

CMS iRPC 簇查找算法与实现

侯庆峰

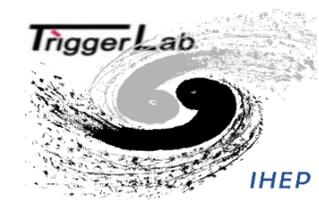
中国科学院高能物理研究所

2024-07-13

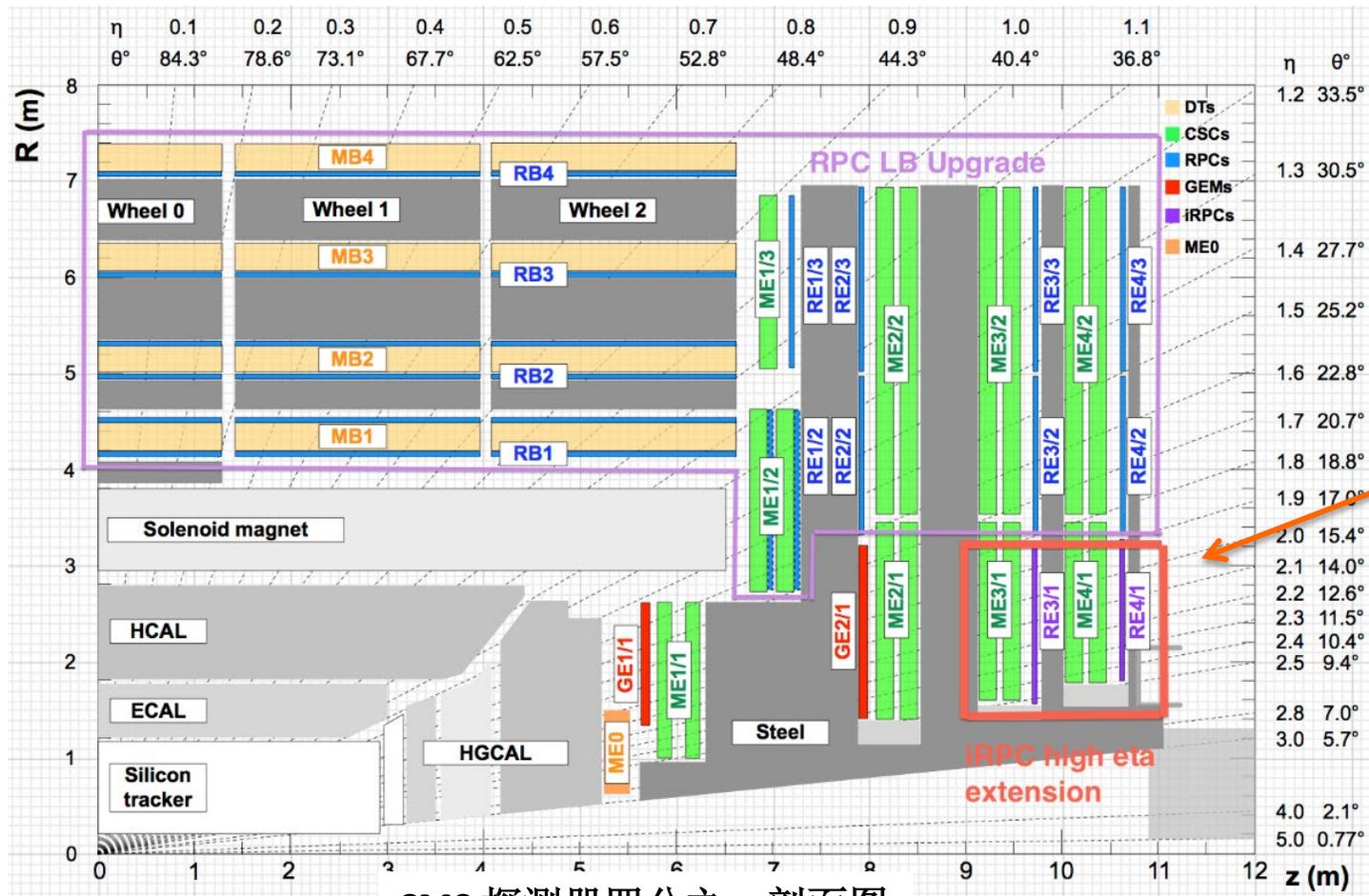
《大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级》 2024年年会



