

多通道超快Micromegas 探测器的研究

孟玥 王旭 李镇言 周意

核探测与核电子学国家重点实验室

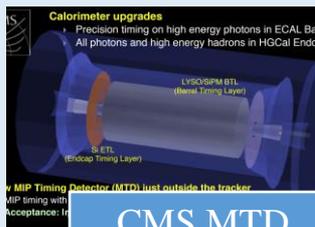
中国科学技术大学

- 研究背景
- 多通道PICONSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望

- 研究背景
- 多通道PICOSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望

快速定时方法的广泛需求

高亮度粒子物理实验



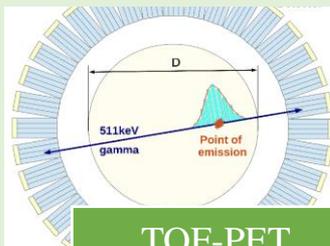
CMS MTD



ATLAS HGTD

- HL-LHC的高亮度升级
- 堆积效应： $\langle\mu\rangle$ 达到140-200
- 需要快速定时探测器结合径迹信息来抑制堆积效应

医疗成像等应用领域



TOF-PET



粒子治癌

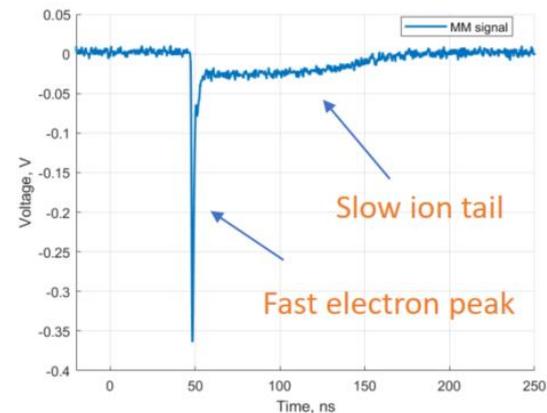
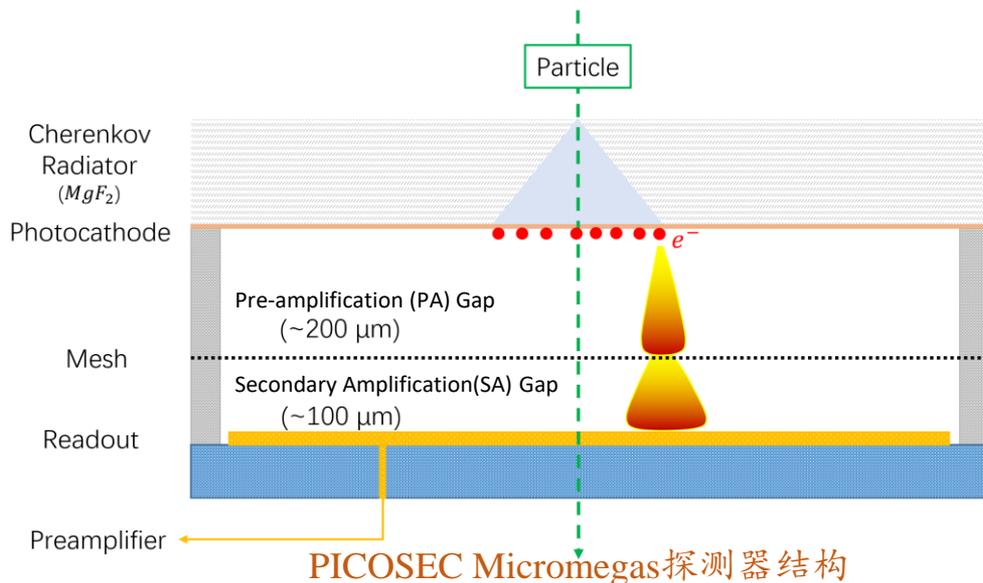
- 飞行时间PET相较于传统PET，利用的飞行时间信息确定湮灭发生点位置，缩小重建像素范围
- 获取精确的飞行时间对探测器时间分辨有较高要求

快速定时探测器	时间分辨	应用场景	性能特点
MRPC	65ps	BES-III TOF	低计数率 大面积
MCP-PMT	6.2ps	Belle-II iTOP	小面积 价格昂贵
SiPM	~69ps	CMS (SiPM)	小面积 抗辐照能力底
LGAD	~30ps	ATLAS (LGAD)	抗辐照能力需 要提升

基于MPGD新型快速定时探测器应具备的特点：

- 时间分辨达几十皮秒量级
- 高计数率和抗辐照稳定性
- 大面积和多通道读出

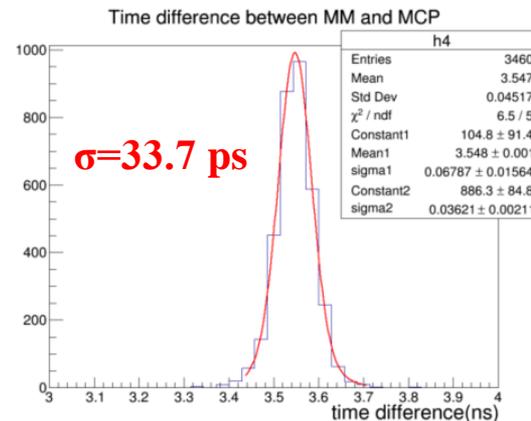
PICOSEC探测器概念



PICOSEC Micromegas探测器典型信号

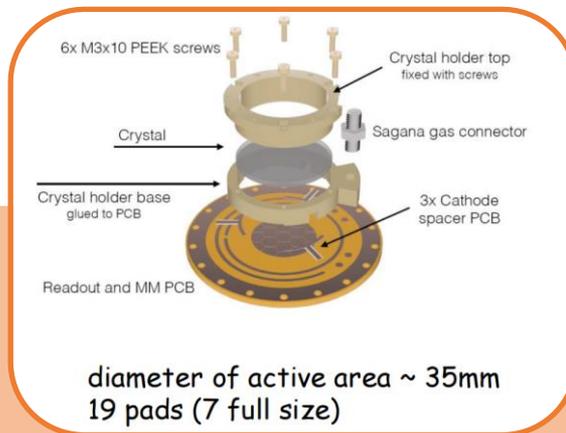
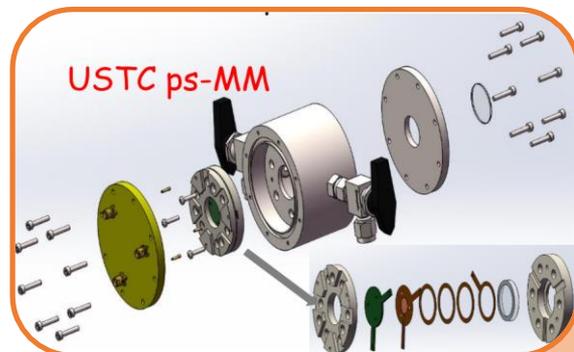
PICOSEC Micromegas: 一种基于Micromegas和光电探测的快速定时微结构气体探测器

