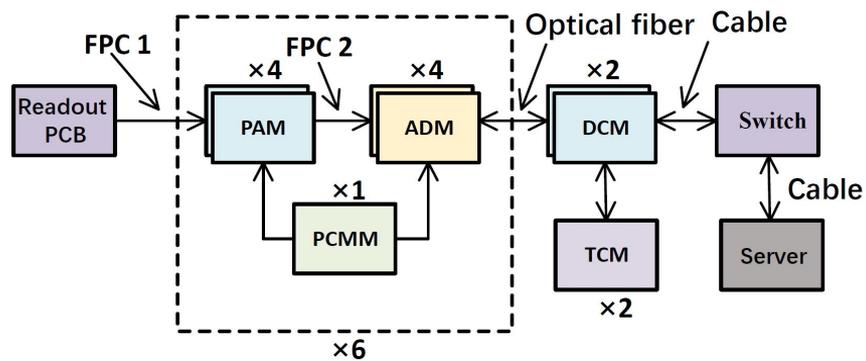
PCB结构

- 微网雪崩间隙100um
- PCB表面镀接地高阻锗层，通过电荷扩散效应增加点火条数，提高位置分辨
- X方向和Y方向读出条置于PCB内层，间隔70um厚PCB介质，雪崩电子通过感应在读出条产生信号



电子学设计

- 采用已有的MTPC电子学模块
- PAM：前放模块
- ADM：模数转换模块
- PCMM：电源时钟管理模块
- DCM：数据汇总模块
- TCM：触发控制模块