项目背景



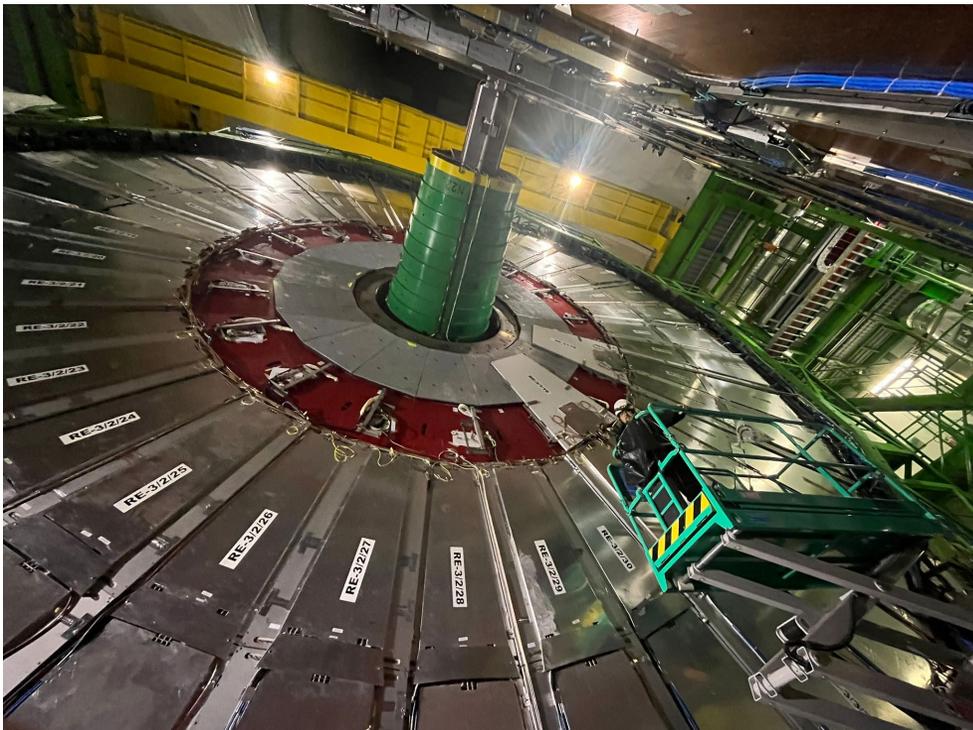
CMS 探测器Muon系统的二期升级，以应对HL-LHC更高的亮度。



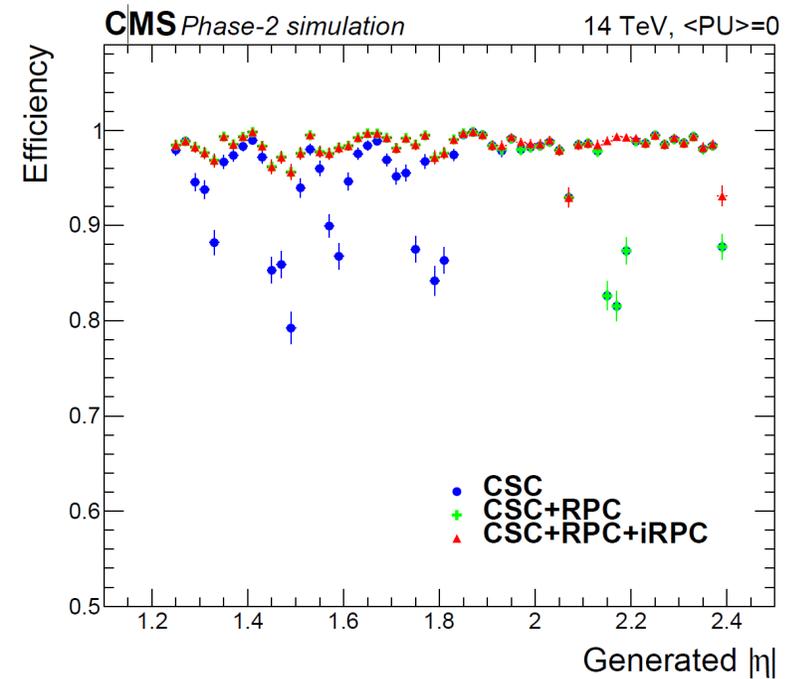
Extend the RPC coverage up to $|\eta| = 2.4$ to increase redundancy in high eta region in stations 3 and 4

CMS 探测器四分之一剖面图

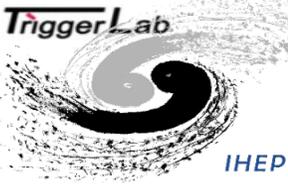
- RPC 系统二期主要升级之一：在高赓快度区域(RE3/1, RE4/1)增加了*i*RPC探测器。
 - 每个Chamber 20° ，每个Ring 包含18块Chamber, P/N两个端盖共需要72个Chamber
- 升级目的: 1. 为了提高端盖区缪子触发效率；2. 为了完成对物理过程更精确测量；3. 保证端盖区域Muon探测器的冗余性。



