# STCF触发系统研究进展

方竹君 封常青 彭亮 周启东
On behalf of STCF TRIG group
2025.7.4

# 摘要


**一、STCF实验需求与触发系统设计**

二、L1层级触发算法研究进展

三、L1层级FPGA硬件平台研究进展

四、HLT研究进展

五、小结

# STCF实验需求

## STCF 关键指标

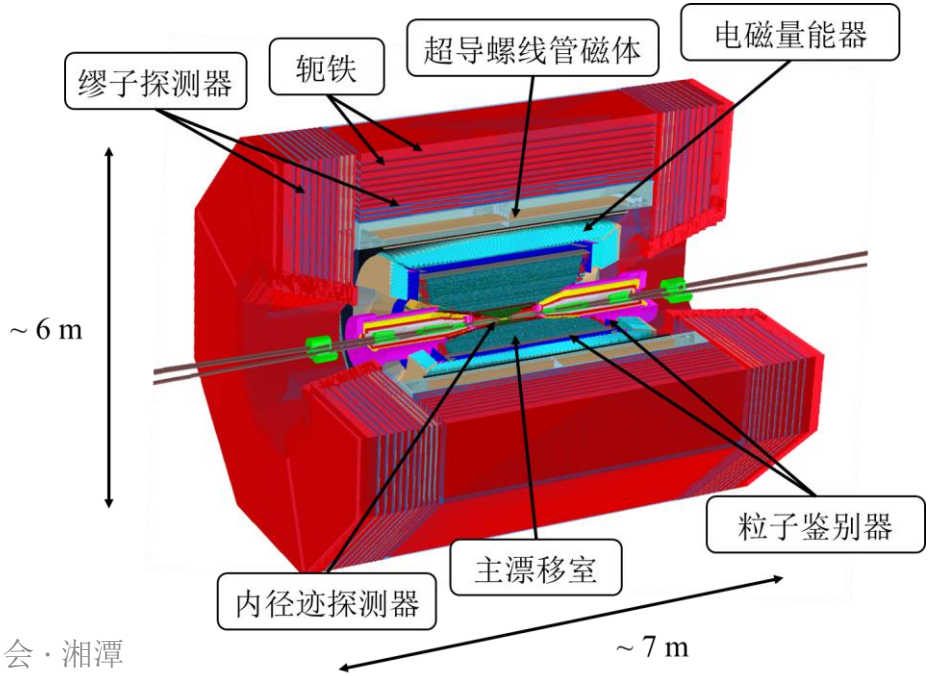
- 峰值对撞亮度 > $0.5\times10^{35}$ $cm^{-2}\cdot s^{-1}$
- 峰值物理事例率 400 kHz
- 1倍本底下，单事例数据量 ~ 18 kB/event

## STCF 1倍本底预估数据量

| Detector system | Sampling time window (ns) | Raw data (GB/s) |
|---|---|---|
| ITKM | 1000 | 2.57 |
| MDC (SSC) | 800 | 4.34 |
| BTOF | 100 | 4.31 |
| DTOF | 100 | 2.78 |
| ECAL | 400 | 7.37 |
| MUON | 600 | 1.48 |
| TOTAL | | **22.85** |

