



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

漂移室原初电离计数方法的束流实验研究

主要参与人员：潘温宇、蔡栋成、董明义、董静、纪梦阳、刘洪斌、马晓妍、钱小辉、
田喆飞、伍灵慧、谢万、章红宇、张振宇、赵光、赵豫斌，以及 IDEA 漂移室团队

第十四届全国先进气体探测器研讨会，2026年7月22日-25日，广东惠州

目 录

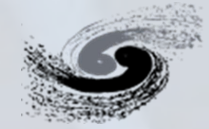
1 CEPC 漂移室与 dN/dx 方法

2 束流测试系统

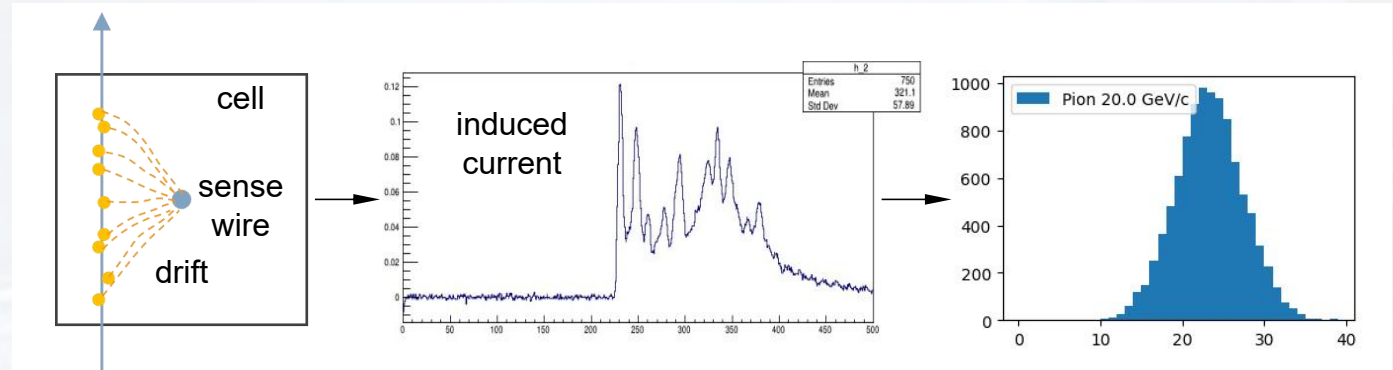
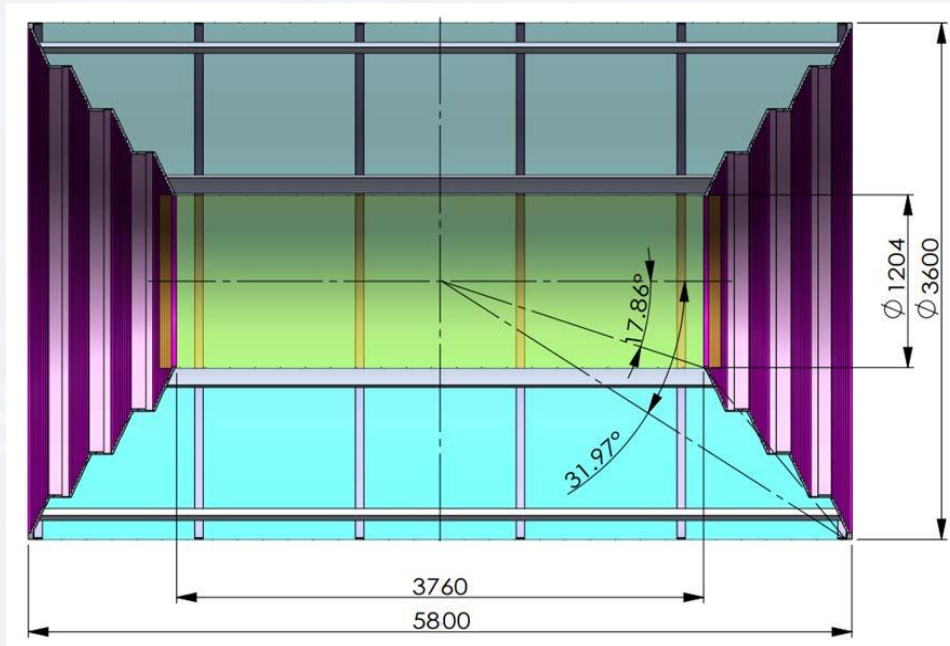
3 束流数据处理与分析

4 基于束流数据的模拟优化

5 总结与未来工作计划

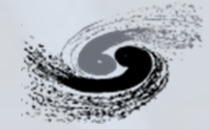


CEPC 漂移室与 dN/dx 方法



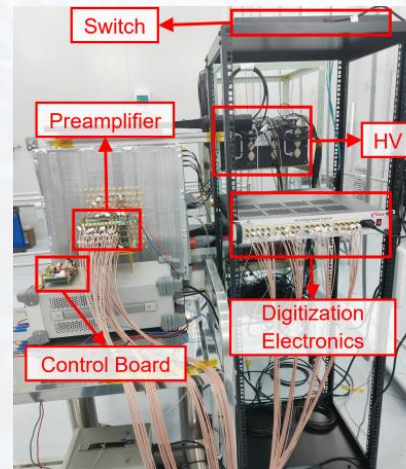
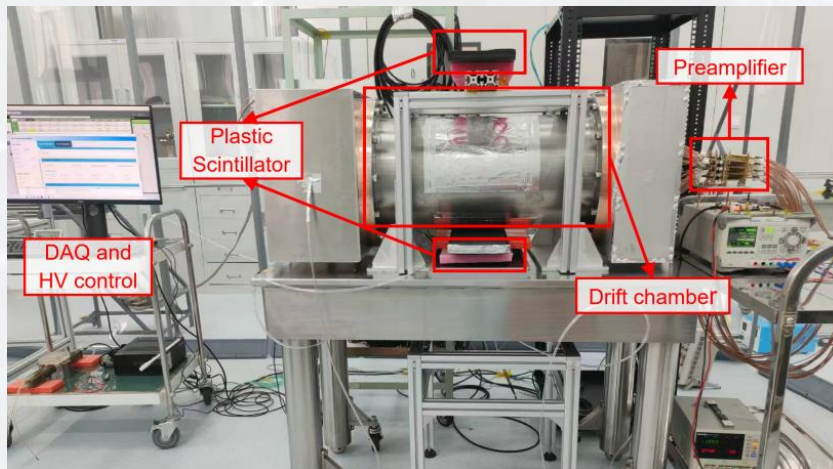
- R extension: 600-1800 mm; Length: 5800 mm
- Cell size: $\sim 18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$; 64 wire layers and 26483 cells
- Ratio of field wires to sense wires: 3:1
- Gas mixture: $\text{He}/i\text{C}_4\text{H}_{10} = 90:10$

- 环形正负电子对撞机开展的味物理和喷注研究对粒子鉴别 (PID) 提出了更高要求
- 作为径迹探测器重要选型方案的漂移室，其关键优化目标之一是粒子鉴别
- 通过 dN/dx 方法优化的漂移室可以在 20 GeV/c 的动量下提供优于 3σ 的 K/ π 鉴别能力



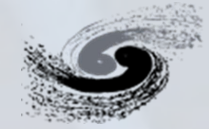
dN/dx 测量的关键问题

关键问题	影响因素	解决方法
信号测量	不同电离信号的时间间隔	优化探测器设计, 使用低漂移速度、低电离团密度气体
	不同电离团之间的干扰	使用低扩散气体, 压低多电子电离团
	电离信号的成型速度及信噪比	研发高速、高带宽、高增益、高采样率、高比特分辨、低噪声的电子学系统
重建算法	堆积信号的处理 初级和次级电离信号的识别 噪声和干扰的去除	开发基于机器学习的寻峰算法和簇团重建算法



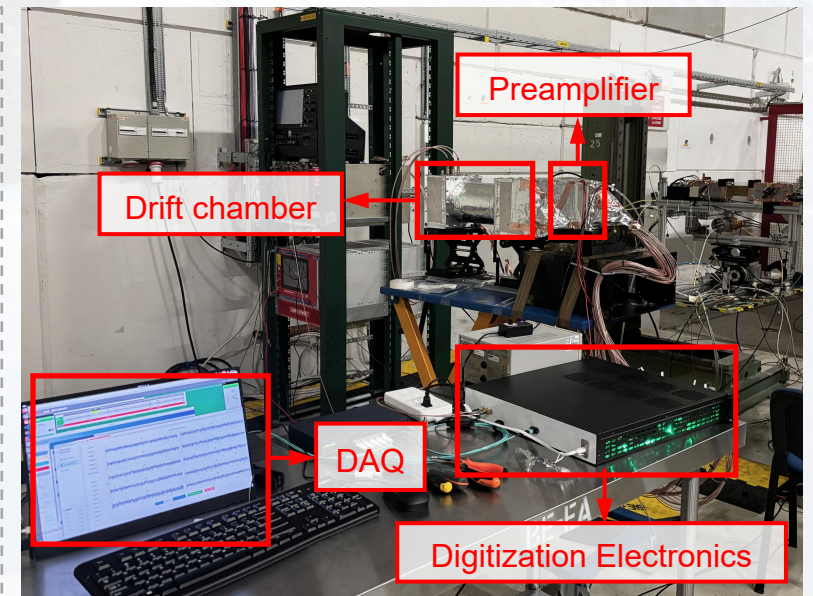
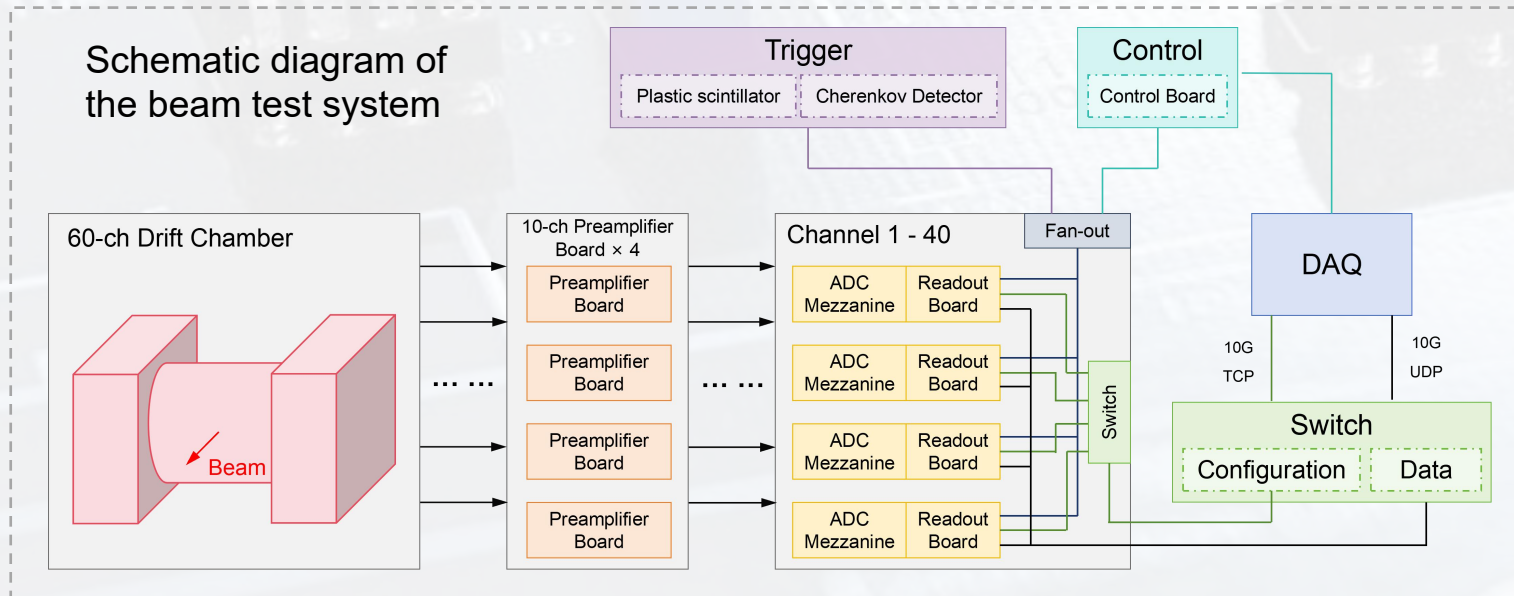
□ 已开展工作