- 切伦科夫辐射体和光阴极将带电粒子转化为光电子
- 窄气隙和高电场形成预放大区，工作在两级放大模式
- 其典型信号具有快的电子峰和长的离子尾巴
- 单通道原理样机对带电粒子的时间分辨~30ps (July/Aug 2017)

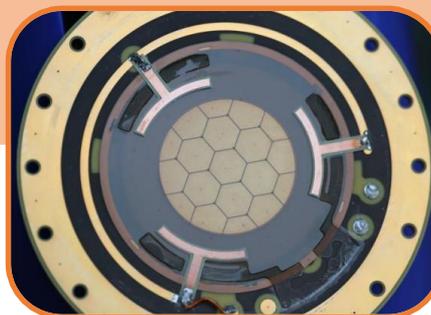


July/Aug 2017
Beam: 150GeV muon

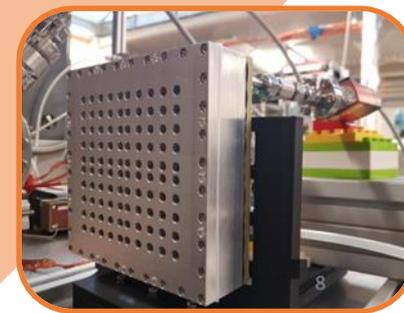
PICOSEC探测器发展历程



USTC单通道原理样机($\Phi=1\text{cm}$)



Saclay PICOSEC($\Phi=3.6\text{cm}$)



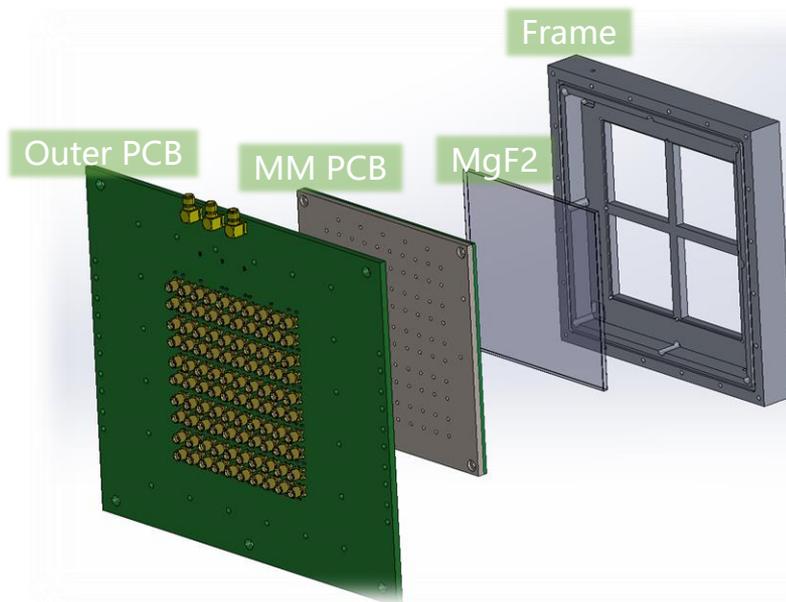
CERN多通道非阻性PICOSEC

- 大面积PICOSEC探测器的研制是一项国际前沿的研究方向
- 从单通道扩展到100通道，有效面积增大至 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$
- 创新性：应用阻性电极Micromegas和抗老化光阴极

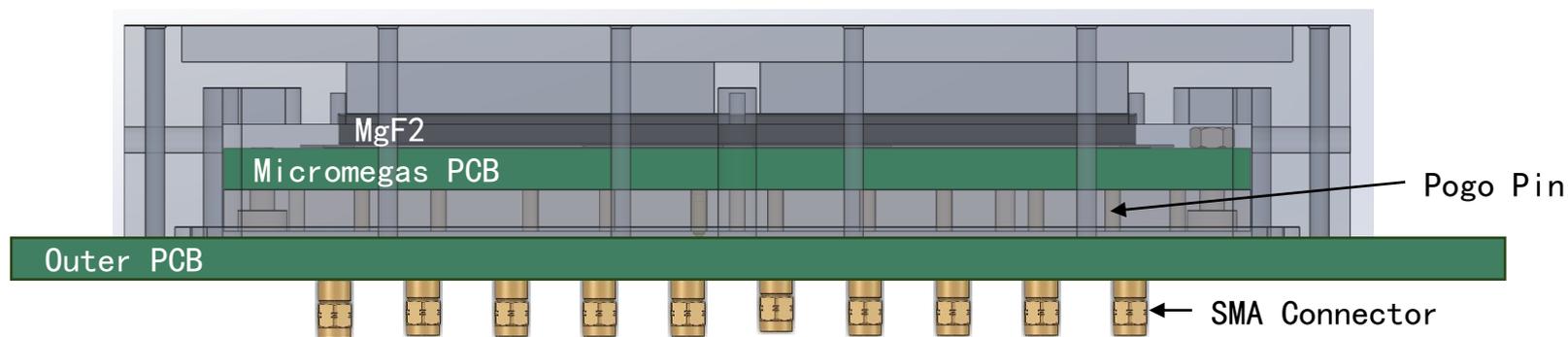
- 研究背景
- 多通道PICONSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望

10cm*10cm多通道PICOSEC Micromegas的设计方案:

- 金属气框和外部读出电路板提供支撑且形成气密
- 整块10cm*10cm MgF2晶体作为切伦科夫辐射体和光阴极
- Micromegas电路板设计有100个边长1cm的读出通道

