

大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级 项目中中期总结报告

课题一：CMS高粒度量能器和一级触发升级

（高能物理研究所，清华大学）

报告人：赵京周

中国科学院高能物理研究所-2025年6月26日

提纲

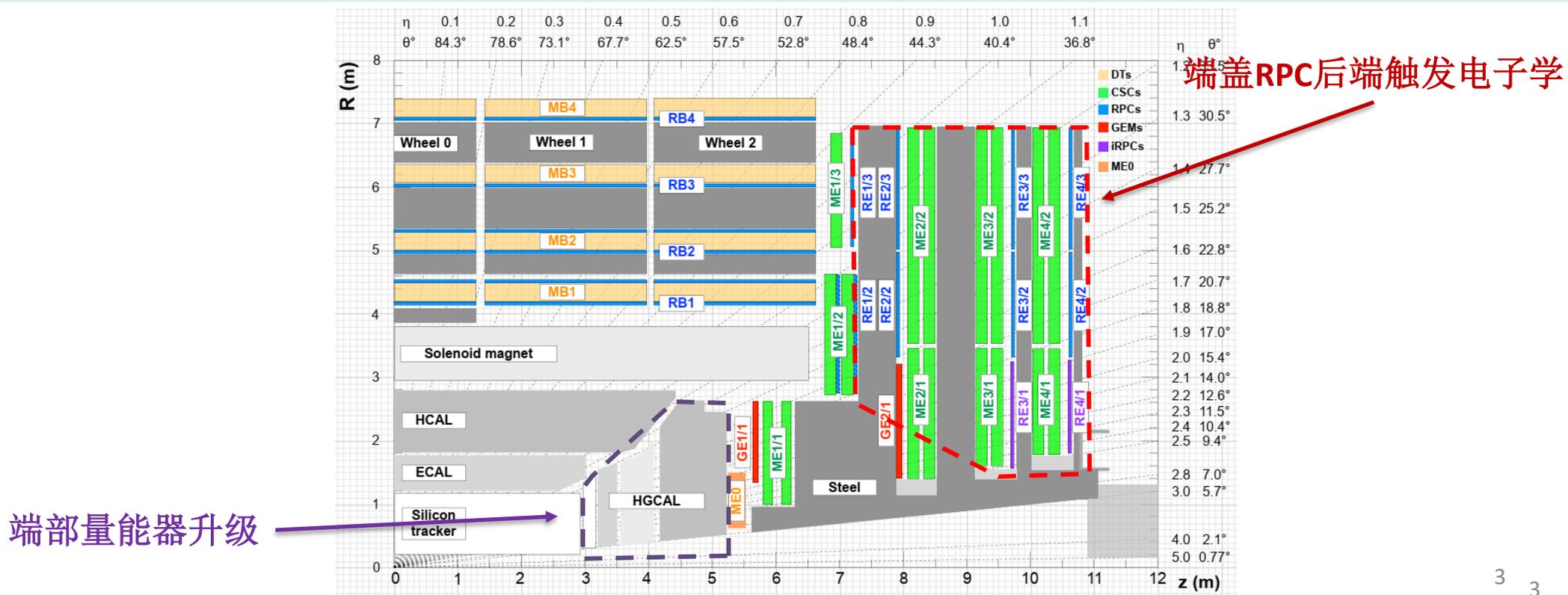
- 课题介绍
 - 课题目标及验收指标
- 课题已取得的突出进展
 - HGCal
 - 一级触发升级
- 资金到位和执行、文章发表、学生培养情况
- 存在的主要问题
- 总结

课题一介绍

LHC 亮度将达到 5×10^{34} Hz/cm² (pileup ~140), 甚至至 7.5×10^{34} Hz/cm² (pileup~200), 事例率及事例堆积将增加。为了提升探测器的能力, CMS对探测器和电子学进行升级。

课题一: CMS高粒度量能器和一级触发升级 (中国科学院高能物理研究所、清华大学)

- CMS高粒度量能器子课题 (中国科学院高能物理研究所、清华大学)
- CMS一级触发升级子课题 (中国科学院高能物理研究所)



课题目标及验收指标

课题目标:

建立高粒度量能器硅模块中心，研究百平方米量级硅探测器模块的制作工艺，掌握高粒度量能器关键的制作技术，完成160块以上8寸硅模块的批量建造（约3.2平米）；

参与CMS一级触发电子学板的设计和一部分生产工作；基于触发电子学板搭建端盖RPC后端触发电子学量产样机系统，并进行数据读出及簇查找算法的开发。

验收指标:

指标1: 高粒度量能器硅模块 160块硅模块

指标2: 高粒度量能器硅模块精度控制 X-Y方向好于200微米

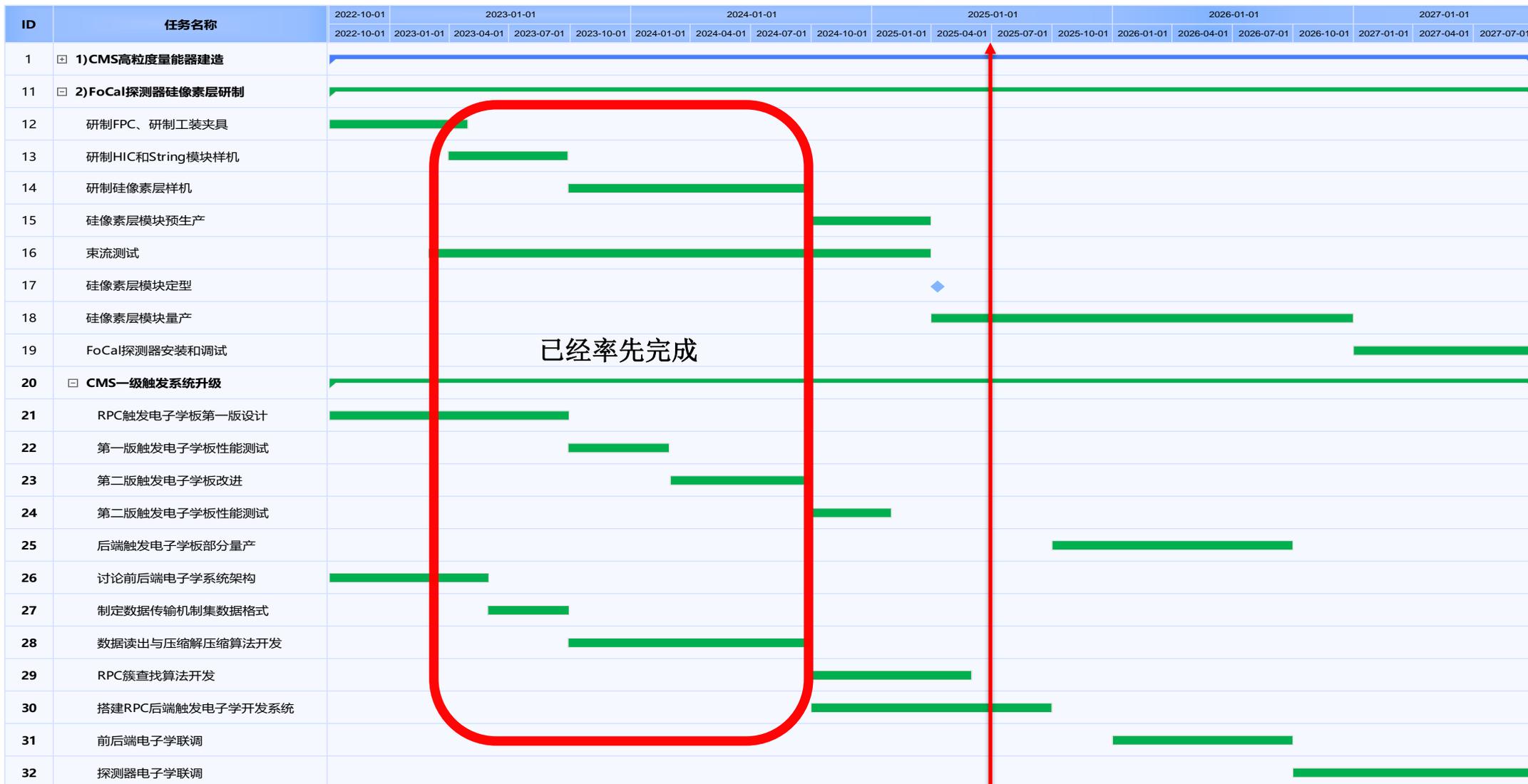
指标3: 高速数据传输速率 单通道 \geq 16Gbps

课题目标、预期成果与考核指标表

课题目标 ¹	预期成果		考核指标 ²			考核方式(方法)及评价手段 ⁴	
	预期成果名称	预期成果类型	指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态 ³		完成时指标值/状态
(限500字以内。)建立高粒度量能器硅模块中心，研究百平方米量级硅探测器模块的制作工艺，掌握高粒度量能器关键的制作技术，完成160块以上8寸硅模块的批量建造(约3.2平米)；进行端盖RPC后端触发电子学系统的设计。参与CMS一级触发电子学板的设计和一部分生产工作，并基	主要成果	1 CMS高粒度量能器系统	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input type="checkbox"/> 新技术 <input type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input checked="" type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 临床指南/规范 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 发明专利 <input type="checkbox"/> 其他_____	0	5块硅模块原型机	160块硅模块	CMS合作组检验合格
			指标1.2: 高粒度量能器硅模块精度控制	无	X-Y方向精度好于200微米	X-Y方向精度好于100微米	实验测试
于触发电子学板搭建端盖RPC后端触发电子学量产样机系统，并进行数据读出及簇查找算法的开发。发表文章1篇，培养研究生2-4名。	2	CMS端盖RPC后端触发电子学系统	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input type="checkbox"/> 新技术 <input type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input checked="" type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 临床指南/规范 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 发明专利 <input type="checkbox"/> 其他_____	单通道速率达到10Gbps(MTCA原理样机)	完成数据读出及压缩解压原理验证	单通道 \geq 16Gbps	实验测试
科技报告考核指标	序号	报告类型 ⁵	数量	提交时间		公开类别及时限 ⁶	
	1	年度科技报告	5	项目执行年度		延期5年公开	
	2	中期科技报告	1	项目中期		延期5年公开	
	3	结题科技报告	1	项目结题		延期5年公开	
其他目标与考核指标							

课题总体进度

课题按照计划进展顺利

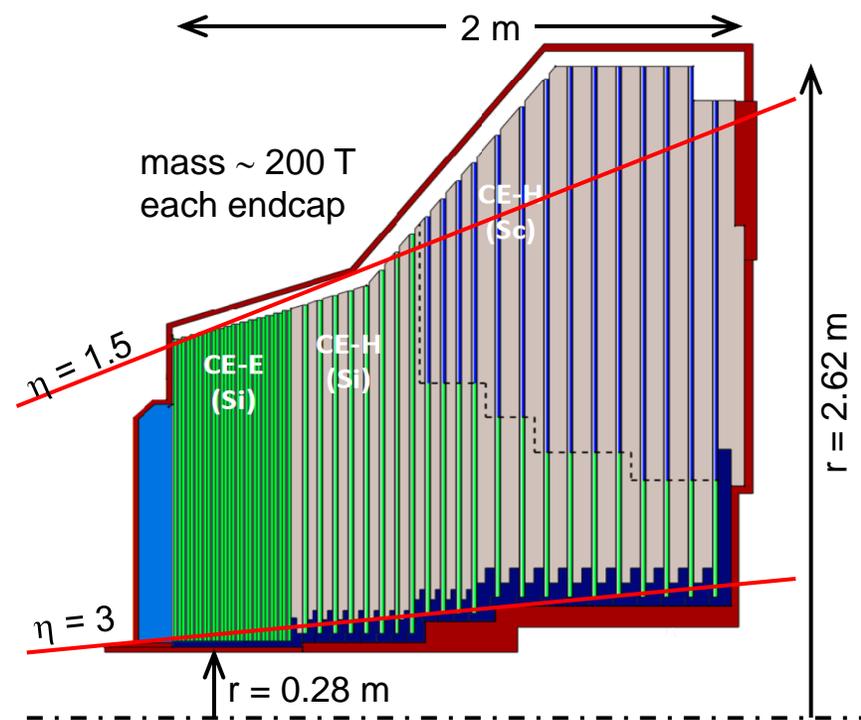
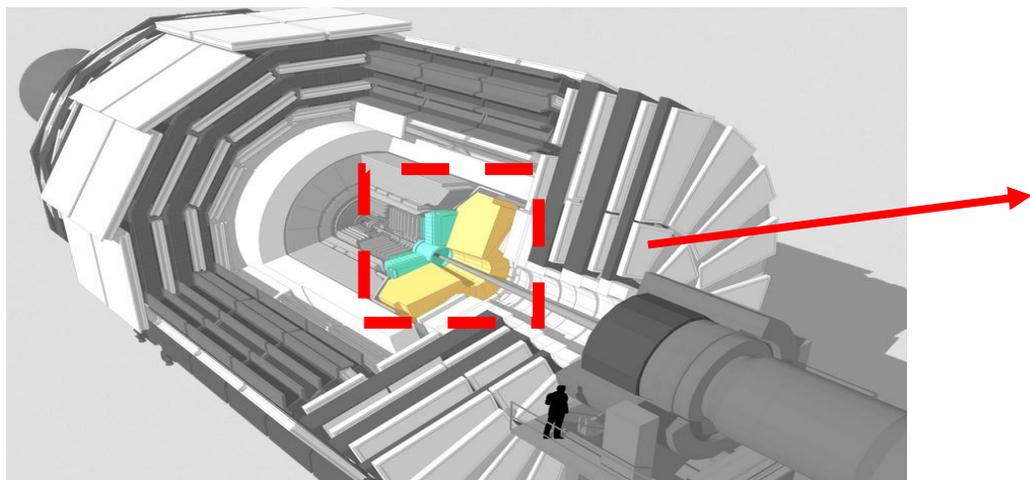


CMS高粒度量能器 (HGCal)

□ 关键指标:

- HGCal covers $1.5 < |\eta| < 3.0$
- 工作环境温度 -30°C
- **$\sim 620\text{m}^2$ 硅传感器**
- $\sim 370\text{m}^2$ 闪烁体
- 6M 道读出通道, 像素大小 ~ 0.5 or 1.1 cm^2
- **~ 26000 硅模块**
- 功率: $\sim 110\text{ kW}$ /一个端盖

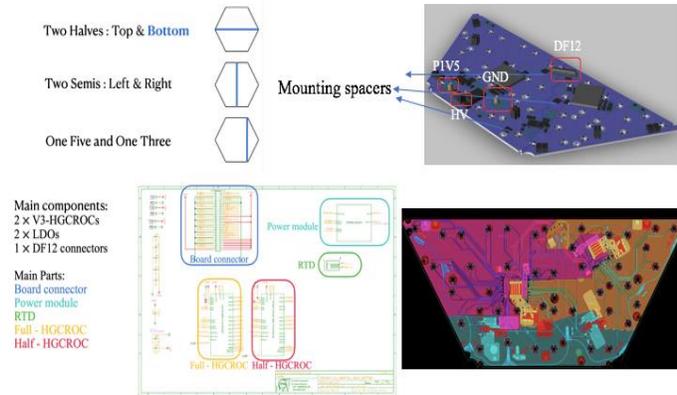
首次在大型实验上应用HGCal



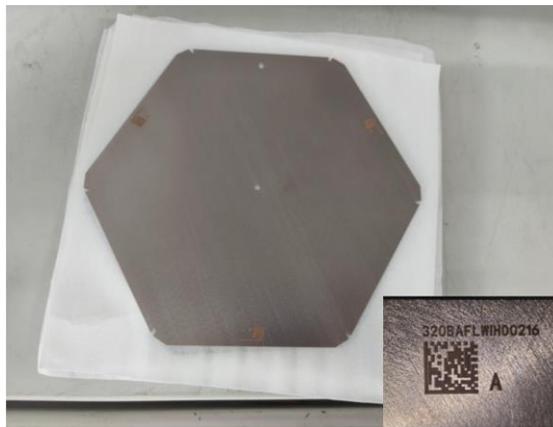
端盖电磁量能器部分(CE-E): Si, Cu & CuW & Pb absorbers, 26 层, $25.5 X_0$ & $\sim 1.3\lambda$
强子量能器部分(CE-H): 硅+闪烁体, steel absorbers, 21层, $\sim 8.5\lambda$