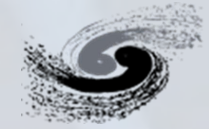
- 工作气体模拟: 开展了工作气体对dN/dx测量影响的模拟, 综合考虑气体的原初电离数、漂移速度、漂移时间、扩散等方面的特性, 使用氦气与异丁烷 (90:10) 作为工作气体
- 电子学研制: 高速、高带宽、低噪声的读出电子学系统基本完成研制, 并与探测器和DAQ开展联合调试
- 重建算法开发: 基于 LSTM 寻峰算法和基于 DGCNN 的簇团重建算法在模拟数据集上有良好表现
- 宇宙线测试: 搭建多层漂移室原型机测试系统, 但由于宇宙线的能量不为固定值, 无法获得理想结果



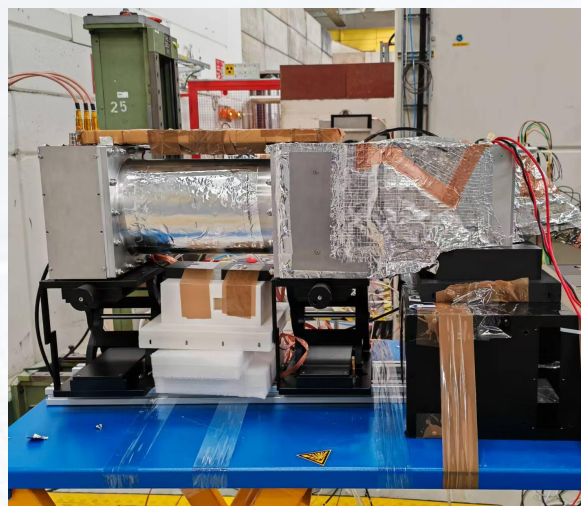
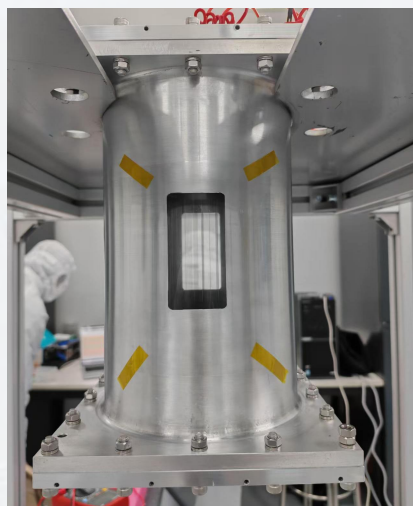
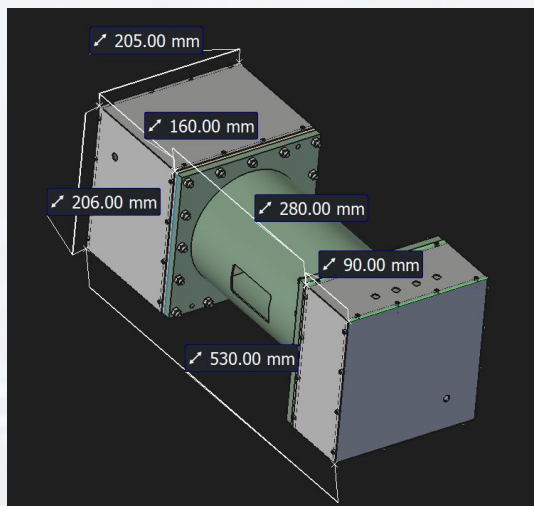
束流测试系统

- 束流测试时间：2026 年 6 月
- 束流测试地点：CERN T9 次级束流，该束流为混合束，可产生 K、 π 、 μ 、e 等粒子
- 本次束流测试与意大利 INFN 的 IDEA DCH 团队联合开展，后续在数据分析、重建算法、模型设计等方面也会进行更深入的合作

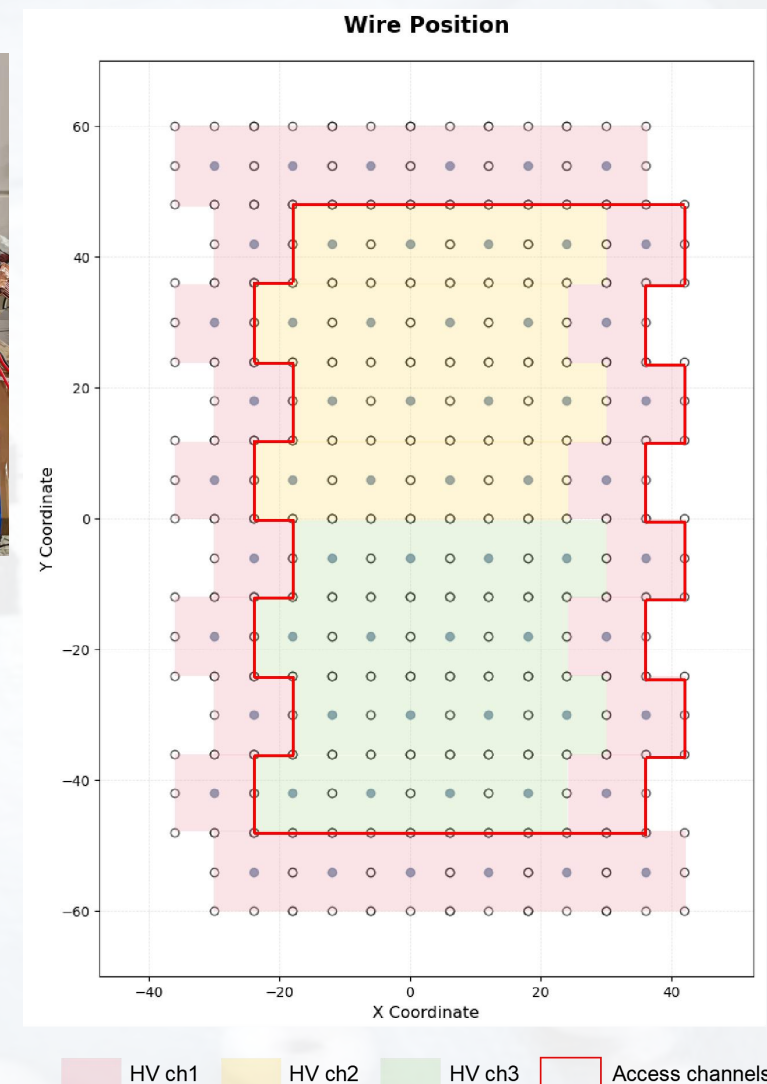


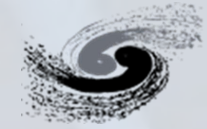


漂移室模型



- 原型机结构：10 层，每层 6 个单元，共 60 个单元；单元尺寸 12 mm × 12 mm；桶部长度 250 mm
- 信号丝：60 根，20 μm 镀金钨丝，张力 4.79 g，挠度 10 μm
- 场丝：222 根，70 μm 铝丝，张力 8.07 g，挠度 10 μm
- 高压分配：所有通道分3组，接入3个高压通道以确保增益一致性
- 因电子学机箱为 40 通道，束流测试仅使用 60 通道中的 40 个（8 行×5 列）





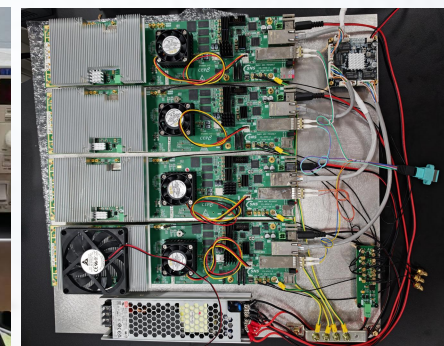
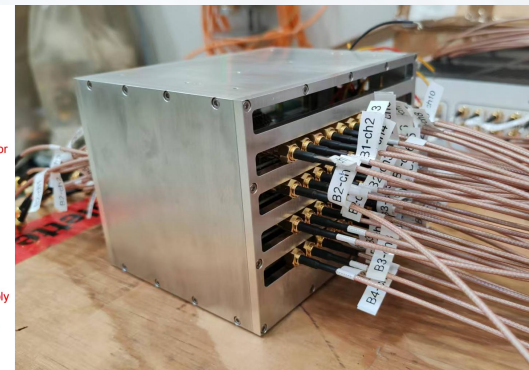
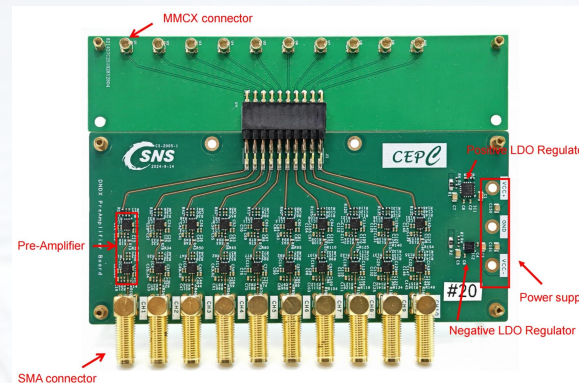
读出电子学

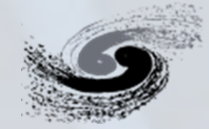
□ 电流灵敏型前置放大器

- 束流测试使用 4 块前放板，每块板 10 个通道
- 电路结构：采用两级 LMH6629 宽带运放进行同相级联放大，保障快前沿特征的低损耗传输
- 增益指标：实测前放模块等效跨阻增益约为 $1233\ \Omega$ (电压增益 24.66V/V)
- 实测带宽与噪声：对前放模块进行扫频测试实测模拟带宽达 601 MHz ；静态工况下输出端基线噪声有效值为 1.09 mVrms

