

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



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

漂移室原初电离计数性能研究

主要参与人员：潘温宇、蔡栋成、董明义、董静、黄菲、纪梦阳、刘洪斌、钱小辉、
田喆飞、伍灵慧、章红宇、张振宇、赵光、赵豫斌

第十三届全国先进气体探测器研讨会，2025年8月21日-22日，上海

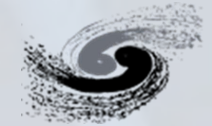
目 录

1 研究背景

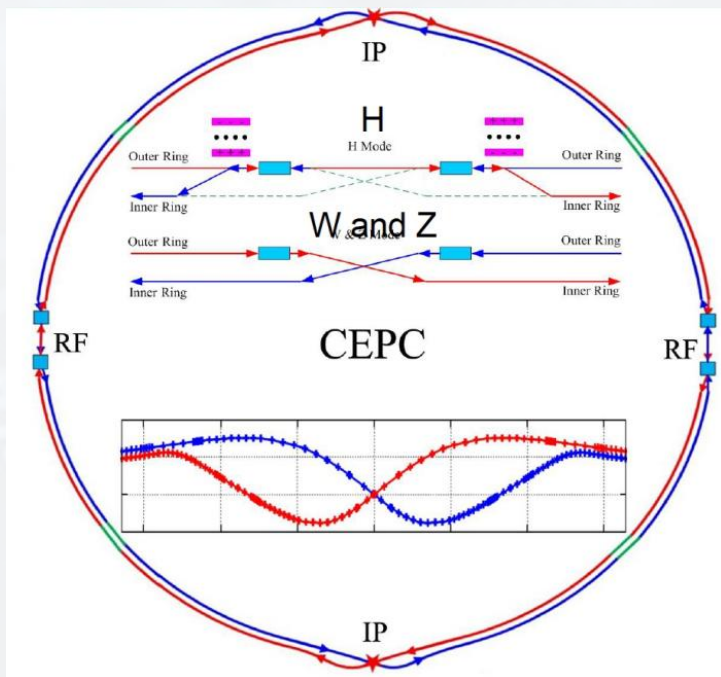
2 研究进展

- 模拟与重建算法
- 漂移室模型建造
- 电子学系统研发
- DAQ 系统研发

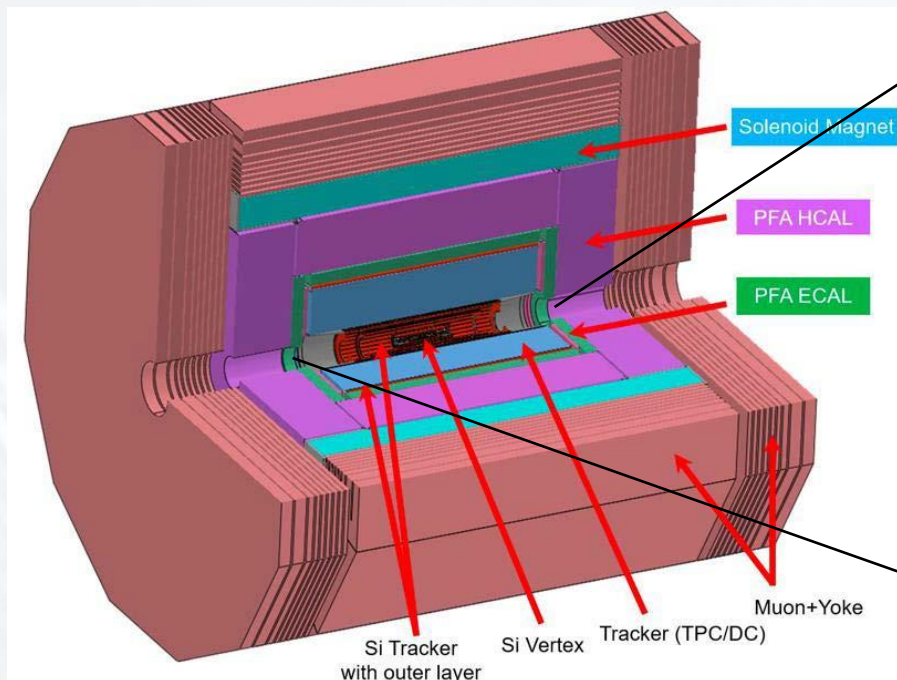
3 总结计划



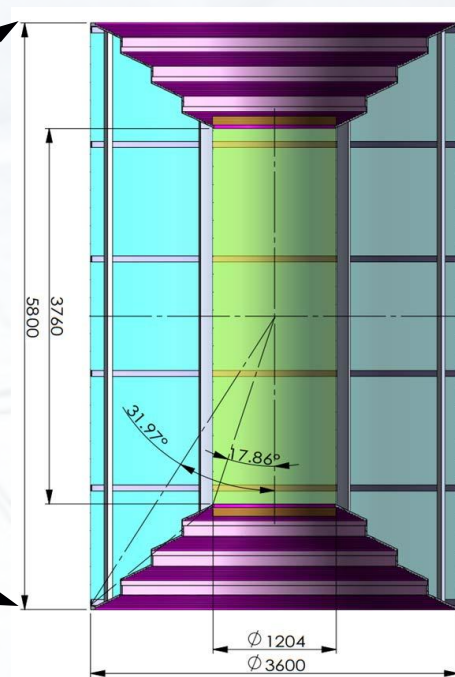
研究背景 —— CEPC 漂移室



环形正负电子对撞机

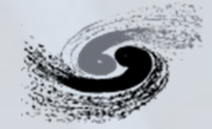


CEPC探测器设计图

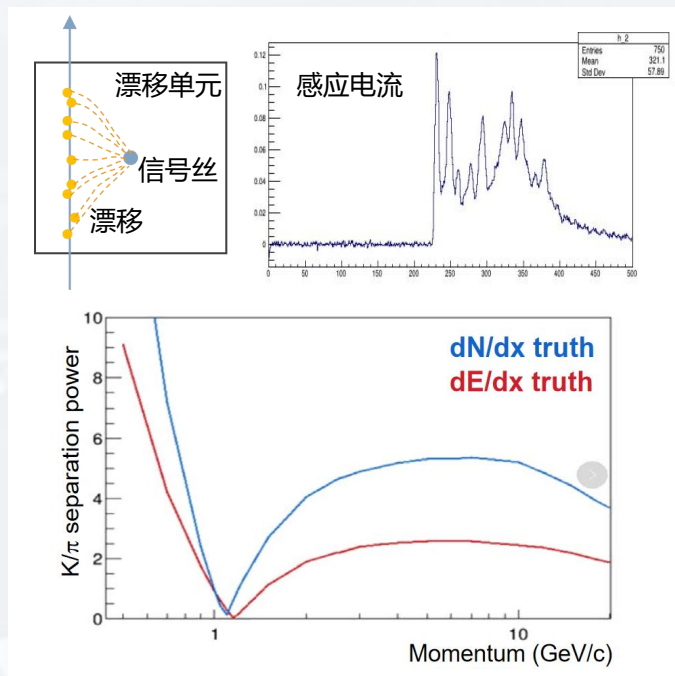


CEPC漂移室结构设计图

- 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



研究背景 —— 原初电离计数方法



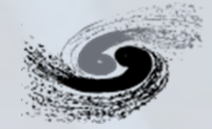
dE/dx

- 电离能损服从朗道分布
- 采用截断平均法，丢失统计量
- 在过去40年，dE/dx方法的分辨能力没有显著提高

dN/dx

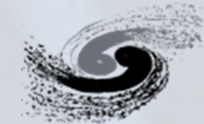
- 单位长度原初电离数服从泊松分布
- 更小的涨落
- 理论上，dN/dx分辨可以比dE/dx提高一倍

□ 基于初步的参数设计，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

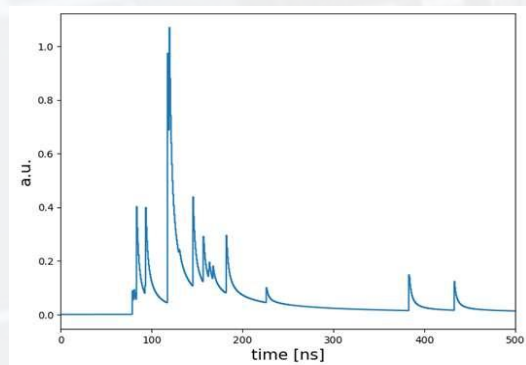
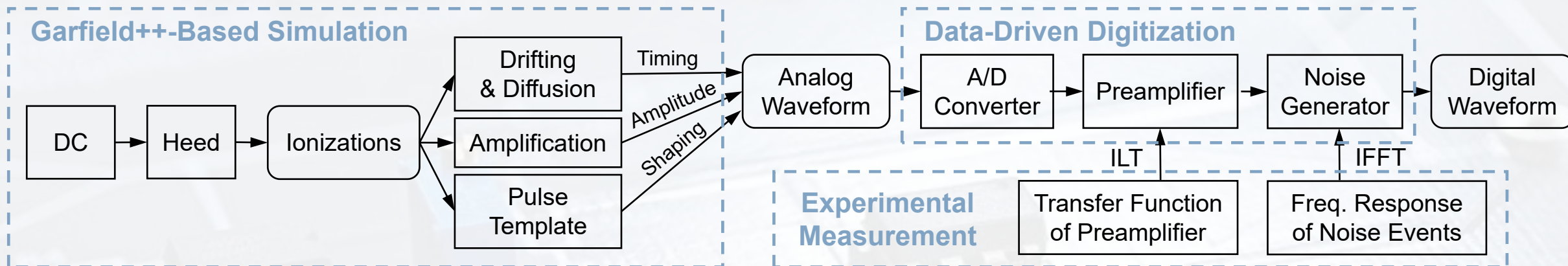


研究背景 —— dN/dx 测量的关键问题

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	开发基于机器学习的寻峰算法和簇团重建算法
	噪声和干扰的去除	

