

# 科技部重点研发项目

## 大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级

2026年会

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

华中师范大学-2026年6月28日

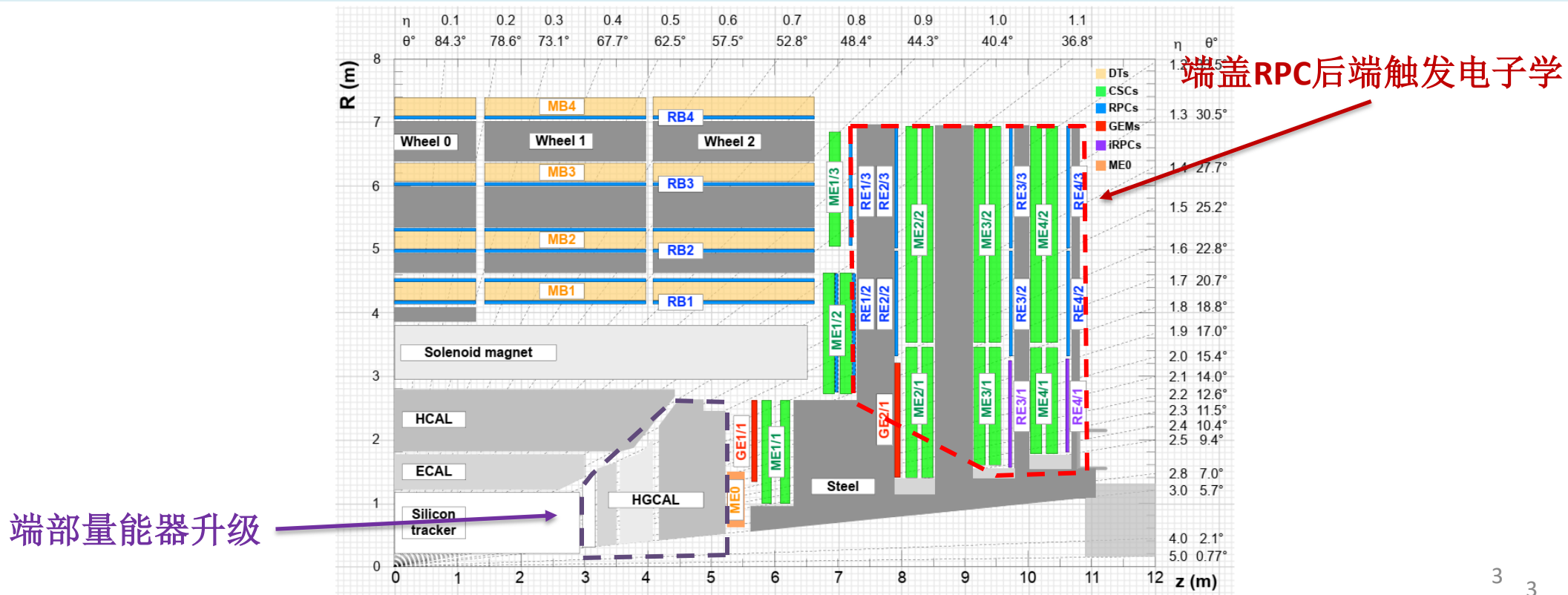
# 提纲

- 课题总体介绍
  - 课题目标及验收指标
- 一级触发升级部分工作进展
  - iRPC后端触发电子学背景介绍
  - iRPC后端触发电子学工作进展
- 总结及下一步计划

# 课题一介绍

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平方米）；

参与CMS一级触发电子学板的设计和部分生成工作；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:

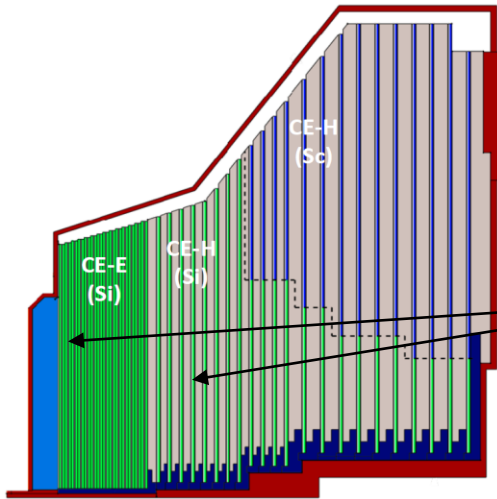
- 指标1: 高粒度量能器硅模块 160块硅模块
- 指标2: 高粒度量能器硅模块精度控制 X-Y方向好于100微米
- 指标3: 高速数据传输速率 单通道 $\geq$ 16Gbps

课题目标、预期成果与考核指标表

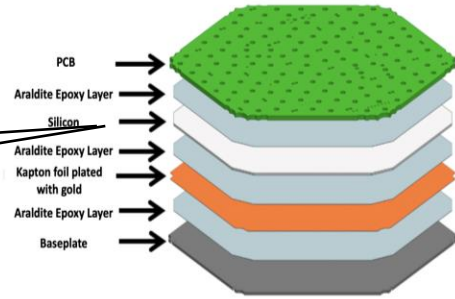
课题目标 <sup>1</sup>	预期成果		考核指标 <sup>2</sup>				考核方式(方法)及评价手段 <sup>4</sup>
	预期成果名称	预期成果类型	指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态 <sup>3</sup>	完成时指标值/状态	
(限500字以内。)建立高粒度量能器硅模块中心，研究百平方米量级硅探测器模块的制作工艺，掌握高粒度量能器关键的制作技术，完成160块以上8寸硅模块的批量建造(约3.2平方米)；进行端盖RPC后端触发电子学系统的设计。参与CMS一级触发电子学板的设计和部分生产工作，并基	主要成果	1 CMS高粒度量能器系统	指标1.1: 高粒度量能器硅模块	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	指标2.1: 高速数据传输速率	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 <sup>5</sup>	数量	提交时间		公开类别及时限 <sup>6</sup>	
	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							

# CMS高粒度量能器课题

高能所是最早参与的10个单位之一，承担一个硅模块中心等任务



拿到2次为期一年的硅模块材料免税许可



共~26000 硅模块 (620平米硅传感器)

中国组核心任务: ~1/5硅模块的生产

国内参与单位:

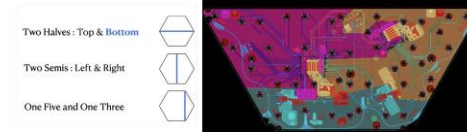
- 高能所
- 清华大学
- 浙江大学
- 复旦大学
- 南京师范大学

不包括台湾

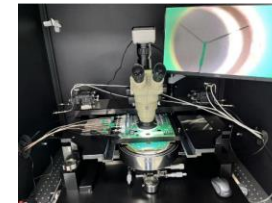
高粒度量能器部分进行详见张华桥老师报告

## 课题进展

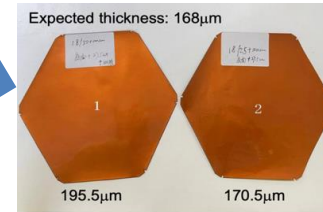
- 目前硅模块量产按照计划进行: 160块硅模块集成数量已经完成
- 模块精度 (554块中>99%) 好于100微米, 达到项目考核指标
- CuW底板量产了6200块 (已经完成原计划高能所自己购买份额)