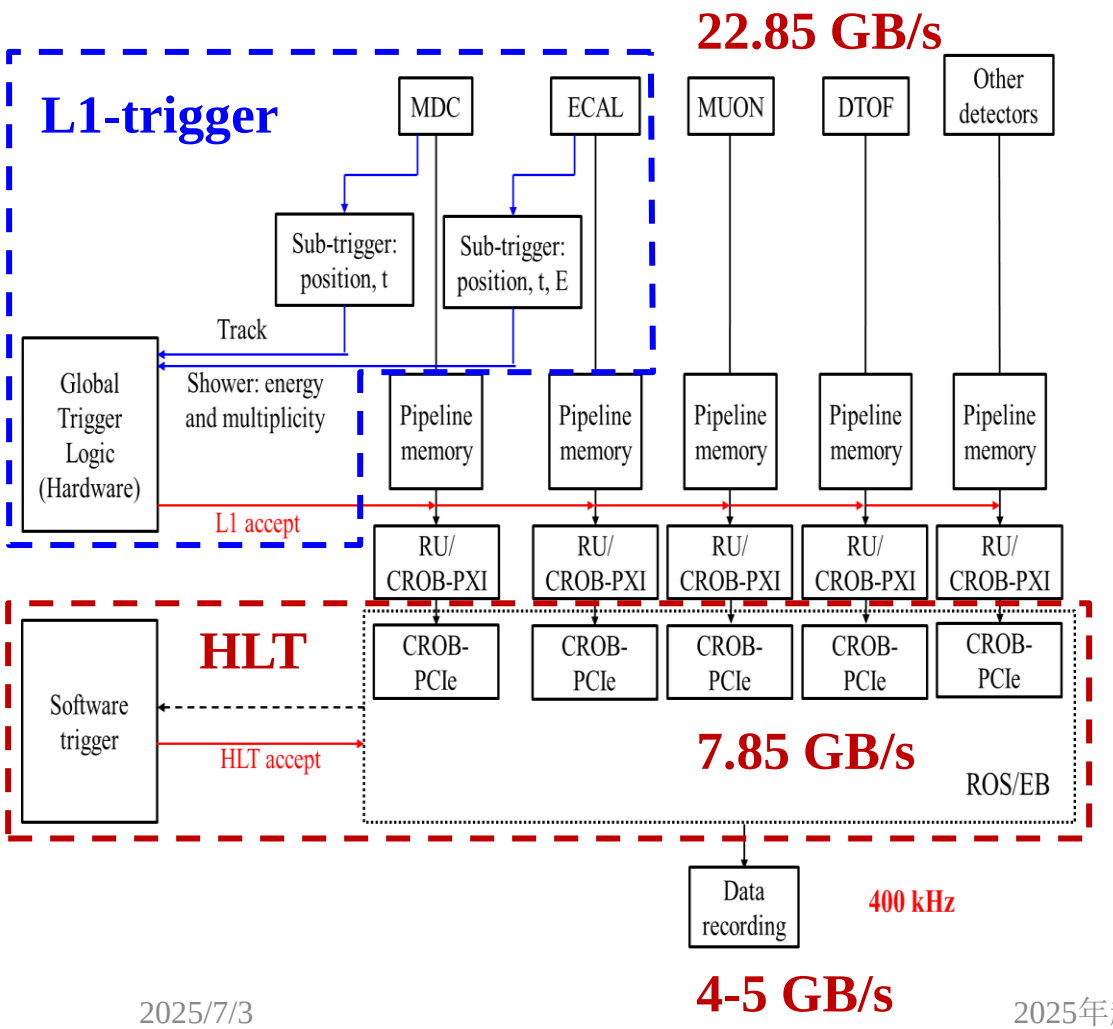
## STCF 触发需求

- 极高物理触发率 （~99%）
- 低本底触发率 （< 50 kHz）
- 高数据量吞吐，低延迟
- 相邻事例区分能力（△T < 100 ns）

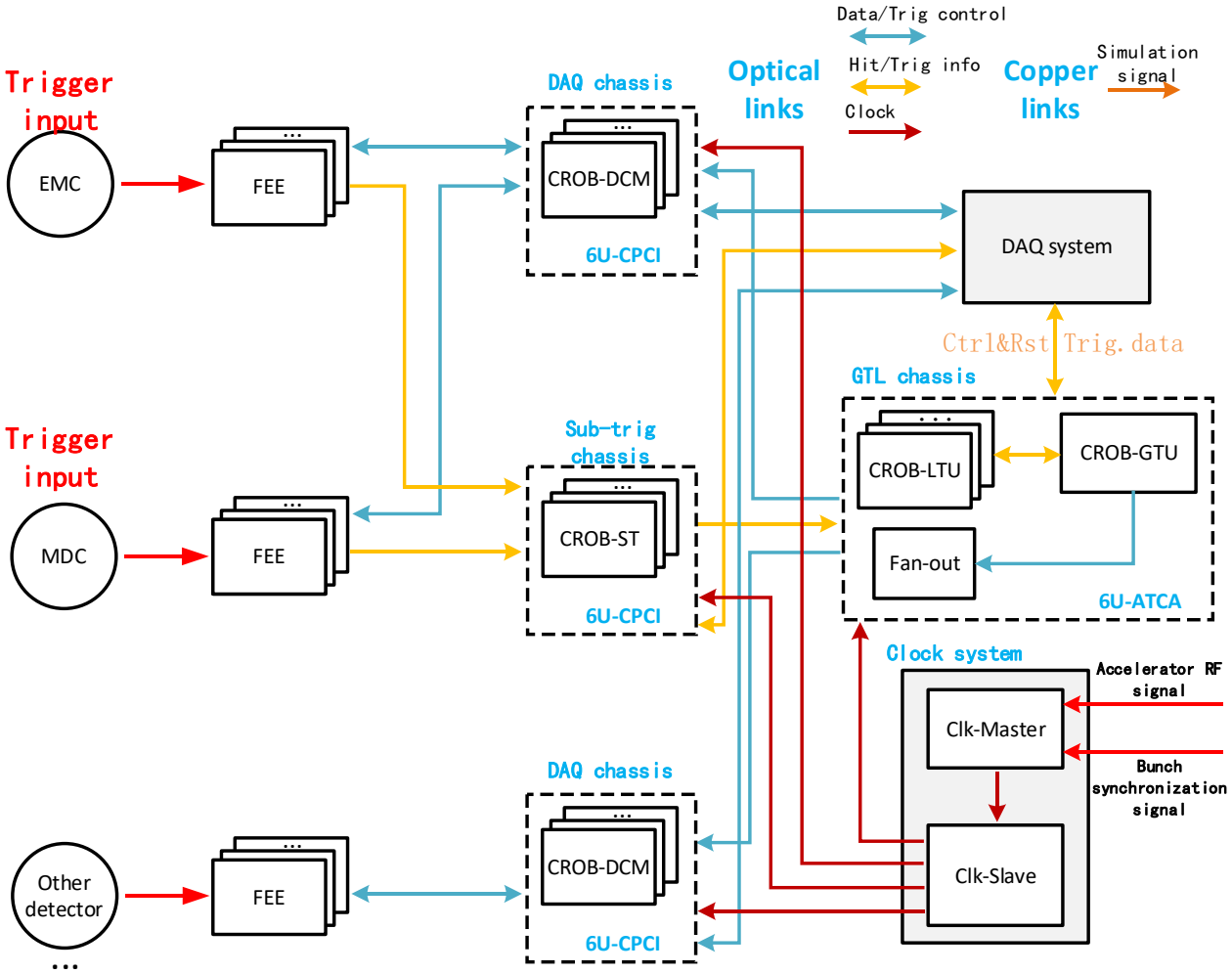


# 触发系统设计

## 触发整体框架设计




## L1 触发与DAQ、CLDT结构关系



# 摘要

一、STCF实验需求与触发系统设计

**二、L1层级触发算法研究进展**

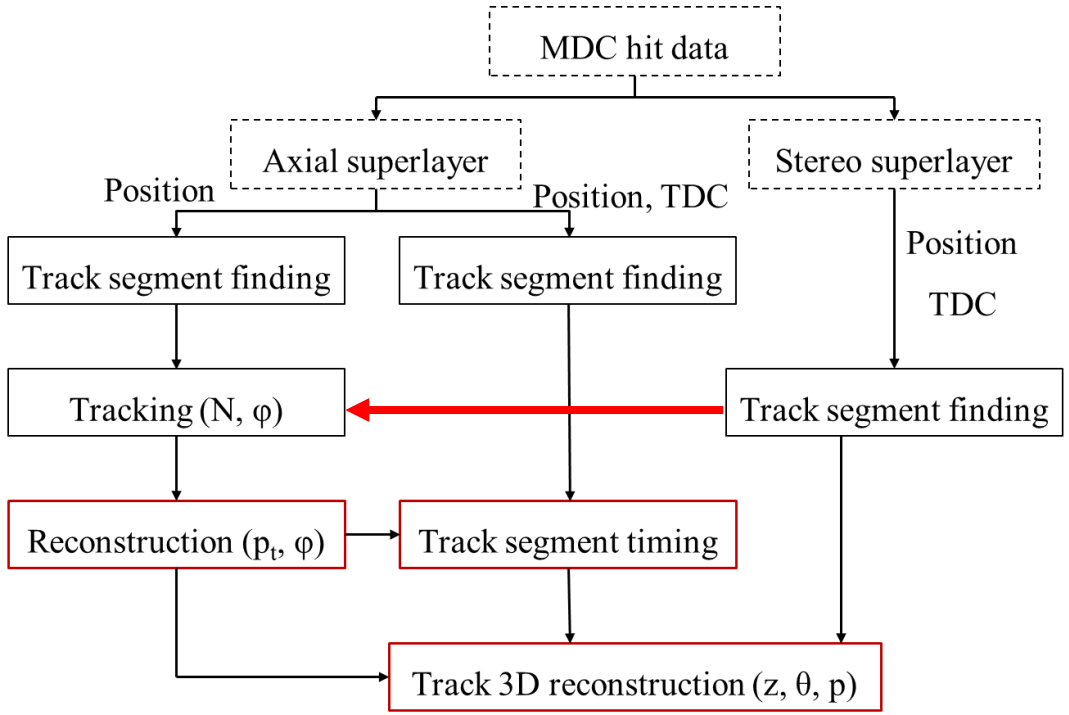
三、L1层级FPGA硬件平台研究进展

四、HLT研究进展

五、小结

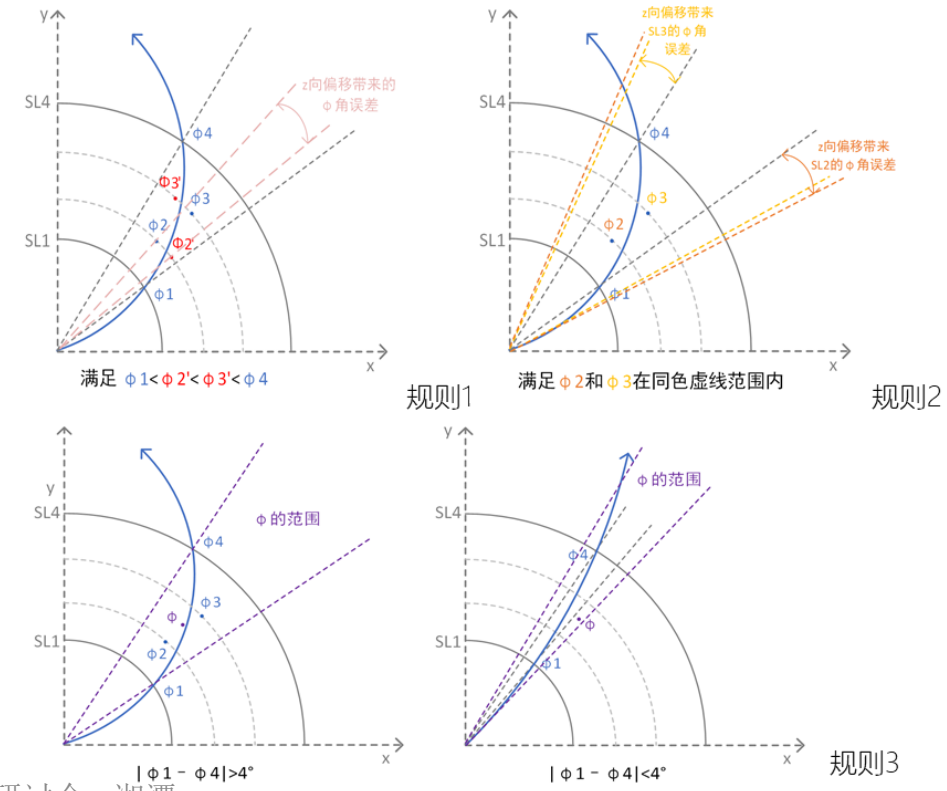
# MDC子触发研究进展

## MDC子触发流程图



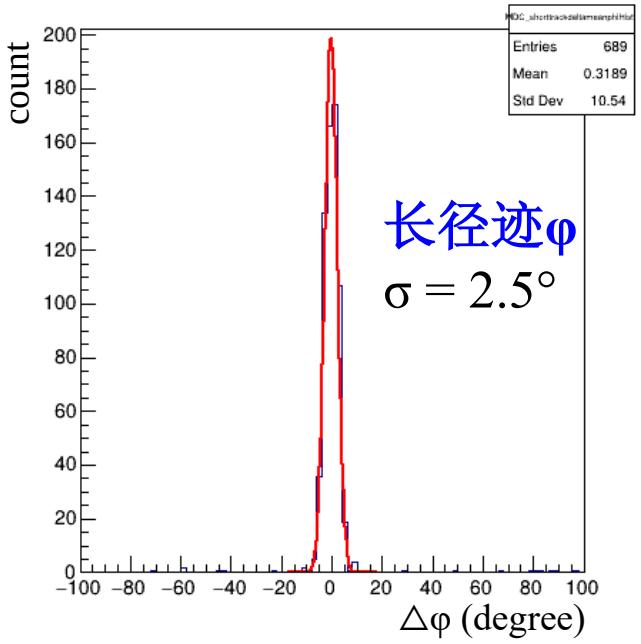

## 斜丝超层引入短径迹2D寻迹

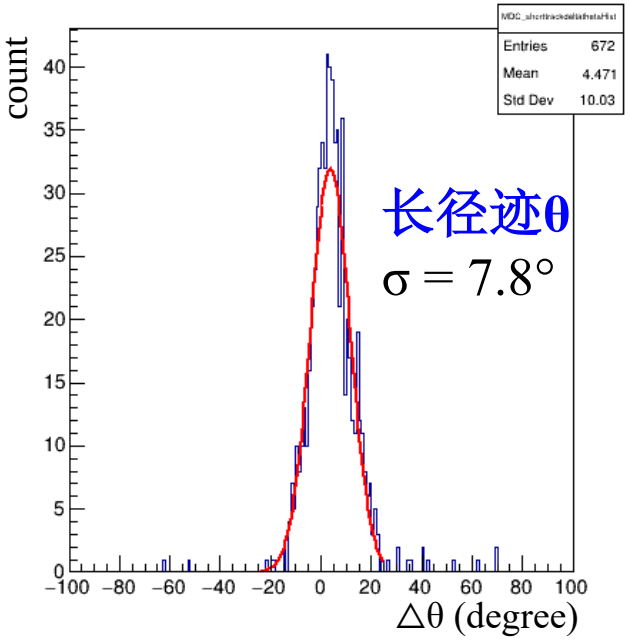
- 通过三个φ向约束实现2D寻迹
- 降低带电触发道50%的本底触发



