



超级陶粲装置
Super Tau-Charm Facility

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

2026. 7. 2



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硬件平台与原理样机研究进展
- 四、HLT研究进展
- 五、小结

STCF实验需求

STCF 关键指标

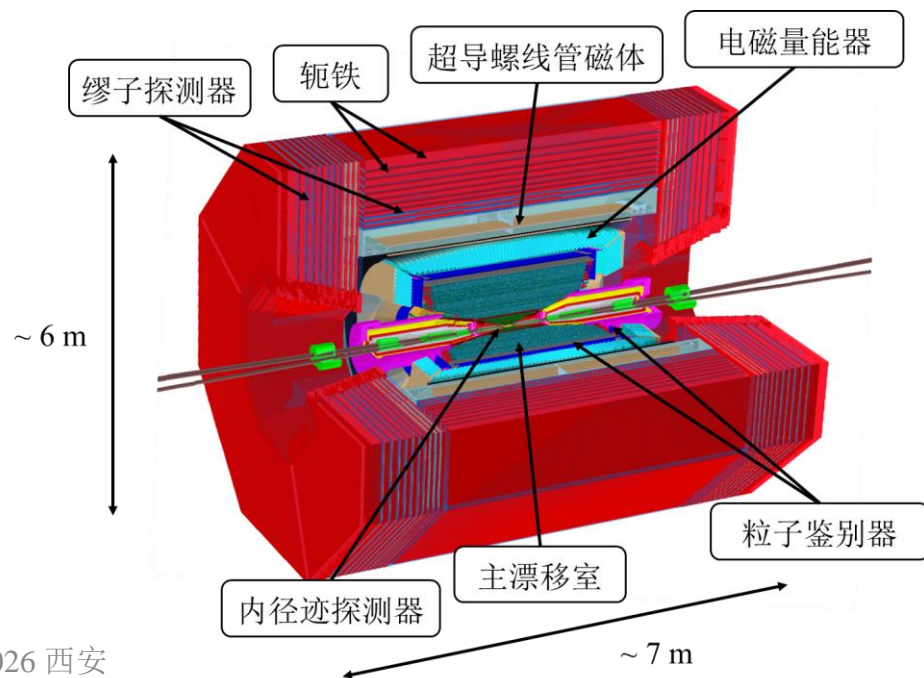
- 峰值对撞亮度 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ @4GeV
- 峰值物理事例率 400 kHz
- 1倍本底下，单事例数据量 $\sim 18 \text{ kB/event}$

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

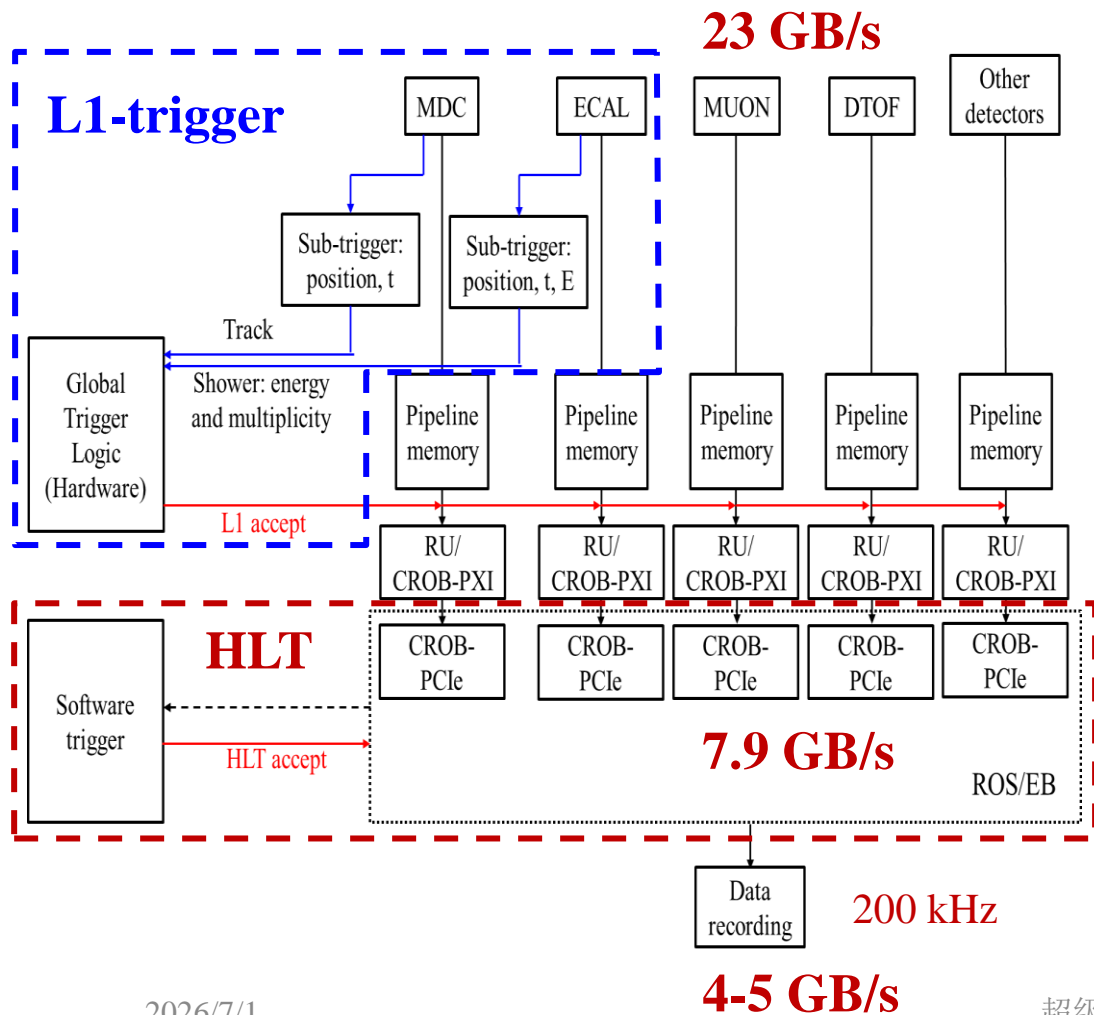
- 极高物理触发率 ($\sim 99\%$)
- 低本底触发率 ($< 50 \text{ kHz}$)
- 高数据量吞吐，低延迟
- 相邻事例区分能力 ($\Delta T < 100 \text{ ns}$)