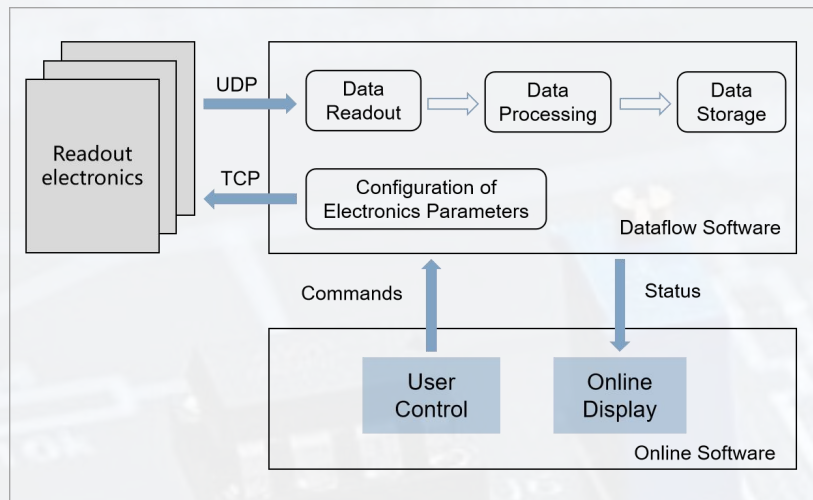
□ 数字化电子学与高速传输链路

- 每块读出板有 10 个通道，4 套读出板集成于一个数字化机箱内，用于束流测试
- 异构架构：ADC 子板集成 AD9695 芯片，通过 FMC 接口对接搭载 Zynq UltraScale+ ZU15EG FPGA 的主控板
- 高速数字化：实现 1.3 GSps 高采样率与 14 bit 高分辨率
- 链路完整性：万兆光纤链路通过 IBERT 物理回环测试，在 10 Gbps 速率下连续运行无误码





DAQ

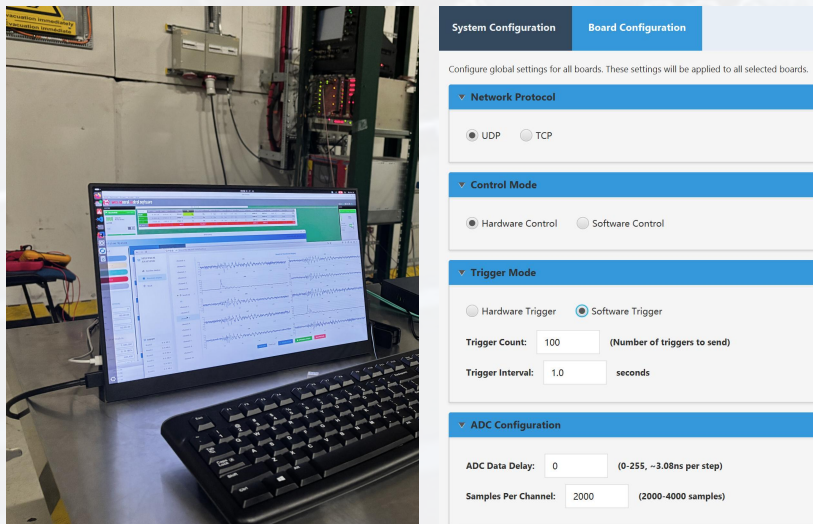


DAQ 架构

- 系统采用前后端分离的模块化架构，将数据流处理与基础服务解耦，基于Java NIO实现多电子学板、多通道的并行非阻塞读出
- 核心优化通过堆外内存环形缓冲区、零拷贝和双级异步存储，消除了GC性能抖动，解决了万兆UDP数据流与磁盘I/O的速度匹配问题
- 系统在连接12块电子学板、万兆网络环境下读出速率峰值达660 MBps，读出并存盘速率稳定在610 MBps

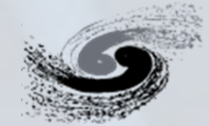
束流数据存储：416 GB

- 数据采用二进制文件格式存储，每块读出板的数据独立打包，每50,000个事例进行一次分包处理
- 一个事例大小（40通道无压缩）
 - $(64B(\text{包头}) + (n(\text{采样点数}) \times 2B + 8B) \times 10 + 64B(\text{包尾})) \times 4$



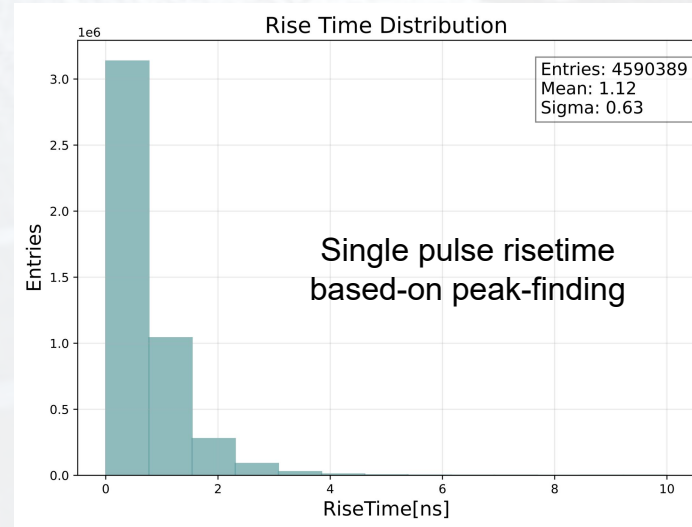
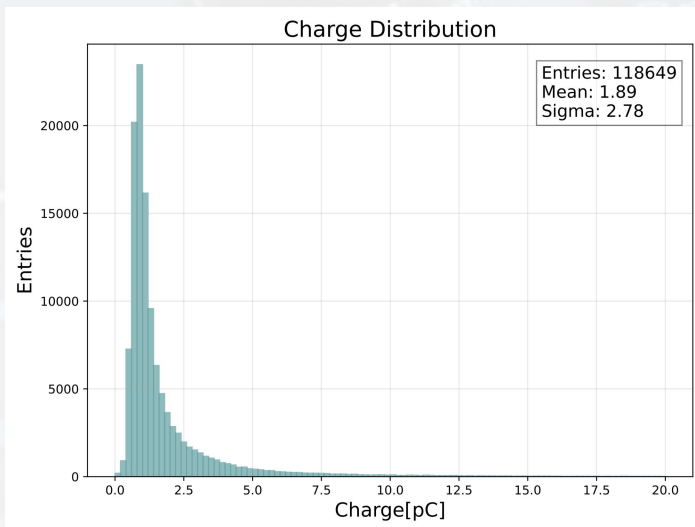
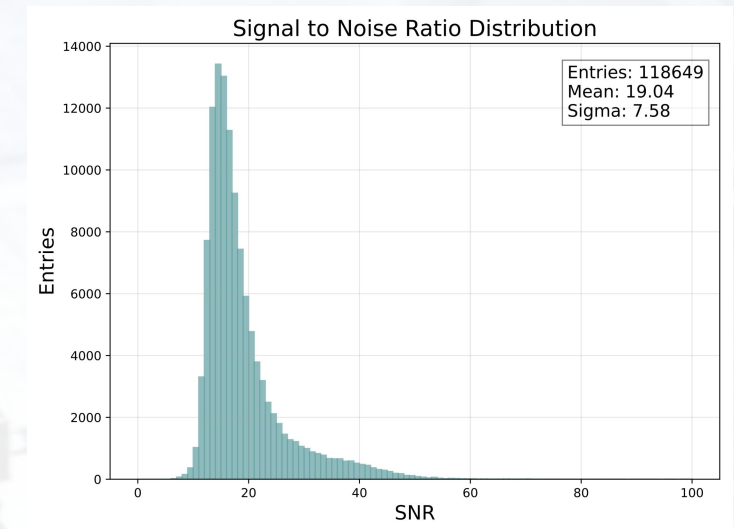
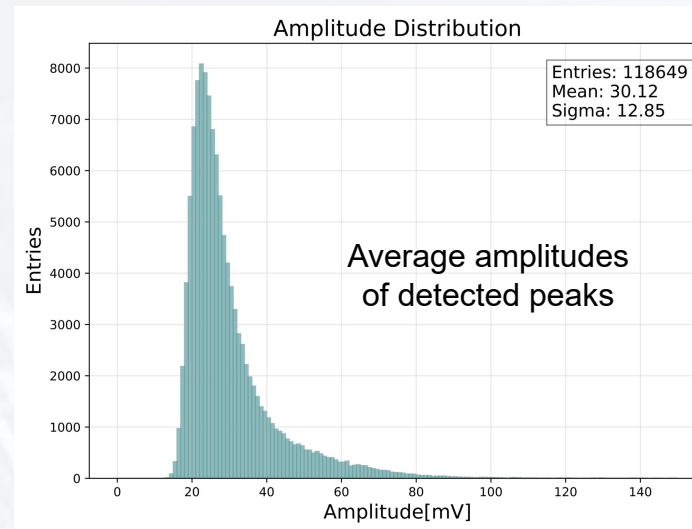
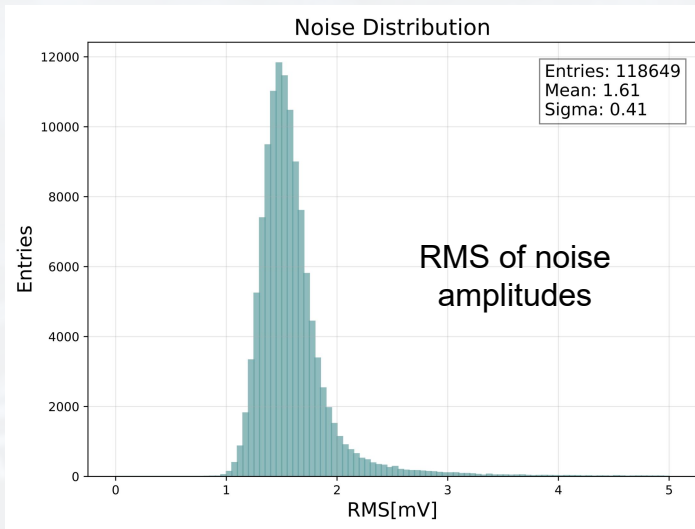
束流取数统计

Particle	Momentum (GeV/c)	Run	HV (V)	Gas Mixture	Sampling Frequency (Gsps)	Sampling Number	Channel Delay (step)
μ	2	Data0046	1745/1795	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	4	Data0023	1740/1790	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	6	Data0032-0033	1740/1790	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	6	Data0034	1745/1795	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	8	Data0035-0037	1745/1795	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	10	Data0038-0040	1745/1795	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	12	Data0010	1740/1790	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	12	Data0041-0043	1745/1795	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
π-	6	Data0060 Data0063-0070	1725/1775	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
	10	Data0053-0059	1725/1775	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	1500	100
π+	10	Data0077	1725/1775	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	2000	150
K	6	Data0079、 Data0082	1725/1775	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	2000	150
	10	Data0078 Data0080-0081	1725/1775	He:iC ₄ H ₁₀ =9:1	1.3	2000	150

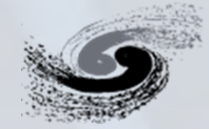


噪声与波形特征

Pion 10GeV



- Noise RMS: 1.61 mV
- Amplitude: 30.12 mV
- SNR: 19.04
- Charge: 1.89 pC
- Risetime: 1.12 ns