CMS中国组承担的任务

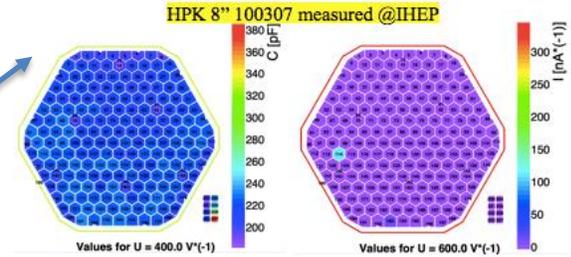
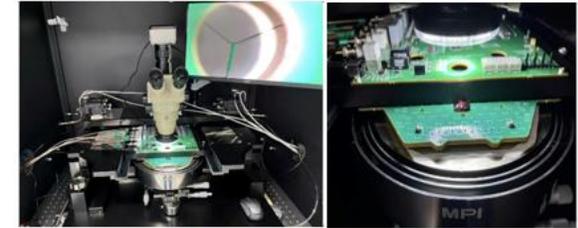
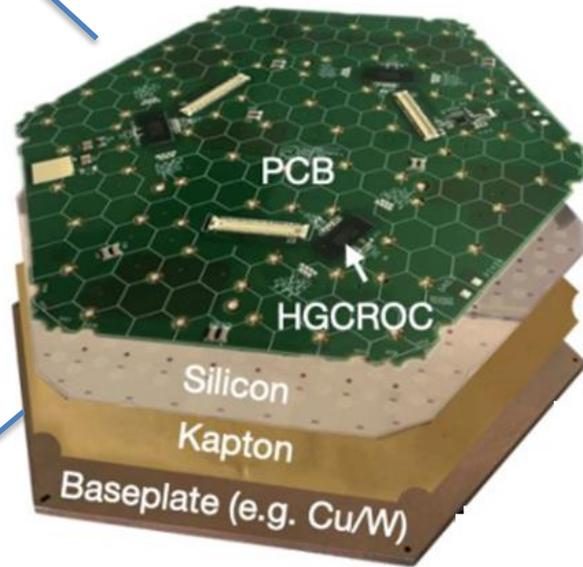
硅传感器的质量控制 (SQC)



部分前端电子学设计
(已完成, 浙江大学)



在国内生产钨铜合金底板+Kapton



合作单位: 高能所, 清华, 浙大, 复旦, 南京师范大学

- 高能所组装中心大约承担 1/5 (~5000 块) 低密度HGCal硅模块的生产任务
- 生产~100 m²硅探测器

HGCaI 部分进展情况

- 由于LHC整个LS3推迟了~6个月，同时LS3延长了1年，整个硅模块量产推迟了~1年
 - 自立项以来，高能所生产了50余块全功能原型硅模块，数量和质量处于6个硅模块中心前列
 - 不影响项目计划中~160块模块生产任务的按时完成
- 钨铜合金底板
 - 原计划仅仅包含中国硅模块中心所需CuW底板
 - CERN 通过k-contract的形式将我们的投入翻倍 ==> 约90%CuW的采购

HGCal 硅模块组装中心 (MAC)



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
COMPACT MUON SOLENOID COLLABORATION
URL: <http://cms.cern>



Dr. Karl Gill
CMS HGCal Project Manager
Principal Applied Physicist
CERN - EP Department
CH - 1211 GENEVA 23
Switzerland
Tel: +41 75 41 41 4712
E-mail: Karl.Aaron.Gill@cern.ch

December 15, 2021

Subject: Certification of qualification the HGCal Module Assembly Centre at IHEP, Beijing

To whom it may concern,

I am writing as Project Manager for the CMS endcap calorimeter upgrade project (HGCal) to certify that the silicon module assembly center (MAC) at IHEP Beijing, led by Prof. Huaqiao Zhang, has been qualified for the HGCal project as ready to move into the Pre-Series phase of construction.

HGCal will replace several of the present CMS sub-detectors: the silicon/lead endcap pre-shower detector, the lead-tungstate crystal electromagnetic endcap calorimeter, and the plastic/brass endcap hadron calorimeter. HGCal is a novel sampling calorimeter, based on a large-scale deployment of silicon modules (a grand total of approximately 26000 installed, plus 5% spares), positioned between dense layers of absorber. The silicon modules will be complemented with plastic scintillator tiles instrumented with silicon photomultipliers (SiPMs) in regions of the detector where particles arrive with lower intensity.

The qualification of the IHEP Beijing MAC has been completed on time to meet the corresponding project milestone. The MAC is set up in a Class 1000 clean room that is dedicated to this facility and all of the equipment for mass production of silicon modules for HGCal has been installed in the clean room and commissioned. This equipment includes a gantry machine for automated module assembly, a wire-bonding machine, an optical inspection and coordination measurement machine, and a silicon module test-stand. The IHEP Beijing team has been trained in how to use the MAC equipment, and they have practiced extensively on dummy module components before moving onto using live components.

Fully functional prototype silicon modules have been assembled successfully in the IHEP Beijing MAC (in June and September 2021), using the latest prototype parts available, which included 8-inch silicon sensors developed together with Hamamatsu, custom circuit boards ("hexaboards") developed at CERN, and custom ASICs (HCRCOCv2 and v3) developed by Omega group (IN2P3, France). The modules assembled at IHEP Beijing were then sent to CERN and have been used successfully in HGCal system tests, including particle beam tests at CERN, in the autumn of 2021.

This certification of the qualification of the IHEP Beijing MAC means that the MAC is now ready for the next step of assembling final prototype pre-series modules. The pre-series exercises should result in several hundred working modules (total from all MACs), which will be used for the integration of larger prototype assemblies ('cassettes') of the HGCal detector. The pre-series phase will exercise all the handling, the tooling, and the QA/QC procedures associated with large scale module assembly and testing. It will also permit a deep study and characterization of the robustness of the pre-series modules with large statistics.

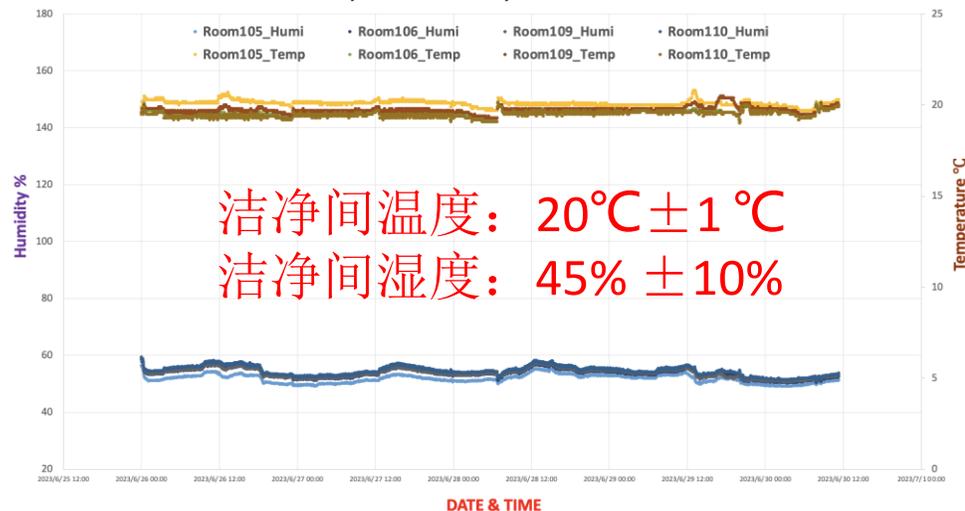
We plan to start the pre-series assembly in 2022, once the component parts are all available, and beyond the pre-series, we look forward to ramping up the IHEP Beijing MAC for full-scale mass production.

Yours faithfully,

Karl A. Gill
CMS HGCal Project Manager

IHEP MAC认证信

Temperature & Humidity from June 26 to 30



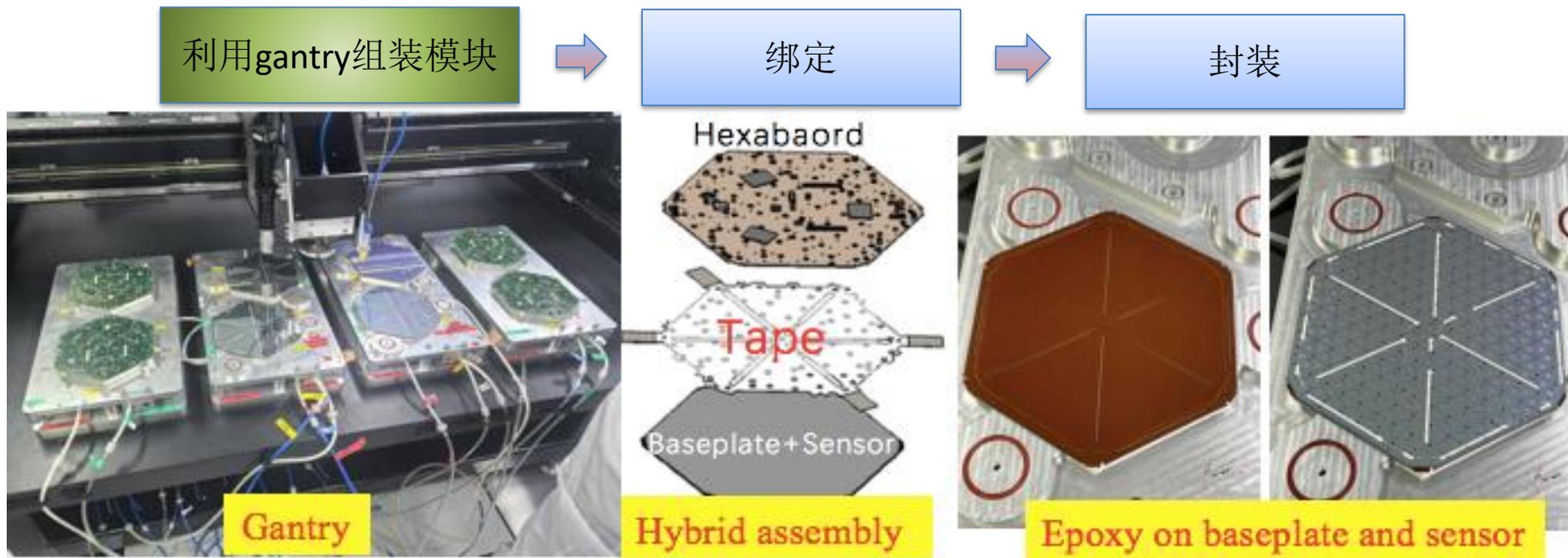
洁净间温度: $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
洁净间湿度: $45\% \pm 10\%$

洁净间及关键设备连续稳定运行多年



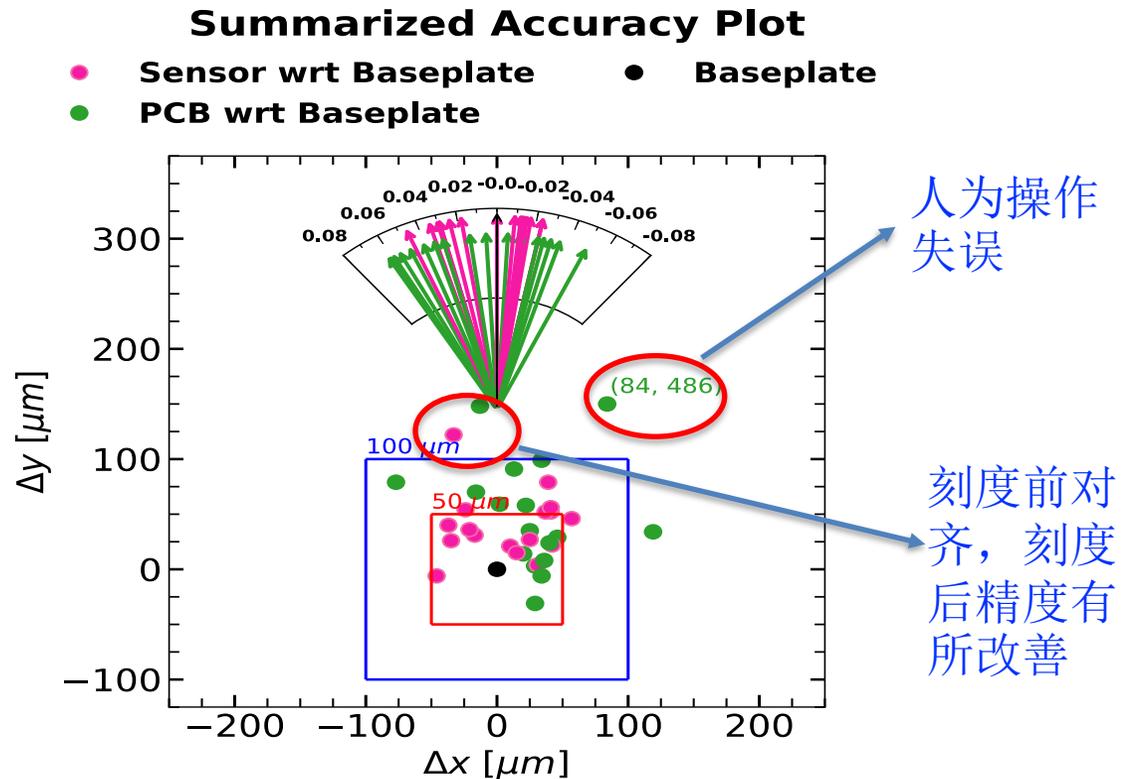
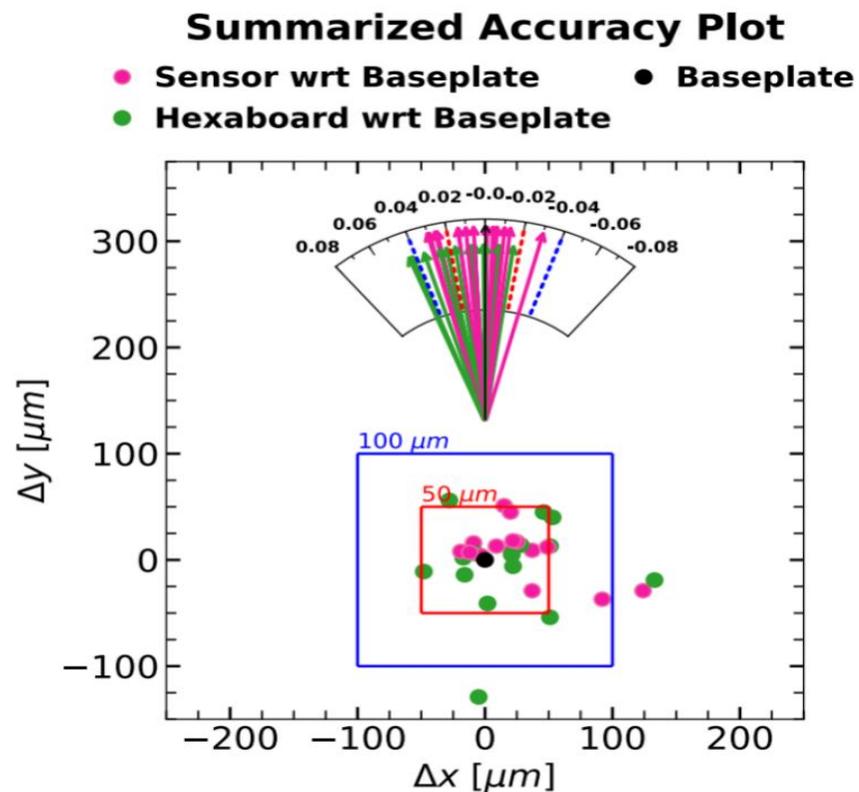
高能所MAC通过了CERN的认证, 是最早通过认证的3家单位之一

