超级陶粲装置
Super Tau-Charm Facility

探测器与电子学分会

张云龙

中国科学技术大学

2026年超级陶粲装置研讨会 西安
2026年7月1日-5日

探测器分会概况

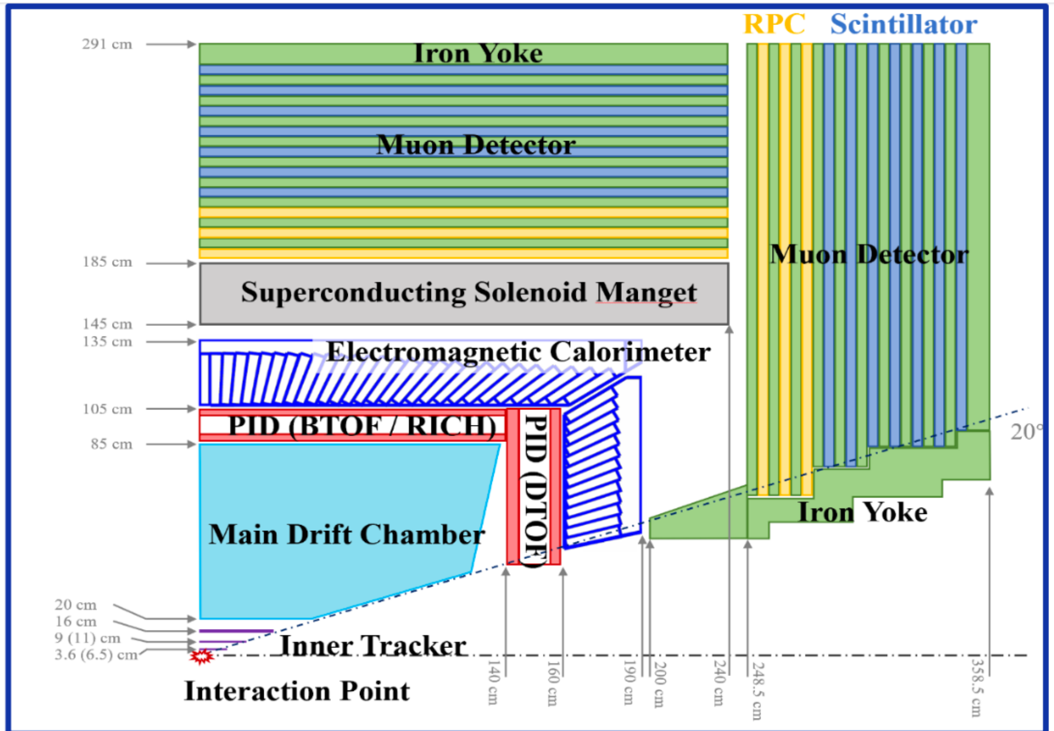
邀请报告 （12个）

- CEPC TaichuPix研制 （魏微，高能所）
- HVCMOS研制 （周扬，高能所）
- 宽禁带半导体探测器研究 （刘林月，西安交大）
- MCP-PMT研究进展（李奎念，西安光机所）
- HNS进展 （王博群，近代物理所）
- ASHIPH进展 （王小龙，复旦大学）
- LHCb电磁量能器升级 （李衡讷，华南师范大学）
- CEPC电磁量能器 （刘勇，高能所）
- ATLAS Phase-II thin-gap RPC（梁昊，中国科大）
- BESIII实验束流能量 （张建勇，高能所）
- CEPC TDAQ研究进展 （李飞，高能所）
- ML at BESIII trigger （张瀚林，高能所）

STCF进展报告 （17个）

- STCF ITKM进展报告 （秦家军，中国科大）
- STCF ITKW进展报告 （方竹君，中国科大）
- STCF MDCH进展 （曹喆，中国科大）
- STCF RICH进展 （黄文谦，广西大学）
- STCF DTOF/BTOF进展 （庞昊，中国科大）
- STCF ECAL进展 （张云龙，中国科大）
- STCF MUD进展 （刘凯，兰州大学）
- STCF前向区系统研究进展 （王杰，中国地大）
- STCF谱仪机械设计及关键技术研究 （刘萍，安徽理工）
- STCF探测器超导磁铁进展汇报 （张小涛，西门子）
- STCF时钟系统与数据传输ASIC研究（王进红，中国科大）
- 高能物理实验中双向光纤收发器的研究（郭迪，华中师大）
- DC/DC BUCK型电压转换器研究 （王佳，西北工大）
- STCF DAQ系统研究进展（杨俊峰，中国科大）
- 基于异构框架的STCF HLT算法研究（彭亮，湖南科大）
- STCF触发系统研究进展 （方竹君，中国科大）
- STCF慢控进展报告（胡东栋，中国科大）

STCF谱仪进展 （刘倩，大会报告）



Major Performance Requirements

Acceptance: 94%×4π

Momentum res.: σ_p/p ~ 0.5% @ 1 GeV

Energy res. : σ_E/E ~ 2.5% @ 1 GeV

Hadron ID: π/K ~4σ @ 2 GeV

Muon ID: eff. >95%, misrate <3.3% @1 GeV

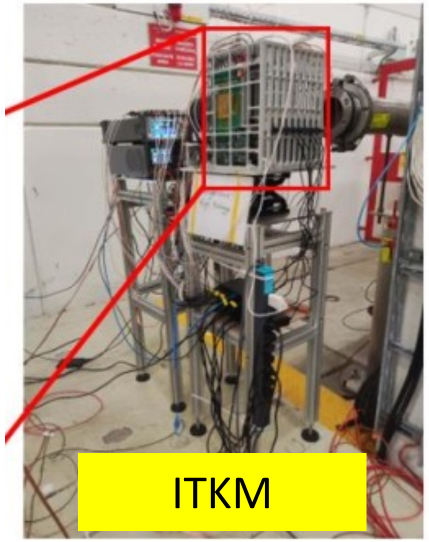
- **Inner Tracker**
  - MPGD: cylindrical uRGroove, σ_x ~100 μm
  - Silicon: low-mass MAPS, <0.3%X_0/layer
- **Central Tracker** (σ_p/p~0.5% @ 1GeV)
  - Drift chamber with super-small cells, σ_x <130 μm
- **PID System** (π/K ~4σ @ 2GeV)
  - Barrel: DIRC-like TOF (σ_t~30 ps)
  - Endcap: RICH (<4mrad) or ASHIPH
- **EMC**
  - pCsI + APD: (σ_E/E~2.5%, σ_x~5 mm, σ_t~300 ps @ 1GeV)
- **Solenoid** ： 1 T
- **Muon Detector** (eff. >95%, mis-rate <3% @1GeV)
  - inner layers : glass RPC， > 300 Hz/cm^2
  - outer layers : scintillator strip + SiPM, ~ 2.4 m
- **Trigger, DAQ, Clock and Data Transmission**

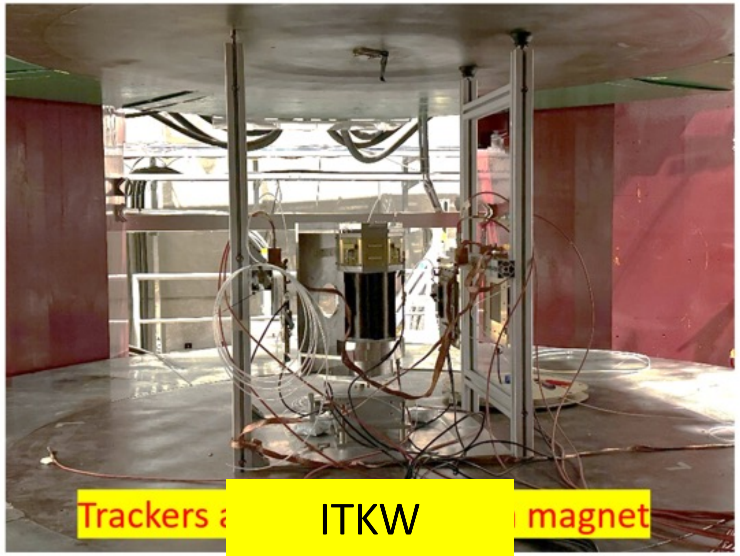
Beam background at the inner most layer

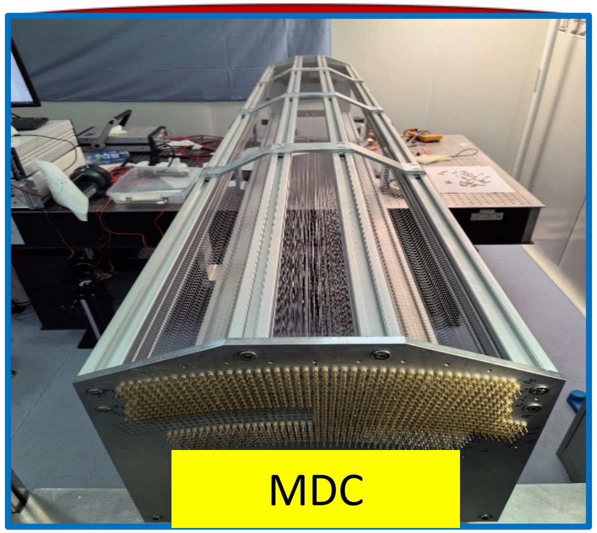
~1 Mrad/y, ~1×10^{11} 1MeV n-eq/cm^2/y, ~1 MHz/cm^2

