



STCF实验触发系统设计与性能研究

方竹君 封常青 彭亮 王君宸 郝艺迪
包一宁 黄钰贺 杨诚 周子煊 郭兆立
中国科学技术大学 湖南科技大学

On behalf of the STCF TRIG working group



摘要

- 一、STCF实验概况与触发需求
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究
- 五、HLT研究
- 六、小结



摘要

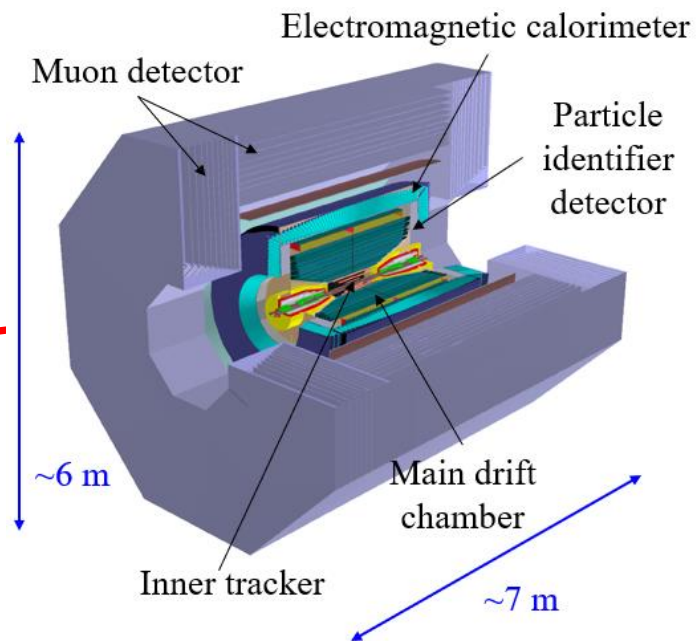
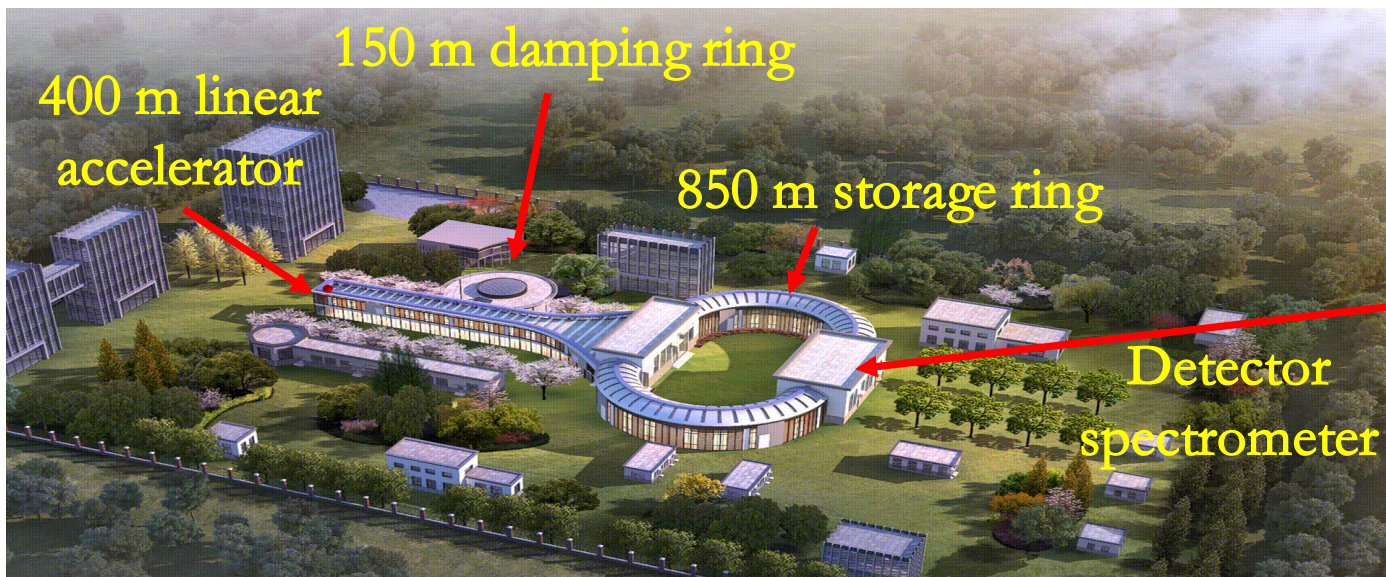
- 一、**STCF实验概况与触发需求**
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究
- 五、HLT研究
- 六、小结



STCF 实验概况

□ Super Tau-Charm Facility:

- 新一代GeV能区高亮度正负电子对撞实验
- 质心能量 **2-7 GeV**
- 峰值亮度 $\geq 0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at 4 GeV
- 对撞数据 $> 1 \text{ ab}^{-1}/\text{y}$
- 未来有**提升亮度**与**电子束流极化**的潜力





STCF实验触发系统设计需求

□ STCF探测器面临的挑战：在高事例率、高本底、大动态范围等极端条件下实现全事例物理量的高效率、精确测量

□ STCF实验的预期指标:

- 峰值物理事例率: **> 400 kHz**
- 峰值原始数据量: **> 200 GB/s**
- 本底水平: **~ 200 kHz/channel**
in MDC、ECAL

□ STCF实验触发系统的设计需求:

- 最高触发率: **~ 1 MHz**
- 典型物理道触发效率: **> 99%**
- 低延迟: L1层级**数 μ s**
- 低本底误触率
- 相邻物理事例区分能力



摘要

- 一、STCF实验概况与触发需求
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究
- 五、HLT研究
- 六、小结



STCF实验触发系统逻辑架构

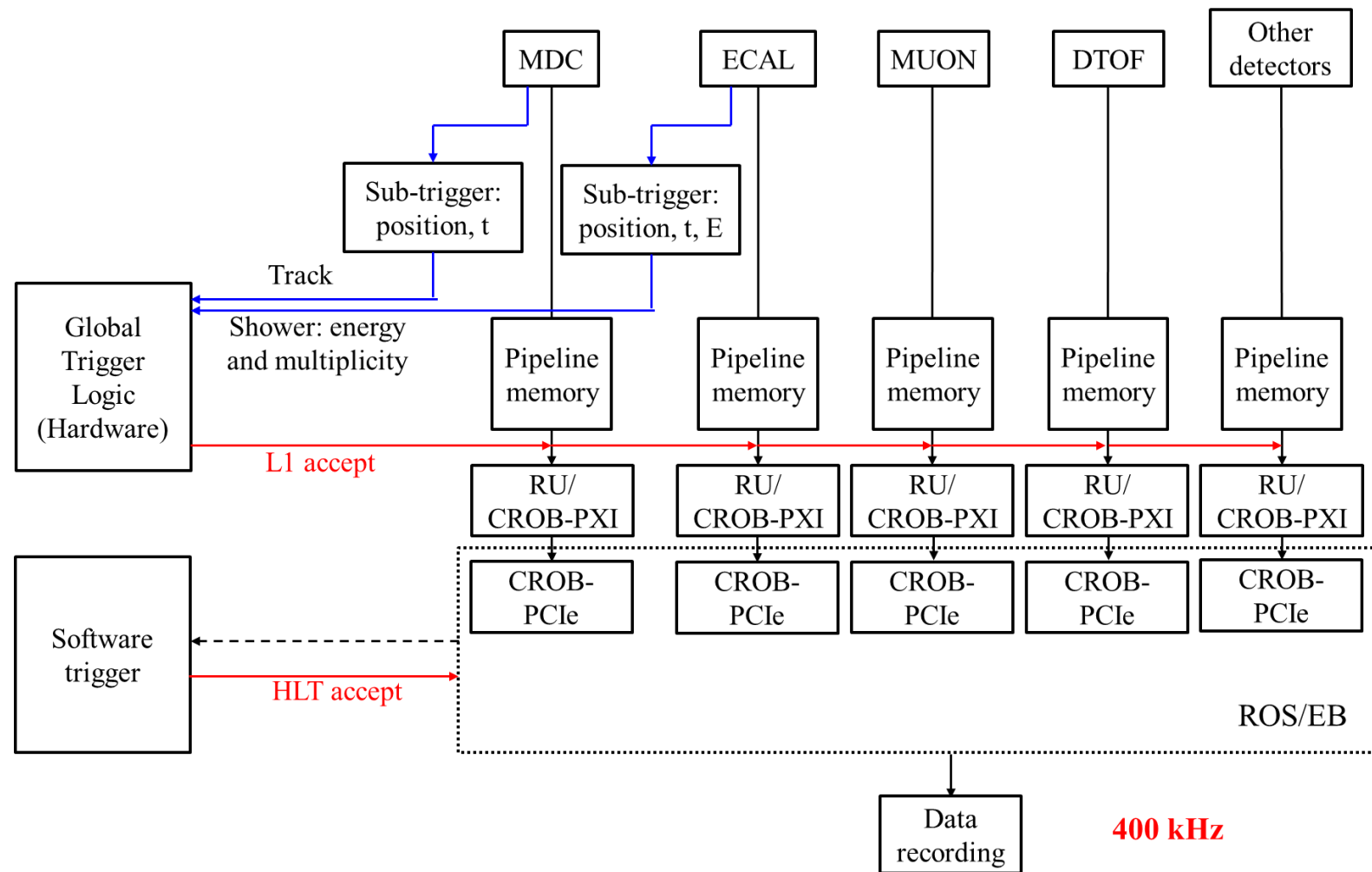
双层级触发架构:

□ L1层级触发:

- 基于FPGA硬件平台实现
- 快速、精确、高效识别物理事例

□ High Level Trigger (HLT):