# MDC子触发研究进展

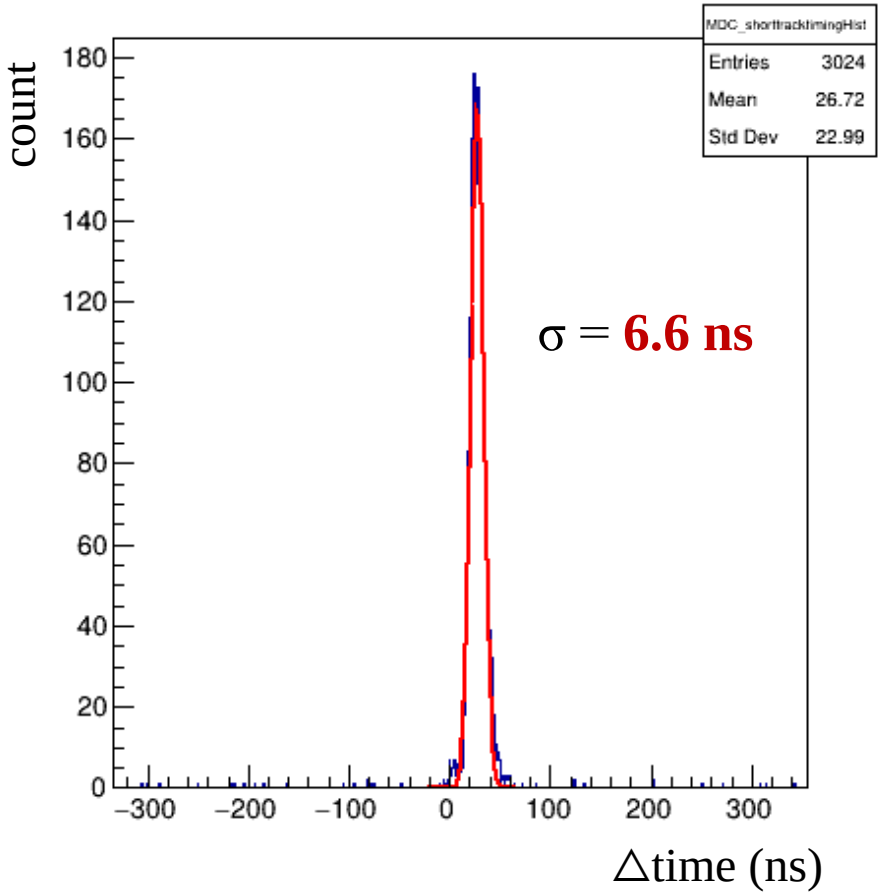
## ◻ 针对不同特征径迹分别研究角度重建方法



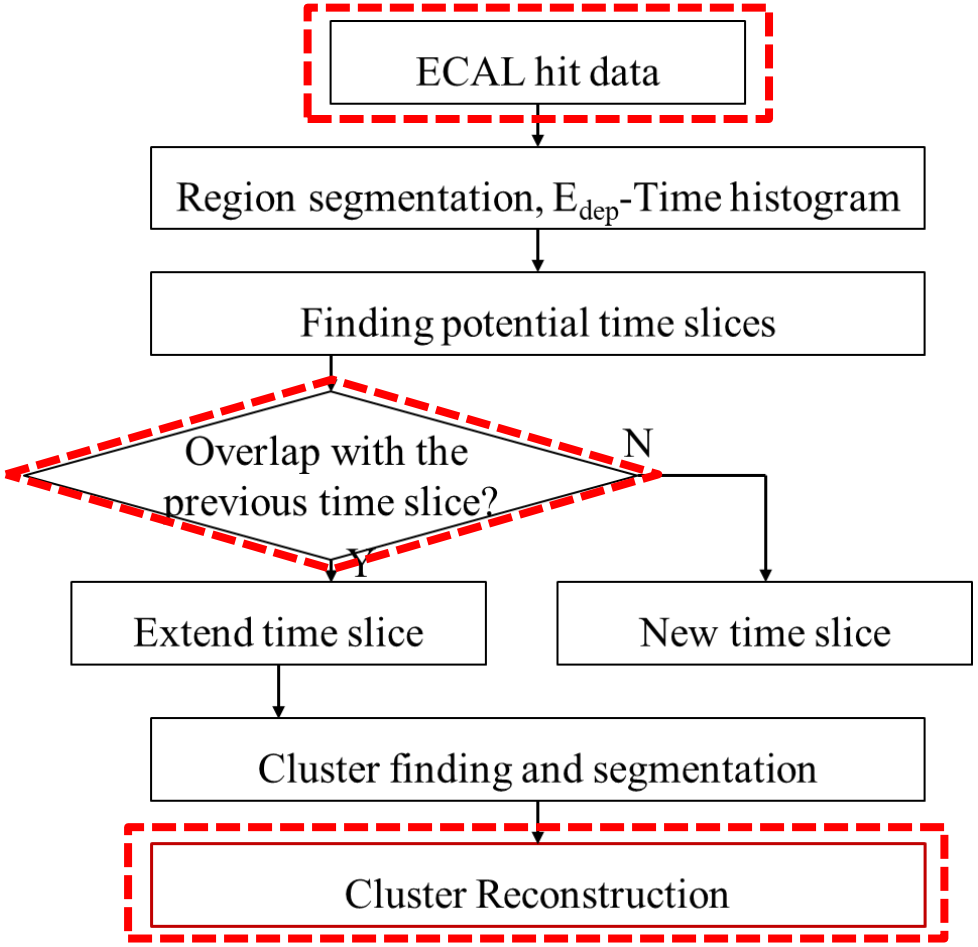

| 短径迹类型 | 重建方法 | 重建标准差 |
|---|---|---|
| 动量较小的径迹 | 神经网络重建 $\theta$ | 2.357° |
| | 基于 $p_t$ 三角关系获得 $\phi$ | 4.794° |
| 动量较大的径迹 | 三角关系近似获得 $\theta$ | 3.831° |
| | 三角关系近似获得 $\phi$ | 2.407° |

## ◻ MDC径迹定时效果



# ECAL子触发研究进展

## ECAL子触发流程图



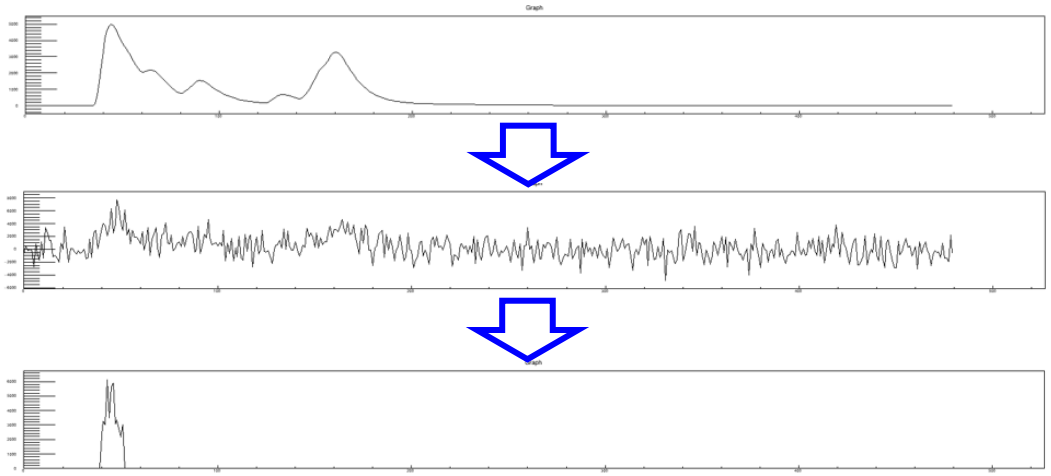

## ECAL波形提取T Q的硬件化实现

- **FEE传输波形信息**
  - ✓ 带宽需求恒定
  - ？ 传输数据总量更高
- **FEE传输信号T, Q**
  - ✓ 可以获得信号晶体编号信息
  - ✓ 传输数据总量少
  - ？ 传输数据峰值受本底影响大