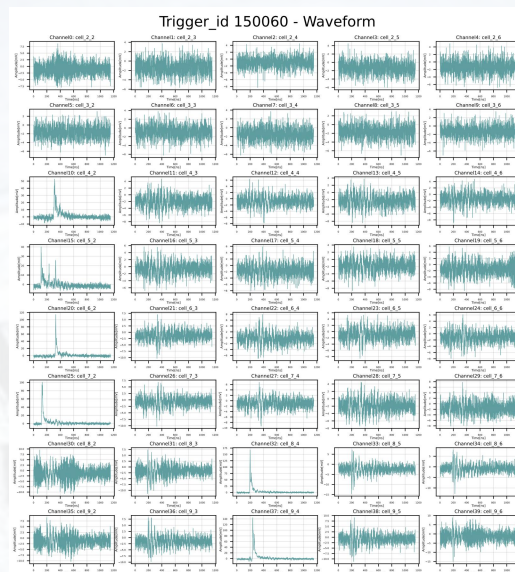
时间戳修正与数据对齐

数据对齐问题

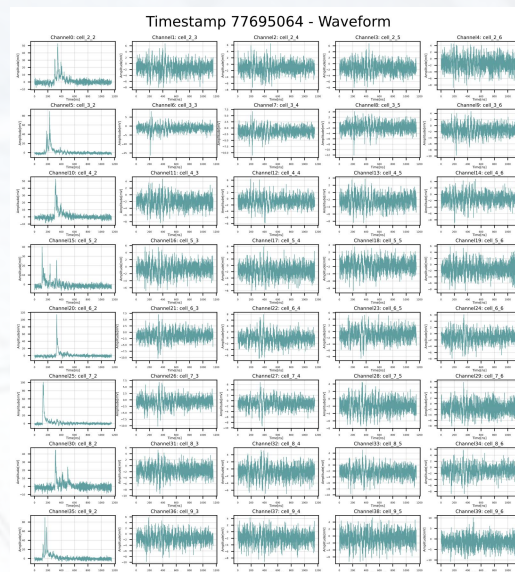
- 在高瞬时触发率下，TID 会发生丢失和错位
- 4 块读出板使用独立的内部时钟，存在时钟漂移和计数差异

时间戳修正

- 确定参考时间戳:
 $\text{start_timestamp} = \text{每个 run 中 4 块板第一个 TID 对齐的事例对应的时间戳}$
 $\text{end_timestamp} = \text{以每个 run 中 4 块板的最后一个时间戳}$
- 以时间戳长度最大的序列作为归一化的基准时间轴:
 $\text{duration} = \text{end_timestamp} - \text{start_timestamp}$
 $\text{global_max} = \max(\text{duration_i})$
- 计算每一块板的修正系数:
 $\text{scale_i} = \text{global_max} / \text{duration_i}$
- 对每块板的时间戳归一化:
 $\text{normalized_ts} = (\text{original_timestamp} - \text{start_i}) * \text{scale_i} / 10000$



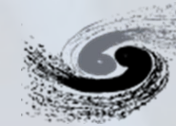
通过 trigger_id 无法对齐数据



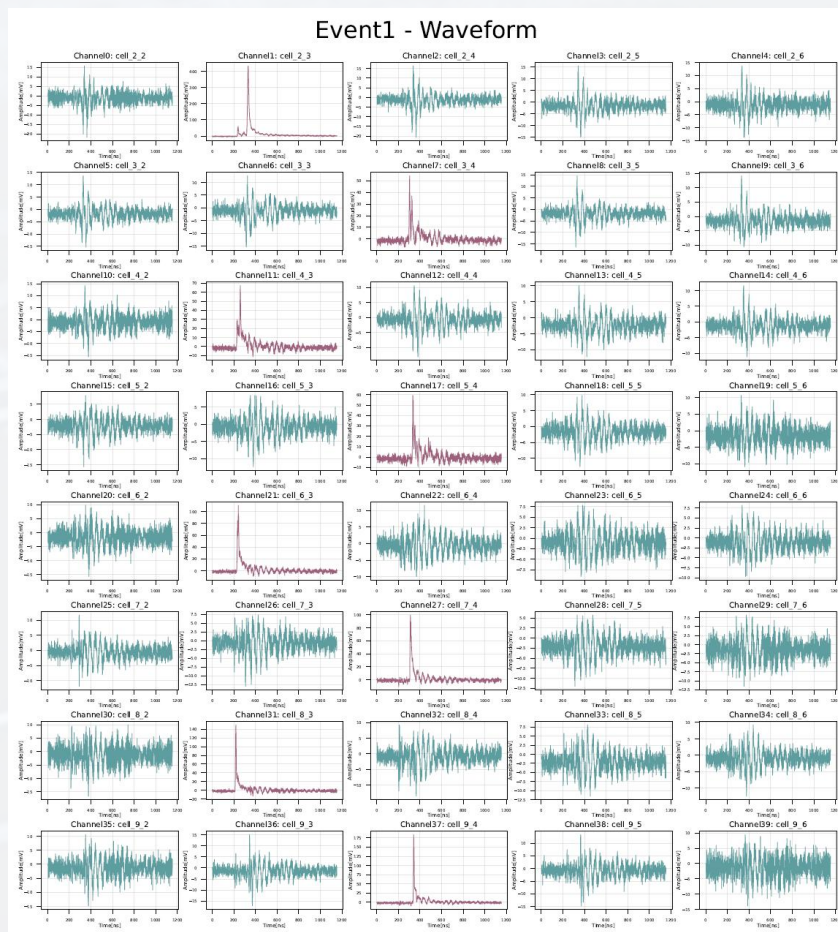
通过修正后 timestamp 对齐的数据

改进措施

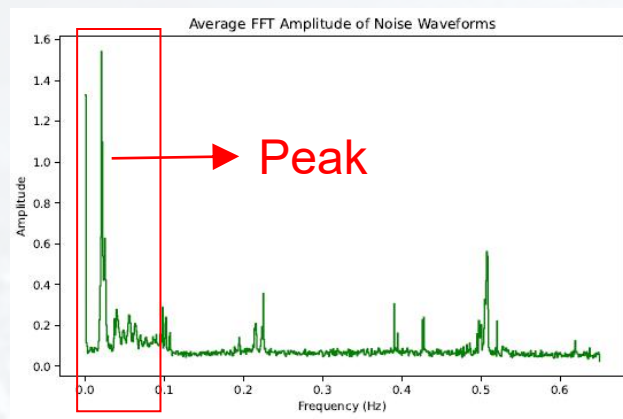
- 后续将在系统中增加时钟同步功能，确保各读出板之间保持时间同步



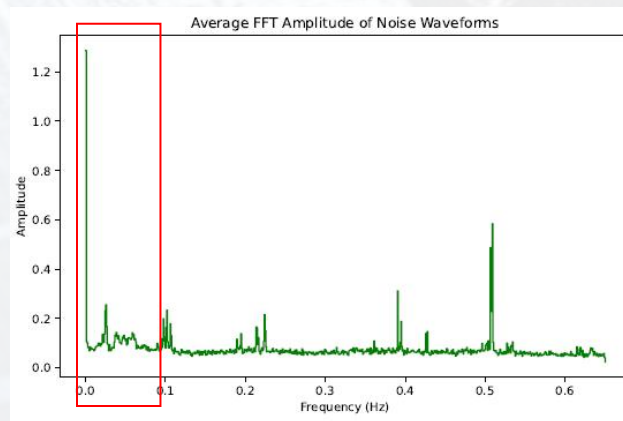
串扰事例去除



带有串扰的事例

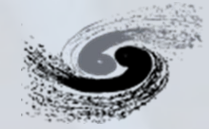


有串扰噪声频谱



无串扰噪声频谱

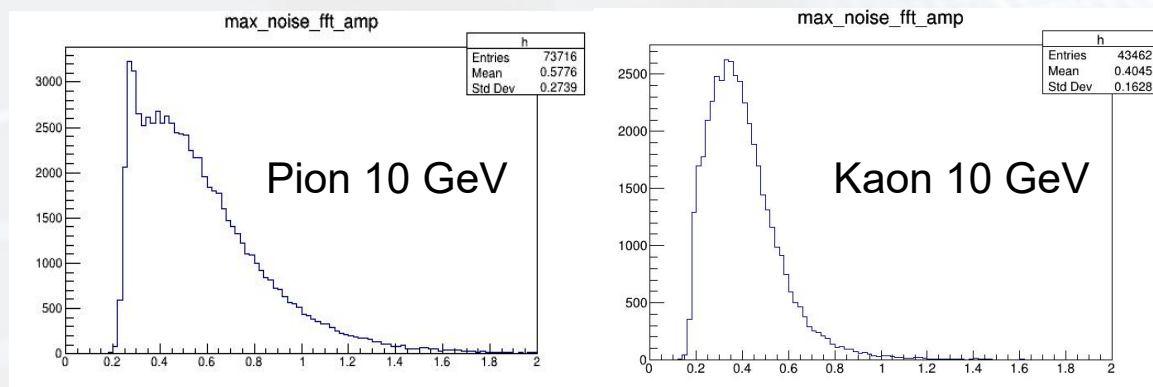
- 在部分事例中存在串扰现象，所有通道均出现低频振荡，从而影响信号质量
- 对噪声信号进行 FFT 分析：
 - 有串扰噪声频谱：在 0-100 MHz 的范围内存在一个明显的峰
 - 无串扰噪声频谱：在 0-100 MHz 的范围内无大峰



串扰事例去除

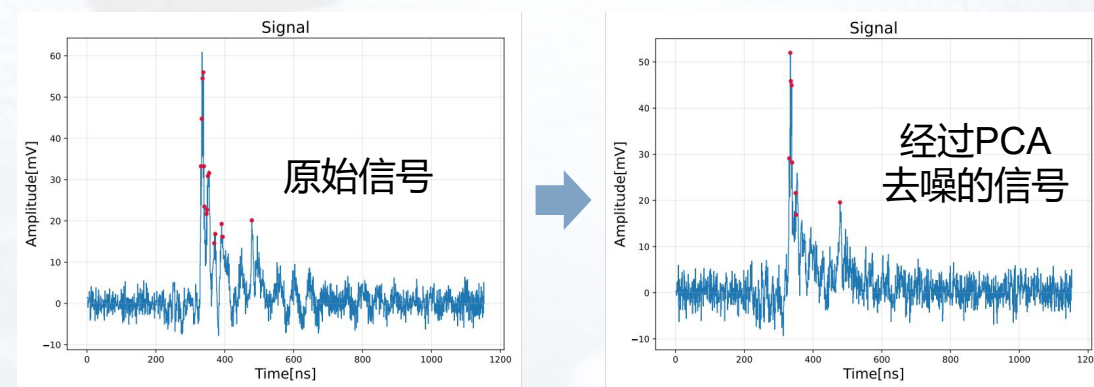
□ 事例筛选

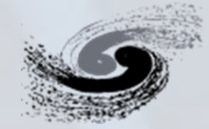
- 定义 A_{100}^{max} : 频率在 (0, 100) MHz 范围内的 FFT 幅度最大值
- 采用 $A_{100}^{max} > 0.6$ 作为判断依据, 将串扰事例予以剔除。经筛选后, Pion 事例的保留效率为 62.6%, Kaon 事例为 90.0%。此外还发现, Pion 事例中低频振荡成分明显多于 Kaon 事例