- 基于异构框架服务器集群实现
- 筛除探测器本底击中，降低数据量

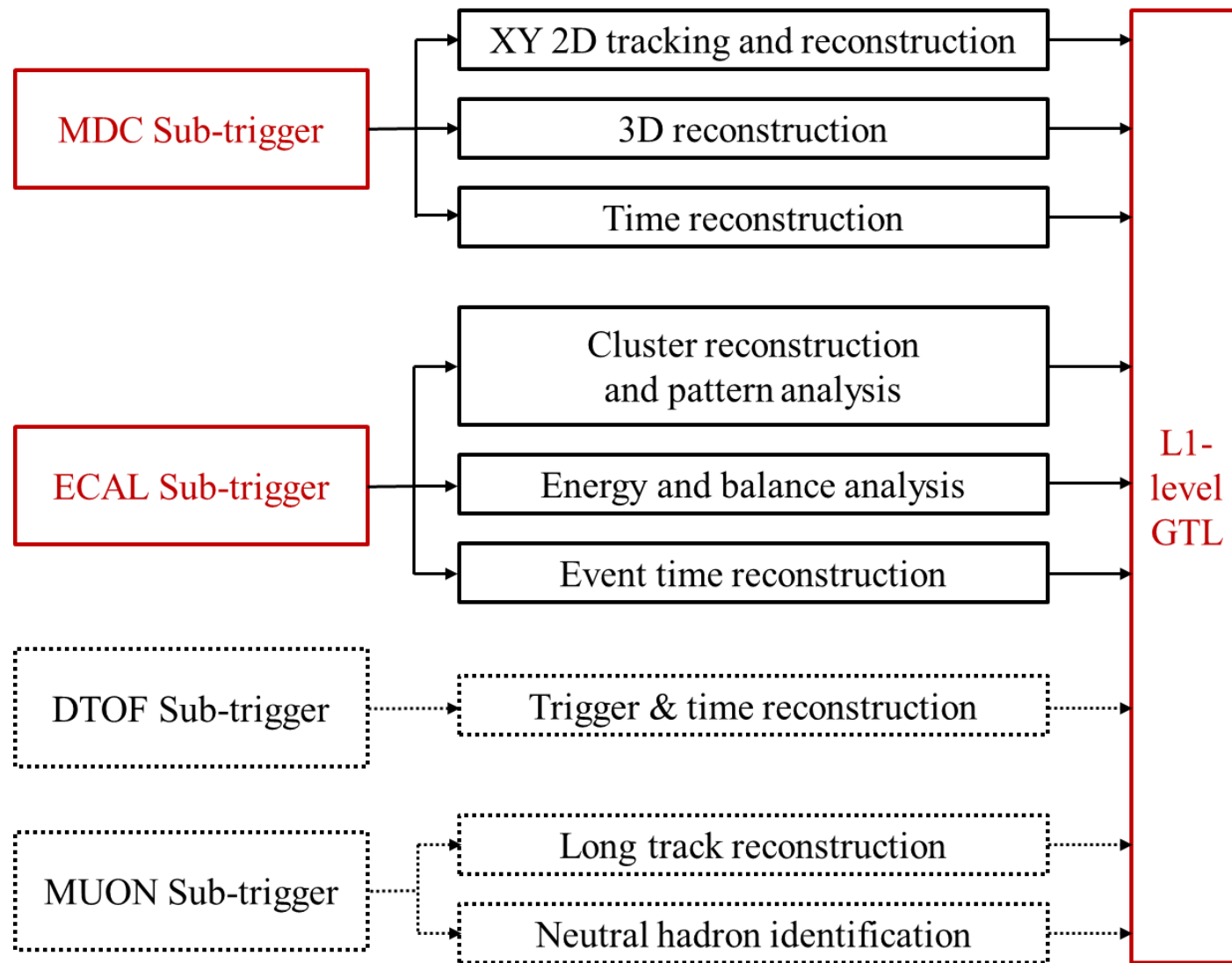




L1层级触发逻辑框架初步设计

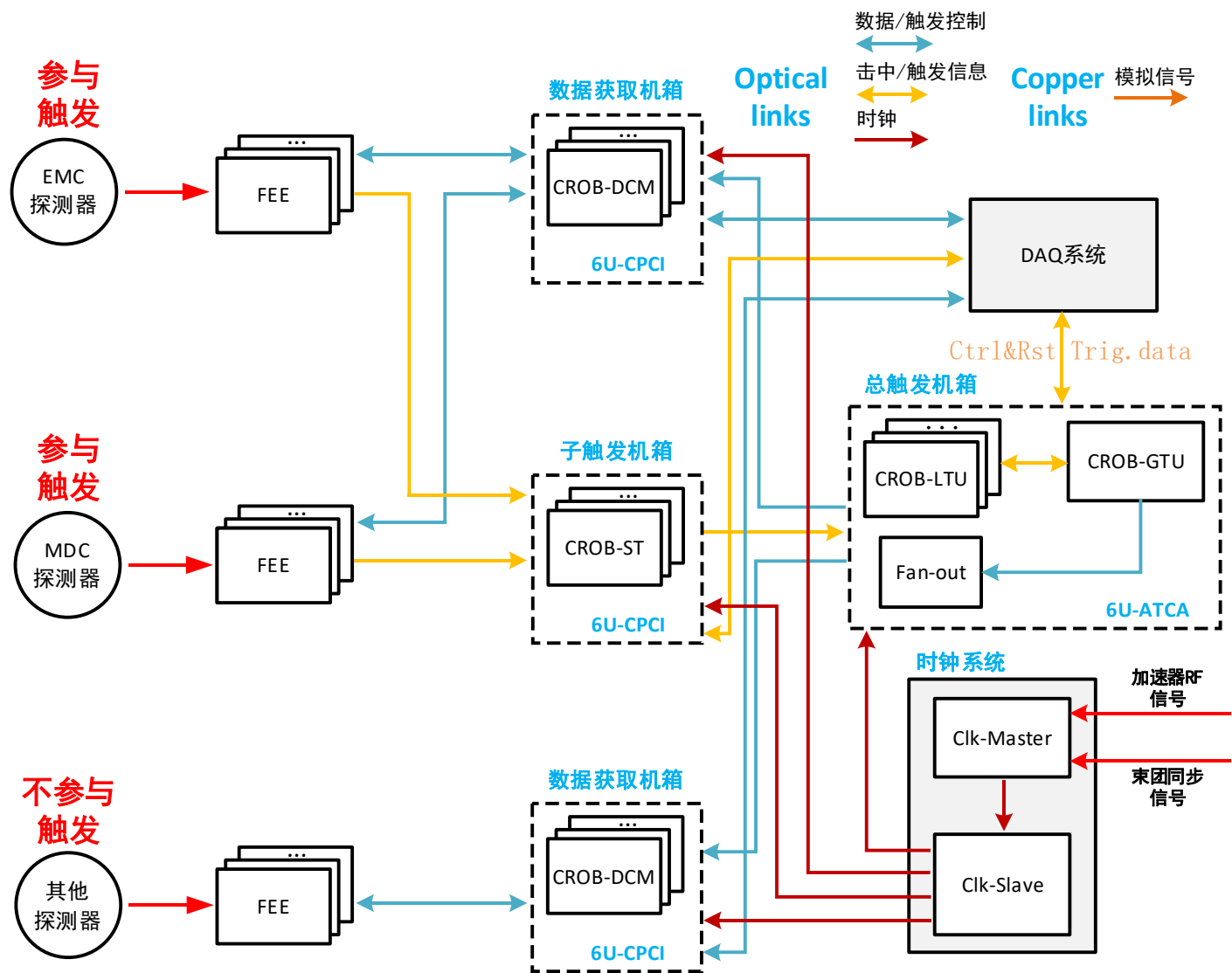
□ STCF谱仪探测器定位梳理

- **ITK:** 高本底，在线触发不适用
- ✓ **MDC:** 核心径迹探测器
- **RICH:** 切伦科夫环重建需要算力，在线触发不适用
- **DTOF:** 端盖区域精确定时的可能补充
- ✓ **ECAL:** 核心能量探测器，在线触发定时主要来源
- **MUON:** $\mu/\pi/n/K_L$ 触发的可能补充





L1层级触发读出电子学系统架构



- DAQ与触发系统分离
- DAQ使用**CROB-DCM**汇总数据（搭载在**数据获取机箱**中）
- 触发系统使用**CROB-ST**汇总击中信息并实现触发预处理（搭载在**子触发机箱**中）
- 硬件触发信号通过**数据获取机箱**下发至各探测器**FEE**
- CROB-DCM/ST: **CPCI**机箱
- CROB-LTU/GTU: **ATCA**机箱
- 全局时钟频率: 40MHz



摘要

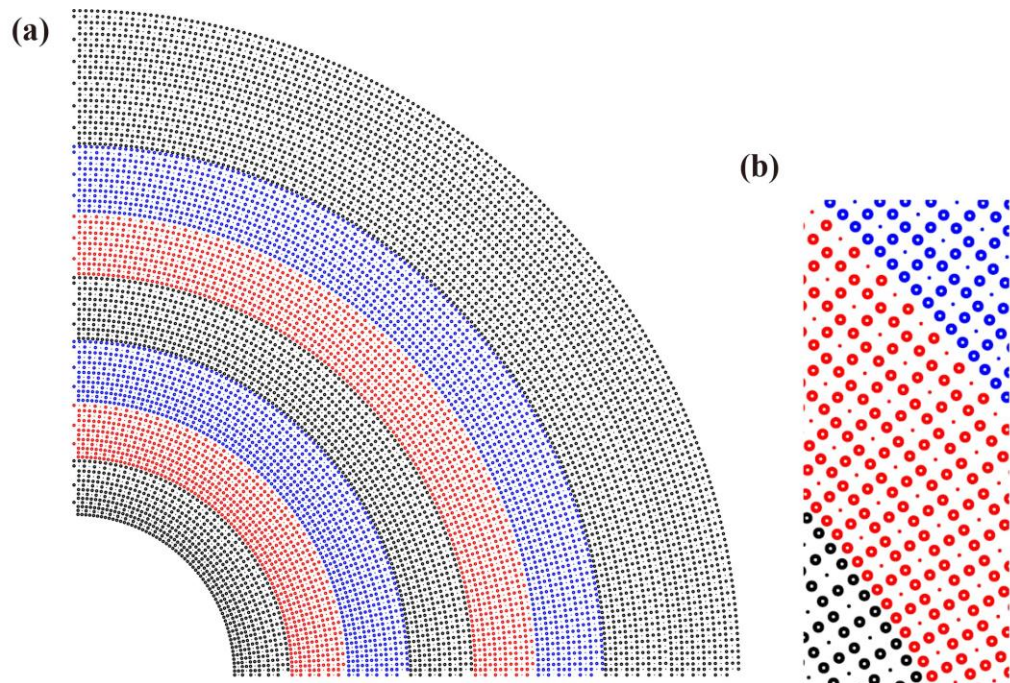
- 一、STCF实验概况与触发需求
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究**
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究
- 五、HLT研究
- 六、小结



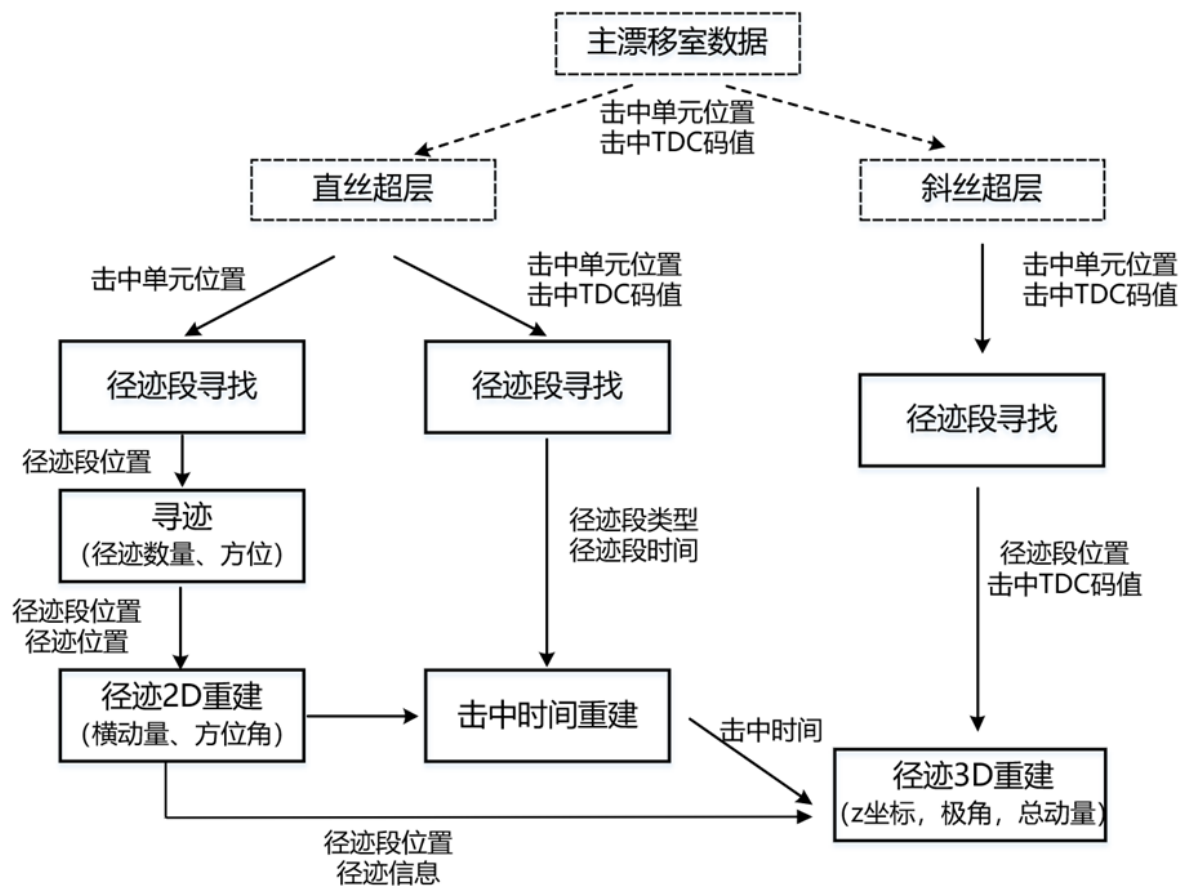
MDC 子触发算法

□ MDC探测器基准设计:

- 8个超层，每超层6丝层，共48层
- **1,4,7,8** 超层为直丝超层



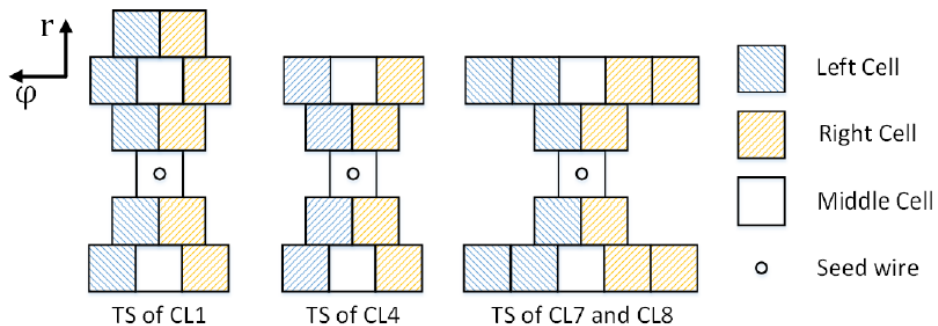
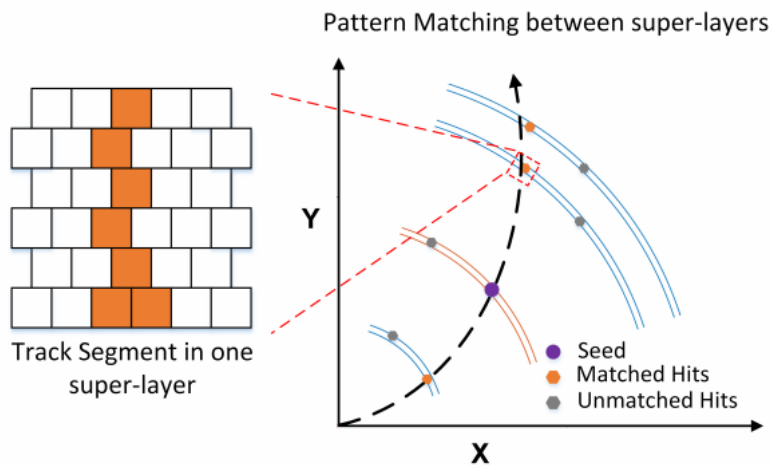
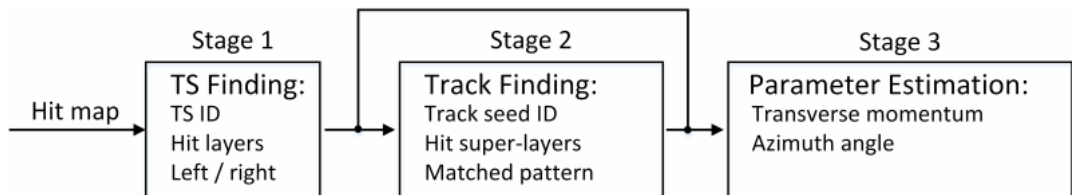
□ MDC 子触发算法逻辑





MDC 子触发算法

XY 2D 寻迹与重建算法（模式匹配）



MDC 寻迹效率

- Trigger: $N_{\text{tracking}} \geq 2$, $N_{\text{rec}} \geq 1$
- 实测latency ~ 350 ns

	pipiee	pipimumu	charm_meson	hyperon	tau_pair	bkg
1000	0.933	0.934	0.969	0.932	0.81	0.017
sig in MDC	1000	999	994	993	995	
3/4 tracking	0.942(987)	0.946(986)	0.977(989)	0.966(964)	0.823(983)	
Reconstruction	0.954(968)	0.954(975)	0.979(983)	0.969(956)	0.826(977)	

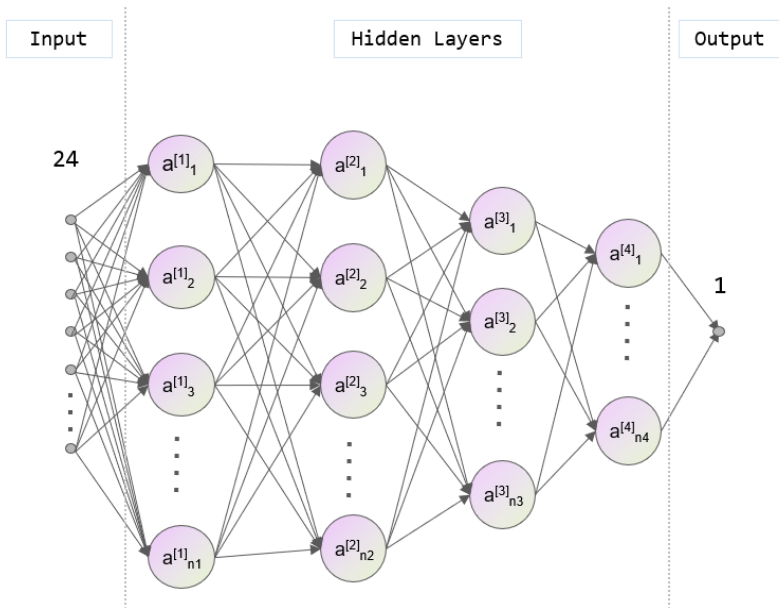
- ✓ 桶部区域寻迹效率高，重建效果较好
- ✗ 端盖区域寻迹受限，不能重建（仅击中2个直丝超层）
- 每超层1个点→多个点
- 将斜丝超层引入2D寻迹和重建