Trigger cell 波形

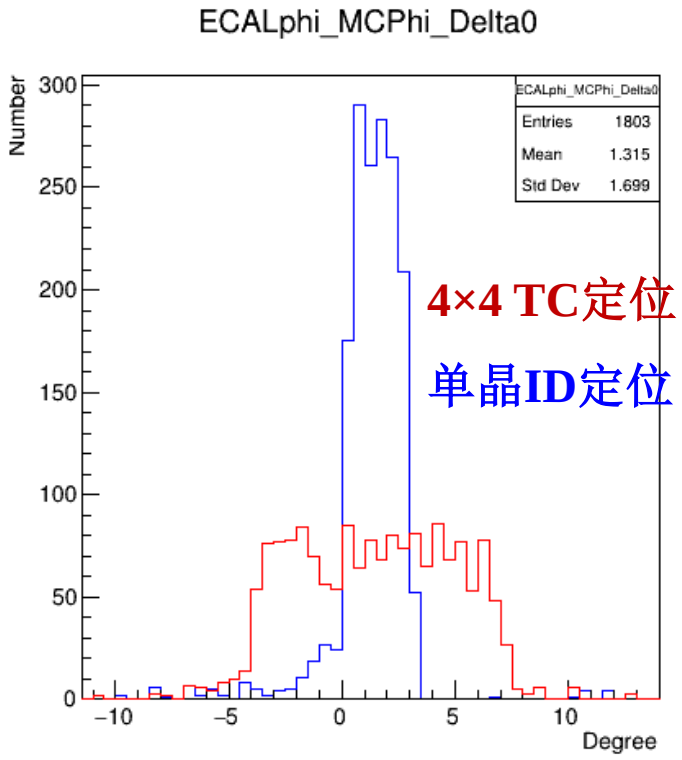
加电子学噪声

过阈处理，待提取信息



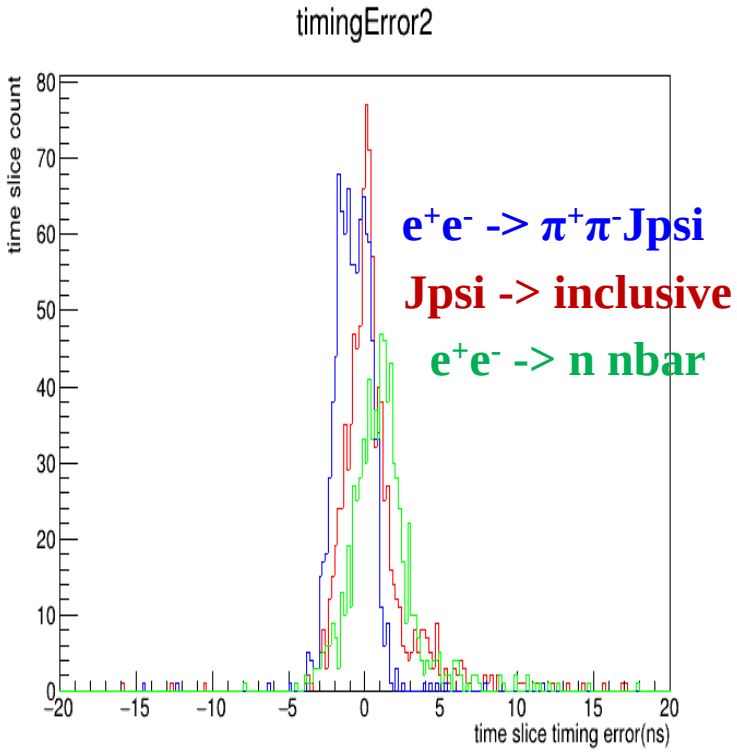
# ECAL子触发研究进展

## ◻ 提升角度重建精度



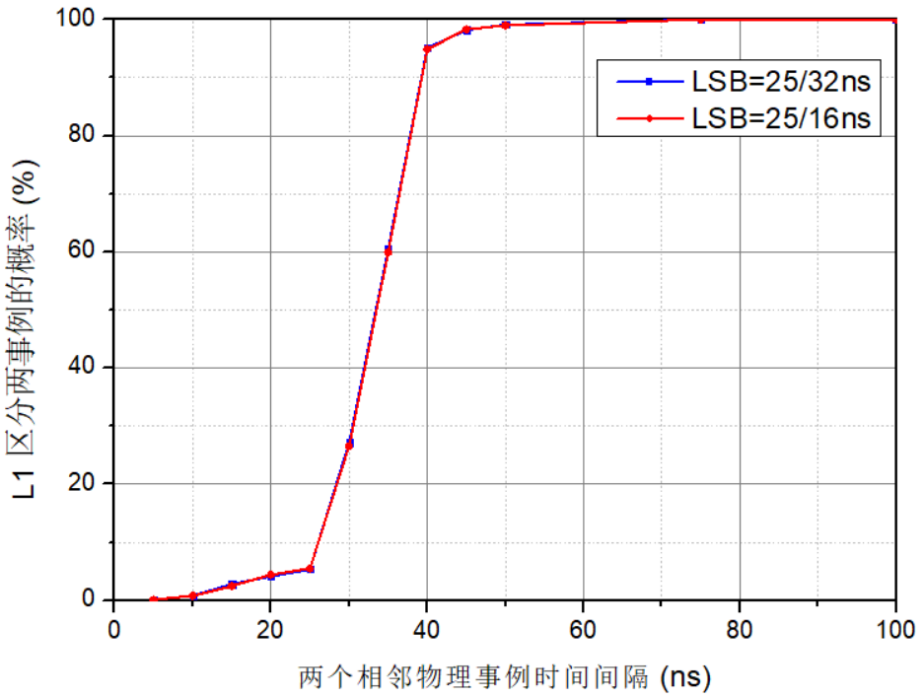

φ向定位精度3.1°→1.0°

## ◻ 分析事例定时




L1定时σ~1.5 – 2 ns

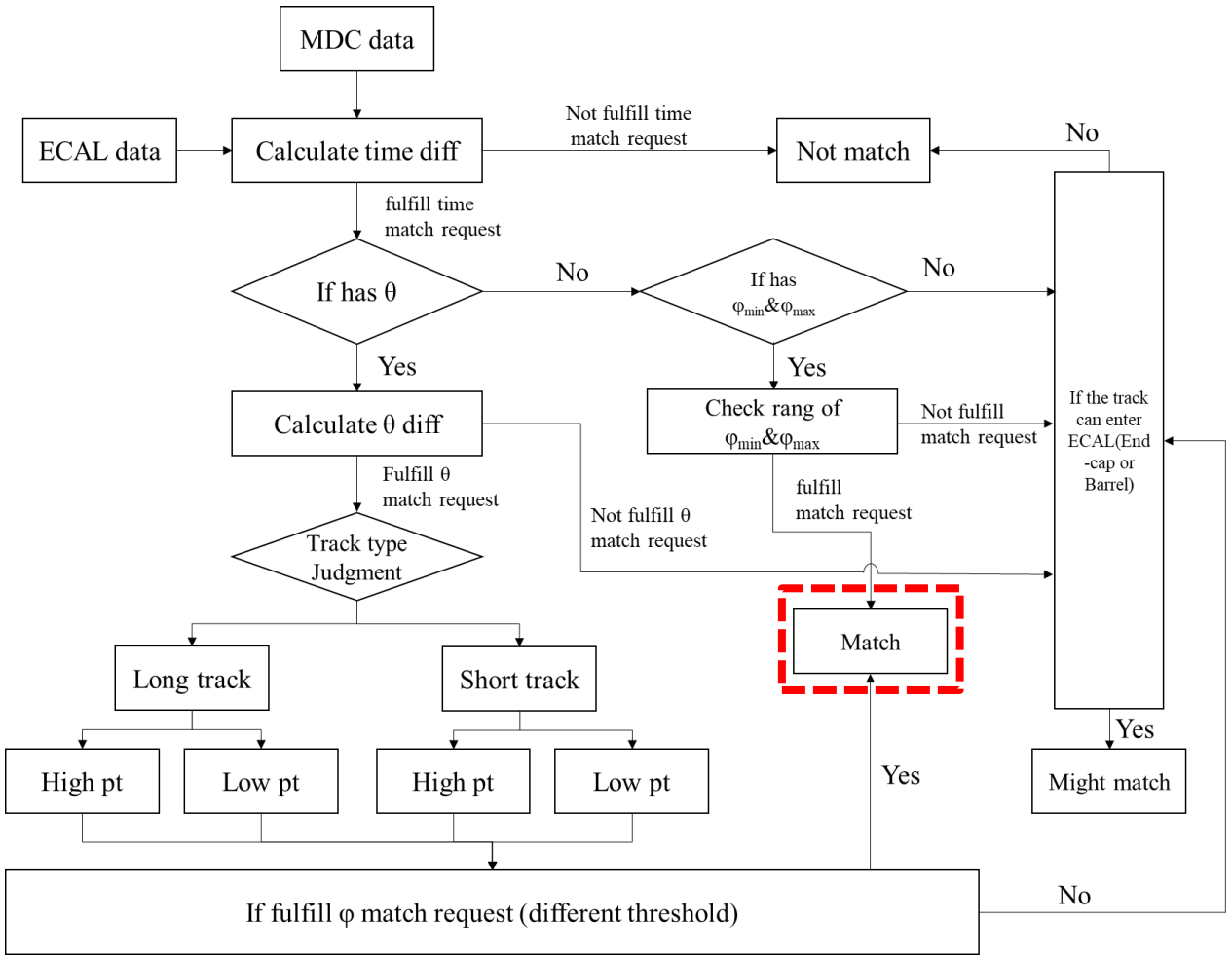
## ◻ 相邻事例区分能力




有效识别相距50 ns 的对撞事例

# GTL研究进展

## GTL 流程图




## 提升track-cluster 匹配正确率

- 使用t, φ, θ等多维约束条件（加入θ限制，track-cluster错误匹配数量降低40%）
- 以e+e-→π+π-Jpsi，Jpsi→e+e-为例，带电道本底触发率从43 kHz降至20 kHz