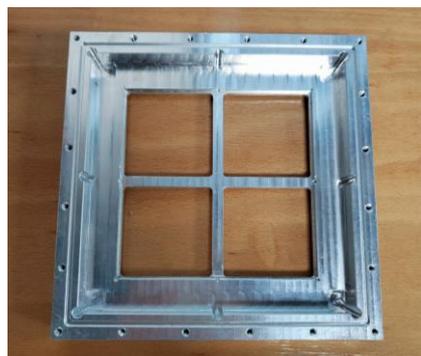


10*10cm多通道 PICOSEC 探测器示意图

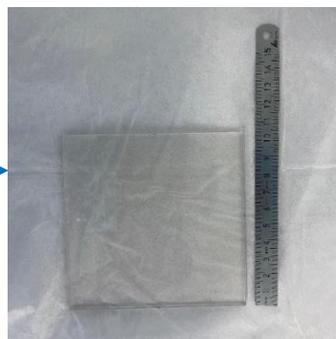


10*10cm多通道 PICOSEC 探测器剖面图

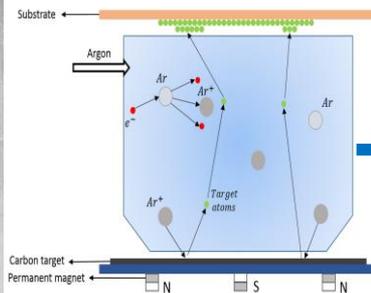
多通道PICOSEC的制作



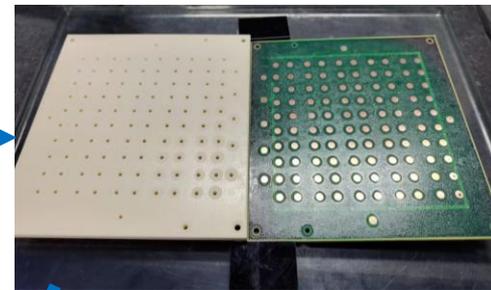
探测器气框



10*10cm DLC光阴极



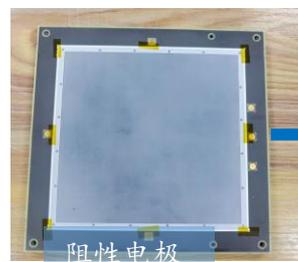
磁控溅射镀膜原理图



环氧胶粘接电路板和陶瓷板

探测器制作的核心工艺:

- 磁控溅射镀膜技术制备10cm*10cm大面积光阴极
- 电路板背部粘接陶瓷板提升机械强度
- 热压接技术制作Micromegas (阻性电极Ge)



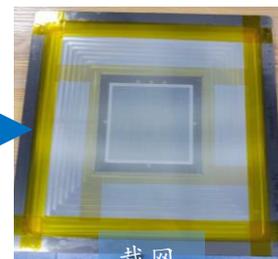
阻性电极



热熔胶膜



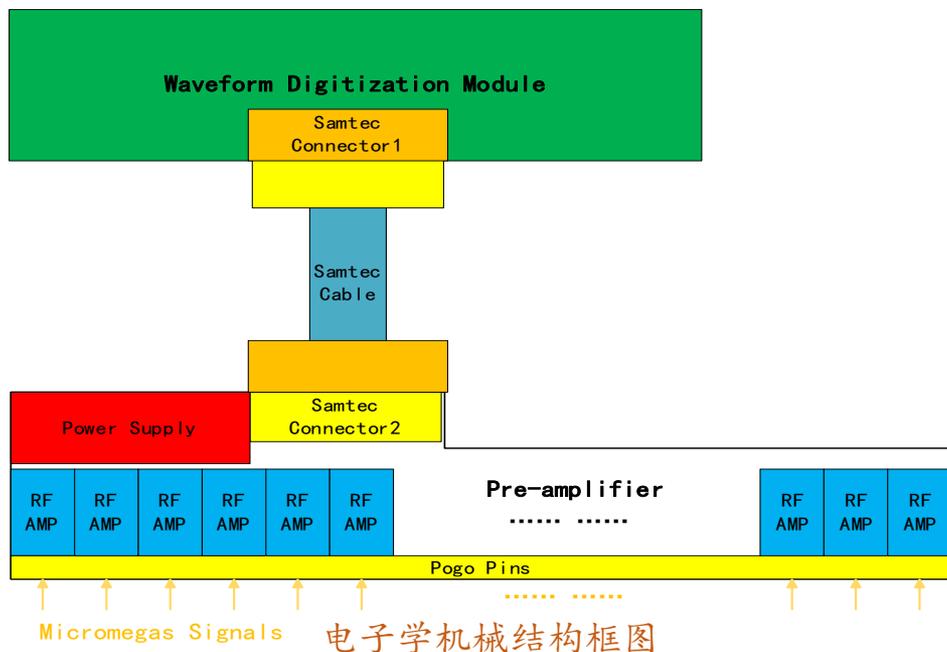
热压接粘网



裁网

热压接工艺制作Micromegas探测器实物图

- 研究背景
- 多通道PICONSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望



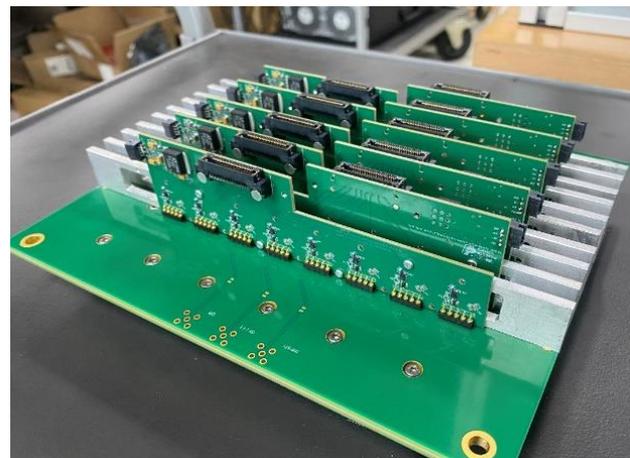
- 前端放大器模块：16通道，基于射频放大器设计
- 波形数字化模块：16通道，基于DRS4芯片进行波形采样，采样率5.12Gps，模拟带宽950MHz
- 耦合方式：前放通过弹簧顶针与探测器连接，前放和波形数字化模块之间通过SAMTEC线缆连接