MDC 子触发算法

□ Z向重建算法（全连接神经网络）

采用径迹段数量和8个超层的TDC时间作为输入

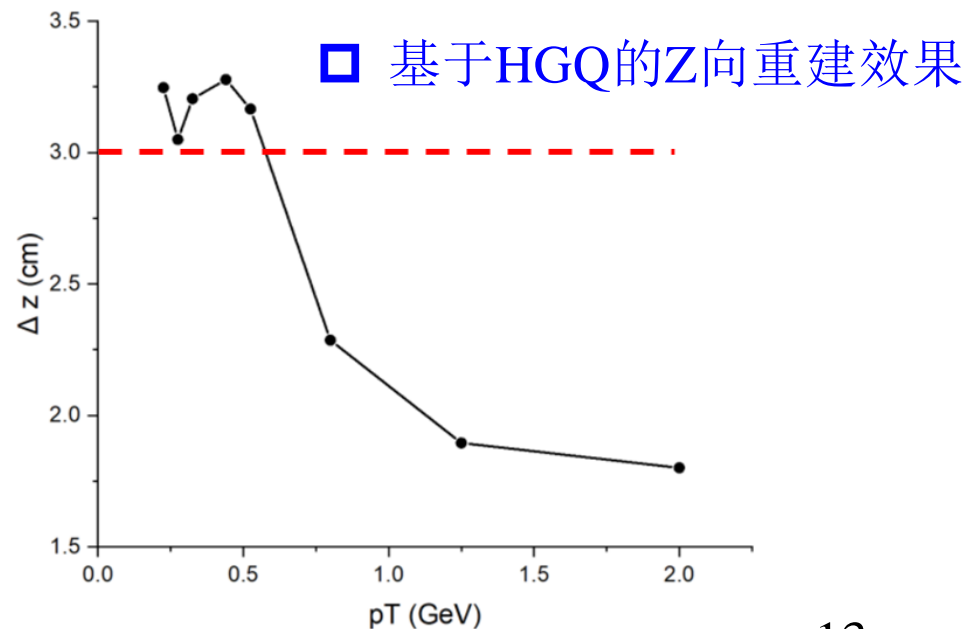


□ HLS4ML 在XCKU060的测试结果

- 死时间: 1clk
- 测试latency: < 200 ns

□ 基于HLS、QKERAS的分区间重建结果

三组	qkeras			hls		
动量区间	Mean	SD	d(0)	Mean	SD	d(0)
200-300	-0.01	2.30	2.30	-0.51	2.41	2.47
300-450	0.03	2.59	2.59	0.28	2.64	2.66
450-1500	0.04	1.61	1.61	0.16	1.64	1.65
一组	qkeras			hls		
动量区间	Mean	SD	d(0)	Mean	SD	d(0)
200-1500	0.00	2.57	2.57	0.07	2.66	2.66



□ 基于HGQ的Z向重建效果



ECAL 子触发算法

□ ECAL探测器基准设计:

- 桶部: 51 圈pCsI晶体
- 单端盖: 10 圈pCsI晶体

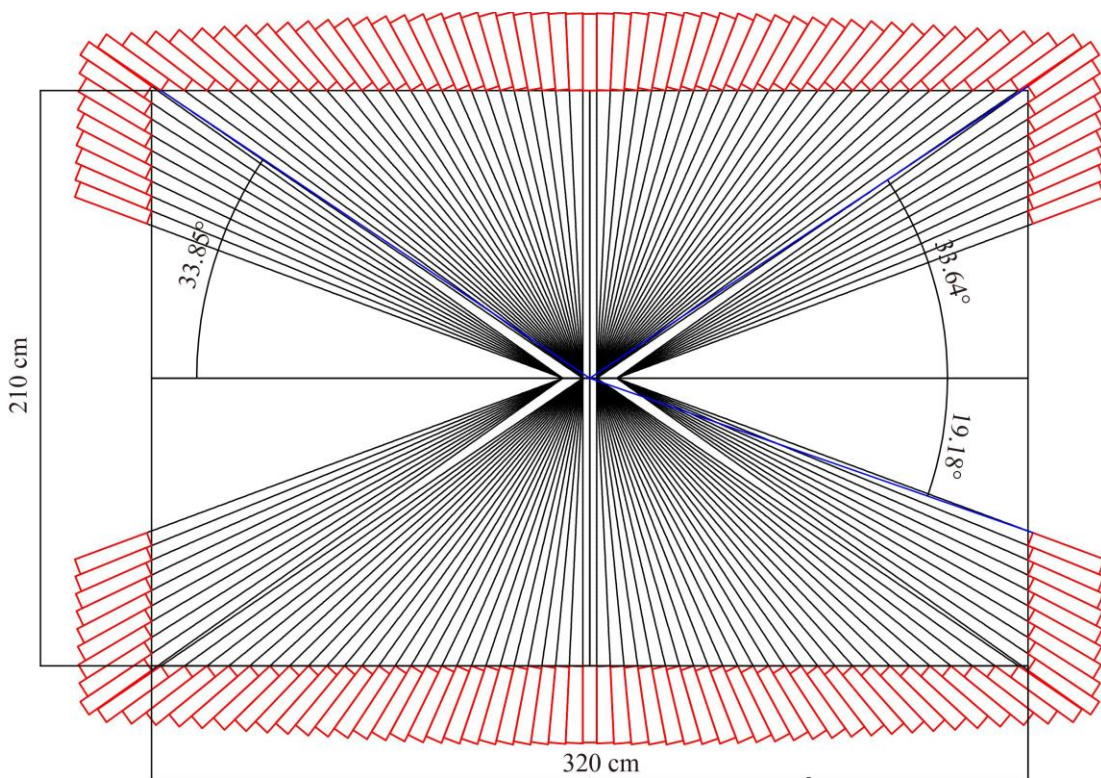
□ 触发单元(Trigger Cell, TC) 分割:

桶部 (4×4 or 3×4):

- 51 圈 × 132 块
- 429 TC

单端盖(3×5 or 4×5):

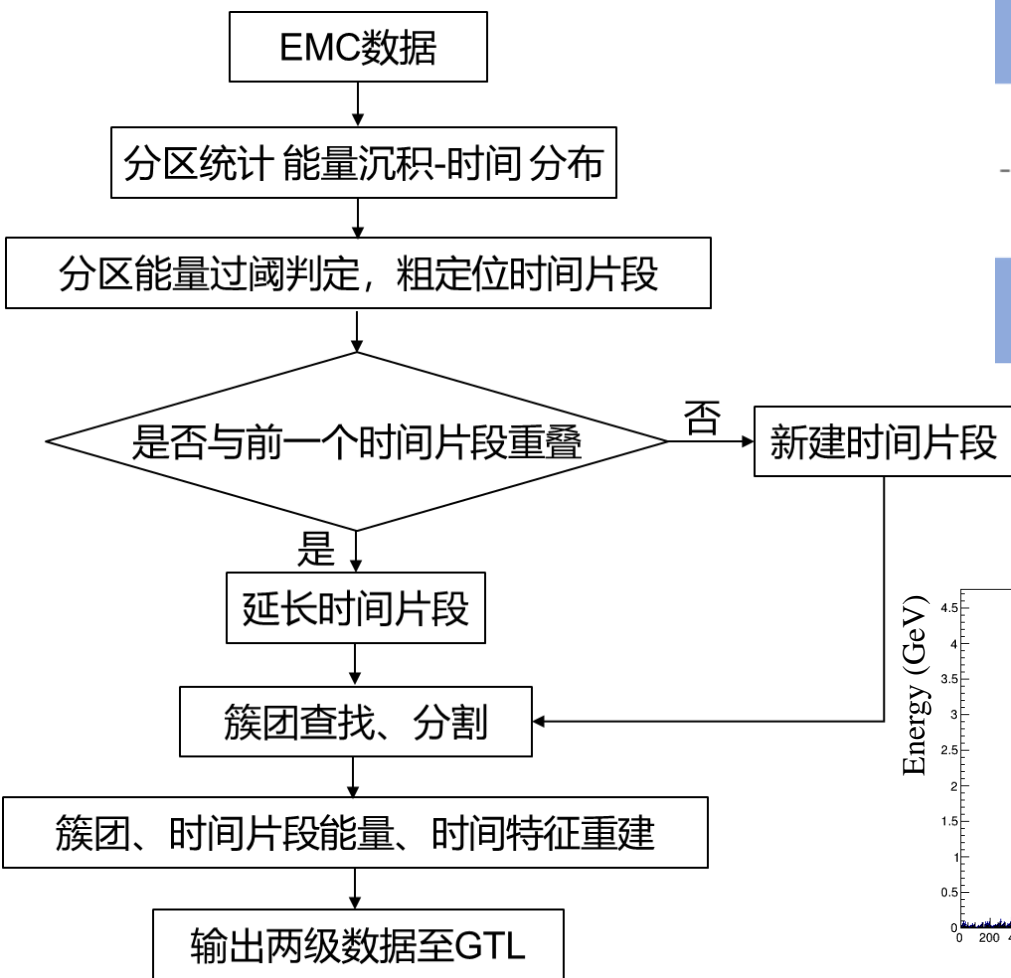
- 10 圈
 - 3 圈 × 85 块 ⇒ 3×5
 - 3 圈 × 105 块 ⇒ 3×5
 - 4 圈 × 130 块 ⇒ 4×5
- 64 TC