## 细化触发表条件

- 根据本底水平调整阈值
- 分析本底特征，缩小中性触发道范围
- 极角分区域判定，压低本底触发

# GTL研究进展

## 本底触发率 < 30 kHz @(带电+中性触发道)

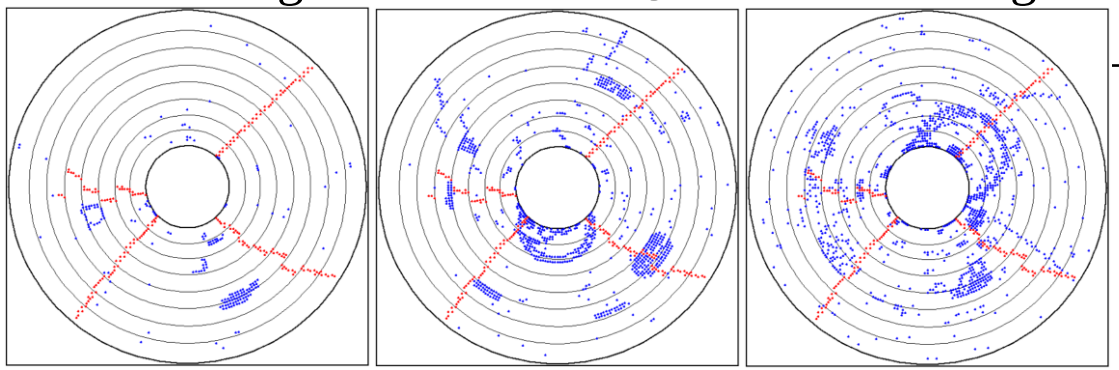
| Physics channel | Physics signal | Energy point | No. of tracks should( is ) matched | No. of matched tracks in Endcap | No. of matched tracks in Barrel | Signal trigger rate | Background false trigger rate (kHz) | Signal trigger rate |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 混合类型 | Jpsi -> inclusive | 3.097GeV | 2187 (2131) | 289 (200) | 1898 (1931) | 927/945(937) (≥2) | 26.5 | 98.1% (98.9%) |
| 带电道 | $e^+e^-$ -> $\pi^+\pi^-$Jpsi; Jpsi -> $e^+e^-$ | 4.26GeV | 3222 (3069) | 426 (380) | 2796 (2689) | 950/952 (≥3) | 23.5 | 99.8% |
| | $e^+e^-$ -> $\pi^+\pi^-$Jpsi; Jpsi -> $\mu^+\mu^-$ | 4.26GeV | 3262 (3072) | 460 (389) | 2802 (2683) | 946/948 (≥3) | | 99.8% |
| | $e^+e^-$ -> $\tau^+\tau^-$ | 4.26GeV | 1615 (1550) | 183 (147) | 1432 (1403) | 864/879 (≥2) | | 98.4% |
| | $e^+e^-$ -> $\pi^+\pi^-$Jpsi; Jpsi -> $\Lambda\bar{\Lambda}$ | 3.097GeV | 2230 (1895) | 286 (205) | 1944 (1690) | 912/918 (≥3) | | 99.5% |
| | $e^+e^-$ -> $\pi^+\pi^-$Jpsi; Jpsi -> $\Xi\bar{\Xi}$ | 3.097GeV | 2295 (1969) | 323 (154) | 1972 (1815) | 909/922 (≥5) | | 98.9% |
| | $e^+e^-$ -> $K^+K^-$Jpsi; Jpsi -> $l^+l^-$ | 4.682GeV | 2734 (2858) | 273 (262) | 2461 (2596) | 962/964 (≥3) | | 99.8% |
| | $e^+e^-$ -> $D_0\overline{D_0}$ | 3.773GeV | 2647 (2832) | 268 (261) | 2379 (2571) | 954/954 (≥3) | | 100% |
| | $e^+e^-$ -> $D^+D^-$ | 3.773GeV | 2334 (2982) | 264 (254) | 2070 (2708) | 984/983 (≥3) | | 100% |
| | $e^+e^-$ -> $D_s^+D_s^-$ | 4.04GeV | 3301 (3641) | 349 (344) | 2952 (3297) | 936/936 (≥5) | | 100% |
| 中性道 | J/psi-> gam invisable | 3.097GeV | - | - | - | 532/549 (≥1&&gam_momentum>=1) | 27.9 | 96.9% |
| | e+e- -> n nbar | 3.097GeV | - | - | - | 535/548 (≥2&&Nbar≥1&&EDep≥0.5) | | 97.6% |
| | e+e- -> gam n nbar | 3.097GeV | - | - | - | 720/730 (≥2&&Nbar≥1&&EDep ≥1) | | 98.6% |
| | e+e- -> gam n nbar(ISR) | 3.713GeV | - | - | - | 389/405 (≥2&&Nbar≥1&&EDep≥0.7) | | 96.0% |
| 亮度监测 | RBB | 4.26GeV | 914 (624) | 620 (358) | 294 (266) | 436/457 (≥2&&pt≥0.5GeV/c) | | 95.4% |

# GTL研究进展

## ◻ 以现有本底为基准，多倍本底：

- 对信号触发率尚无显著影响
- 本底触发率随本底水平非线性升高
- 中性触发道与少带电径迹触发道是本底触发主要贡献

1 bkg　3 bkg　5 bkg



| $e^+e^- \to \pi^+\pi^- Jpsi$<br>$Jpsi \to e^+e^-$ | 信号<br>触发率 | 本底<br>触发率<br>（kHz） | 少带电径迹<br>触发道<br>（kHz） | 中性<br>触发道<br>（kHz） |
|---|---|---|---|---|
| 1bkg | 948/952 = 99.6% | 14 | 5 | 6 |
| 2bkg | 945/952 = 99.3% | 56 | 13 | 38 |
| 3bkg | 951/952 = 99.9% | 86 | 28 | 54 |
| 5bkg | 948/952 = 99.6% | 253 | 65 | 168 |

| Jpsi -> inclusive | 信号<br>触发率 | 本底<br>触发率<br>（kHz） | 少带电径迹<br>触发道<br>（kHz） | 中性<br>触发道<br>（kHz） |
|---|---|---|---|---|
| 1bkg | 919/945 = 97.2% | 26 | 6 | 18 |
| 2bkg | 917/945 = 97.0% | 52 | 11 | 40 |
| 3bkg | 917/945 = 97.0% | 119 | 37 | 78 |
| 5bkg | 914/945 = 96.7% | 266 | 65 | 169 |