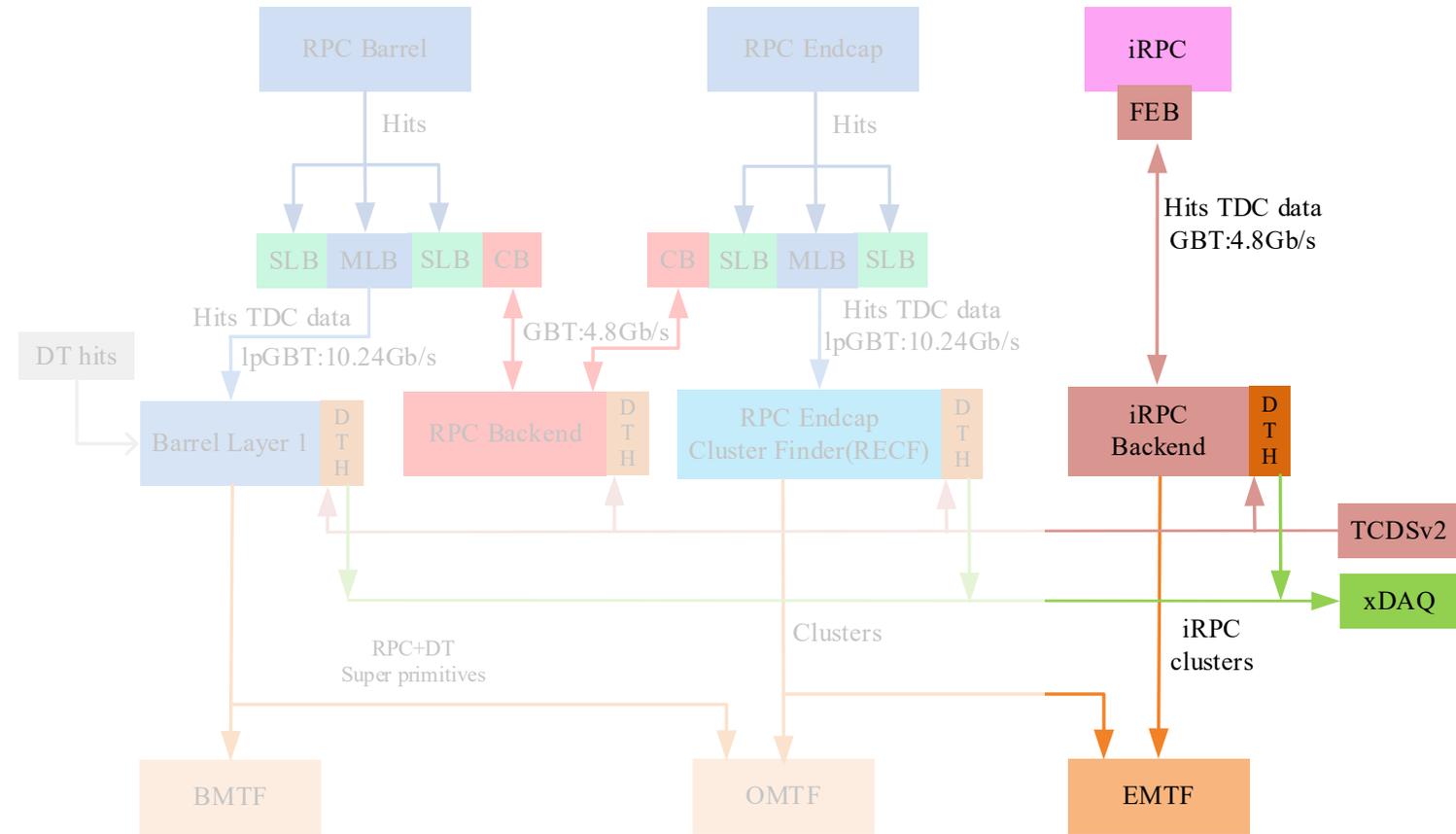
2023 年 YETS 期间 RE31 安装



不同配置下 Muon 一级触发效率与赓快度的关系



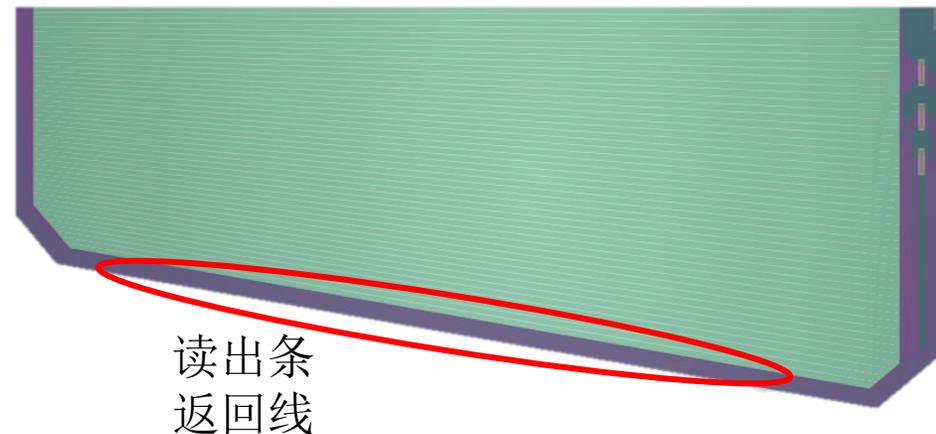
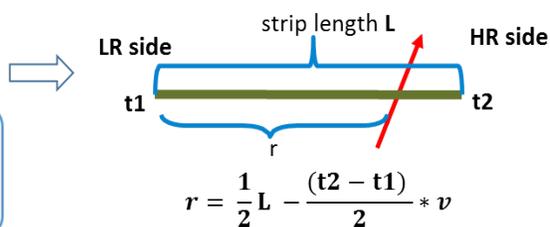
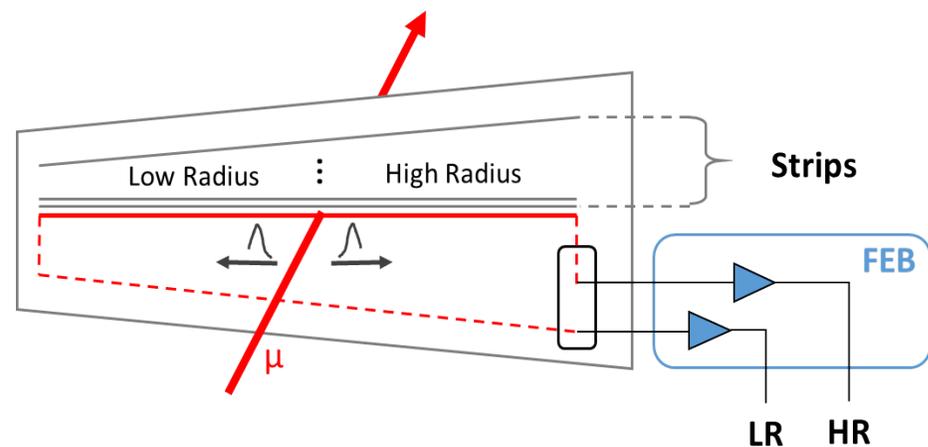
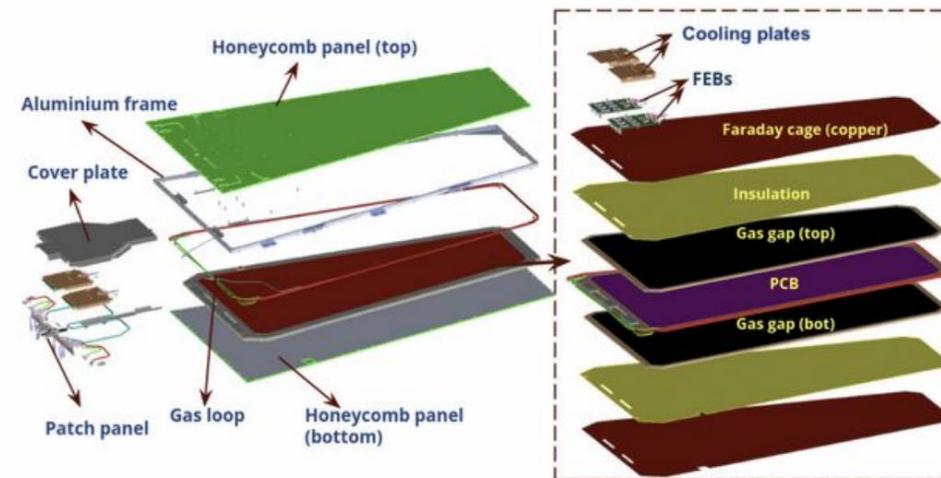
项目背景