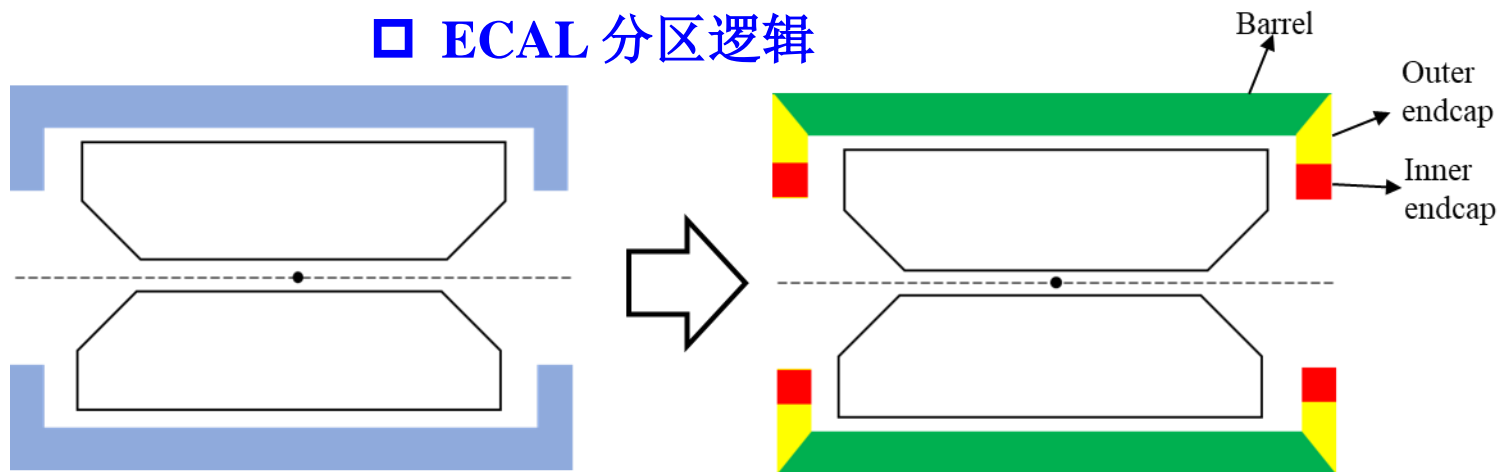


ECAL 子触发算法

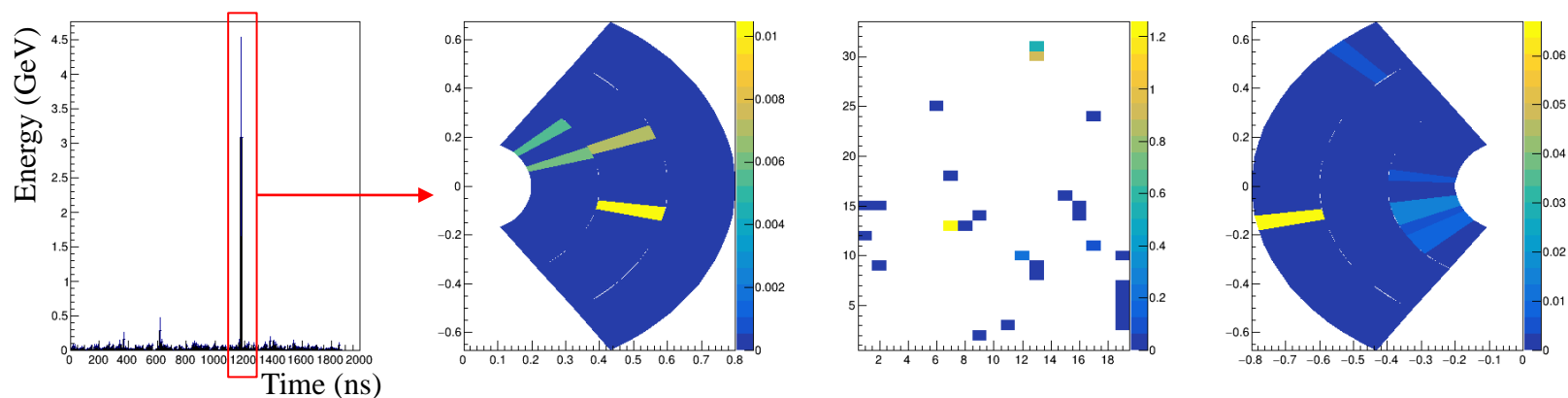
ECAL 子触发算法逻辑



ECAL 分区逻辑



典型ECAL时间片段识别示意





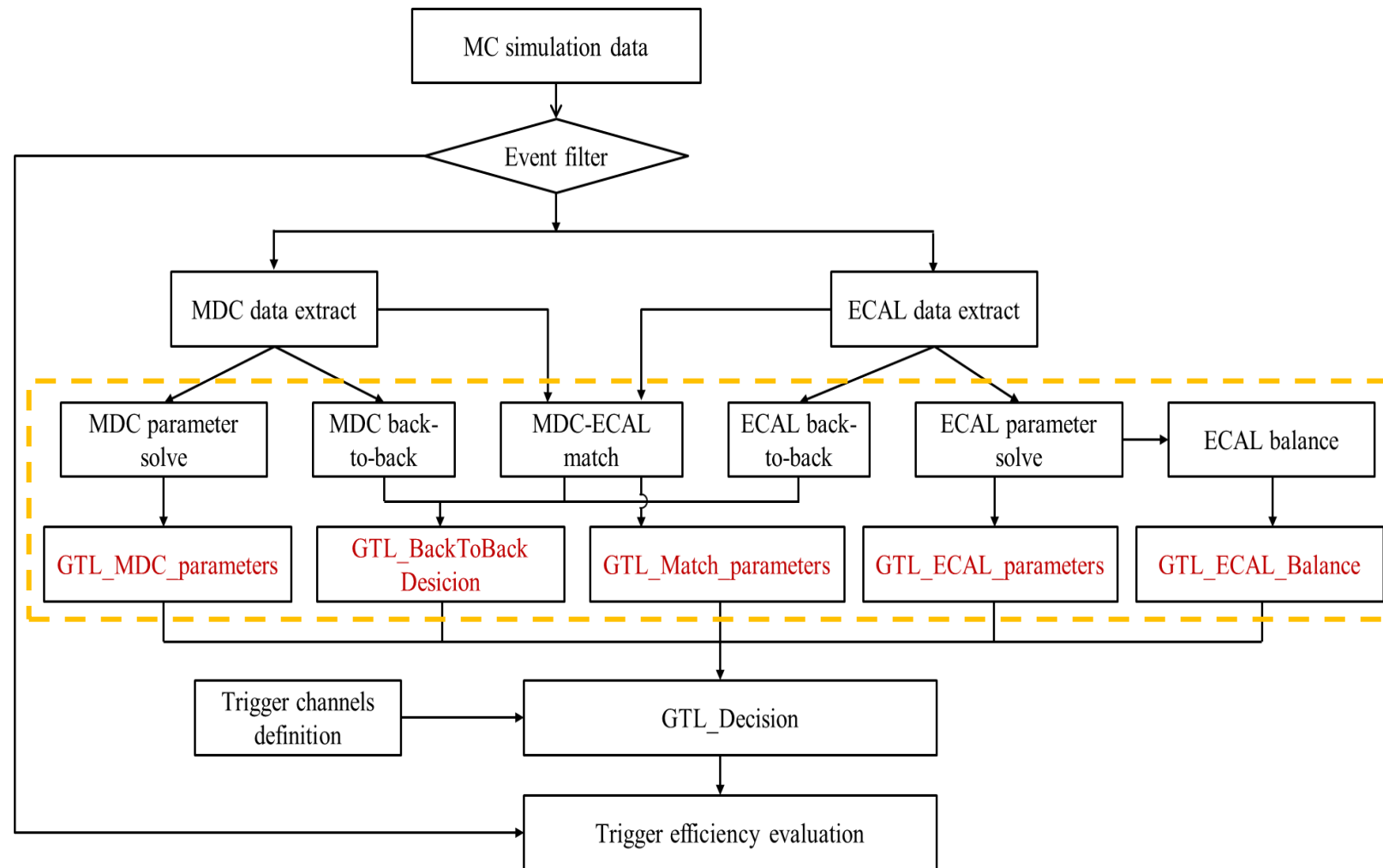
L1层级全局触发研究

□ L1层级全局触发（GTL）研究

- 逻辑框架设计
- 算法开发
- 触发表设计
- L1层级触发效果评估

□ 现阶段触发表

- 6个带电道
- 1个中性道
- 1个RBB道





GTL 典型触发效果

Physics signal	Number of charged tracks into detector	Number of tracks that should (is) matched	Number of matched tracks in Endcap	Number of matched tracks in Barrel	Number of miss matched tracks	Number of miss matched tracks in Endcap	Number of miss matched tracks in Barrel	Signal trigger rate	Background false trigger rate(kHz)
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J\psi$ $J\psi \rightarrow e^+e^-$	3049	2639(2014)	225(53)	2414(1961)	63	7	56	99.20% (≥ 3)	
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J\psi$ $J\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	3140	2674(2010)	252(64)	2422(1946)	58	2	56	99.30% (≥ 3)	
$e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$	1668	1668(1380)	164(35)	1504(1345)	28	1	27	99.00% (≥ 2)	
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J\psi$ $J\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ $J\psi \rightarrow \Xi \bar{\Xi}$	5811	3845(2582)	208(86)	3637(2496)	43	4	39	98.00% (≥ 3)	43
$e^+e^- \rightarrow D_0 \bar{D}_0$ $e^+e^- \rightarrow D^+ D^-$ $e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_s^-$	4314	4054(2901)	268(56)	3403(2845)	52	10	42	98.80% (≥ 3)	
$e^+e^- \rightarrow D_0 \bar{D}_0$ $D_0 \rightarrow K l \pi^+ \pi^-$	5636	5360(2641)	278(60)	3192(2581)	46	6	40	99.10% (≥ 3)	
$J/\psi \rightarrow \text{gam}$ invisible	2492	1170(861)	105(25)	1065(836)	11	2	9	99.70% (≥ 2)	



GTL 典型触发效果

Physics signal	Number of charged tracks into detector	Number of tracks that should(is) matched	Number of matched tracks in Endcap	Number of matched tracks in Barrel	Number of miss matched tracks	Number of miss matched tracks in Endcap	Number of miss matched tracks in Barrel	Signal trigger rate	Background false trigger rate(kHz)
$e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$	-	-	-	-	-	-	-	78.40%	
$e^+e^- \rightarrow \text{gam} n \bar{n}$	-	-	-	-	-	-	-	89.10%	43
RBB	750	750	404	346	-	-	-	92.50%	



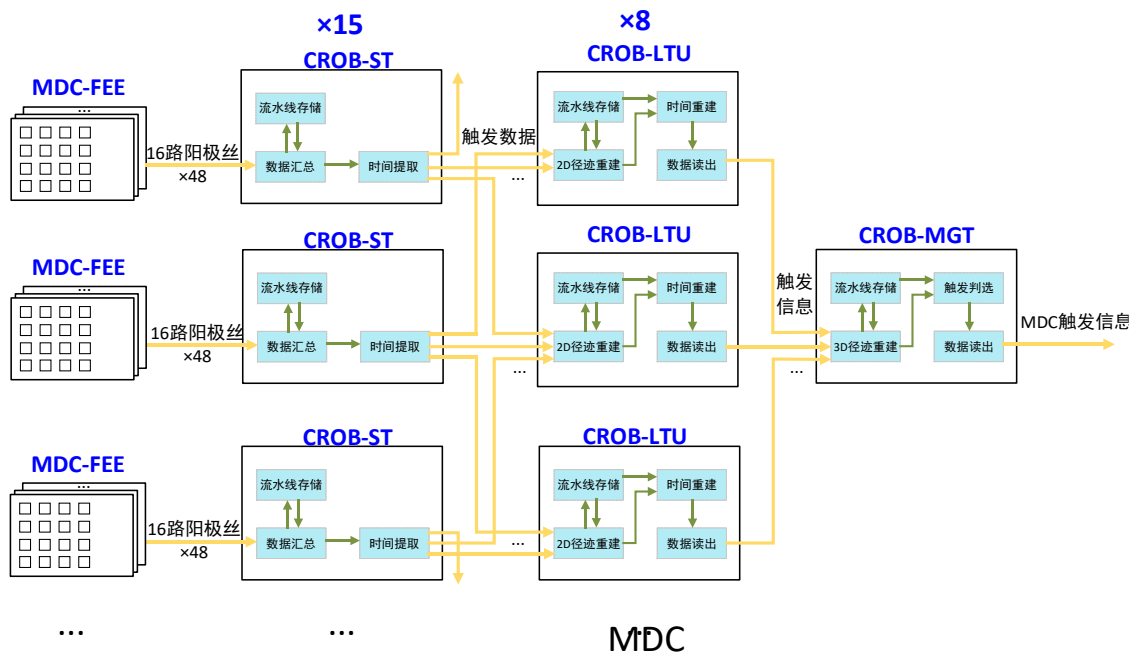
摘要

- 一、STCF实验概况与触发需求
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究**
- 五、HLT研究
- 六、小结

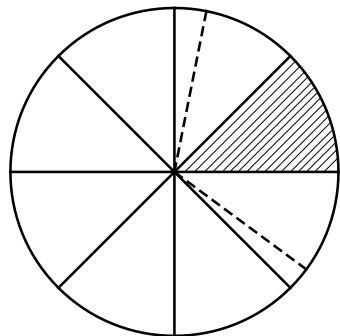


L1 子触发电子学初步方案

□ MDC 子触发



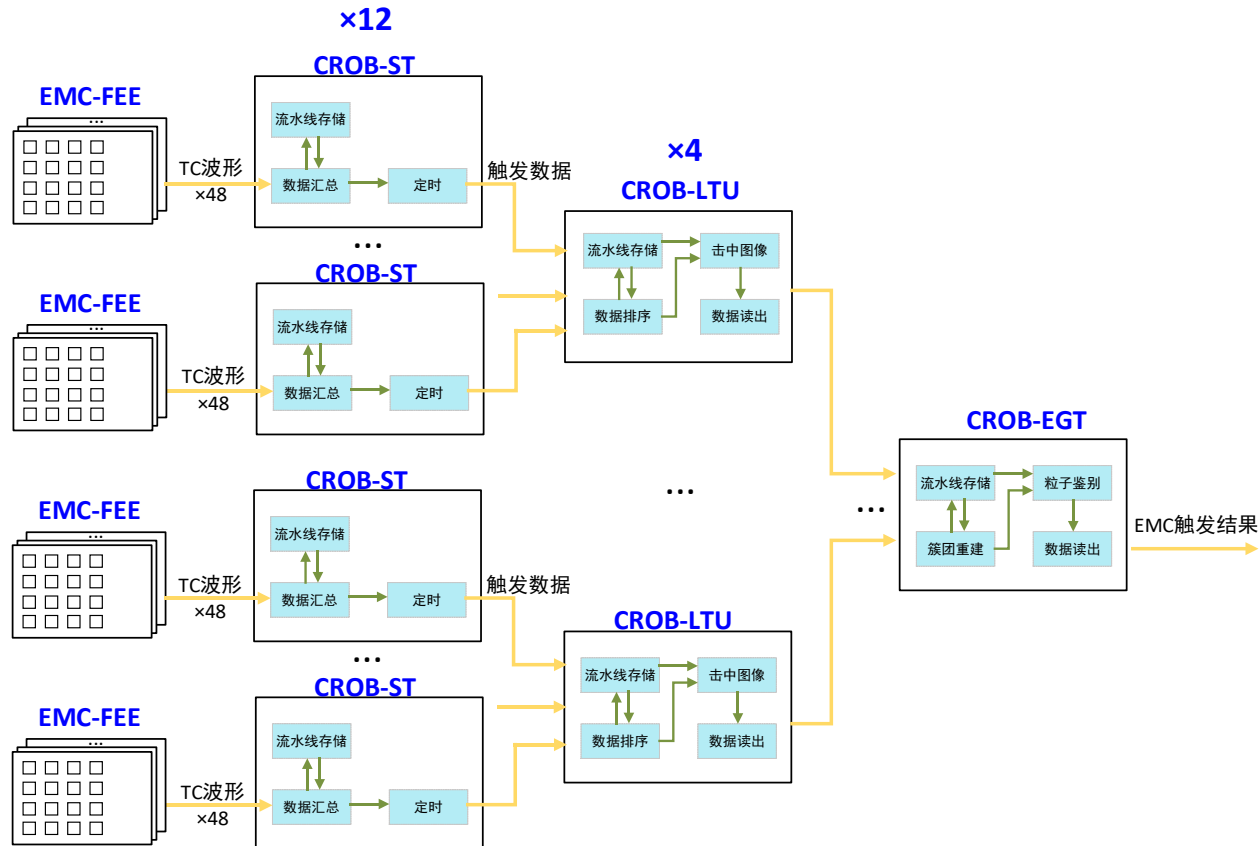
MDC触发扇区分配方案
(以LTU #1为例)