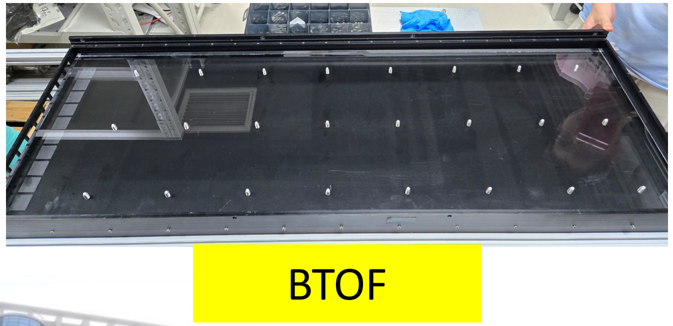
STCF探测器研究进展

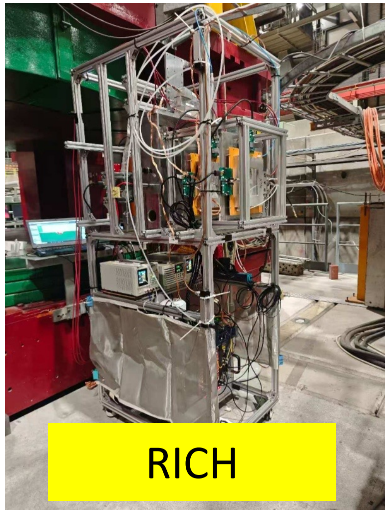
◆各子探测器均在进行或完成样机的研制，并进行宇宙线或束流实验验证性能

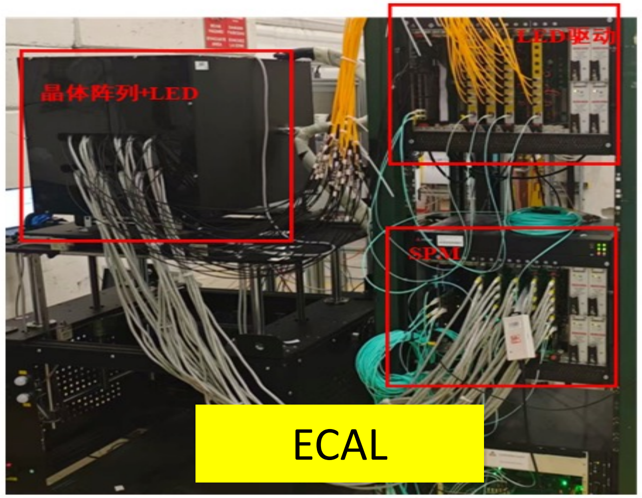


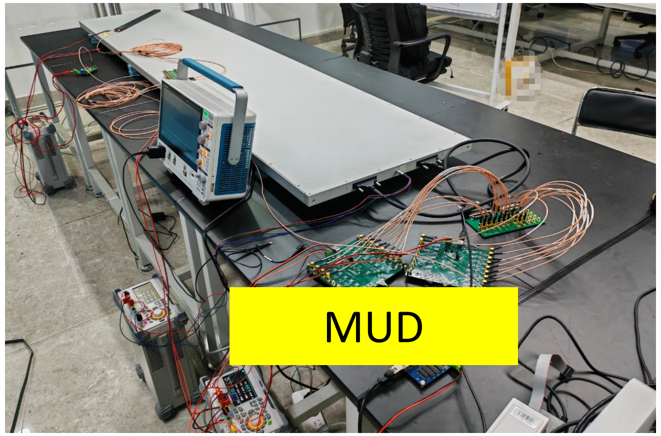












STCF机械设计、超导磁铁及前向系统研究进展

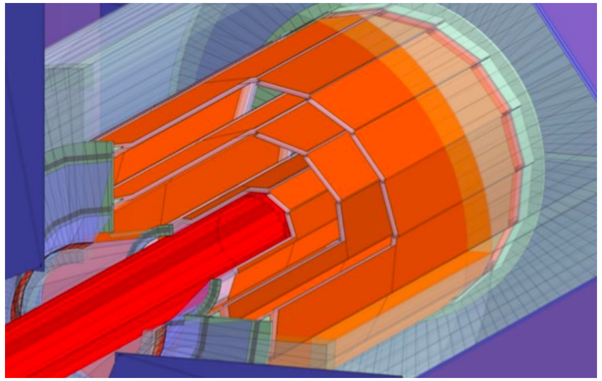
◆完成各个子探测器的机械设计，并开展相关研究

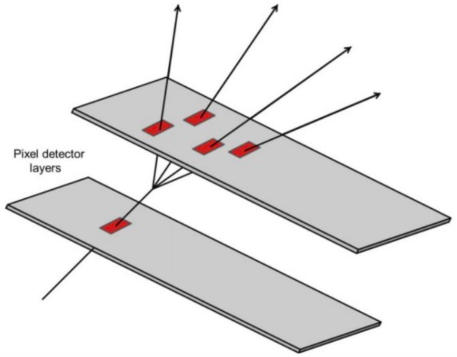
子探测器名称	2024.12-2025.02	2025.03-2025.05	2025.06-2025.08	2025.09-2025.12
1、整体支撑及移动	整体支撑和移动结构分析及优化（已完成）	设计制作模型（已完成）	模型验证（已完成）	TDR+设计优化改进（已完成）
2、MUON（轭铁）	整体轭铁机械结构初步设计，整体框架力学分析	模型更新，桶轭与端轭吊装方案	MUON探测器安装方案	已完成：厚度、新磁力分析
3、超导磁体	完成项目建议书、吊挂结构设计（已完成）	超导螺线管磁体垂直组装设计、超导螺线管磁体与轭铁工装设计（已完成）	工装过程中吊挂结构及辅助吊耳分析、冷质量吊挂结构模型迭代（V3）（已完成）	冷质量吊挂结构改进、水平组装方案设计、TDR撰写（已完成）
4、电磁量能器	完成量能器桶部和端部吊挂结构设计（已完成）	完成量能器端部和桶部组装设计、与轭铁工装设计（已完成）	完成量能器冲击载荷分析、模态分析、组装设备强度分析（已完成）	完成量能器散热方案设计和仿真（已完成桶部）维护方案设计
5、ITKM（内径探测器）	整体安装机构的机械设计移动/连接副的设计	结构优化设计，工装设计，安装方案，整体结构的强度分析	制造工艺校核，安装、拆卸与维护方案	整体结构改进（已完成）
6、ITKW（气体内径迹探测器）	完成项目建议书、产热与散热分析（已完成）	散热系统仿真与实验、进一步优化结构（已完成）	完成机械主体与散热系统完整结构设计图（已完成）	安装与维护、定位与悬挂（已完成）
7、MDC（主漂移室）	完成项建书撰写和机械结构尺 寸优化匹配（已完成）	完成内桶连接形式的优化，确定结构及尺寸（已完成）	考虑实际机械结构边界条件关 键零部件模拟分析（已完成）	设计安装与拆卸维护方案，优化调整定位系统（已完成）
8、PIDB（BTOF）（桶部粒子鉴别器）	完成RICH结构初步设计，整体框架力学分析	RICH结构优化设计、工装	方案更改 PIDB（BTOF）	已完成：BTOF 设计及分析
9、RICH（端部粒子鉴别器）	完成DTOF结构初步设计，整体框架力学分析	DTOF结构优化设计、工装	方案更改 RICH	已完成：RICH 设计及分析

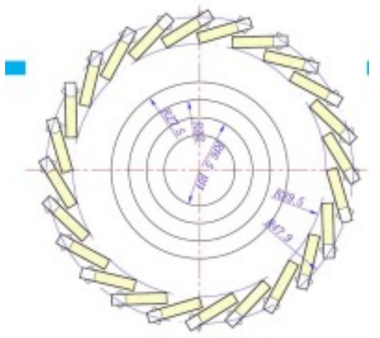
CEPC Vertex Detector & TaichuPix Development 魏微 （IHEP）

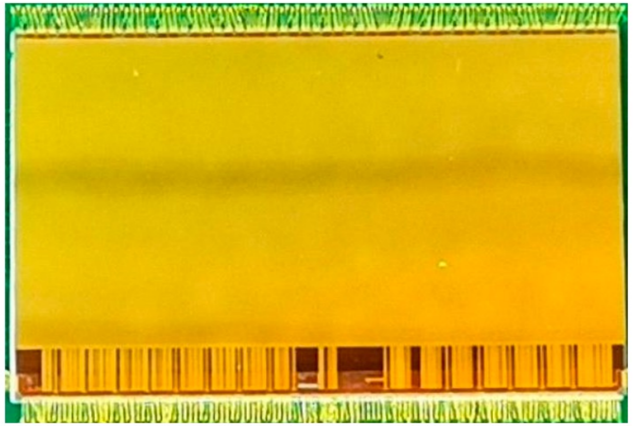
◆CEPC顶点探测器

- 空间分辨：~5um
- 物质量：~0.8%X_0
- 时间分辨：100ns
- 功耗：<40mW/cm^2
- 4层弯曲MAPS+ 1层ladder结构

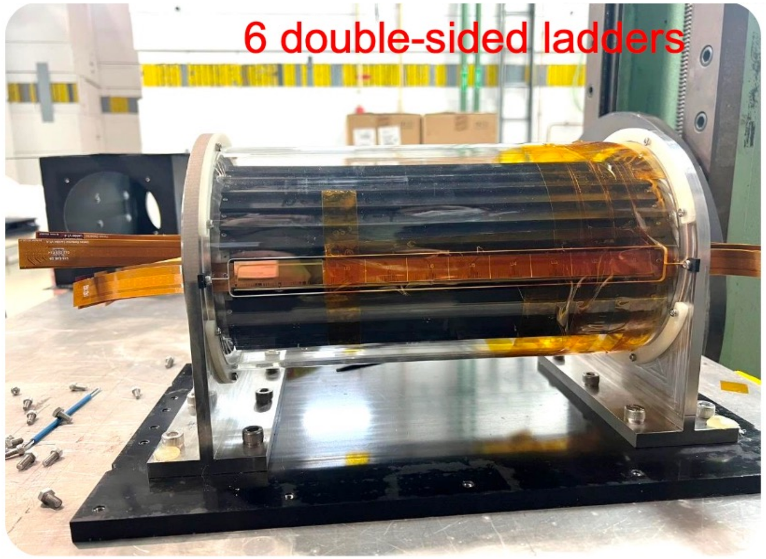


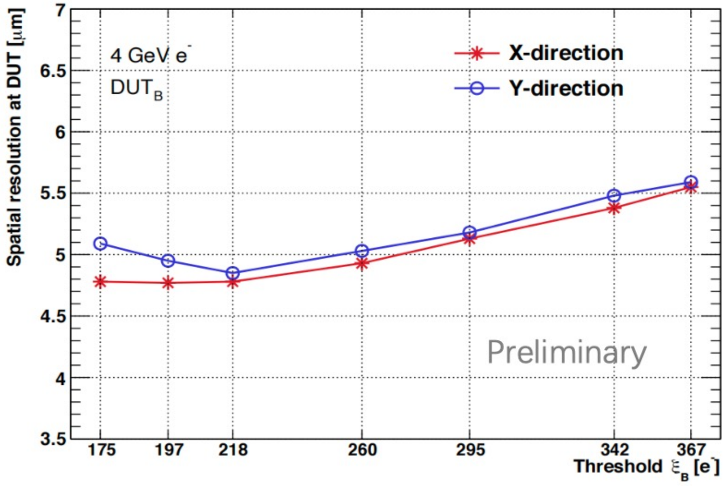






TaichuPix-3
(15.9 × 25.7 mm²)