PCB: 完成底部硅模块电路板设计  
2023/10月通过review  
(浙江大学)



硅传感器: 建立了测试中心, 将为高能所硅模块所需所有传感器抽样测试 (高能所)



钨铜合金底板: 已经生产了6200块, 为高能所硅模块中心和其他单位提供所需钨铜合金底板

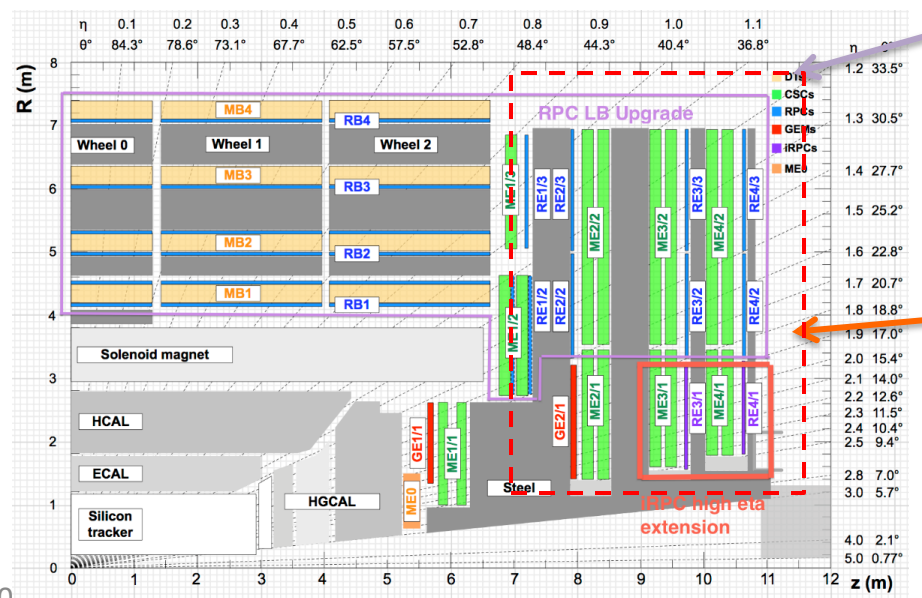
# 本报告后续部分为一级触发升级进展: 一级触发升级子课题背景

LHC 亮度将达到  $5 \times 10^{34}$  Hz/cm<sup>2</sup> (pileup ~140), 甚至至  $7.5 \times 10^{34}$  Hz/cm<sup>2</sup> (pileup~200), 事例率及事例堆积将增加。为了提升RPC探测器的压低本底的能力, 对探测器的电子学进行升级。

CMS RPC二期升级中包含两部分:

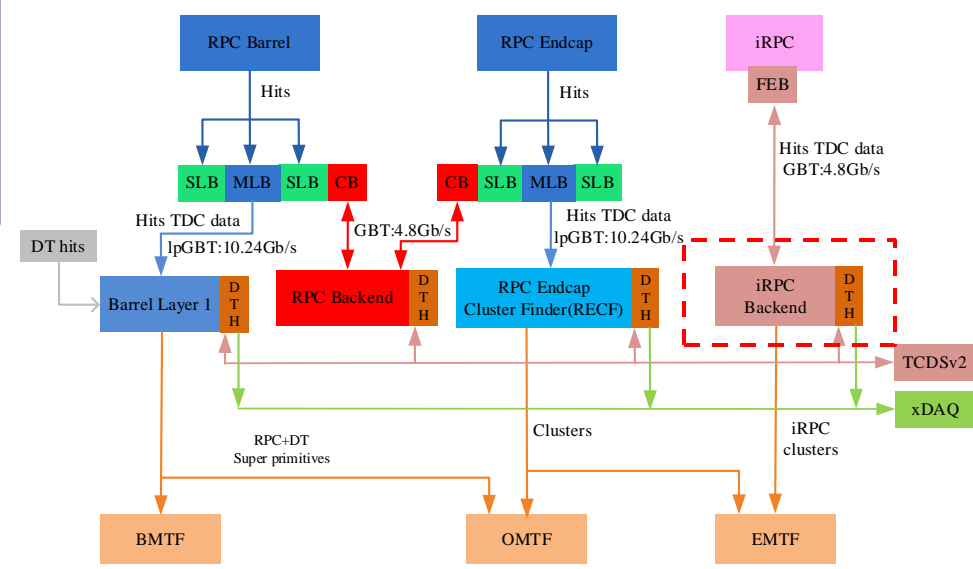
1. 现在运行的RPC Link系统升级设计, 提升时间分辨。
2. RE31/RE41位置新安装iRPC探测器。

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。



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

## ■ ATCA系统进展:

- 前端电子学到EMTF的连接关系确定，数据格式讨论确定基本版本。
- ATCA Serenity板完成设计，已经拿到两块样板，在北京实验室和CERN 904实验室搭建了固件开发平台，指标达到课题验收指标。
- 8块ATCA serenity已经开始量产，预计27年上半年完成。
- ATCA机箱已经到达904实验室，准备在电子学集成区域安装搭建联调系统。

## ■ 关键技术点进展:

- iRPC MTCA后端触发电子学P5 run3期间顺利取到对撞束流数据，完成样机功能验证。
- iRPC TOF性能研究表明iRPC具有对HSCP进行时间测量的能力；
- iRPC MTCA后端系统用于iRPC探测器的批量生产，完成全部80块探测器QC3检测。

# iRPC FEB-BE-EMTF 连接关系图

20240213 version for 2024 CMS ESR

RPC chambers in RE3/2 and RE4/2 Endcap (10°sectors)

