



2026年8月考核报告

报告人：李灿明

导师：朱科军，赵京周

专业：核技术及应用

时间：2026.8.27

报告主要内容



■ CMS iRPC探测器实现首次真实对撞取数:

- 首次实现后端电子学与LHC的系统同步
- 首次使用CMS系统触发进行取数验证
- 首次完成后端电子学与EMTF的触发链路联调

■ iRPC ATCA系统新平台开发:

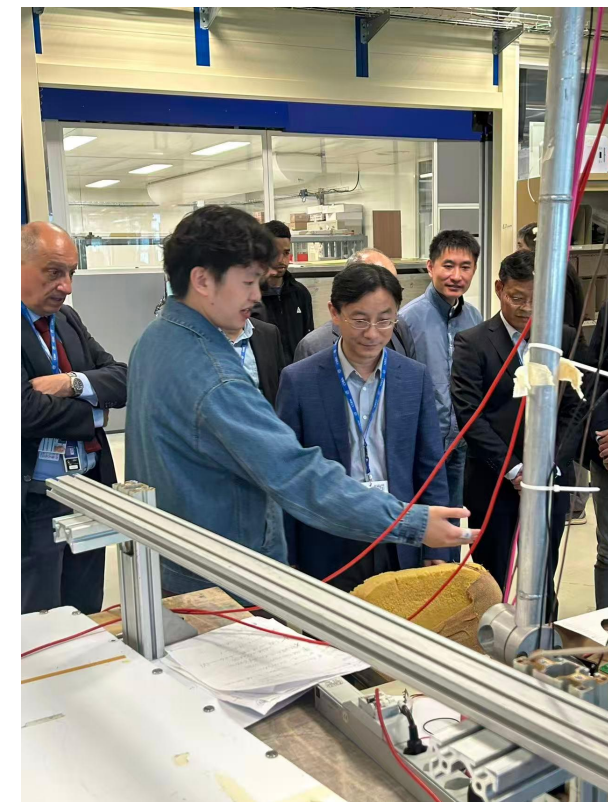
- 基于GTY硬核实现GBT传输协议及相位调整
- 基于新硬件平台serenity的ipbus慢控开发

■ 其他工作:

- 参加RPC2026并作大会报告
- 前端SEU处理机制讨论
- 后续工作计划



RPC合作组合影

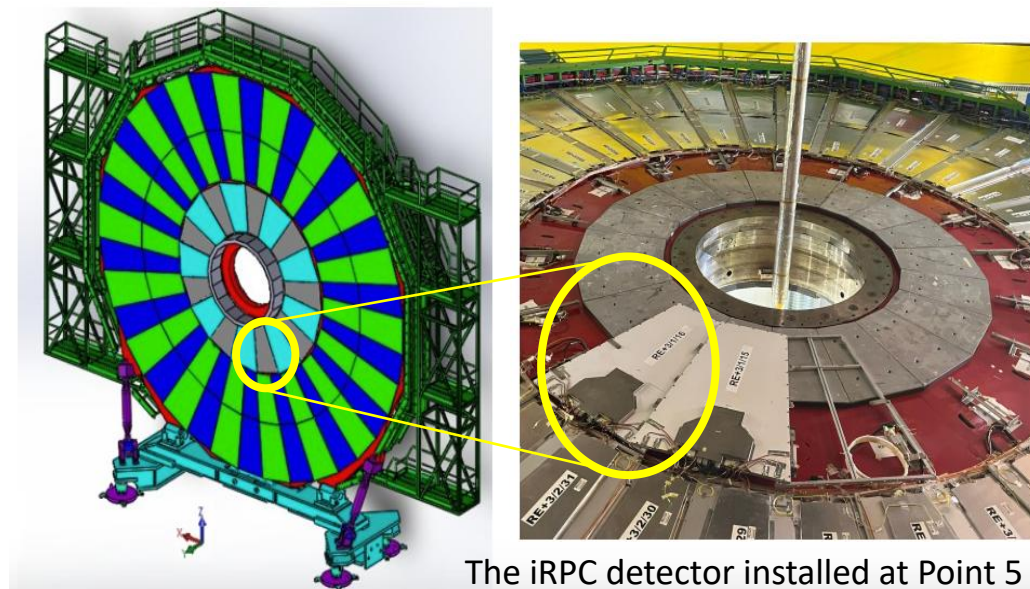


接待曹俊所长一行参观CERN实验室

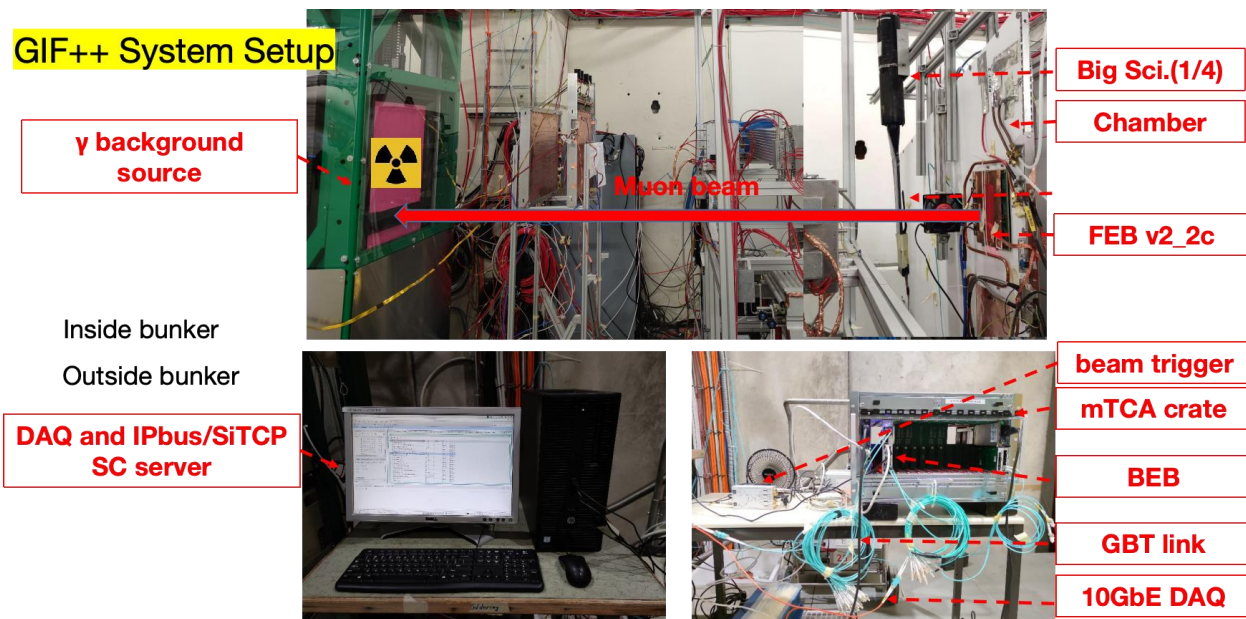
iRPC mTCA后端电子学样机开发:



- **研究动机:** iRPC 是 CMS 二期升级的关键组成部分, 旨在提升高亮度大型强子对撞机 (HL-LHC) 环境下的缪子触发性能和探测器冗余能力。课题组提出设计方案并承担iRPC后端电子学的研制。
- **初步测试:** 在CERN904实验室进行宇宙线取数和 GIF++ 束流取数。但仅在单板条件下测试, 未通过机箱AMC13插件接收系统时钟/触发信号; 未校准与CMS系统触发的延迟; 未完成与EMTF (端盖循迹插件) 在触发链路的验证
- **任务目标:** RPC合作组对样机系统的长期目标为在第三次长期停机 (2026/7) 之前, 利用真实的 LHC 对撞数据验证探测器及电子学性能。



The iRPC detector installed at Point 5



对撞点 (CMS point5) 系统搭建与验证:



■ 任务一: CMS TTC (Timing, Trigger and Control) 系统集成

- 通过 AMC13 将与 LHC 同步的时钟、BC0 信号和 CMS 全局触发信号接入后端电子学系统。

■ 任务二: 多种触发模式下的取数验证

- 验证自触发模式, 确认系统功能及触发算法运行正常。
- 接入 CMS 全局触发进行数据采集, 确认后端电子学系统已与 LHC 正确同步, 并能够稳定运行。

■ 任务三: 与 EMTF 开展联合测试

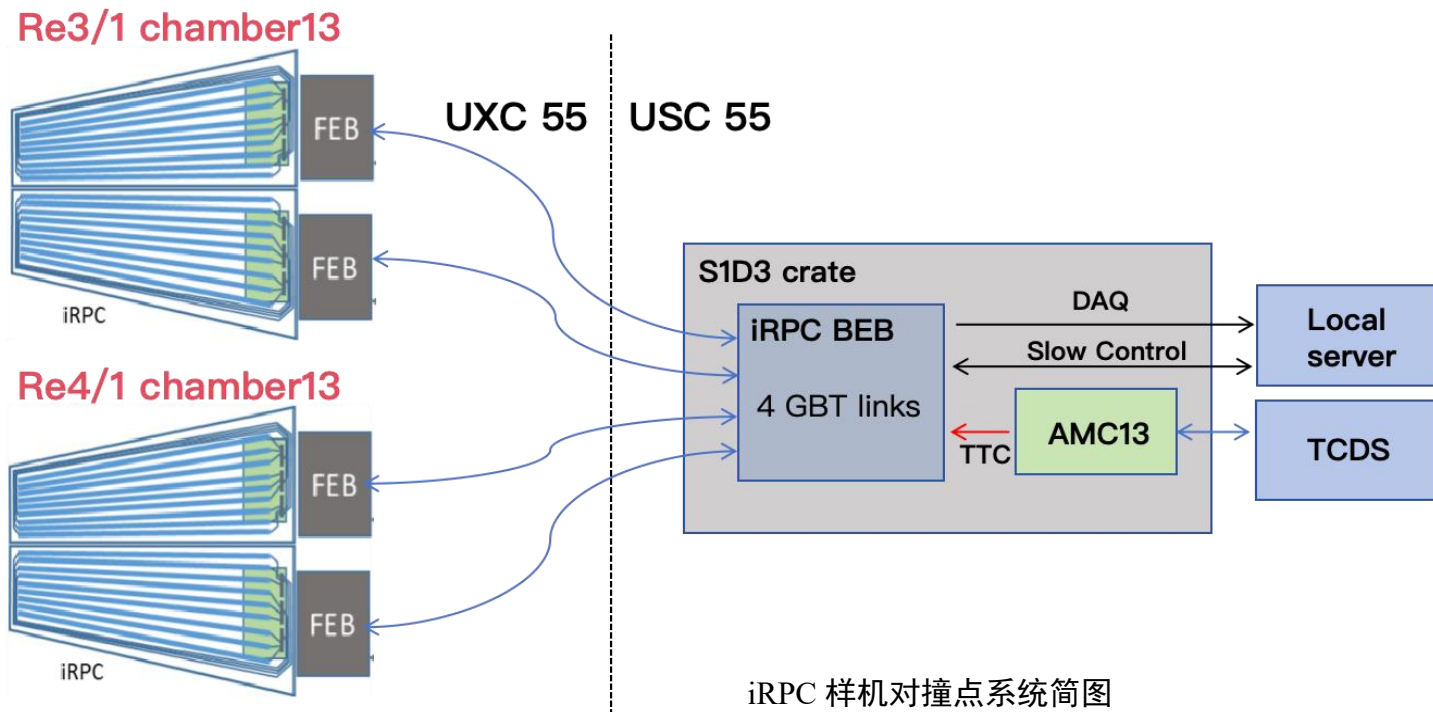
- 与端盖缪子轨迹插件 (EMTF) 开展联合测试, 确认 EMTF 能够正确接收 iRPC 簇团数据, 从而验证 iRPC 在一级缪子触发系统 (L1 Muon Trigger) 中的完整触发链路。

对撞点 (CMS point5) 系统搭建与验证:

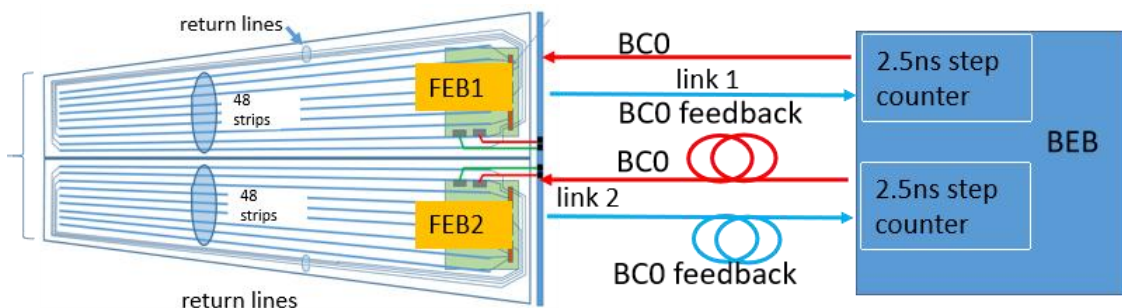


■ 系统搭建:

- 在mTCA机箱中使用一块后端电子学板, 通过四路GBT链路连接四块前端板 (两块探测器)
- 两块探测器分别位于RE3/1 sector13及 RE4/1 sector13, 选择同一sector以做两层符合分析
- 取数前测量并校准了由于光纤长度不同带来的前端时基延迟, 调整步长2.5ns



iRPC 样机对撞点系统简图



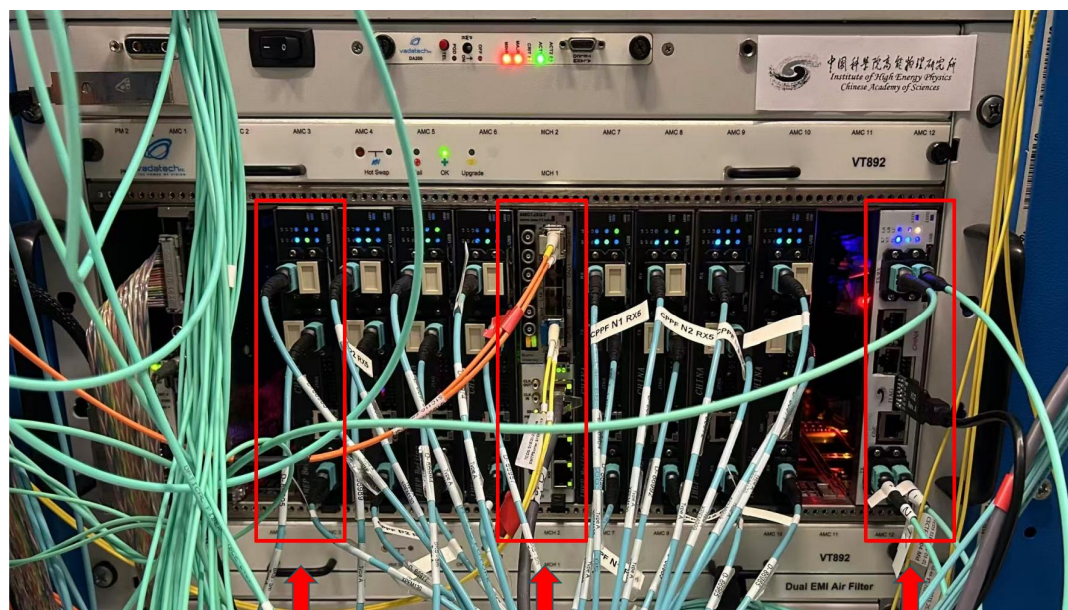
时基调整功能简图

对撞点 (CMS point5) 系统搭建与验证:



■ 任务一: CMS TTC (Timing, Trigger and Control) 系统集成:

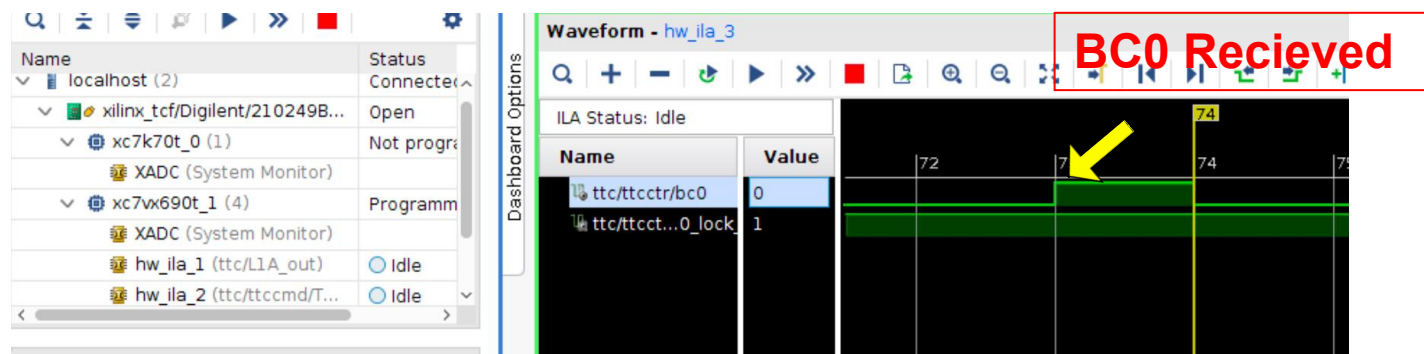
- iRPC BEB 安装在 S1D3 区域的 RPC Phase-1 CPPF 机箱中, 使用机箱内的一个空闲槽位。
- 利用机箱中已有的 AMC13 完成系统集成测试。在固件中成功接收并解析以下 TTC 信号: BC0 信号 / CMS全局一级触发信号 (Global L1A) / LHC 同步时钟信号