- iRPC Backend:
 - Fast/Slow control and monitor
 - Data readout
 - **Trigger primitive (clusters) generation**
- Output to EMTF:
 - Cluster position(2D), Cluster Timing , Cluster Size
 - Clusters for endcap muon trajectory reconstruction

• iRPC探测器:

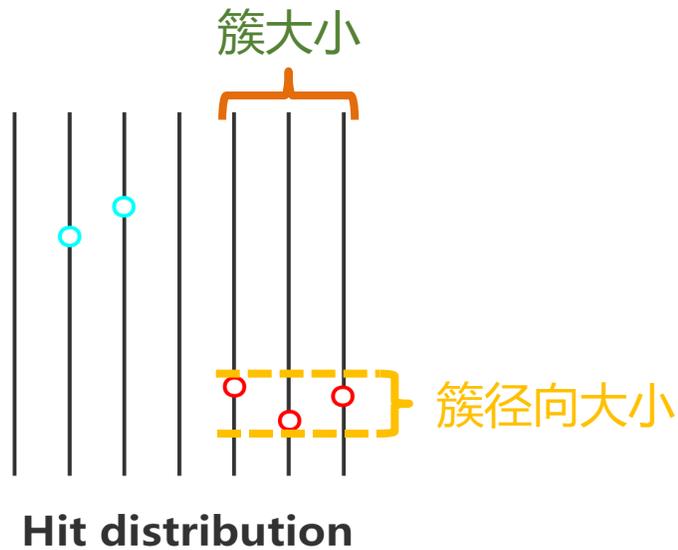
- 结构: 双气隙结构, 气隙厚度1.4mm.
- 每个Chamber 96根读出条, 20° 的覆盖区域
- 信号读出: 双端读出
 - 测量读出条两端信号到达时间的的时间差计算出击中位置 (Y坐标)
 - 读出条的位置给出一维信息 (X坐标)
- 每个iRPC Chamber由两块前端板读出, 共需144块前端板



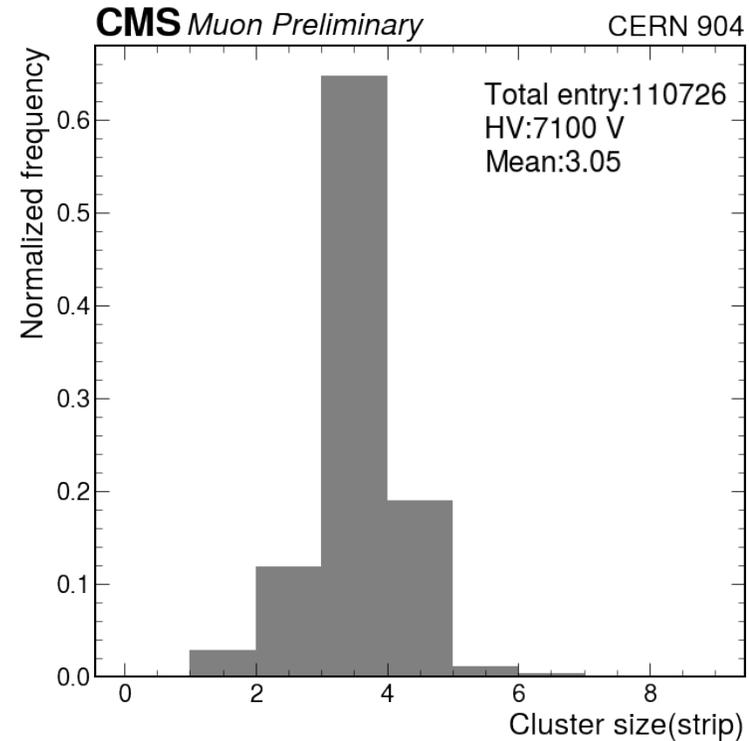
Half-chamber 读出条的结构图

簇团特征研究- 簇大小

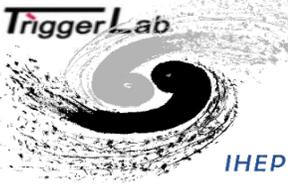
- 宇宙线测试对簇大小和径向大小进行研究，以确定进行簇查找的依据。
- 簇大小测试结果：
 - 在工作高压下，iRPC探测器的中Muon产生的簇团的簇大小分布中，平均值为3.05，且簇大小为3的簇占比超过**60%**，随着簇大小的增加和减小占比逐渐减小。簇大小大于等于6的部分仅占约0.45%。