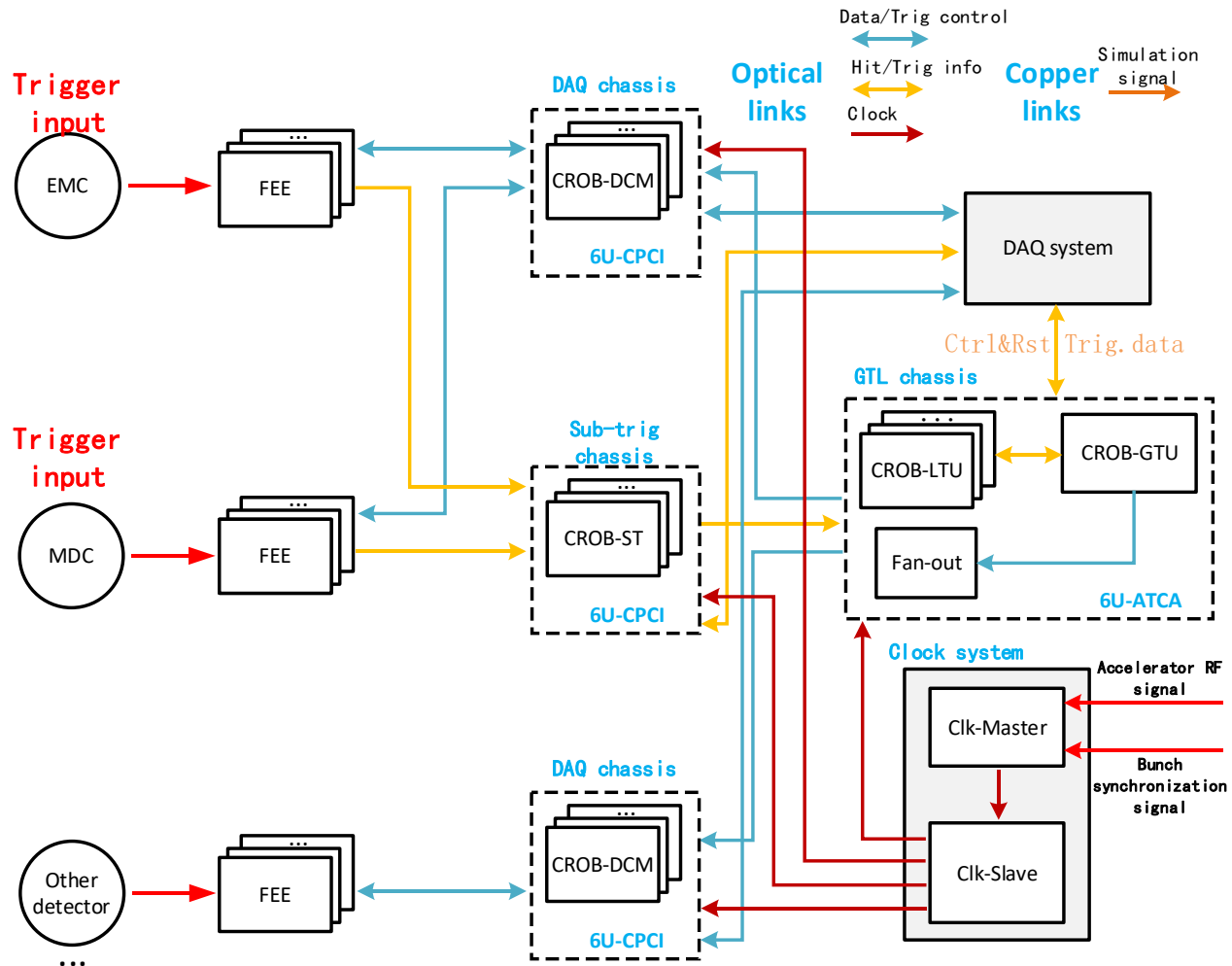


触发系统设计

□ 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硬件平台与原理样机研究进展
- 四、HLT研究进展
- 五、小结



L1触发表优化

□ 修改L1触发表，增设更宽松的触发道

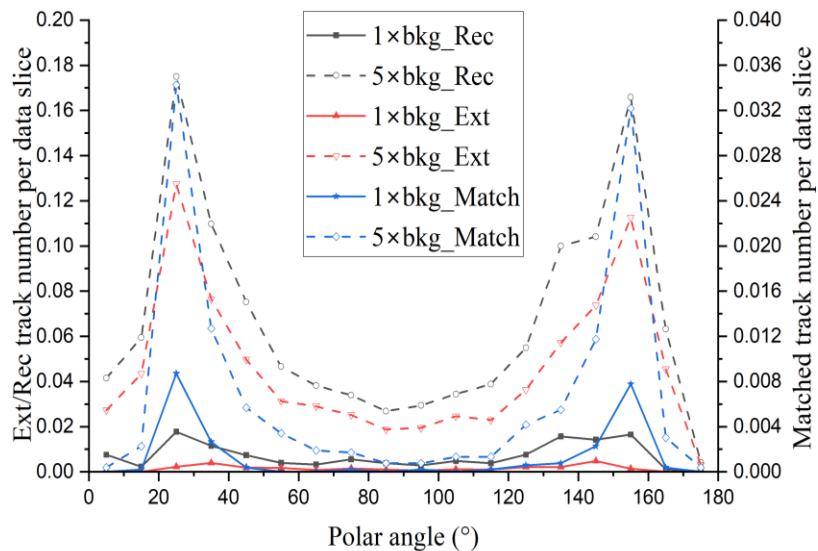
- Ch.05/07 条件宽松，专为低亮度、刻度阶段设计

No.	Trigger target
01	Contains charged final states passing the back-to-back check
02	Low-multiplicity charged-particle final states ($N_{\text{track}} \leq 2$)
带电触发道 03	Medium-multiplicity charged-particle final states ($3 \leq N_{\text{track}} \leq 6$)
04	High-multiplicity charged-particle final states ($N_{\text{track}} \geq 7$)
05	Pure track trigger channel
中性触发道 06	Neutral final states
07	Neutral final states with loose criteria
亮度监测道 08	Bhabha scattering
随机触发道 09	Background sampling