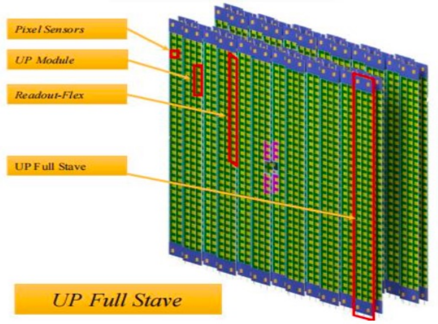


Spatial resolution vs. pixel threshold

单片高压CMOS像素传感器 周扬（IHEP）

- **时间分辨: ~3 − 5 ns for 精确标记束团对撞时间**（precise tagging of bunch crossing ~23 ns for CEPC, 25ns for LHCb);
- **位置分辨: ~8 μm** in the R-φ (bending) direction for CEPC, with less stringent requirements for LHCb;

CEPC ITK： 3 barrels layers + 4 pairs of endcap disks

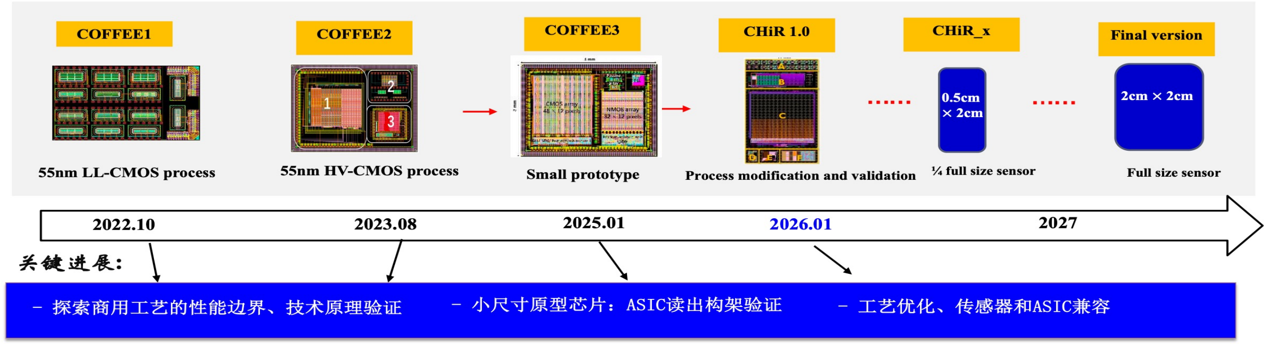


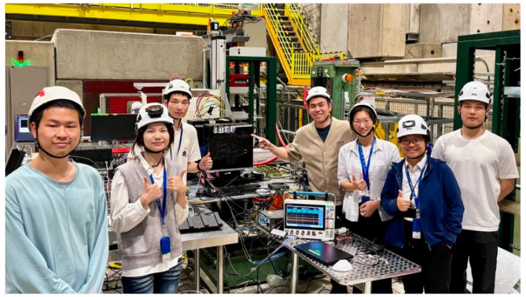
LHCb UP： 4 layers of endcap

COFFEE 系列芯片研发路线图： CMOS sensOr in Fifty-Five nm process

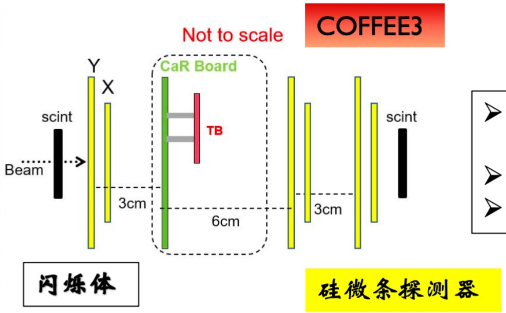
需要逐步攻克的核心问题：

先进CMOS工艺上传感器的实现、ASIC读出构架、传感器和ASIC的兼容、全功能集成、大尺寸全功能芯片集成

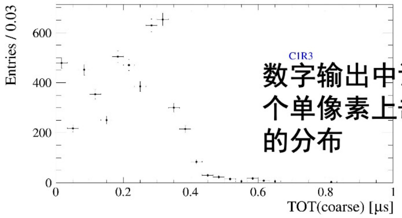




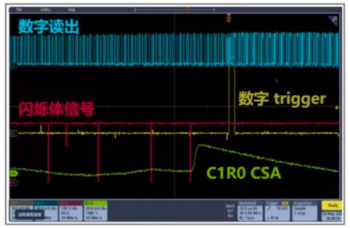
Setup on 19th May COFFEE placed between Si strip layers @ H6/PP156 @ SPS.



- COFFEE3在首次束流实验中观测到了MIP信号；
- 进一步的分析正在进行中；
- 为下一次束流实验积累了经验；



数字输出中记录到的一个单像素上击中的TOT的分布



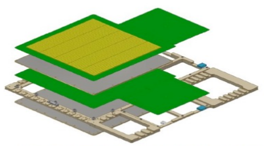
示波器中记录到的MIP击中在COFFEE3芯片上产生的模拟波形（绿色）、数字信号（蓝色）

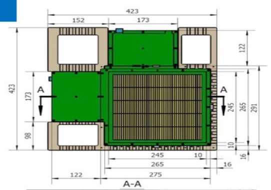
CEPC Silicon Inner Tracker meeting (May 26, 2026) · Indico of IHEP (Indico) by Yiming

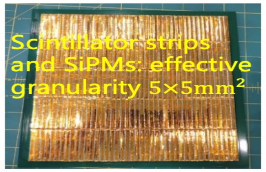
CEPC Electromagnetic Calorimetry 刘勇 （IHEP）

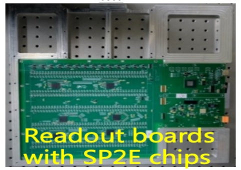
- ScW-ECAL prototype: developed in 2016-2020
  - Transverse area 22×22 cm^2, 32 longitudinal layers
  - 6,720 channels based on **SPIROC2E** (192 chips)
  - Total weight ~350 kg

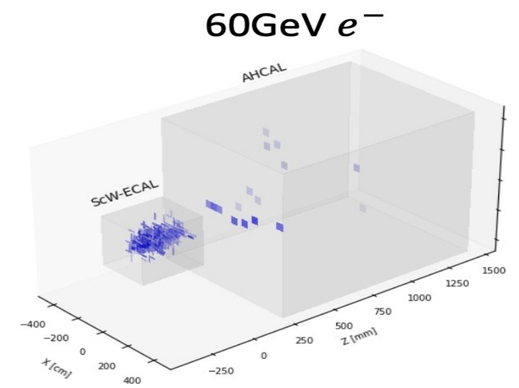
“Super-layer” design

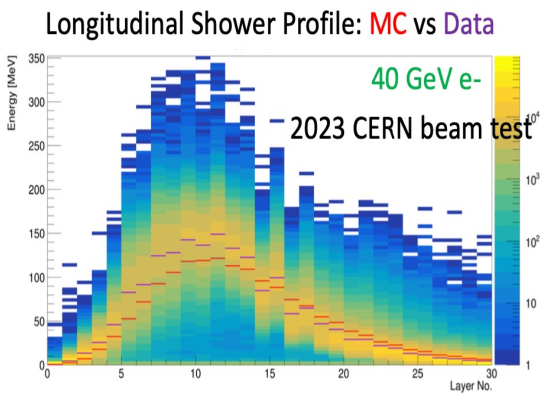






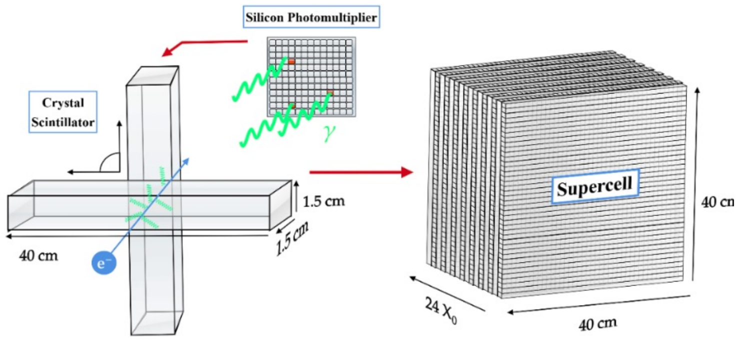


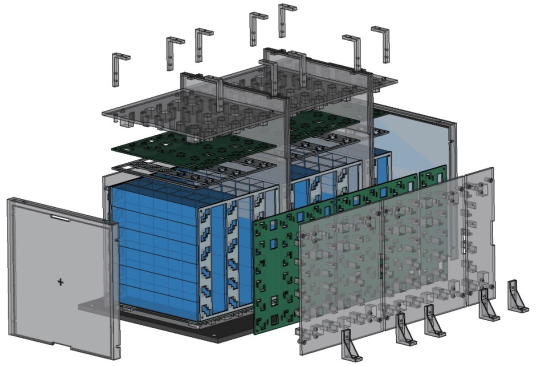


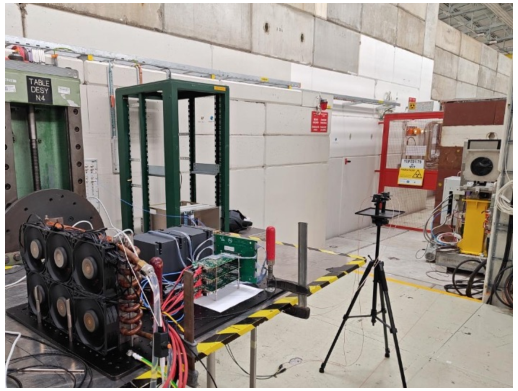


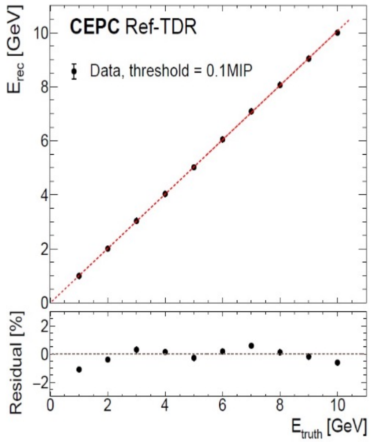
- A new PFA-oriented ECAL option for a future Higgs factory
  - **Homogeneous imaging** calorimetry: the first of this type
  - Design featuring **high granularity**, **modularity** and **hermeticity**
    - Crystals and SiPMs fully integrated in mechanics, cooling and readout electronics