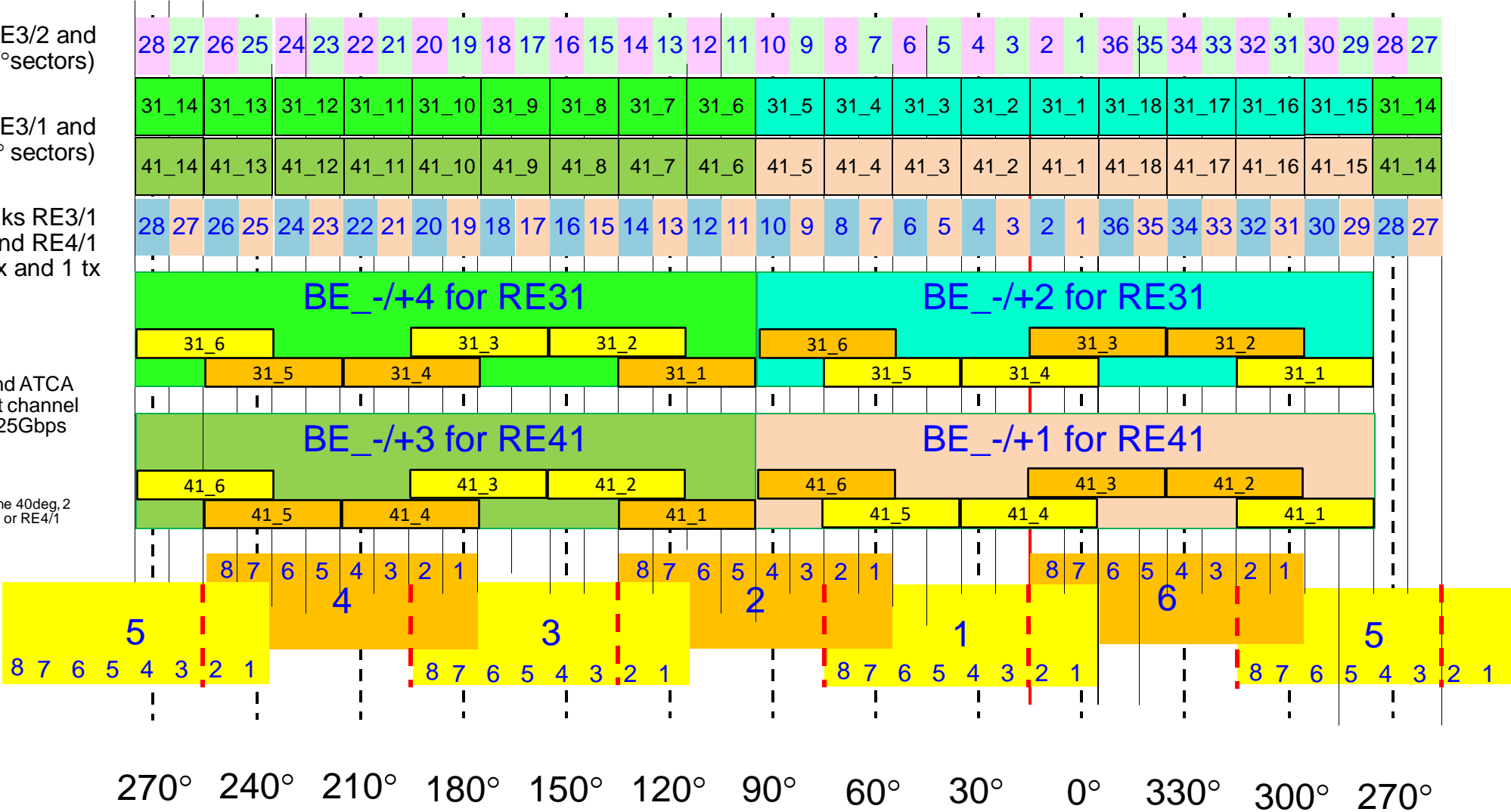
iRPC chambers in RE3/1 and RE4/1 Endcap (20° sectors)

iRPC FEB optical links RE3/1 and RE4/1  
One link include 1 rx and 1 tx

iRPC backend ATCA board Output channel to EMTF a5 25Gbps line rate

Outputs:  
1 25Gbps fiber= one 40deg, 2 chambers of RE3/1 or RE4/1

EMTF sector (60°+neighbor 20°)



# iRPC FEB-BE/TRG-EMTF 光纤跳线连接方案

## ◆ iRPC BE输入:

- 每个后端触发电子学插件连接18路前端电子学, 协议: 4.8Gbps GBT

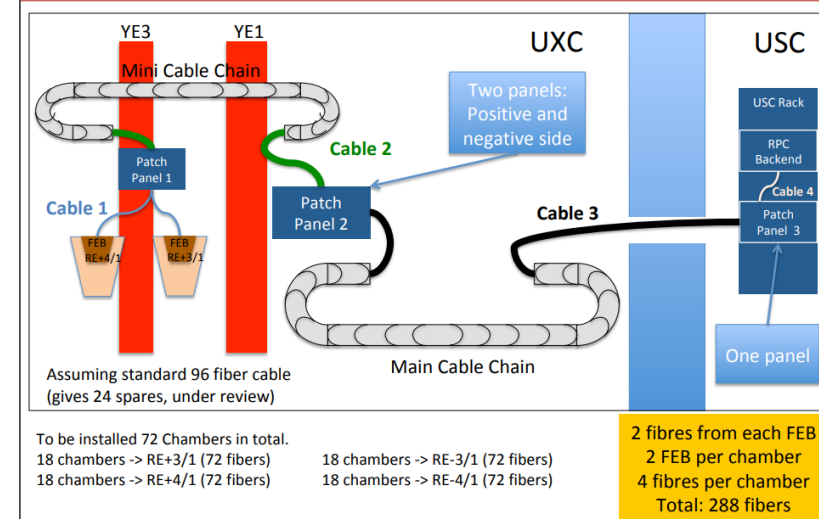
## ◆ iRPC BE输出:

- 每个插件输出6路到EMTF, 协议: 25Gbps, CSP.

MTP fiber channel number	iRPC BE board channel
1#	31_1 (41_1)
2#	31_2 (41_2)
3#	31_3 (41_3)
4#	31_4 (41_4)
5#	31_5 (41_5)
6#	31_6 (41_6)
7#-12#	--

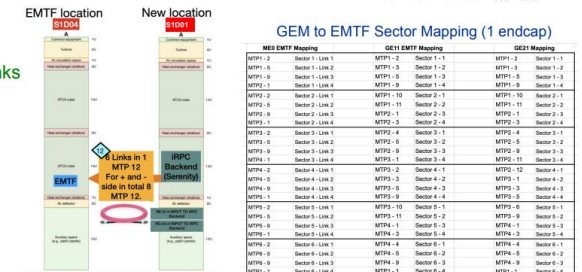
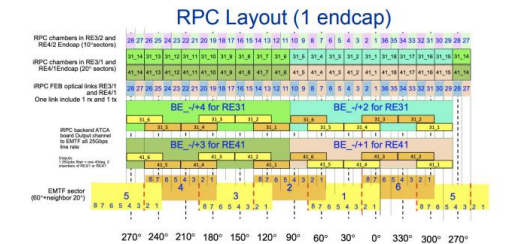
- Fiber re-mapping in EMTF side Patch panel.