HGCa I 硅模块组装工艺的研究—组装



- ❑ 硅模块混合组装工艺
 - 双面胶 + 环氧树脂
 - 双面胶控制模块厚度，环氧树脂胶保证在高辐照下模块结构稳定性
 - 提高在量产过程中生产效率
- ❑ 全自动高精度组装工艺
 - 全自动点胶及高精度组装钨铜合金底板+ 硅传感器+前端电子学板
 - 利用gantry已经实现一次4个硅模块同时组装，目标16块/天

模块对齐精度



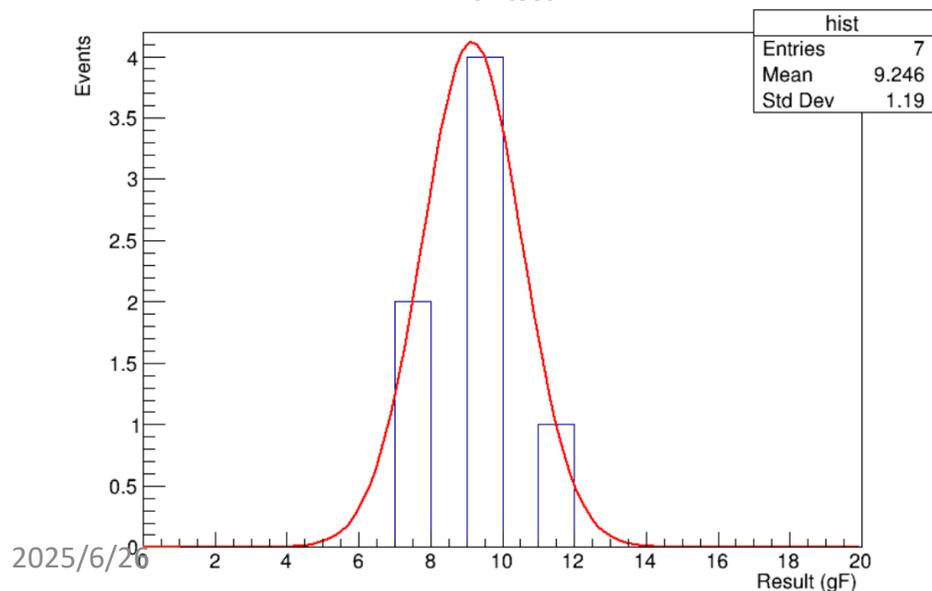
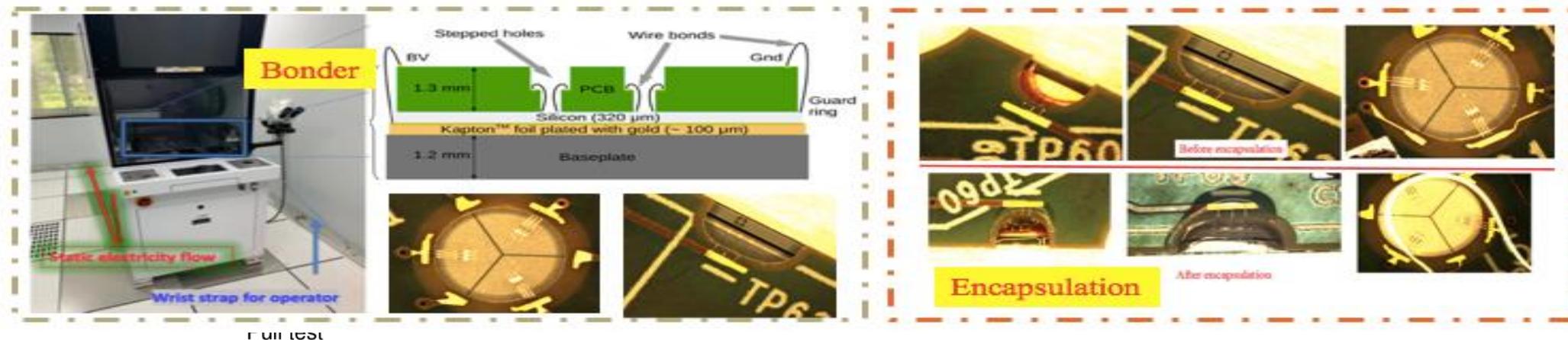
- 我们利用光学测量仪（OGP）对模块的XY方向的对齐精度进行测量
- OGP测量精度 $\sim 1\ \mu\text{m}$
- 大部分模块在XY方向的对齐精度好于 $150\ \mu\text{m}$ ，满足项目中期考核指标

HGCa I 硅模块组装工艺的研究—绑定

利用gantry组装模块

绑定

封装



- ❑ 模块组装好后要对读出，保护环及偏压进行绑定。
 - 每个LD模块~650根绑定线
- ❑ 已经实现全自动绑定
 - 量产时需要达到20分完成一个硅模块的绑定
 - 由于模块数量限制，目前最多1天完成5块
- ❑ 绑定线拉力测试结果~10 gF

HGCaI 硅模块组装工艺的研究—封装

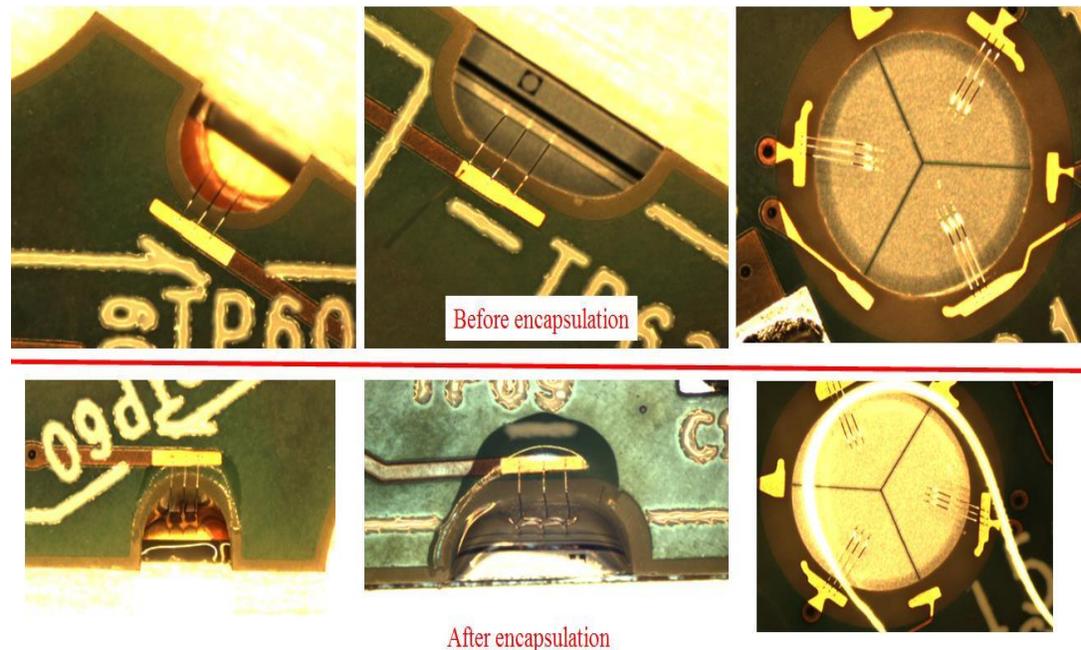
利用gantry组装模块



绑定

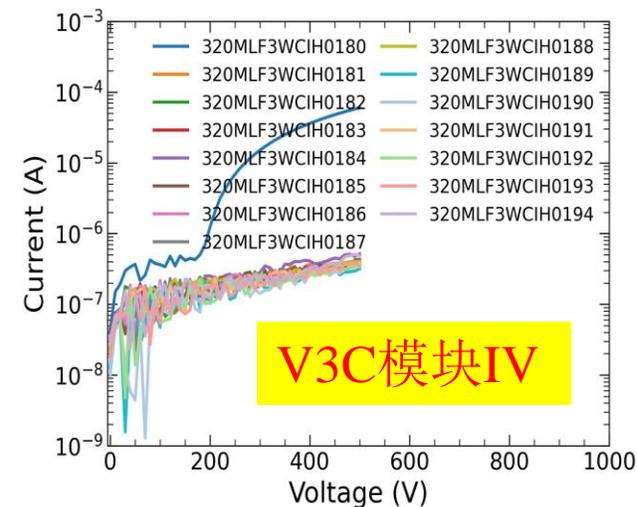
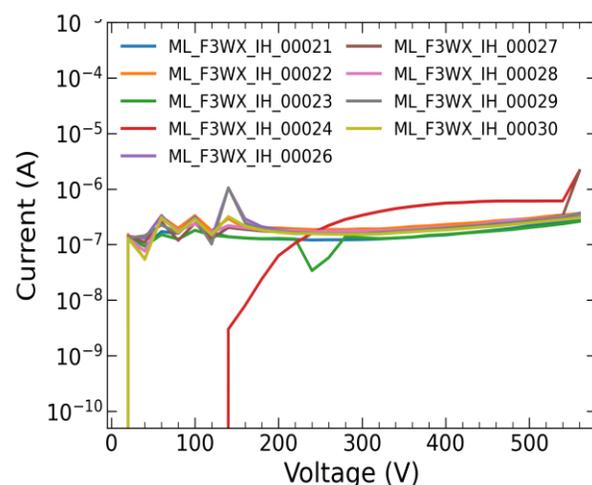
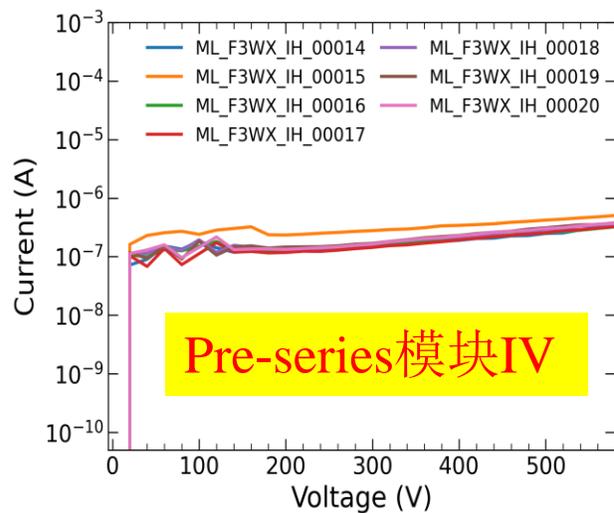
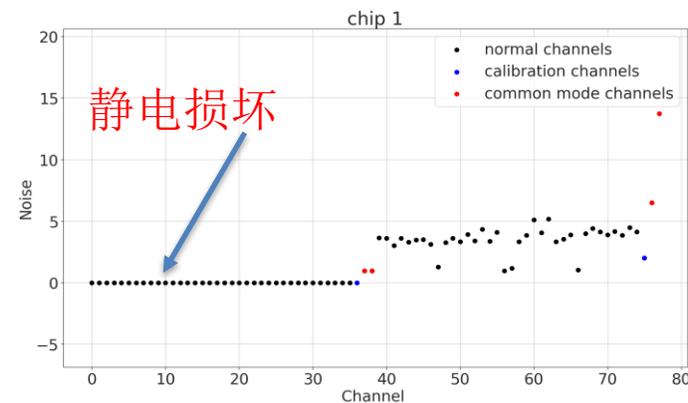
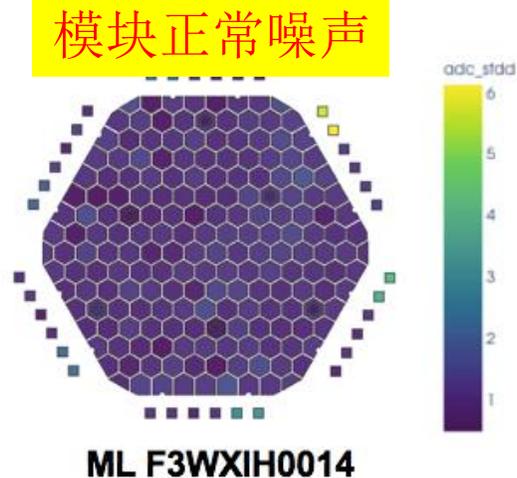
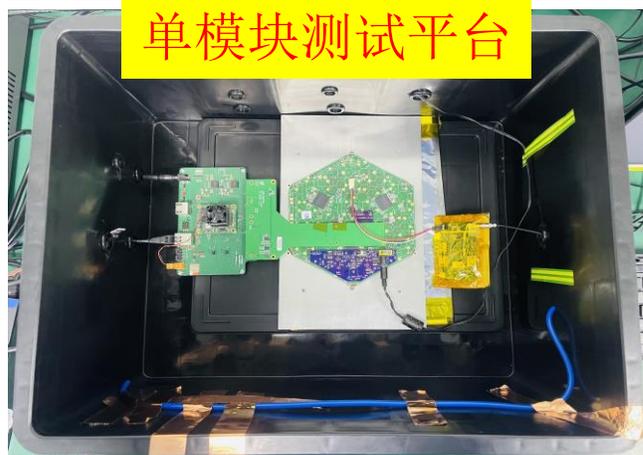


封装



- ❑ 为了保护绑定线，需要在绑定后对每一个绑定的位置进行封装
- ❑ 已经实现全自动封装流程，平均15分钟完成一个模块的封装，满足量产时生产速率的需求

模块测试 @ IHEP

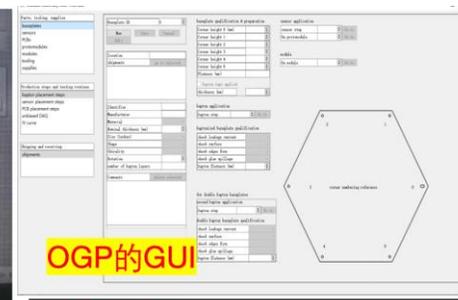
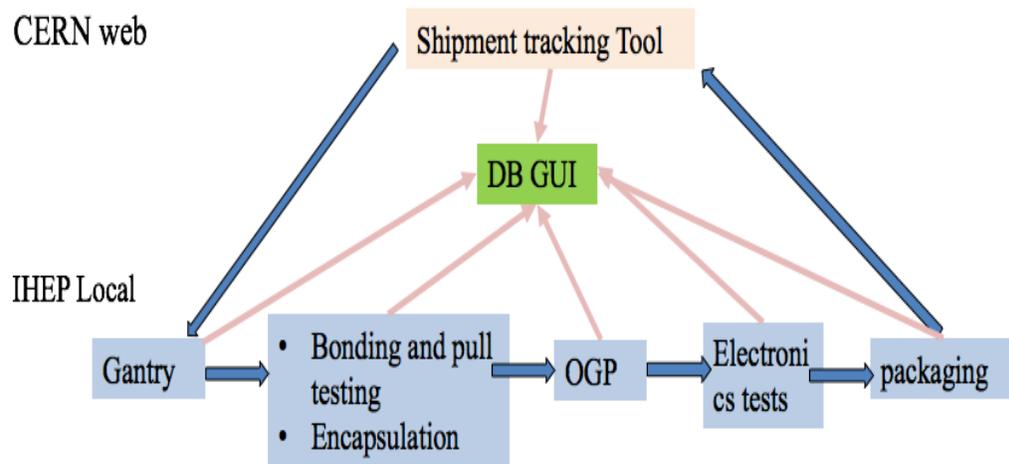


- ❑ 高能所最先发现并提出在给前端电子学板贴胶时会出现静电损坏现象。
- ❑ 通过检查实验室、设备接地，以及改进贴胶工艺，最终解决了这个问题
- ❑ 解决静电损坏后的模块电子学性能表现良好