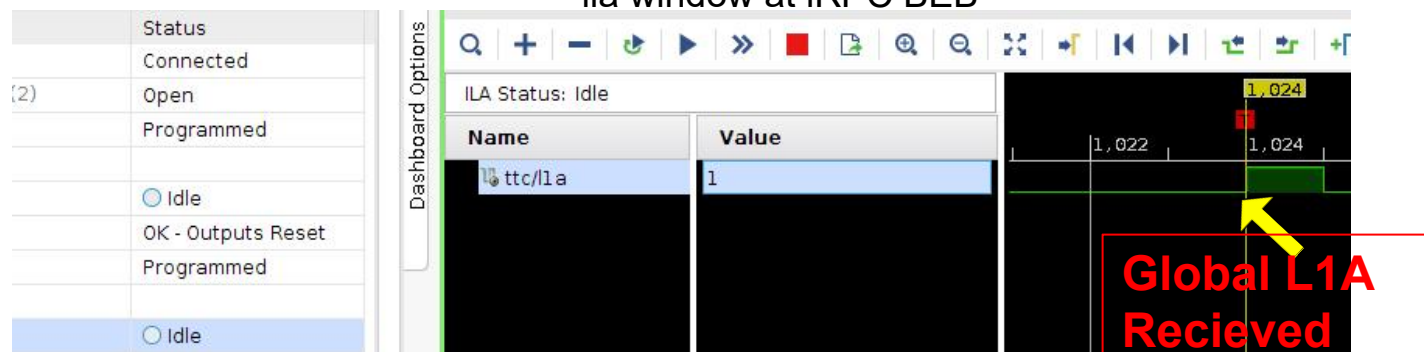
CPPF

AMC13

iRPC BEB



ila window at iRPC BEB

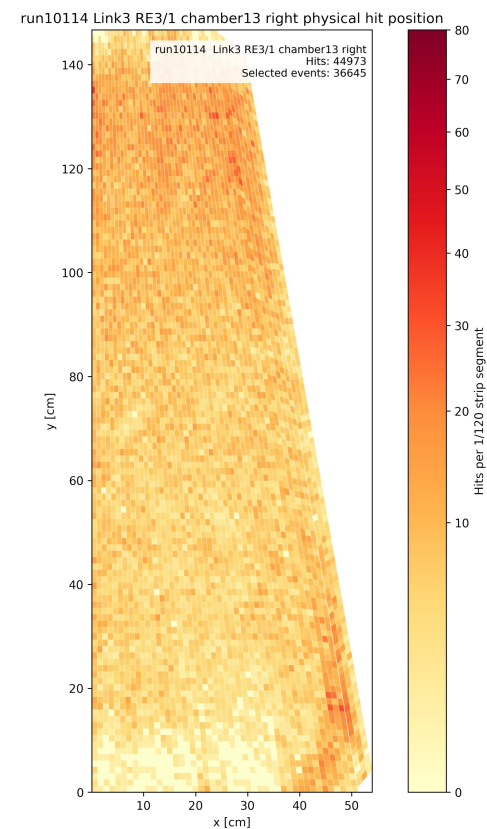
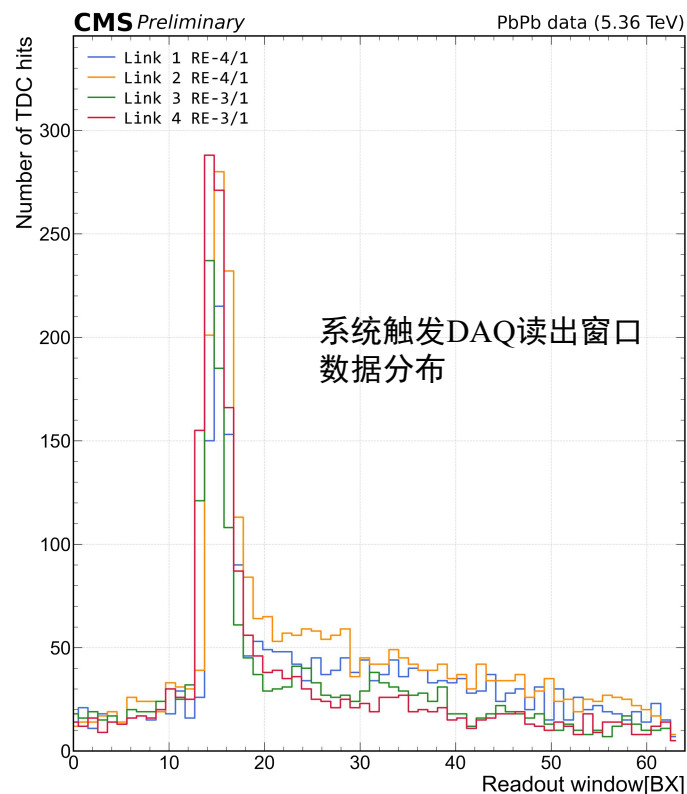
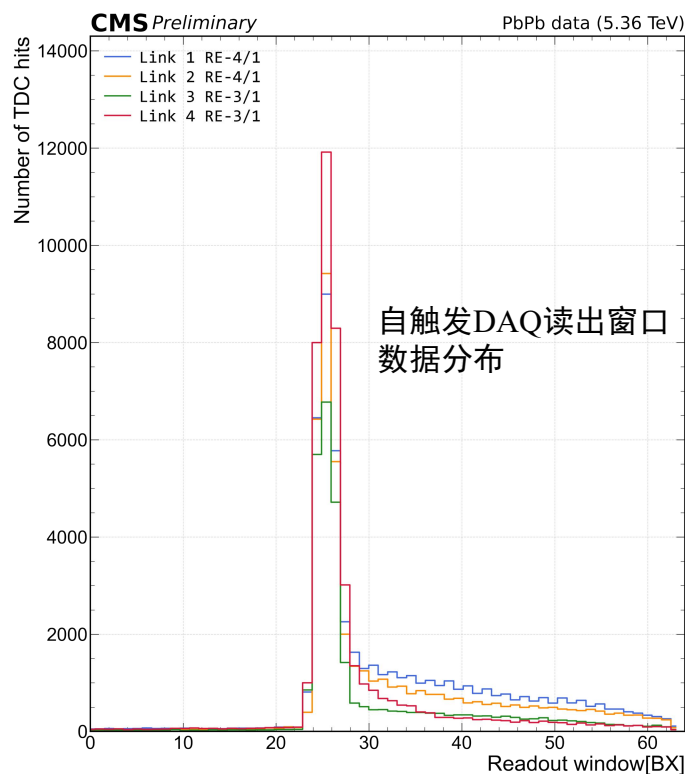