## 3.1 and 4.1 station fiber system components



## iRPC and GEM to EMTF

- \* 8 iRPC Serenity BE Boards
  - 6 links per BE board to EMTF Patch Panel
- \* GEM X2Os
  - 28 total MTP12s at EMTF end
    - 12 for ME0
    - 8 for GE11
    - 8 for GE21
- \* 12 EMTF X2Os
  - 12 GEM input links each
    - 4 per station
  - 4 iRPC input links each
- \* Link Info
  - Protocol: 25G CSP
  - MTP12 OM4 cables
  - Patch panels on EMTF end to handle links



# iRPC BE-EMTF 链路数据格式 v1.2

- 1 BEE-EMTF LINK covers 40 ° (RE3/1 or RE4/1)
- 1 BE has 6 output channels;
- 1 EMTF has 4 input channels for iRPC BE.
- Data format to EMTF(512bit used one bx):

iRPC Backend to EMTF data format(512 bit)															
RE3/1(RE4/1) link_n				RE3/1(RE4/1) link_n				RE3/1(RE4/1) link_n+1				RE3/1(RE4/1) link_n+1			
3+/-_n_c1	3+/-_n_c2	3+/-_n_c3	3+/-_n_c4	resv	resv	resv	resv	3+/-_n+1_c1	3+/-_n+1_c2	3+/-_n+1_c3	3+/-_n+1_c4	resv	resv	resv	resv
n stands for chamber number: 1, 3, 4, 6,7,9,10,12,13,15,16,18															

- Resv positions for 4 clusters per 10 deg.
- Data format of cluster output:

cluster(32bit)				
link number	Sub_bx	Segmnet_info	Strip_info	Cluster Size
5bit	6bit	9bit	9bit	3bit

Link number: 5bit shows offset of 10 deg(TBD)

Sub\_bx(6 bits): 4 bits are used, 2bits resv

segment\_info(9 bits): (Theta) 6 bits are used for local coordinate, 3bits resv

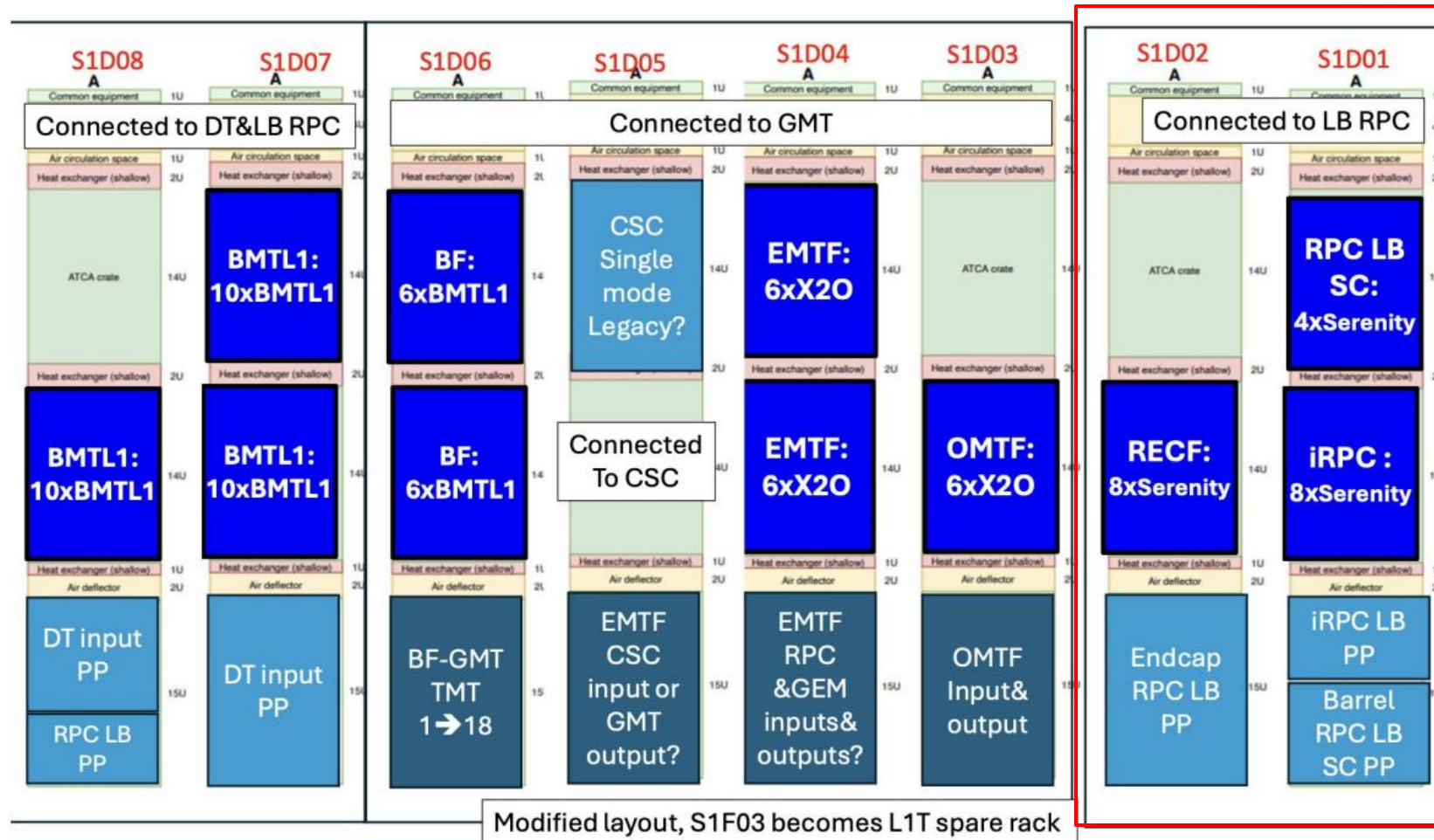
Strip\_info(9 bits):(Phi) 7 bits are used for local coordinate,2 bits resv