数据库（DB）和图形化界面（GUI）

- 高能所在模块生产中已经使用并帮助完善GUI和DB的功能
 - 记录元器件的位置，分类等信息
 - 记录设备关键参数，元器件，模块，操作员等的信息

帮助保证生产时模块的质量

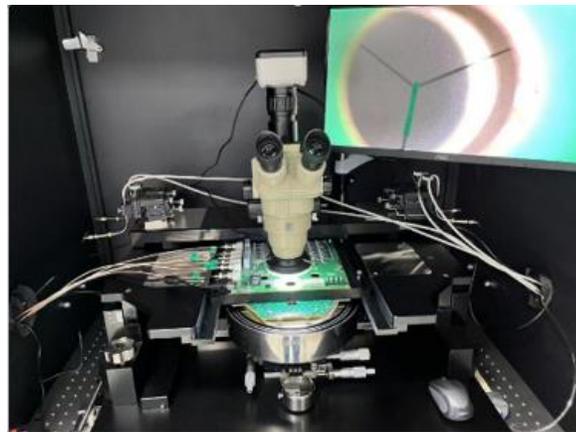


- 除了OGP，其他所有生产步骤的GUI和DB的功能和权限得到了检验
- OGP GUI正在开发中，数据暂时需要手动输入

硅传感器的质量控制

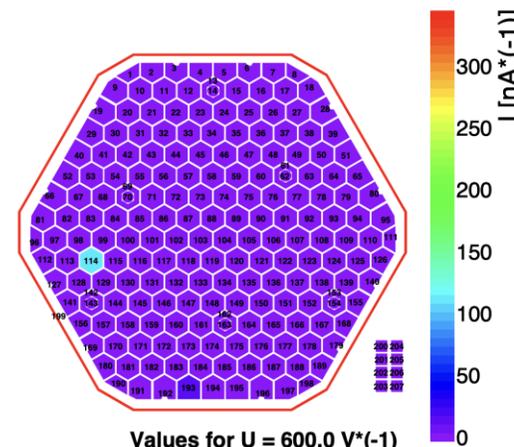
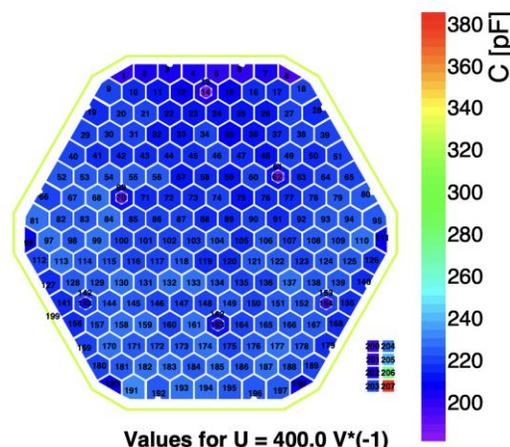
- 在高能所搭建完成一套硅传感器质量控制 (SQC) 平台
 - 在高能所首次实现对8英寸sensor的测试
 - 目前已收到100片用于量产的8英寸senior, 并且完成按照总量的5%进行抽检

大面积硅探针台



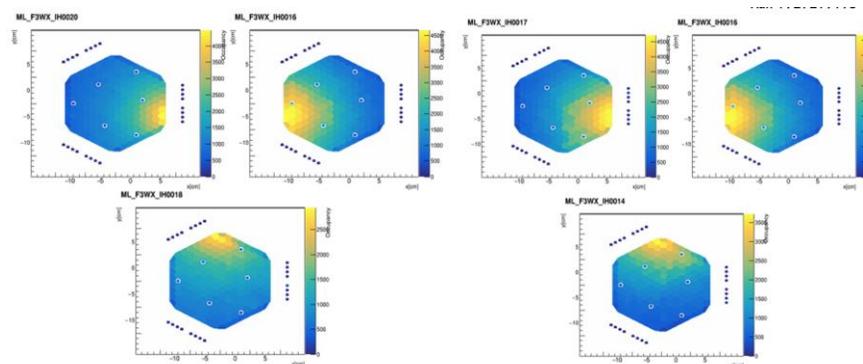
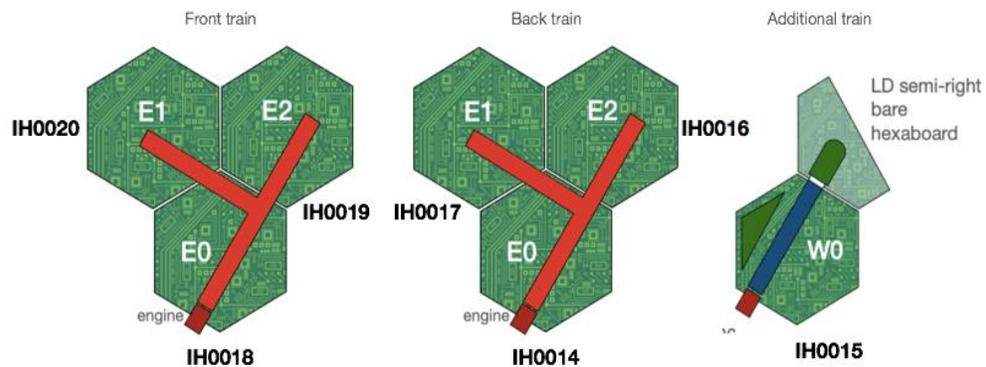
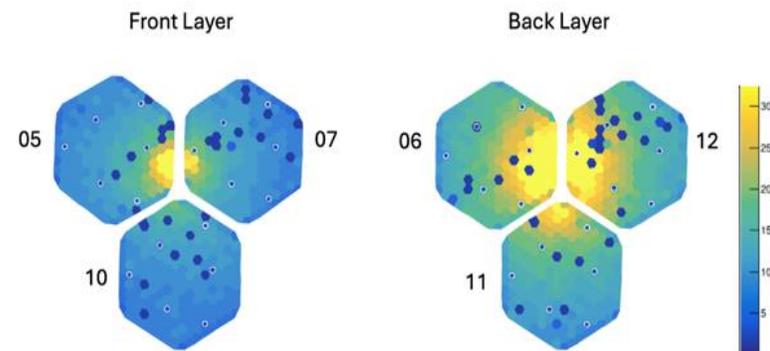
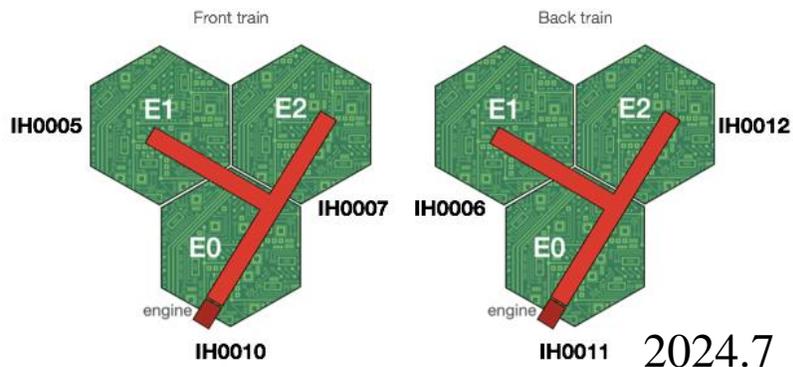
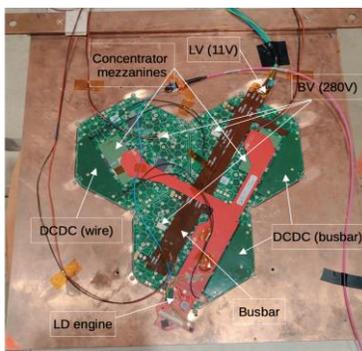
8英寸sensor

HPK 8" 100307 measured @IHEP



HGCa I 模块束流测试

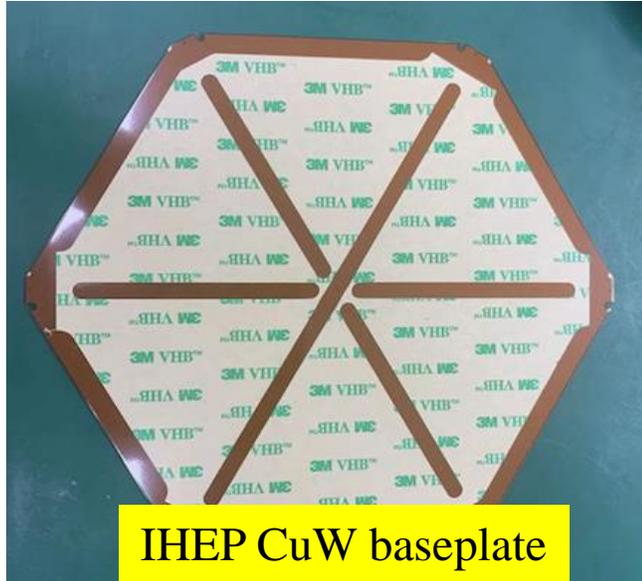
- 2024在CERN做了两次束流测试
 - ◆ 这两次束测用到的模块全部并且仅由高能所制作的模块
- 所有模块在测试中表现良好



2024.9

钨铜合金底板生产

CuW+Kapton+3M tape



□ HGCa1上约90%面积的钨铜合金底板（CuW baseplates）将在中国生产

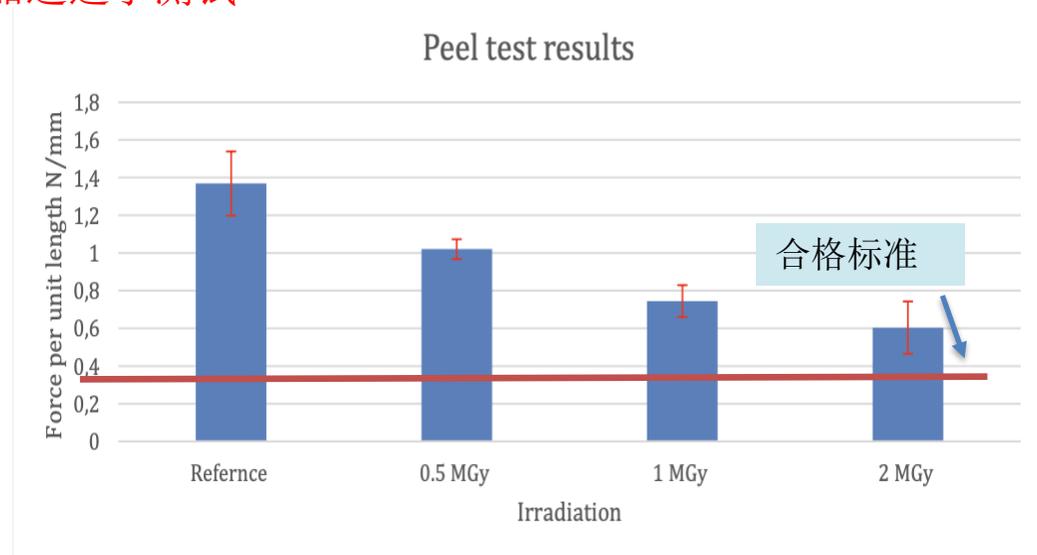
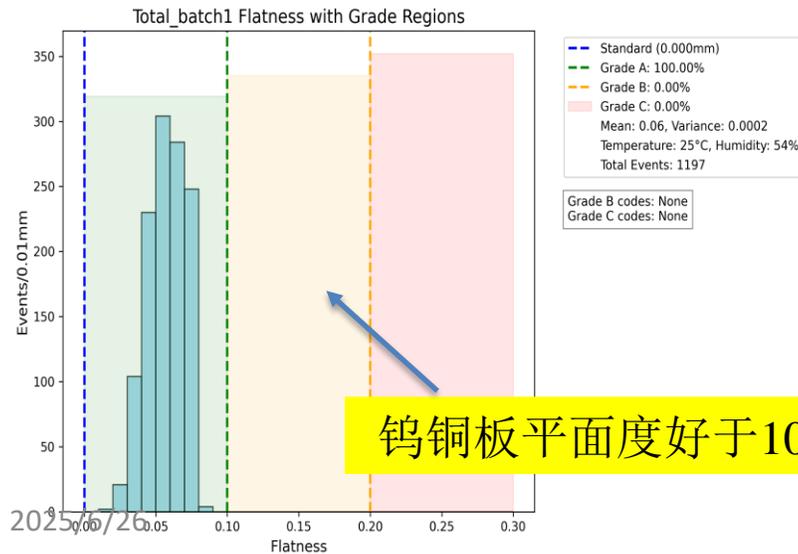
- ◆ 2024年底高能所与CERN签订了K-contract
- ◆ 2025年初，在国内内完成了钨铜板的招标，贴膜合同即将签订

□ 生产情况

- ◆ 合同中首批1200块裸钨铜底板已经生产完成，正在贴膜
- ◆ 所有指标均满足A类要求

□ 高能所同CERN和KIT共同R&D

- ◆ 2024年利用高能所生产的钨铜和金底板完成了2MGy的抗辐照测试，高能所样品通过了测试

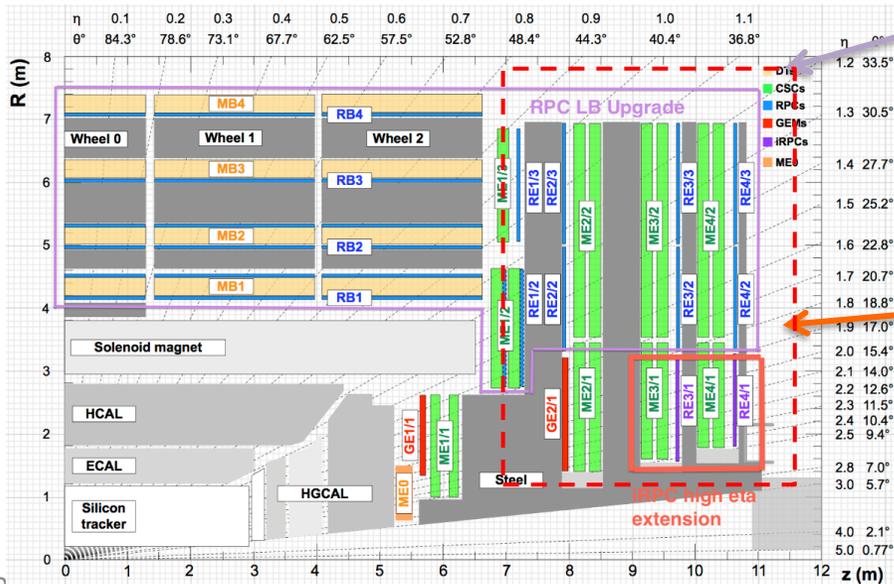


一级触发升级背景

CMS RPC二期升级中包含两部分：

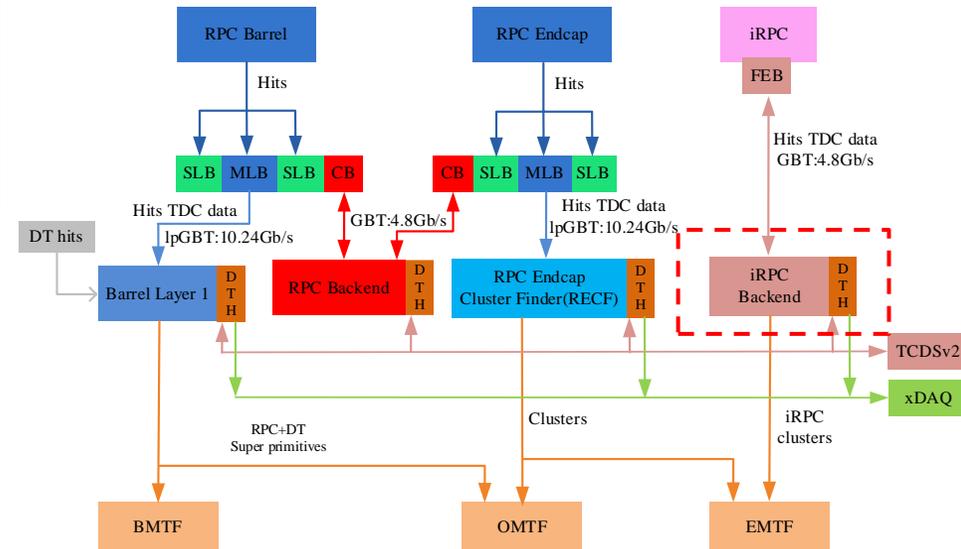
1. 现在运行的RPC Link系统升级设计，提升时间分辨。
2. RE31/RE41位置新安装iRPC探测器。

本课题针对iRPC部分的升级，进行后端触发电子学量产样机开发。



Upgrade of Link System to improve timing resolution for existing RPC ($|\eta| < 1.9$)

Extend the RPC coverage up to $|\eta| = 2.4$ to increase redundancy in high eta region in stations 3 and 4



一级触发升级进展

- iRPC 后端触发电子学方案顺利通过CMS评审
 - 确定了iRPC FEB-iRPC后端触发电子学-EMTF 的连接关系。
 - 完成了第一版与EMTF的接口文档；顺利完成了CMS ESR。
- 关键技术点一进展：Serenity板出完成设计，已出样板
- 关键技术点二进展：数据压缩及传输研究部分进展
 - 提出Check-Sort-Push (CSP) 数据压缩机传输机制，已被合作组采纳和应用。
- 关键技术点三进展：时间基准调整研究
- 关键技术点四进展：簇查找算法研究初步结果

系统设计方案顺利通过CMS ESR

- 完成了第一版与EMTF的接口文档;
- 2024年2月15日顺利完成了CMS ESR。
 - <https://indico.cern.ch/event/1357604/>

Available on the CMS information server

CMS L1T-INTERFACE-iRPC

DRAFT CMS Internal Note

The content of this note is intended for CMS internal use and distribution only

2024/03/27

Archive Hash: Untracked

Archive Date: 2020/11/08

CMS level-1 trigger interface specification: iRPC muon trigger primitives

CMS RPC GROUP
All around the world

Abstract

This note provides the interface specification between iRPC Trigger Primitive Generator and Endcap Muon Track Finder for the Phase-2 CMS Upgrade.