□ 后续串扰处理：串扰成分去除

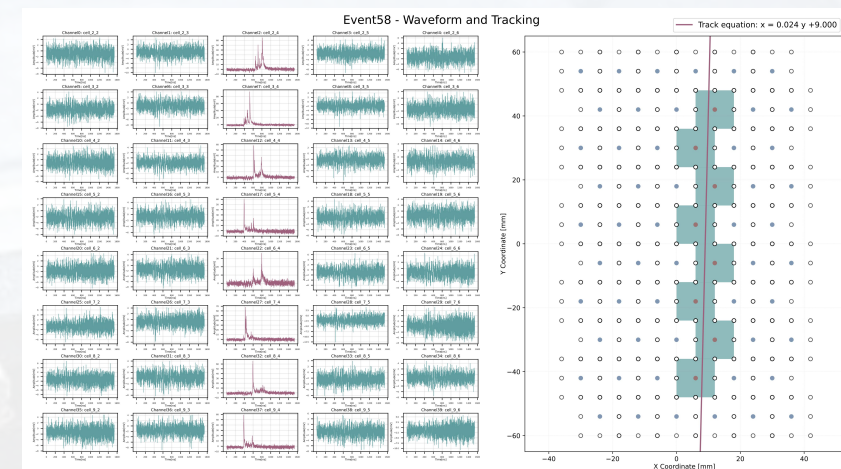
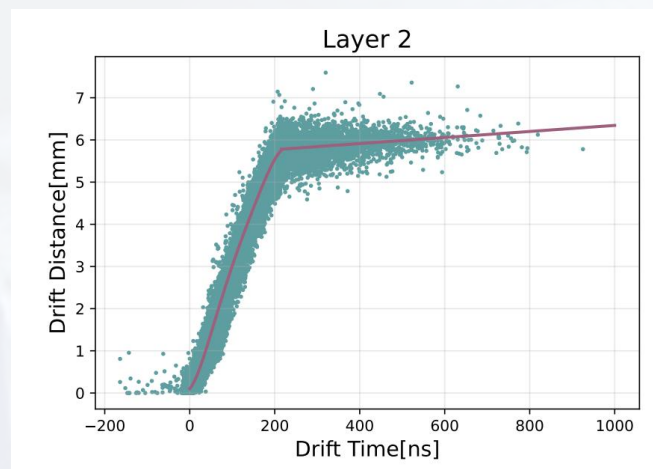
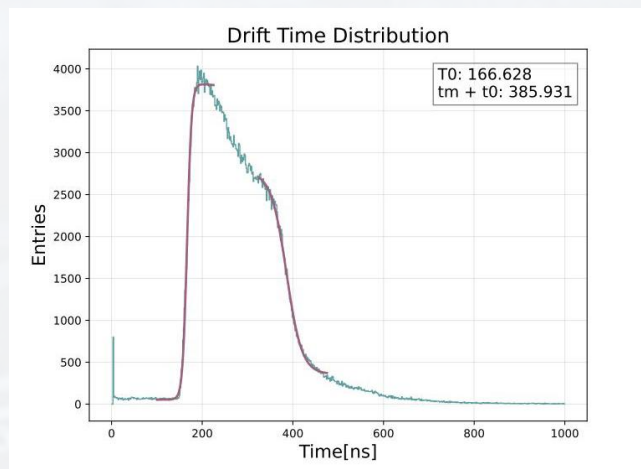
- 盲源分离——主成分分析(PCA)
- 假设观测信号是真实信号与串扰的线性叠加, 且串扰在通道之间具有高度相关性
- 将数据正交变换到方差最大的主成分方向, 剔除代表强共模噪声的前几个主成分后反向重构
- 大幅值波形的处理仍存在问题, 需进一步研究





刻度与径迹重建

Pion 10GeV

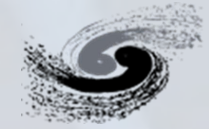


□ T0 刻度与 X-T 刻度

- 漂移时间分布 ($t_{\text{meas}} - t_{\text{elec}}$) 的上升沿和下降沿包含漂移时间零点和线性区间信息，对上升沿拟合可得到 T0
- 初始 X-T 刻度关系采用时间分布积分法获得
- 通过径迹可以计算实际漂移距离和新的 X-T 关系，即可得到实际的 X-T 分布，并对该分布采用五阶多项式和一阶多项式进行分段拟合

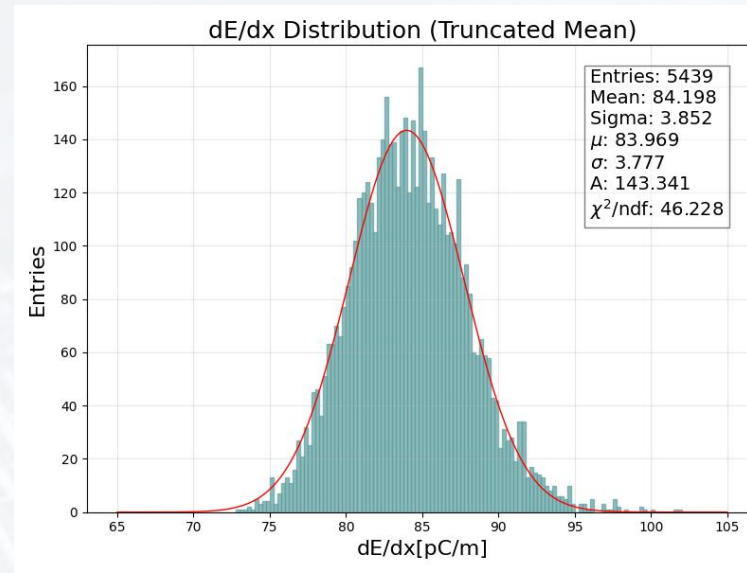
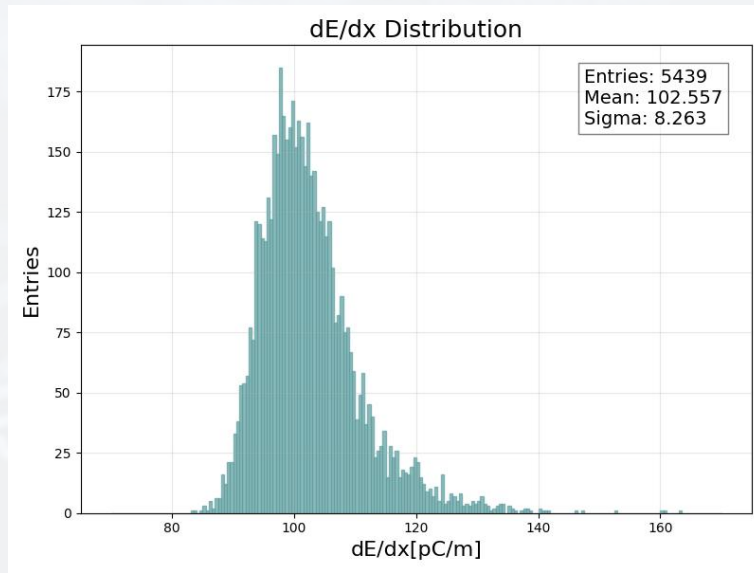
□ 径迹重建

- 采用霍夫变换法进行径迹寻找，霍夫空间中投票值最高的 (k, b) 即为径迹参数，将用作拟合的初始值
- 径迹拟合通常采用最小二乘法，通过 T0 刻度关系以及 X-T 刻度关系计算漂移距离



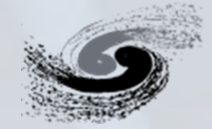
dE/dx

Pion 10GeV



- 10 GeV Pion 在 15% 的截断比下，等效 1 m 径迹的最优 dE/dx 分辨率为 4.5%

截断比 (%)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
μ	89.445	86.533	83.969	81.624	79.412	77.286	75.193	73.126	71.000
σ	4.088	3.894	3.777	3.698	3.639	3.603	3.571	3.558	3.595
分辨率 (%)	4.57	4.50	4.50	4.53	4.58	4.66	4.75	4.86	5.06



二阶导数寻峰算法

- 基于导数的寻峰算法利用信号快速上升沿的特征，通过判断一阶导数是否超过设定阈值来识别信号峰；同时增加二阶导数约束，以平衡探测效率与噪声敏感性
- 快速处理实验数据，及时反映实验情况，以便于对实验条件进行调整，易在硬件设备上实现
- 对堆叠峰的识别能力较差，噪声可能过阈被识别为假峰

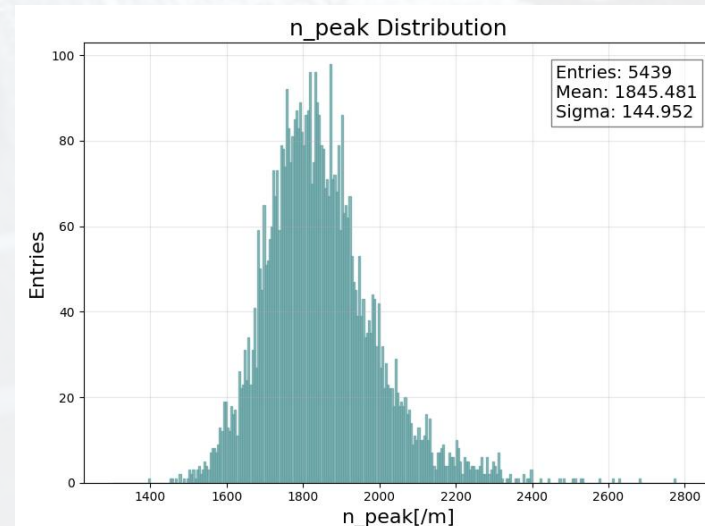
Algorithm 1: Derivative algorithm.

Data: Waveform with n bins ($Input[1, \dots, n]$)

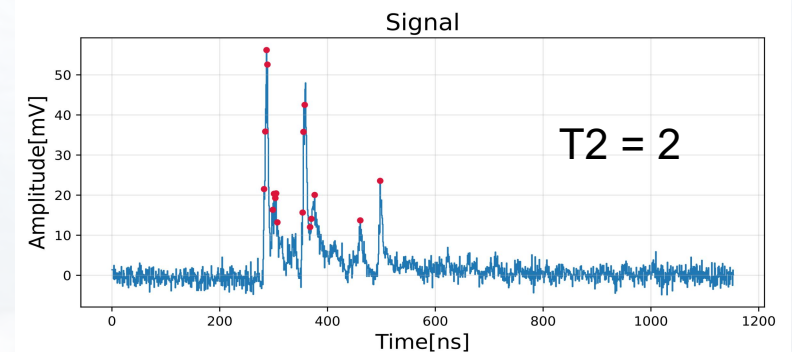
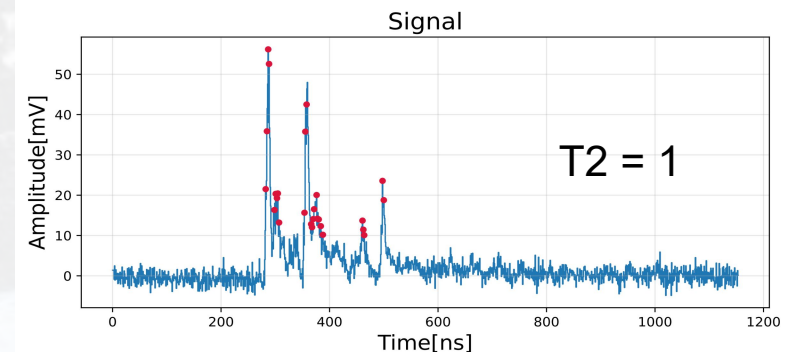
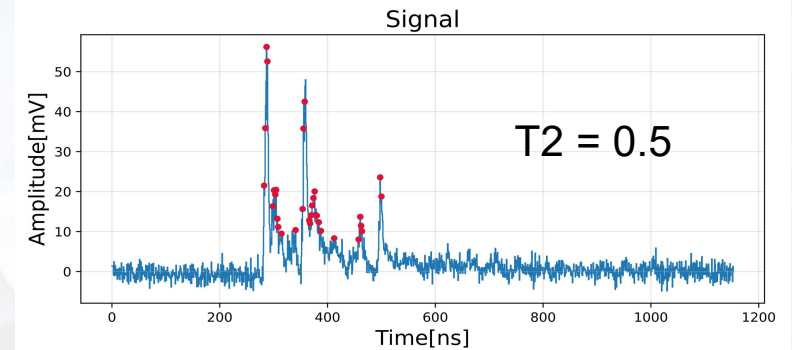
Result: A list of detected peaks ($Output$)