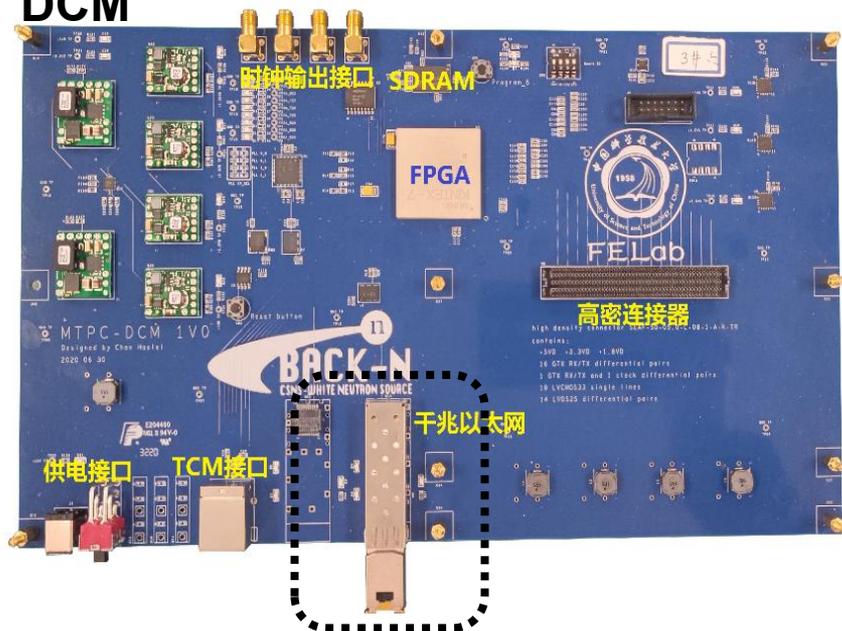


ADC采样率	40MHz
采用窗宽度	1024
ADC位数	12bit
数字成形时间	1us
死时间	<40us
动态范围	2.8pC

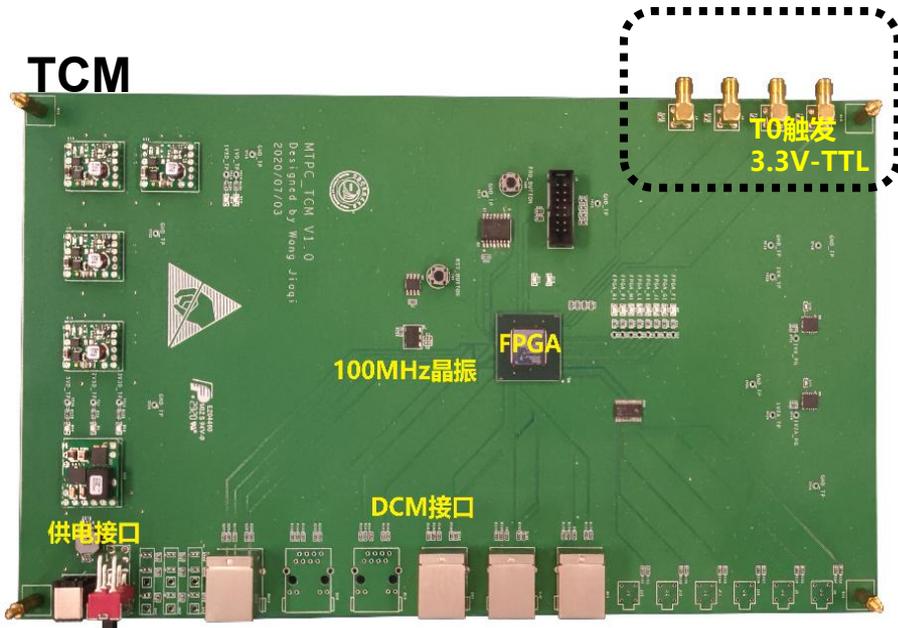
电子学接口

- 外部接口：
- 千兆以太网接口：DAQ控制、数据传输
- T0触发接口：接受加速器打靶信号，3.3V-TTL

DCM

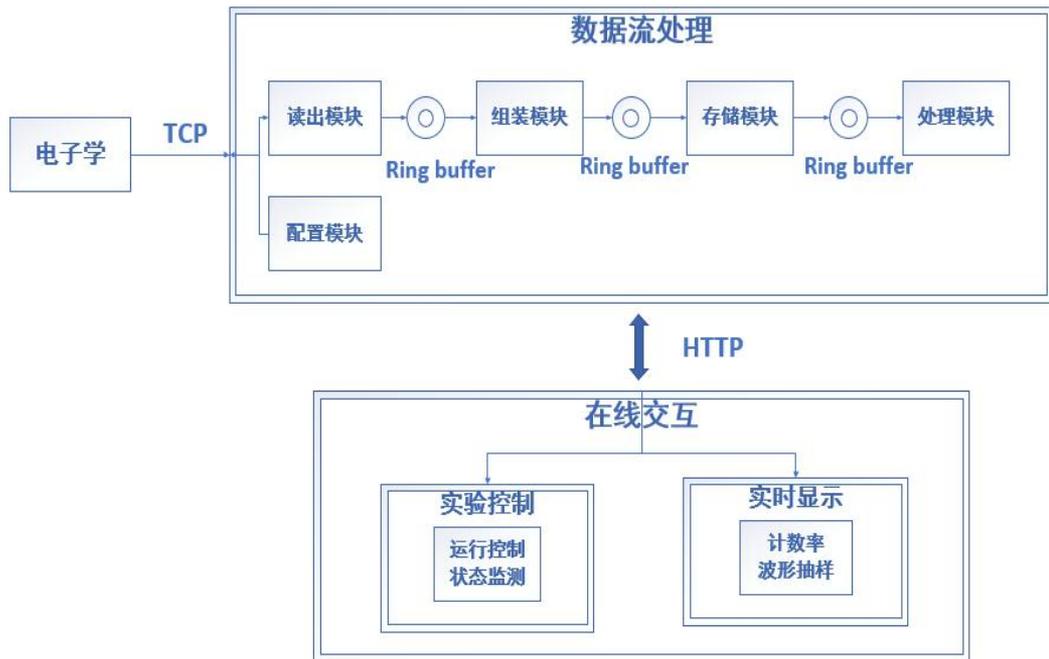


TCM



数据获取系统框架

- DAQ模块将与HEPS数据获取整体框架整合



数据处理软件 (DAQ 核心)