CMS Back-end system ESR day 2

Thursday 15 Feb 2024, 09:00 → 18:10 Europe/Zurich

774/R-013 (CERN)

Description An overview describing the back-end electronics system in Phase-2
For the different subsystems:
- Targeted board and features required in that board
- Firmware development status and estimated firmware footprint
- Timeline for hardware delivery
- Installation and Commissioning schedule
- Requirements on Infrastructure, e.g. ATCA shelf procurement, rack allocation

Videoconference
Invitation_cms_Bac...
CMS Back-end system ESR [Join](#)

09:00 → 13:00 Back-end boards applications: Back-end board applications session 1

HGCAL, EB, HB, HO, HF, DT, RPC (if applicable), CSC, GEM

Conveners: Jeroen Hegeman (CERN), Magnus Hansen (CERN)

video1027642046...

09:00 Introduction to Day 2

Speaker: Magnus Hansen (CERN)

09:10 The HGCAL application

Speaker: Raghunandan Shukla (Imperial College (GB))

BE_ESR_HGCAL_2...

09:40 The Muon application overview

Speaker: Sabino Meola (INFN e Laboratori Nazionali di Frascati (IT))

Muon Overview_Ba...

10:00 RPC

Speakers: Jingzhou Zhao (Chinese Academy of Sciences (CN)), Zhen-An Liu (IHEP/Chinese Academy of Sciences (CN))

RPC_BE_ESR_2024...



RPC Backend Electronics and Trigger ESR

Zhen-An LIU, Jingzhou ZHAO*

Trigger Lab/IHEP Beijing

on behalf of CMS Muon RPC Group

2024 CMS Back-end system ESR
<https://indico.cern.ch/event/1357604/>



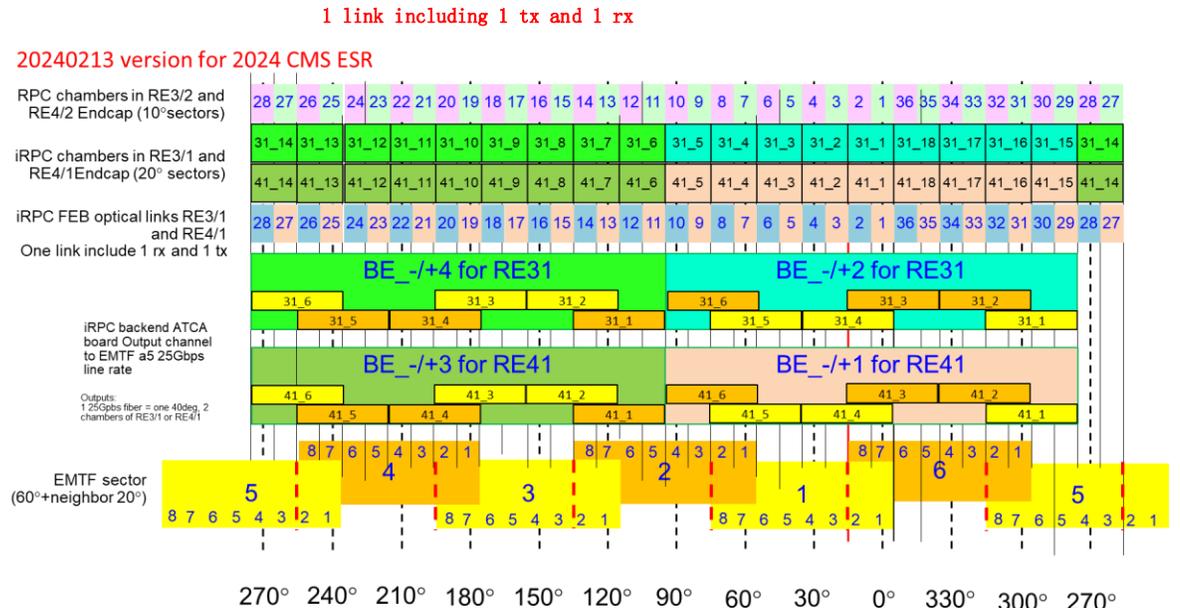
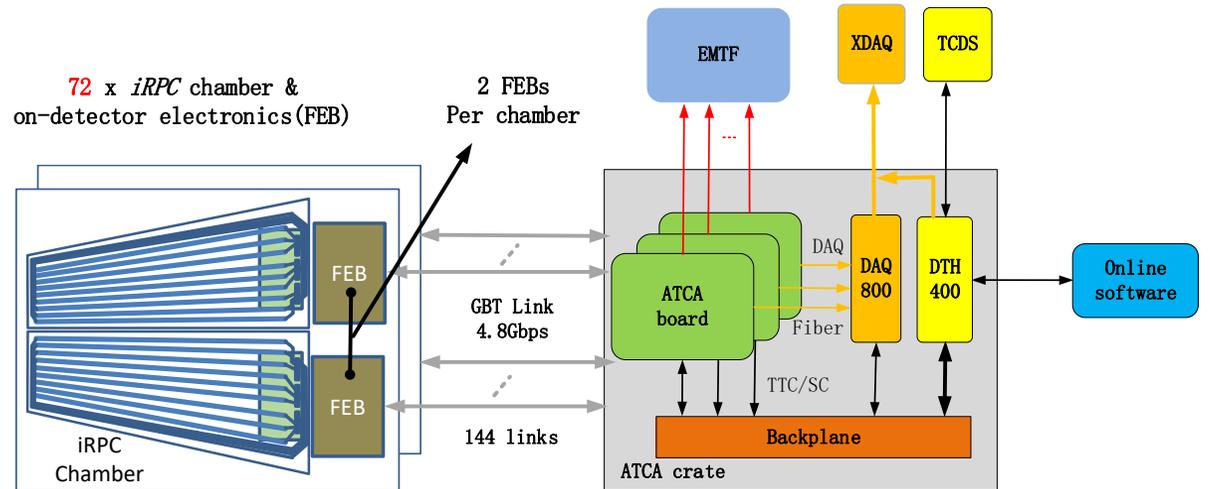
iRPC后端触发电子学系统架构

□ iRPC后端触发电子学系统组成

- 1 ATCA机箱
- 1 DTH400 插件
- 1 DAQ800插件
- 8 ATCA serenity 触发电子学板

□ 系统功能

- 时钟、快慢控制分发,
- 系统状态监测
- 探测器数据读出
- RPC簇查找



iRPC后端触发电子学与前端 FEB和触发EMTF连接关系

Serenity板卡设计进展

◆ Serenity-S1为CMS二期升级触发及后端电子学核心板子之一

- VU9P/VU13P

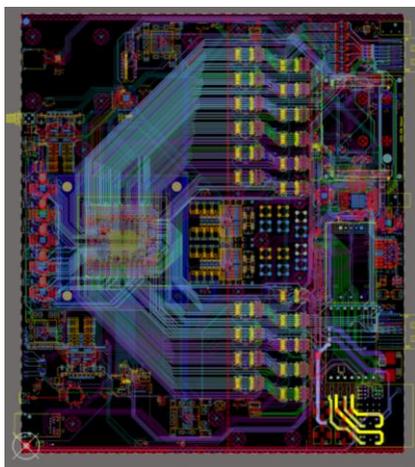
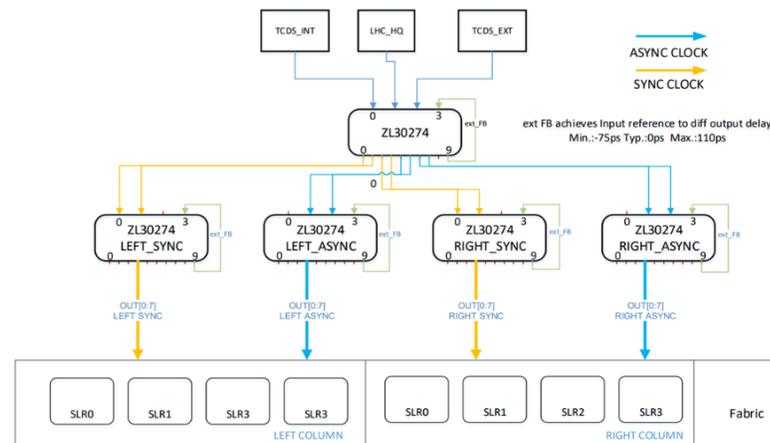
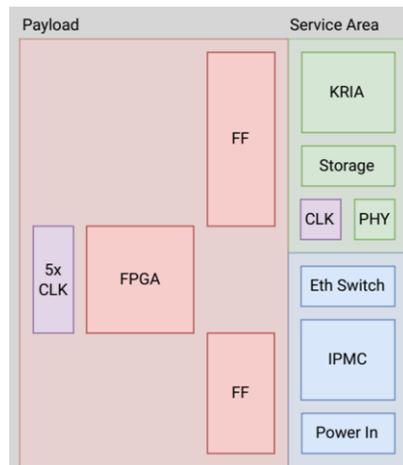
◆ 参与度：刘振安研究员参与Serenity指导委员会，赵京周参与技术设计组

◆ 课题组贡献：

- 负责设计了时钟拓扑结构原理图
- 原理图设计，PCB布局布线，测试

◆ 拿到1块serenity样板，目前正在进行测试。

◆ 完成量产8片FPGA的采购已到货，其他芯片已下单。

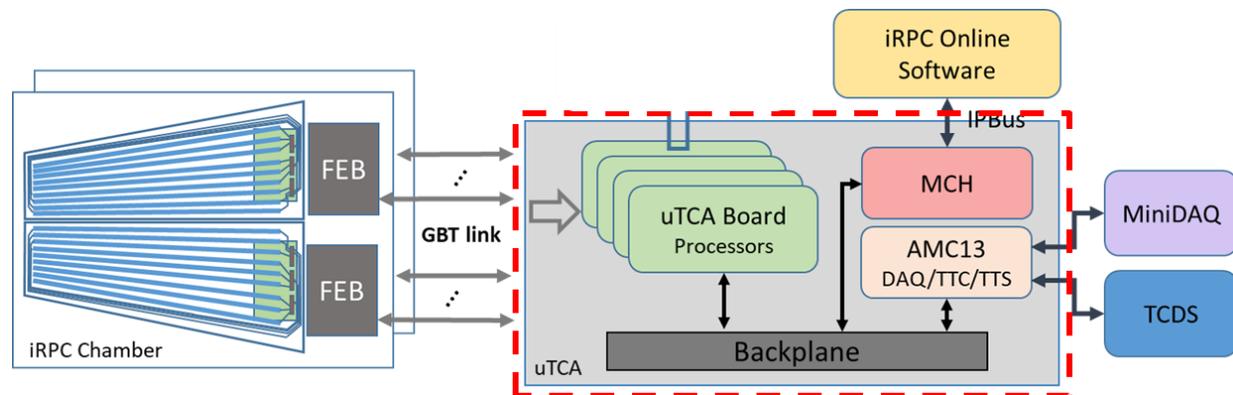


Name	TX	RX	Status	Bits	Errors	BER	BERT Asset	TX Pattern	RX Pattern	TX Pre-Cursor	TX Post-Cursor	TX DM Swing	DFE Enabled	Inject Error	TX Reset	RX Reset	RX PLL Status	TX PLL Status	Loopback Mode	TX Polarity Invert	
Ungrouped Links (0)																					
Link Group 50 (12)																					
Link 0	MGT_X118/TX	MGT_X124/RX	16,000 Gbps	2,549E13	0E0	3.024E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 1	MGT_X117/TX	MGT_X123/RX	16,001 Gbps	2,549E13	0E0	3.024E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 2	MGT_X118/TX	MGT_X122/RX	15,999 Gbps	2,549E13	0E0	3.024E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 3	MGT_X118/TX	MGT_X127/RX	15,999 Gbps	2,549E13	0E0	3.024E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 4	MGT_X122/TX	MGT_X126/RX	16,000 Gbps	2,549E13	0E0	3.024E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 5	MGT_X121/TX	MGT_X125/RX	16,000 Gbps	2,549E13	0E0	3.024E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 6	MGT_X122/TX	MGT_X128/RX	16,000 Gbps	2,556E13	0E0	3.021E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 7	MGT_X123/TX	MGT_X117/RX	16,001 Gbps	2,556E13	0E0	3.021E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 8	MGT_X124/TX	MGT_X116/RX	16,001 Gbps	2,556E13	0E0	3.022E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 9	MGT_X125/TX	MGT_X121/RX	16,000 Gbps	2,556E13	0E0	3.021E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 10	MGT_X126/TX	MGT_X120/RX	16,002 Gbps	2,556E13	0E0	3.021E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 11	MGT_X127/TX	MGT_X118/RX	16,000 Gbps	2,556E13	0E0	3.021E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	2.21 dB (01001)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link Group 51 (12)																					
Link 0	MGT_X128/TX	MGT_X119/RX	16,001 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 1	MGT_X129/TX	MGT_X125/RX	15,999 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 2	MGT_X130/TX	MGT_X134/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 3	MGT_X131/TX	MGT_X130/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 4	MGT_X132/TX	MGT_X138/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 5	MGT_X133/TX	MGT_X137/RX	16,001 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 6	MGT_X134/TX	MGT_X130/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 7	MGT_X135/TX	MGT_X130/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 8	MGT_X136/TX	MGT_X128/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 9	MGT_X137/TX	MGT_X138/RX	15,997 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 10	MGT_X138/TX	MGT_X132/RX	16,001 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		
Link 11	MGT_X139/TX	MGT_X131/RX	16,000 Gbps	2,552E13	0E0	3.018E-14	Reset	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit	0.00 dB (000000)	4.08 dB (01111)	900 mV (11000)		Inject	Reset	Reset	Locked	Locked	None		