USTC前端放大器模块



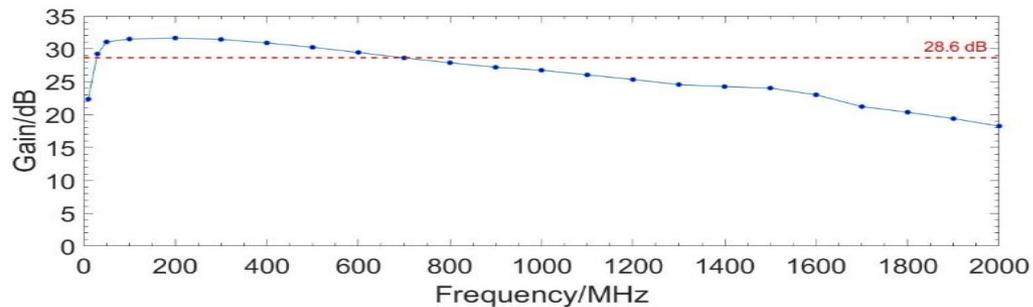
USTC波形数字化版



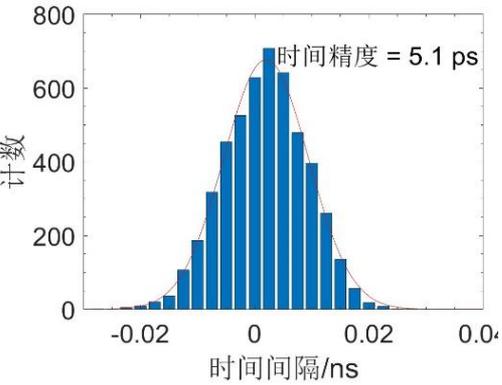
前放与PICOSEC探测器耦合

电子学系统的研制

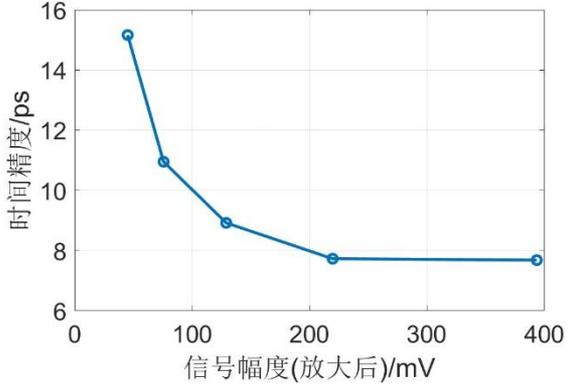
PICOSEC
Micromegas



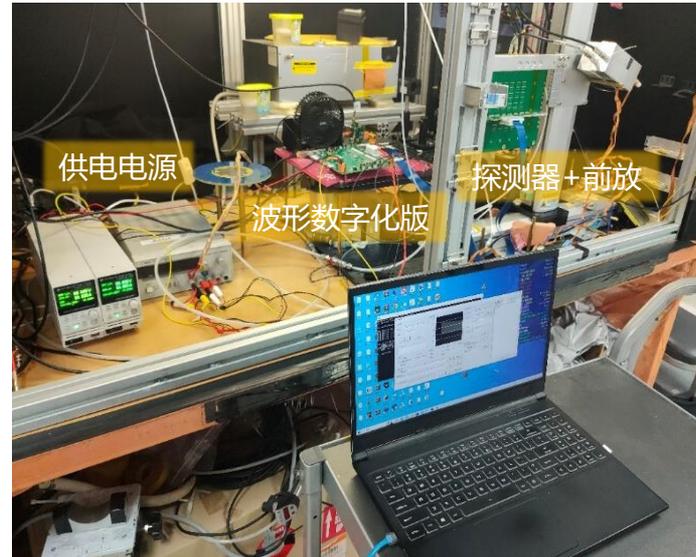
前放的增益频率响应曲线



前放时间精度



前放+波形数字化版时间精度

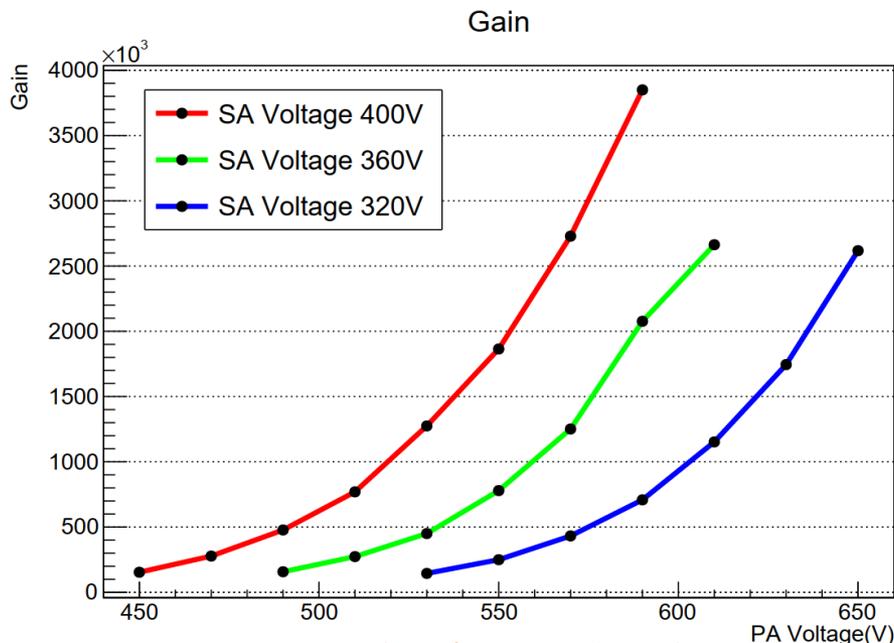


探测器与电子学系统测试平台

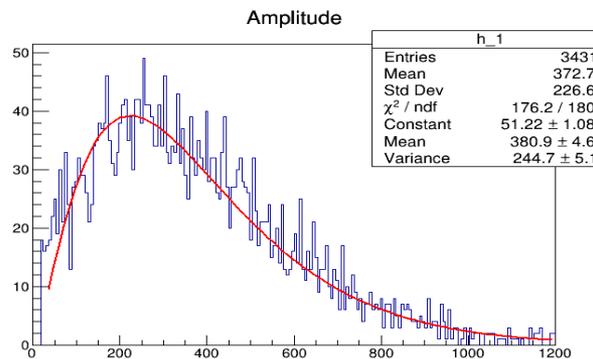
- 实验室中测试前放的增益频率响应曲线，-3dB带宽在25MHz~700MHz内
- 利用脉冲信号源测量前放时间精度5.1ps，在探测器信号幅度的动态范围内前放+波形数字化时间精度<10ps
- 实验室搭建测试平台，进行电子学和探测器联调测试