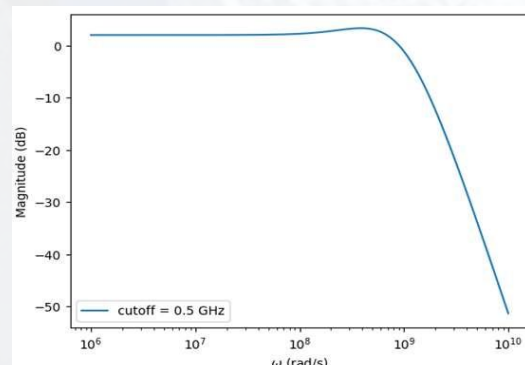


模拟与重建算法 —— 基于波形的全模拟



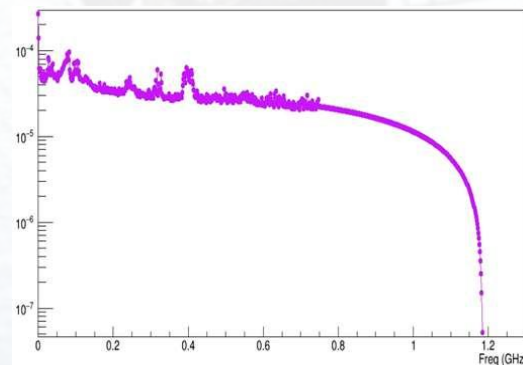
模拟生成信号

+



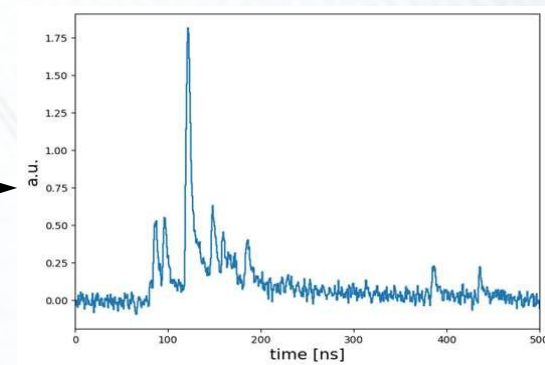
电子学响应

+



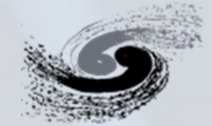
噪声

→



模拟波形

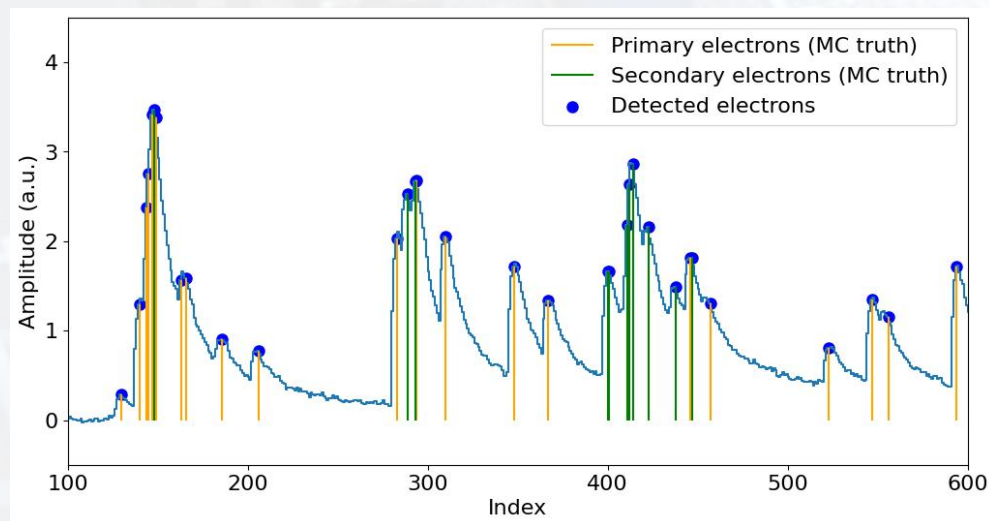
□ 参数化方法提升了模拟信号的生成速度，且模拟波形与实验波形保持良好的一致性



模拟与重建算法 —— dN/dx 重建

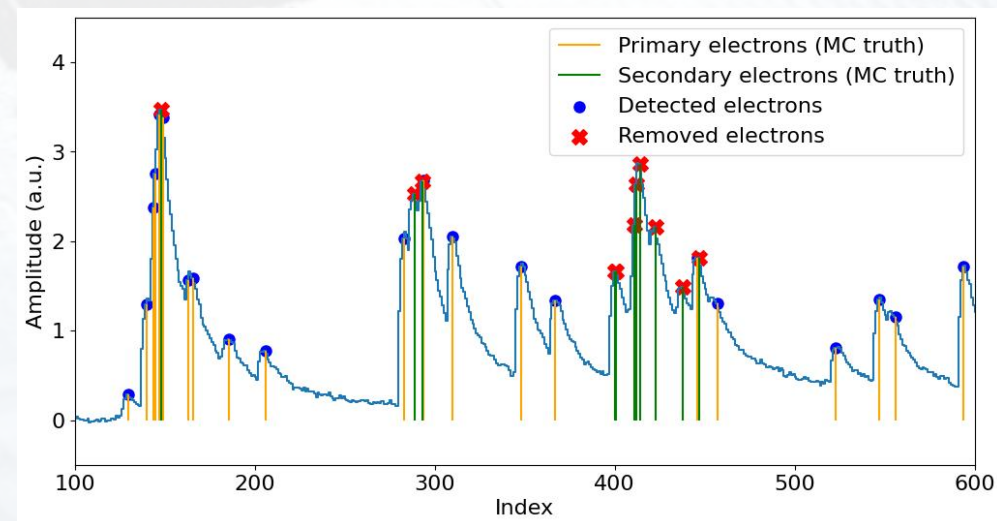
Step 1

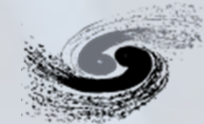
- 寻峰：通过寻找峰值找到全部电离信号，包括初级电离信号和次级电离信号



Step 2

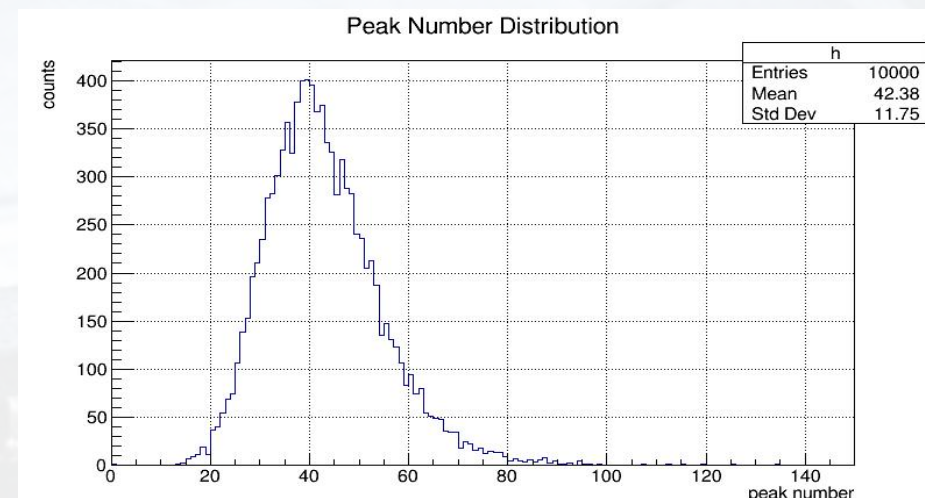
- 簇团重建：重建簇团信号，将寻峰步骤中的次级电离信号合并，保留初级电离信号





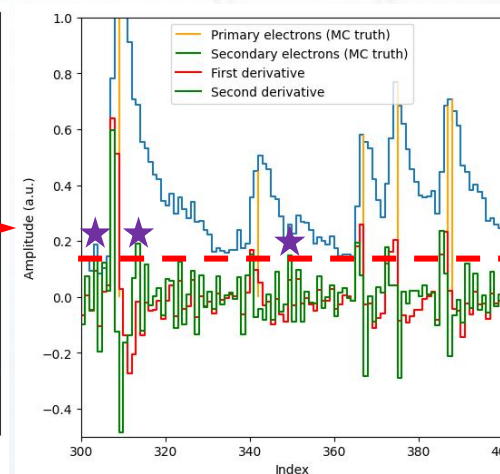
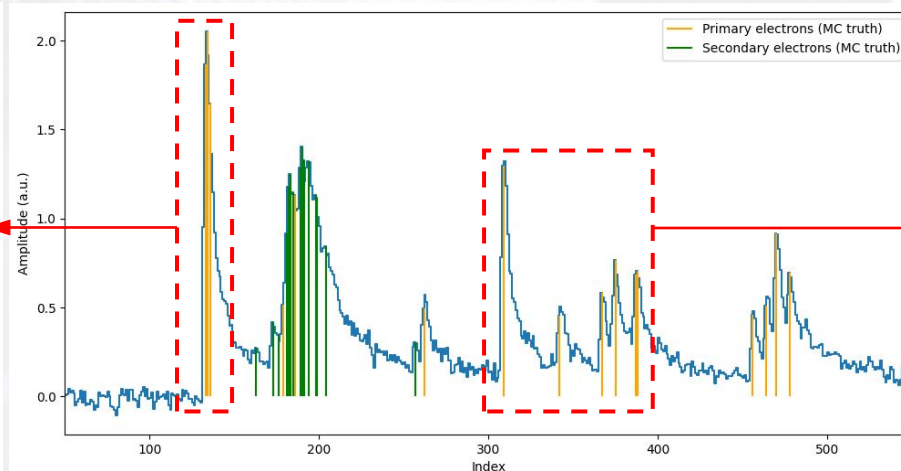
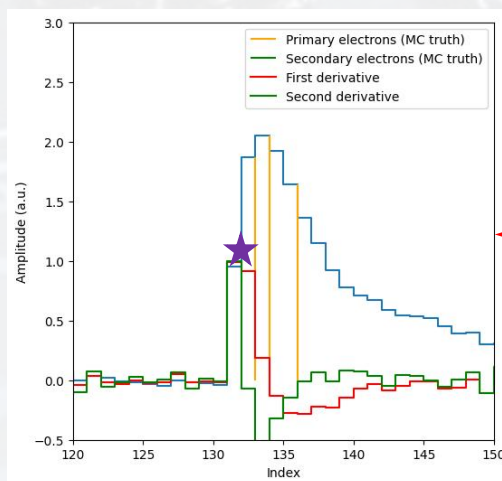
模拟与重建算法 —— 基于二阶导数的寻峰算法

- 一阶导数计算: $D1[i] = wf[i+1] - wf[i]$
- 二阶导数计算: $D2[i] = D1[i+1] - D1[i]$
- 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

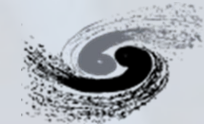


导数寻峰算法寻到的峰数分布

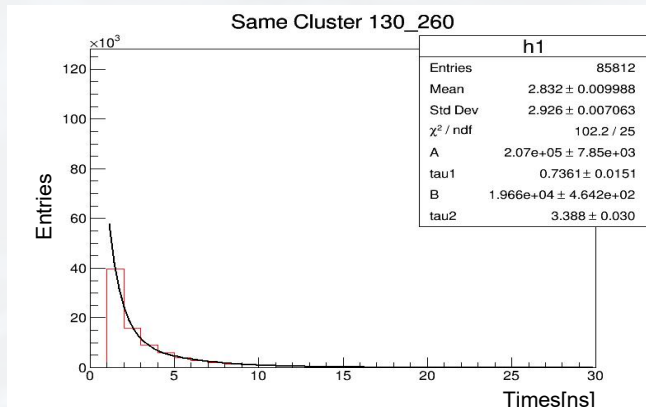
3个信号峰
中只有1个
被识别



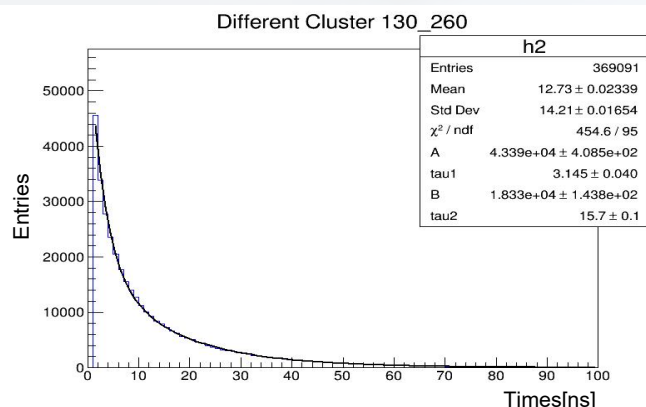
噪声可能
超过阈值



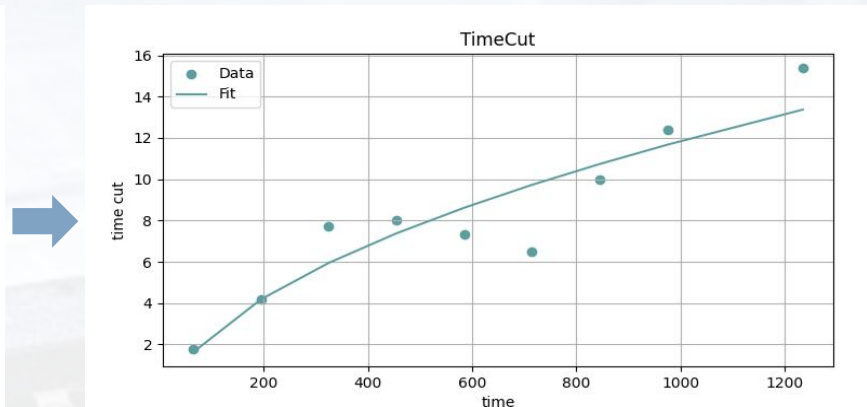
模拟与重建算法 —— 基于截断时间的簇团重建算法



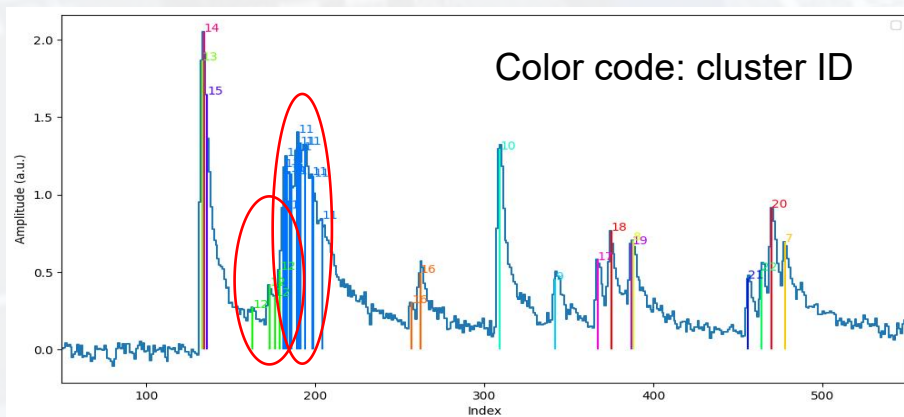
同一簇团信号峰时间差分布



不同簇团信号峰时间差分布

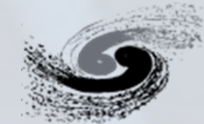


截断时间随漂移时间的变化曲线



- 若相邻两个信号峰的时间差小于截断时间，即 $\Delta t < t_{\text{cut}}$ ，则将峰合并为同一电离团
- 反之，若 $\Delta t > t_{\text{cut}}$ ，则认为两个信号峰属于不同电离团