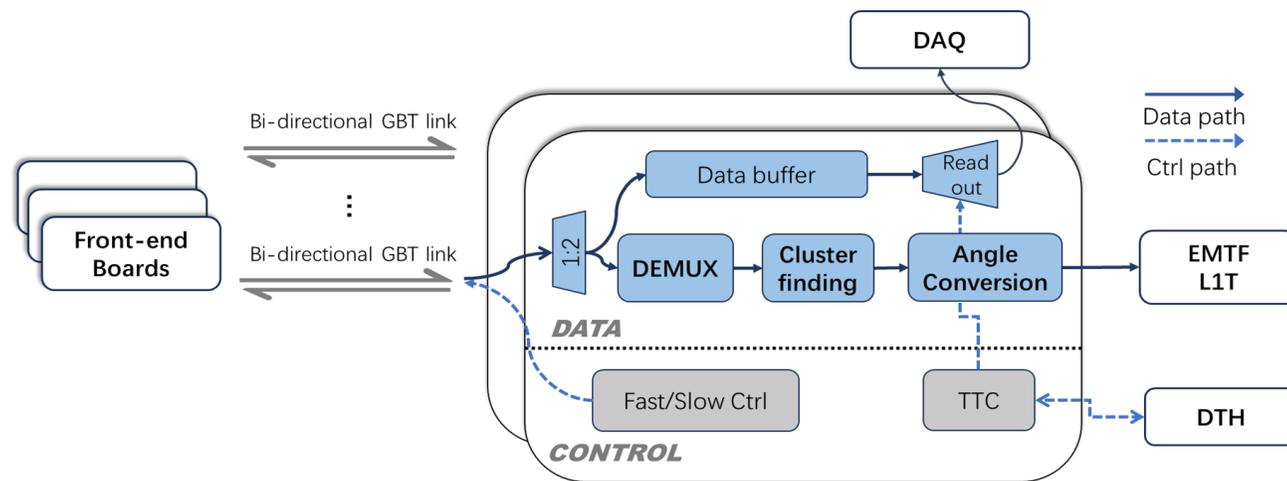
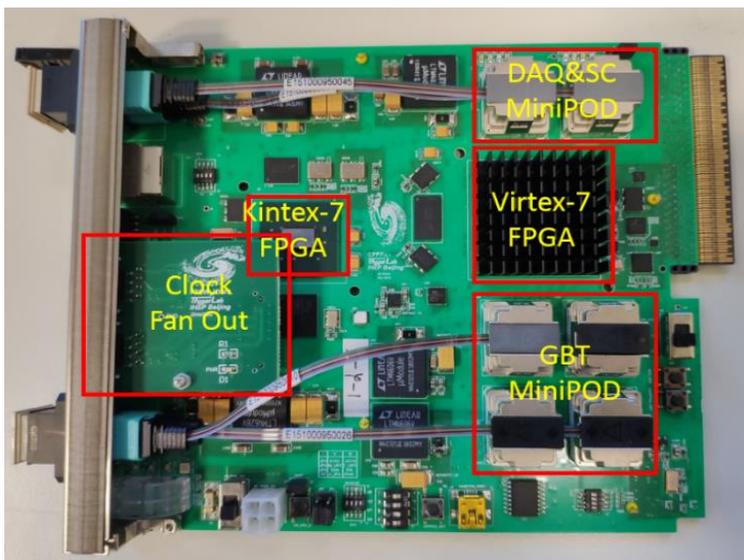
RPC后端触发电子学 MTCA Demo系统开发

◆ 在ATCA硬件生产出来前，开发了基于MTCA的iRPC后端触发电子学Demo系统，用于后端触发电子学的原理验证。

- 在合作组提出了高能所基于时间优先的数据传输方案（Check-Sort-Push, CSP），并被合作组采用。
- 时间基准的调整研究
- 对宇宙线实验簇信息进行了初步研究



基于MTCA的后端触发电子学Demo系统架构图

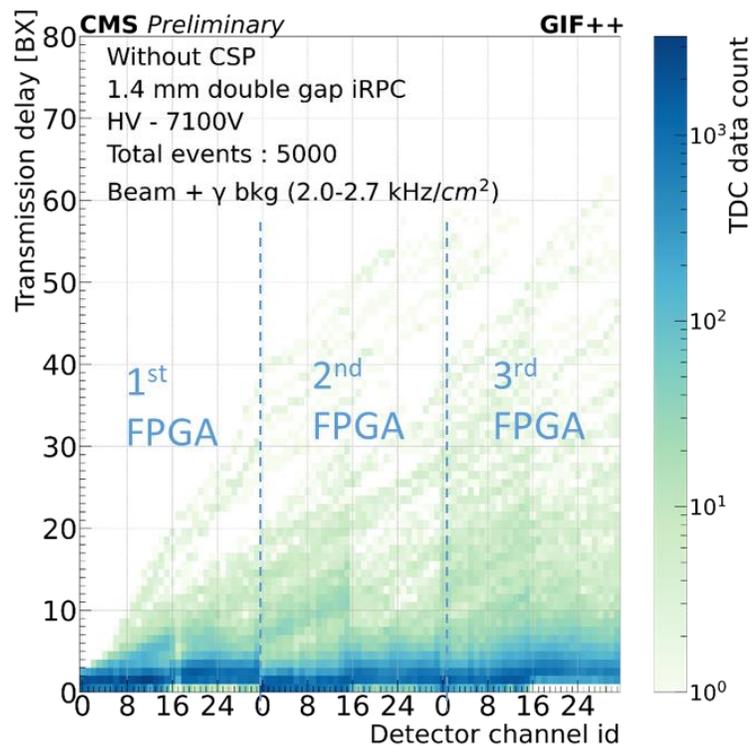


iRPC后端触发电子学固件架构

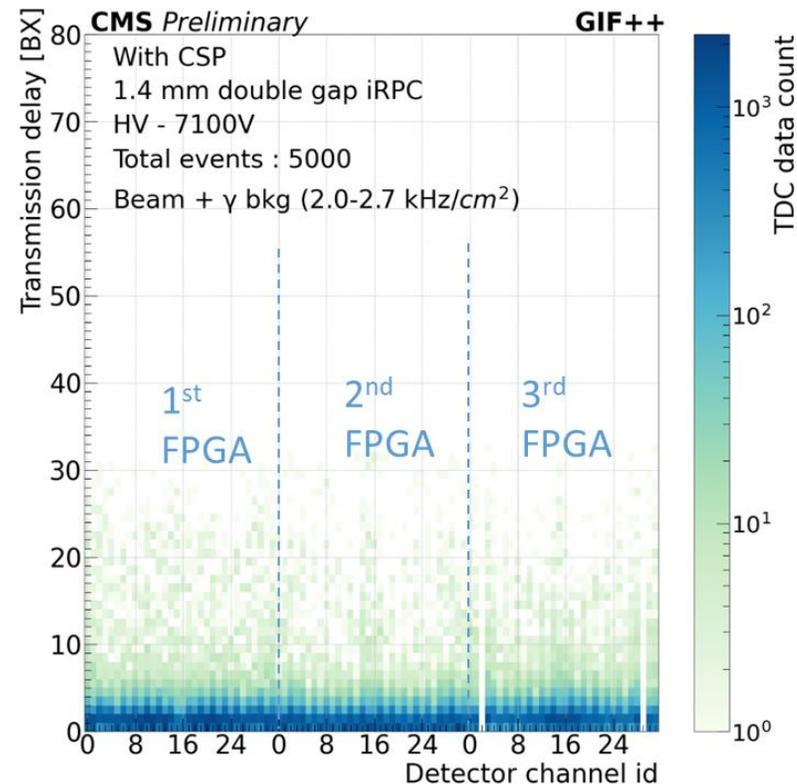
CSP机制效果- 传输延迟

■ Check-Sort-Push (CSP) 数据发送机制

- 基于时间优先的思想
- 平衡各通道的发送延迟，减小后端触发电子学部分的接收等待时间，减小cluster的产生延迟。
- 发送机制提交合作组，被采纳并实现在前端电子学板中。
- 束流实验效果：
 - 传输延迟和通道号不再有依赖关系
 - 在高本底情况下，最大延迟从60BX(左图)降低到30BX(右图)



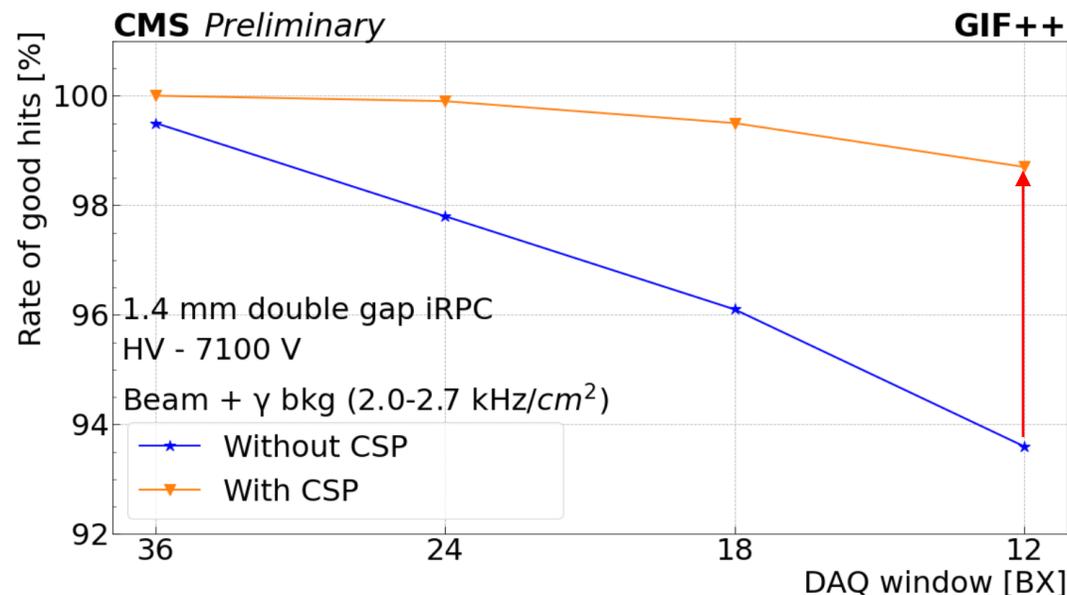
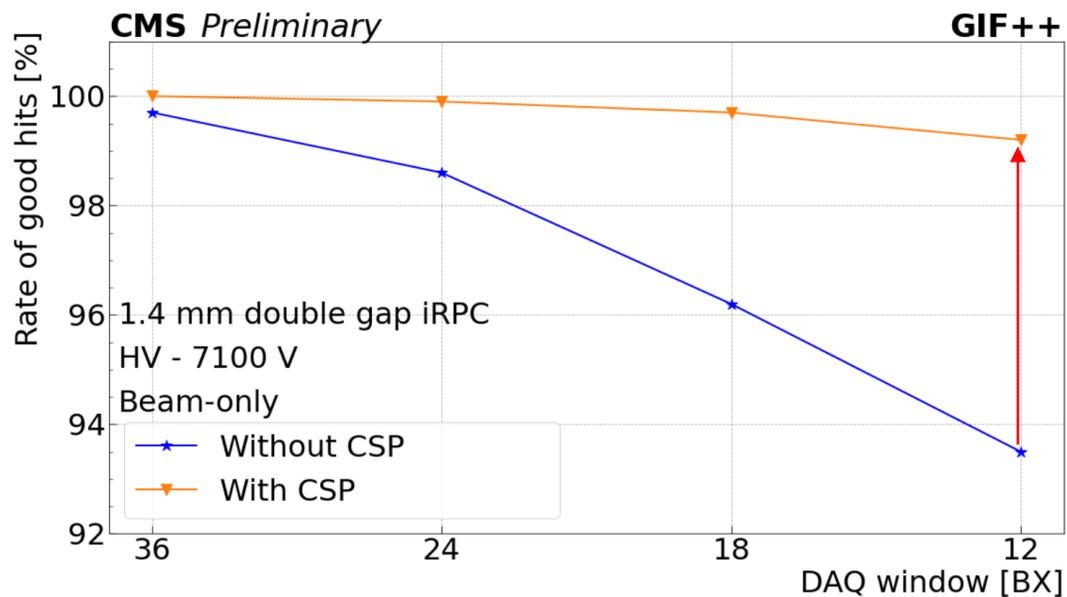
前端电子学数据发送机制采用CSP前



前端电子学数据发送机制采用CSP后

CSP效果研究 - DAQ窗口

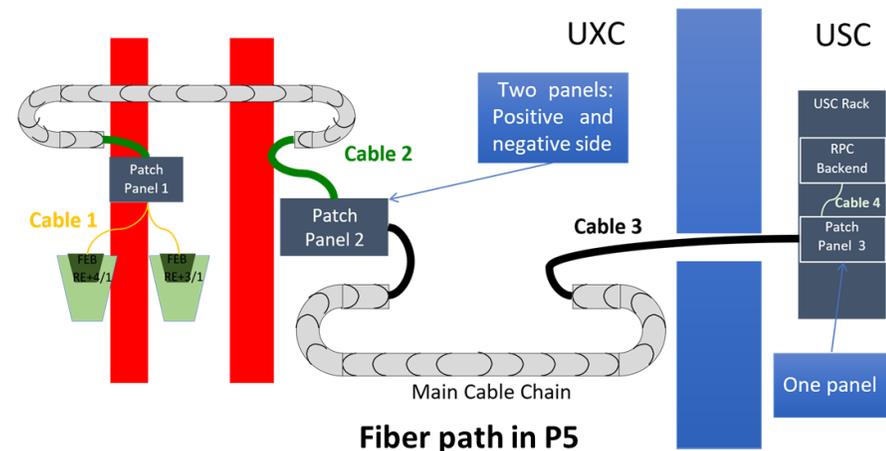
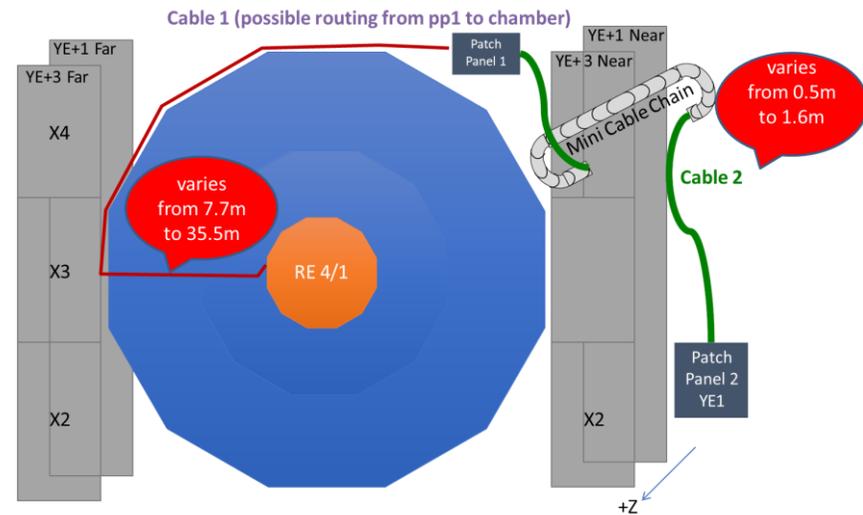
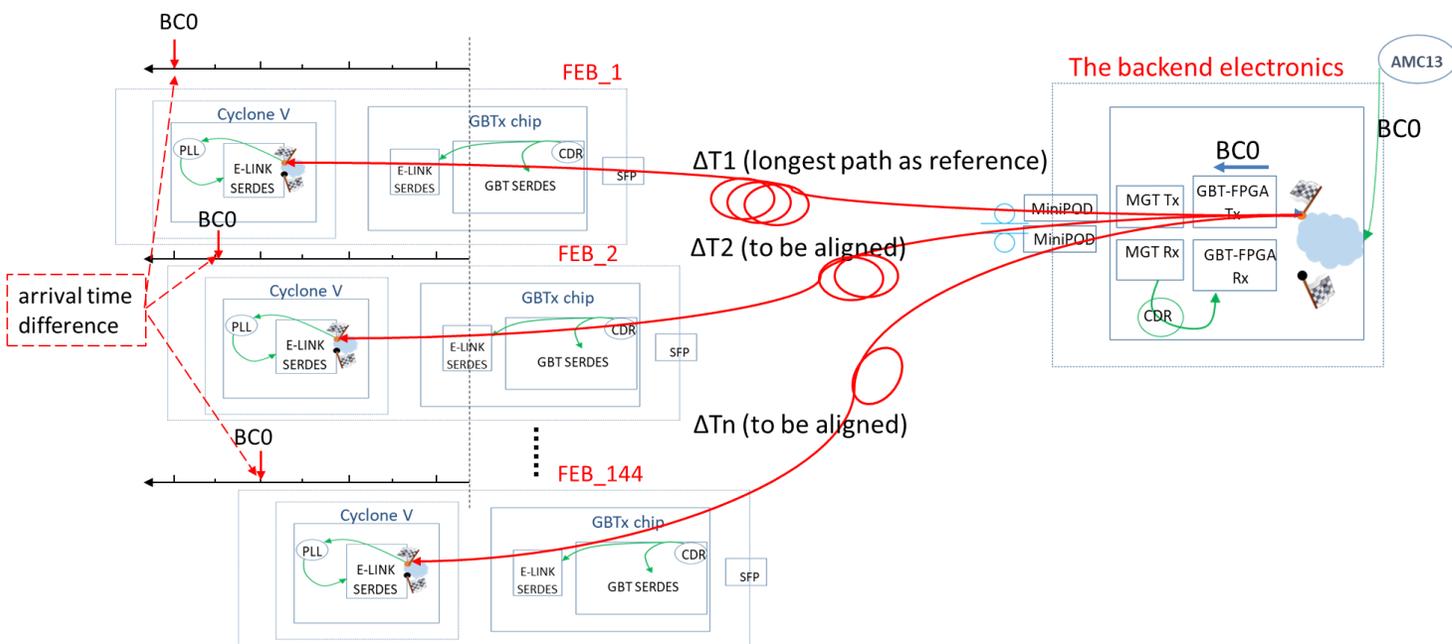
- 使用CSP，在24 BX的窗口下好击中的比例大于99.8%
- 在只有束流或者束流+ γ 本底下，好击中的比例在12BX (目标窗口) 从93%增长到99%
- CSP使得更小的DAQ窗口成为可能