- 研究背景
- 多通道PICOSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望

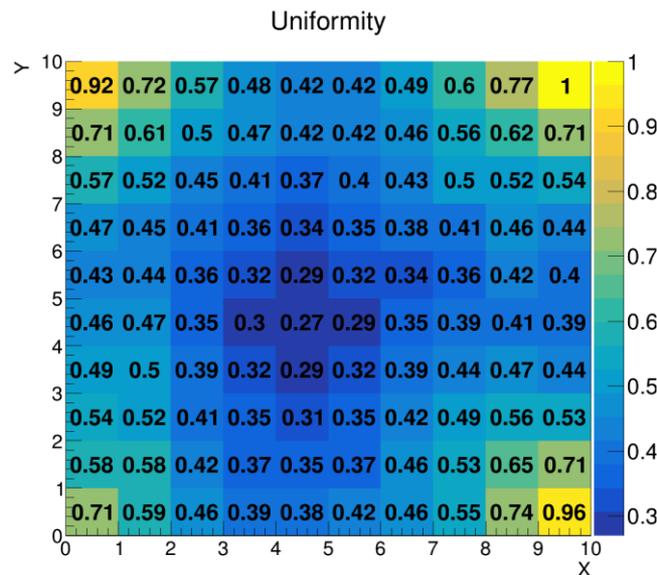
增益和均匀性测试



探测器增益随电压的变化曲线



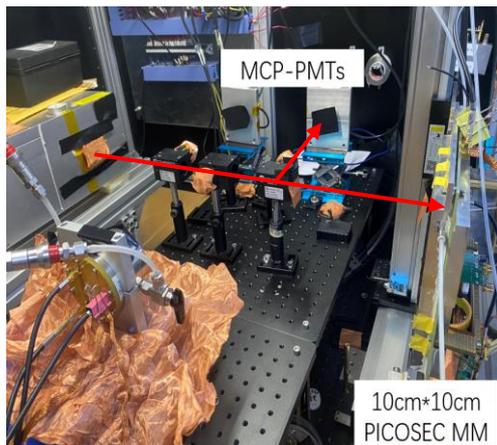
单光子能谱 (Polya拟合)



探测器整体均匀性
RMS/Mean = 29.61%

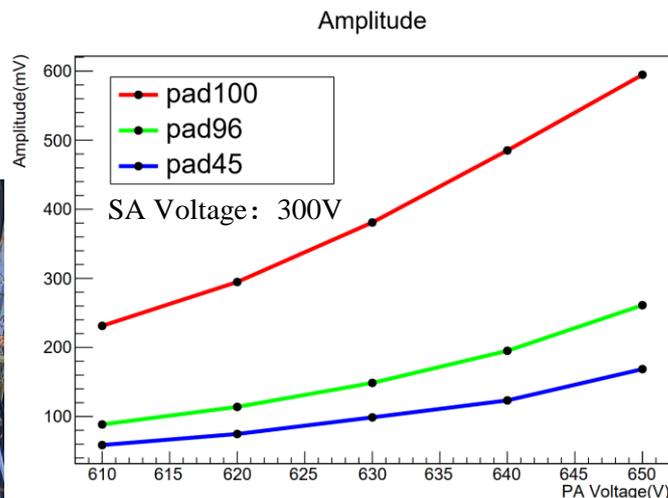
- 单光子源，气体：Ne/CF₄/C₂H₆ = 80/10/10
- 两级放大模式的增益可达 4×10^6
- 两级放大模式下探测器整体均匀性呈现中间小两边大的趋势，主要由于电路板形变导致的预放大区气隙厚度不均匀

紫外激光测试平台

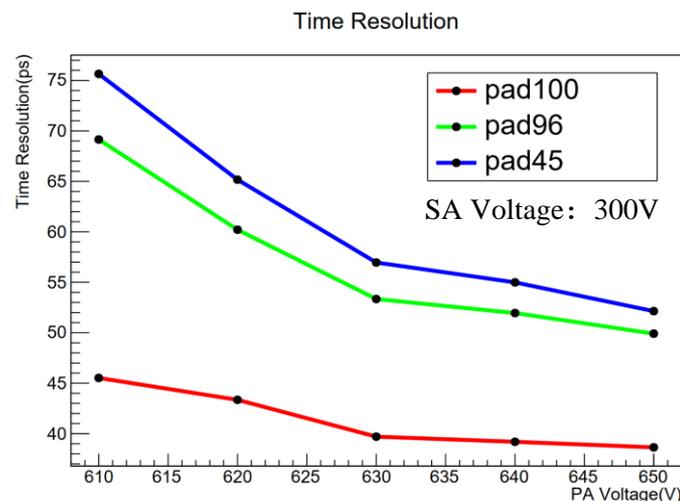


实验设置:

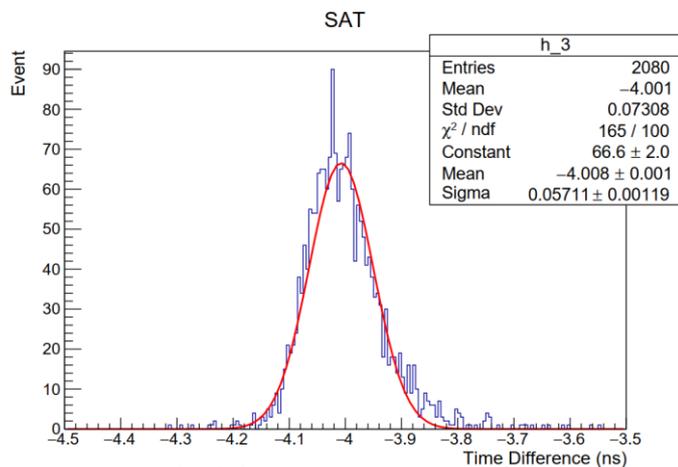
- 皮秒激光器, 脉冲宽度~4ps
- 紫外激光波长: 213nm
- 前端放大器: Cividec 2GHz
- 信号采集: 高性能示波器
- MCP-PMT作为参考时间



信号幅度随电压变化曲线



时间分辨随电压变化曲线

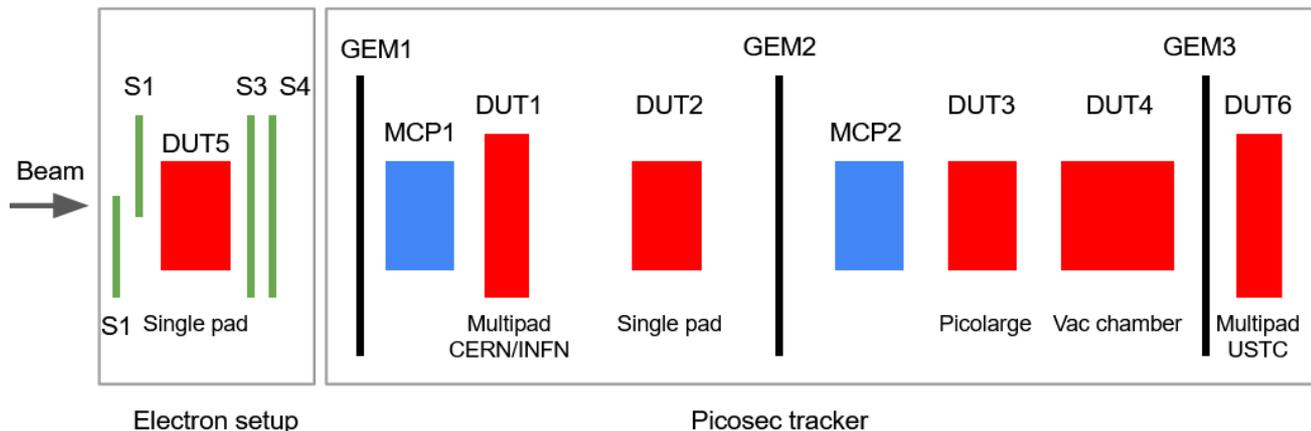


信号时间差分布 (高斯拟合)