RPC中簇大小和径向大小示意图

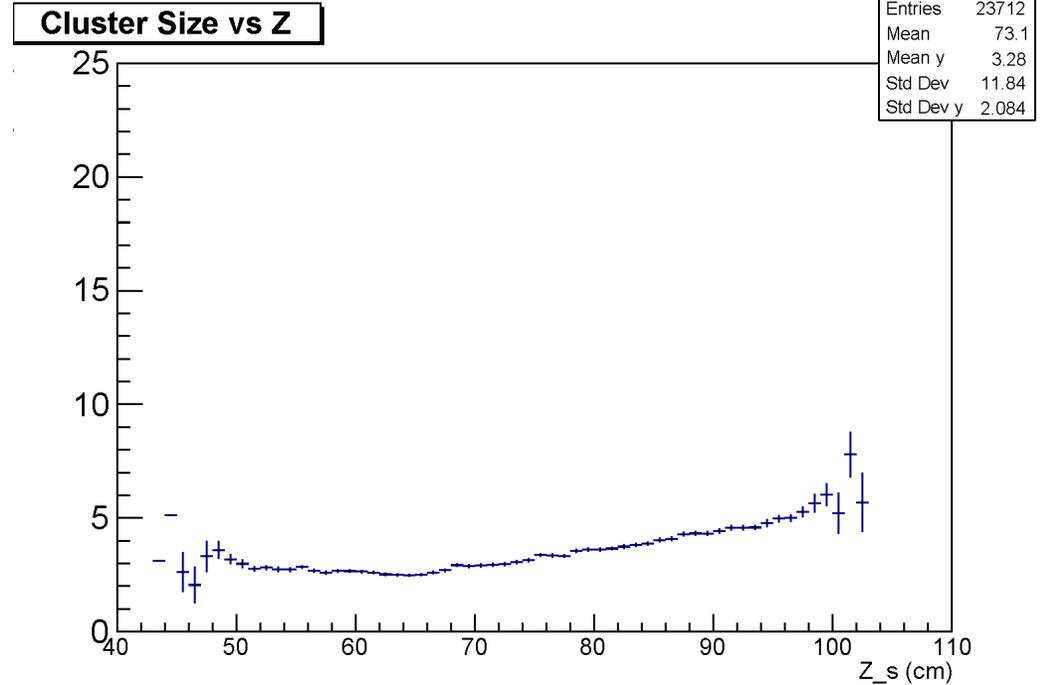
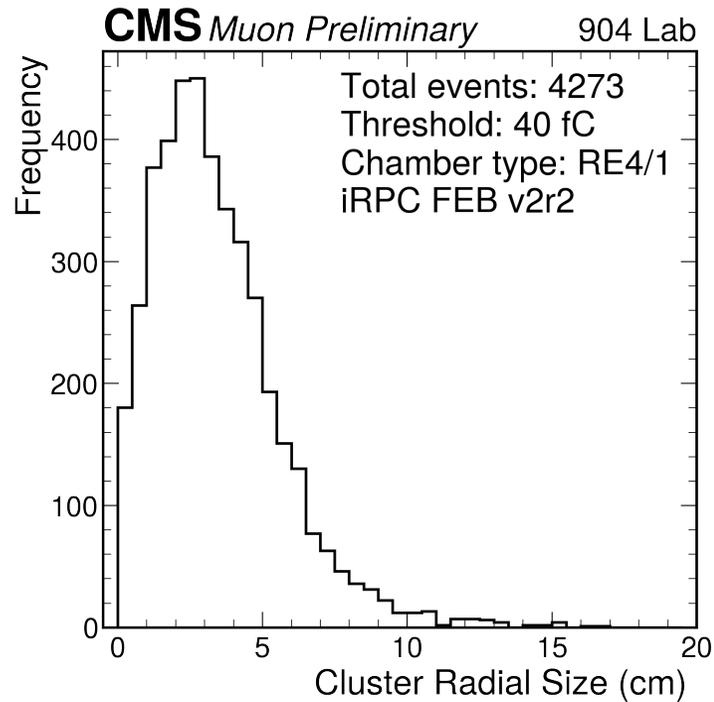


宇宙线事例中簇团大小分布



簇特征研究 - 簇团径向大小

- 测试结果：
 - 在工作高压下，簇团径向分布呈现出以~3cm为峰值，向两侧逐渐减少的类高斯分布，但是出现了很长的拖尾现象、以至于最大径向大小大于15 cm，有~98%的簇径向大小小于9cm。
 - 分析大径向大小的簇团是由于边缘小信号的时间游走效应造成的，通过Event Display的分析证实了分析猜想，偏离点多为簇边缘的点。
 - 同时研究了径向大小沿读出条方向的分布，当位置靠近LR时，径向大小增加，该部分由于靠近LR时平均簇大小变大，边缘信号时间游走效应加强。