# 摘要

一、STCF实验需求与触发系统设计

二、L1层级触发算法研究进展

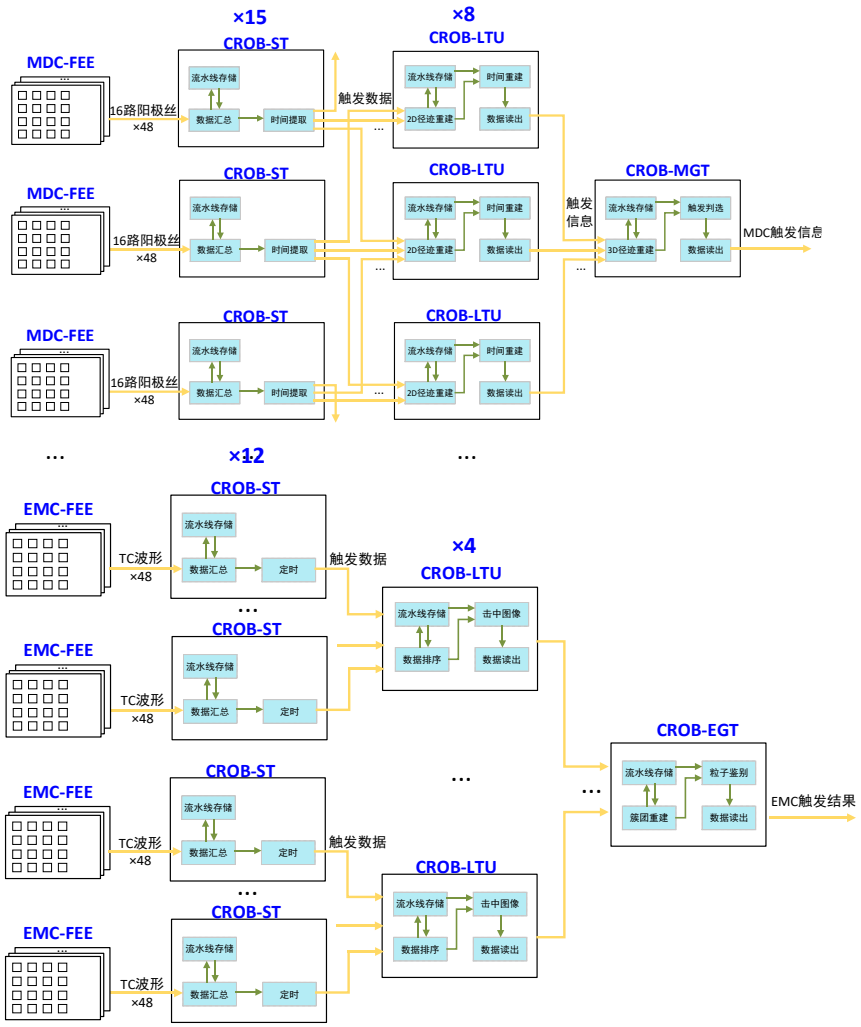
**三、L1层级FPGA硬件平台研究进展**

四、HLT研究进展

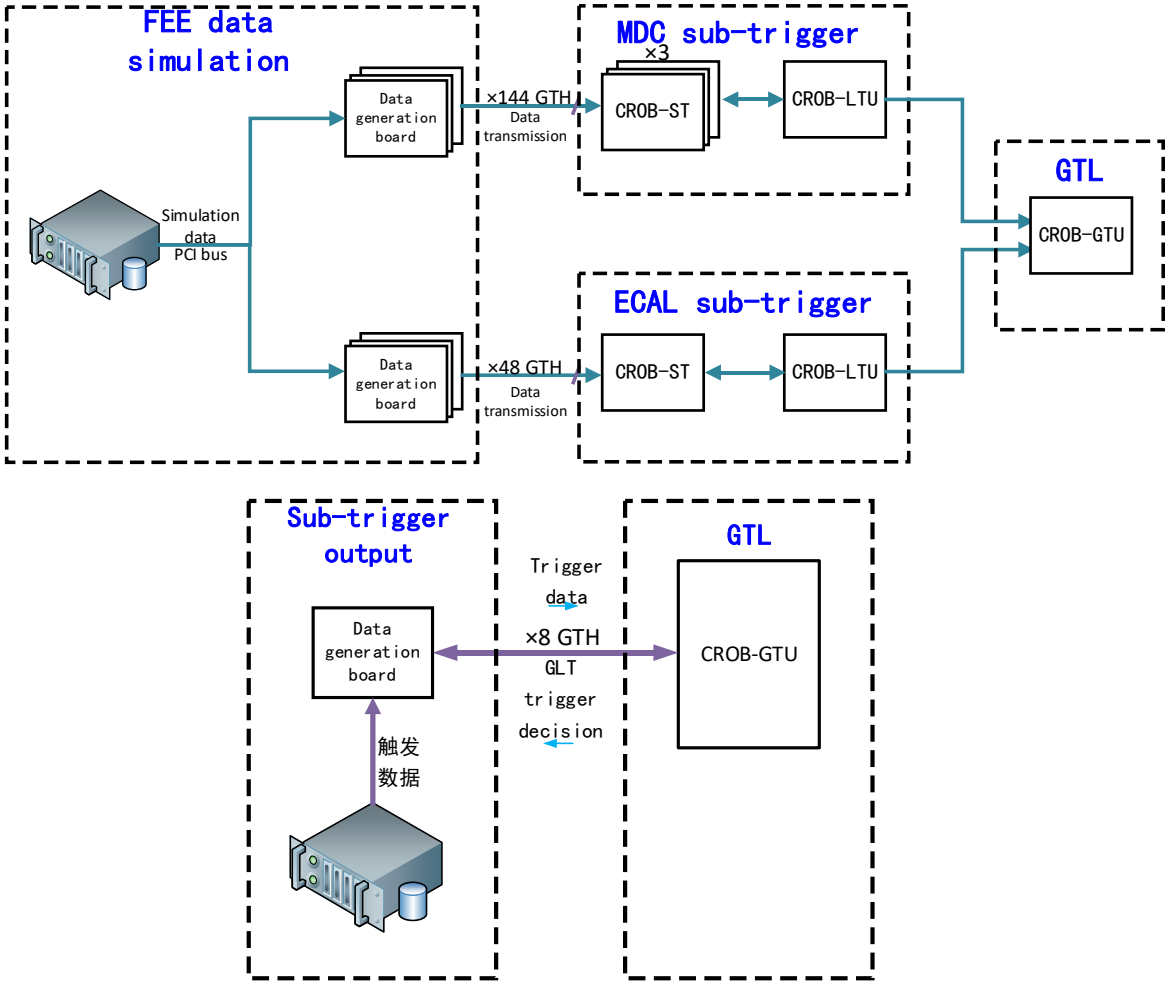
五、小结

# L1层级FPGA硬件平台架构设计

## □ MDC、ECAL子触发硬件架构



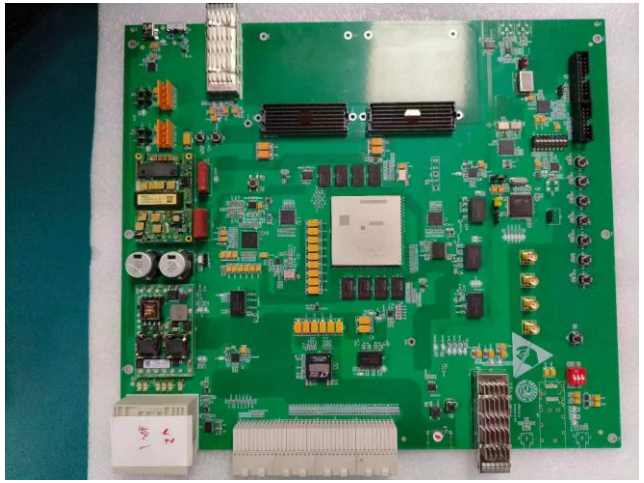

## □ L1触发原理样机架构设计

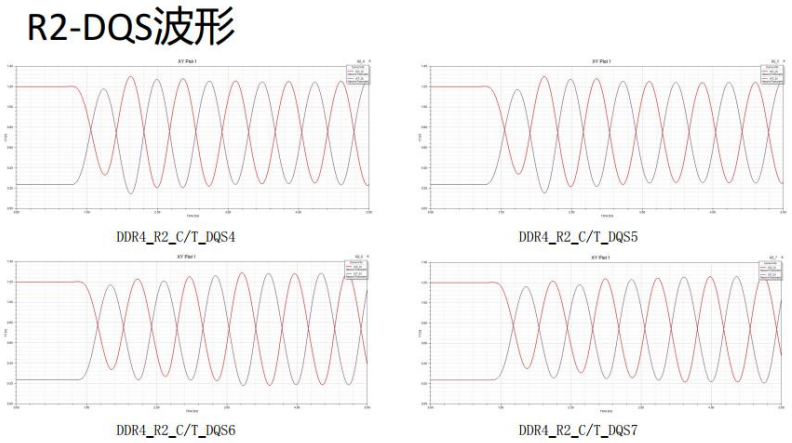


# 核心板卡研究进展

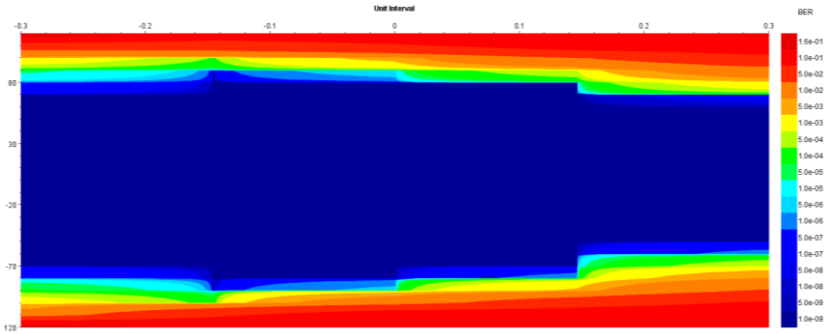
- **CROB-LTU**
  - 完成第三版板卡制板、调试
  - 目前有4片DDR4可用，将针对DDR4再次优化
- **FMC子板**
  - 优化高频性能，完成测试
- **数据产生板**
  - 通过全部测试
- **CTM板**
  - 通过全部测试