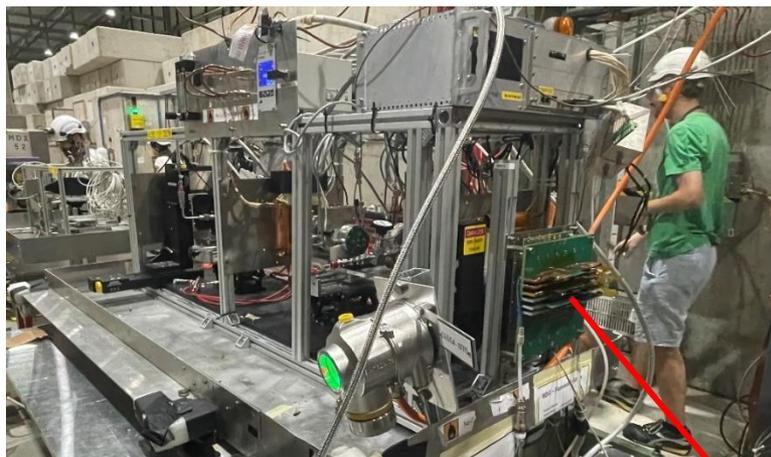
分析和结果:

- 信号定时: 前沿拟合+恒比定时 (20% CFD)
- 高斯拟合时间差分布
- 单光子时间分辨可达低于40ps

- 研究背景
- 多通道PICOSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望



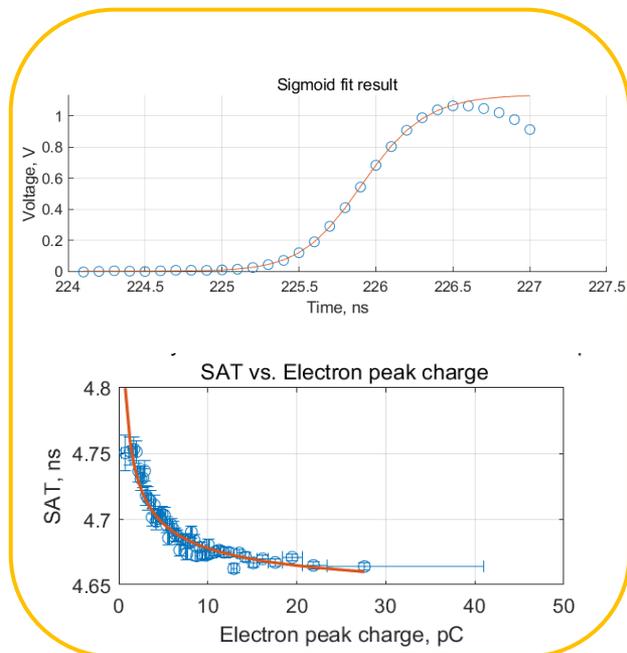
束流实验设置 (CERN SPS H4 Beamline, 2023 July)



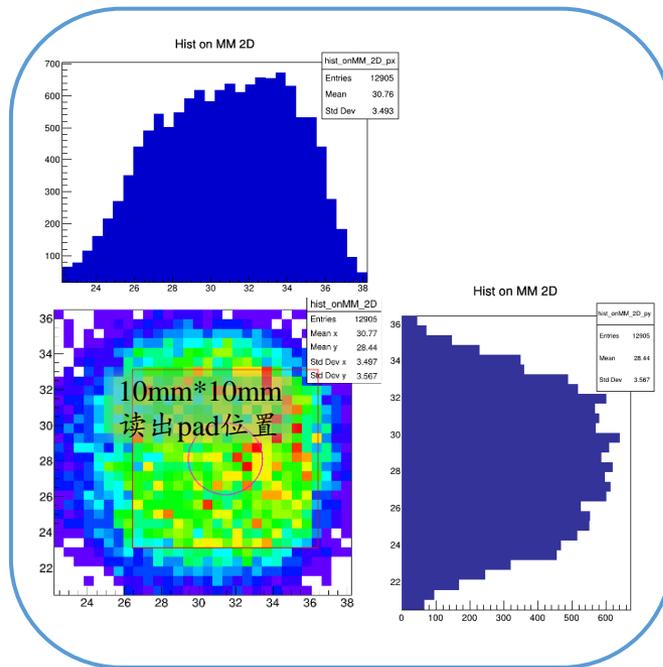
束流实验装置图

USTC
PICOSEC

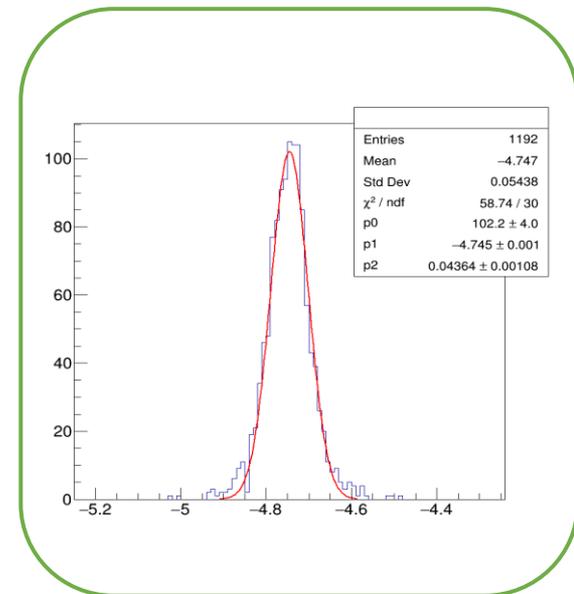
- 束流: 150 GeV/c μ 子
- 气体: Ne/CF₄/C₂H₆ = 80/10/10
- 参考时间: MCP-PMT1
- 径迹系统: 三个GEM探测器, XY维读出
- 采数系统: MCP1做触发, SRS接收后输出event ID作为示波器的触发, 开始采数



