



CEPC TDAQ 研制进展

李飞

代表 CEPC TDAQ 工作组



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

目录

- 物理需求
- TDAQ 总体设计
- 详细研制进展
- 总结

引言

■ CEPC 不同质心能量下的基线运行计划

ref-TDR 表 1.1

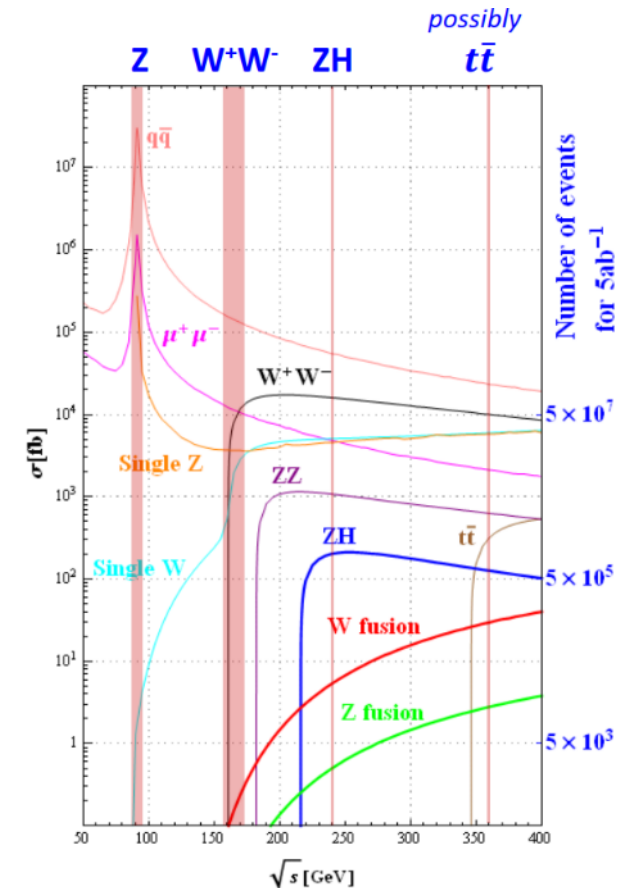
Operation mode	\sqrt{s} (GeV)	SR power (MW)	\mathcal{L} ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\int \mathcal{L}/\text{year}$ (ab^{-1})	Years	Total $\int \mathcal{L}$ (ab^{-1})	Event yields
H	240	30	5	0.65	15	10	2.0×10^6
Z	91	12.1	26(*)	3.2	4	13	5.6×10^{11}
W^+W^-	155-170	30	16	1.2	1	1.2	1.0×10^7 (†)

■ CEPC 升级运行计划

ref-TDR 表 1.4

Operation mode	\sqrt{s} (GeV)	SR power (MW)	\mathcal{L} ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\int \mathcal{L}/\text{year}$ (ab^{-1} , 2 IPs)	Years	Total $\int \mathcal{L}$ (ab^{-1} , 2 IPs)	Event yields
H	240	50	8.3	2.2	10	21.6	4.3×10^6
Z	91	50	192(*)	50	2	100	4.1×10^{12}
W^+W^-	155-170	50	26.7	6.9	1	6.9	5.5×10^7
$t\bar{t}$	360	50	0.8	0.2	5	1.0	0.6×10^6

■ Z 模式下低亮度与高亮度相差七倍



CEPC 探测器 CDR

物理需求

■ 物理事例率

- ZH 和单 Z 过程为最高优先级
- 低能事例（来自双光子对撞）为次要目标
 - 暂无特殊要求
- ~500 Hz @ZH, 10/75 kHz @Z

■ 物理事例率远低于束团对撞率

■ 本底与物理事例存储比 < 1

- 主要本底事例：双光子 $\rightarrow ee$

■ 事例存储率要求:

- 1 kHz @ZH, 20kHz-150kHz @ Z

Table 12.1: Expected Standard Model processes event rate at the Higgs mode for 50 MW

Higgs mode processes	Cross section (fb)	Event rate (Hz)
Physical events (top priority)		
Higgs production	203.7	0.017
Two Fermions processes (exclude Bhabha)	6.4×10^4	5.3
Four Fermions processes	1.9×10^4	1.6
Bhabha	1.0×10^6	80
Diphoton process (low priority)		
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$	1.6×10^6	136
$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$	2.1×10^6	173
$\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$	6.0×10^7	4963
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$	2.1×10^8	17210
$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^-$	2.3×10^6	193

Table 12.2: Expected Standard Model processes event rate at the Z mode for 12.1 MW.