Cluster Size: 3bit are used for cluster size

# CMS 触发部分安装位置 (in P5)

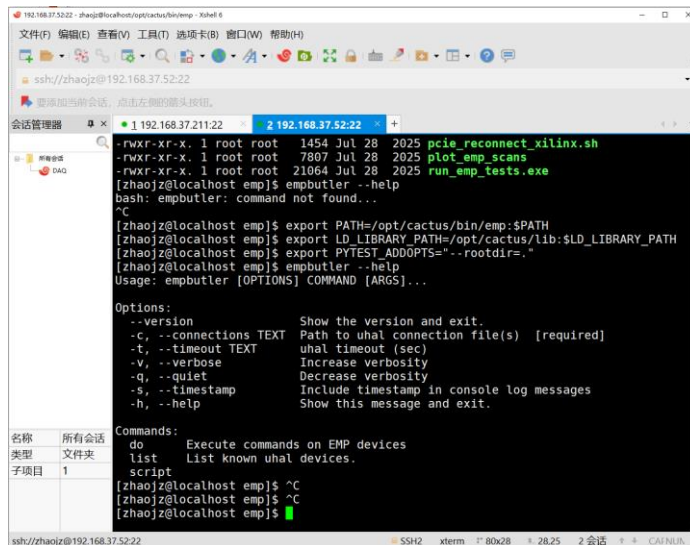
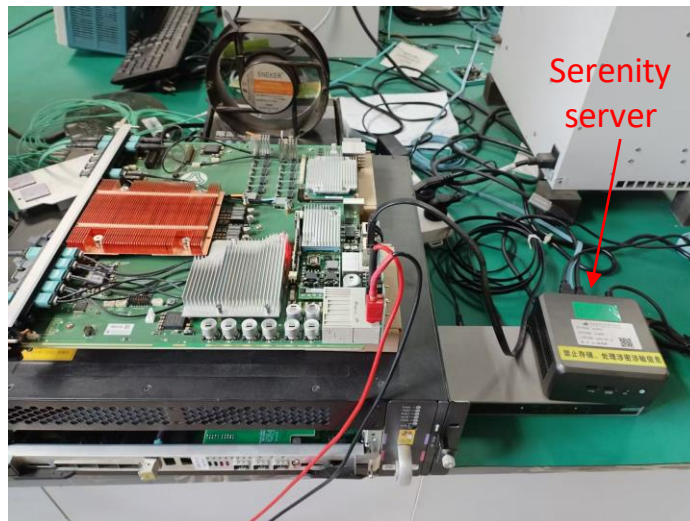


## S1D Overview

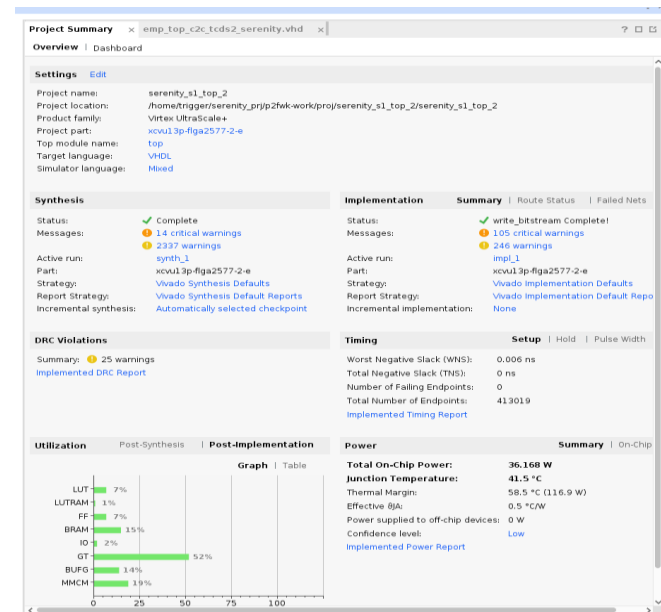





# ATCA Serenity开发进展

- ◆ ATCA Serenity板设计完成，已拿到两块样板，性能指标满足课题验收要求；
- ◆ 8板 ATCA serenity板批量生产进行中，预计27年上半年拿到8套插件。
- ◆ Serenity emp 软件开发平台搭建成功
- ◆ Serenity emp 固件框架搭建成功
- ◆ 固件开发进展：
  - 基于MTCA完成了样机系统功能验证，
  - 固件从MTCA到ATCA的移植工作进展顺利。



```
(ipbb) [trigger@localhost serenity_s1_top_2]$ source /home/trigger/vivado2022root.sh
(ipbb) [trigger@localhost serenity_s1_top_2]$ ipbb vivado package
Bitfile does not exist. Starting a build ...
bitfile
-----
bitfile - Starting Vivado -----
bitfile Vivado's
bitfile - Started Vivado 2022.2 -----
bitfile current_project -quiet
bitfile current_project -quiet
bitfile Vivado% open_project /home/trigger/serenity_prj/p2fwk-work/proj/serenity_s1_top_2/serenity_s1_top_2/serenity_s1_top_2.xpr
bitfile | open_project /home/trigger/serenity_prj/p2fwk-work/proj/serenity_s1_top_2/serenity_s1_top_2/serenity_s1_top_2.xpr
src/addrtab/emp_payload.xml
src/hashees.txt
src/summary.txt
src/serenity_s1_top_2.bit
[16:48:53] Package vivado.py:1110
package/serenity_s1_top_2_localhost_localdomain_260423
1648_taz successfully Created.
bitfile Vivado% quit
bitfile quit
bitfile INFO: [Common 17-206] Exiting Vivado at Thu Apr 23 16:48:53 2026...
bitfile - Terminating Vivado (pid 37496) -----
(ipbb) [trigger@localhost serenity_s1_top_2]$
```

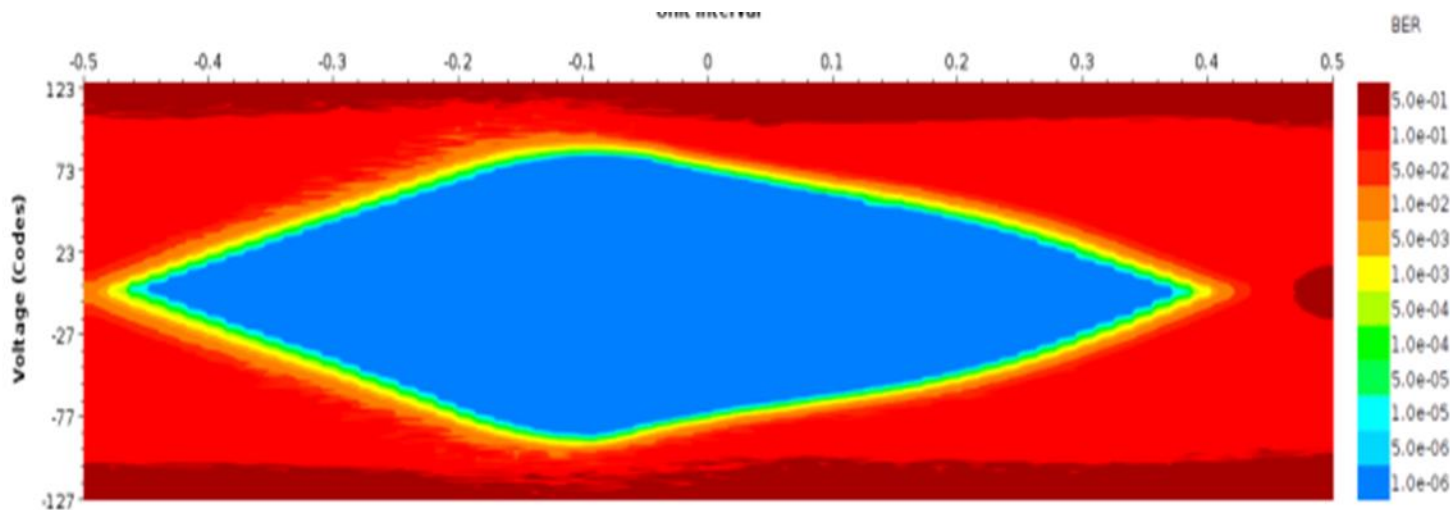


 Auto detected link 1	Quad_120/	25.651 Gbps	5.897E15	0E0	1.696E-16	<input type="button" value="Reset"/>	PRBS 7-bit
 Auto detected link 10	Quad_234/	10.260 Gbps	2.359E15	0E0	4.239E-16	<input type="button" value="Reset"/>	PRBS 7-bit
 Auto detected link 11	Quad_235/	4.810 Gbps	1.106E15	0E0	9.044E-16	<input type="button" value="Reset"/>	PRBS 7-bit

◆ ATCA Serenity触发电子学板核心指标:

- 高速数据传输速率单通道达到25Gbps,
- 眼图张开度达到80%;
- 误码率小于10E-16.