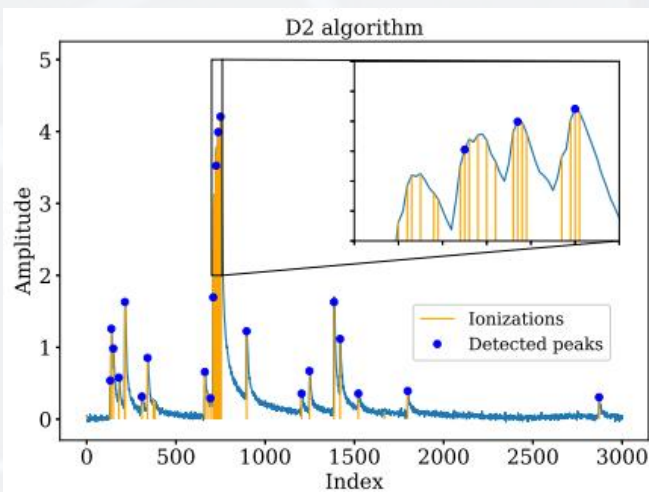
□ 截断时间较难确定，并且簇团之间的重叠会影响重建



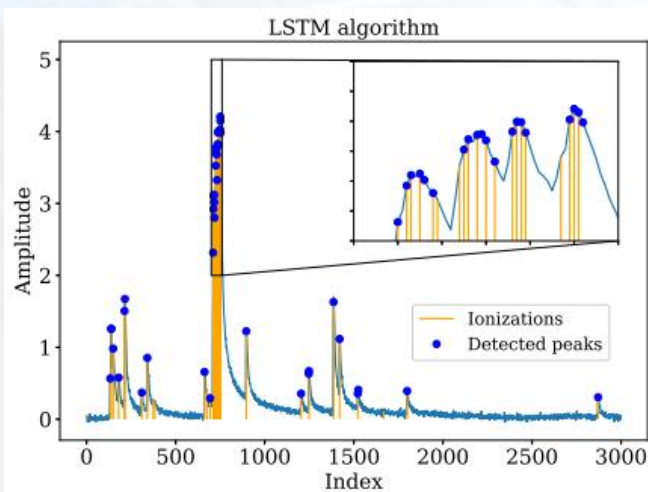
模拟与重建算法 —— 基于 LSTM 的寻峰算法



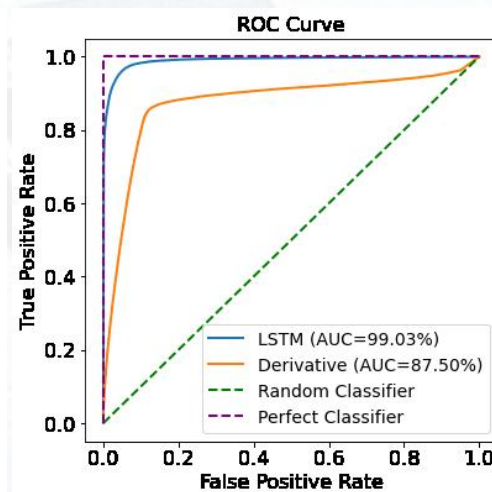
基于 LSTM 寻峰算法的结构示意图



基于二阶导数寻峰算法的寻峰结果



基于 LSTM 寻峰算法的寻峰结果

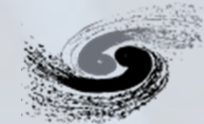


两种寻峰算法的 ROC 曲线

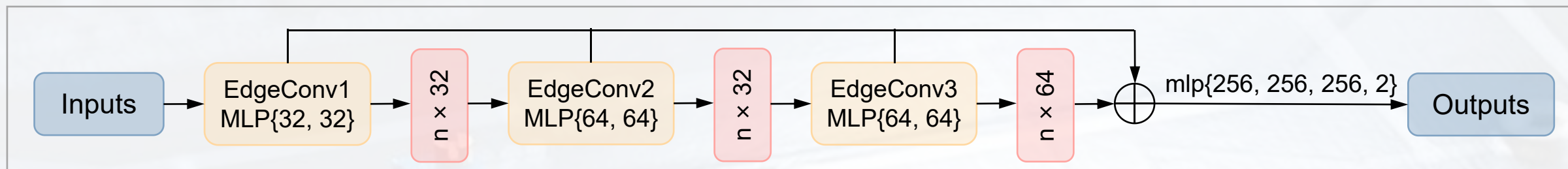
两种寻峰算法纯度和效率对比

	Purity	Efficiency
LSTM algorithm	0.8986	0.8820
D2 algorithm	0.8986	0.6827

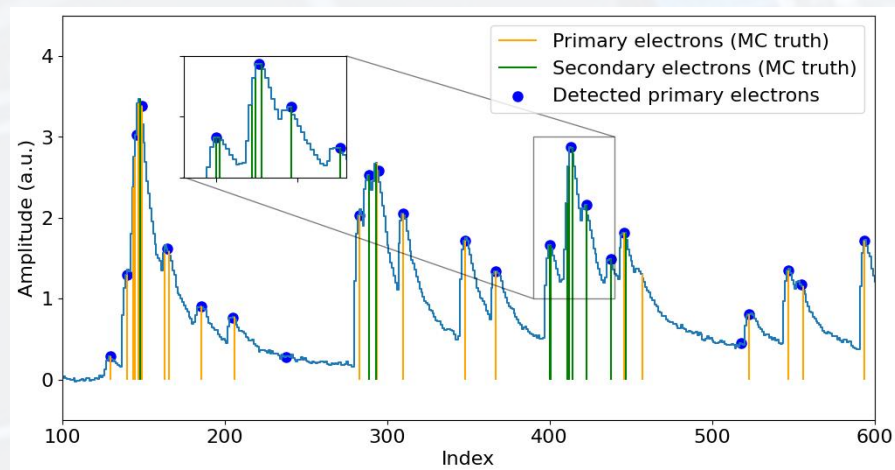
□ 基于 LSTM 寻峰算法比传统二阶导数寻峰算法对于堆积事例的识别更加高效



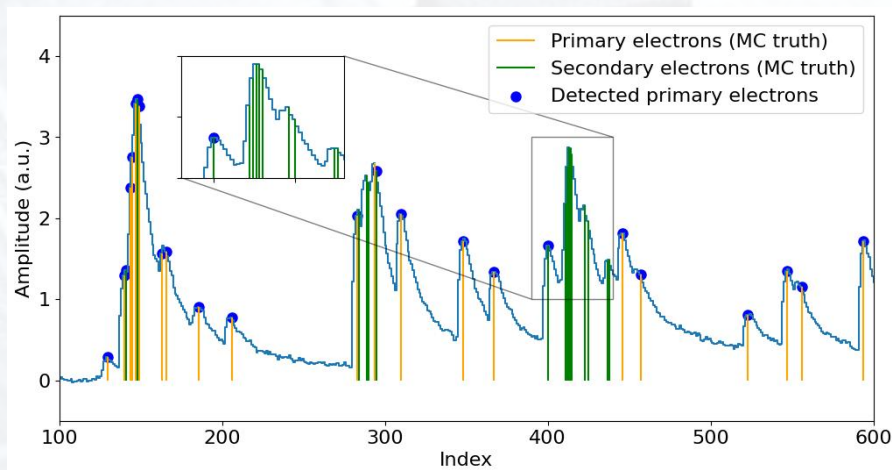
模拟与重建算法 —— 基于 DGCNN 的簇团重建算法



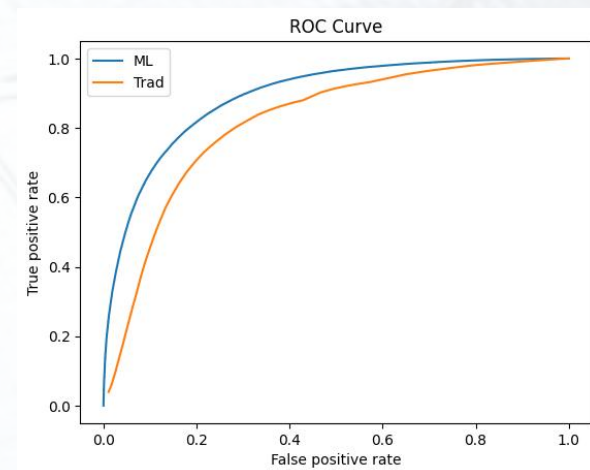
基于DGCNN 簇团重建算法的结构示意图



截断时间簇团重建算法的重建结果

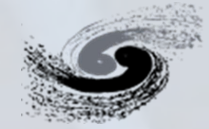


基于DGCNN 簇团重建算法的重建结果

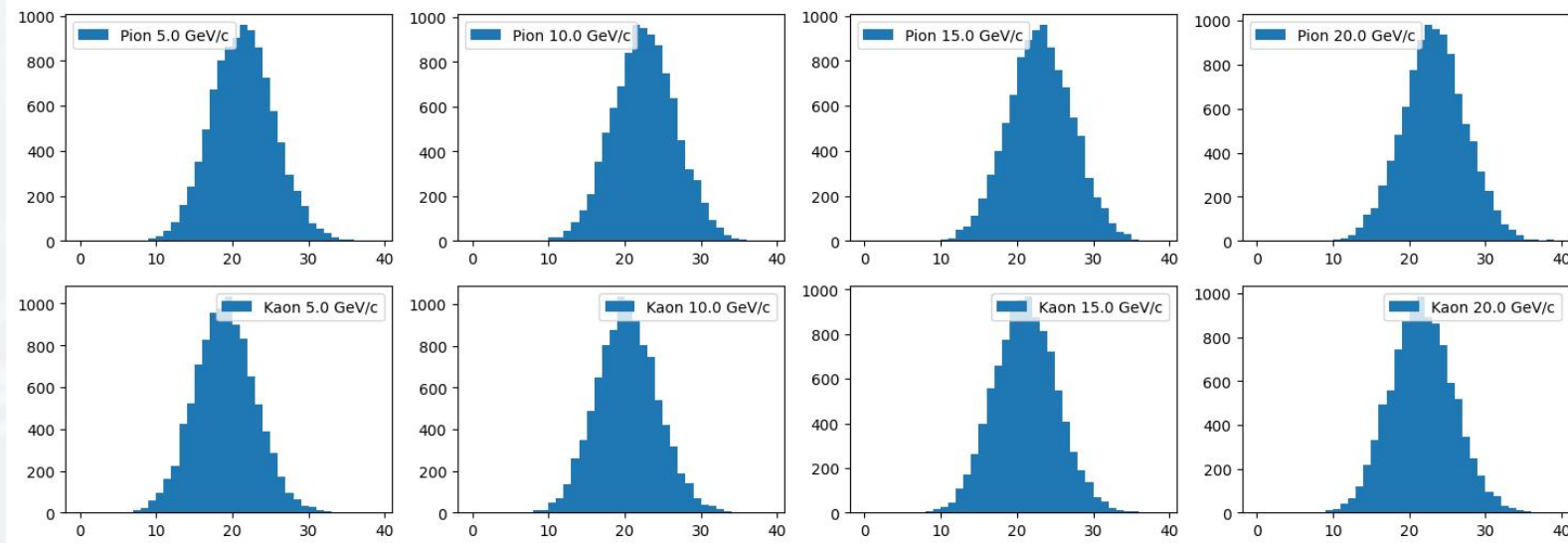


两种重建算法的 ROC 曲线

□ 基于 DGCNN 的簇团重建算法相比于传统方法，可以更准确地排除次级电离