▨ CROB-LTU #1 对应的MDC扇区

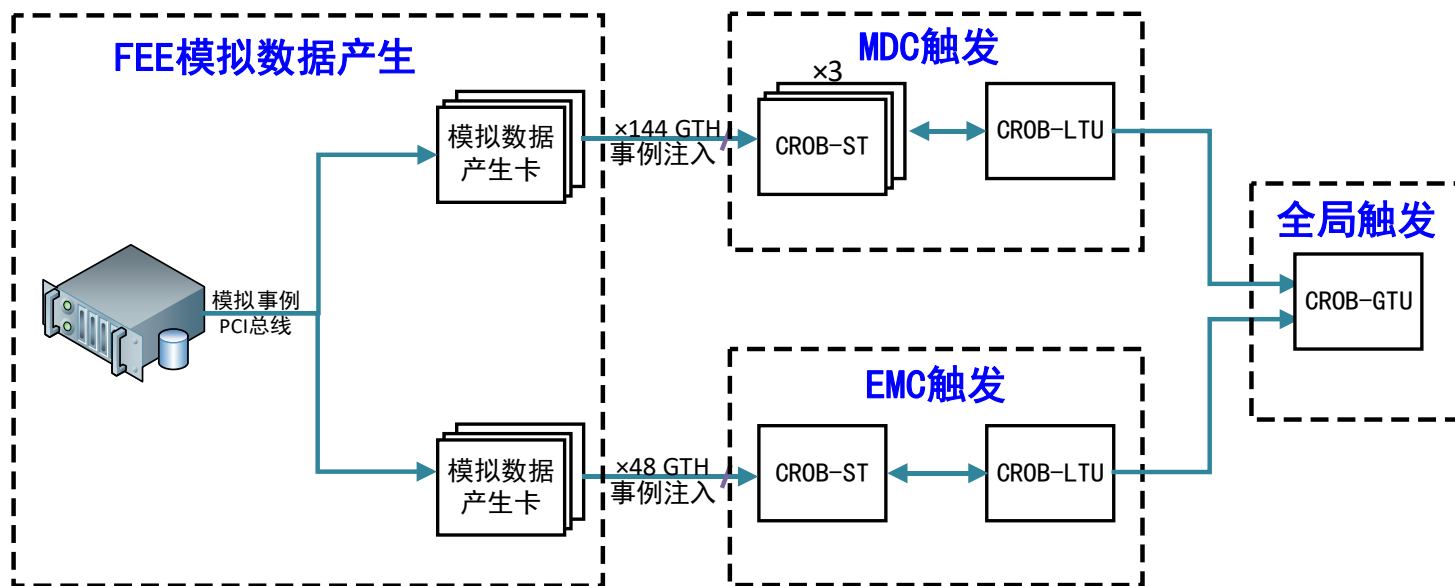
⤵ CROB-LTU #1接收及触发处理对应的MDC区域

□ ECAL 子触发

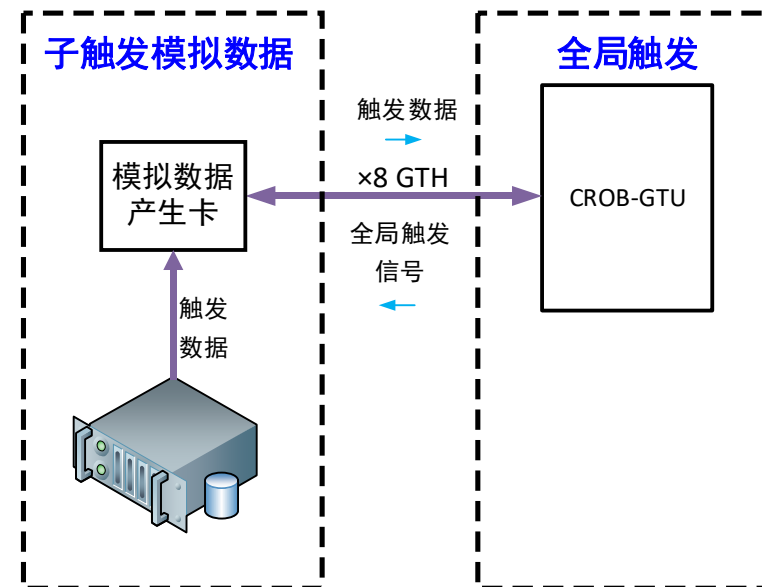


L1层级触发原理样机

子触发算法验证、触发架构验证



全局触发算法验证



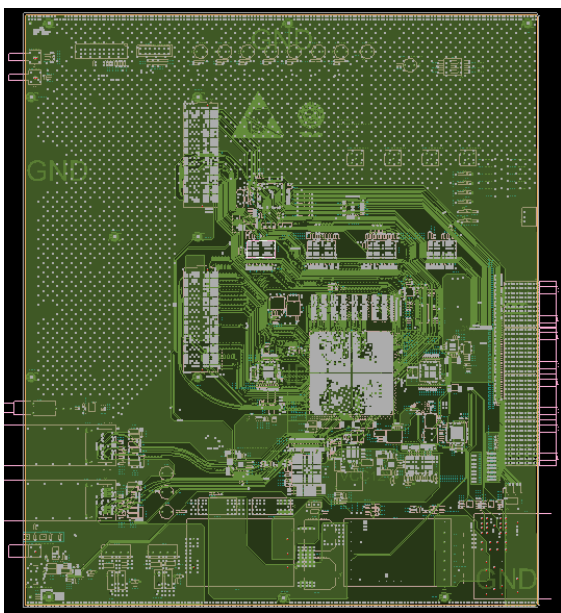
- 原理样机： **1/8 MDC (1/3总面积)**、 **1/4 ECAL**，以Oscar模拟数据为输入
- 子触发算法验证： 验证ECAL硬件触发算法与MDC硬件触发算法
- 触发架构验证： 验证整体架构、信号传输链路可靠性、触发延时等
- 全局触发算法验证： 验证全局触发算法



FPGA硬件平台关键板卡设计

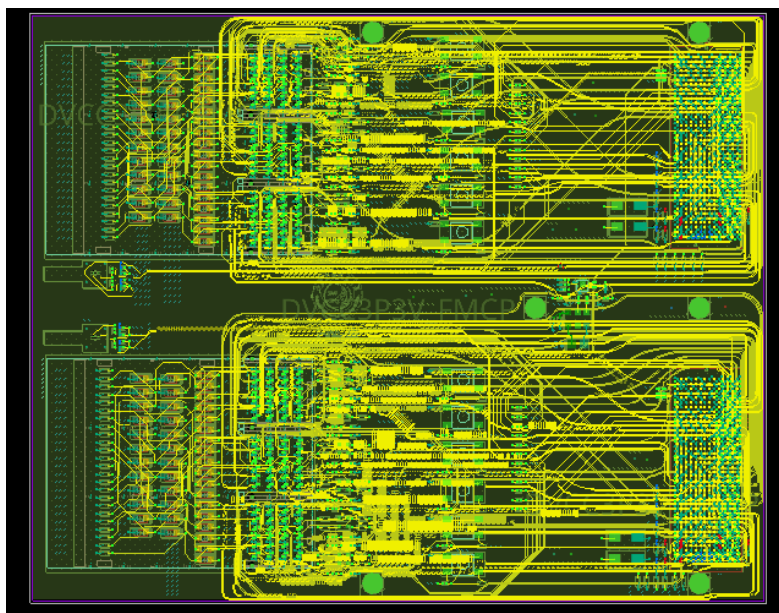
□ CROB-LTU board

- 第一版完成测试
- 第二版正在改板



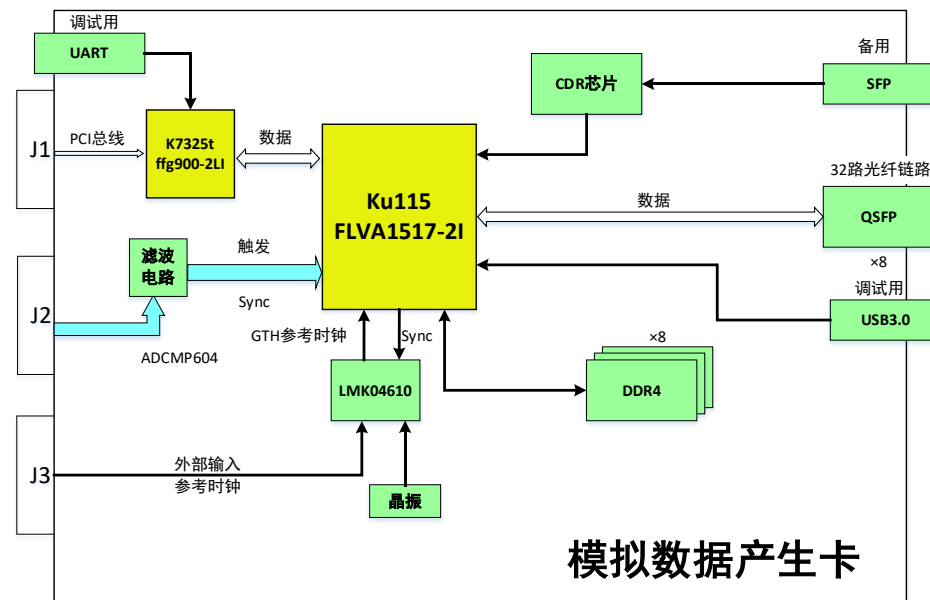
□ FMCP_ST子板

- 第二版已投版



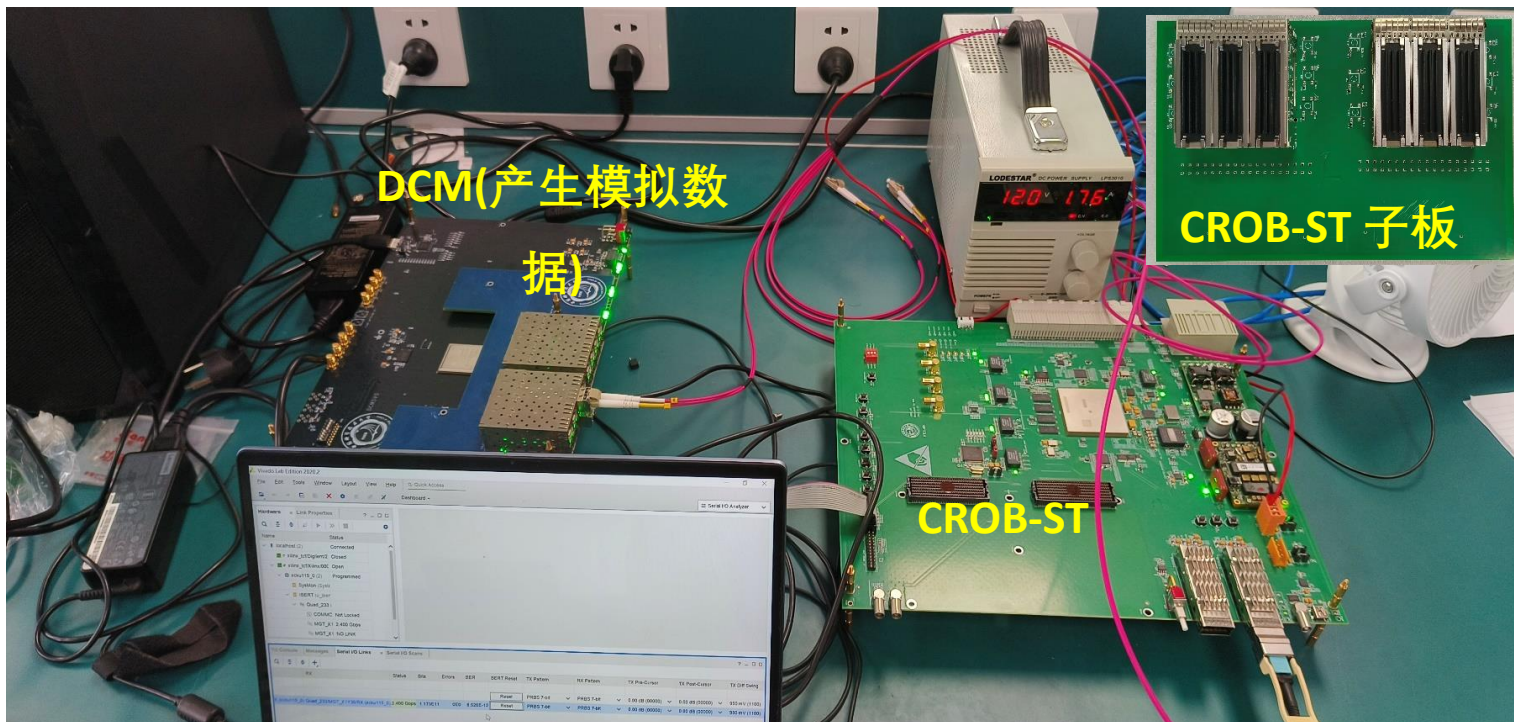
□ 模拟数据产生卡

- 原理图设计完成
- 正在第一版layout





FPGA硬件平台板卡测试



□ 板卡模块功能测试完成

- 电源测试、FPGA测试、DDR4调试、单片机调试、子板调试通过

- GTH接口调试（发现问题）

□ 同步进行改版和算法初测

- 测试CROB 板卡运行MDC 子触发算法的性能

- 使用USB转UART模块进行调试



摘要

- 一、STCF实验概况与触发需求
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究
- 五、HLT研究**
- 六、小结



HLT 定位与技术路线

□ High Level Trigger (HLT) 功能定位:

- 基于异构框架服务器集群实现
- 筛除探测器本底击中，降低数据量

- 峰值物理事例率 ~ 400 kHz
- 部分能量点事例率 ~ 50 kHz
- L1本底误触率 ~ 40 kHz
- ITK、MDC、RICH数据量占比66%，其中9成以上都是本底

□ HLT研究方向:

- 在L1触发基础上，识别筛除不含物理对撞的**数据片段**
- 在L1触发基础上，识别筛除数据片段内的**本底击中**

□ HLT技术路线:

- **(短期)** 不改变数据结构，筛除本底击中，交由后续offline分析
- **(长期)** 改变数据结构，在HLT实现offline 重建的部分功能，将探测器响应提取凝练为高阶信息存储



HLT 服务器硬件平台配置

□ 服务器硬件平台

- 已完成GPU和虚拟机直通和分配
- 已完成公网ip访问配置

- 机器型号: Dell PowerEdge R760xa
- 主要配置:

双 Xeon Gold 652Y6 处理器

256GB内存

双960GB NVMe SSD (系统盘RAID 1)

3.84TB NVMe SSD(数据盘)



虚拟机列表

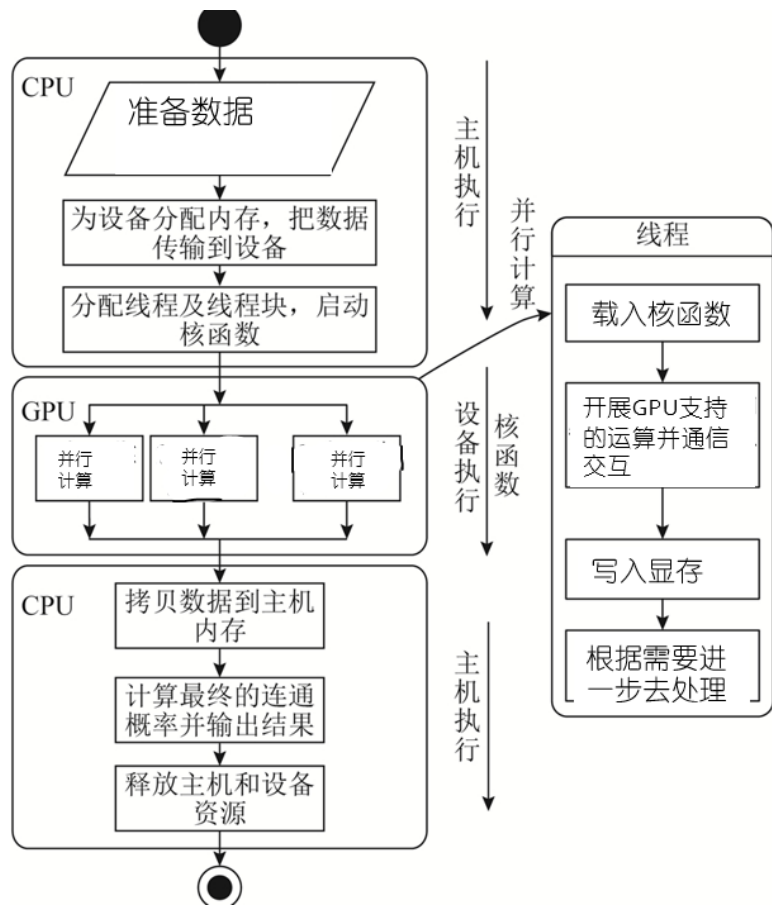
名称	ip 地址	cpu (核心)	内存 (GB)	硬盘 (GB)	gpu (ID)
desktop001	192.168.1.1	32	128	960	65,66,67,68
desktop002	192.168.1.1	16	48	960	e5,e6
desktop003	192.168.1.1	8	24	960	e7
desktop004	192.168.1.1	8	24	960	e8