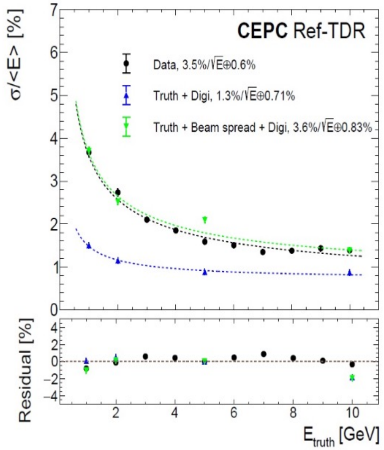
Module schematics







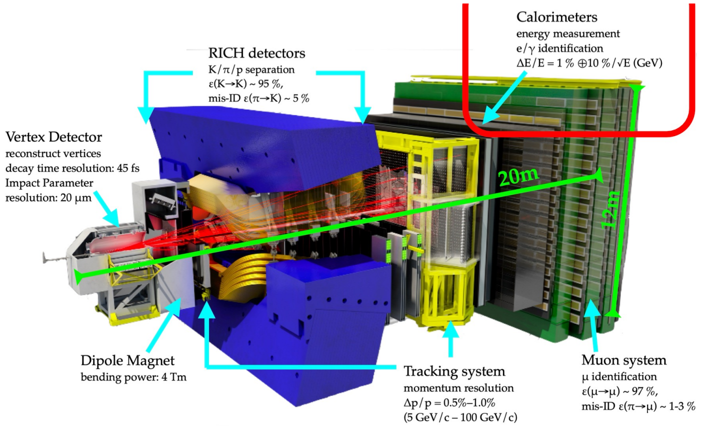


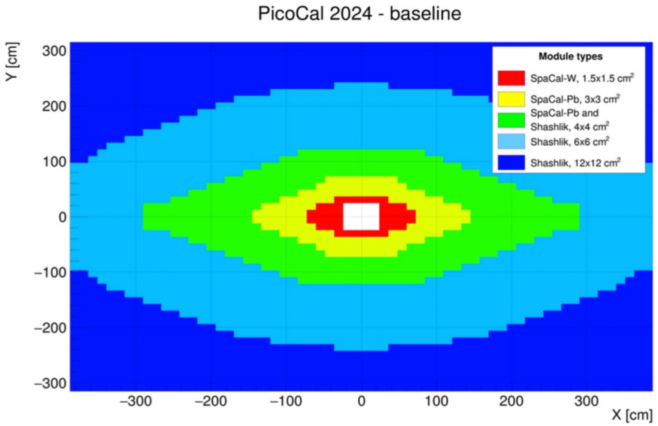


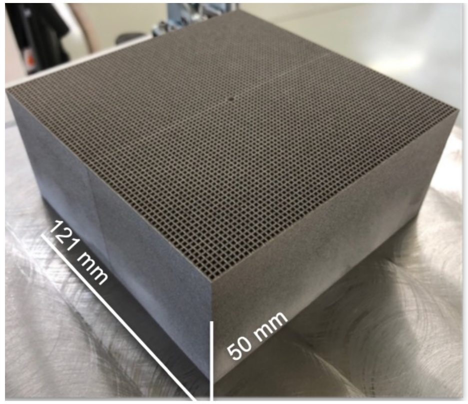
LHCb ECAL Upgrade II 李衡讷（SCNU）

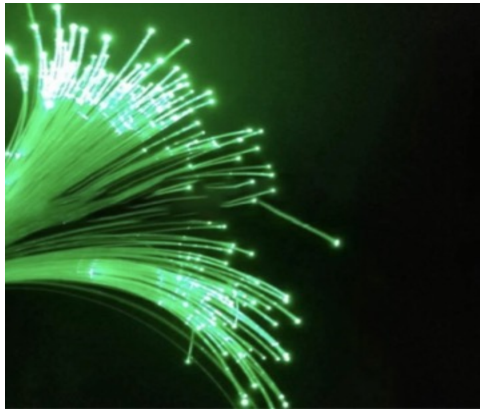
- 升级挑战
  - 1MGy
  - $\mathcal{O}$（10 ps）