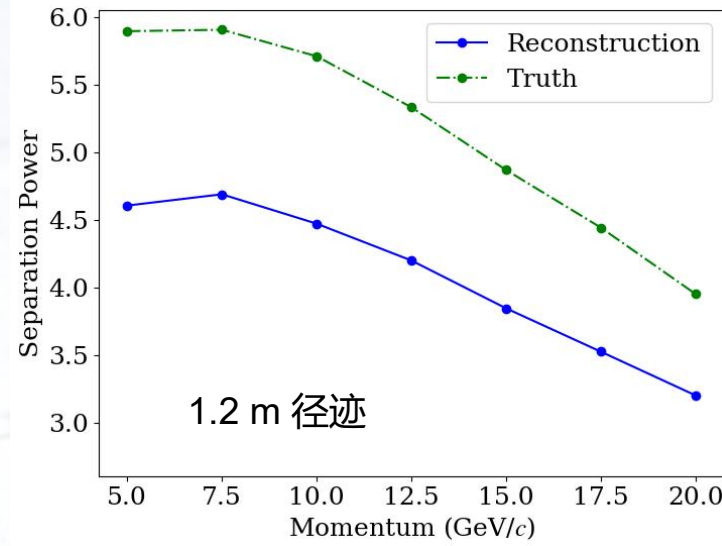


模拟与重建算法 —— PID 性能



簇团重建分布

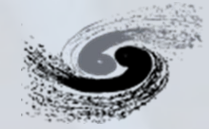
- 重建簇团数即原初电离数，其分布呈现出良好的高斯分布
- 等效于1.2 m 径迹，dN/dx 的粒子分辨 <3%，优于 dE/dx 通常的 ~5%



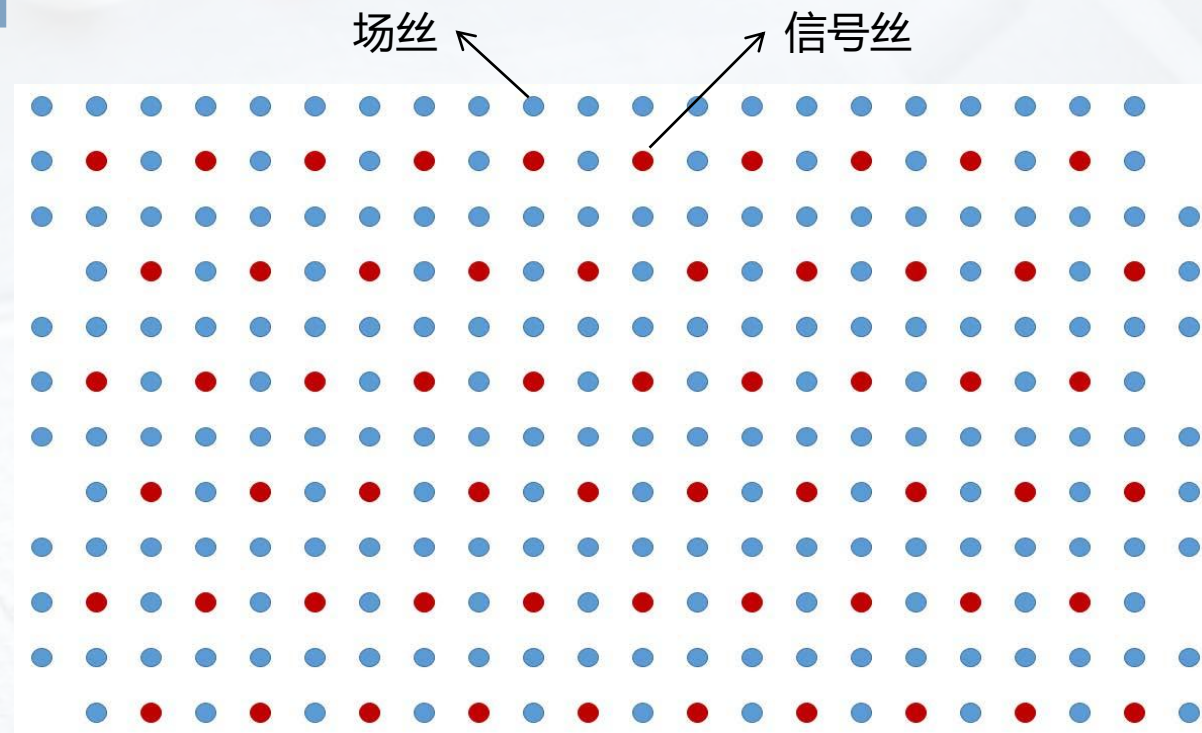
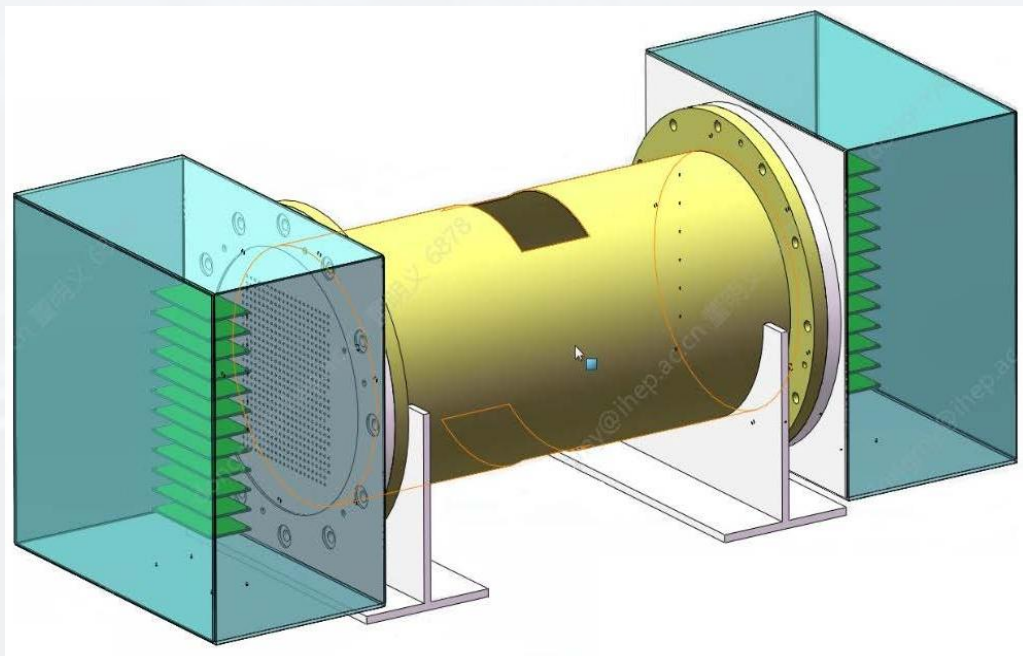
K/π 分辨能力随动量的变化

$$\text{分辨能力: } S = \frac{\left| \left(\frac{dN}{dx} \right)_{\pi} - \left(\frac{dN}{dx} \right)_{K} \right|}{(\sigma_{\pi} + \sigma_K)/2}$$

□ 通过机器学习方法优化，dN/dx 在模拟数据上可实现 3.2σ 的 K/π 鉴别能力

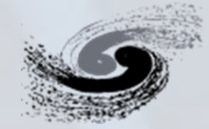


► 漂移室模型建造 —— 结构设计



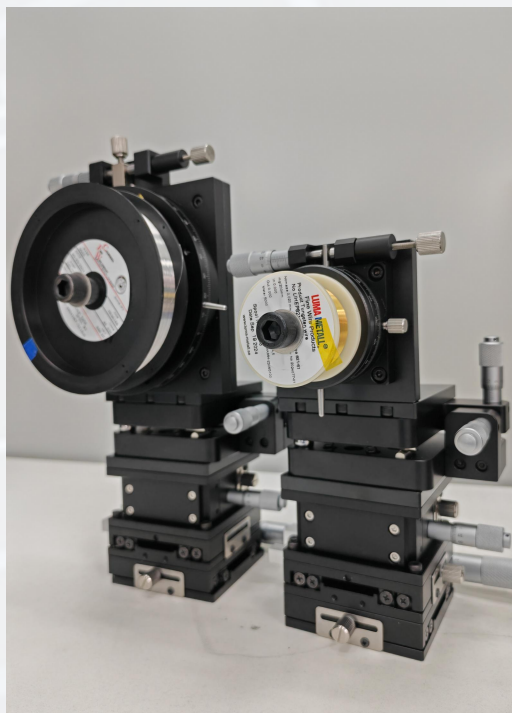
□ 模型共 12 层，每层 10 个单元，单元尺寸 1.8×1.8 cm，模型长度为 60 cm

□ 信号丝使用 $20\ \mu\text{m}$ 的镀金钨丝；场丝使用 $70\ \mu\text{m}$ 的铝丝



▶ 漂移室模型建造 —— 拉丝

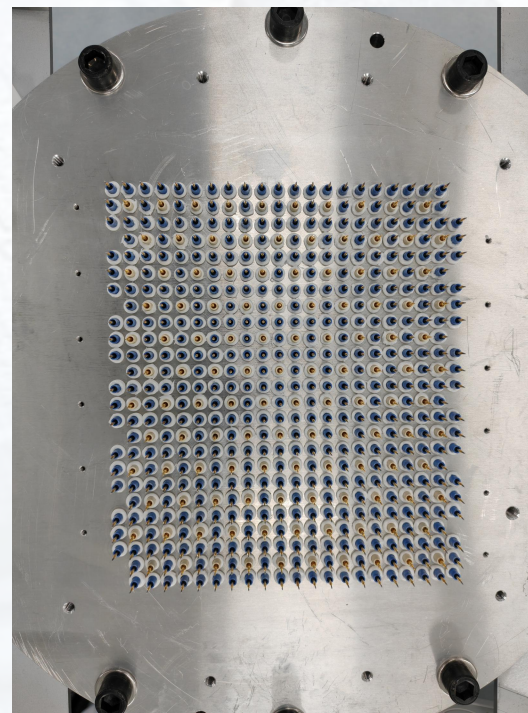
- 信号丝共 120 根，施加张力 11 g；场丝共 416 根，施加张力 19 g
- 信号丝和场丝在相应丝张力下的挠度均为 $25\ \mu\text{m}$