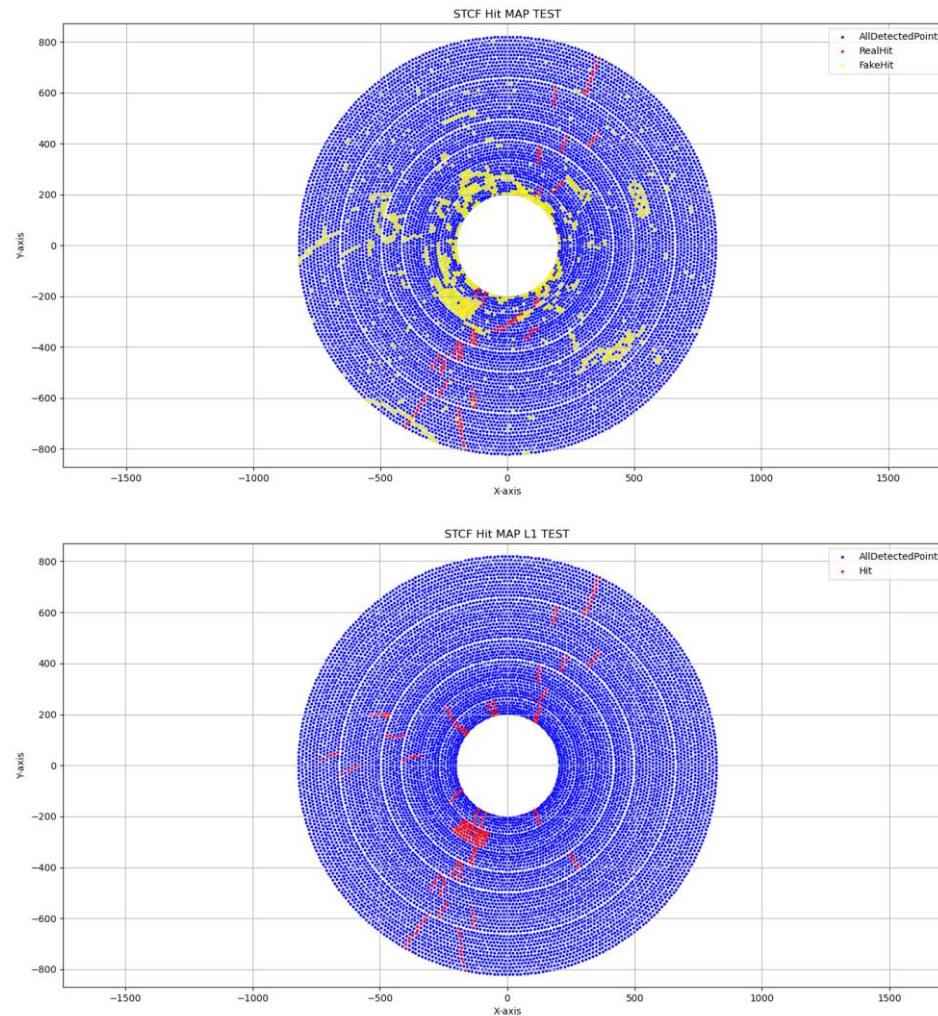
HLT 算法研究

□ HLT算法执行路线

- 算法方案1: **Python (CUPY)**
- 算法方案2: **CUDA**



□ HLT实现MDC模式匹配寻找径迹段





摘要

- 一、STCF实验概况与触发需求
- 二、触发系统整体设计
- 三、L1层级触发算法研究
- 四、L1层级FPGA硬件平台研究
- 五、HLT研究
- 六、小结



现存问题与下一阶段工作计划

□ 现存问题

- L1-MDC端盖处寻迹效率、重建效率不足
- L1层级对于MDC、ECAL时间信息的利用不足
- 全链条硬件平台性能测试延后
- HLT 算法研究有待加强

□ 计划

- 将斜丝超层通过模式匹配引入XY 2D重建
- 优化MDC-ECAL时间窗口匹配以及track-cluster匹配，着重考虑定时准确性影响
- 抓紧CROB、FMC改板工期，基于第一阶段模块功能测试，准备全链条测试
- 结合模式匹配与霍夫变换算法，优化HLT的MDC寻迹效果；考虑HLT实现其他探测器分析算法的研究方案



小结

- 初步构建完整的L1层级触发框架和算法，对典型物理道触发率 **~ 99%**
- 现有版本本底误触 **~ 40 kHz**
- FPGA硬件平台测试MDC子触发算法延迟 **~ 350 ns + 200 ns**
- HLT 可基于模式识别实现快速径迹段寻找
- 下一阶段，重点关注L1本底误触率降低、L1层级软硬件联调、HLT算法优化等方面



致谢

- 本研究受到安徽省超级陶粲装置关键技术攻关项目和国家自然科学基金专项（重点）项目“新一代2-7GeV能区超高亮度正负电子对撞机触发与数据传输关键技术研究的资助”，特此感谢！

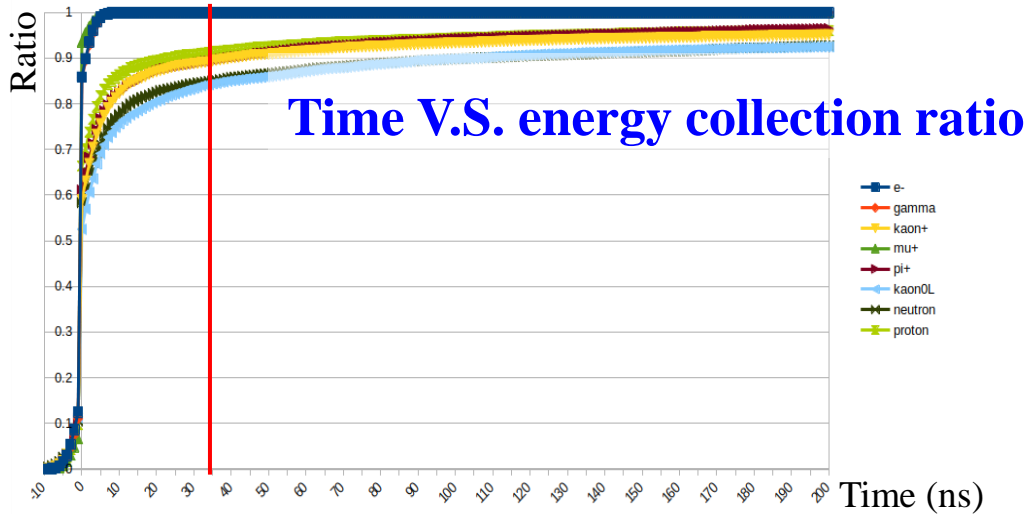
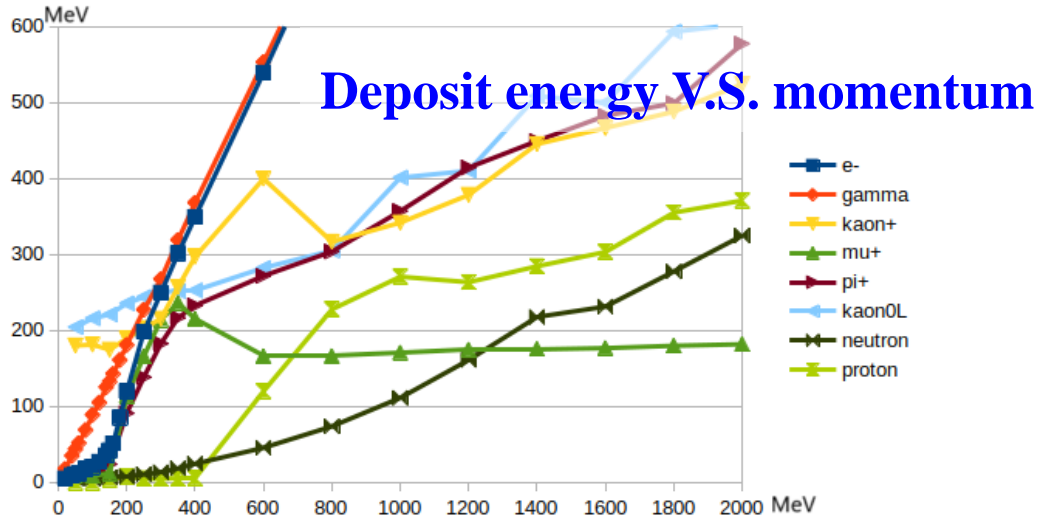


谢 谢!



ECAL sub-trigger R&D

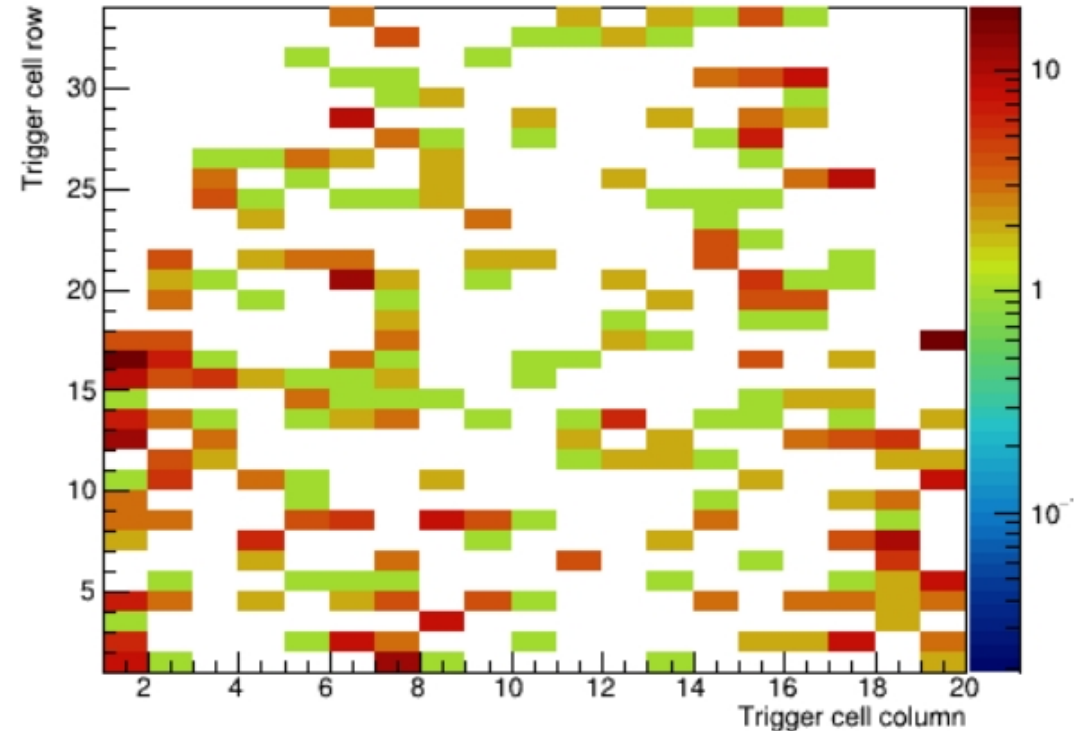
Single particle ECAL response:



Background level simulation:

- 1 μs time window for trigger
- 1 MeV TC signal threshold

ECAL background TC response distribution



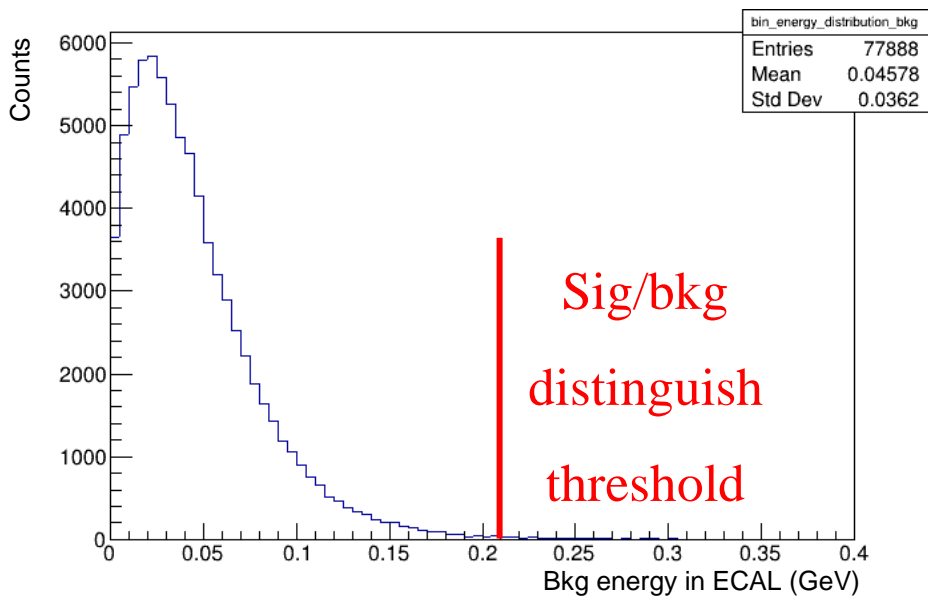


ECAL sub-trigger R&D

Basic parameters setting:

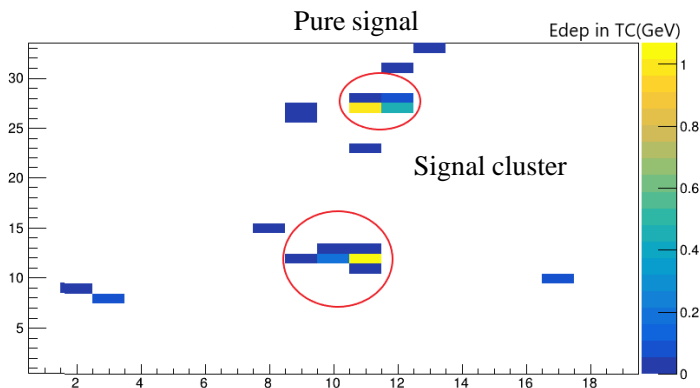
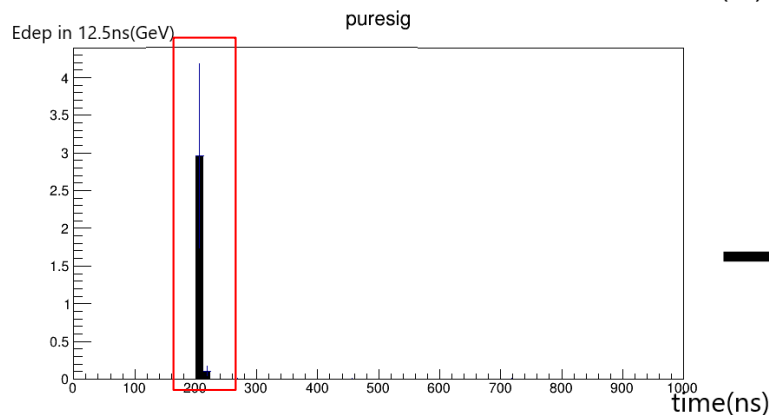
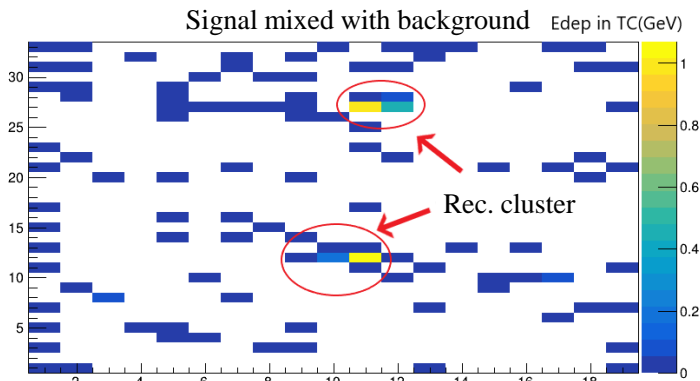
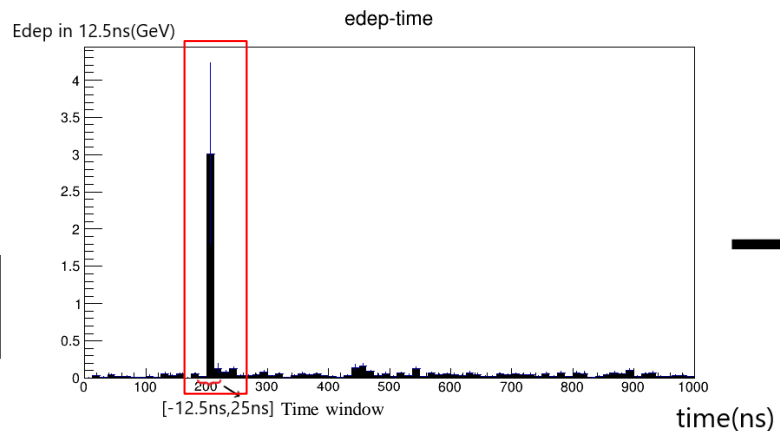
- T-Q map bin width: 12.5 ns
- S/B threshold: 210 MeV
- Cluster energy threshold: 35 MeV