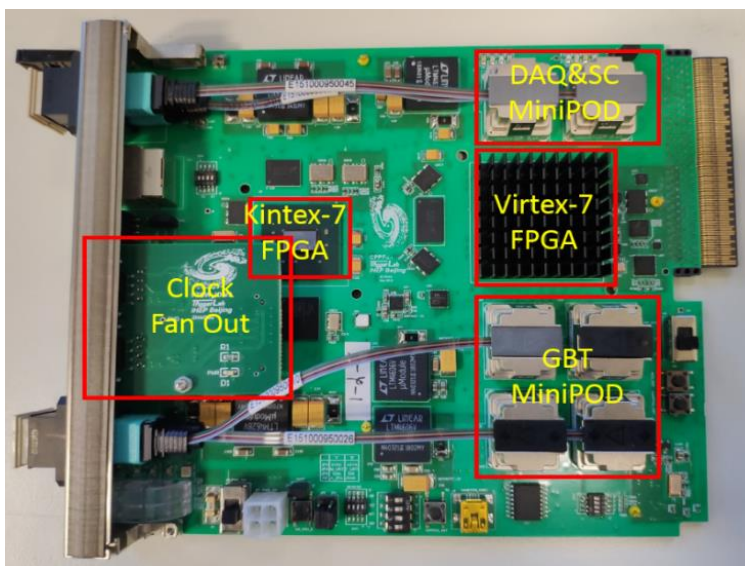
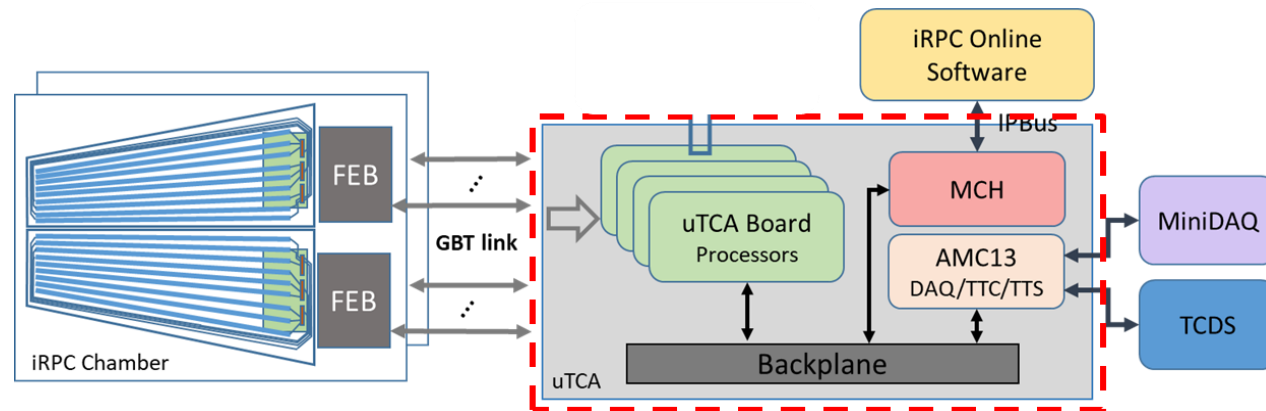
◆ 好于课题指标



Summary		Metrics	Settings		
Name:	SCAN_3	Open area:	5057	Link settings:	N/A
Description:	Scan 3	Open UI %:	80.00	Horizontal increment:	1
Started:	2026-Mar-03 06:24:06			Horizontal range:	-0.500 UI to 0.500 UI
Ended:	2026-Mar-03 06:24:43			Vertical increment:	1
				Vertical range:	100%

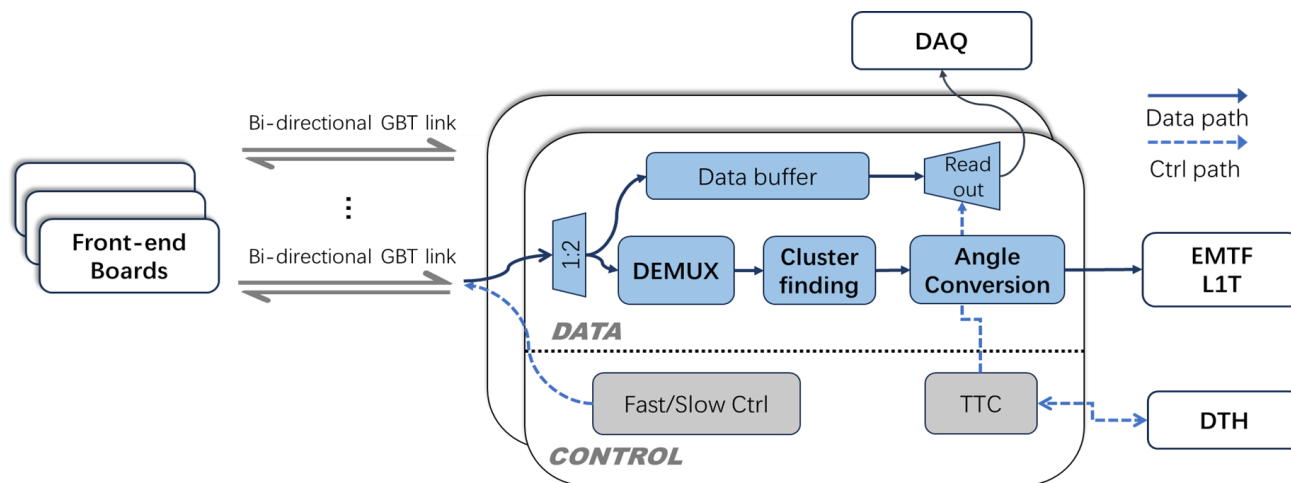
# iRPC后端触发电子学 MTCA原理样机系统

- ◆ 在ATCA硬件生产出来前，开发了基于MTCA的iRPC后端触发电子学样机系统，用于后端触发电子学的原理验证。
- ◆ 开发了数据对齐，簇查找，DAQ数据读出，快慢控制分发等核心功能。
- ◆ 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。