PICOSEC信号进行时幅修正



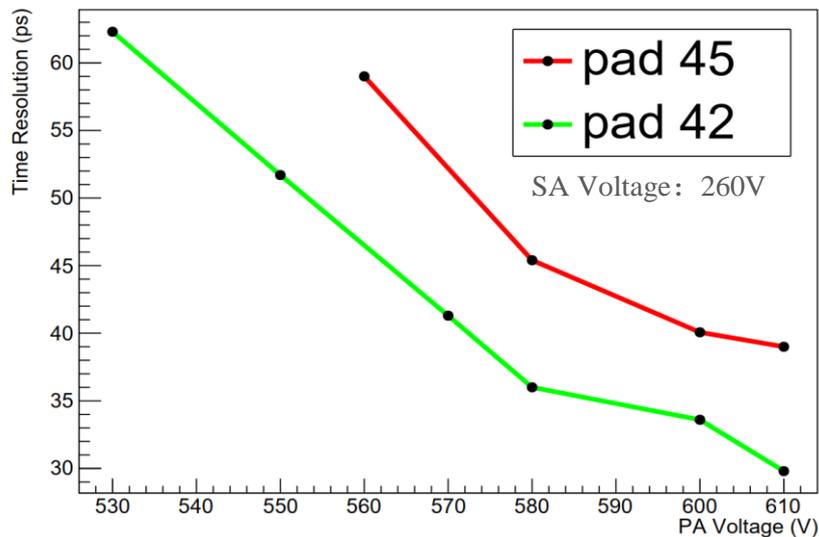
带电粒子击中位置的二维分布



筛选后的时间差分布(ns)

- 信号定时：PICOSEC探测器信号经过前沿拟合、20%恒比定时、时幅修正
- 径迹筛选：筛选出击中pad中心4mm圆板斑位置的粒子
- MCP1信号作为参考时间，统计PICOSEC探测器与其的时间差分布

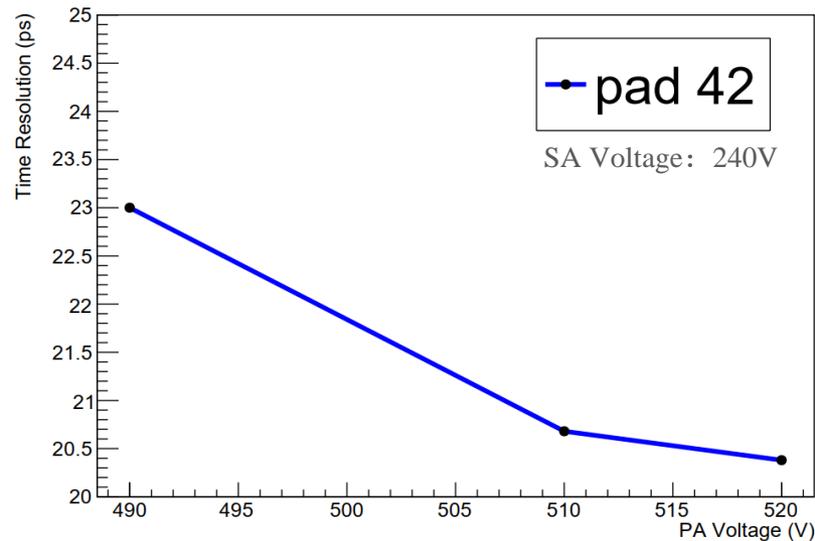
Time Resolution with DLC Photocathode



使用DLC光阴极的时间分辨结果

- 使用之前自主制备的大面积DLC光阴极，光子数约2.5个（有提升空间）
- 单通道时间分辨可达~30ps

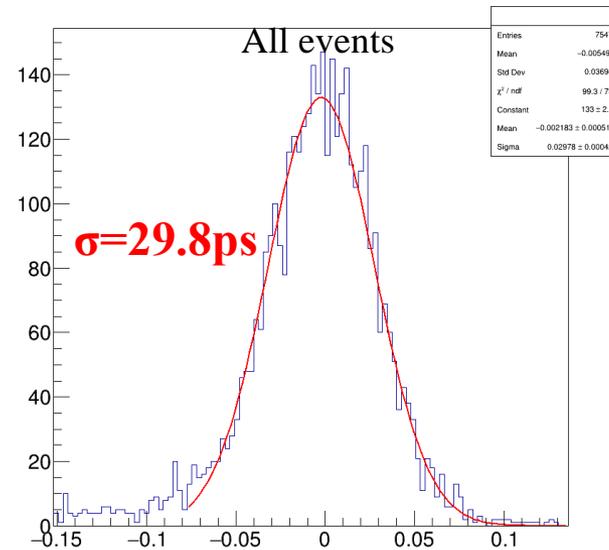
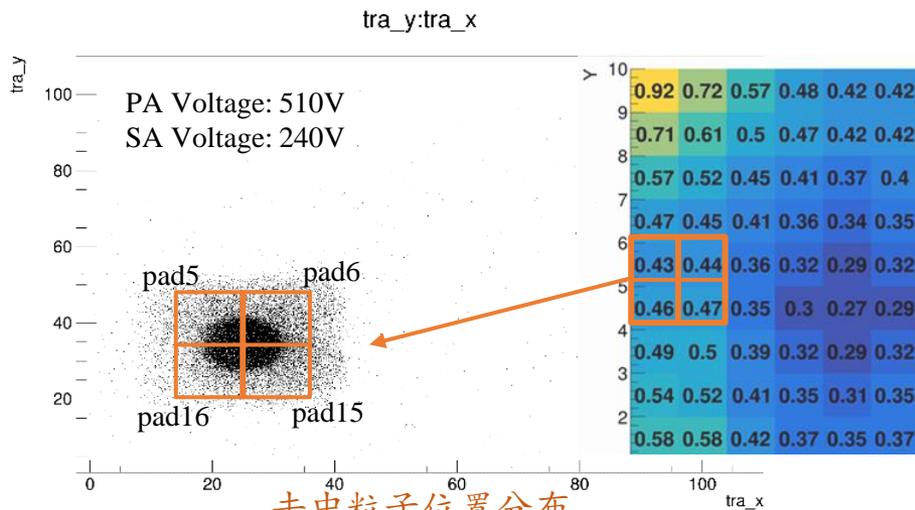
Time Resolution with CsI Photocathode