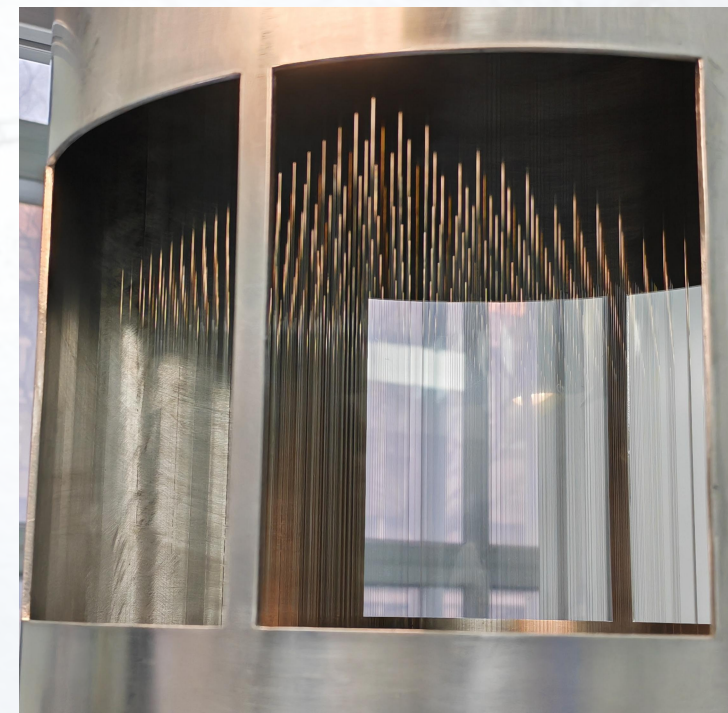
场丝和信号丝



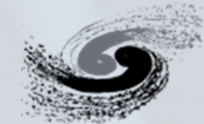
进行拉丝工作



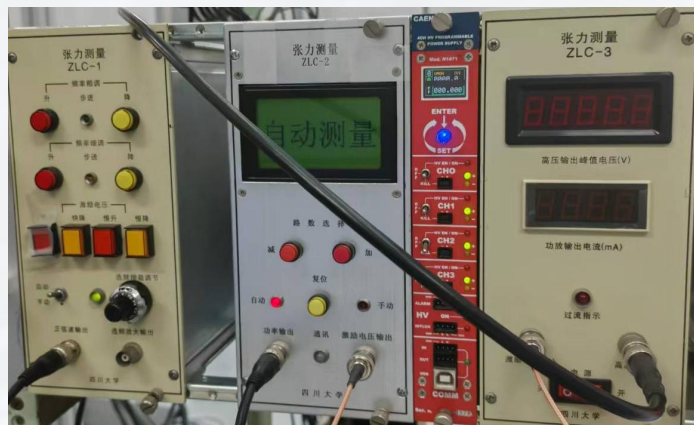
完成拉丝后的端面板



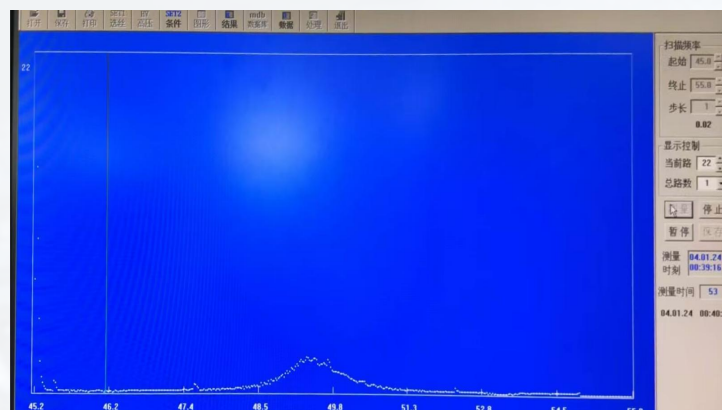
从窗口观察到的丝



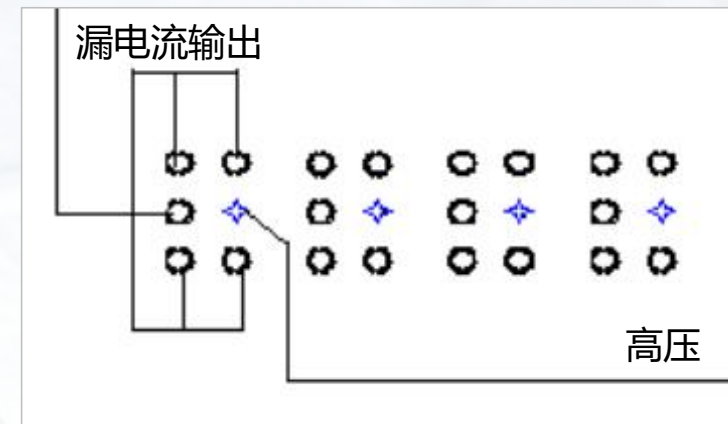
漂移室模型建造 —— 张力测试和漏电流测试



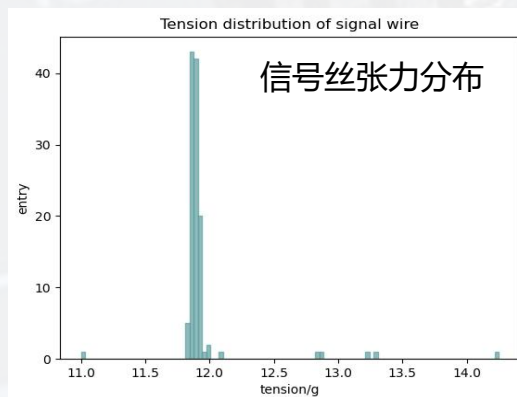
张力和漏电流测试系统



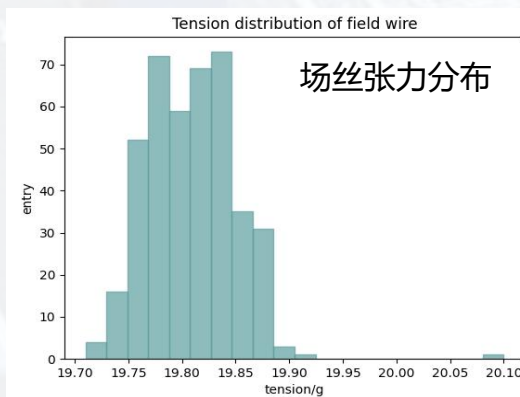
共振法测量丝张力



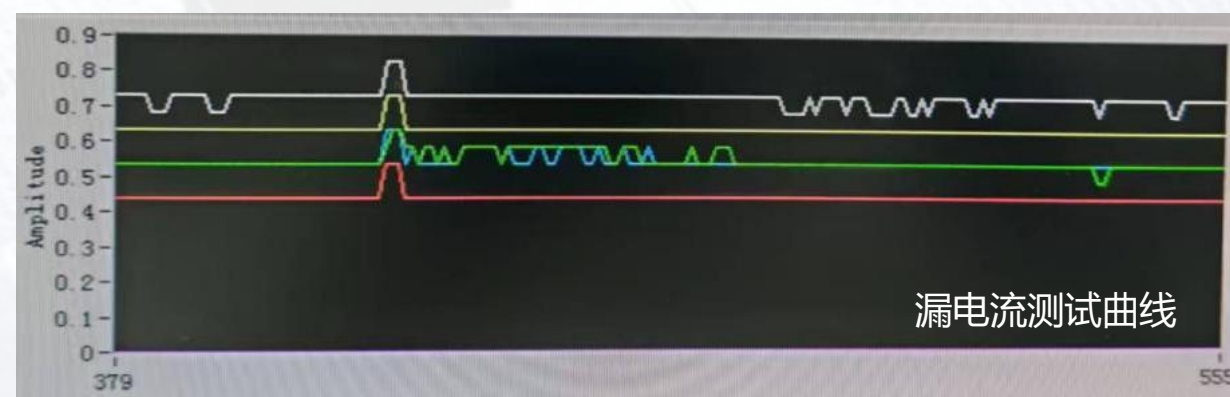
漏电流测试接线



信号丝张力分布

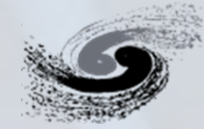


场丝张力分布

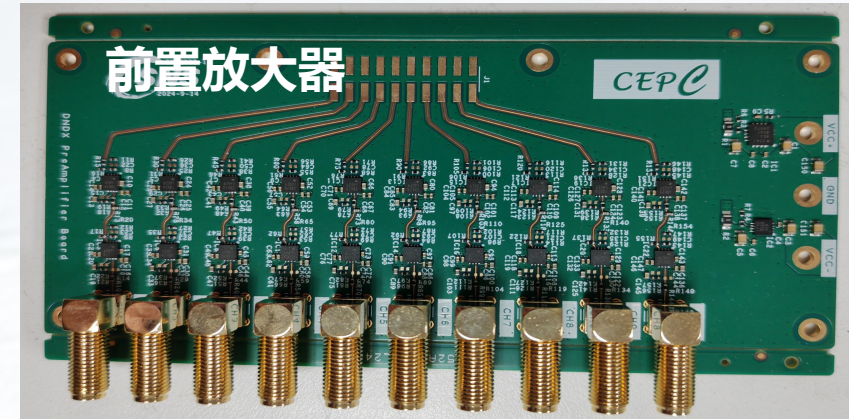
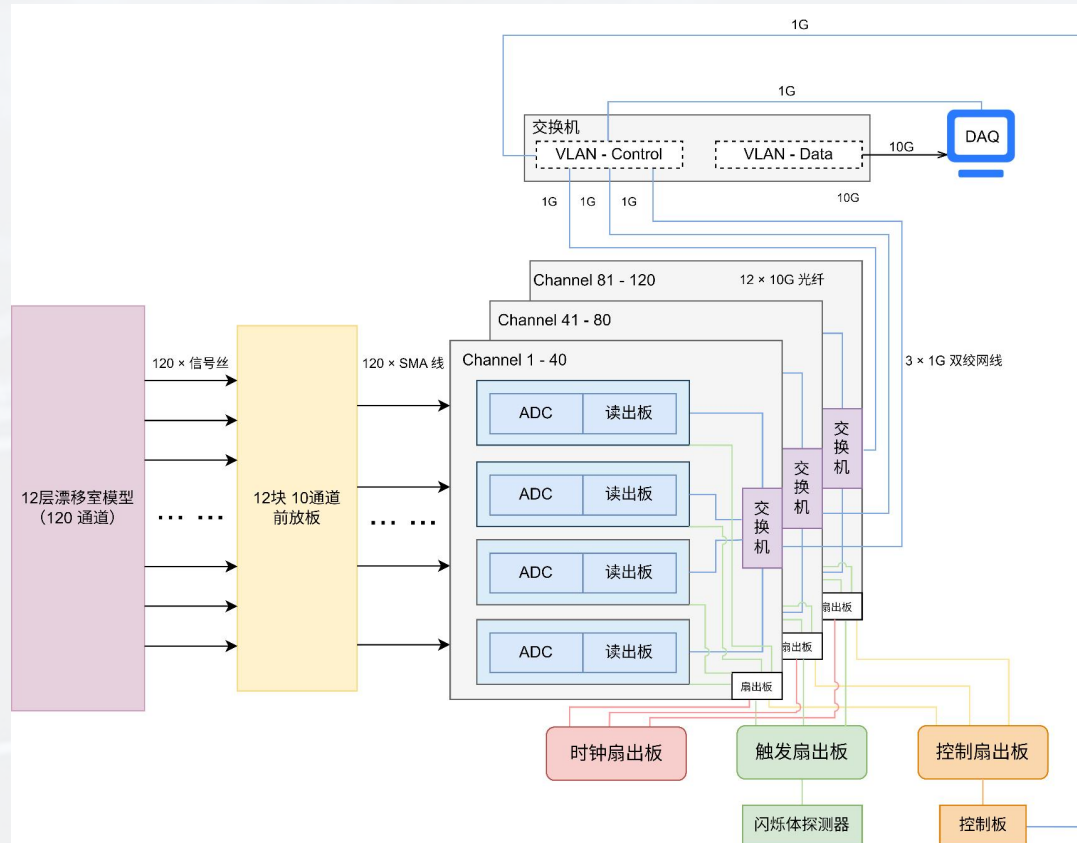