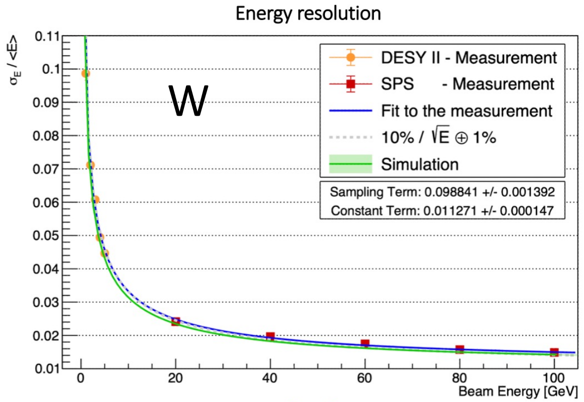
SpaCal，Scintillation fiber

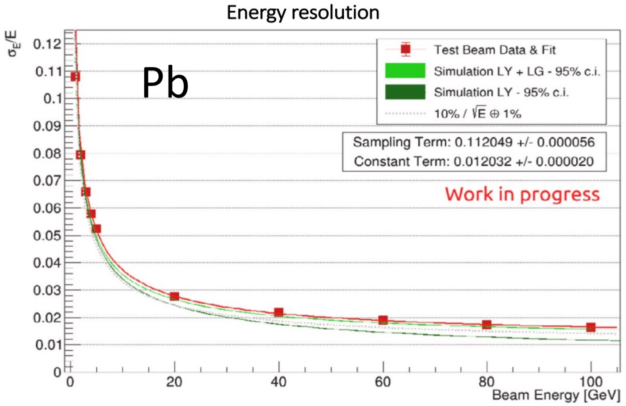


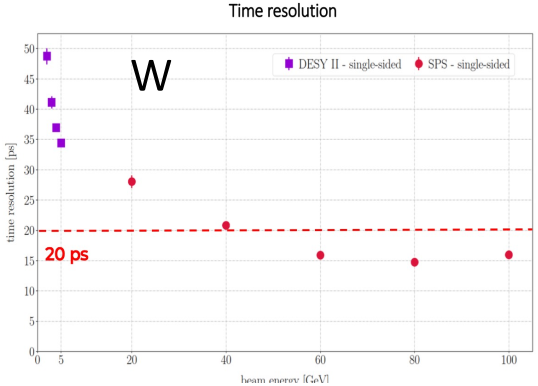


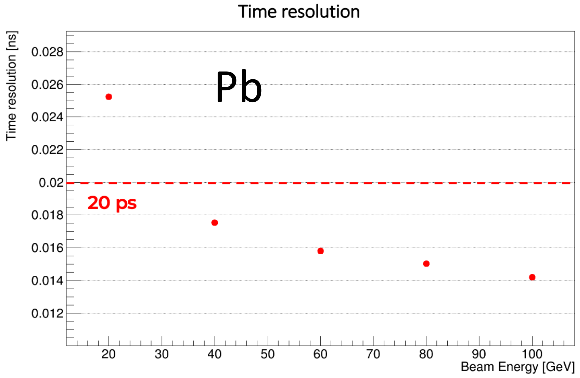






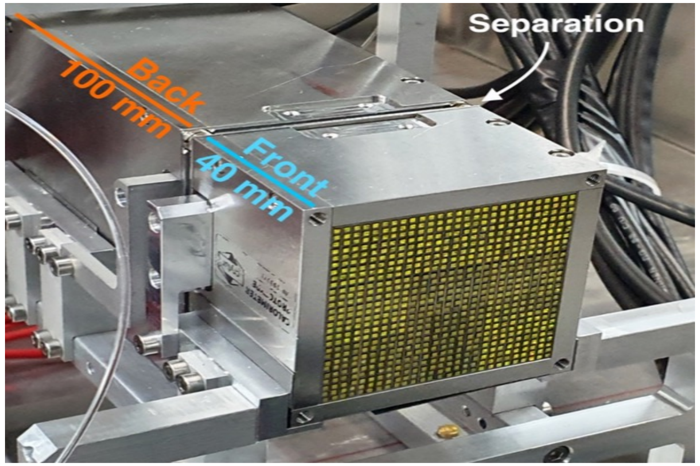


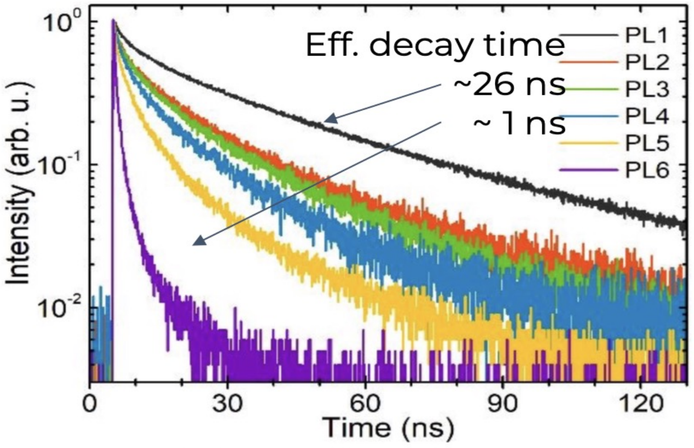


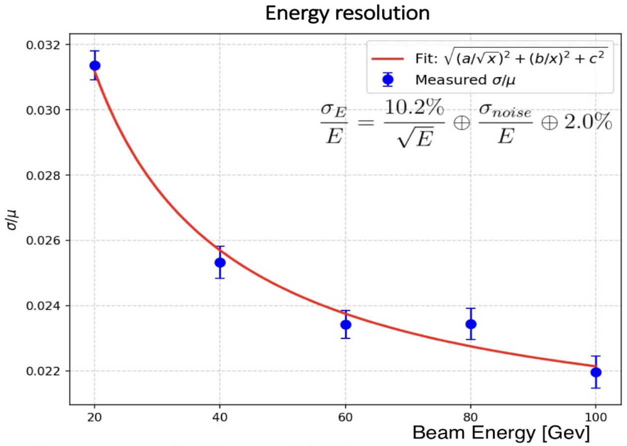


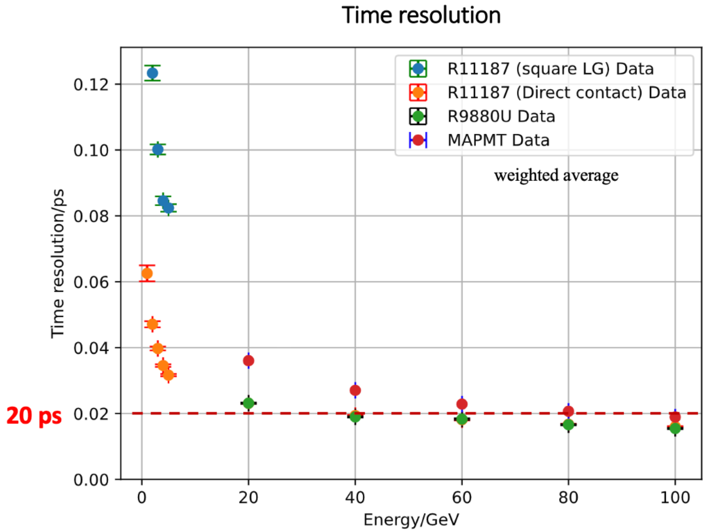
LHCb ECAL Upgrade II 李衡讷（SCNU）

SpaCal， W+GAGG fiber

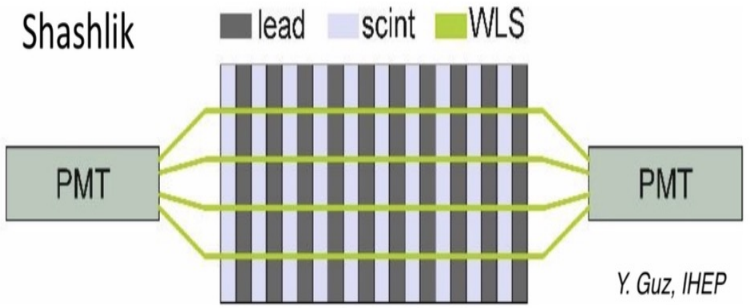


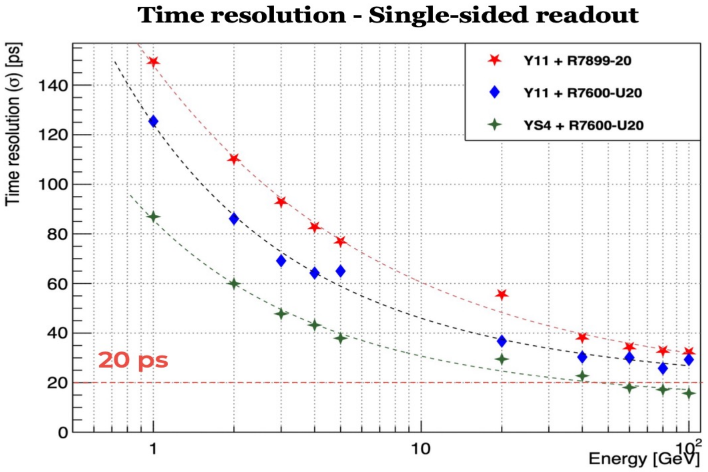






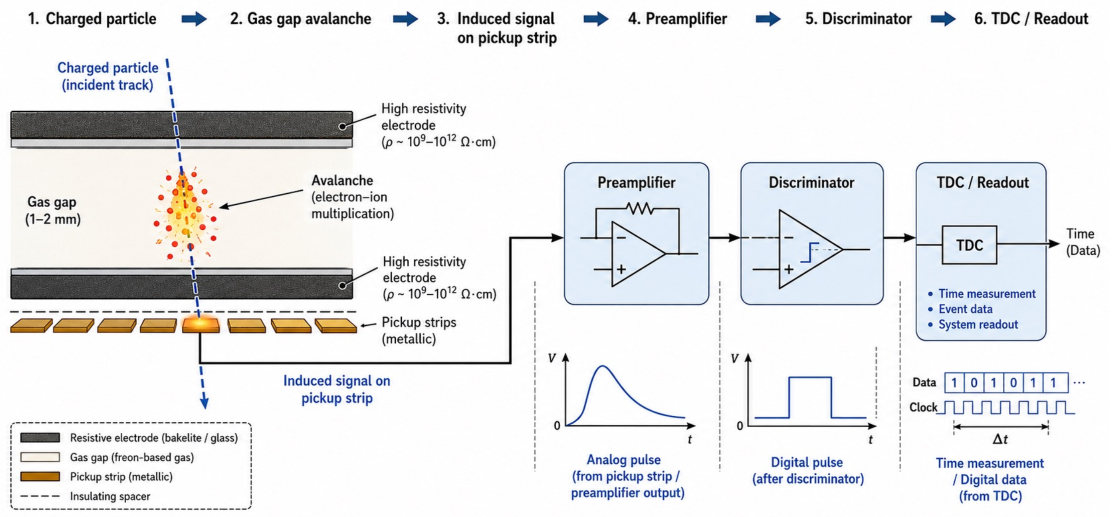
Shashlik

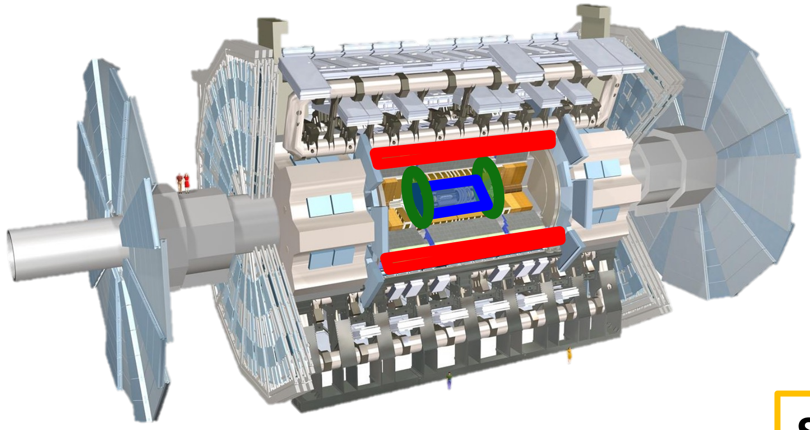




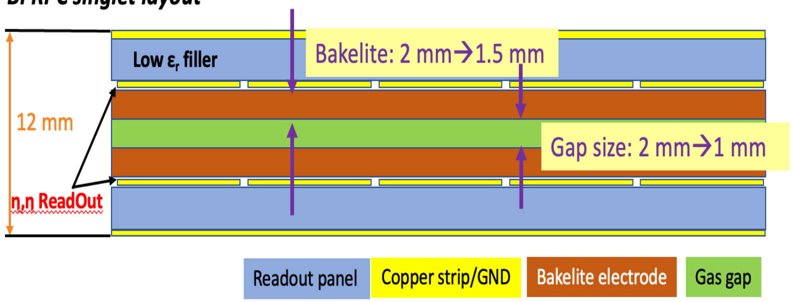
ATLAS Phase-II Upgrade 梁昊（USTC）

- HL-LHC condition:
  - Luminosity up to $7,5\times10^{34}\ cm^{-2}s^{-1}$
  - Pile-up $\langle\mu\rangle$ $up\ to\ 200$
  - Target: integrate 3000-4000 fb^{-1}



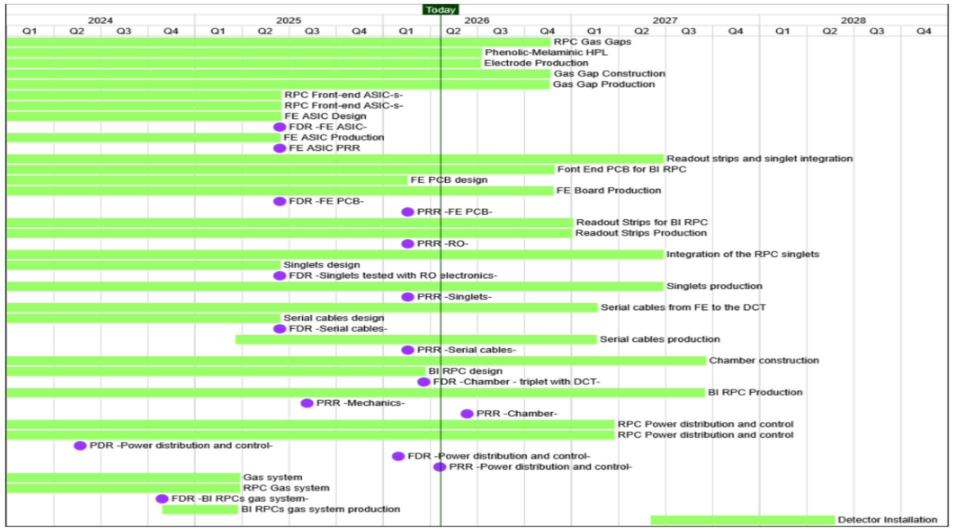


BI RPC singlet layout



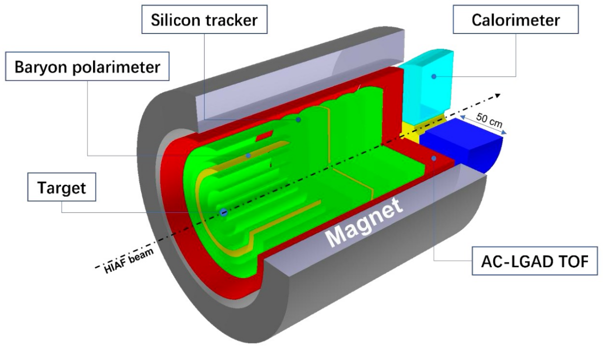
Specifications：

- Rate： >1 kHz/cm²
- Longevity： >10y@HL-LHC
- Spatial resolution： <1 cm
- Time resolution： ~ 0.5 ns



Hyperon-Nucleon Spectrometer (H-NS) 王博群 （IMP）

Hyperon-Nucleon Spectrometer (H-NS)