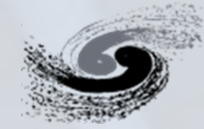
```
1 begin
2   Output  $\leftarrow \emptyset$ ;
3   D1[1]  $\leftarrow 0$ ;
4   D2[1]  $\leftarrow 0$ ;
5   Int[1, ..., n]  $\leftarrow 0$ ;
6   for  $i \leftarrow 2$  to  $n$  do
7     if  $Input[i-1] < T_1$  then continue;
8     D1[i]  $\leftarrow \max\{Input[i] - Input[i-1], 0\}$ ;
9     D2[i]  $\leftarrow \max\{D1[i] - D1[i-1], 0\}$ ;
10    if  $D2[i] > 0$  then
11      Int[i]  $\leftarrow Int[i-1] + D2[i]$ ;
12    else if  $Int[i-1] > T_2$  then
13      Output  $\leftarrow Output \cup \{i-1\}$ ;
14    end
15  end
16 end
```

Comp. Phys. Comm. 300
(2024) 109208

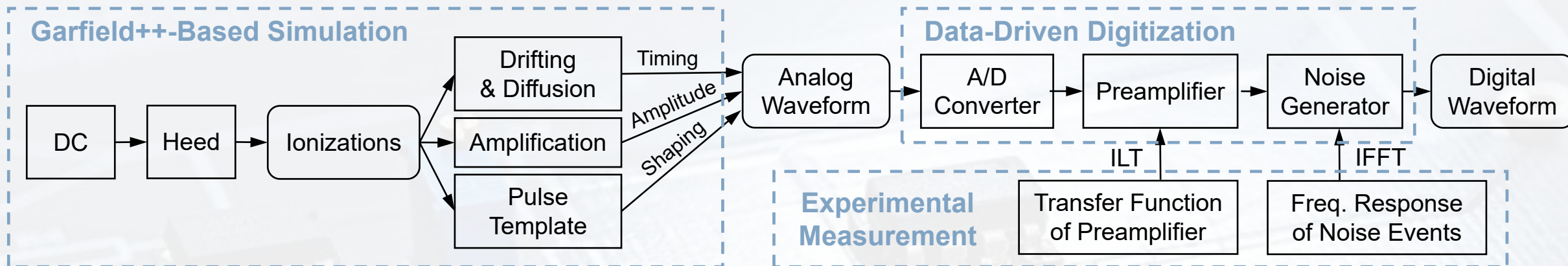


Pion 10GeV





模拟框架

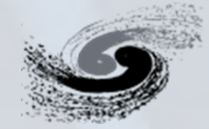


□ 单单元模拟

- 初级和次级电离：基于 Garfield++ 的 Heed
- 单脉冲参数化：幅度（Polya 分布），时间（x-t 关系），成型（成形函数）
- 前放：在 s 域中做传递函数逆拉氏变换（ILT）
- 电子学噪声：对频域幅值做快速傅里叶逆变换（IFFT）生成

□ 多单元模拟

- 将一个单元扩展为 n 行 × m 列的多单元结构
- 定义 DCHTrack 类，包含波形（HitWaveform）、层编号（HitLayerID）、单元编号（HitCellID）
- 当前配置：8 × 5 列，与束流测试单元结构相同



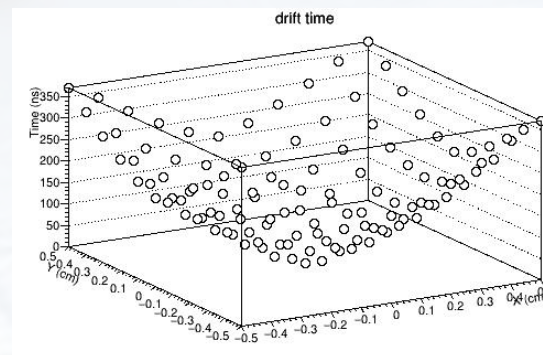
基于束流数据的参数更新

□ Garfield++ 配置与参数提取

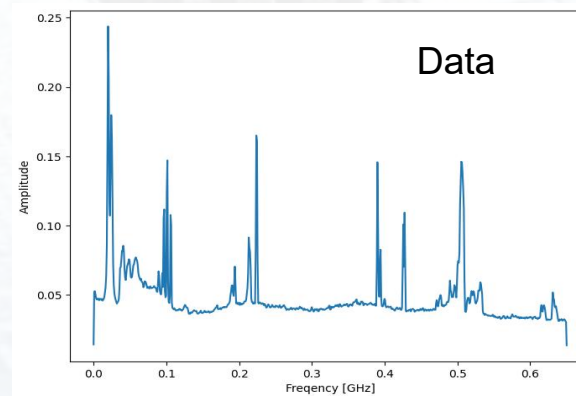
- 在 Garfield++ 中配置束流测试参数 (单元尺寸 12 mm × 12 mm, 8 行 × 5 列, 高压 1775 V)
- 幅度和时间参数: 幅度分布由有效电离电子数决定, $\text{amplitude} = f(N_{\text{aval}})$; 漂移时间由 X-T 关系给出, $\text{drift time} = g(x, y)$, $\text{drift time error} = h(x, y)$

□ 噪声生成 (基于 Parseval 定理)

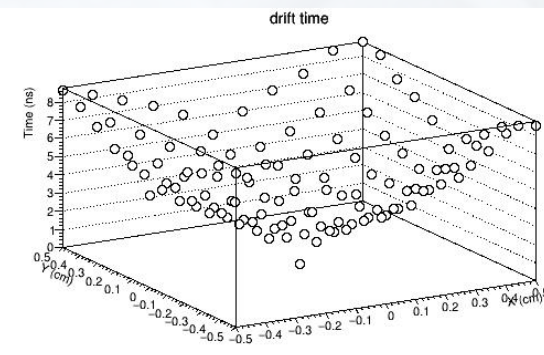
- 从实测束流数据中提取噪声频谱, 前半部分频点加随机相位, 后半部分取共轭, 满足实信号条件
- 对 0 和 $N/2$ 频率点虚部置零, 经 IFFT 得到时域噪声



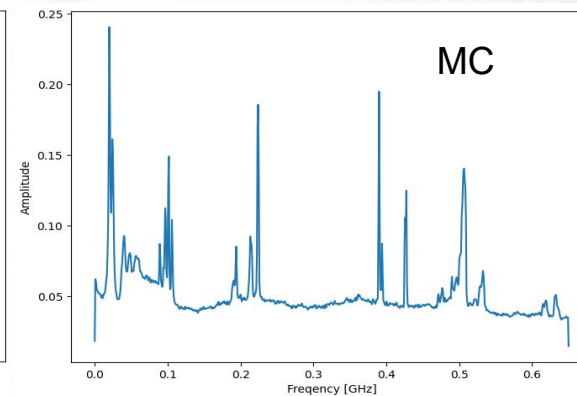
Drift time = $g(x, y)$



Data 噪声频谱

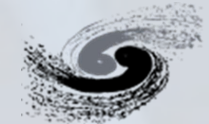


Drift time err. = $h(x, y)$



MC 噪声频谱

- 时域中
 - Data 噪声: mean = -1.330, std = 1.963
 - MC 噪声: mean = -1.357, std = 1.954



模拟调优

□ 调优目标

- 通过迭代调整波形幅度和传递函数使模拟波形在幅度和噪声水平上与实测数据一致

□ 评估指标

- 时域平均幅度比: $R_{\text{amp}} = A_{\text{data}} / A_{\text{MC}}$
- 频域响应的皮尔逊相关系数: $P_{\text{freq}} =$

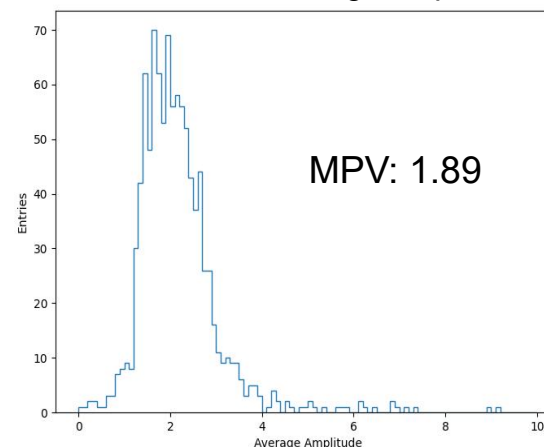
$$\frac{\Sigma(x-m_x)(y-m_y)}{\sqrt{\Sigma(x-m_x)^2 \Sigma(y-m_y)^2}}, \text{ 其中 } x、y \text{ 分别为数据}$$

和 MC 的频域响应, m_x 、 m_y 为均值

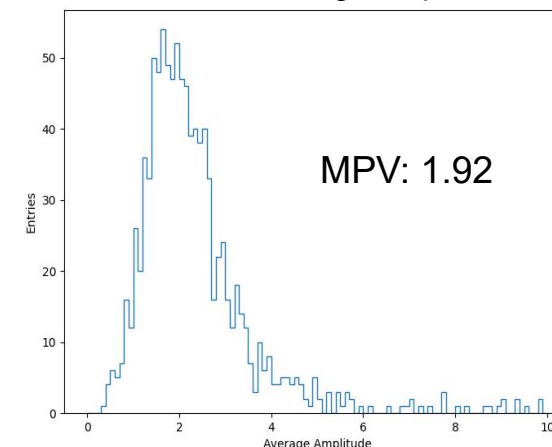
□ 后续应用

- 利用调优后的模拟器生成含真值标签的数据集, 用于机器学习 (ML) 训练

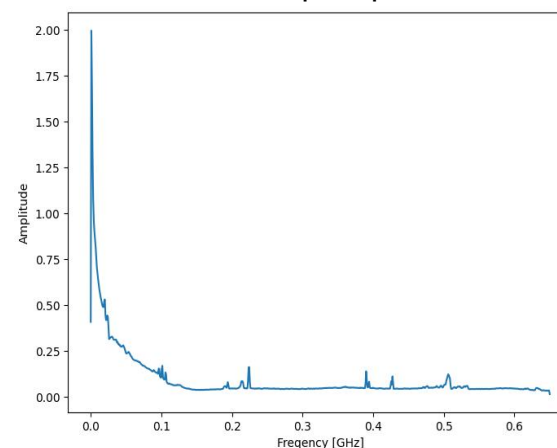
Data Average amp.



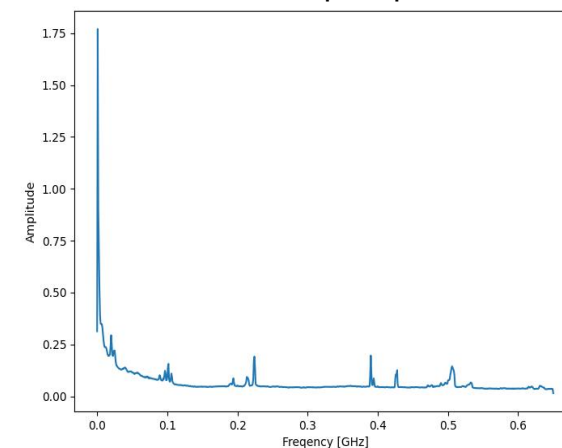
MC Average amp.