Z mode processes	Cross section (fb)	Event rate (Hz)
Physical events (top priority)		
$q\bar{q}$	3.1×10^7	7970
$\mu^+\mu^-$	1.5×10^6	400
$\tau^+\tau^-$	1.5×10^6	396
Bhabha	6.6×10^6	1714
Diphoton process (low priority)		
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$	2.7×10^5	71
$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$	5.1×10^5	132
$\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$	3.5×10^7	9014
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$	1.3×10^8	33696
$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.3×10^5	163

探测器与电子学需求

子探测器读出与重建时间窗口

- TPC: 最大漂移时间 34 μ s
 - 需对堆积径迹做特殊的读出与触发处理
- HCAL: 读出窗口 1000 ns
- Silicon/Muon/ECAL: 读出窗口 $23 \times 3 = 69$ ns

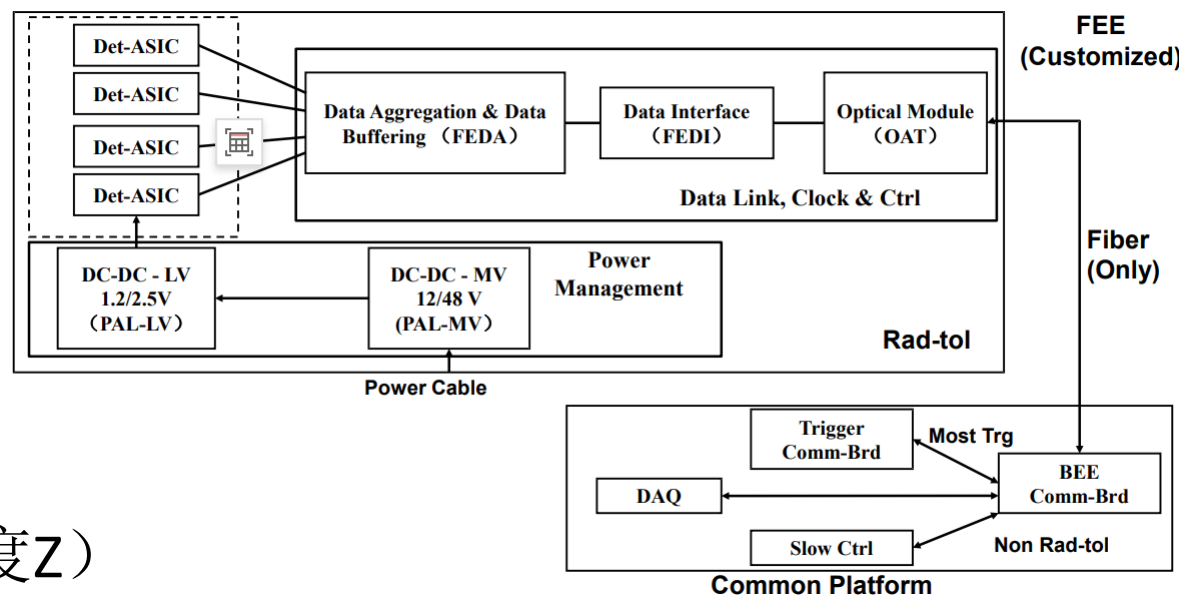
电子学设计方案

- 系统时钟: 43.3 MHz
- 从 FEE 到 BEE 传输全部原始数据
 - 通过异步光纤链路
- 触发仅与 BEE 交互

触发延迟

- BEE DDR 毫秒级数据缓存
- 可能需要向 FEE 发送快速触发
 - $<10 \mu$ s 延迟 (顶点探测器 @ 高亮度Z)