负责承载与数据流相关的工作：
数据的接收、组装、存储和处理

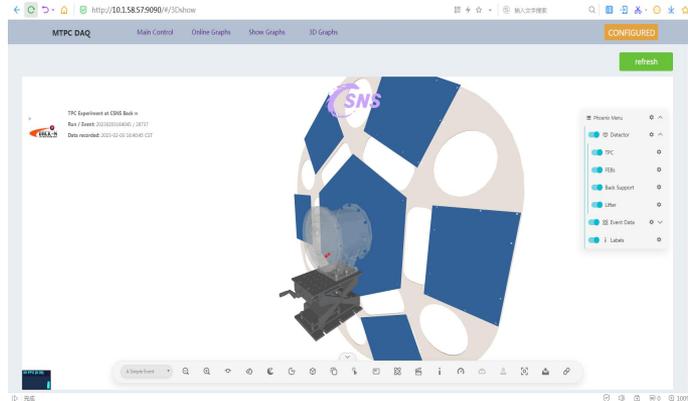
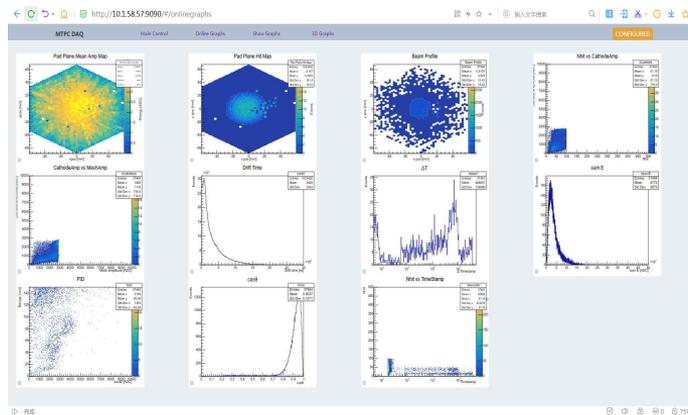
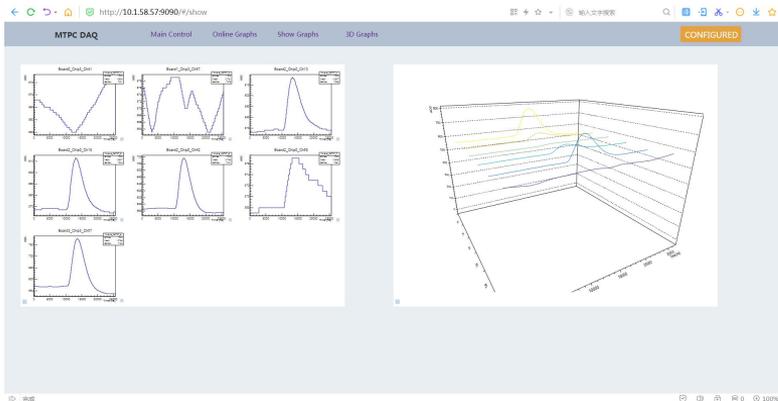
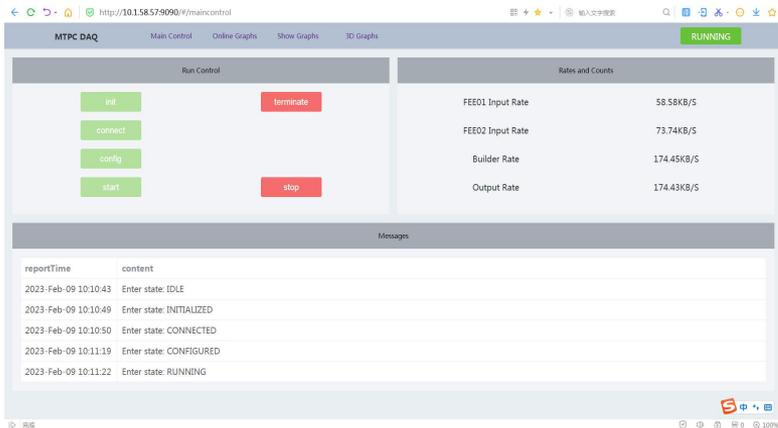