时间基准分发调整

◆ 时间基准分发调整需求:

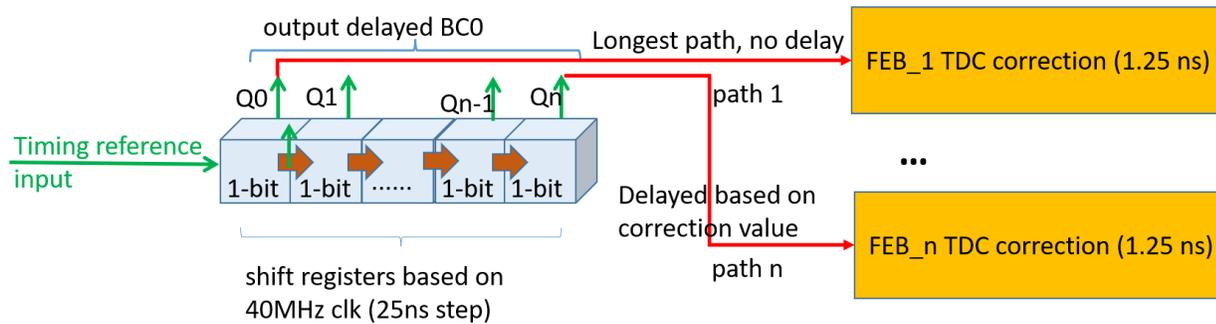
- iRPC后端触发电子通过光纤发送时钟、快控制到前端电子学
- 光纤长度不一致最大28.9米，快控制信号到达前端时间差最大144.5ns（6BX）。
- 前端电子学时间以BC0为时间计数器的清零



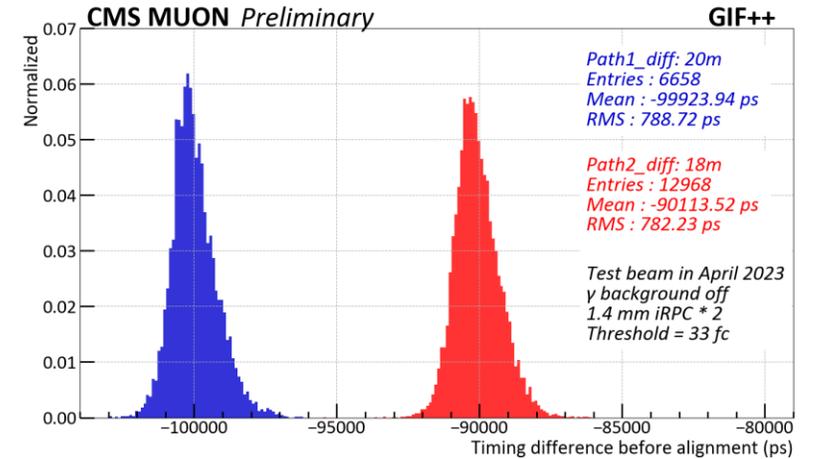
时间基准分发调整

◆ 调整方法及效果:

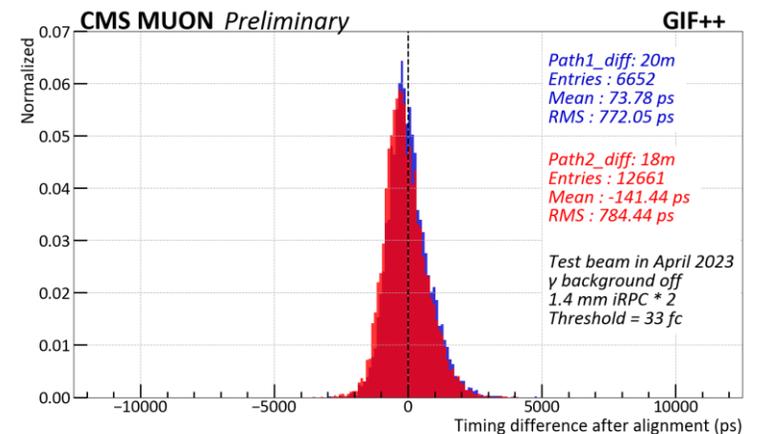
- 25 ns的整数倍部分可以直接在LHC系统时钟域下进行时基的延迟。
- 对小于1个BX的差别，采用其他各路TDC数值需要减去特定校正值实现调整目的。
- iRPC全系统时间基准可以调整到1.25ns之内。



时基调整 (25/1.25 ns)



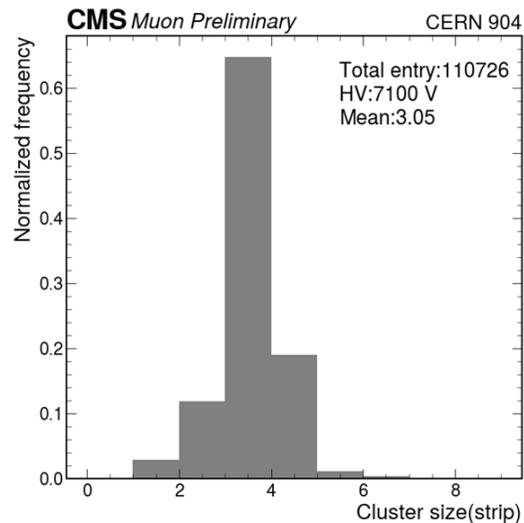
调整前两路系统中时间基准到达差别



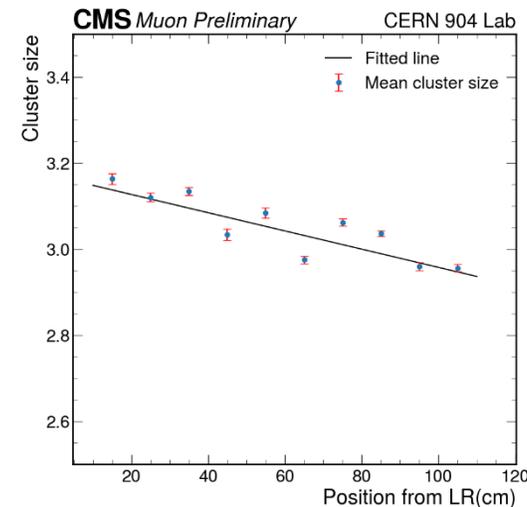
调整后两路系统中时间基准到达差别

簇查找算法研究取得了重要进展

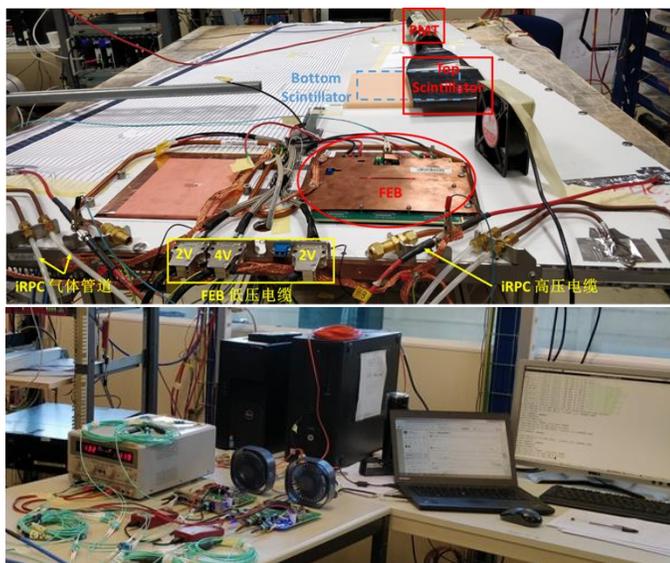
- 簇查找算法的研究基于宇宙线实验和束流实验数据
- 对簇（团）特性的研究有了初步结果
 - 簇（团）大小
 - 簇（团）大小与径向位置的关系
 - 簇（团）时间选择参考



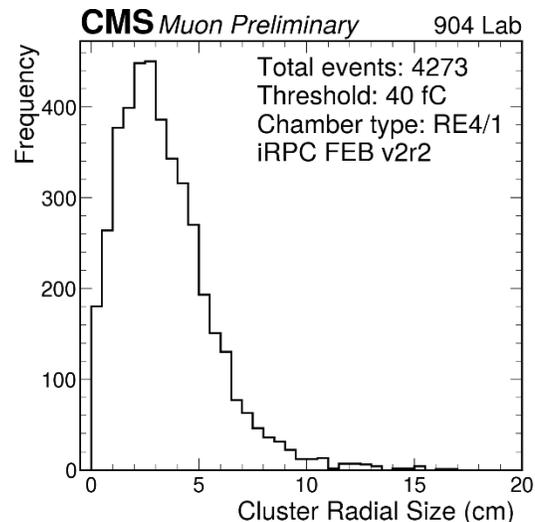
宇宙线事例中簇团大小分布



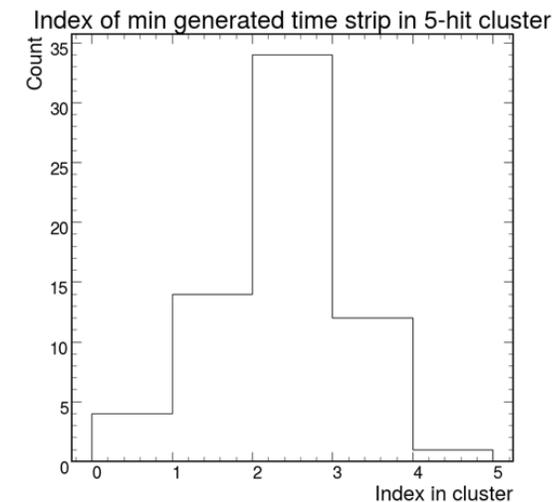
簇团大小与径向位置的关系



簇（团）宇宙线研究平台



宇宙线事例中簇团径向大小分布

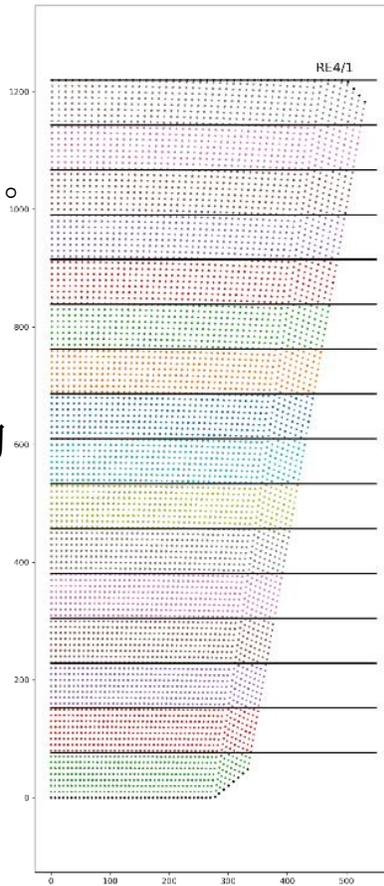


最小时间在击中簇中的位置分布

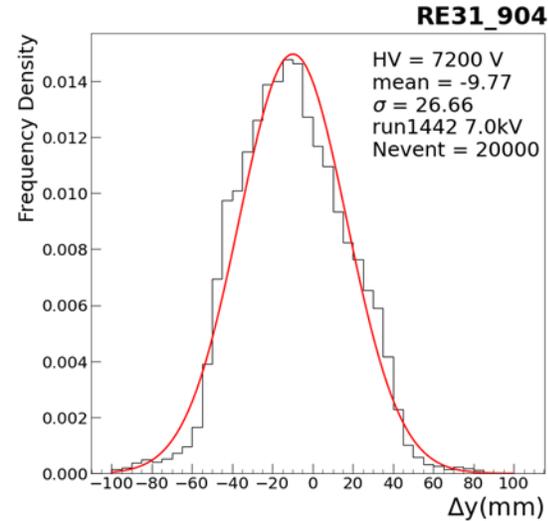
簇查找算法研究取得了重要进展

- 通过对簇特性的研究，确定了簇查找算法的方案。
- 通过软件对算法的精度进行了模拟。
- 通过宇宙线及束流实验得到了初步的结果。
- 对FPGA资源的使用有了比较可靠的评估。

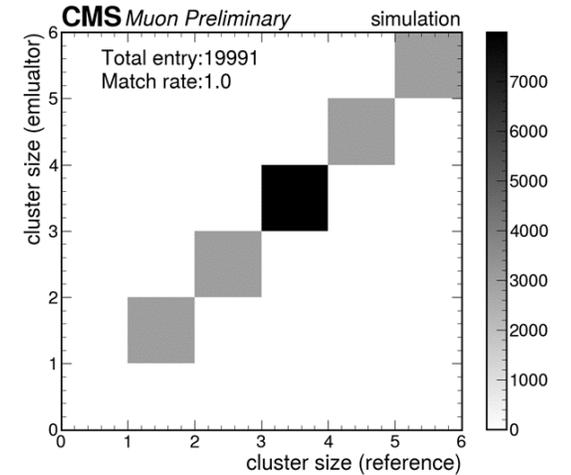
Nseg	Seg Length RE41	Seg Length RE31
8	152.5 mm	183 mm
16	76.25 mm	91 mm
32	38 mm	46mm