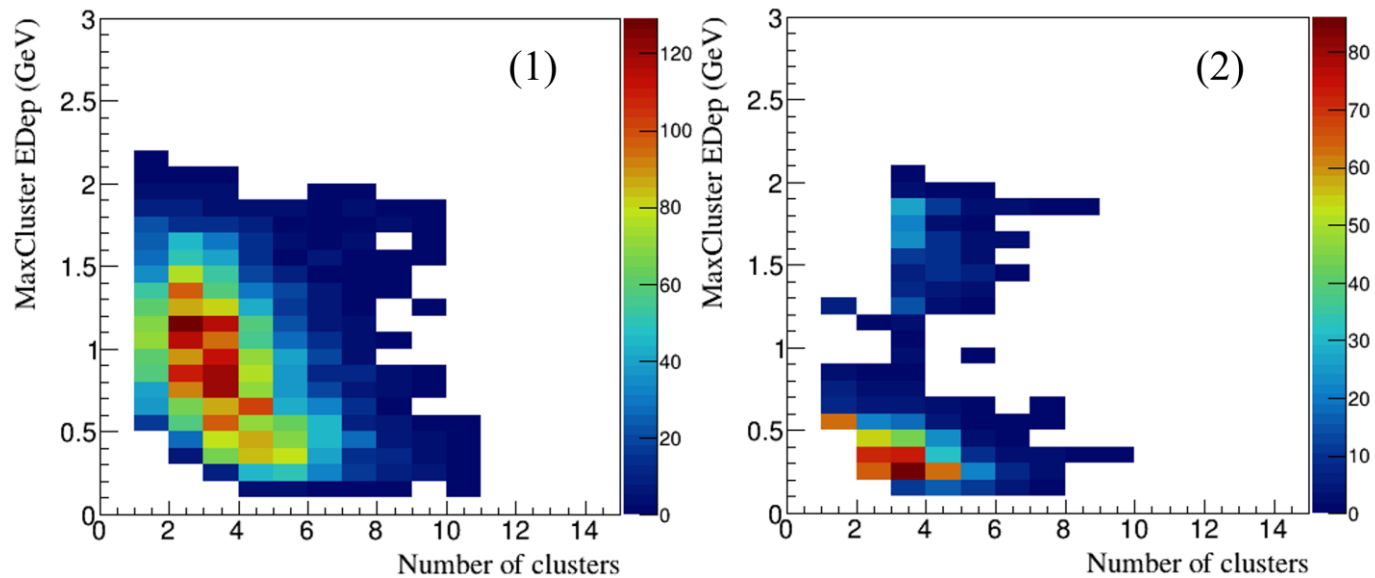
高倍本底下的L1触发条件优化

□ 带电触发道优化



- 以track-cluster匹配数作为带电道主条件
- 针对性细化多径迹、多簇团两个补丁
- 优化GTL阈值、参数选取

□ 中性触发道优化



- 添加“最大簇团能量”的判选条件
- 以track-cluster匹配数彻底分隔带电、中性触发
- 优化GTL阈值、参数选取



L1 1倍本底触发效果

□ 本底触发率 < **30 kHz** @(带电+中性触发道) @CDR水平本底

	Physics signal	Energy point (GeV)	Single particle matching ratio for signal (%)	Signal trigger efficiency (%)	Background trigger rate (kHz)	Signal trigger rate (kHz)	
混合类型	$J/\psi \rightarrow \text{inclusive}$	3.097	99.4	98.6		165.4	
带电反应道	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$	4.26	95.0	99.8	28.1	2.97×10^{-4}	
	$J/\psi \rightarrow e^+e^-$						
	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$	4.26	94.6	99.8			
	$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$						
	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	4.26	99.3	98.4			1.72×10^{-1}
	$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$	3.097	90.8	98.6			3.13×10^{-1}
	$J/\psi \rightarrow \Xi \bar{\Xi}$	3.097	92.4	97.8			1.59×10^{-1}
	$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$	4.682	98.0	99.5			
	$J/\psi \rightarrow l^+l^-$						
	$e^+e^- \rightarrow D_0 \bar{D}_0$	3.773	97.3	99.9			2.08×10^{-1}
$e^+e^- \rightarrow D^+D^-$	3.773	100	99.8	1.64×10^{-1}			
$e^+e^- \rightarrow D_s^+D_s^-$	4.04	99.8	99.9	3.37×10^{-4}			
中性反应道	$J/\psi \rightarrow \gamma \text{ invisible}$	3.097	—	98.8		1.16×10^{-4}	
	$e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$	3.097	—	97.2		3.41×10^{-1}	
	$e^+e^- \rightarrow \gamma n \bar{n}$	3.097	—	98.9		1.28×10^{-2}	
	$e^+e^- \rightarrow \gamma n \bar{n}(\text{ISR})$	3.713	—	98.4		2.47×10^{-2}	
本底 (亮度) 监测	$e^+e^- \rightarrow \gamma \gamma$	4.26	—	98.7		1.78	
	Bhabha scattering	4.26	97.5	99.8		36.6	



高倍本底下的L1触发性能提升

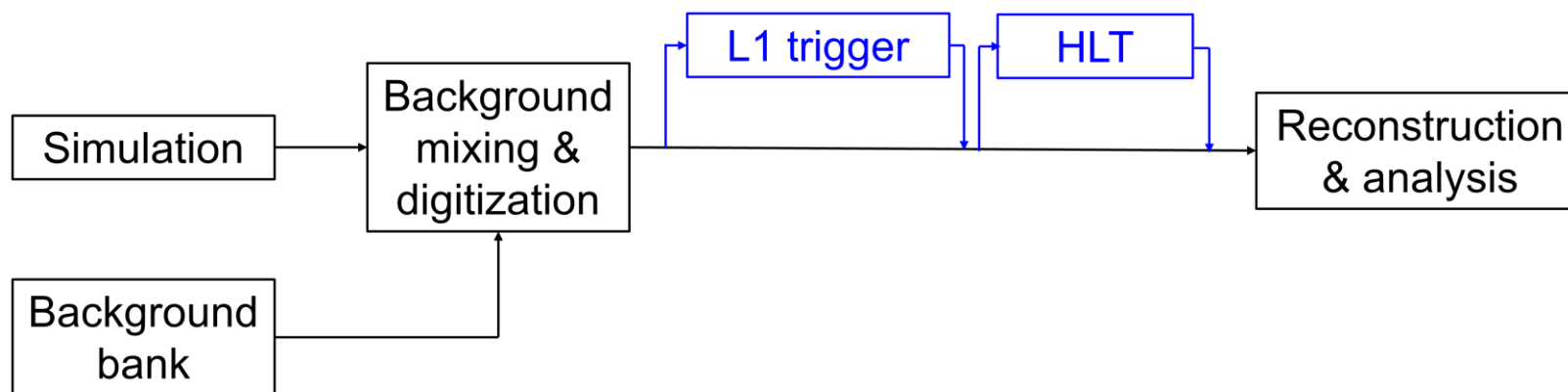
- 带电物理过程触发率上升
0.1% ~ 0.5%
- 中性物理过程触发率上升
1.4% ~ 1.9%
- 本底触发率降低
~25% @ 1 ~ 5×bkg

	Baseline		Optimized	
	signal trigger efficiency (%)	background trigger rate (kHz)	signal trigger efficiency (%)	background trigger rate (kHz)
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$				
$J/\psi \rightarrow e^+e^-$				
1×bkg	99.8	25.9	99.8	19.5
3×bkg	99.8	110.3	99.8	86.2
5×bkg	99.6	261.1	99.7	203.4
$e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$				
1×bkg	98.0	27.5	98.1	19.5
3×bkg	97.3	112.1	98.1	78.9
5×bkg	95.7	244.2	97.6	184.0
$J/\psi \rightarrow \gamma$ invisible				
1×bkg	98.8	24.4	98.7	16.3
3×bkg	98.1	113.8	98.2	78.3
5×bkg	95.6	250.2	97.0	193.2
$J/\psi \rightarrow$ inclusive				
1×bkg	98.6	28.3	98.6	20.7
3×bkg	98.6	116.1	98.8	83.7
5×bkg	98.2	261.7	98.7	198.6