漏电流测试曲线

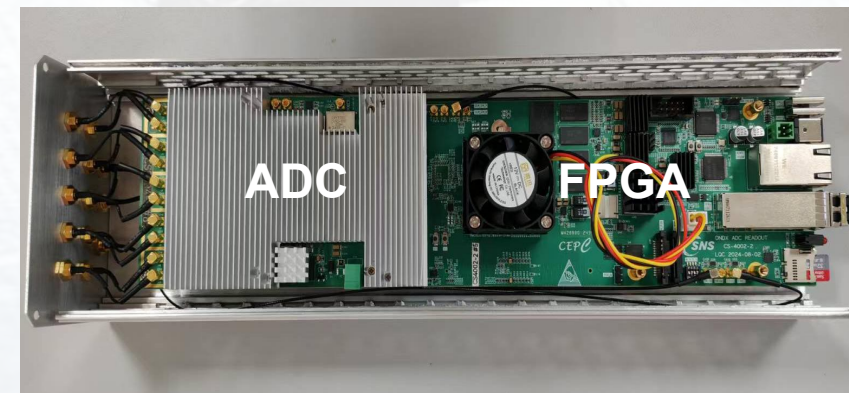
□ 丝张力与实际施加丝张力吻合，漏电流变化小于 1 nA



电子学系统研发 —— 电子学系统架构

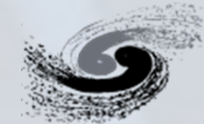


- 高增益
- 高带宽
- 低噪声

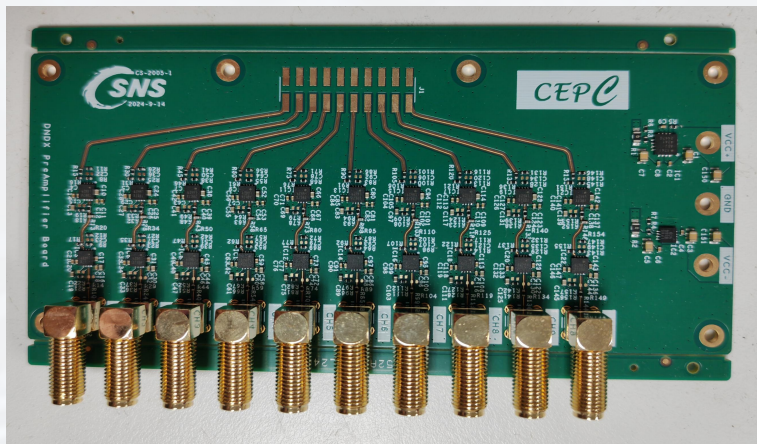


- 高采样率
- 高分辨率

□ 读出电子学由电流灵敏型前置放大器和数字化模块组成，以满足 dN/dx 测量要求



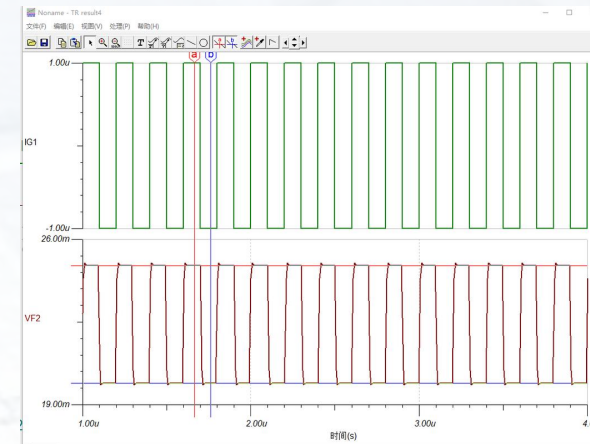
电子学系统研发 —— 前置放大器模块



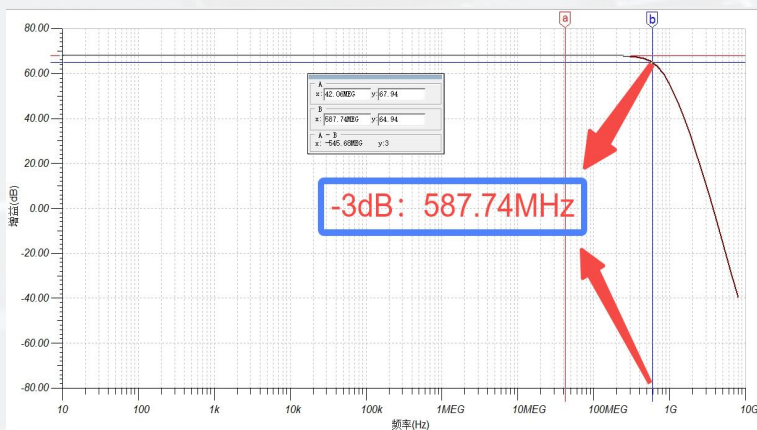
电流灵敏型前置放大器



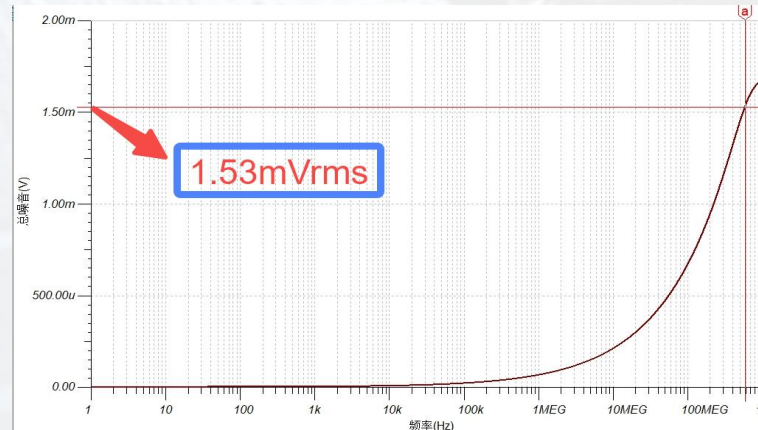
电流增益仿真



电流放大倍数仿真

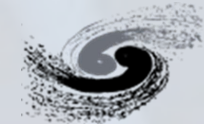


电路带宽仿真

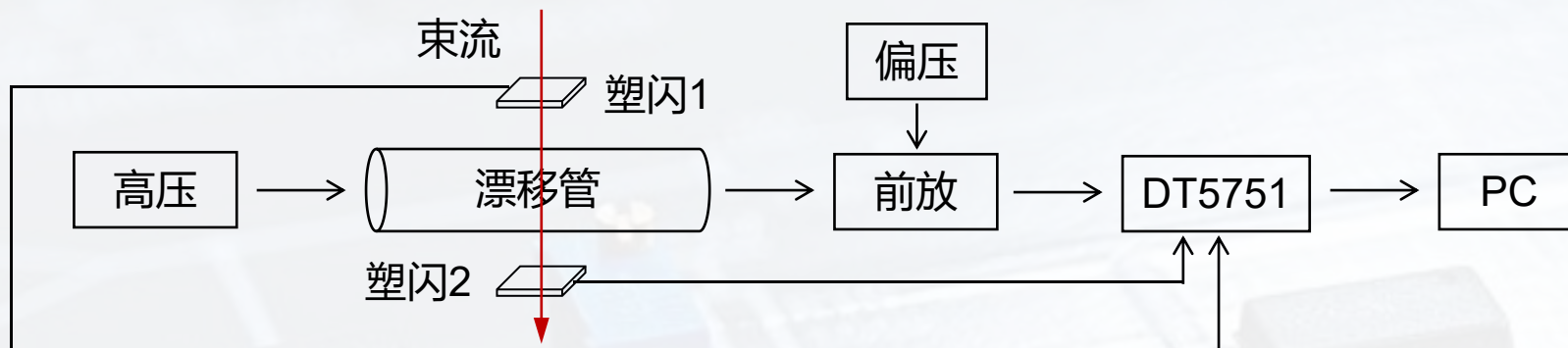


电路噪声仿真

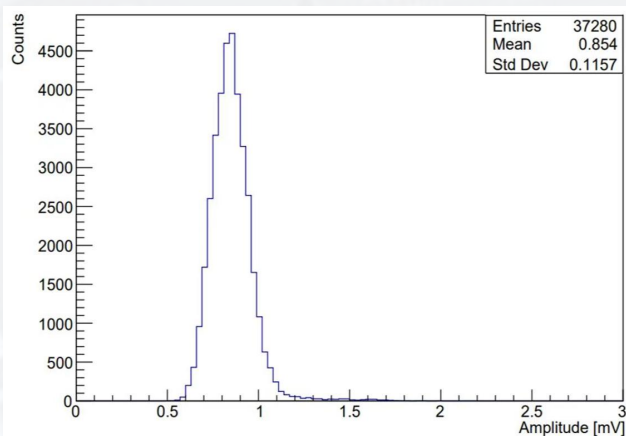
- 电流增益为 67.94 dB
- 电流放大倍数 2500 倍
- 带宽为 587.74 MHz
- 噪声为 1.53 mVrms



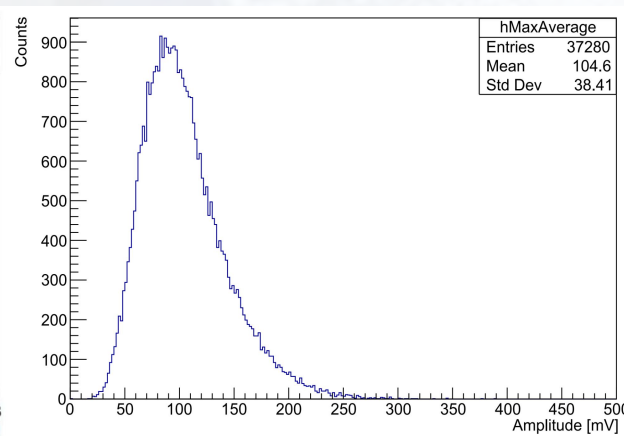
电子学系统研发 —— 前置放大器模块功能验证



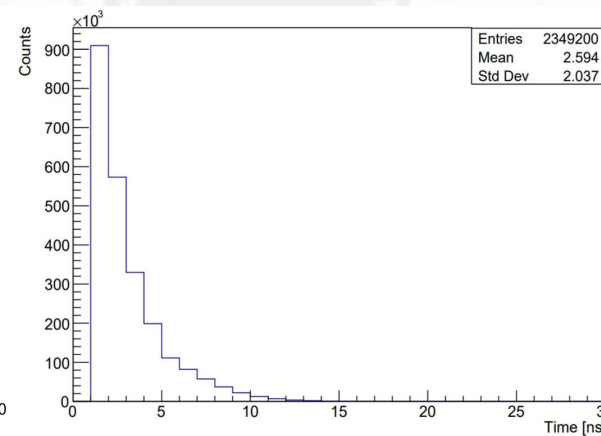
- 前置放大器与漂移管进行束流测试
- 束流为 ~ 1.3 GeV 电子
- 数字化由 DT5751 实现