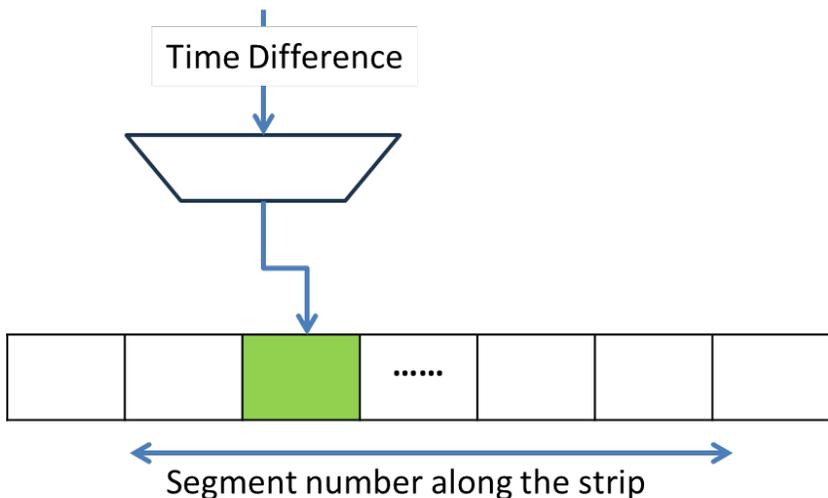
宇宙线事例中簇团径向大小分布 平均簇团径向大小与位置的关系（0cm为HR处）

固件算法设计

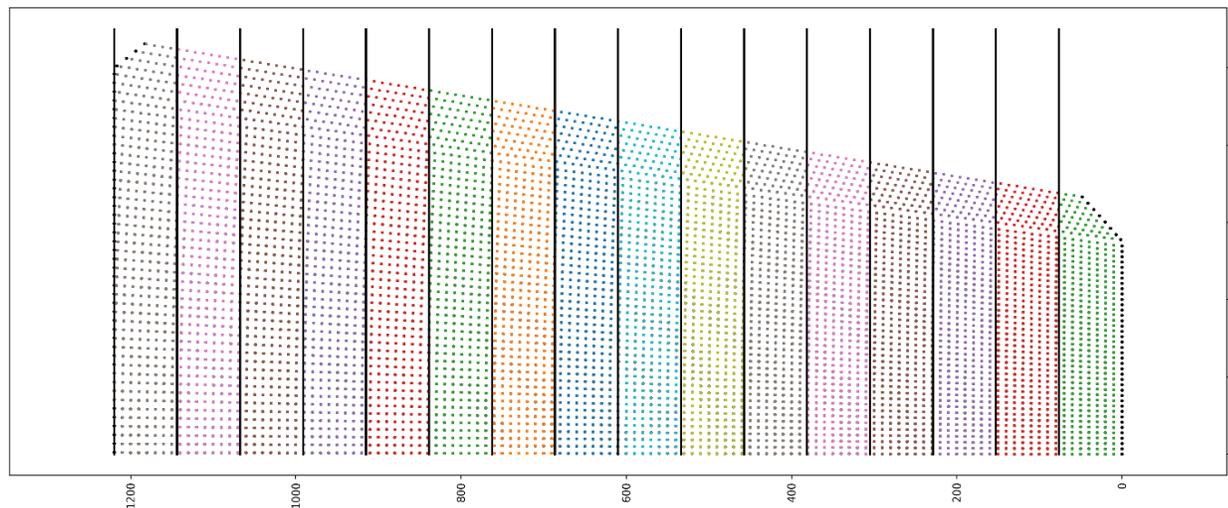
- 按照探测器实际几何形状将读出条进行分段，对读出条上击中位置进行**在线重建**，并将单一击中映射到二维矩阵中。
- 根据簇团径向大小分布、算法实现复杂度、硬件资源消耗和算法位置精度多方面考虑，将分段个数设为16，分段长度约为9 cm.
- 根据簇团的大小信息确定**感兴趣区域**，使用感兴趣区域在二维矩阵中进行簇团的聚类和查找，并根据查找的结果进行位置和时间参数的确定。



- 矩阵生成模块:
 - 使用独热码来表示击中在读出条上的位置。
 - 为每个strip建立**独立映射表**，该映射表由软件离线生成，实现从时间差到分段的映射。
- 优点:
 - 独立的映射表提高了实现和后期调整的灵活性，映射关系的微调直接更改映射表，无需修改固件代码。
 - 映射表的生成参考统一的全局坐标，消除了iRPC读出PCB的几何形状带来的影响。
 - 实现了从时间差到分段的直接映射，减少了在固件中的计算需求。



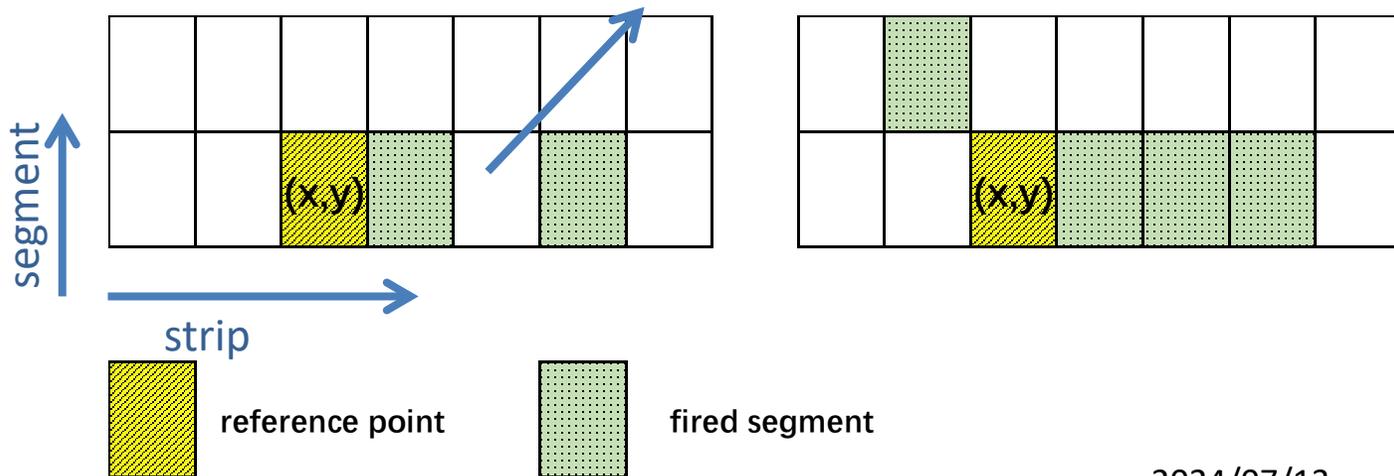
分段原理简图



探测器分段示意图

- 滑动窗口
 - 与传统滑动窗口方法不同，感兴趣区域的每次滑动以**簇团参考点**为基础，簇团参考点为二维矩阵中最左下的有效分段。
 - 感兴趣区域大小设置为：**7 strip * 2 segment**，与簇团参考点呈左二右四的分布。（该分布由簇团分布模式的统计性分析得来，感兴趣区域可以最大程度覆盖整个簇团的分布。
- 优点：
 - 以**簇团参考点**为基础的滑动方式大幅度减少了算法处理延迟，如果以每次一个单元的方式进行滑动扫描，那么每10度区域的扫描需要 $48 * 16 = 768$ 个时钟周期

Empty strip tolerance was added to mitigate the single-ended strip effect from **return line attenuation** and **failure channel**