L1触发的Oscar移植与实现

□ 目标：在Oscar中实现完整的L1触发，并测试L1触发筛选对后续分析的影响



MDC子触发



ECAL子触发

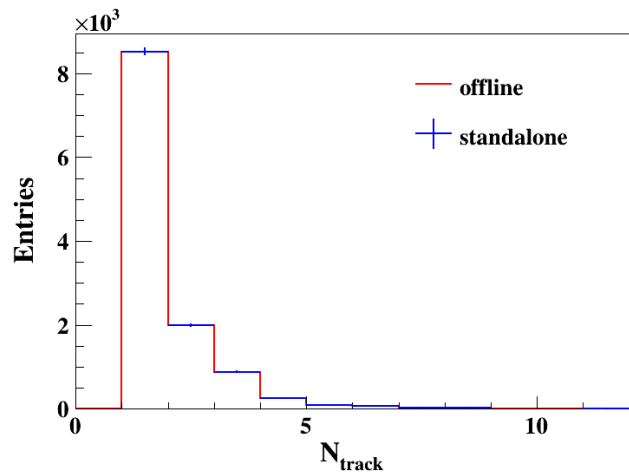


L1-GTL

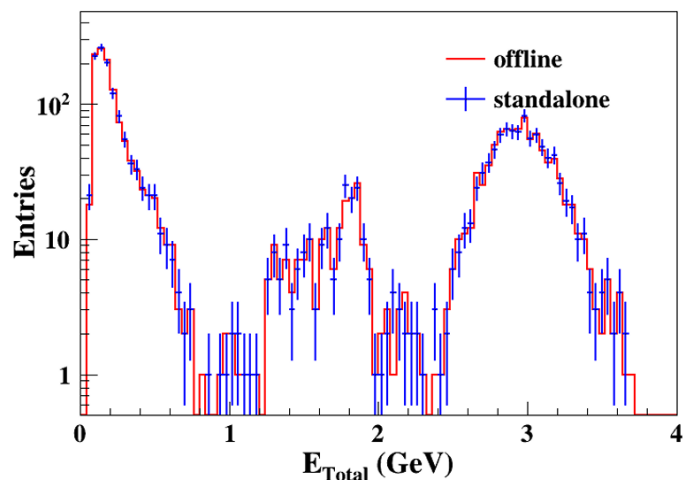


Standalone/Oscar L1结果对比

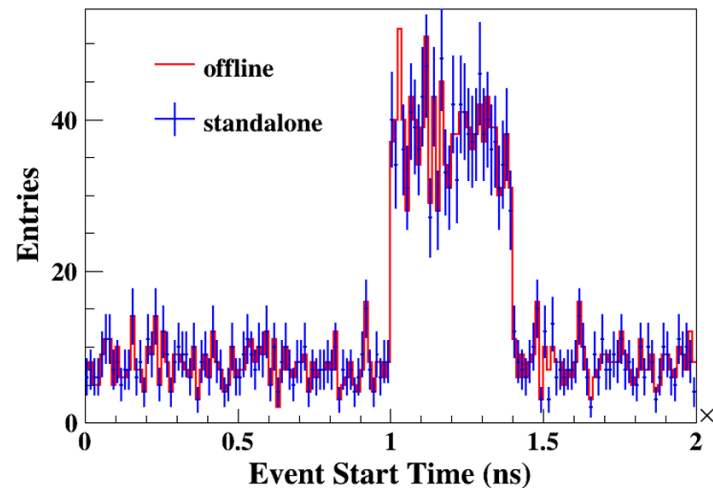
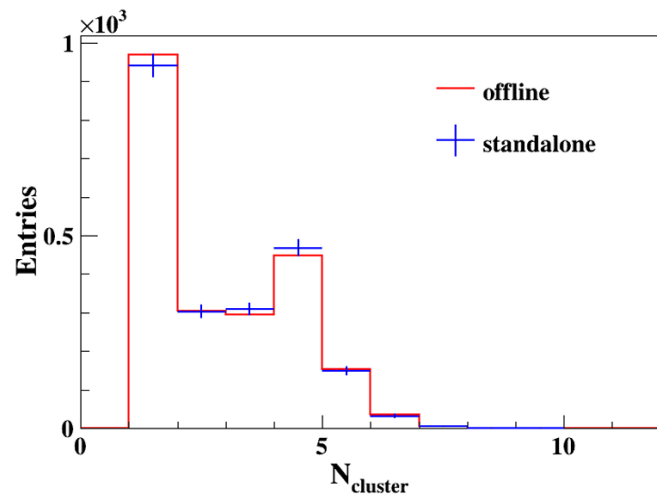
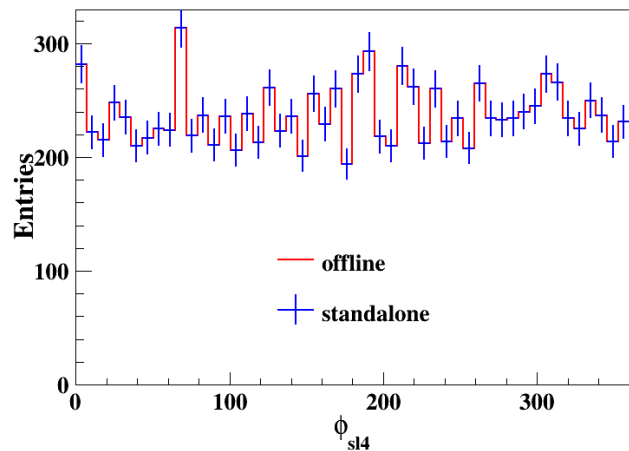
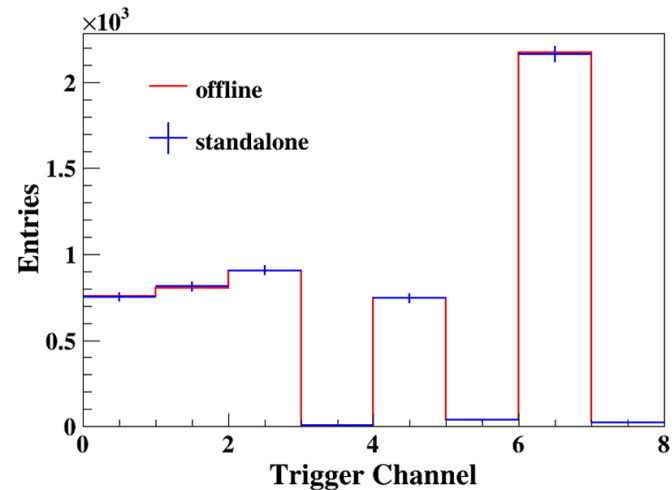
□ MDC track



□ ECAL cluster



□ Event L1 触发判选





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硬件平台与原理样机研究进展**
- 四、HLT研究进展
- 五、小结