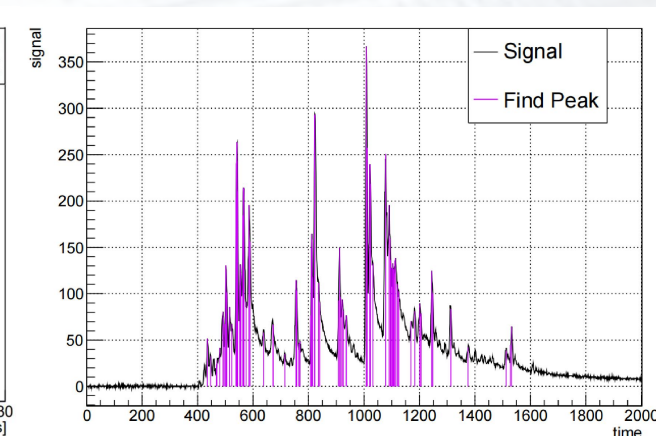
噪声均方根值分布



信号幅度分布

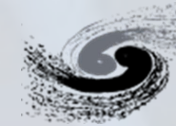


信号上升时间分布



波形寻峰示例

□ 电流灵敏型前置放大器符合高增益、高带宽、低噪声的设计目标



电子学系统研发 —— 数字化模块



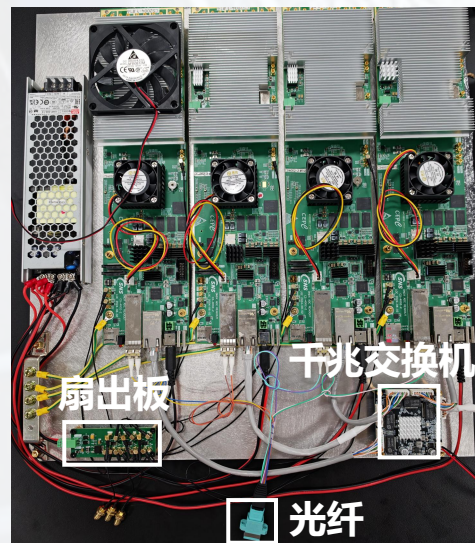
ADC 及数字采集模块



机箱前面板



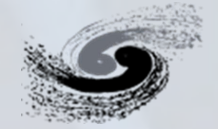
机箱后面板



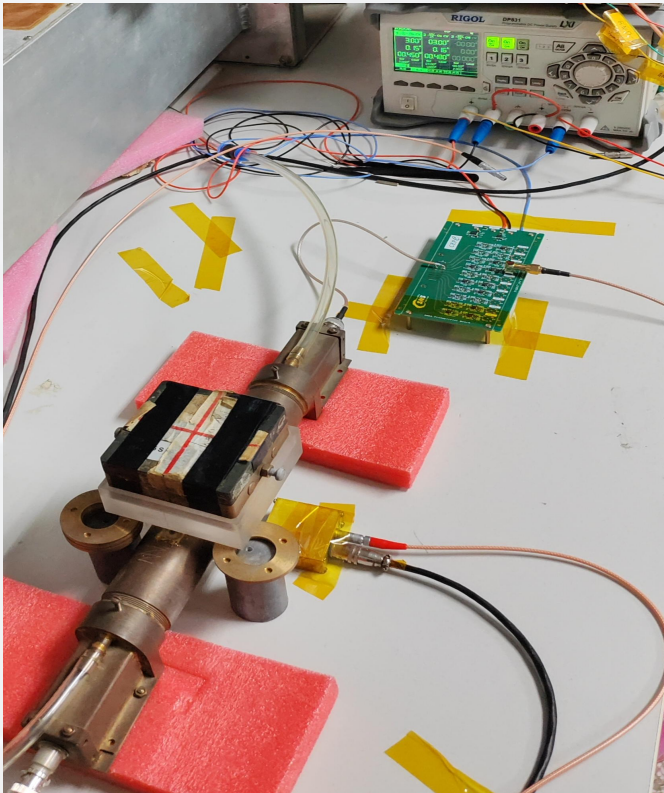
40 通道机箱内部器件连接

- ❑ ADC 模块：采样率为 1.3 Gsps，分辨率为 14 bit，功耗为 750 mW/通道
- ❑ 数字采集模块：通过 20 个 13Gbps 接口接收 5 片 ADC 芯片的数据流，数据经过处理后，再通过 10Gbps UDP 链路传输至 DAQ 服务器

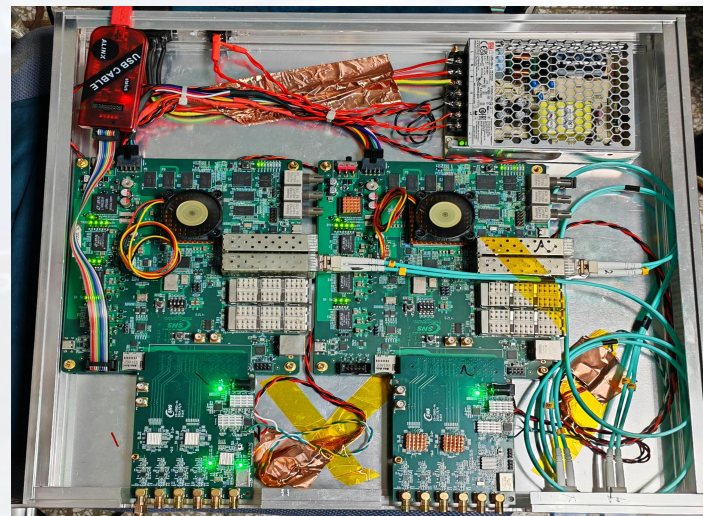
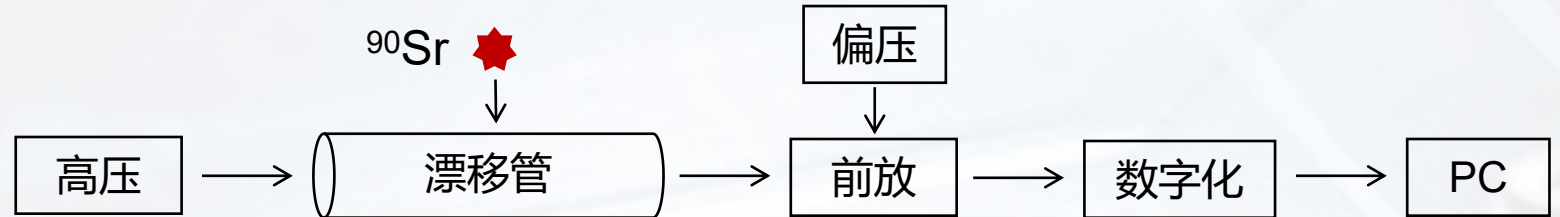
- 扇出板：将外部时钟信号、触发信号、控制信号扇出给各套板卡
- 千兆交换机：接收上位机指令对板卡进行统一管理配置
- 八芯光纤线：通过 10G UDP 进行数据传输



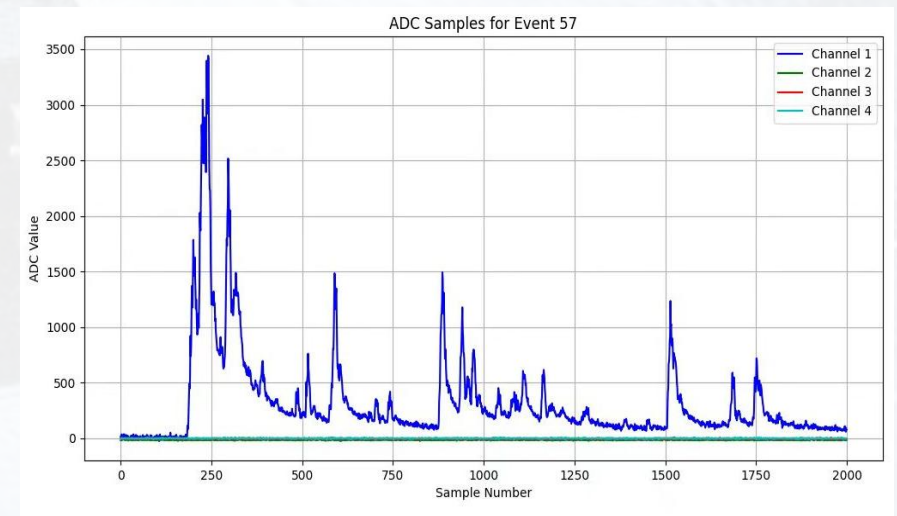
电子学系统研发 —— 数字化模块模块功能验证



漂移管及前放测试系统

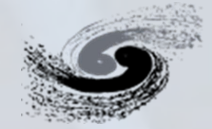


数字化电子学测试机箱

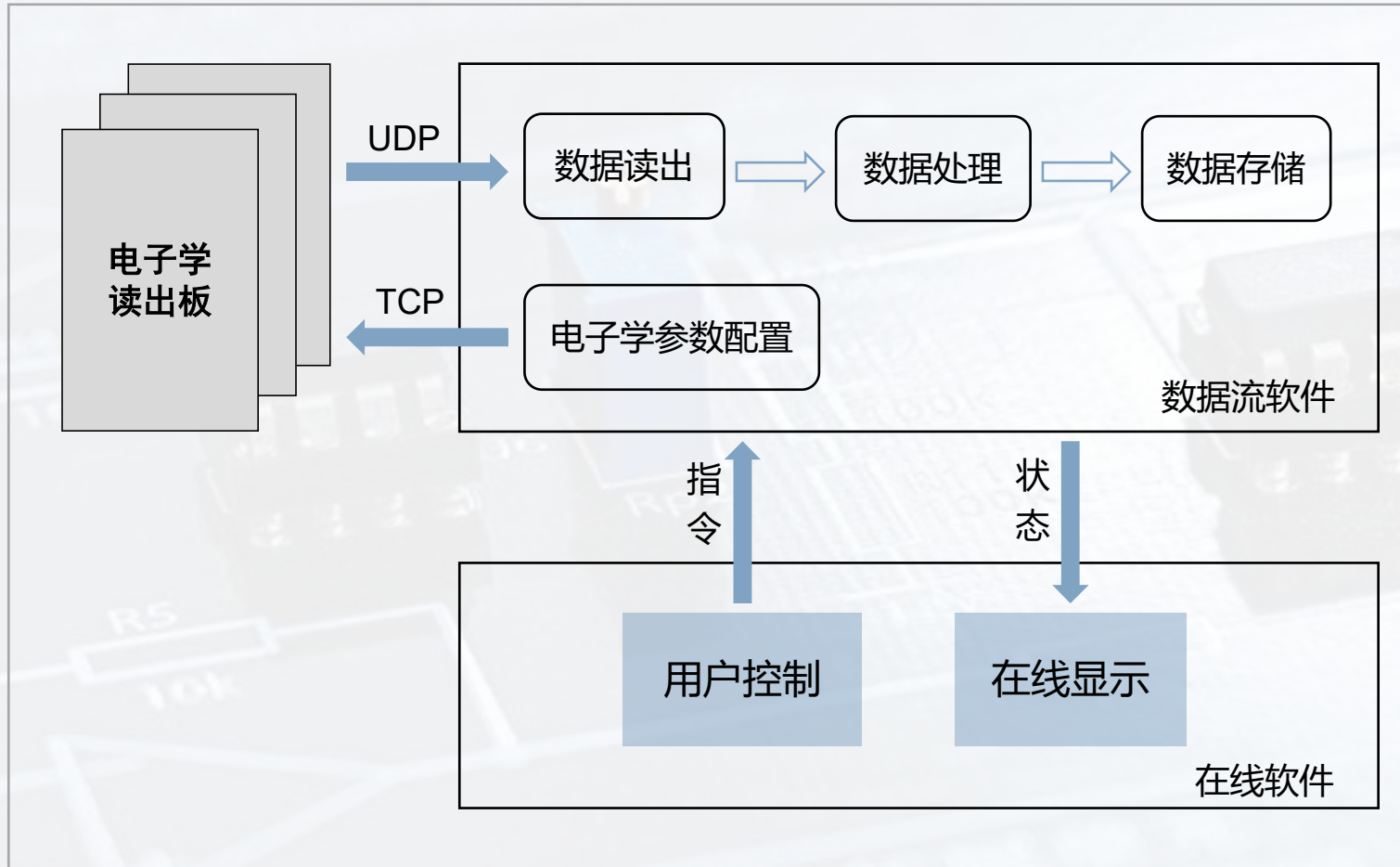


测试采集到的信号波形

□ 读出电子学测试系统工作正常稳定，可以采集到包含清晰信号峰的波形



DAQ 系统研发 —— 数据流软件和在线软件



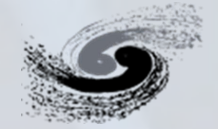
DAQ 整体架构框图

数据流软件 (多线程运行)