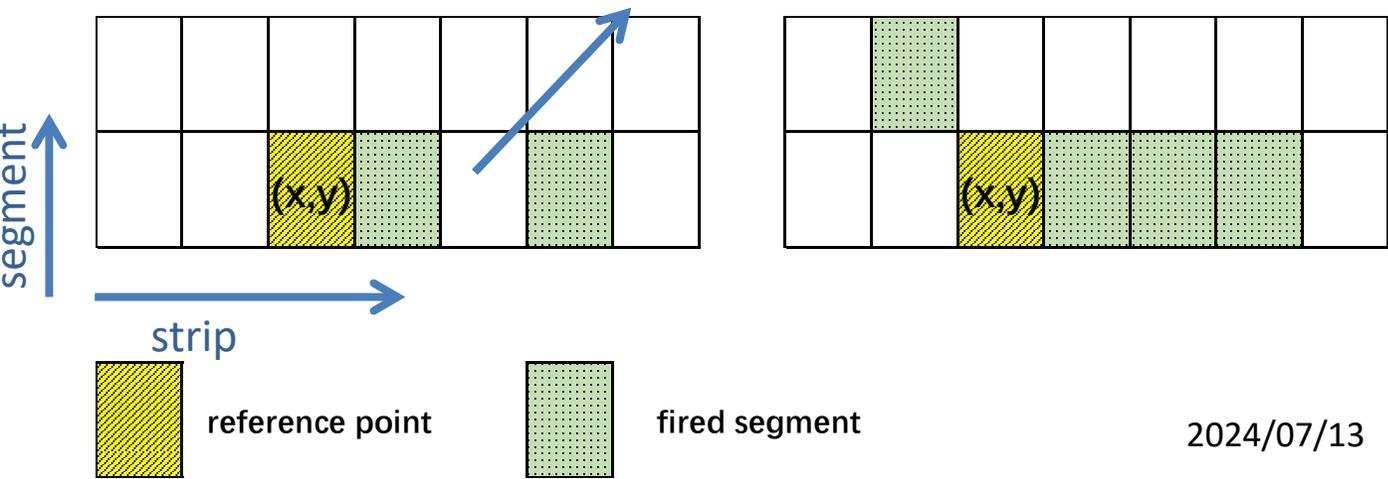


- *LEFT EXAMPLE:*
 - *cluster center: $(x+1.5, y)$*
- *RIGHT EXAMPLE:*
 - *Cluster center: $(x+1, y+0.5)$*

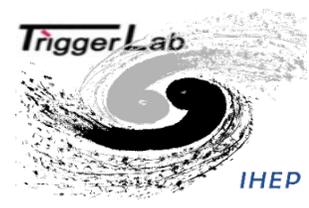
簇团位置参数确定和簇团时间标定

- **位置确定:**
 - 在每次完成感兴趣区域的滑动之后，对感兴趣区域的模式（Pattern）与预定义的查找表进行对比，得到相对于参考点的偏移量。查找表数据集由**离线生成**，在每个簇中间加入了一个空读出条的容忍度。
- **时间标定:**
 - 簇团时间标定方法以簇团时间分布研究为基础，将感兴趣区域内有效读出条最小的时间值作为簇团时间进行时间戳标定。
- **优点:**
 - 查找表数据集独立于算法实现，可以根据实际运行情况进行调整，提高了灵活性。
 - 空读出条的容忍适应与iRPC读出方式，减少信号衰减带来的影响，同时可以保证运行时出现故障读出通道时的稳定性。
 - 时间标定方法简单高效。

Empty strip tolerance was added to mitigate the single-ended strip effect from **return line attenuation** and **failure channel**

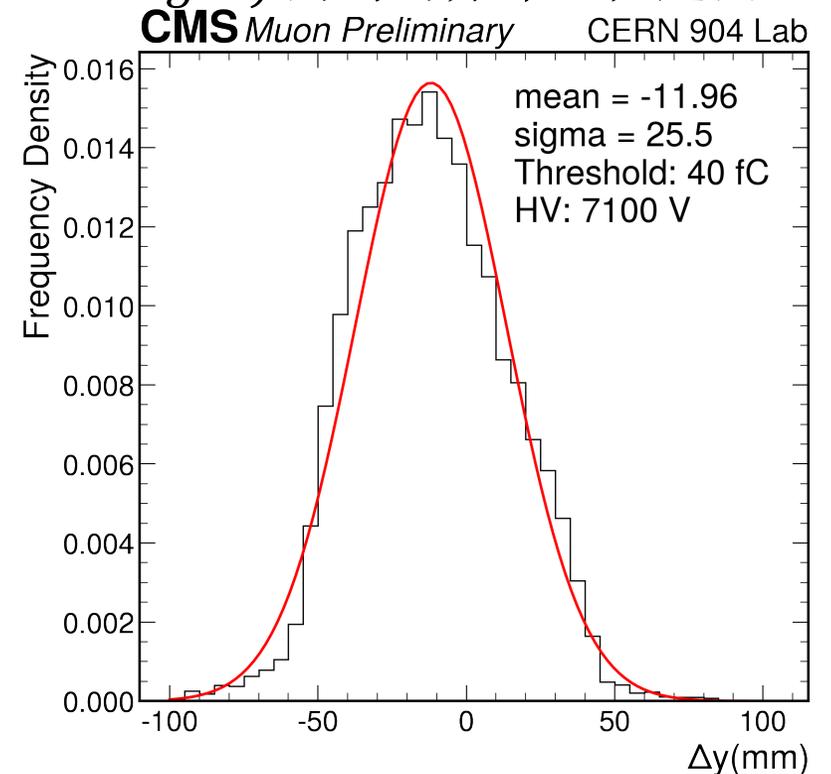


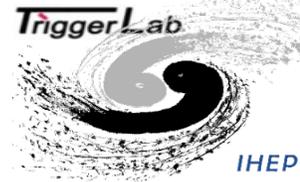
- **LEFT EXAMPLE:**
 - *cluster center: $(x+1.5, y)$*
- **RIGHT EXAMPLE:**
 - *Cluster center: $(x+1, y+0.5)$*