在线交互软件

向上提供用户服务：执行、反馈
向下与数据流子系统信息传递

在线交互软件

●UI框架将与HEPS数据获取UI框架整合



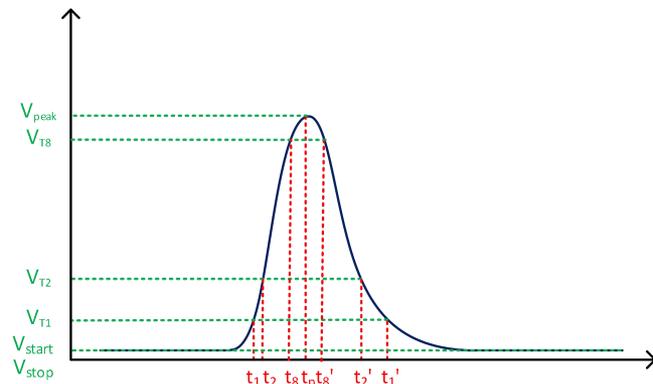
计数率估算

●计数率1kHz

- 单个事例单个探测器平均点火通道数6，每个通道数据量2kB，
- 1个探测器同时工作，单个事例数据量12kB
- 数据量12MB/s
- 当前DAQ测试最高数据传输率100MB/s
- 目前电子学和DAQ已定义数据格式
- 后续需要开发与高能质子束DAQ交互的接口

●计数率10kHz

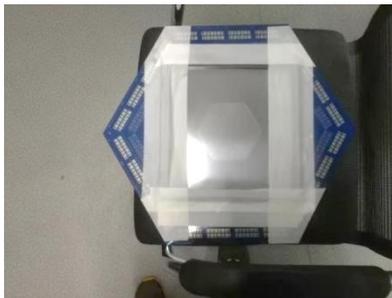
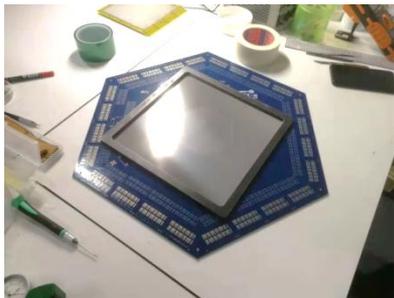
- 采集全波形数据量较大
- 可采用波形压缩模式进行采集
- 通过峰值提取波形能量，通过拟合提取波形时间
- 数据格式和全波形相同



报告提纲

- 研制目标
- 物理设计
- 技术方案
- 研制进展

Micromegas工艺



- 采用热压技术压制mesh增益结构;
- mesh参数: 不锈钢丝直径 $16\mu\text{m}$ 、厚度 $25\mu\text{m}$ 、LPI-400
- 透过率55%、张力30N;
- 增益区厚度 $100\mu\text{m}$ ，支撑柱直径1mm，间隔10mm

电子学与DAQ

- 有基础版本电子学与DAQ
- 可开展测试



Screenshot of the MTPC DAQ web interface. The browser address bar shows <http://10.158.57.9090/#/maincontrol>. The interface includes a navigation menu with "Main Control", "Online Graphs", "Show Graphs", and "3D Graphs", and a "RUNNING" status indicator.

The "Run Control" section contains buttons for "init", "connect", "config", "start", "terminate", and "stop".

The "Rates and Counts" section displays the following data:

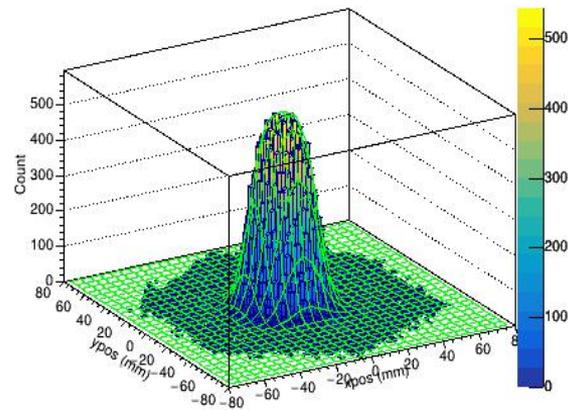
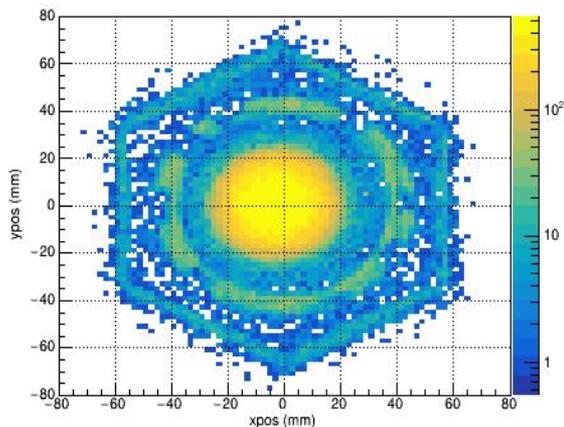
Category	Value
FEE01 Input Rate	58.58KB/S
FEE02 Input Rate	73.74KB/S
Builder Rate	174.45KB/S
Output Rate	174.43KB/S