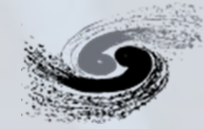


Data Freq. response



MC Freq. response





总结与未来工作计划

□ 总结

- 漂移室是径迹探测的重要选型，通过 dN/dx 方法可以提升漂移室的 PID 性能；为验证 dN/dx 方法，在 CERN T9 线站开展束流实验，获取了 K、 π 、 μ 等多粒子样本
- 束流测试数据分析正在进行中，包括时间戳修正、串扰事例剔除、刻度、径迹重建，初步寻峰等
- 模拟框架已根据束流数据进行了更新与调优，后续将用于生成带标签数据集，以支持机器学习训练

□ 未来工作计划

- 针对束流测试中发现的时钟同步问题和串扰问题，对测试系统进行相应的调整与优化
- 继续进行束流测试数据的分析工作，开展对重建算法的研究，开发基于机器学习等方法的新算法，提升寻峰和簇团重建算法性能



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences



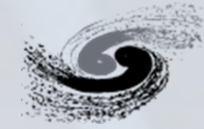
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

请各位老师同学批评指正

汇报人：潘温宇

汇报时间：2026年7月23日

第十四届全国先进气体探测器研讨会，2026年7月22日-25日，广东惠州

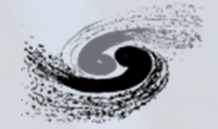


The T9 Secondary Beam at CERN

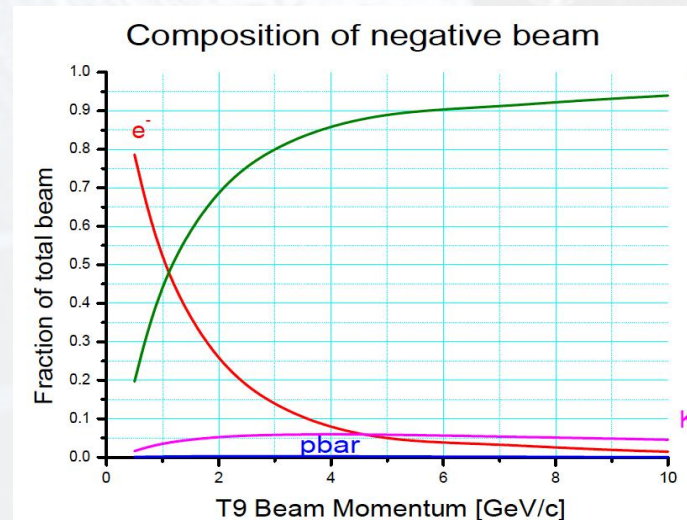
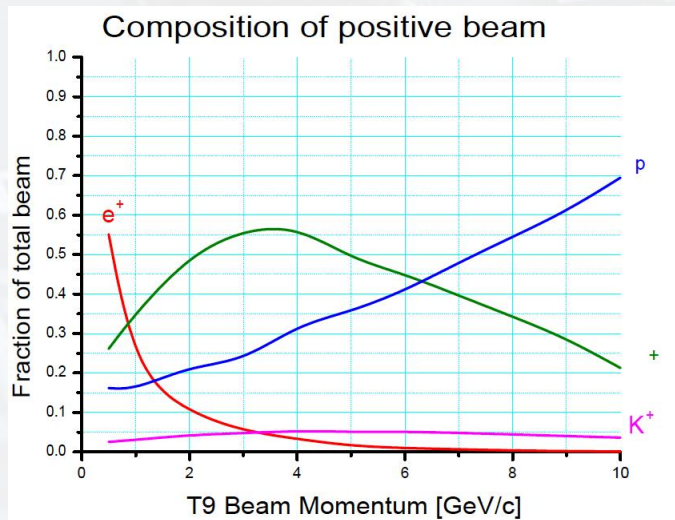
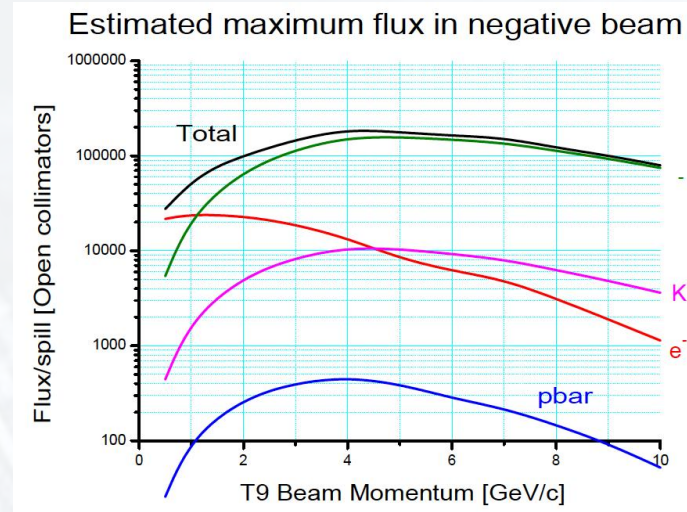
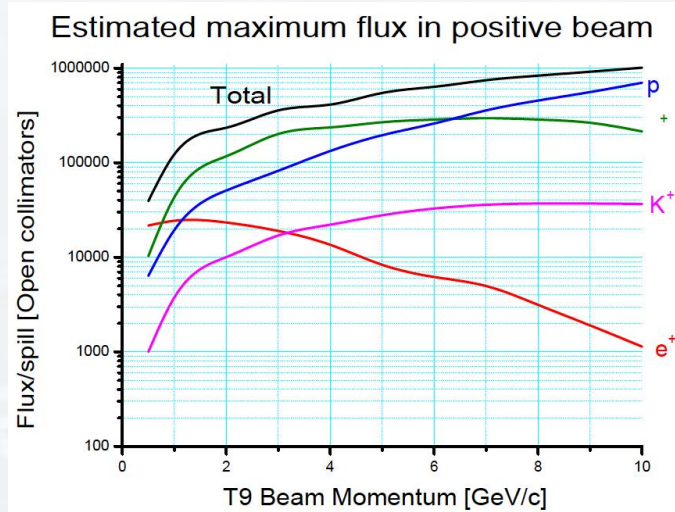
		Name		Q	Mass	Mean life (τ)		CT	Mean decay distance	Decays		
					[MeV/c²]	[s]		[m]	[m/GeV/c]			
Leptons	Electron		e	±e	0.511	stable						
	Muon		μ	±e	105.6	2.2×10 ⁻⁶		659.6	6.3×10 ³	μ ⁺ → e ⁺ ν̄ _e ν _μ (100%)		
Hadrons	Mesons	Pion		π	±e	139.6	2.6×10 ⁻⁸		7.8	56.4	π ⁺ → μ ⁺ ν _μ (100%)	
		Kaon		K	±e	493.6	1.23×10 ⁻⁸		3.7	8.38	K ⁺ → μ ⁺ ν _μ (63%) π ⁰ e ⁺ ν _e (5%) π ⁰ μ ⁺ ν _μ (3%) π ⁺ π ⁰ (...) (28.9%)	
				K ⁰	0	497.6	K ⁰ _S	8.9×10 ⁻¹¹	0.02	0.060	K ⁰ _S → π ⁰ π ⁰ (30.7%) π ⁺ π ⁻ (69.2%)	
					K ⁰ _L		5.12×10 ⁻⁸	15.34	34.4	K ⁰ _L → π [±] e [∓] ν _e (40.5%) π [±] μ [∓] ν _μ (27.0%) 3π ⁰ (19.5%) π ⁺ π ⁻ π ⁰ (12.5%)		
	Proton		p	±e	938	stable						
	Lambda		Λ	0	1115.6	2.63×10 ⁻¹⁰		0.079	0.237*	Λ ⁰ → p π ⁻ (63.9%)		
	Baryons	Sigma Hyperons		Σ ⁺	+e	1189.3	8.02×10 ⁻¹¹		0.024	0.068*	Σ ⁺ → p π ⁰ (51.57%)	
				Σ ⁻	-e	1197.4	1.48×10 ⁻¹⁰		0.044	0.125*	Σ ⁻ → n π ⁻ (99.84%)	

(*) for 10 GeV/c

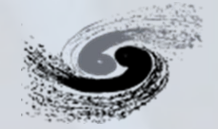
Parameter	T9
Maximum momentum (GeV/c)	12
Production angle (mrad)	0
Beam length to ref. focus (m)	55.8
Beam height above floor (m)	2.50
Ang. acceptance Horizontal (mrad)	± 4.8
Vertical (mrad)	± 5.8
Acc. Solid angle (μ sterad)	87
Theor. momentum resol. (%)	0.24
Max. momentum band (%)	± 10
Magnification at reference focus	1.0, 1.2
Protons on North target	$\sim 2.5 \cdot 10^{11}$
Max. flux (depending on p, Q)	10^6



The T9 Secondary Beam at CERN



- Beam rates
- For wide open collimators, i.e.
 $dp/p \approx \pm 7.5\%$
- Beam composition
- With electron enriched target
(otherwise $e^\pm$ strongly reduced)

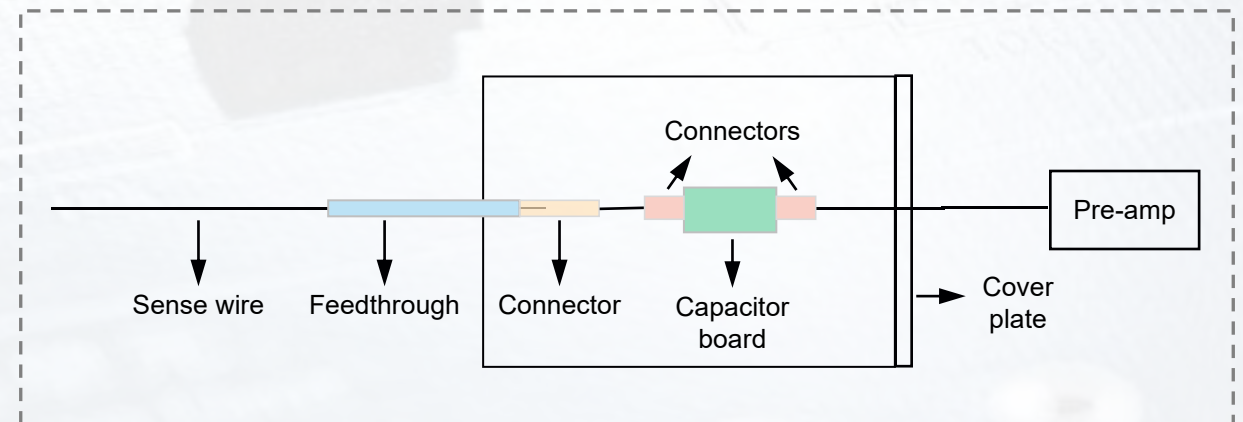
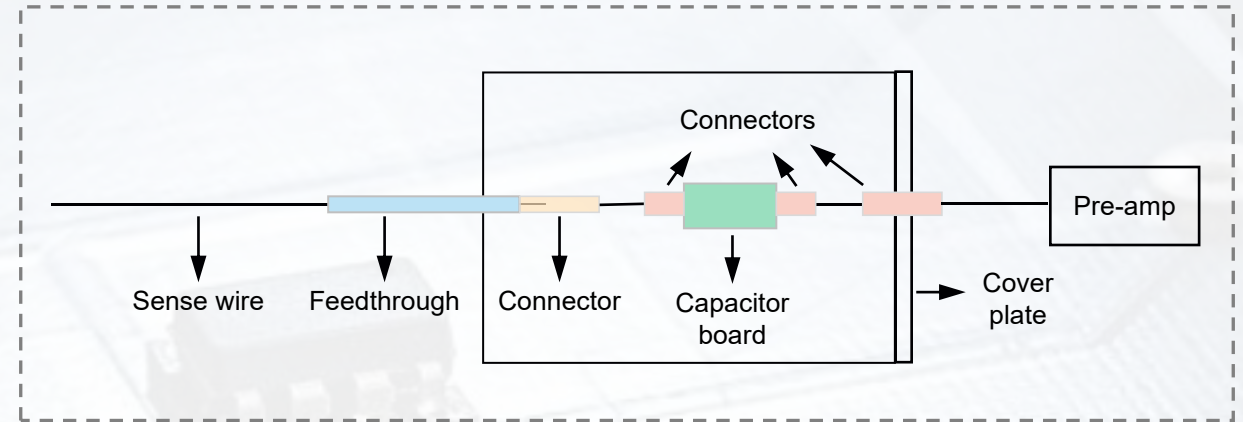