堆积 BX/事例	Higgs	低亮度 Z	高亮度 Z
TPC	123	492	1472
HCAL	4	15	44



ref-TDR 图 1.1

原始数据率与事例大小

束流本底改善后，原始数据率与事例大小显著降低

- 顶点探测器和量能器的本底击中率大幅下降
- 全数据率 1.04~13Tbps

- 130 GB/s @Higgs
- 221 GB/s @低亮度 Z
- 1.6 TB/s @高亮度 Z

- 读出时间窗口

- TPC 34 μ s, HCAL 1 μ s

- 原始事例大小

- 405/333/1824 KB
- TPC 占比: 76%/92%/91%

表 12.3

	VTX	ITK	OTK	TPC	ECAL	HCAL	Muon	Total
Time windows (ns)	69	69	69	34000	69	1000	69	
50 MW Higgs mode Full Data (Gbps)	130	21.2	82.7	26.4	752	26.6	<1	1040
Data size / bunch (kB)	12.1	1.98	7.71	2.46	70.1	2.48	<0.1	96.9
Data size / event (kB)	12.1	1.98	7.71	303	70.1	9.92	<0.1	405
12.1 MW Z mode Full Data (Gbps)	307	37.8	139	57.1	1202	27.2	<1	1771
Data size / bunch (kB)	3.20	0.394	1.45	0.595	12.5	0.283	<0.1	18.4
Data size / event (kB)	6.40	0.788	2.90	293	25.0	4.53	<0.1	333

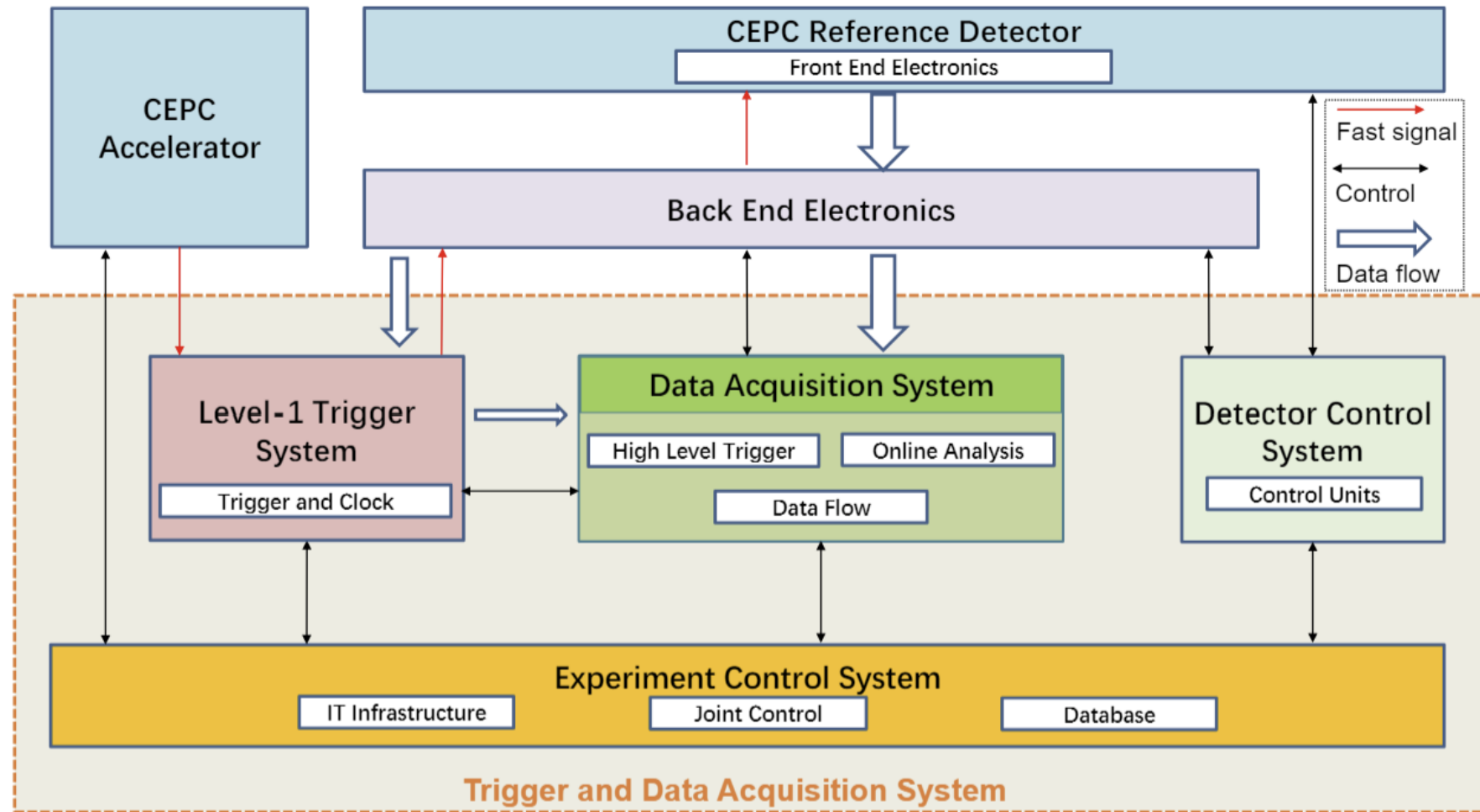
- 含 2 倍安全裕度 (遵循电子学章节)