L1 硬件平台板卡迭代与测试

❑ CROB-LTU

- ✓ 完成第三版调试和DDR4优化
- ✓ 完成全部测试
- ✓ 确定版本，复制板卡

❑ FMC+子板

- ✓ 优化高频性能，完成测试，复制板卡

❑ 数据产生板

- ✓ 通过全部测试，复制板卡

❑ CTM板

- ✓ 通过全部测试，复制板卡

CROB-LTU board



DAQ board



FMC+ sub board

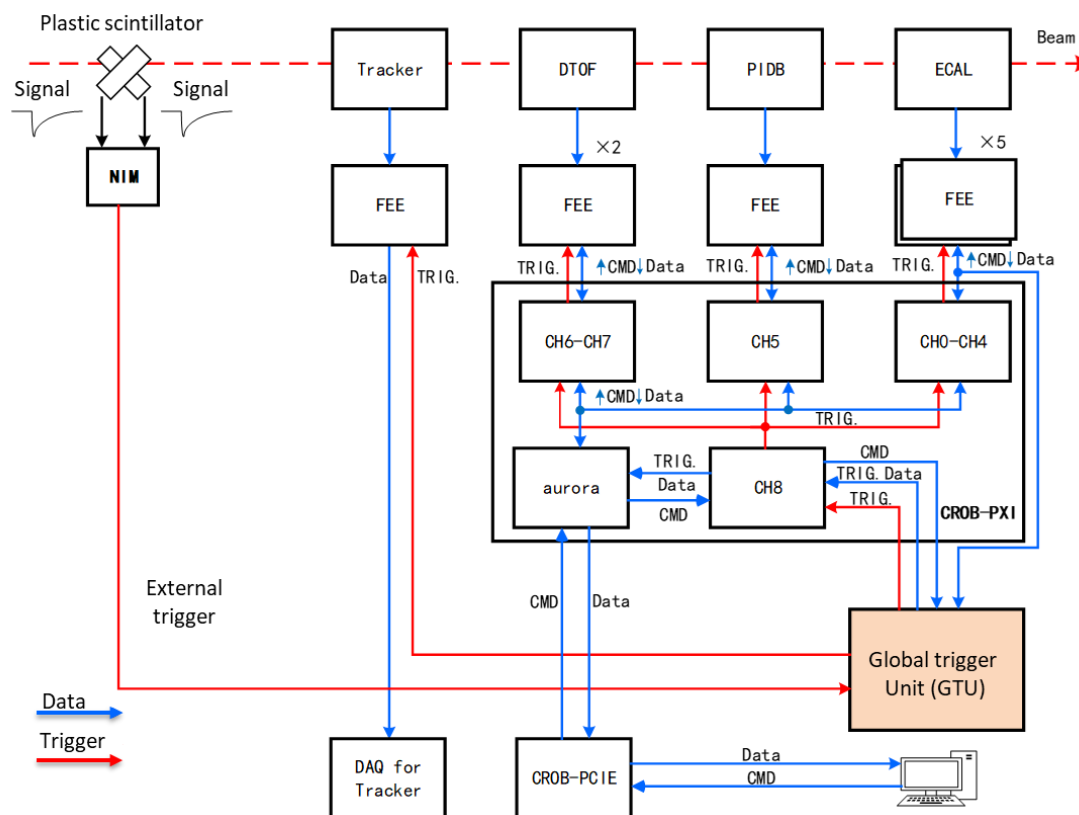


CTM board

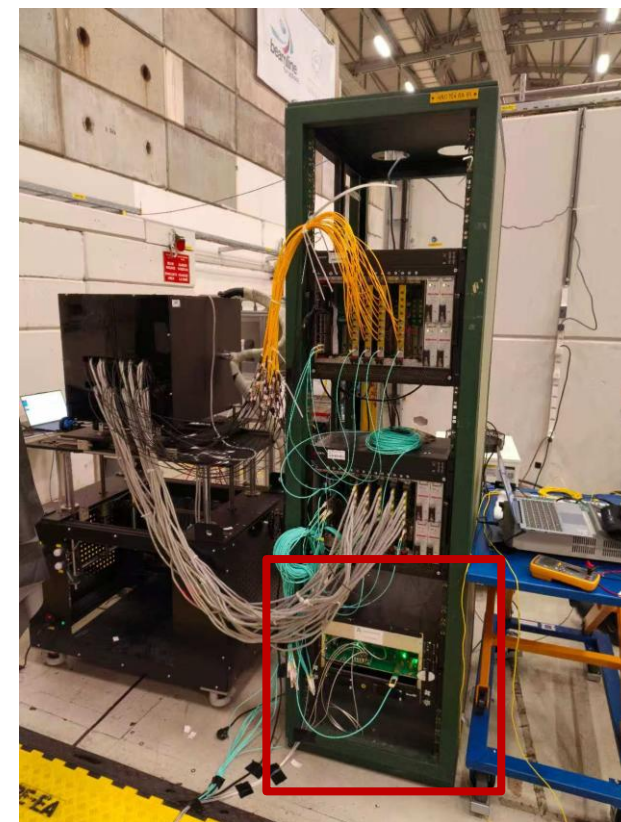


多系统联合束流测试

束流测试系统框图



束流测试中的L1触发



- 实现了L1 触发与PIDB、ECAL、DAQ的**GBT**连接
- 成功验证**完整的L1触发数据链路**

- 触发效率: **~96%**
- 全链路延迟: **1.3 μs**



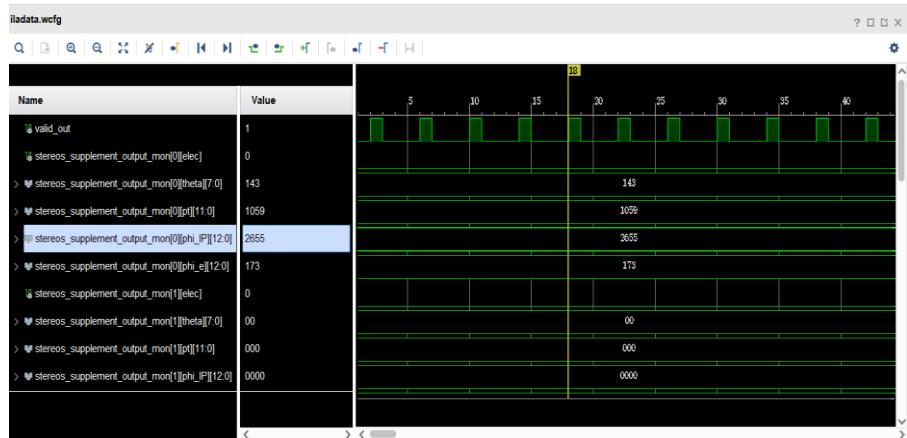
L1触发硬件算法开发

□ MDC子触发

- ✓ 第一版硬件算法核心部分重写优化
- ✓ 斜丝超层匹配、 θ 角计算、外推 ϕ 角计算功能实现

□ ECAL子触发与GTL

- ✓ ECAL前序处理模块完成：零压缩、数据延展
- ✓ ECAL能量位宽修改、实现事例定时
- ✓ 实现GTH固定延时
- ✓ 完成模拟数据产生板数据缓存工程



Graph | Table

Resource	Utilization	Available	Utilization %
LUT	176047	663360	26.54
LUTRAM	10	293760	0.01
FF	455255	1326720	34.31
BRAM	653	2160	30.23
IO	45	728	6.18
BUFG	6	1248	0.48
MCM	1	24	4.17



L1触发原理样机联调测试

□ 已完成:

- ✓ MDC、ECAL、GTL原理样机搭建
- ✓ 原理样机完整链路测试
- ✓ ECAL、GTL小批量数据测试



□ 正在进行:

- MDC小批量数据测试
- MDC、ECAL、GTL的大批量数据完整流程与性能测试





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硬件平台与原理样机研究进展
- 四、HLT研究进展**
- 五、小结