- 从电子学板读出数据
- 校验数据格式，解析数据
- 写盘存储，转发在线软件
- 对电子学进行参数配置

在线软件

- 对用户层提供服务：命令执行、信息反馈
- 为数据流软件传递信息
- 在线处理数据



DAQ 系统研发 —— DAQ 功能验证

控制功能测试

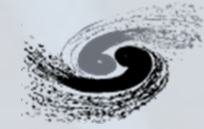


- DAQ 系统可通过控制板实现启停控制，信号发生器产生外触发，单板（10通道）可正常运行并正常采集数据

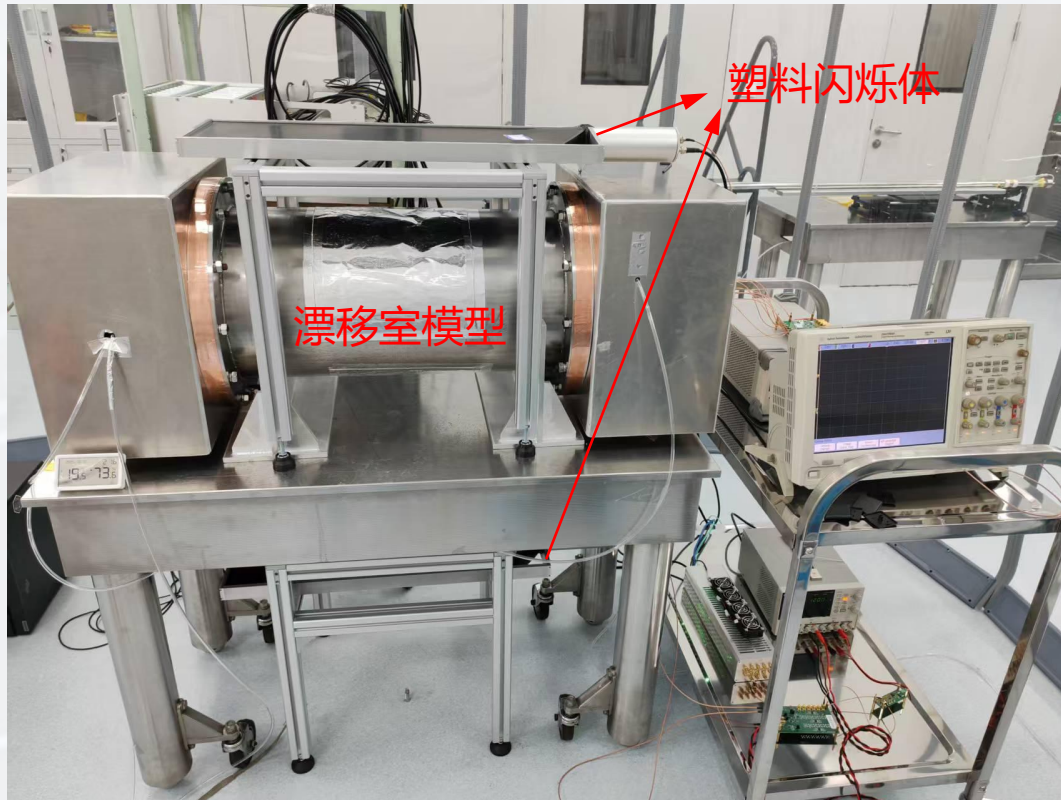
多通道速率测试



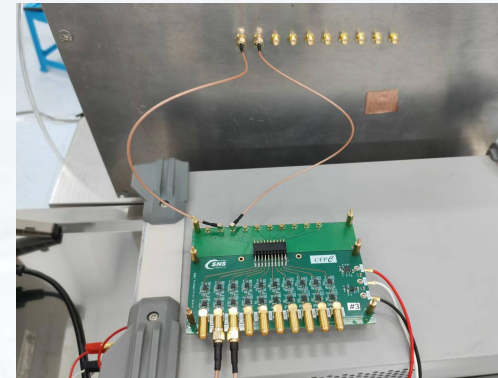
- 触发频率从 20Hz 增加到 3000Hz，DAQ 系统均可正常取数，并且长时间稳定运行，数据无丢失



系统初步测试



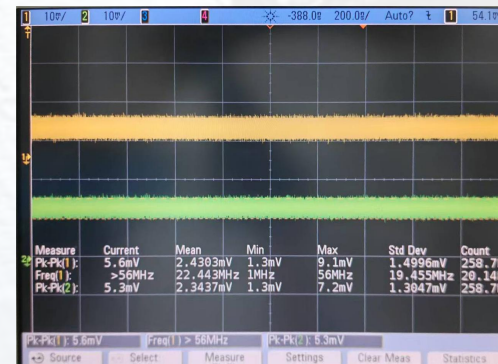
测试系统搭建



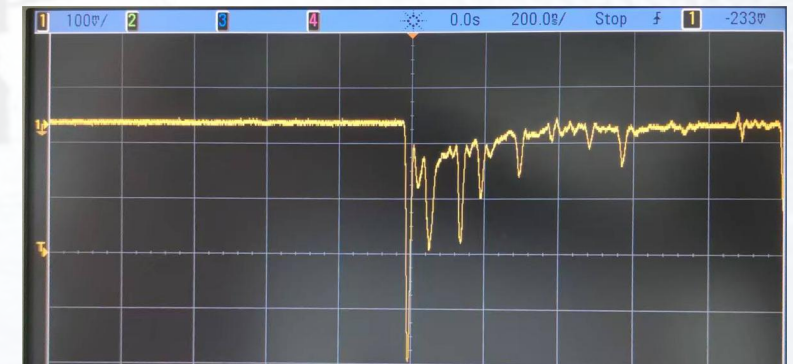
前置放大器连接



采集到的宇宙线信号

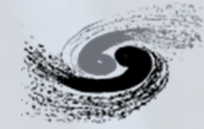


连接信号丝的前放噪声



采集到的宇宙线信号

□ 经过调试，前放连接信号丝后的噪声达到可测试水平，并采集到初步的宇宙线信号



总结与计划

1

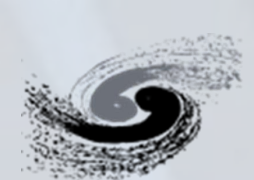
漂移室是径迹探测的重要选型，通过 dN/dx 方法可以提升漂移室的 PID 性能；为验证 dN/dx 方法，开发了高效波形模拟软件和基于深度学习的重建算法；模拟表明在 1.2m 径迹下 dN/dx 方法的 K/π 鉴别能力为 3.2σ ，符合预期

2

搭建了多层漂移室测试系统，对 dN/dx 方法开展实验验证。目前漂移室模型、读出电子学及 DAQ 系统的设计和建造工作基本完成，并进行了初步测试

3

开展宇宙线测试，对实验数据进行分析，包括径迹拟合，寻峰和簇团重建等，进行 dN/dx 方法分辨能力研究，并通过实验数据优化模拟和重建算法



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



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



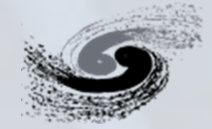
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

请各位老师同学批评指正

汇报人：潘温宇

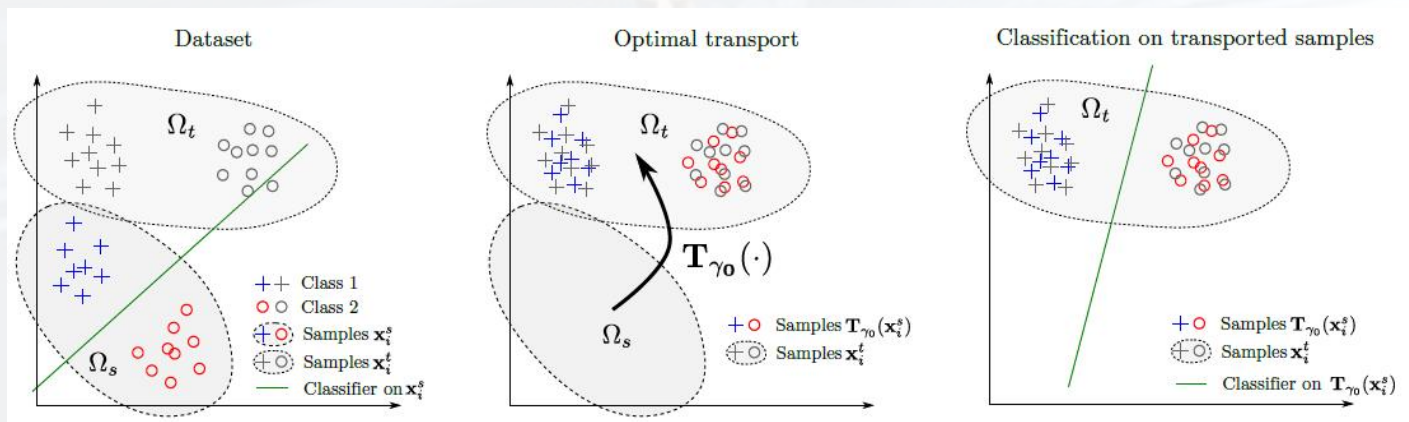
汇报时间：2025年8月21日

第十三届全国先进气体探测器研讨会，2025年8月21日-22日，上海



半监督域自适应 (Semi-Supervised Domain Adaptation, SSDA)

- SSDA 实现了在源域（有标签）和目标域（少量标签）之间的知识迁移，解决了传统域自适应（UDA）的局限性，目标域从完全无标签到部分有标签

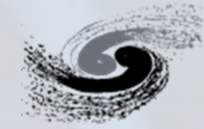


□ 典型方法

- 特征对齐：MMD、对抗训练
- 自训练：用高置信度伪标签迭代优化
- 一致性正则化：增强目标域预测鲁棒性

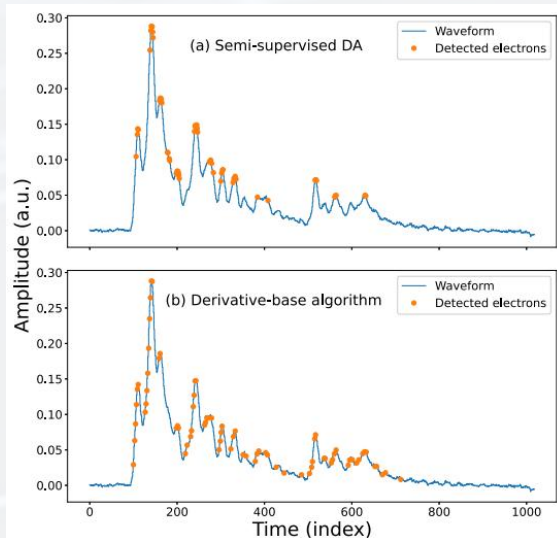
□ 优势对比

- vs 监督学习：减少目标域标注成本，挖掘目标域无标签数据价值
- vs 无监督域自适应（UDA）：利用少量标签显著提升性能，解决UDA因域偏移过大导致的负迁移问题
- 适用场景：医学图像（如MRI→CT跨模态迁移）、自动驾驶（跨城市数据集）

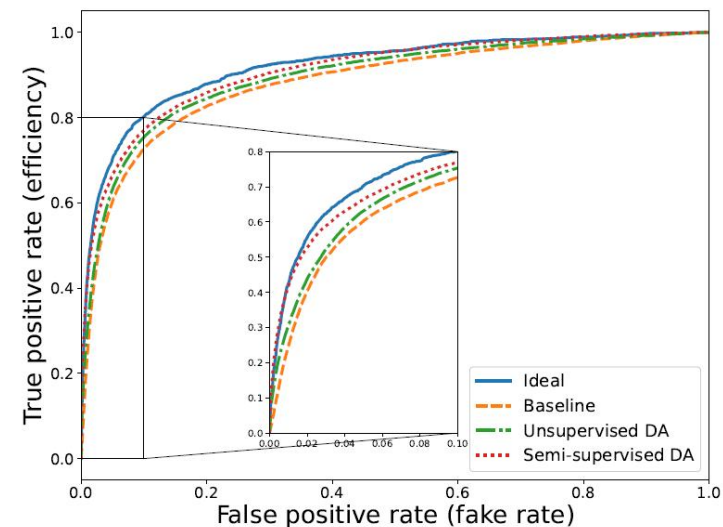


基于 SSDA 的寻峰算法

- 模拟数据与实验数据存在差异，即源领域和目标领域的数据分布不同，影响模型学习结果
- 领域对齐与半监督学习结合，在减少领域间分布差异的同时，利用目标域未标注数据优化模型



SSDA 算法与 D2 算法寻峰结果



不同模型的 ROC 曲线

不同模型的 AUC 与 Partial AUC

Model	AUC	pAUC (FPR<0.1)
Ideal	0.926	0.812
Baseline	0.878	0.749
Unsupervised DA	0.895	0.769
Semi-supervised DA	0.912	0.793

□ 基于 SSDA 的寻峰算法提升了寻峰结果的准确性，其表现更接近于理想模型