TDAQ 与在线系统总体设计

■ TDAQ 方案

- 一级硬件触发 (L1)
+ 高级触发 (HLT)
- 同时提供常规触发和快速触发
- 联合控制与监测
- 统一的在线服务和IT 基础设施

图 12.1



硬件触发结构设计

■ 触发原语 (TP)

- 在 BEE 提取

■ 子探测器局部触发

- 子能量与径迹...

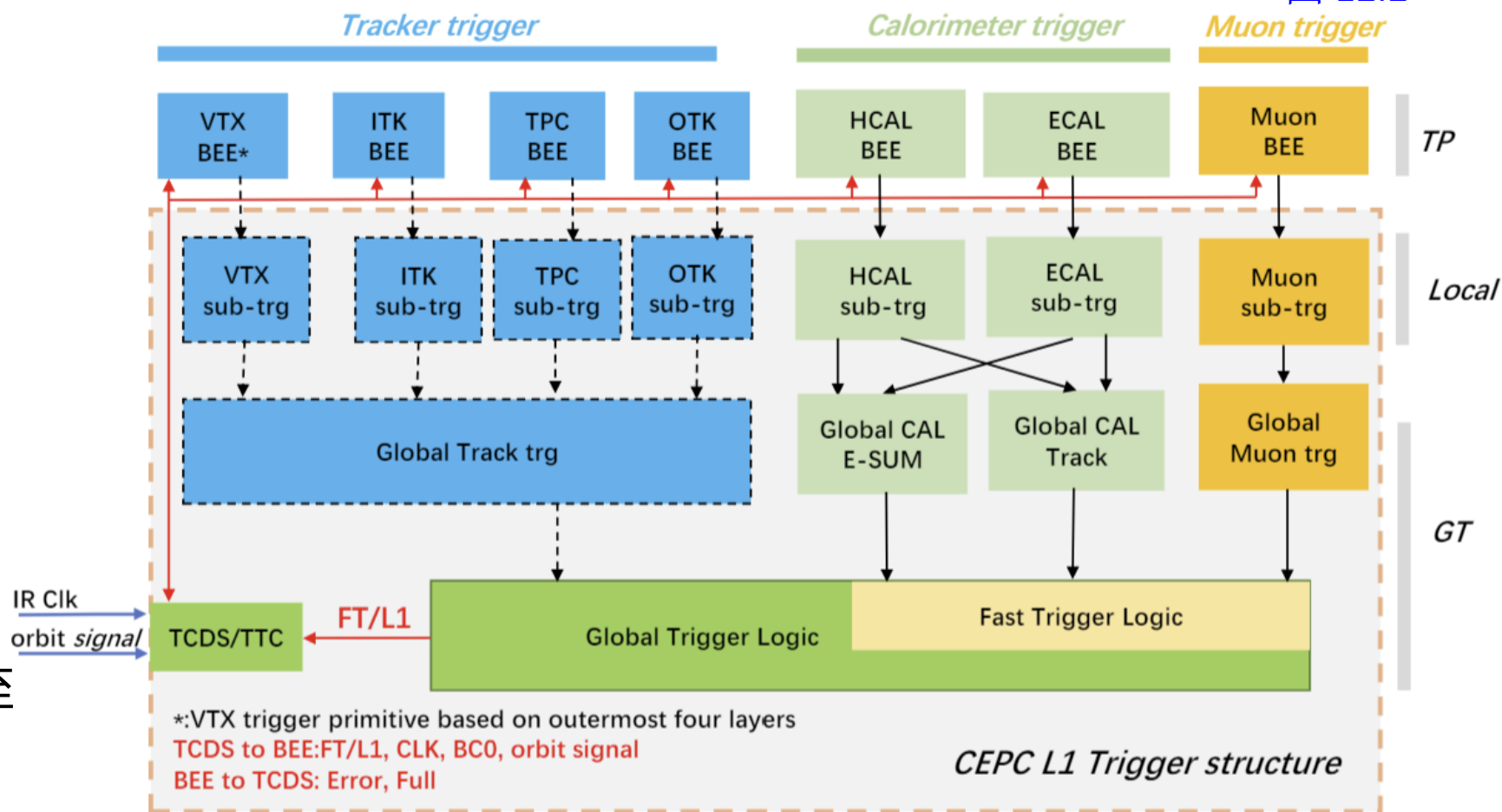
■ 全局触发

- 总能量与径迹
- 按需生成快速触发 (FT) 和 L1A

■ TCDS (触发时钟分发系统)

- 将时钟和快控信号分发至 BEE

图 12.2



量能器 + Muon 为默认方案，径迹探测器为可选

通用触发板设计

- 已研制一系列xTCA板卡
 - 启动了 CEPC ATCA 通用触发板设计
- 通用触发板功能列表
 - ATCA 标准
 - Virtex UltrascalePlus FPGA
 - 兼容国产 FPGA
 - 光通道: 10-25 Gbps/通道
 - 通道数: 36-48 通道