基于模式匹配与霍夫变换的 MDC HLT

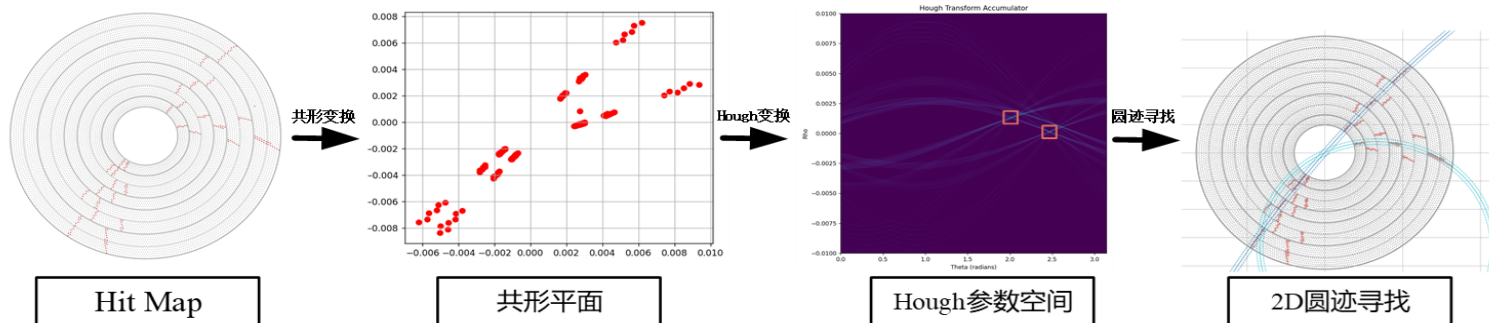
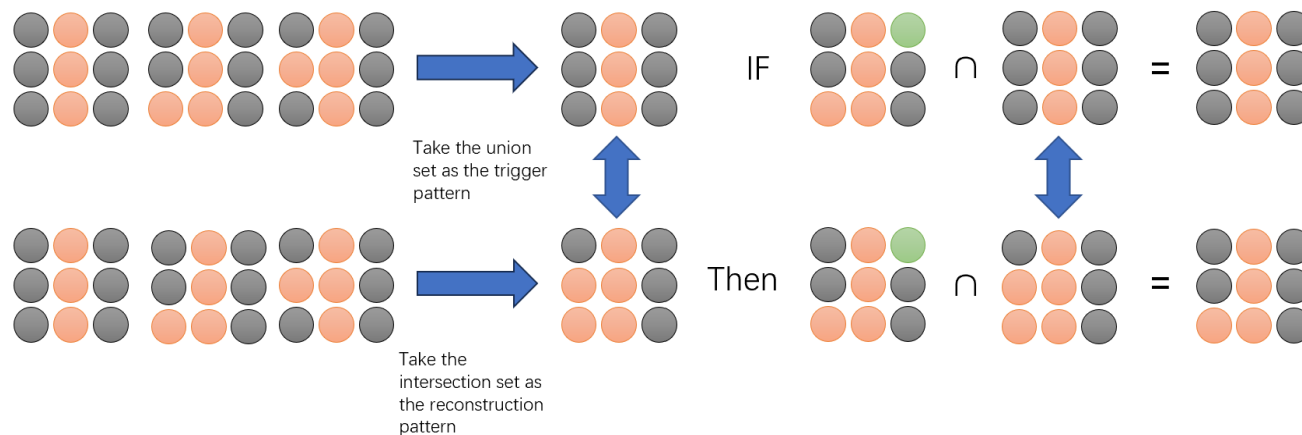
MDC HLT 方案一:

□ 利用CPU+GPU异构框架实现

□ GPU模式匹配处理中高动量径迹

□ GPU霍夫变换处理低动量径迹

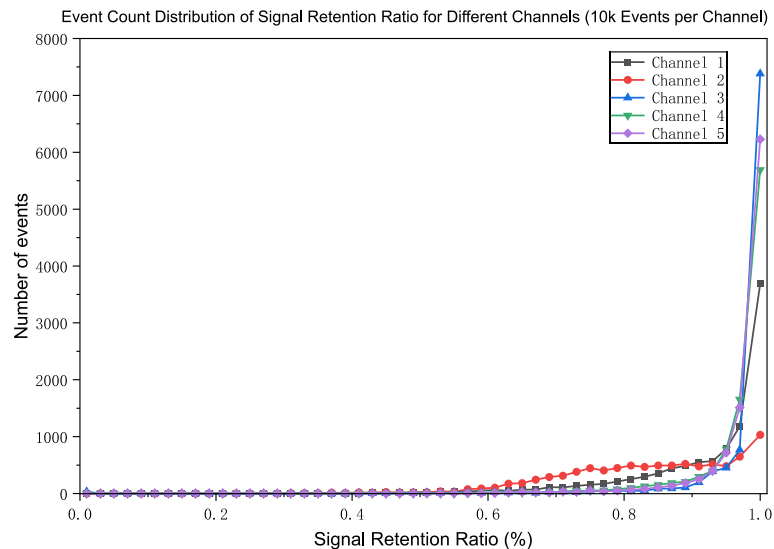
□ CPU DFS实现全局寻迹



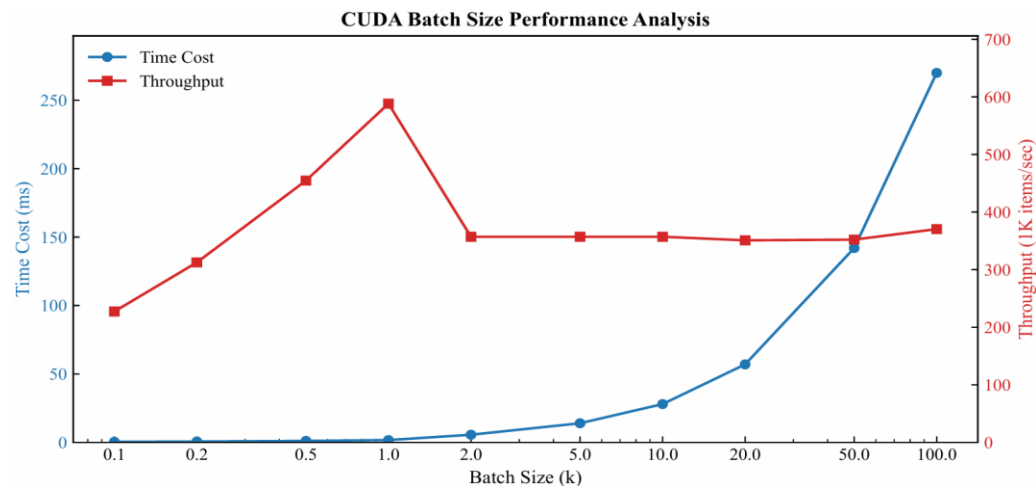


基于模式匹配与霍夫变换的 MDC HLT

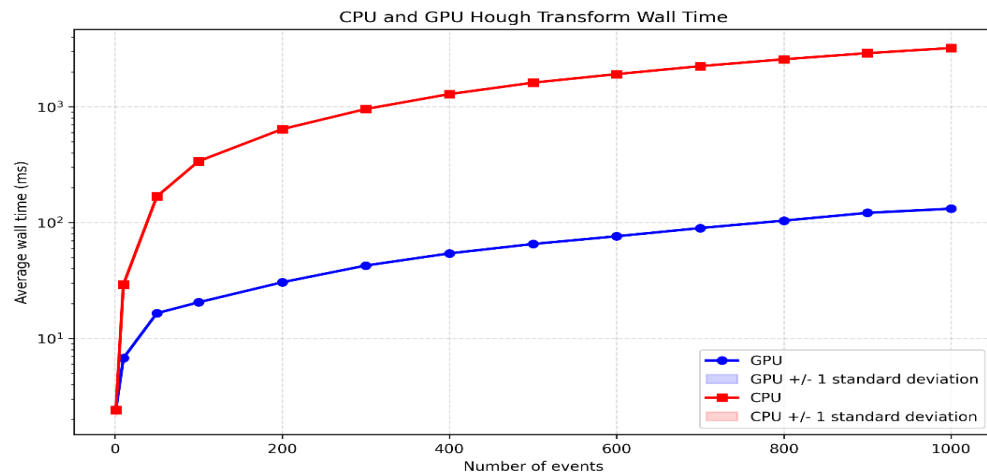
HLT性能模拟效果



模式匹配与霍夫变换的GPU运行时间消耗



通道编号	通道	信号压缩率	信号留存率
Channel 1	Pipiee	0.381	0.956
Channel 2	pipimumu	0.381	0.965
Channel 3	Kkjpsi	0.391	0.950
Channel 4	taupair	0.260	0.974
Channel 5	Lambda	0.362	0.851