## 第三版CROB-LTU板卡及DQS波形






## FMC子板10Gbps 眼图

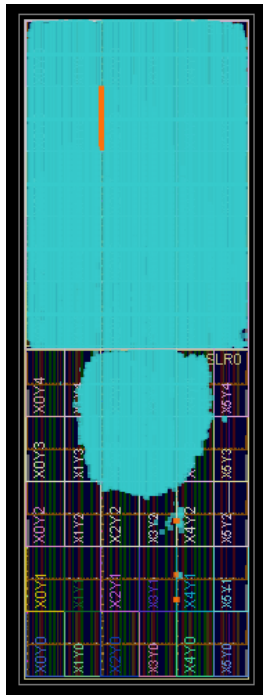


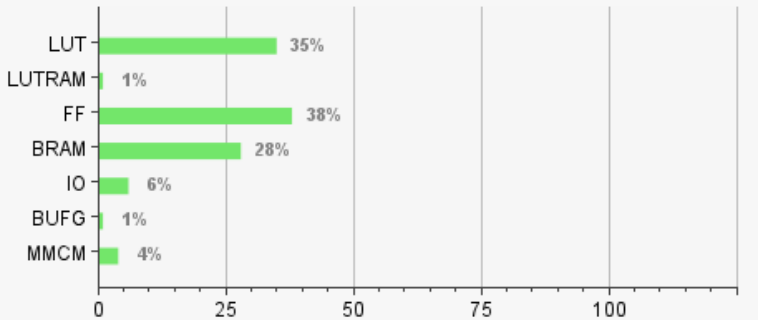
## 数据产生板机箱测试

# ECAL算法硬件化进展

## ECAL桶部簇团分割算法资源量消耗

- LUT消耗35%，FF消耗38%，BRAM消耗28%
- 仍有进一步优化空间

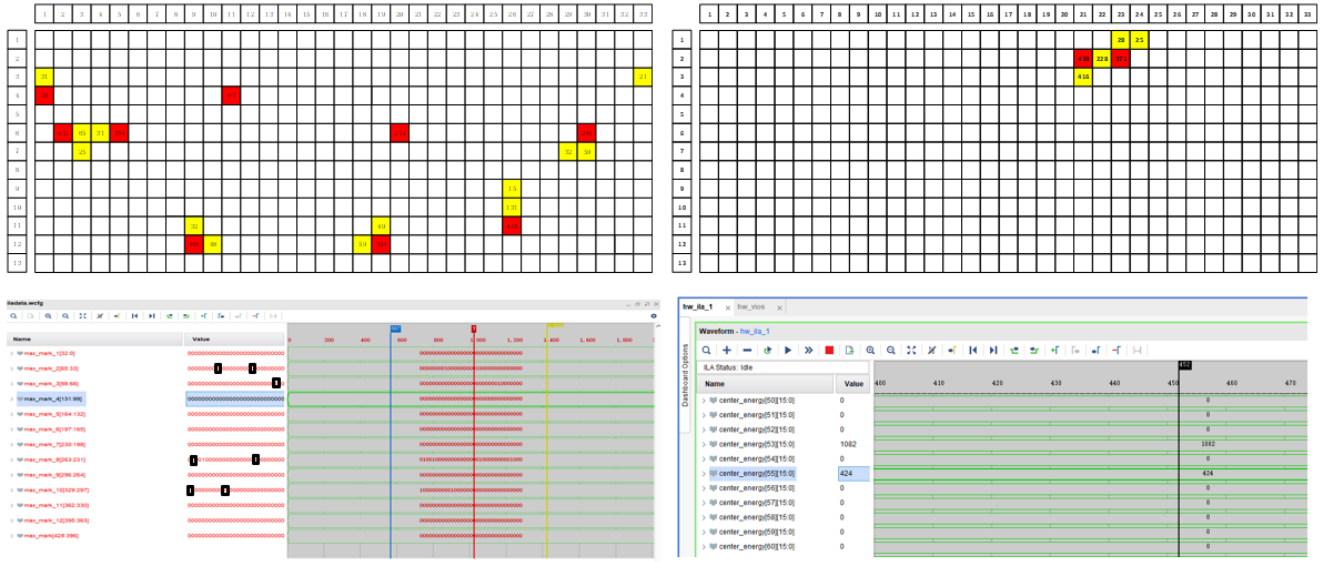





| Resource | Utilization | Available | Utilization % |
|---|---|---|---|
| LUT | 229814 | 663360 | 34.64 |
| LUTRAM | 829 | 293760 | 0.28 |
| FF | 508745 | 1326720 | 38.35 |
| BRAM | 599.50 | 2160 | 27.75 |
| IO | 45 | 728 | 6.18 |
| BUFG | 6 | 1248 | 0.48 |
| MMCM | 1 | 24 | 4.17 |

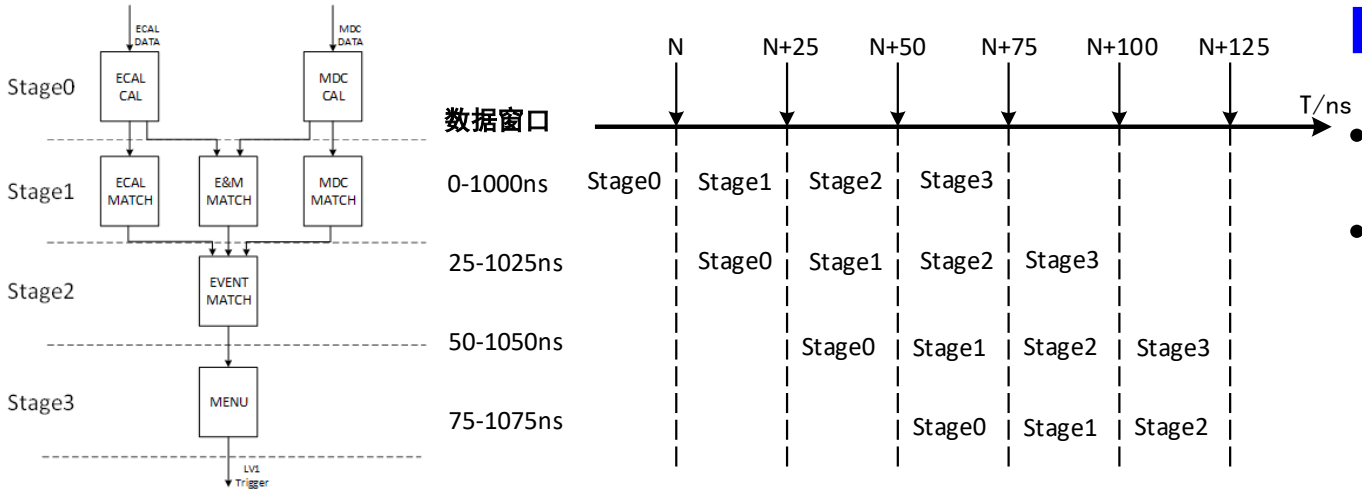
## ECAL桶部子触发算法软硬件联调

- 软硬件簇团分割结果完全一致
- 硬件簇团能量重建结果接近软件算法
- 硬件算法延迟 **< 150 ns**



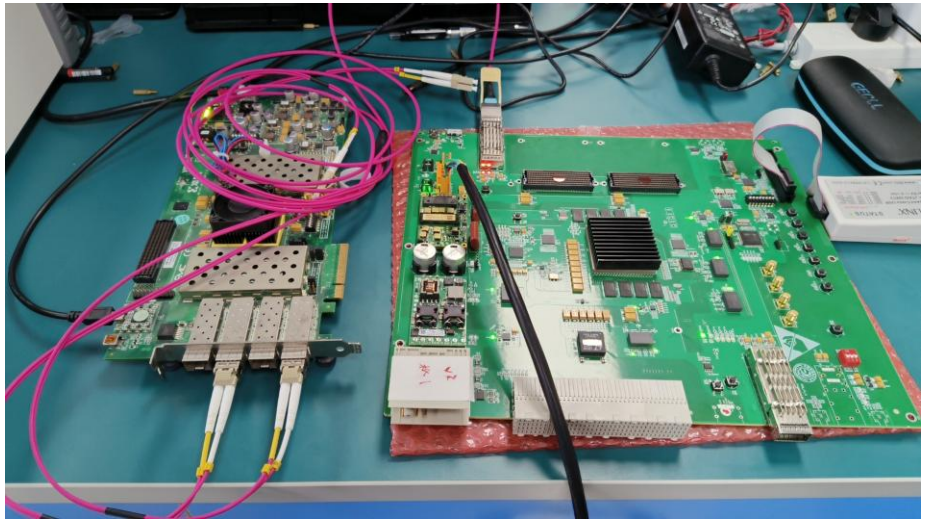
# GTL算法硬件化与联调进展

## □ GTL流水线框图




## □ TRIG与DACQ、ECAL联调GBT工程

- 为10月束流测试做准备
- 调试优化，两个通道数据传输正常



## □ GTL资源消耗量评估（~ 12%）

| Name | CLB LUTs (663360) | CLB Registers (1326720) | CARRY8 (82920) | CLB (82920) | LUT as Logic (663360) | Bonded IOB (624) | HPIOB (520) | GLOBAL CLOCK BUFFERs (1248) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| dataremix | 122656 | 107134 | 5094 | 19350 | 122656 | 3 | 3 | 1 |
| EMCdataremix_1 (EMCdataremix) | 10958 | 16732 | 248 | 2597 | 10958 | 0 | 0 | 0 |
| match1 (match) | 86079 | 63360 | 4480 | 13306 | 86079 | 0 | 0 | 0 |
| MDCdataremix_1 (MDCdataremix) | 11228 | 14186 | 62 | 2330 | 11228 | 0 | 0 | 0 |
| trig1 (trig) | 13023 | 12856 | 93 | 2567 | 13023 | 0 | 0 | 0 |