 - 光以太网口: 40-100GbE
 - DDR4 大容量数据缓存: 16GB
 - SoC 模块用于板卡管理
 - IPMC 模块用于电源管理

PCB 设计进行中, 详见[广州研讨会报告 \(Jingzhou\)](#)

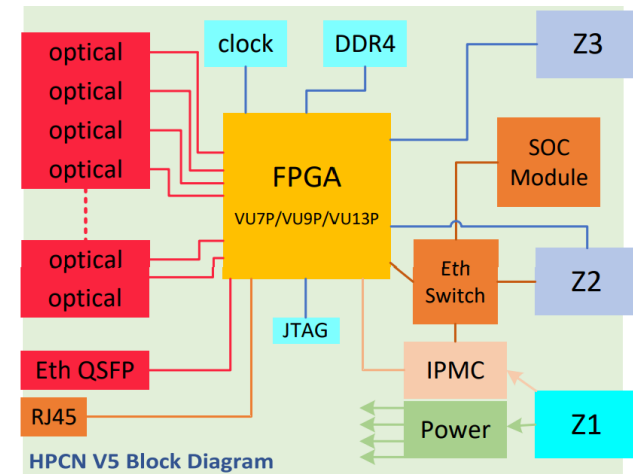
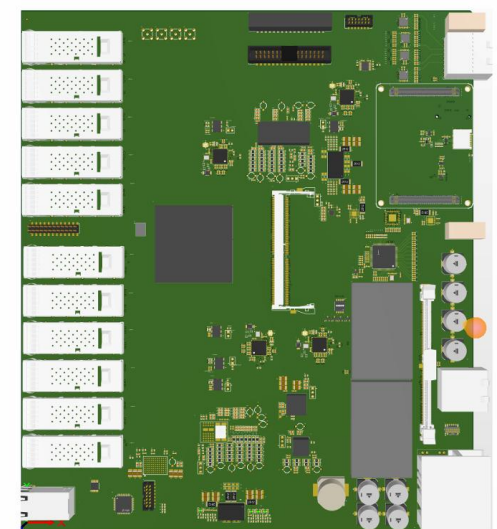
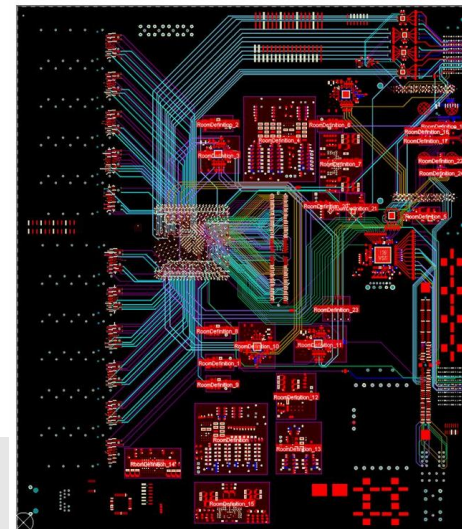


Figure 12.3: Diagram of the proposed structure of the trigger electronics plug-in principle prototype. It is based on ATCA standard. AMD Xilinx FPGA will be the first option for high speed data data transmission and high performance data processing.