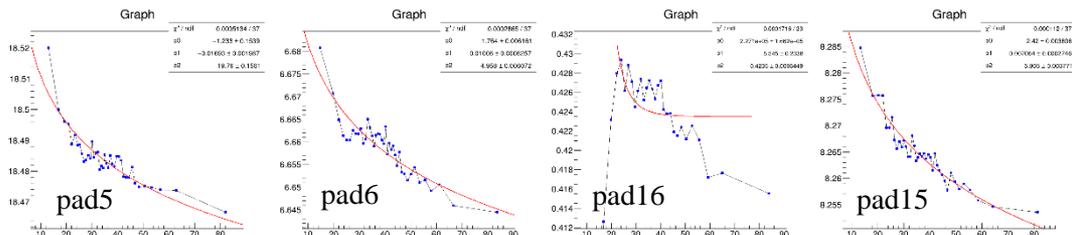
使用碘化铯光阴极的时间分辨结果

- 碘化铯光阴极产生的光子数约8-10个，时间分辨可达~20ps
- 碘化铯光阴极具有难以在空气中长期保存，因离子反馈导致老化等潜在问题

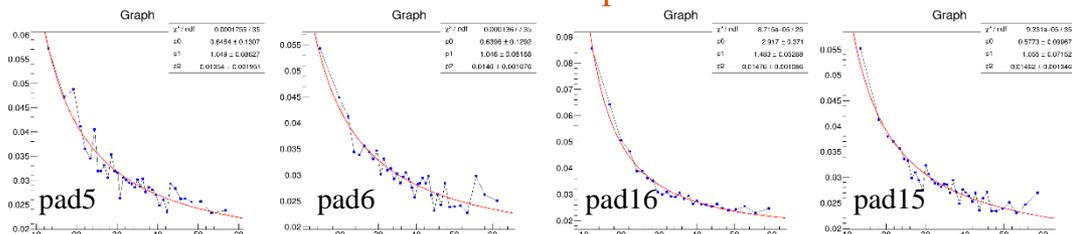
多通道击中测试结果



三通道重建后的时间差分布 (ns)



SAT vs Amplitude



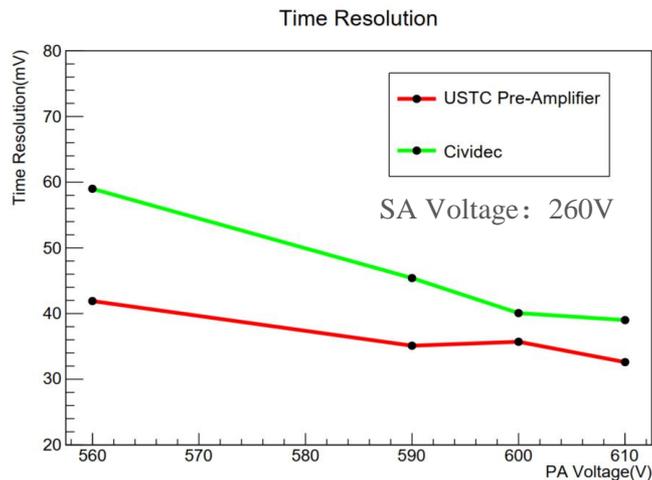
RMS vs Amplitude

$$T_{combine} = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{(\delta(\text{signal size}))^2}} \sum_{i=1}^M \frac{SAT_{true}^i - SAT_{corr}^i(\text{signal size})}{(\delta(\text{signal size}))^2}$$

- 束流击中位置在四个相邻通道的中心
- 每个pad上进行时幅修正，通过 δ_{SAT} 与信号幅度的关系拟合重建时间
- 使用碘化铯光阴极，重建后的多通道时间分辨可达 $<30\text{ps}$

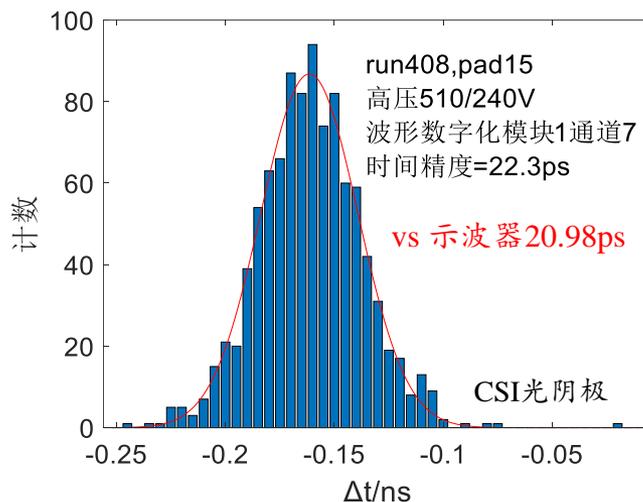


CERN束流电子学测试现场实物图



USTC前端放大器测试结果

- USTC前放的时间分辨率略好于Cividec



USTC波形数字化版测试结果

- 波形数字化版性能满足需求, 整个系统的时间分辨率也可达22.3ps

- 研究背景
- 多通道PICOSEC探测器的设计与制作
- 电子学系统的研制
- 实验室基本性能测试
- 束流上的时间性能测试
- 小结与展望

10cm*10cm 多通道PICOSEC探测器的设计与制作工艺:

- 用于装配辐射体和Micromegas探测器的整体腔体设计
- 大面积DLC光阴极制备技术
- 应用阻性电极的热压接Micromegas工艺

多通道PICOSEC探测器在测试中达到良好的时间性能:

- 实验室激光测试中单光子时间分辨可达低于40ps
- 束流测试: 使用CsI光阴极的时间分辨可达~20ps (8-10个光电子); 抗老化的DLC光阴极时间分辨可达~30ps (~2.5个光电子)
- 结合自主开发的前端放大器和波形数字化模块测试结果有较好的性能表现, 探测器和电子学系统整体时间分辨可达<30ps

未来研究前景:

- 开发更大面积的PICOSEC探测器制作工艺
- 改进电路板的机械性能来增进探测器整体均匀性
- 进一步提升DLC光阴极量子效率的研究

谢谢!

- **CEA Saclay(France):** S. Aune, D. Desforge, I. Giomataris, T. Gustavsson, F. J. Iguaz, M. Kebbiri, P. Legou, T. Papaevangelou, M. Pomorski, L. Sohl
- **CERN (Switzerland):** J. Bortfeldt, F. Brunbauer, Karl Jonathan Floethner, D. Janssens, M. Lisowska, M. Lupberger, H. Müller, E. Oliveri, G. Orlandini, F. Resnati, L. Ropelewski, L. Scharenberg, T. Schneider, M. van Stenis, A. Utrobicic, R. Veenhof, S.White
- **USTC (China):** J. Liu, Y. Meng, X. Wang, Z. Zhang, Y. Zhou.
- **AUTH (Greece):** I Angelis, A. Kallitsopoulou , K. Kordas, C. Lampoudis, I. Maniatis, I. Manthos, K. Paraschou, D. Sampsonidis, A. Tsiamis, S.E. Tzamarias
- **NCSR (Greece):** G. Fanourakis.
- **NTUA (Greece):** Y. Tsiopolitis.
- **LIP (Portugal):** M. Gallinaro.
- **HIP (FINLAND):** F. García.
- **JLAB (US):** K. Gnanv , S. Malace
- **SBU (US):** K. Dehmelt, P. Gargo