Mag. Field: 1.5 Tesla

Tracker: MIC6, 30X30 μm^2, 0.35%X/X_0

LGAD: σ_t ~ 30 ps , 300X300 μm^2

Calorimeter: σ_E ~ 3% @ 1GeV

Polarimeter: nucleon and photon polarization

Momentum resolution:
- ~2%@1GeV

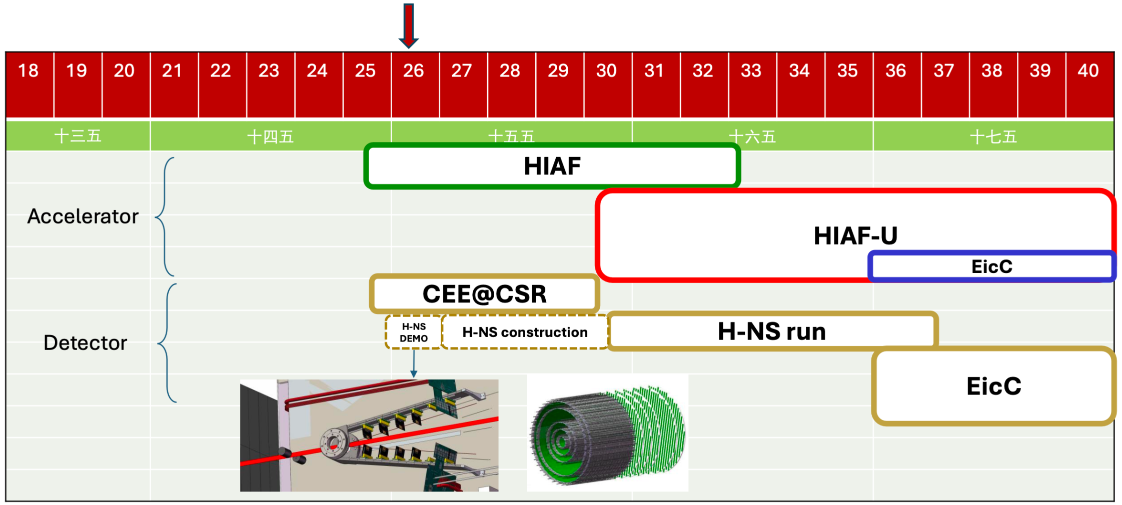
PID:
- K, π separation (~3σ) up to 2 GeV/c .
- K, p separation (~3σ) up to 5 GeV/c

Vertex resolution:
- Excellent vertex resolution for background suppression
- Low Material budget (<10%)

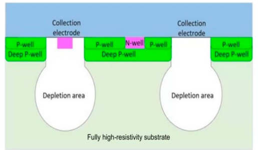
Acceptance:
- 5 to 100 degree

High event rate
- 100MHz

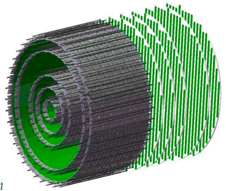
Timeline



Silicon tracker at H-NS



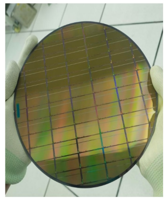
MIC6 development at CCNU



MIC6 MAPS pixel chip: development and manufacture with the domestic process

Readout electronics (ITS2 based design) **and DAQ** (ALICE CRU/FELIX protocol, GBTx, …)

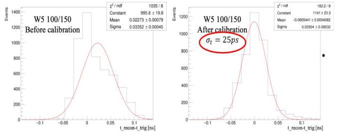
Detector assembly and integration:
- **Vertex detector:** Stave module design (spatial resolution: ~ 5 μm with pixel size 30 μm, total material < 0.35%X/X_0 per layer)
- **Forward tracker:** Ladder module aligned to disc super-module (spatial resolution: ~ 5 μm with pixel size 30 μm, total material < 0.45%X/X_0 per layer)

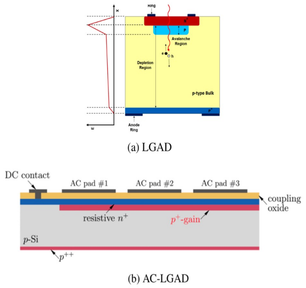


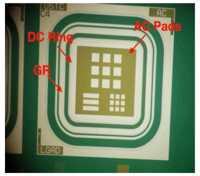
10

AC-LGAD at H-NS

- Low Gain Avalanche Diode (LGAD):
  - A p+ doped layer (commonly called gain layer) is implanted near the PN junction
  - Low fill factor with finer granularity
- AC-LGAD:
  - The gain layer is not segmented and a dielectric layer is deposited between the gain layer and segmented electrodes
  - Simultaneously good spatial and temporal resolutions
- Recent development from USTC:
  - Two wafers with different n^+ dose: W5 high n^+ dose and W6 low n^+ dose.
  - Sensor size : 1300×1300×50 μm.
  - Sensor with different pad-pitch size: Large pad size/pitch: 100/150 μm, Small pad (Strip) size/pitch: 50/75 μm.

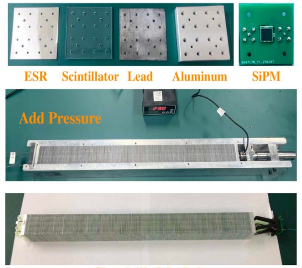






11

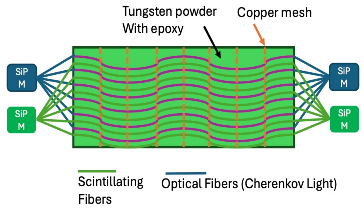
The Endcap Calorimeter at H-NS



Shashlik Module

Prototype of Calorimeter

Dual read-out: better hadron shower resolution, PID capability



- R&D for calorimeter technology
- Hybrid design for the end-cap ECAL:
  - PbWO4 with high granularity for the central part,
  - Lead glass with cost-effective for the outer part

12

ASHIPH Detector for PID 王小龙 （FDU）

ASHIPH: Aerogel-SHIfter-PHotomultiplier

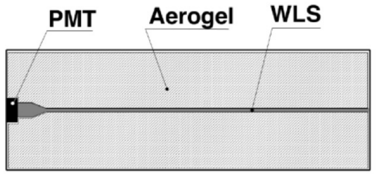


Figure 1.1: Operating principle of the ASHIPH counter.

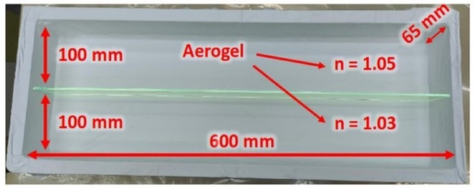


Figure 1.5: The ASHIPH counter prototype.

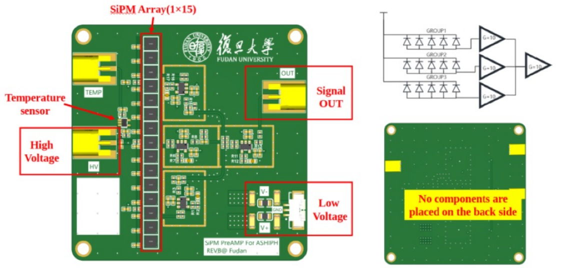
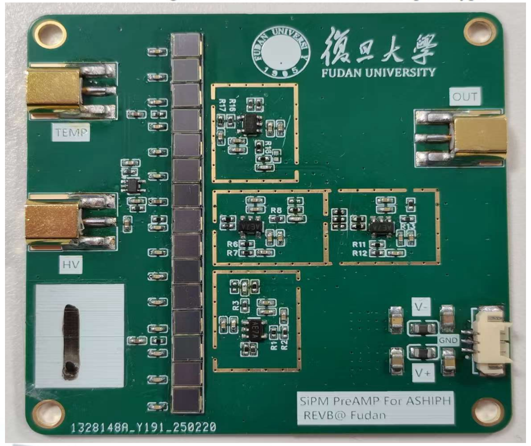
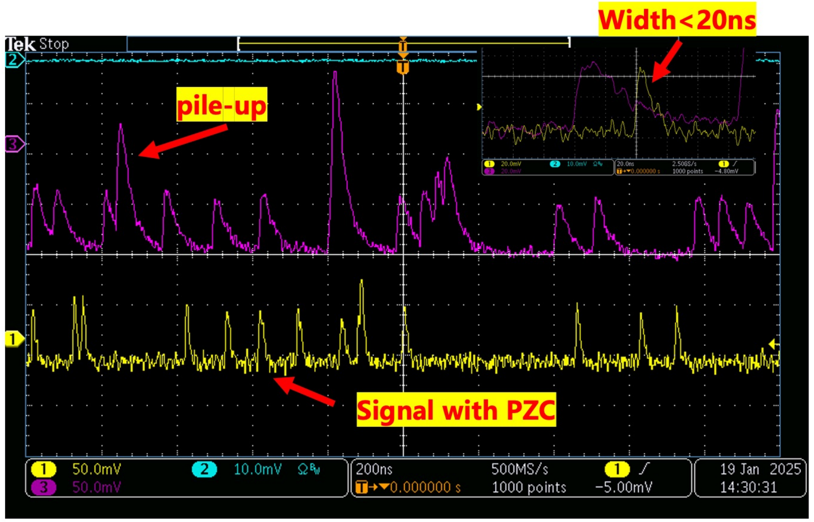
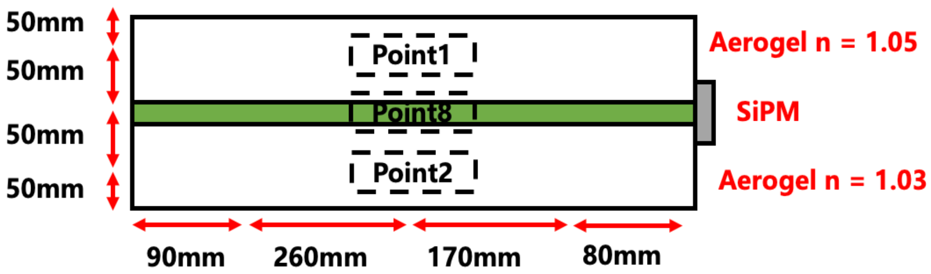
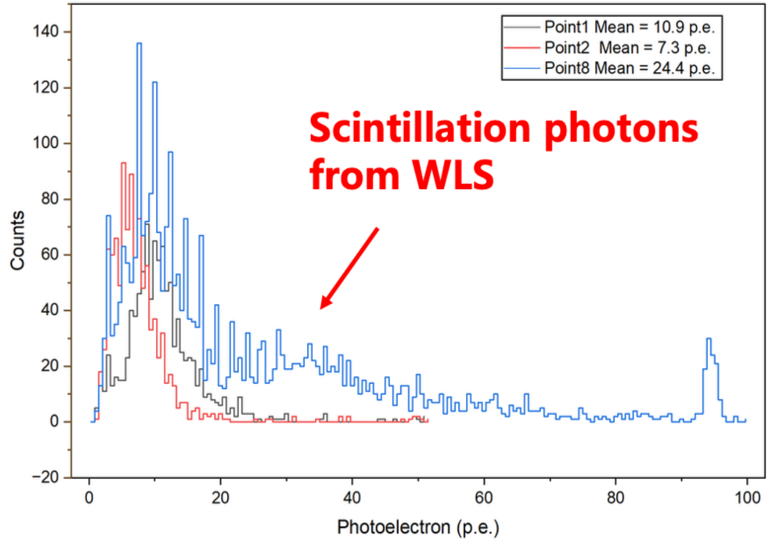


Figure 1.6: The PCB assembly featuring the SiPM linear array and the preamplifier circuit.