TCDS与读出接口设计

TCDS/TTC

- 时钟、BC0、触发、轨道起始信号分发
- Full、ERR 信号反馈至 TCDS/TTC, 可屏蔽或停止 L1A

从 BEE 读取数据

- 直接读出或经 DCTD 板汇聚
- 根据数据量大小选择
- 以太网速率: 10 Gbps

- TCDS — 触发时钟分发系统
- TTC — 触发、定时与控制

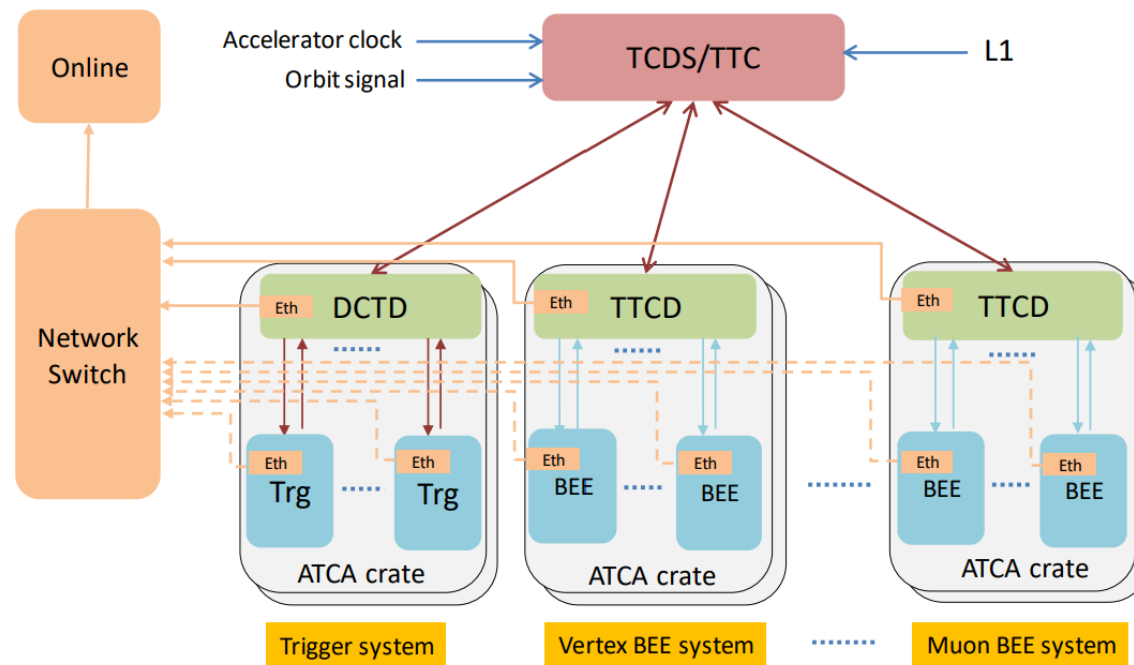


Figure 12.4: TCDS/TTC proposed structure. DCTD is Data Concentrate and Timing Distribution board. TTCD is Trigger Timing and Control Distribution for each sub-detector back end electronic system. Details of TTCD please refer Figure 11.17.

基线触发算法方案

■ ECAL触发单元:

- 桶部: 一个模块 (40cm×40cm×18层) 作为一个触发单元 (supercell)
 - 共计: 480 supercell = 32(R-Φ) × 15(Z)
- 端盖: 一个模块 (6种不同梯形模块) 作为触发单元
 - 共计: 224 supercell, 单侧 112 (异形模块未计入)

■ HCAL触发单元

- 桶部: Box (240/280/320 × 646 mm²)
 - φ 方向两个合并、z 方向一分为二
 - 20(Z) × 32(φ) 在 Z-φ 平面 (~匹配ECAL)
- 端盖
 - 划分为 350 mm² 网格

■ Muon 探测器: 计数小锥角内的击中数

- 角间距: $dR = \sqrt{(d\text{Eta}^2 + d\text{Phi}^2)}$, Eta: 赝快度
- 桶部: $dR < 0.05$, 端盖: $dR < 0.01$

■ 触发原语在触发单元内生成

- 能量、簇射信息 (位置、大小和深度)