高能所触发团队开发触发电子学板

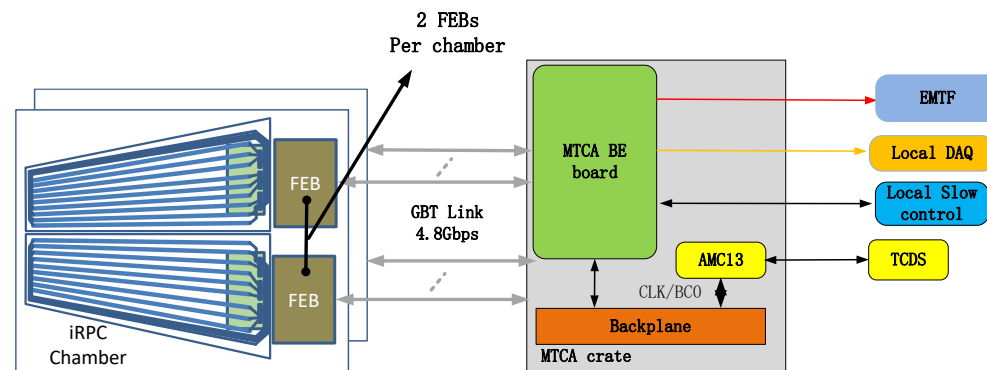
基于MTCA的后端触发电子学Demo系统架构图



iRPC后端触发电子学固件架构

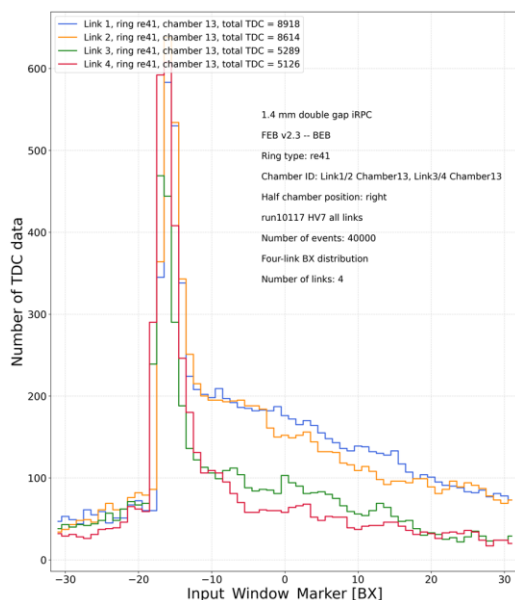
# iRPC后端触发电子学 MTCA原理样机P5取数成功

- ◆ 在CMS P5实验现场系统搭建：
  - 采用全局时钟/BCO信号，全局触发信号
  - 连接两块iRPC探测器室，四路电子学。
- ◆ 在稳定束流对撞的情况下，进行了随机取数，自触发取数和系统触发取数。
- ◆ 完成样机功能验证。