对撞点 (CMS point5) 系统搭建与验证:



■ 任务二：多种触发模式下的取数验证:

- 自触发：固件簇查找算法检测到有效簇后产生触发信息，取数进一步验证后端算法的正确性。
- 系统触发：通过估算系统L1A 触发延迟并相应调整后端延迟参数，在读出窗口内观测到清晰的数据峰，结果与预期基本一致。



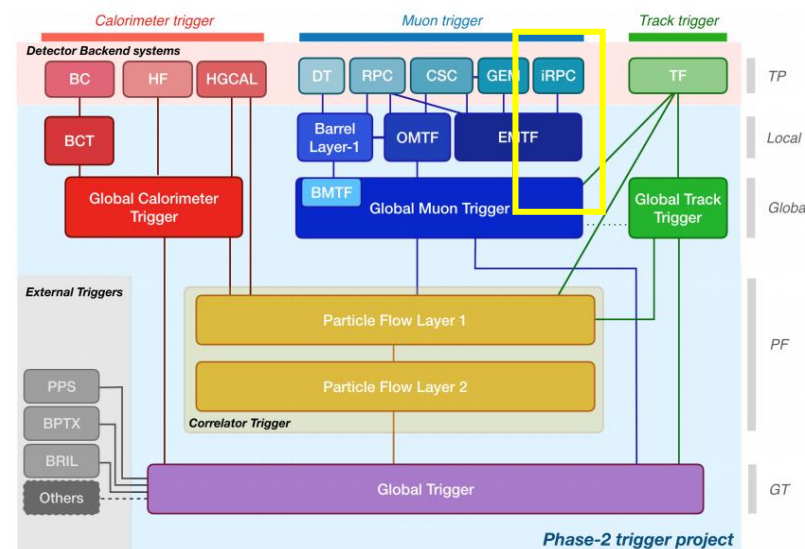
探测器粒子击中重建三维分布图

对撞点 (CMS point5) 系统搭建与验证:

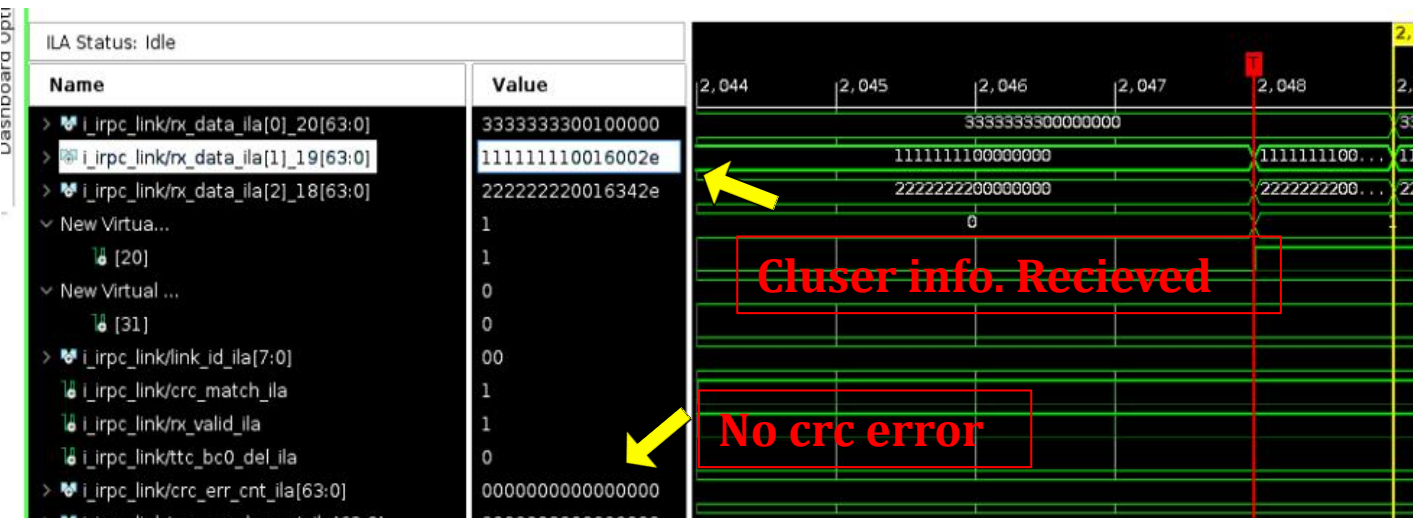


■ 任务三：与 EMTF 开展联合测试:

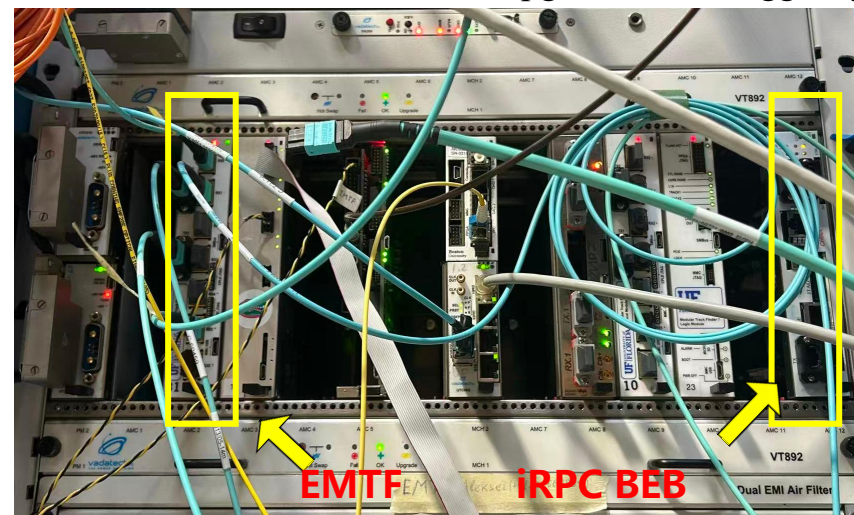
- 在 CMS 二期升级中, iRPC 将端盖区域的簇信息发送至端盖缪子轨迹寻找器 (EMTF), 参与一级触发 (L1 Trigger)
- CMS触发链路采用自定义CSP协议, 开发并测试
- CERN 904 和 CMS Point 5 的测试表明, iRPC 后端电子学与 EMTF 之间链路运行稳定, EMTF接收簇团数据格式符合预期。