# 摘要

一、STCF实验需求与触发系统设计

二、L1层级触发算法研究进展

三、L1层级FPGA硬件平台研究进展

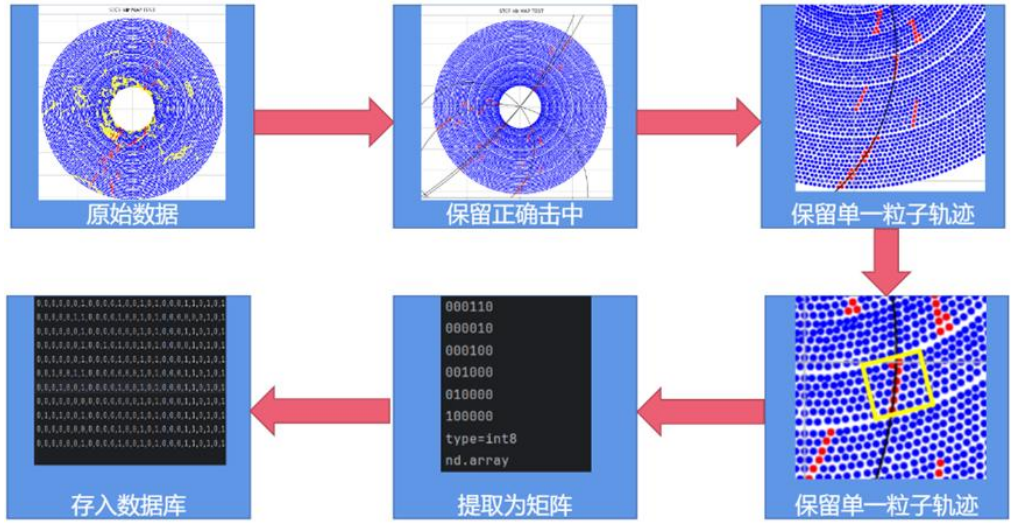
**四、HLT研究进展**

五、小结

# HLT研究进展

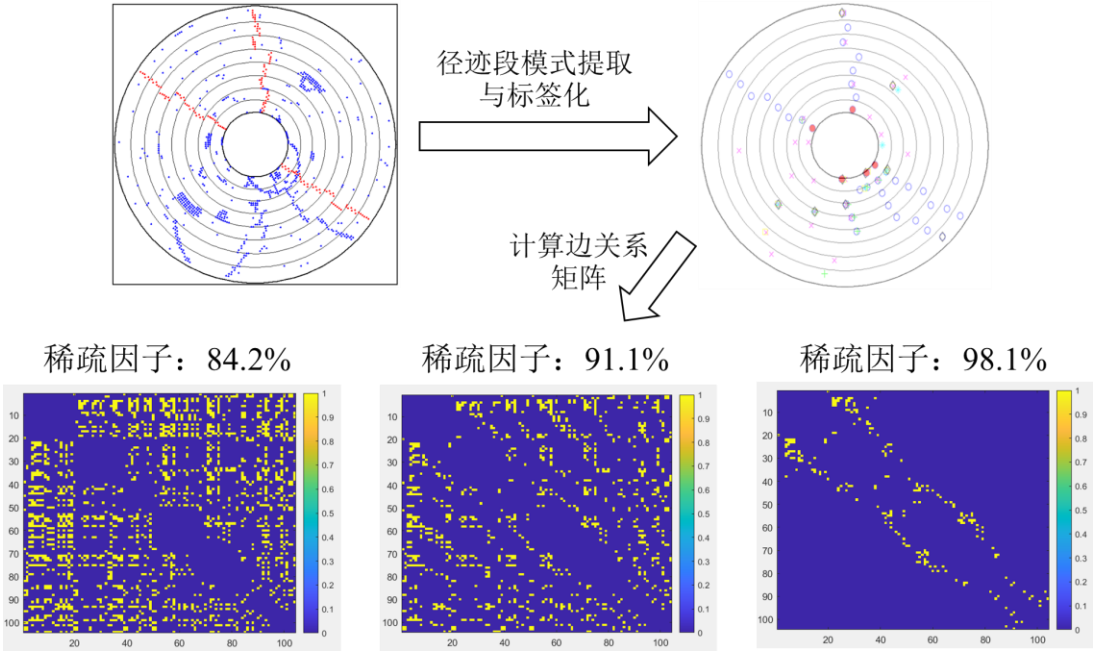
## ◻ 模式匹配 + 霍夫变换的MDC HLT算法

- 研究细节可参照彭亮老师的报告“基于异构框架的STCF MDC HLT算法研究”




| 本底/通道 | D+D- | D0D0 | Ds+Ds- | Gamnbar | Gamnbar_ISR | jpsi | KKjpsi | Lamdba | Nnbar | pipiee | pipimumu | Tau_par | xi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 压缩率 | 0.47 | 0.46 | 0.51 | | 0.39 | | 0.45 | 0.43 | | 0.45 | 0.45 | 0.37 | 0.47 |
| 准确率 | 0.87 | 0.91 | 0.87 | | 0.90 | | 0.91 | 0.80 | | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.71 |

## ◻ 径迹段+神经网络的MDC HLT寻迹算法



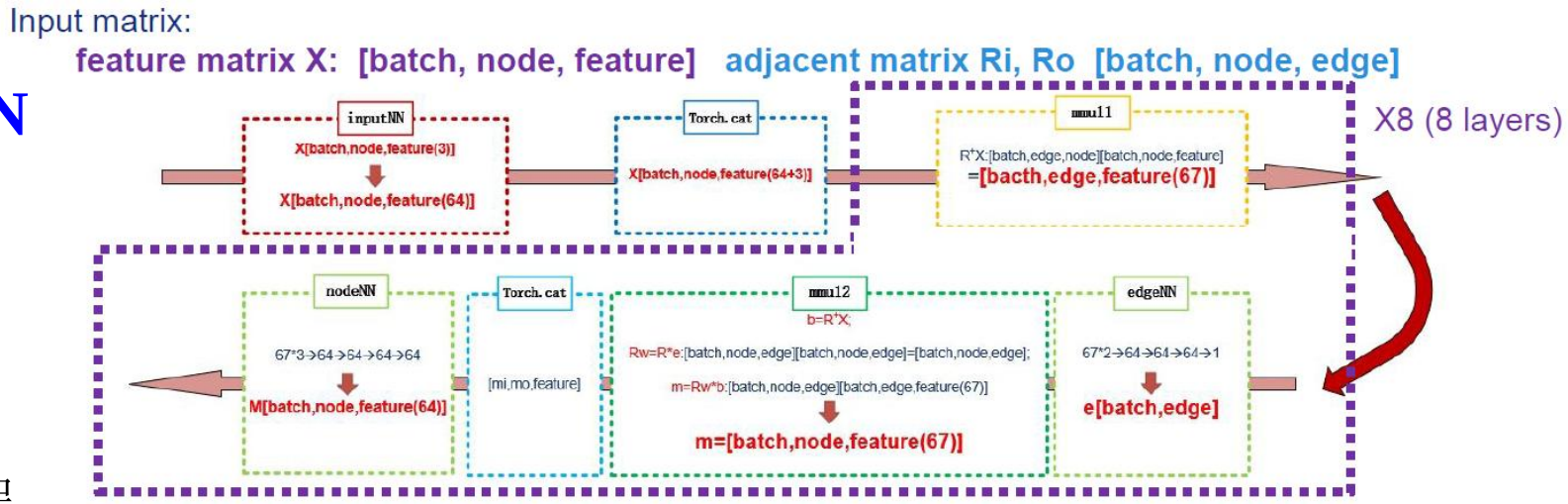

◻ 初步性能($e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- Jpsi$, $Jpsi \rightarrow e^+e^-$)：

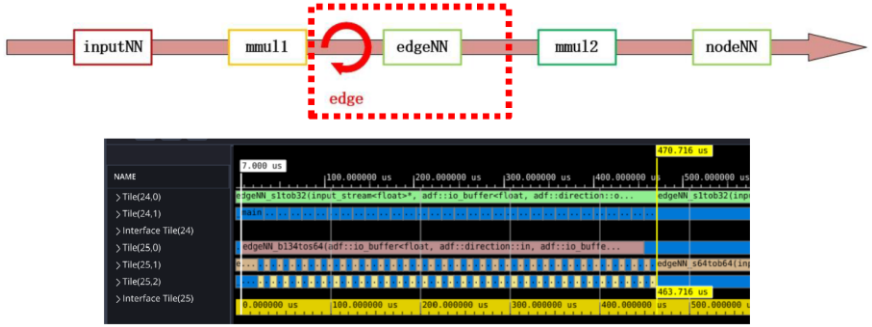
- 97.3%信号hit留存率、67%纯度、46.8%压缩率
- 80 ms + 5 ms + 50 ms 延迟

# HLT研究进展

## □ 研究AI-engine 实现部署GNN

- 实现针对hit分析的GNN部署
- 单循环计算延迟500 μs
- 消耗4.5%的计算资源
- 重点优化神经网络边矩阵计算流程




Expected graph structure:

# 摘要

一、STCF实验需求与触发系统设计

二、L1层级触发算法研究进展

三、L1层级FPGA硬件平台研究进展

四、HLT研究进展

五、小结

# 小结

- **L1 触发算法：**
  - ✓ 典型带电物理事例触发率 **> 99%**，纯中性物理事例触发率 **96%-99%**，可区分**△T >50 ns**物理事例
  - ✓ 本底触发率 **< 30 kHz** @(带电+中性触发道)
- **FPGA硬件平台与原理样机：**
  - ✓ 基于第三版CROB-LTU板卡测试结果优化第四版，其余板卡测试通过，准备复制板卡，制作样机
  - ✓ 完成ECAL子触发桶部算法硬件化，延迟 **< 150 ns**；GTL完成硬件算法规划与资源量估计
  - ➢ 准备制作原理样机、软硬件联调，准备参与束流测试
- **HLT：**
  - ✓ 研究两种基于径迹段的MDC HLT算法
  - ➢ 研究GPU实现霍夫变换、算法并行度提升、AI-engine部署GNN的方法
  - ➢ 推动各探测器系统的HLT算法研究

# 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！