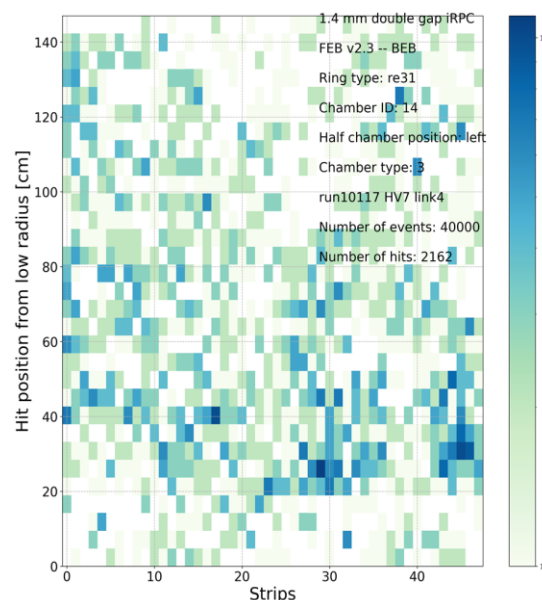


1 link including 1 tx and 1 rx

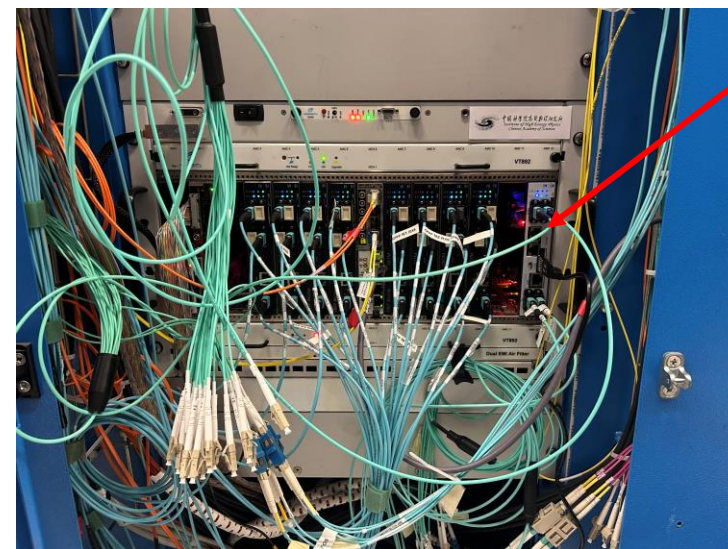
iRPC后端触发电子学P5安装结构图



readout window distributions with global trigger



2D particle hit with global trigger



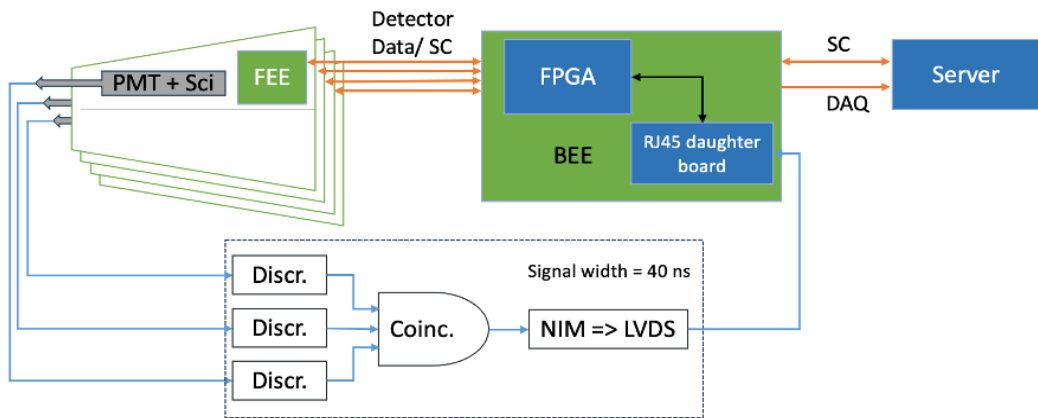
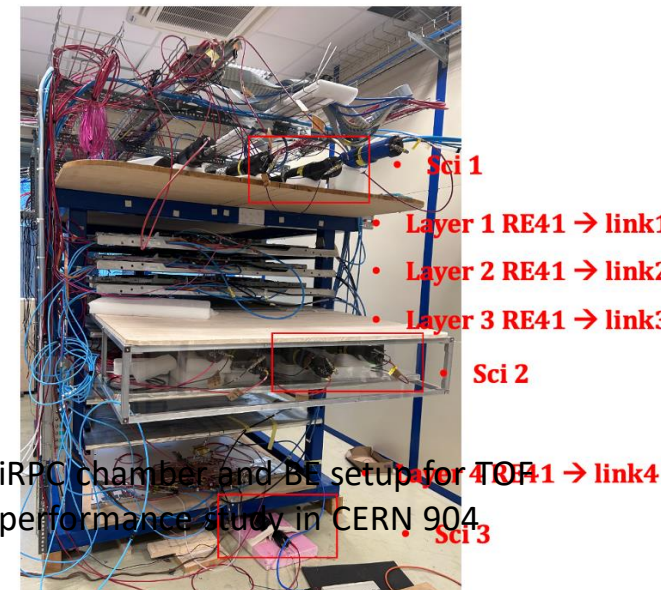
iRPC后端触发电子学P5安装现场

# iRPC系统TOF性能研究

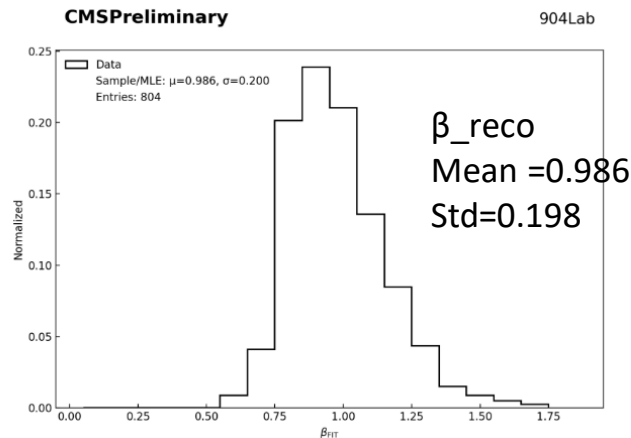
- ◆ 采用四层探测器符合，MTCA RPC后端触发电子学进行宇宙线取数，研究 iRPC 探测器TOF性能；
- ◆ 通过径迹重建，研究iRPC系统测量粒子飞行速度
- ◆ 研究后端触发电子学用于HSCP粒子寻找时的读出窗口： $\geq 8$  BX



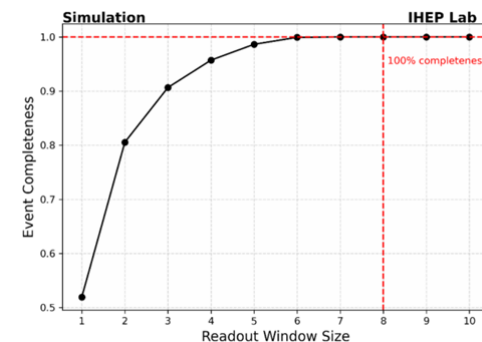
hit map after selection



系统信号连接示意图



系统搭建实物图



- DAQ window  $\geq 8$  BX
- Buffer depth  $\geq 500$  BX

# MTCA后端电子学用于iRPC QC3系统

- ◆ iRPC MTCA BE used for iRPC QC3 system
- ◆ iRPC QC3 : Chamber during construction and with cosmic @ assembly sites: Gas leak, dark current, cosmic (noise, eff, cluster size, HV).
- ◆ 904测试系统已完成全部80块iRPC chamber的测试。



904 QC3 system



	Required	Assembled	QC4.2 Long term HV stability	QC4.3 (final cosmic test done)	Installed
RE3/1	36	41	40	40	18
RE4/1	36	40	40	40	18
Total	72	81	80	80	36

# 总结及下一步计划

## ◆ 总结：一级触发升级子课题按计划进行顺利

- ATCA Serenity设计完成，**指标满足课题验收要求；**
- ATCA Serenity量产预计27年上半年完成；
- ATCA Serenity固件开发平台在CERN 904和北京实验搭建完成；
- 基于MTCA开发了后端触发电子学Demo系统
  - 第一次在CMS实验P5现场成功成功取到iRPC的数据；
  - 验证了iRPC 后端触发电子学关键技术的可行性；
  - 对RPC的时间测量性能进行了详细研究
- MTCA BE系统固件往ATCA移植工作进展顺利。

## ◆ 下一步计划：

- 继续MTCA iRPC后端触发电子学固件到ATCA的移植与开发
- ATCA Serenity样机系统与iRPC探测器及EMTF联调

感谢各位领导专家！

# 人才培养、文章发表及会议报告

## ■ 人才培养情况:

- 研究生在读: 2人: 李灿明, 赵钱缘
- 博士毕业3人: 宋嘉宁, 侯庆峰, 刁伟卓

## ■ 文章:

1. Application of the new Check-Sort-Push mechanism in the iRPC subsystem for the CMS Phase-2 upgrade , Z.-A. Liu, W. Diao, J. Zhao, Q. Hou, J. Song, H. Kou, P. Cao, W. Gong, S. Dong, H. Wang, Published 21 January 2026 • © 2026 The Author(s), [Journal of Instrumentation](#), [Volume 21](#), [January 2026](#) Citation Z.-A. Liu *et al* 2026 *JINST* 21 P01021 DOI 10.1088/1748-0221/21/01/P01021

## ■ 会议报告:

1. Jingzhou ZHAO, RPC Backend Electronics (BE) and Trigger firmware status, hase-2 L1T Muon Subsystem Group Meeting, <https://indico.cern.ch/event/1607787/>
2. Jingzhou ZHAO, RPC Backend Electronics (BE) and Trigger status, 2025 Annual Review-Muons, <https://indico.cern.ch/event/1593777/>
3. ZHAO, RPC Backend Electronics (BE) and Trigger progress, L1 Muon upgrade meeting, <https://indico.cern.ch/event/1662940/>
4. Jingzhou ZHAO, RPC Backend Electronic and Trigger progress, Spring 2026 Muon days <https://indico.cern.ch/event/1658337/>
5. 赵京周, **Progress of RPC BE and TRG**, 2026CMS Chinese Group Meeting, 26<sup>th</sup>, June. 2026
6. 赵钱缘, 面向HSCP需求的RPC电子学时间分辨需求研究, 2026CMS Chinese Group Meeting, 26<sup>th</sup>, June. 2026