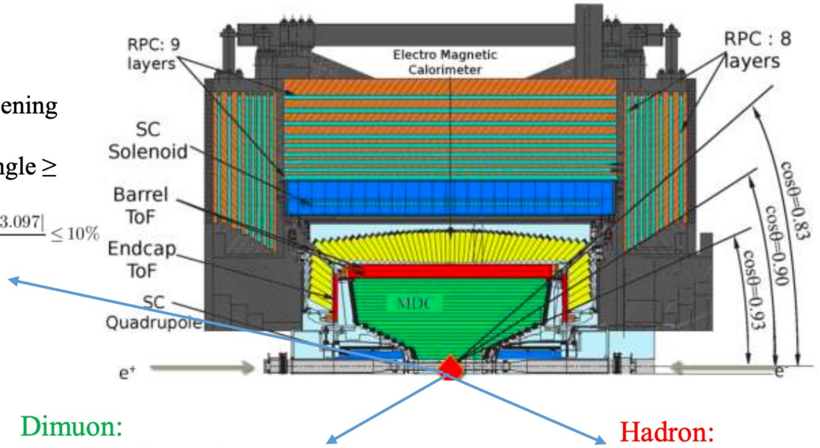
可以考虑WLS提供的TOF信息

Suppress background using ML in BESIII trigger 张瀚林 （IHEP）

- BEPCII计划升级到crab waist方案，低质心能量下亮度提高10倍
  - 触发系统需要全面升级

The traditional method focused on : **Hadron**, **Bhabha**, **Dimuon**
The data other than these three categories are tag as **Beam Background**

Bhabha:
EMC Cluster Opening angle > 166°
MDC opening angle ≥ 175°
$\frac{|E_{emc}(e^+)+E_{emc}(e^-)-3.097|}{3.097} \le 10\%$



Dimuon:
MDC Opening angle > 178°
(E/c, P_x, P_y, P_z) Limit the scope
P < 2 GeV/c, E < 0.7 GeV

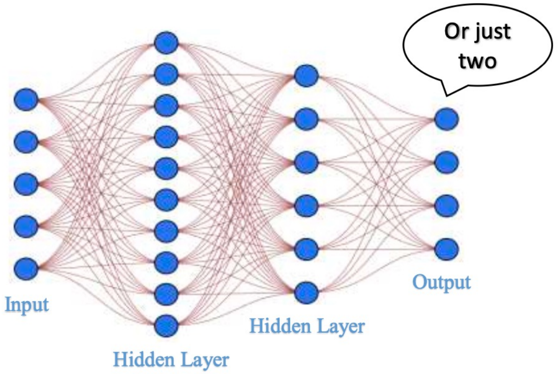
Hadron:
Two or more good Tracks
MDC Opening Angle < 170°

Our model is a feed-forward dense neural network with two hidden layers. (For FPGA!)

Supervised Learning

Inputs
- 48 Trigger Conditions

Hidden
- 64 Nodes per Layer
- Two hidden layers
- Dynamic Learning Rate Adjustment



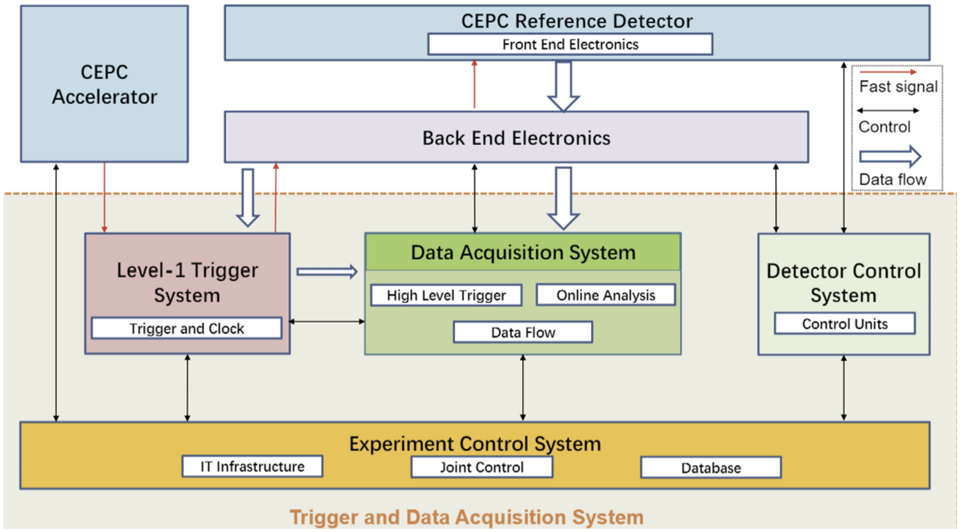
Outputs
- Prediction results of binary classification or four-class classification

Threshold
- Which let the TPR matches the traditional method

	Binary Classification	Four-class Classification
MDC&TOF only	20.86%	21.79%
EMC only	31.26%	26.40%

CEPC TDAQ研究进展 李飞 （IHEP）

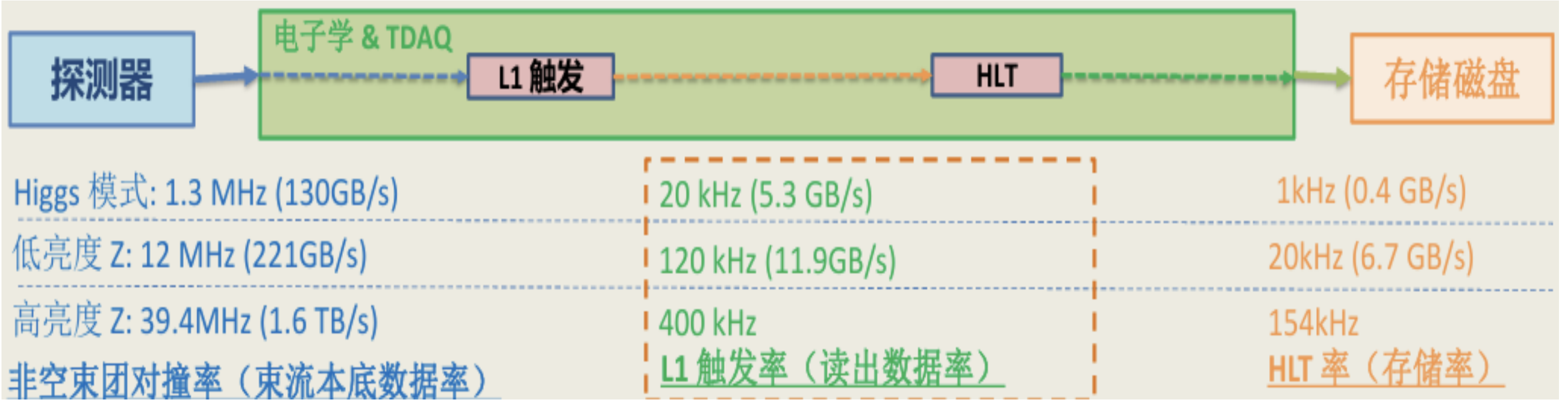
- TDAQ方案：
  - 一级硬件触发（L1）+高级触发（HLT）
  - 提供常规触发和快速触发
  - 联合控制与监测
  - 统一在线服务和IT基础设施
- 硬件触发结构设计：量能器+muon为默认方案，径迹探测器为可选



➢ 触发效率高、本底抑制效率好

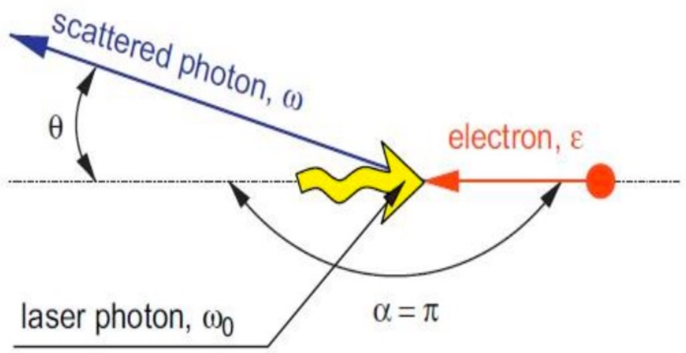
Higgs mode	Efficiency(%)	Z mode	Efficiency(%)
Higgs production	>99.9	$q\bar{q}$	>99.9
$q\bar{q}$	>99.9	$\mu^+\mu^-$	>99.9
$\mu^+\mu^-$	99.8	$\tau^+\tau^-$	>99.9
$\tau^+\tau^-$	99.6	Bhabha	>99.9
Bhabha	99.9		
Di-photon processes		**Di-photon processes**	
Di-photon event rate	**Efficiency(%)**	**Di-photon event rate**	**Efficiency(%)**
9.1 kHz	40.3	Low Lumi: 18.5 kHz	42.9
Beam Background		**Beam Background**	
Background event rate	**Veto efficiency(%)**	**Background event rate**	**Veto efficiency(%)**
11.4 kHz	99.2	Low Lumi: 90.0 kHz	99.3
Total		**Total**	
20.6 kHz		Low Lumi: 118.9 kHz	