Architecture of the CMS Phase-2 Upgrade muon trigger system



Data receive window from EMTF side



Fiber connection between iRPC&EMTF

iRPC ATCA系统新平台开发:



■ GTY硬核设计:

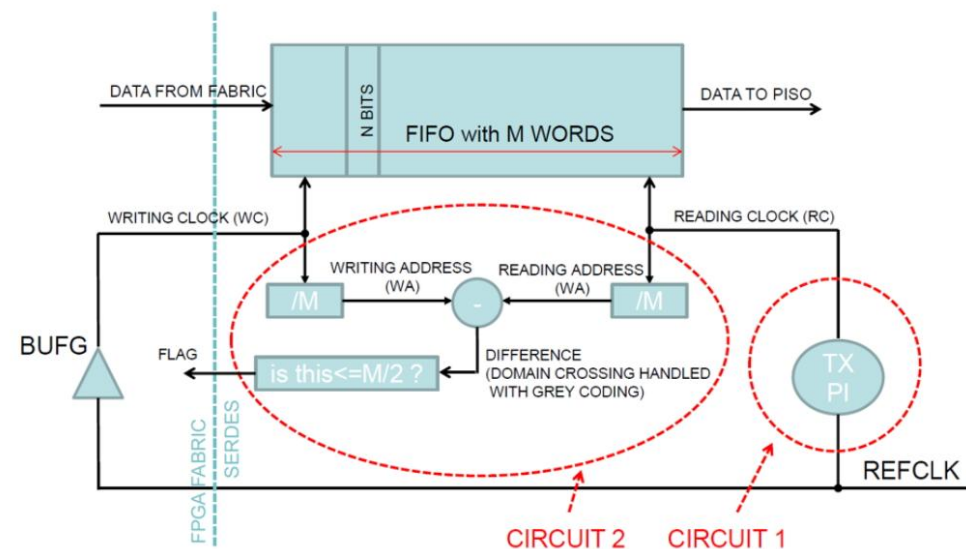
- GBT协议是phase2阶段iRPC前后端电子学之间数据与慢控传输所采用的链路协议，官方工程仅支持GTH/GTX；后端电子学平台Serenity板卡使用vcu13p FPGA芯片，搭载GTY高速串行收发器，自行设计底层硬核

■ 发送端相位不确定性调整:

- Transceiver 每次复位后，内部 PMA 分频器可能落在不同的相位状态，导致串行数据与参考时钟相位不一致
- 复现CERN HPTD团队基于相位插值器实现的相位调整，相位确定性在10ps内

■ 新硬件平台Serenity的ipbus慢控开发:

- 三级架构：PC 经以太网连接至板载 SOM，再由SOM通过片间高速接口转发至主FPGA的IPbus寄存器空间，实现对板卡固件的配置下发与状态回读。将以太网协议栈的处理负担从主FPGA卸载至SOM
- 目前已完成慢控链路的搭建与寄存器读写验证



相位插值调整功能框图

其他工作及后续计划



■ 参加RPC2026会议:

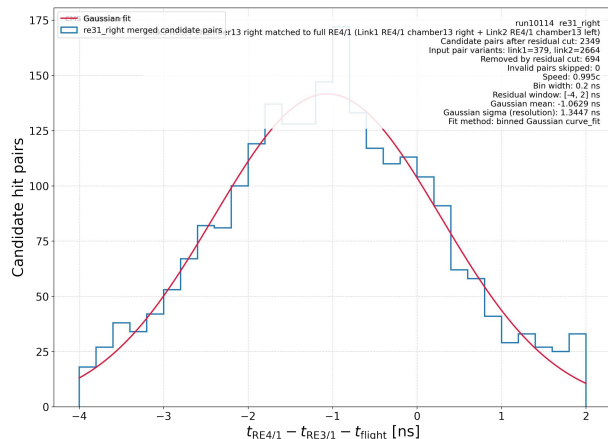
- iRPC样机开发与验证工作已在CMS General Meeting汇报并通过审查, 将于9月14日参加RPC2026并作口头报告

■ 前端SEU处理机制讨论:

- iRPC前端电子学处在高辐照环境下, 经测试平均每10分钟发生一次SEU现象
- 联合前端及Online software讨论检测、处理和上报机制

■ 后续工作计划:

- 针对Point5取数数据进行两层chamber间的符合与径迹分析, 已有关于探测器时间分辨的初步验证结果, 相关论文正在撰写中



请各位老师批评指正!