针对高本底环境的高效MDC HLT

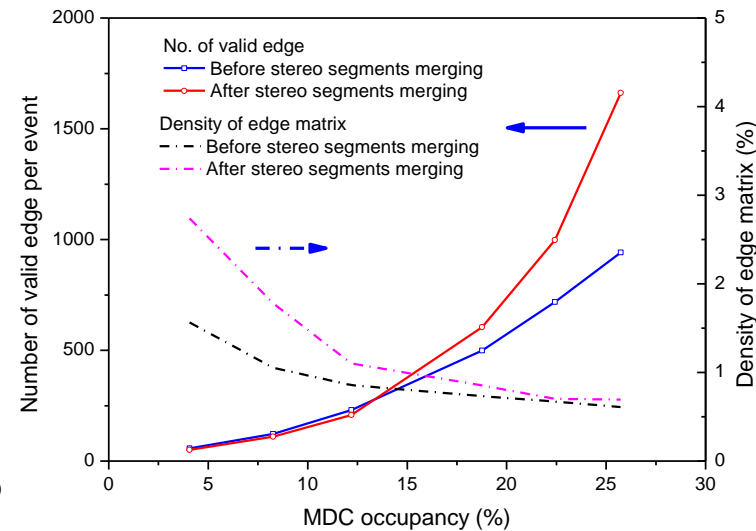
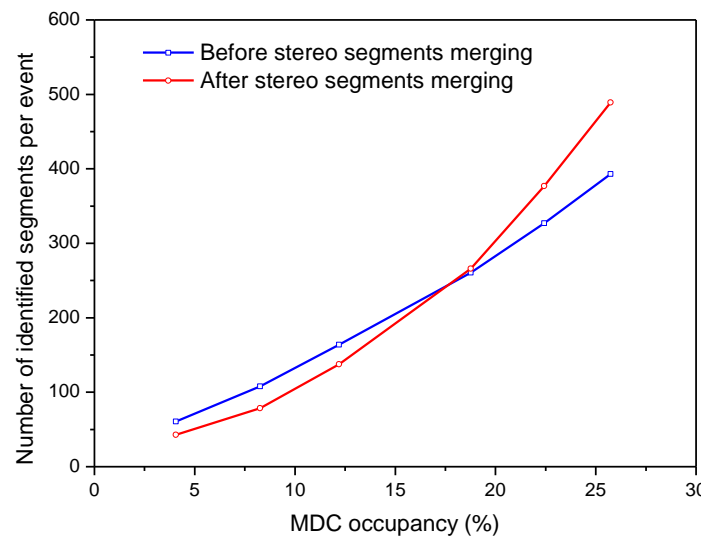
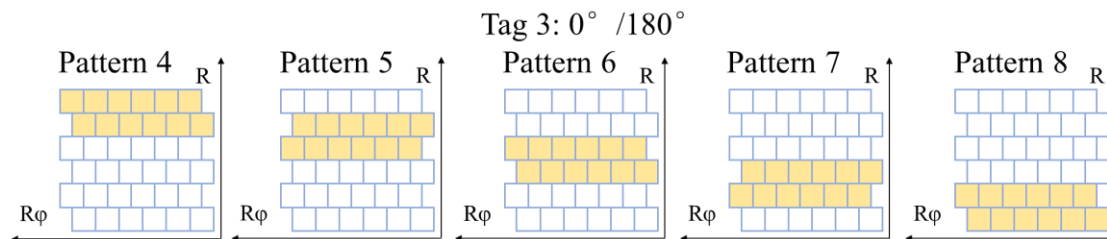
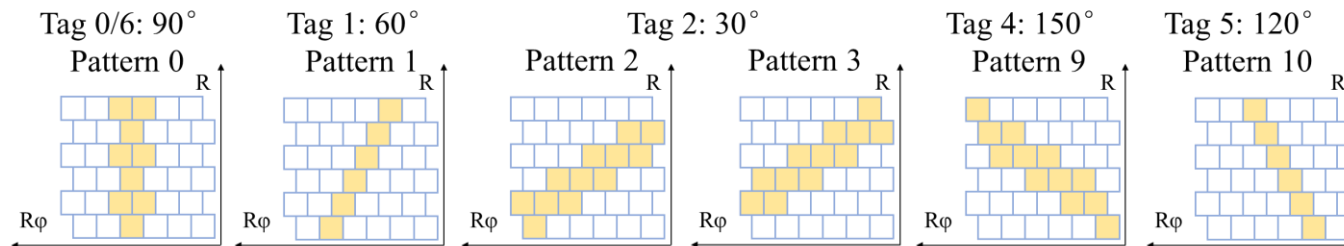
MDC HLT 方案二:

□ 利用CPU实现

□ 高度简并的**标签式径迹段**模式库

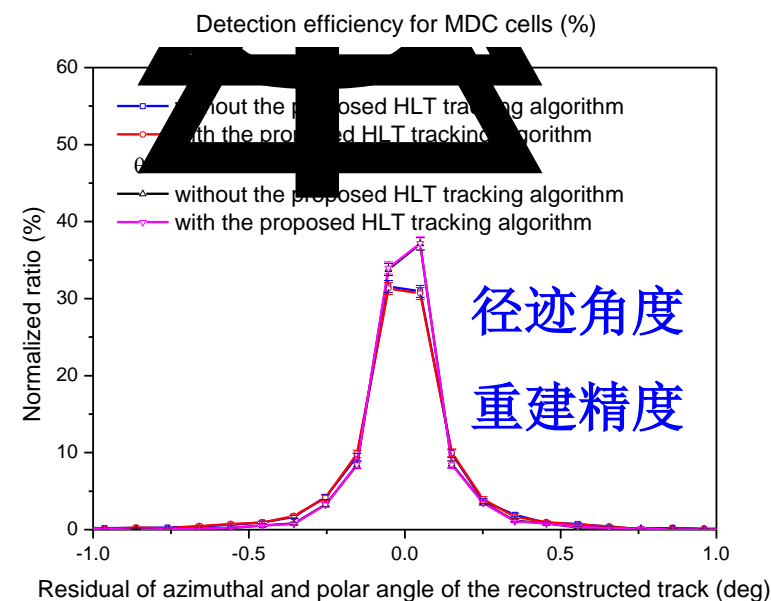
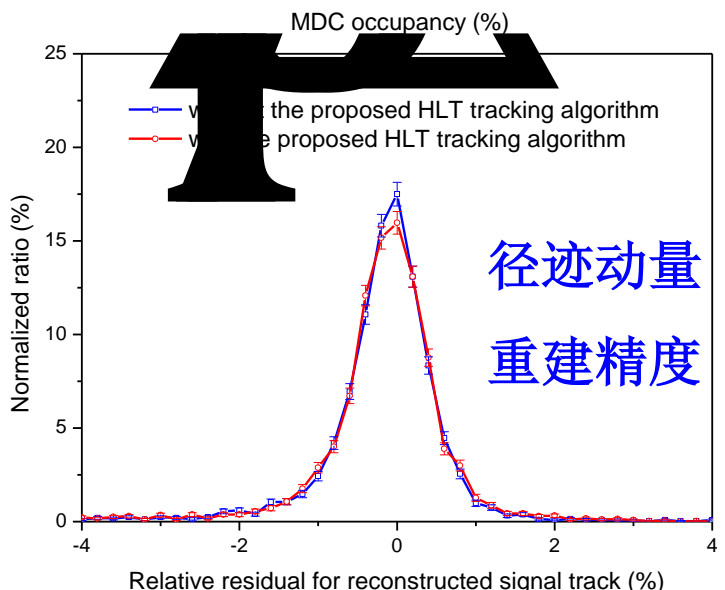
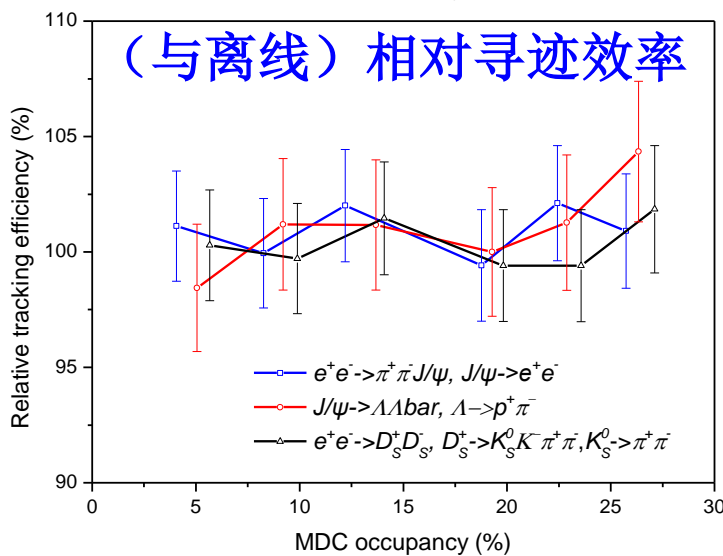
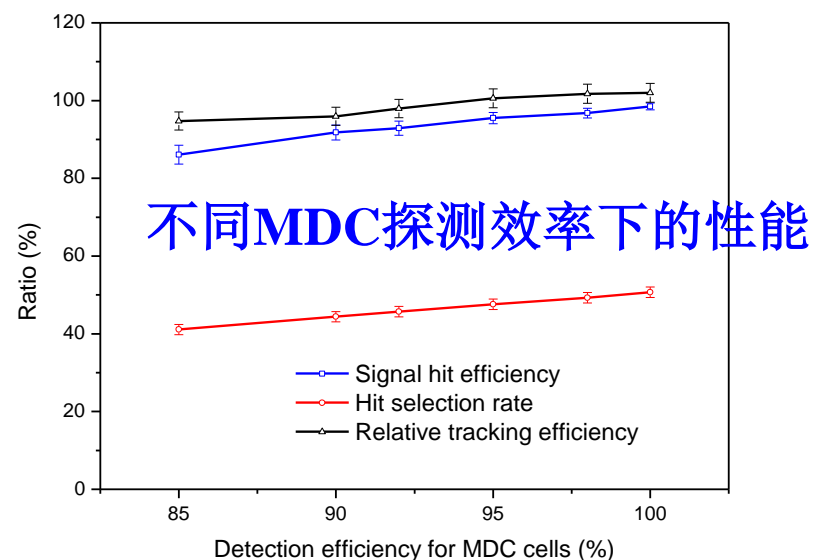
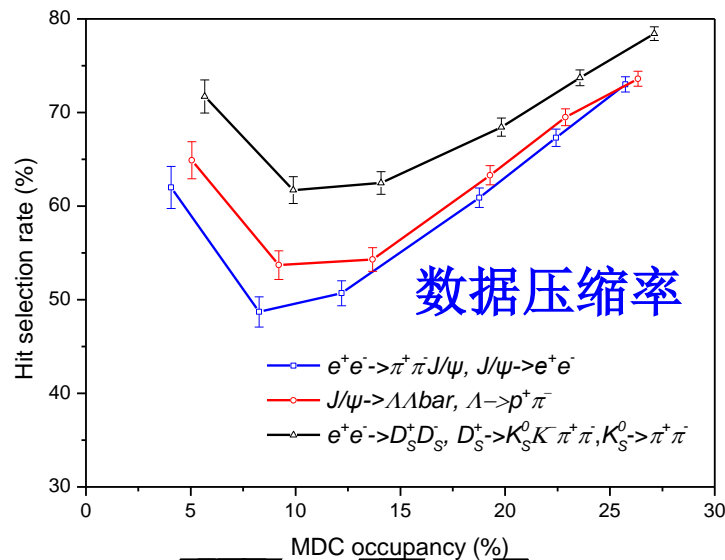
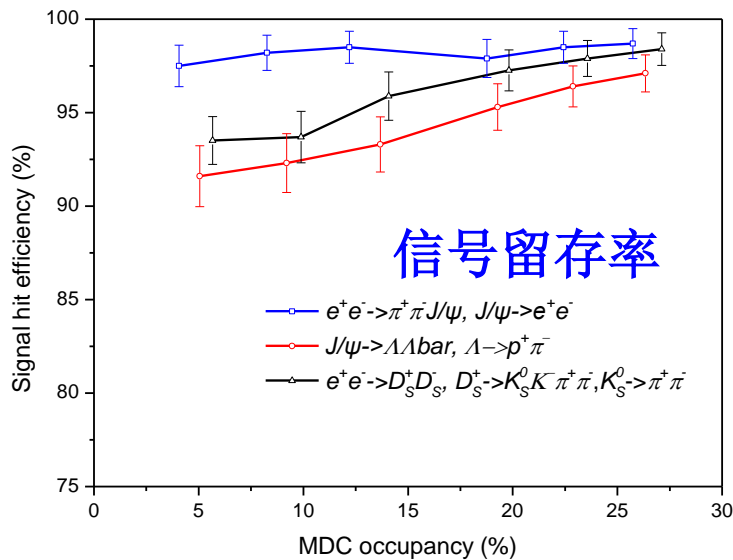
□ 多级筛选的**多维度径迹段连接**

□ DFS/GNN全局寻迹





针对高本底环境的高效MDC HLT





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硬件平台与原理样机研究进展
- 四、HLT研究进展
- 五、小结



小结

□ L1 触发算法:

✓ 压低高本底下的本底触发, 实现OSCAR移植

□ FPGA硬件平台与L1触发原理样机:

✓ 所有板卡制作、测试完成

✓ L1算法硬件化完成

➤ 正在全链路调试原理样机

□ HLT:

✓ 在两种MDC HLT算法方面均取得阶段性成果

➤ 推动各探测器系统的HLT算法研究

新挑战: 更高本底, 更新几何

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

Detector system	Sampling time window (ns)	Raw data (GB/s)
ITKM	1000	6.5
MDC (SSC)	800	6.1
BTOF	100	32.8
DTOF	100	4.1
ECAL	400	17.9
MUON	600	0.4
TOTAL		67.8



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！

Thanks~