CERN 宇宙线实验测试结果 - 簇团位置精度

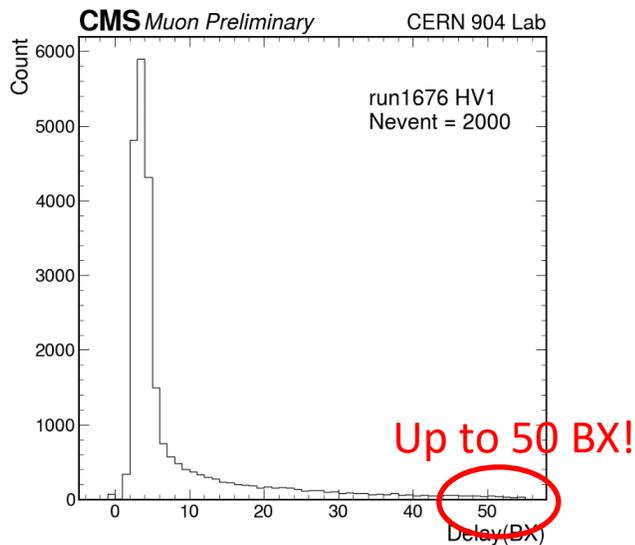
- 因为读出条的分段会影响输出的位置精度，簇团位置精度定义为**固件簇团输出位置（沿读出条方向）**和**离线重建位置**的位置差，通过统计所有簇团的位置偏差，来评估分段簇查找算法的位置精度。
- 测试结果：
 - 分段方法相对与单一击中的偏差分布应该为 $\left[-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right]$ ($l = \text{segment length}$) 的均匀分布，但是由于簇团径向大小的存在，偏差分布呈高斯分布。
 - 位置精度的标准偏差为 25.5 mm, 结果与 $\left[-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right]$ 均匀分布的标准偏差 $l/\sqrt{12}$ 相符合，符合预期。
 - 分段簇查找算法的有效位置分辨率是位置精度与iRPC探测器位置分辨率（1.5 cm）的综合作用，有效位置分辨率为2.95cm.



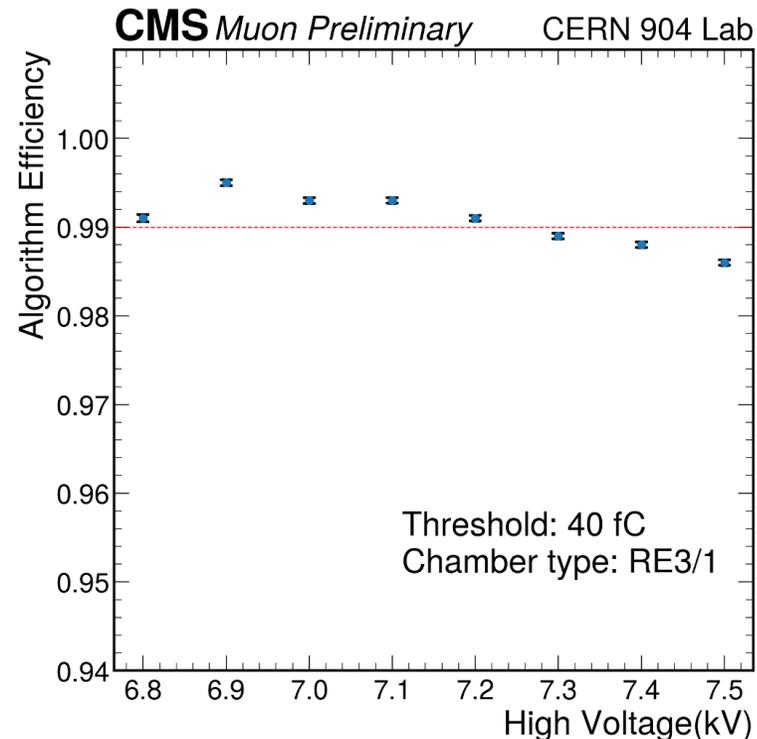


CERN 宇宙线实验测试结果 - 分段簇查找算法效率

- 算法效率是衡量簇查找算法的一个重要性能指标，算法效率定义为：如果探测器数据在闪烁体区域内包含有效击中，并且簇查找算法的输出在同一区域内也具有有效输出，则该簇团被视为一次有效的簇团查找。
- 测试结果：
 - 在一次高压扫描的各高压点下，算法效率均大于98%，在工作高压点下，算法效率大于99%。
 - 自6.9 kV 到7.5 kV, 随着高压的升高，算法效率出现降低的趋势，这是因为前端板随着高压升高，发送延迟出现异常增高，超出了后端De-Mux的缓冲深度，造成有效数据的丢失，前端电子学设计团队正在改进这一问题。

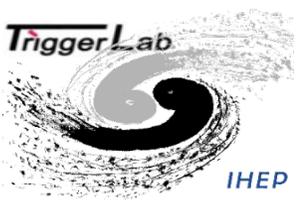


前端板发送延迟异常增高





总结



- 针对CMS 二期升级的iRPC 提出了基于分段的簇查找算法，便于FPGA 实现，采用模块化的设计方法，提高设计的灵活性
- 使用探测器-电子学联合调试系统，在宇宙线平台进行了功能和性能验证。
- 算法位置精度约为 ~ 2.6 cm, 在iRPC探测器中有效位置分辨率约为 3 cm.
- 在工作高压点下，算法效率超过99%，前端的发送延迟造成了部分效率下降。

- **感谢各位专家领导提出宝贵建议！**