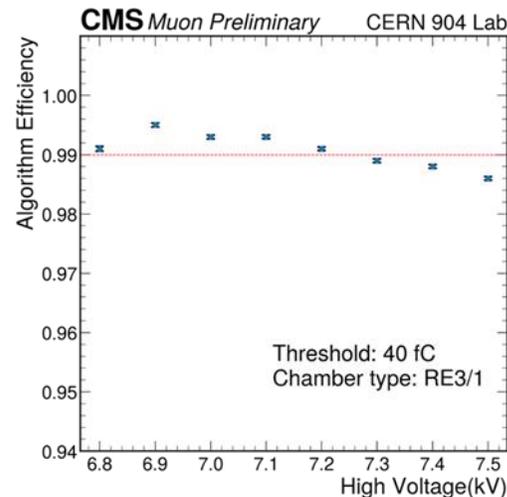
Seg=16



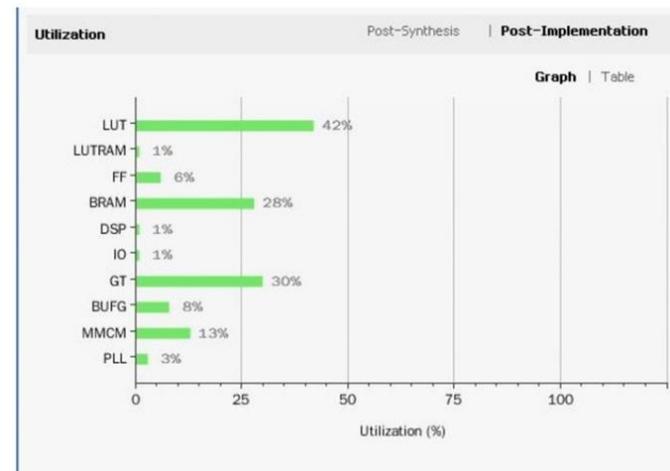
径向分段数为16时位置准确度



软件簇大小与数据源的匹配图



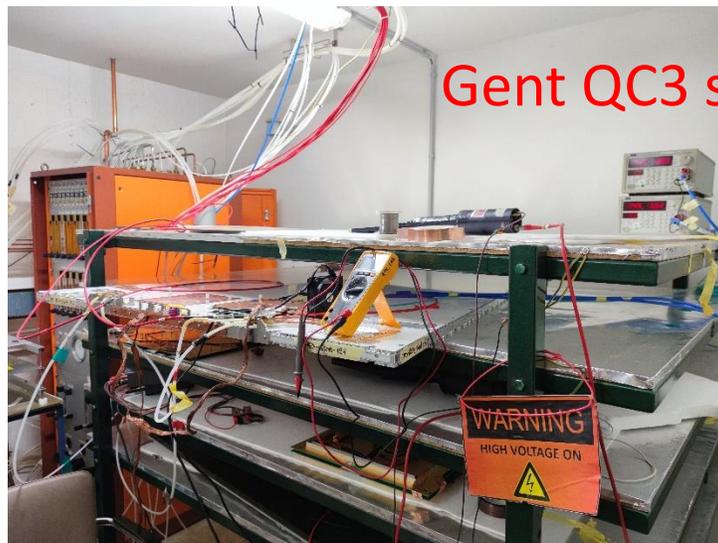
宇宙线实验中簇查找算法效率



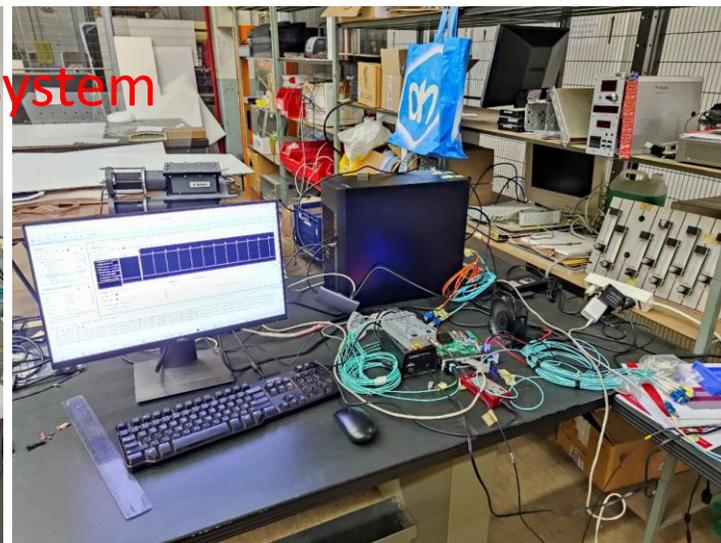
VCU13P的资源使用(180 links)

iRPC QC3质量检测系统开发

- ◆ iRPC MTCA后端触发电子学系统用于iRPC QC3质量检测
- ◆ iRPC QC3 : Chamber during construction and with cosmics @ **assembly sites**: Gas leak, dark current, cosmic (noise, eff, cluster size, HV).
- ◆ Developed and set up two systems
 - Gent system: Jianing helped set up this system in July.2023
 - 904 system: Qingfeng set up 904 backend system
- 904测试系统已完成50块iRPC chamber的测试。



Gent QC3 system



904 QC3 system



经费执行, 学生培养及文章报告情况

◆ 参与人员:

- 16名职工, 4名博后, 1名外聘技术员,
- Trigger 6名学生, Hgcal 每名学生贡献<50%的工作时间

◆ 学生培养:

- 学生毕业14人, 其中博士13人

◆ 文章发表:

- 发表文章6篇, 其中第一标注2篇

◆ 经费执行情况:

预算数 (万元)	到位数 (万元)	是否按计划拨付 课题承担单位	外拨数 (万元)	执行数 (万元)
690	556	是	75.9	194.4+150

- 150万为已签完合同, 正在付款

存在的问题

- ◆ LHC的整体计划有所延迟：LHC整个LS3推迟了~6个月，同时LS3延长了1年。
- ◆ 整个硅模块量产推迟了~1年，不影响项目计划中~160块模块生产任务的按时完成
- ◆ HGCa1项目原材料需要进口制作成模块再出口，由此产生的关税及增值税远超项目预算
 - ◆ 通过一年多努力与海关签订来料加工协议，实现税费的减免
 - ◆ 通过上述方式，在完成项目任务基础上还能为CMS合作组作出更大贡献
- ◆ iRPC后端触发电子安装延迟，不影响课题验收指标

总结

◆ Hgcal:

□ HGCal任务完成情况

- 自项目执行以来，高能所站点完成了55块（ $\sim 1.1 \text{ m}^2$ ）硅模块原型机的制作，满足项目中期考核指标要求
- 模块XY方向的对齐精度达到好于150 μm ，满足项目中期考核指标要求

□ 在国内生产HGCal钨铜合金底板总面积的90%

- 2024年底高能所与CERN签订了K-contract，为国内企业带来了超1000万的订单
- 合同中首批1200块裸钨铜底板已经生产完成，全部满足A类标准

◆ 一级触发升级:

- iRPC 后端触发电子学方案顺利通过CMS评审
- 触发电子学板Serenity板卡拿到样板
- 对触发延迟控制，时间基准分发调整及簇查找等关键技术进行了研究
 - 提出Check-Sort-Push (CSP) 数据压缩机传输机制，已被合作组采纳和应用。中期考核要求已达到。

◆ 课题两部分均进展顺利，达到中期考核要求。

谢谢各位专家!

文章发表

发表文章:

1. Neutron Irradiation and Electrical Characterization on the First 8” Silicon Pad Sensor Prototypes for the CMS Endcap Calorimeter Upgrade. JINST 2023_18_P08024
2. Performance of CMS High Granularity Calorimeter prototype to charged pion beams of 20-300 GeV/c.* JINST 2023_18_P08014
3. Timing Performance of the CMS High Granularity Calorimeter Prototype. JINST, 2024-04, Vol.19 (4), p.P04015
4. Using graph neural networks to reconstruct charged pion showers in the CMS High Granularity Calorimeter, JINST 19 P11025
5. Qingfeng Hou, Zhen-an LIU, Jingzhou ZHAO, [R&D of the cluster finding algorithm for CMS iRPC detector](#), JINST 19 (2024) 12, DOI: [10.1088/1748-0221/19/12/T12001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/12/T12001),
6. Song, J., Zhao, J., Hou, Q. *et al.* Research and development of time resolution and time reference adjustment for CMS improved resistive plate chambers (iRPCs). *Radiat Detect Technol Methods* **8**, 1604–1613 (2024). <https://doi.org/10.1007/s41605-024-00473-w>

主要报告统计

科普报告:

1. 张华桥: 国科大味物理讲座/现代物理知识科普直播: “探索微观世界的眼睛—量能器”, 2023/3/23

会议报告:

1. HGCAL status report, 张华桥, CMS week, 18—22/09/2023
2. CMS Upgrade, 王峰, CLHCP2023, 16-20/11/2023
3. HGCAL MAC status at IHEP, 余涛哲 CLHCP2023, 16-20/11/2023
4. HGCAL SQC at IHEP and domestic silicon sensor R&D for calorimeter, 赵晓 CLHCP2023, 16-20/11/2023
5. Computing vision QC in HGCAL production, 袁煦昊 CLHCP2023, 16-20/11/2023
6. 高粒度量能器项目进展, 王峰, 中国CMS年会, 2-3 July 2023, 上海
7. HGCAL module development at IHEP 赵晓 中国CMS年会 上海 2—3 July 2023
8. Status of HGCAL module assembly at IHEP, 王峰, CLHCP2024, 青岛, 2024.11.13-17
9. CuW baseplate R&D and production, 王涵, CLHCP2024, 青岛, 2024.11.13-17
10. HGCAL module beam test, 侯宝瑞, CLHCP2024, 青岛, 2024.11.13-17
11. HGCAL module test at IHEP, 崔志鹏, CLHCP2024, 青岛, 2024.11.13-17
12. CMS 高粒度量能器升级, 张华桥, 2024CMS年会, 安徽潜山, 2024.7.10-13
13. 高粒度量能器硅模块集成工艺介绍, 王峰, 2024CMS年会, 安徽潜山, 2024.7.10-13
14. RPC后端触发电子学进展, 赵京周, 2023 CMS中国组年会, 2023年7月2日
15. Timing reference distribution and alignment study for CMS iRPC, 刁伟卓, 2023 CMS中国组年会, 2023年7月3日
16. CMS iRPC Backend and Trigger Status, zhao jingzhou, CLHCP2023, 16-20/11/2023
17. Data analysis for iRPC BE/TRG beam test, Weizhuo DIAO, CLHCP2023, 16-20/11/2023
18. Jingzhou ZHAO, RPC Backend Electronic and Trigger ESR, 2024 CMS Back-end system ESR, 14 Feb. 2024-15 Feb. 2024, CERN, Switzerland, <https://indico.cern.ch/event/1357604/>
19. Jingzhou ZHAO, RPC Backend Electronics (BE) and Trigger status, 2024 Annual Review-Muons, 29 Oct.2024, online, <https://indico.cern.ch/event/1460127/>
20. Jingzhou ZHAO, RPC Backend Electronics (BE) and Trigger status, 2024 CMS Muon week, 23-27 Sept. 2024, <https://indico.cern.ch/event/1446338/>
21. Qingfeng Hou, Zhen-an Liu, Jingzhou ZHAO, Weizhuo Diao on behalf of CMS Muon Group, CMS iRPC cluster finding algorithm in Backend electronics, the XVII international Conference on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2024), 9-13 Sept. 2024, Santiago de Compostela, Spain, <https://indico.cern.ch/event/1354736/>
22. 赵京周, RPC后端触发电子学进展, CMS2024中国组年会, 2024.7.10-13, 安徽潜山

参与单位及人员

◆ HGCal

- 5个合作单位，
- 12名职工，4名博士后，1名外聘技术员
- 每名学生贡献<50%的工作时间，并且每年会有合作单位的新生参与进来

◆ 一级触发升级

- 4名职工
- 6名学生

12 Fellows

Huaqiao Zhang	SQC Wire Bond OGP Shipping Gantry	IHEP
Yong Liu		
Hongbo Liao		
Junquan Tao		
Xuhao Yuan		
Wan Xie		
Congcong Wang		
Feng Wang		
Zhen Hu		THU
Kai Yi		NNU
Meng Xiao		ZJU
Zirui Wang		FDU

4 Postdocs

Chu Wang	Chengsun Zhang
Geliang Liu	Hongwei Wen

17 Graduate Students

Han Wang	Yingqi Hou
Baorui Hou	Haozhong Yang
Hao Zhu	Anwar
Zhipeng Cui	Nazima
Tianyu Cao	Pei-Zhu Lai
Haozhong Yang	Dejing Du
Ruobing Tu	Changcheng Liu
Kaile Yao	Jinjing Gu
	Shiyang Chen

1 Technician

Zhijian Yang (Wire Bonding)

学生培养

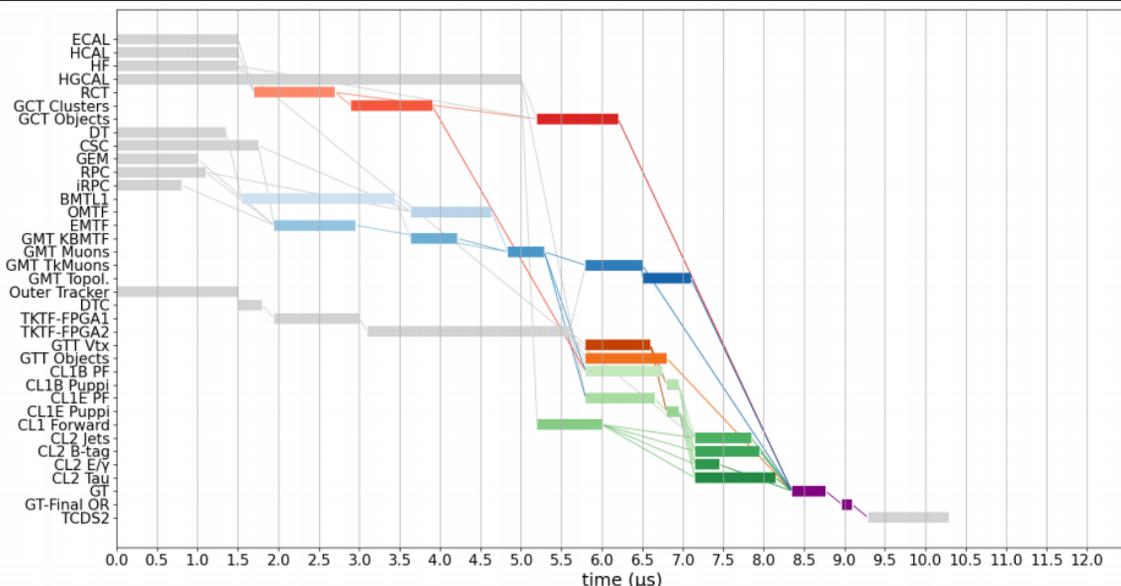
毕业学生：彭娜，苑超辰，王储，王泽炳，张辰光，华慧玲，
候霄楠，余涛哲，郭佳林，张镇轩，张诗洁，寇含君，宋嘉
宁，侯庆峰

电子学发送延时研究

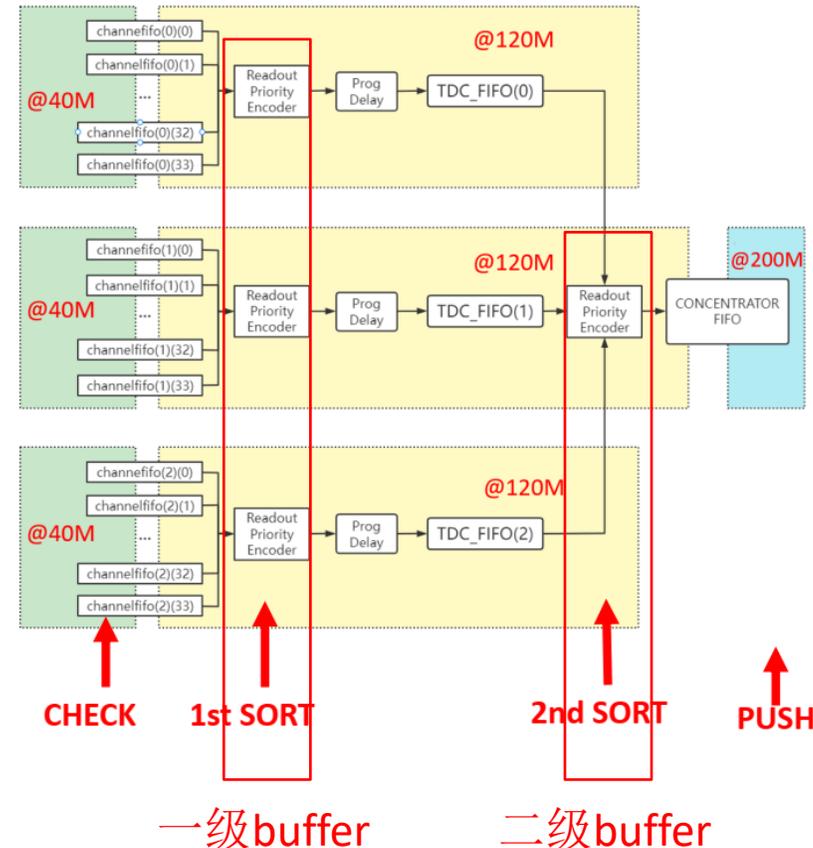
- 在触发系统中延时（latency）是衡量触发系统的重要参数；
 - 基于时间优先的数据传输方案（Check-Sort-Push, CSP）
 - 研究了一级buffer和二级buffer合适的缓存深度设置，减小buffer延时。

前端电子学架构

L1T (preliminary) latency based on real firmware



- Includes latency of inputs and numbers based on developed subsystems
 - Latency of the links $\sim 0.2 \mu\text{s}$
- Latency of $10.2 \mu\text{s}$ (FE to FE) / $12.5 \mu\text{s}$



截止中期，课题1到位经费**556** 万元，外拨经费**75.9**万元，所内经费执行**188.27** 万元，外拨经费执行**6.13** 万元，共执行**194.4** 万元