Background energy distribution in each 12.5 ns bin



Cluster reconstruction:

- Limit time window by T-Q map
- Find the rec. cluster in TC map

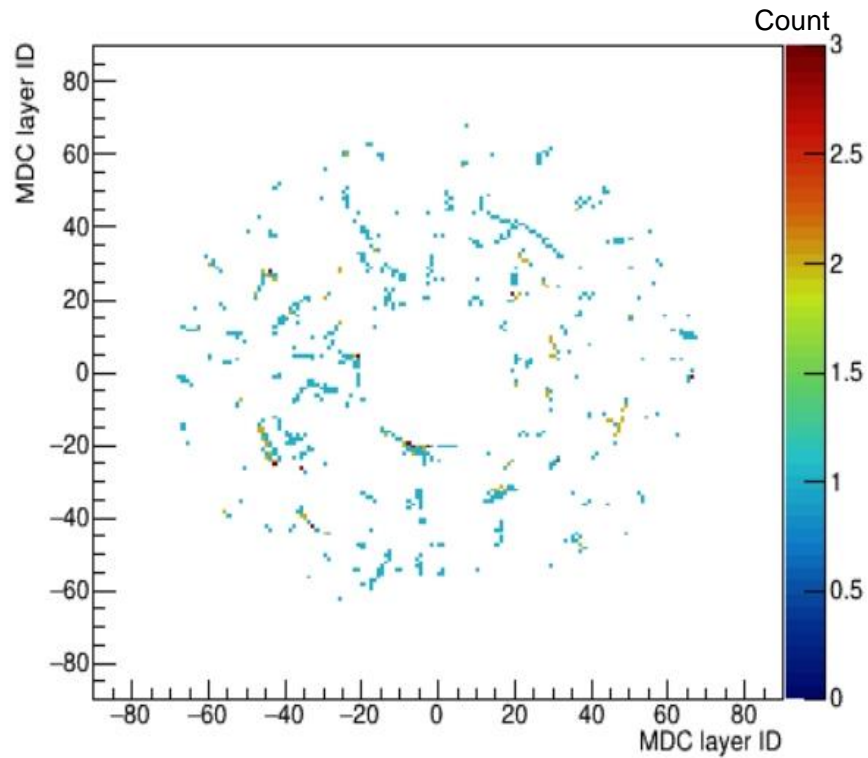




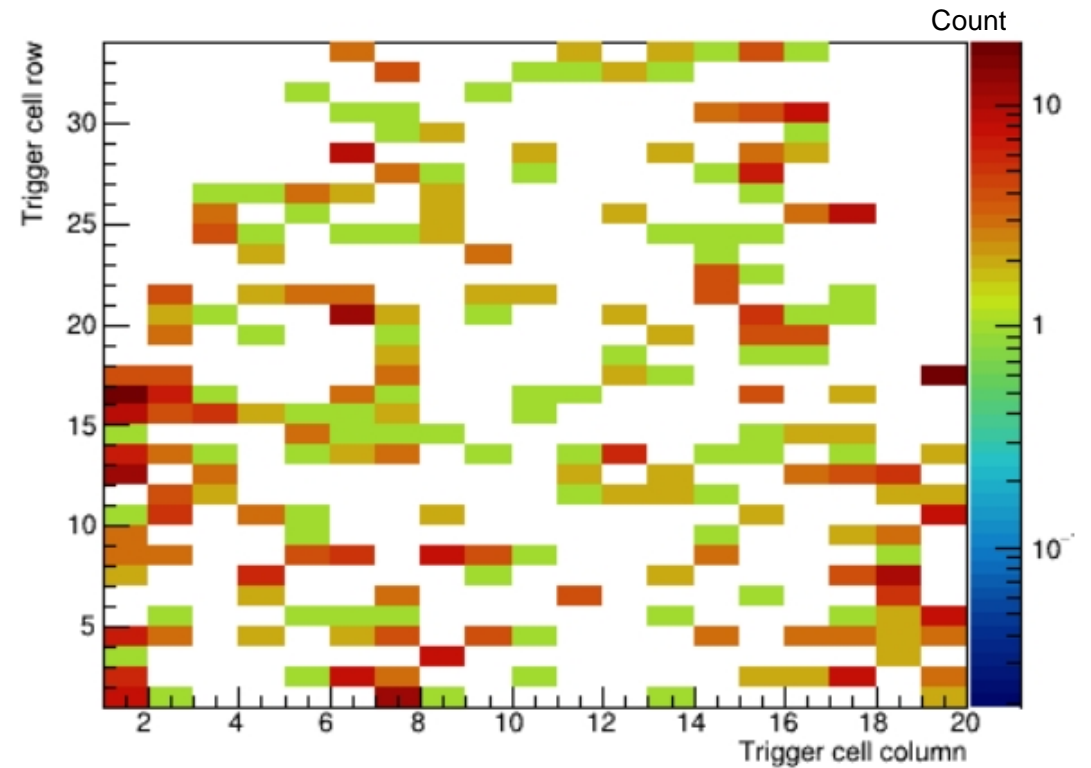
Back up

□ MDC and ECAL background

MDC background distribution in 1 sampling window



ECAL background distribution in 1 sampling window

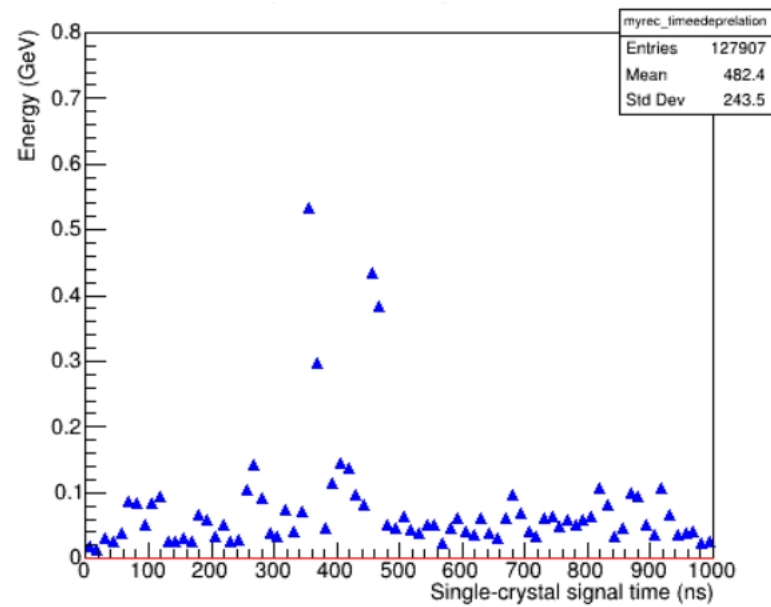




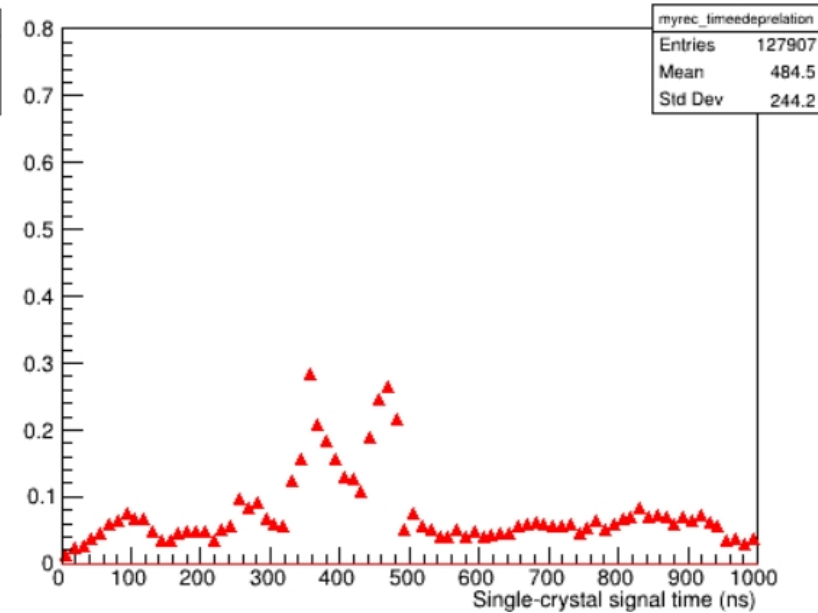
Back up

ECAL online time resolution contributions

Time V.S. deposit energy in whole EMC Time V.S. deposit energy in whole EMC



$$\sigma_t = 5 \text{ ns}$$



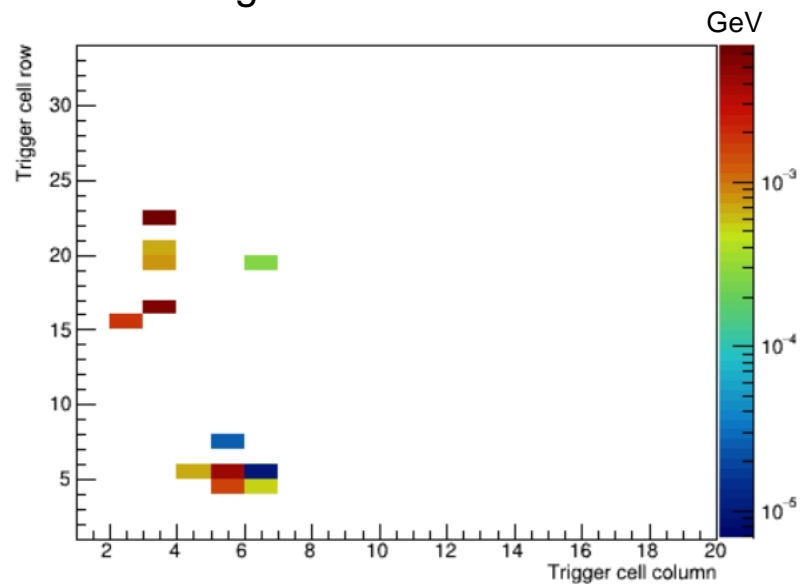
$$\sigma_t = 20 \text{ ns}$$



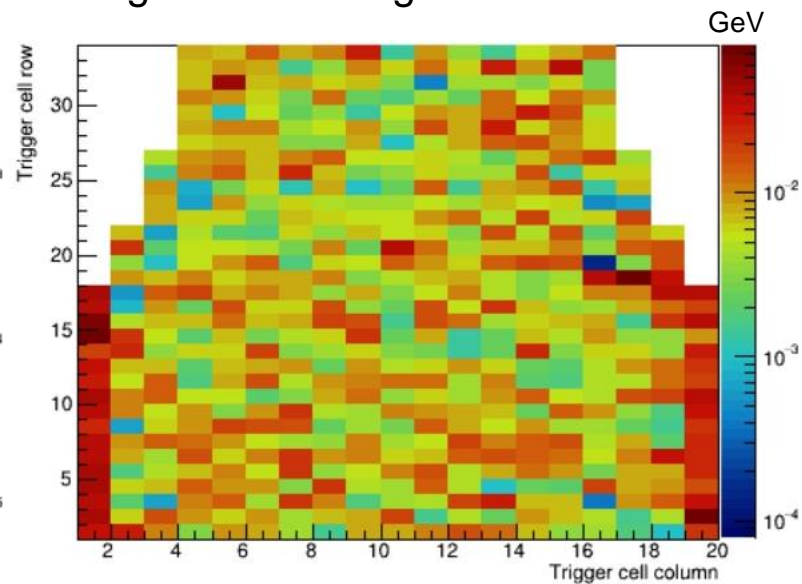
Back up

ECAL response to low energy deposition event

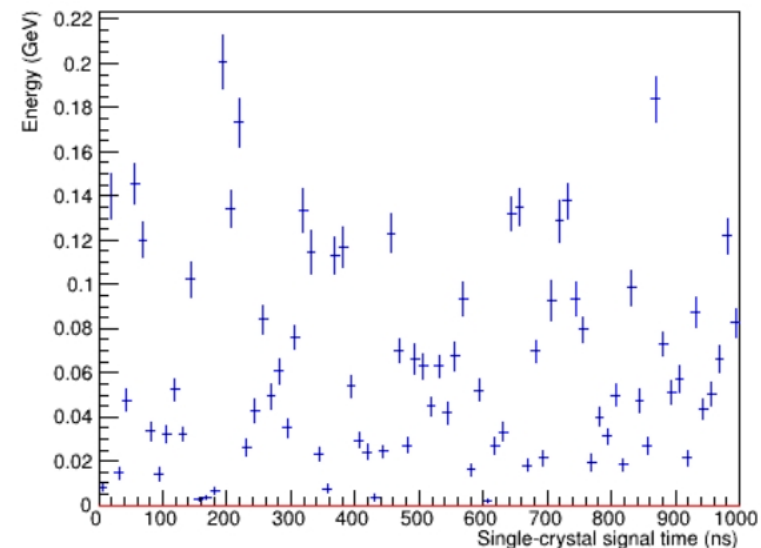
Signal distribution

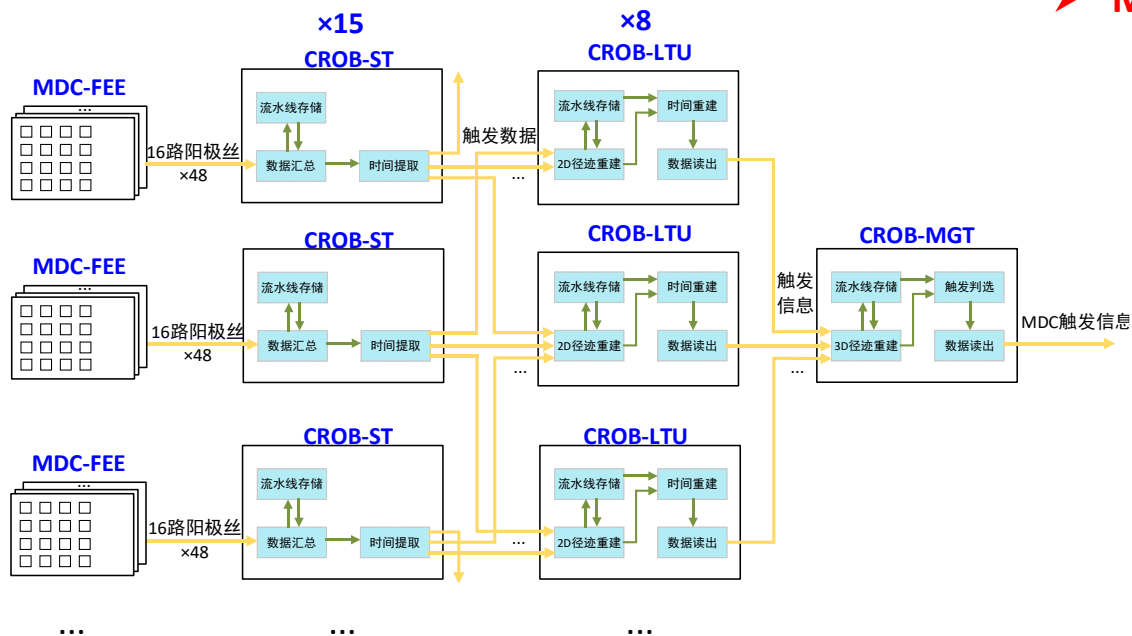


Signal and background distribution



Time V.S. deposit energy in whole EMC





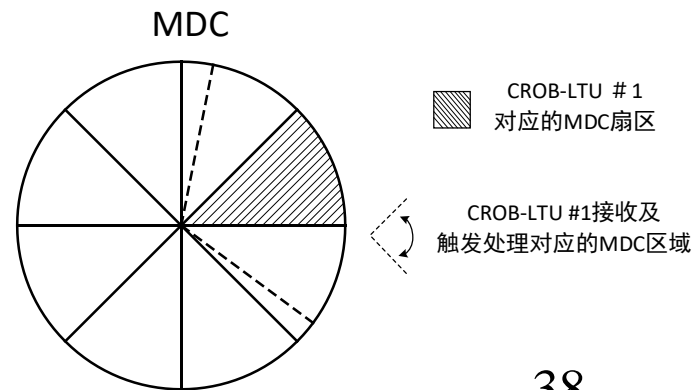
触发电子学板卡数量:

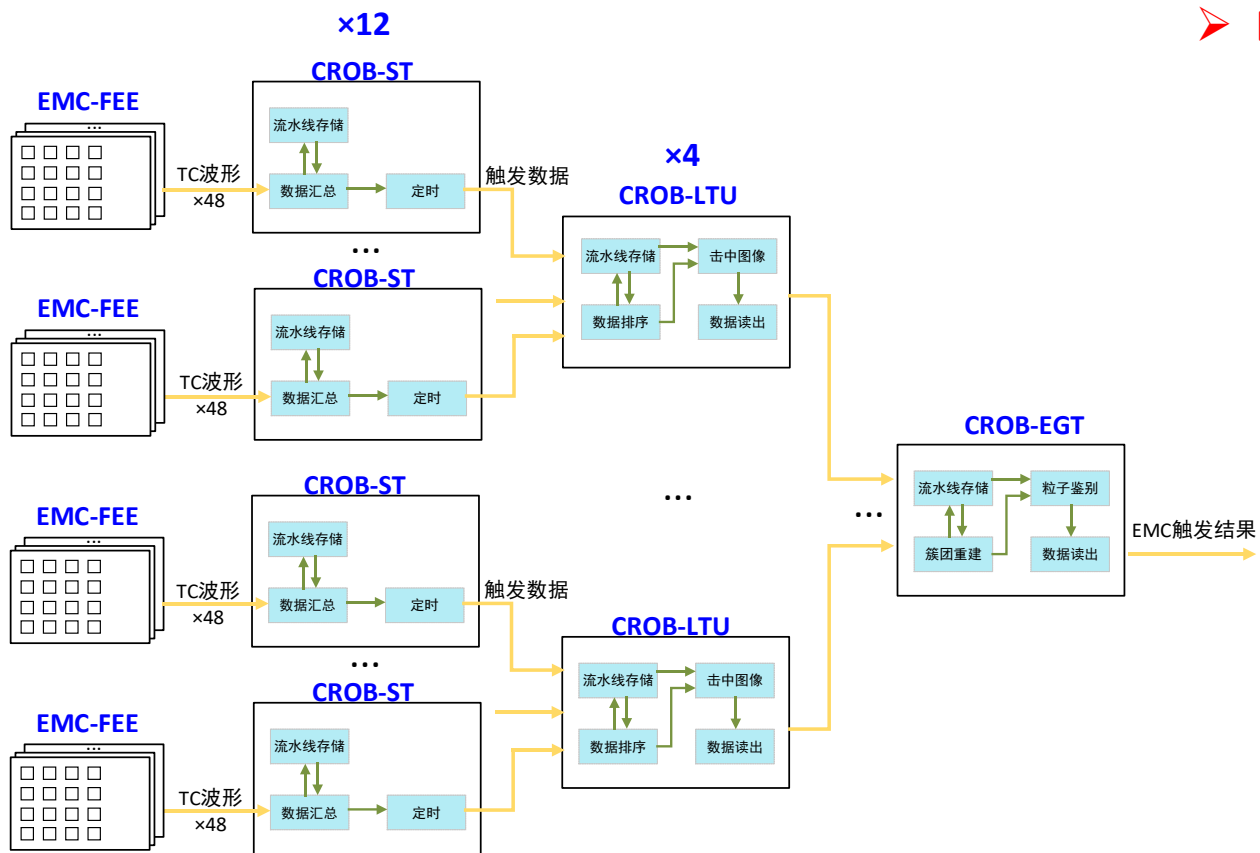
CROB-ST × 15; CROB-LTU × 8; CROB-MGT × 1

➤ MDC子触发系统:

- ❑ CROB-ST: 通过光纤链路接收MDC前端电子学的48路击中信号，每路光纤对应MDC的16根阳极丝，数据率： $(16 \times 3\text{bit} \times 40\text{MHz}) \times 48$
 - CROB-ST对48路击中信号进行**预处理（零压缩）**之后再发送给CROB-LTU
 - 每个CROB-ST的触发数据需要复制3份，发送给3个CROB-LTU，以实现触发处理的Overlap,
- ❑ CROB-LTU: 每块对应MDC的一个扇区，接收整个MDC 1/3的触发信息（对应4或5个CROB-ST），完成**2D径迹重建与击中事例时间重建**
- ❑ CROB-MGT: **MDC Global Trigger**，收集整个MDC的子触发结果，再完成3D径迹重建

MDC触发扇区分配方案
(以LTU #1为例)





触发电子学板卡数量:

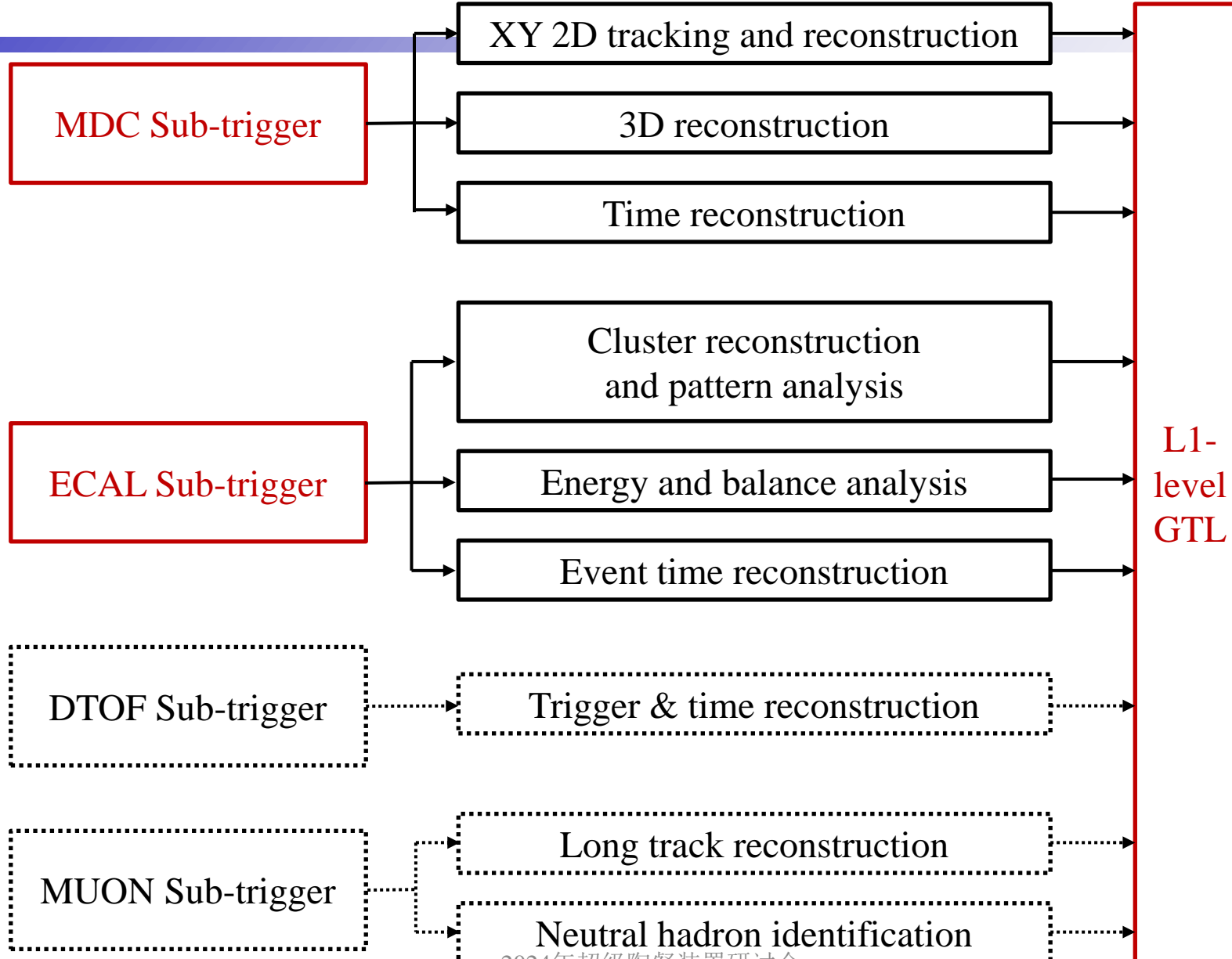
CROB-ST×12; CROB-LTU×4; CROB-EGT×1

➤ EMC子触发系统:

- ❑ CROB-ST: 通过光纤链路接收EMC前端电子学的48路TC (Trigger Cell) 波形, 完成**TC峰值、定时信息获取**

 - 每个TC对应4×4晶体阵列
 - 每路光纤对应1个TC波形(20bit×40MHz)
- ❑ CROB-LTU: 接收最多3块CROB-ST的触发信息, 对应EMC的1/4区域, 完成**TC数据重排列, 提取击中图像和TC峰值信息**

 - 按簇团接收, 每个簇团30bit (10bit地址+10bit能量+10bit时间)
- ❑ CROB-EGT: EMC Global Trigger, 收集整个EMC信息, 包括TC能量和定时信息, 以及击中图像, 完成**簇团重建和粒子鉴别**