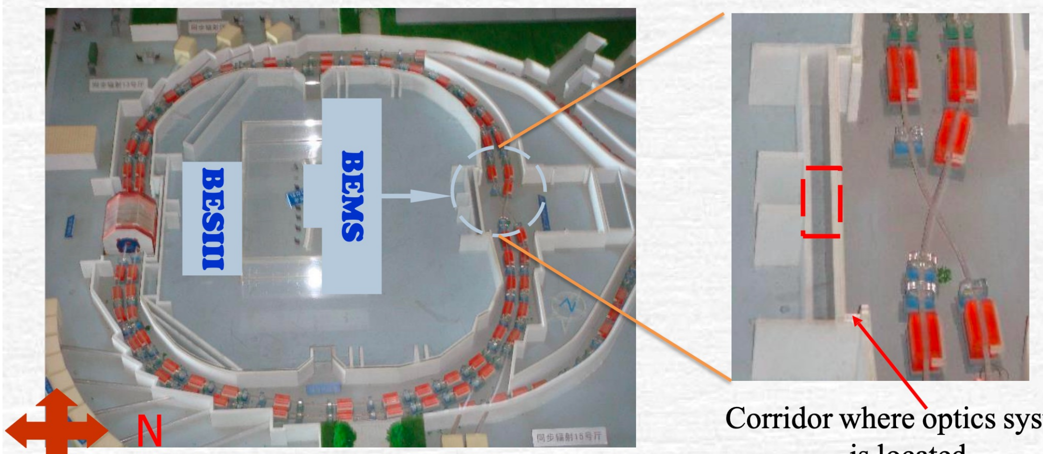
➢ 估算3种工作模式下的L1、HLT触发率和数据率



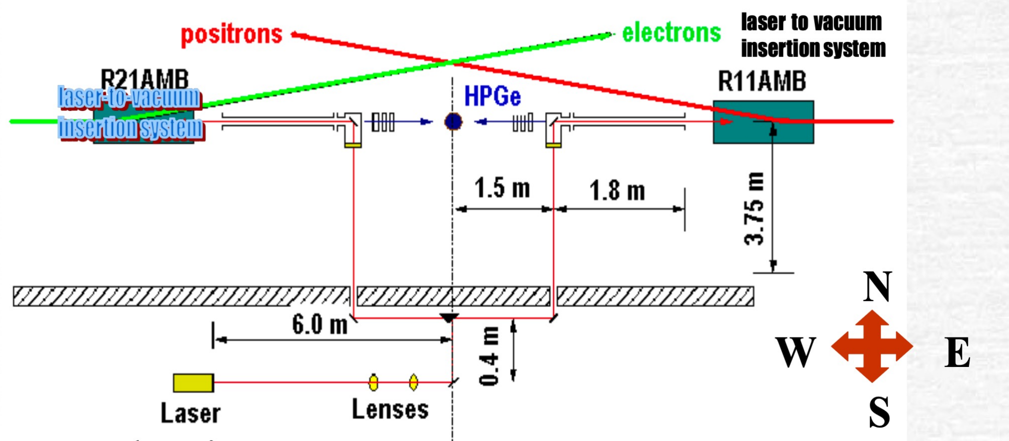
BEPCII上束流能量测量系统（BEMS）　张建勇（IHEP）

- 精确测量束流能量对加速器和北京谱仪都有重要的意义
- 对于共振态质量测量，特别是陶轻子的质量测量，能量不确定度是改善其测量精度的瓶颈
- 目标：束流能量1-2GeV，相对精度 5×10^{-5}



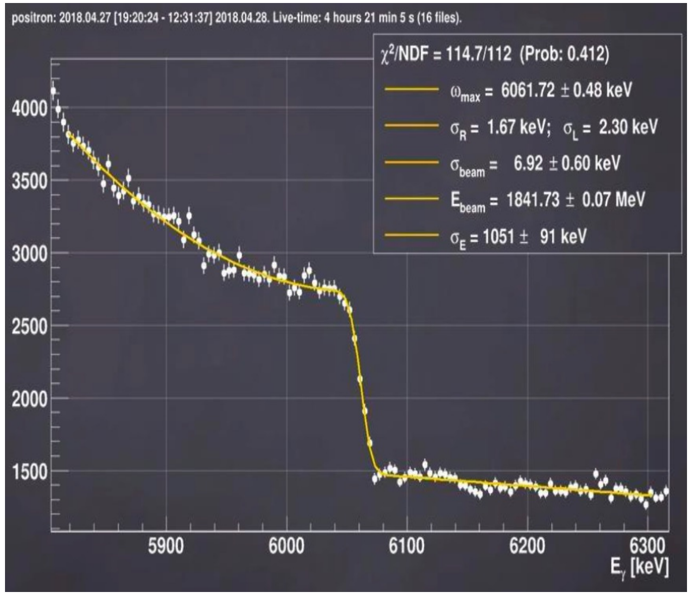


Corridor where optics system is located



Laser and optics system　Laser to beam interaction system

HPGe detection system　Data acquisition system



正电子

测量的相对误差

实测结果: 3.55×10^{-5}

设计指标: 5×10^{-5}

$$E_{edge} = 6220.999 \pm 0.441\ \text{keV}$$
$$\sigma_{E_{edge}} = 6.15 \pm 0.72\ \text{keV}$$
$$E_{beam} = 1887.065 \pm 0.067\ \text{MeV}$$
$$\sigma_{E_{beam}} = 932.1 \pm 109.3\ \text{keV}$$

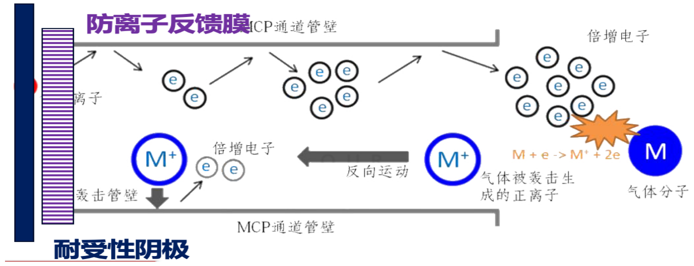
MCP-PMT的研究进展 李奎念（西安光学精密机械研究所）

- MCP-PMT寿命定量化控制
- 高信噪比门控选通
- 饱和特性及饱和恢复

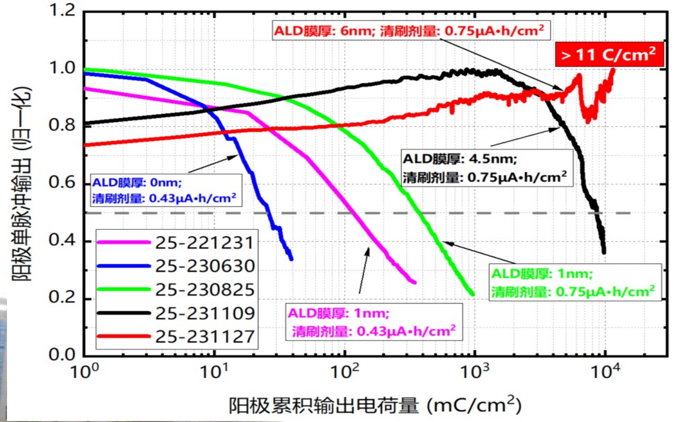
寿命短是MCP-PMT的一大短板

◆ 主要原因：
- MCP正离子反馈导致阴极性能下降

◆ 提高寿命的主要思路：
- 抑制正离子产生及迁移
- 提高阴极的耐受性

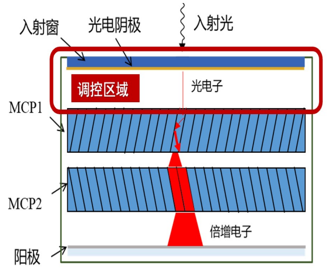


ALD膜层厚度对寿命的影响

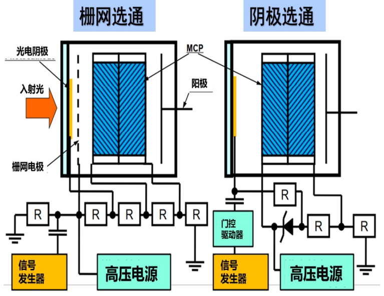


门控选通的思路

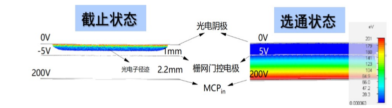
利用外加电场，控制阴极发射的光电子是否入射到MCP上，实现MCP-PMT的选通控制。



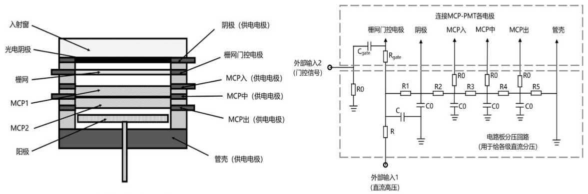
具体实现方式



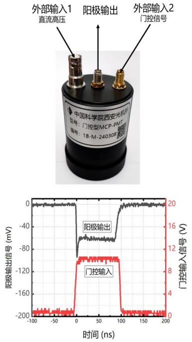
- ☐ 采用三电极MCP供电，设置限流电阻和隔直电容，实现直流高压供电和门控选通信号馈入
- ☐ 引出管壳电极，内部封装电路连接，外部设置“直流高压”、“门控信号”两个输入端口



MCP三电极直流供电



直流供电设置限流电阻，选通馈入设置隔直电容

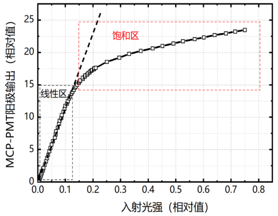


输出饱和的定义：

- ☐ 随入射光强的增大，阳极输出偏离线性，偏离线性超过10%时，称为输出饱和

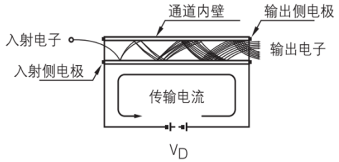
输出饱和的原因：

- ☐ MCP末端聚集大量电子，形成反向局部电场，抑制后续电子倍增
- ☐ 外部电路不能及时补充微通道内壁消耗的二次电子



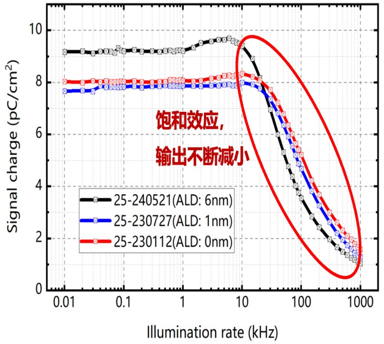
饱和模式分类：

- ☐ 单次脉冲饱和：单脉冲输出电荷量受限于通道末端的空间电荷效应
- ☐ 高重频饱和：通道壁电子的消耗速率超过补充速率

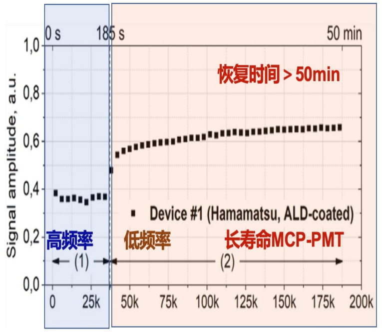


◆ ALD技术可以大幅提升MCP-PMT的寿命，但ALD-MCP在高重频饱和后，恢复时间需数小时

◆ 需进一步厘清基于ALD-MCP的长寿命MCP-PMT的高重频饱和和恢复作用机制



随入射光频率的增加，单脉冲输出减小



长寿命MCP-PMT饱和后，恢复时间长（数小时）

高频率下器件失效

总结

- 探测器分会：12个邀请报告，17个STCF进展报告
- 感谢议程委员会、主持人、报告人和志愿者
- 感谢大家的积极讨论

总结

- 探测器分会：12个邀请报告，17个STCF进展报告
- 感谢议程委员会、主持人、报告人和志愿者
- 感谢大家的积极讨论

谢谢！