The "Messages" section shows a log of system events:

reportTime	content
2023-Feb-09 10:10:43	Enter state: IDLE
2023-Feb-09 10:10:49	Enter state: INITIALIZED
2023-Feb-09 10:10:50	Enter state: CONNECTED
2023-Feb-09 10:11:19	Enter state: CONFIGURED
2023-Feb-09 10:11:22	Enter state: RUNNING

中子束斑测量

- 用于中子核反应测量的MTPC装置（基于阻性Micromegas读出）



$$f(x, y) = B + \frac{A}{2} \left[\text{Erf} \left(\frac{r(x, y) + r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left(\frac{r(x, y) - r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right], \quad r(x, y) = \sqrt{\left(\frac{x - x_0}{e} \right)^2 + (y - y_0)^2}$$

束斑中心(mm)	50%半径(mm)	边缘锐利度(mm)	XY半径比
(x_0, y_0)	r_0	σ	e
$(-2.95 \pm 0.05, 0.80 \pm 0.03)$	17.14 ± 0.01	4.95 ± 0.06	0.974 ± 0.005

阳极板设计

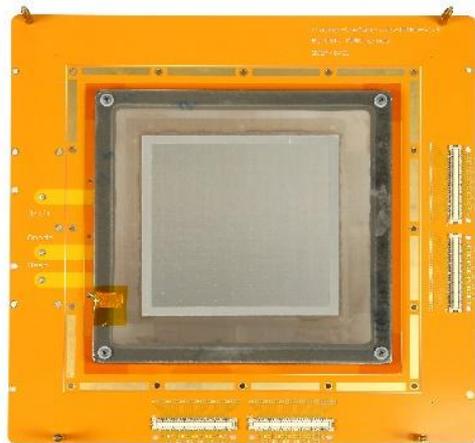
- 灵敏区采用柔性板：降低物质量
- 外围采用刚性板



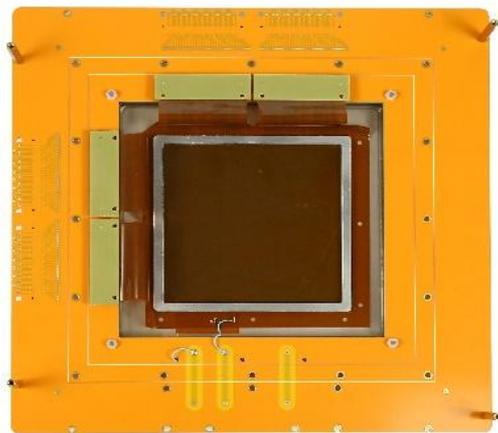
Thickness	X0	Total: ~0.0022
Fe: 0.02mm×50%	/17.6mm	0.0006
Cu: 0.01mm×2×50%	/14.3mm	0.0007
Polyimide: 0.2mm	/286mm	0.0007
Argon gas: 20mm	/109708mm	0.0002

制板工艺

- 已开展技术验证
- 工艺已成熟稳定



探测器Mesh面



阳极面

研制计划

研制内容	开始时间	计划完成时间
探测器阳极板转接板PCB设计 电子学研制	2025年5月	2025年10月
探测器PCB制作焊接 气室腔体加工	2025年11月	2026年3月
探测器组装测试	2026年4月	2026年10月
探测器改进测试	2026年11月	2027年5月
实验厅安装调试	2027年5月	2029年7月

谢谢!