MC simulation data

Event filter

MDC data extract

ECAL data extract

MDC parameter solve

MDC back-to-back

MDC-ECAL match

ECAL back-to-back

ECAL parameter solve

ECAL balance

GTL_MDC_parameters

GTL_BackToBack Decision

GTL_Match_parameters

GTL_ECAL_parameters

GTL_ECAL_Balance

Trigger channels definition

GTL_Decision

Trigger efficiency evaluation



GTL 典型触发效果

Physics signal	Number of charged tracks into detector	Number of tracks that should(is) matched	Number of matched tracks in Endcap	Number of matched tracks in Barrel	Number of miss matched tracks	Number of miss matched tracks in Endcap	Number of miss matched tracks in Barrel	Signal trigger rate	Background false trigger rate(kHz)
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J\psi$ $J\psi \rightarrow e^+e^-$	3534	2684 (2323)	238 (67)	2446 (2256)	210	78	132	99.6% \rightarrow 99.5% (≥ 3)	128.3
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J\psi$ $J\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	3547	2702 (2314)	275 (96)	2427 (2218)	254	102	152	98.7% \rightarrow 99.2% (≥ 3)	152.6
$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	1776	1695 (1462)	169 (44)	1526 (1418)	141	50	91	96.8% \rightarrow 98.4% ($=2$)	125.0
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J\psi$ $J\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ $J\psi \rightarrow \Xi \bar{\Xi}$	6189	3363 (2678)	167 (96)	3196 (2582)	356	129	227	99.3% \rightarrow 99.5% (≥ 5)	158.8
$e^+e^- \rightarrow D_0 \bar{D}_0$ $e^+e^- \rightarrow D^+ D^-$ $e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_s^-$	3837	3465 (2824)	276 (52)	3189 (2772)	262	96	166	99.8% \rightarrow 99.4% (≥ 3)	133.1
$e^+e^- \rightarrow D_0 \bar{D}_0$ $D_0 \rightarrow K l \pi^+ \pi^-$	3767	3333 (2774)	237 (74)	3096 (2700)	285	164	121	99.0% (≥ 3)	167.0
$J/\psi \rightarrow \text{gam}$ invisible	1734	876 (1008)	3 (42)	873 (966)	134	42	92	99.8% (≥ 2)	147.6