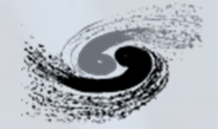
Tests for crosstalk

- Crosstalk source identified: originates from cover plate (ground)
- Solution: use connections that bypass the cover plate
- This connection method reduces crosstalk but increases baseline noise. Thus, an effective noise reduction approach is required

Old capacitor board test:

- Outputs directly connected to preamp inputs (no cover plate path); board not grounded separately. Baseline noise: ~several hundred mVpp
- To provide a ground, a coaxial cable connected the output to the cover plate. With 5 channels grounded to the cover plate, noise on other channels dropped to ~13 mVpp





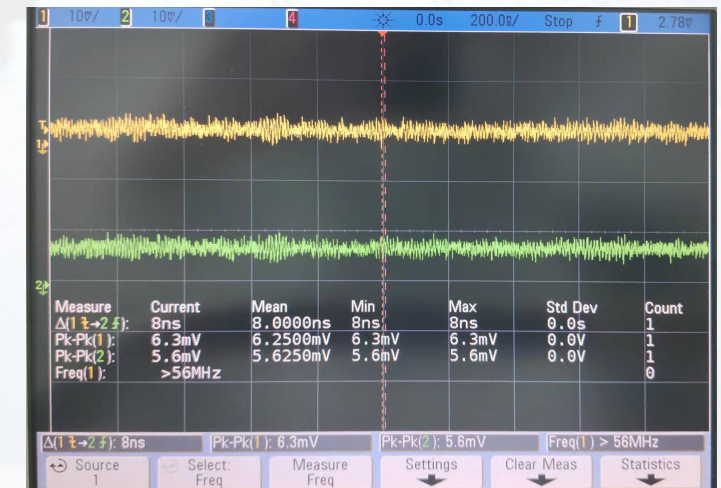
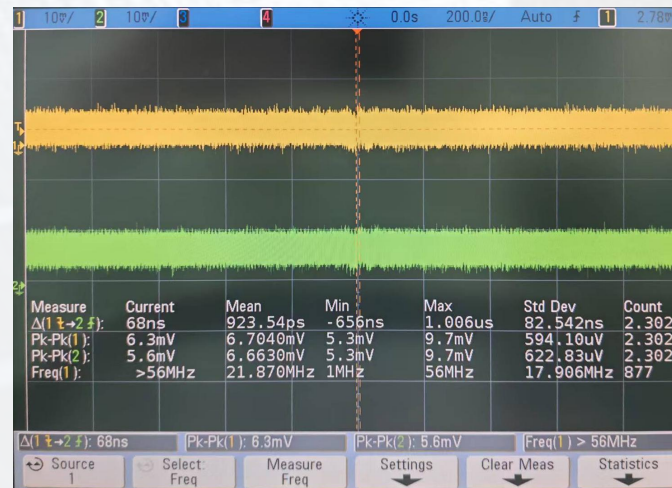
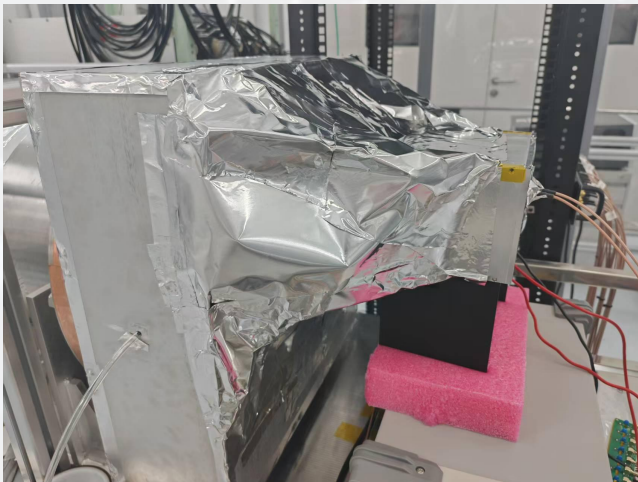
Tests for crosstalk

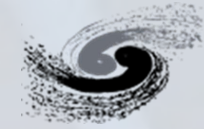
New capacitor board test:

- New board design: 4-layer PCB; larger copper area; added 250 Ω resistor for impedance matching
- Without dedicated ground: noise ~ 26 mVpp (significantly lower than old 2-layer board)
- With ground (pad connected to end panel): noise ~ 15 mVpp (best case: 11 mVpp)

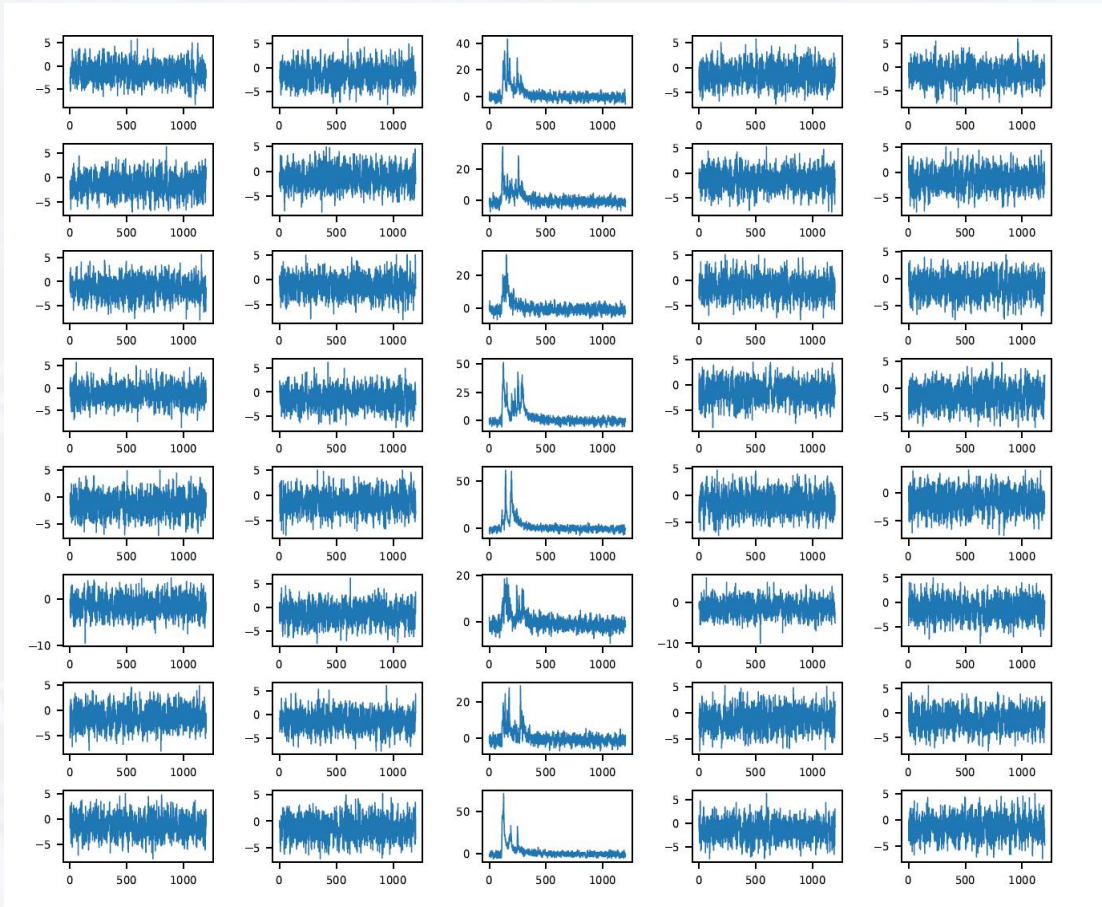
Shielding test:

- Adding a shielding box around the preamplifier had essentially no effect on the noise
- Shielding the cable between the preamplifier and the prototype reduced the noise to ~ 6 mVpp. However, the test results were unstable, and further testing is still required

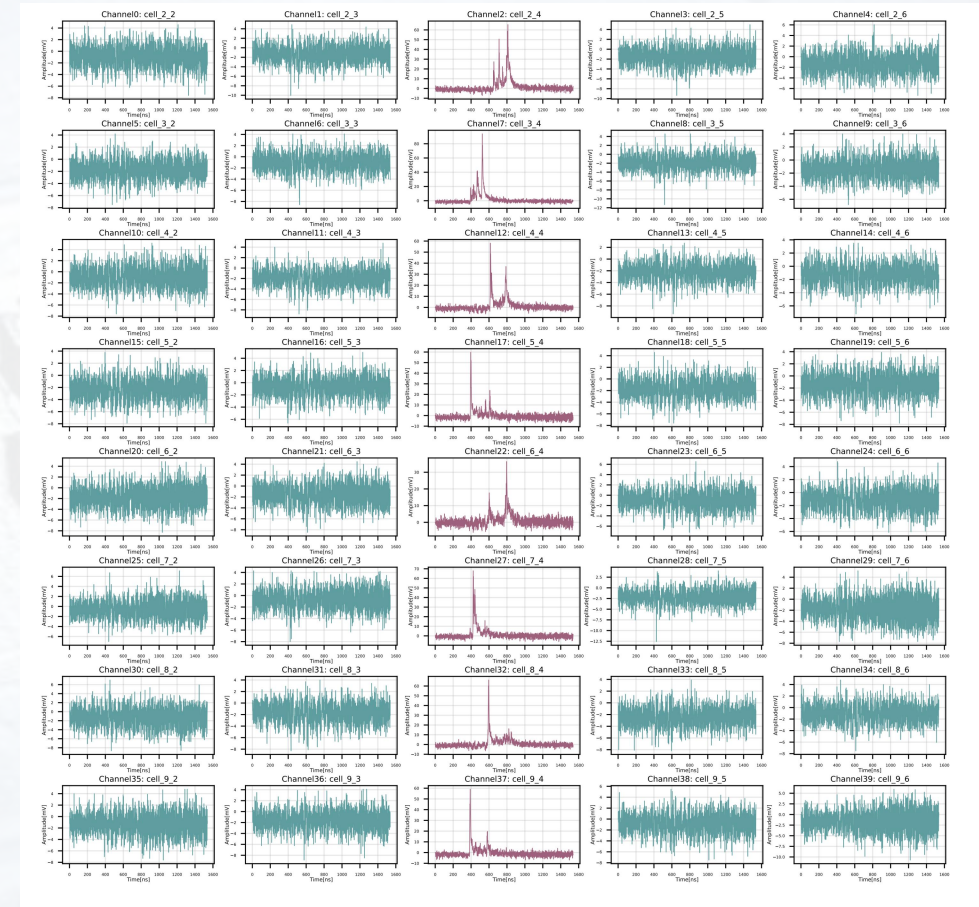




Simulated data and experimental data



Simulated data



Experimental data