■ 触发条件在全局触发逻辑中实现

- 能量阈值、簇团计数、背对背、能量平衡、径迹寻找

详情参见[广州研讨会报告 \(Boping\)](#)

触发模拟结果

■ 触发原语: ECAL & HCAL

– supercell 能量, 以最高值作为阈值

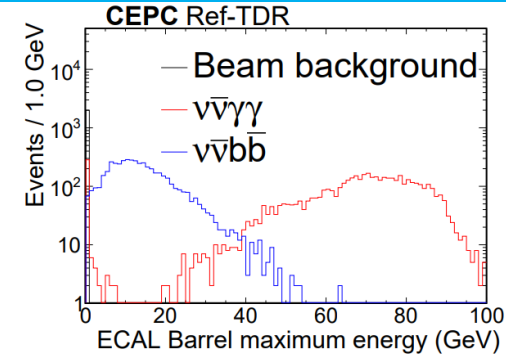
表 12.6

Subdetector	Baseline threshold		Subdetector	Baseline threshold	
	Higgs mode	Z mode		Higgs mode	Z mode
ECAL Barrel	> 0.20 GeV	>0.113 GeV	HCAL Barrel	> 0.023 GeV	>0.017 GeV
ECAL Endcap	> 2.57 GeV	>0.96 GeV	HCAL Endcap	> 0.16 GeV	>0.059 GeV

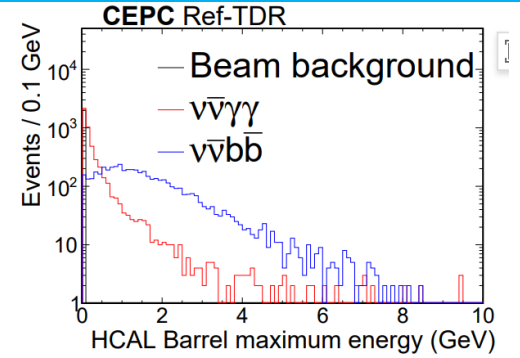
■ Higgs & Z 触发效率

Table 12.7: Baseline calorimeter energy threshold efficiency at the Higgs mode for 50 MW and the Z mode for 12.1 MW.

Process	Efficiency(%)	Process	Efficiency(%)	Process	Efficiency(%)
Higgs production					
$Z(\nu\bar{\nu})H(\gamma\gamma)$	>99.9	$Z(\nu\bar{\nu})H(\gamma Z)$	>99.9	$Z(\nu\bar{\nu})H(b\bar{b})$	>99.9
$Z(\nu\bar{\nu})H(\mu^+\mu^-)$	>99.9	$Z(\nu\bar{\nu})H(\tau^+\tau^-)$	>99.9	$Z(\nu\bar{\nu})H(W^+W^-)$	>99.9
$Z(\nu\bar{\nu})Z(W^+W^-)lep$	>99.9	$Z(\nu\bar{\nu})H(ZZ)$	>99.9	$Z(\nu\bar{\nu})H(ZZ)lep$	99.9
Two Fermions					
$q\bar{q}$	Higgs mode >99.9	Z mode >99.9	$\mu^+\mu^-$	Higgs mode 99.6	Z mode >99.9
Bhabha	99.9	>99.9	$\tau^+\tau^-$	99.6	>99.9
Di-photon process					
$\gamma\gamma \rightarrow b\bar{b}$	Higgs mode 99.6	Z mode >99.9	$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$	Higgs mode 98.4	Z mode 99.7
$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$	26.9	29.6	$\gamma\gamma \rightarrow \tau^+\tau^-$	78.0	92.1
$\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$				81.6	90.7
Background					
	Veto efficiency				
	Higgs mode	Z mode			
Beam Background	99.3	99.3			

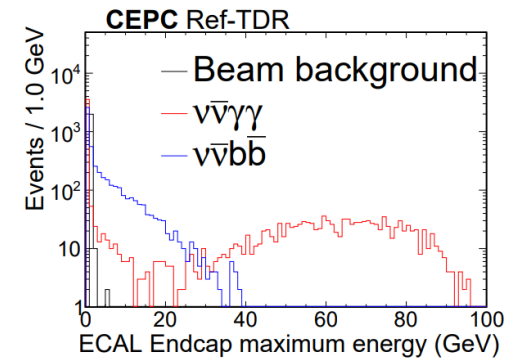


(a)

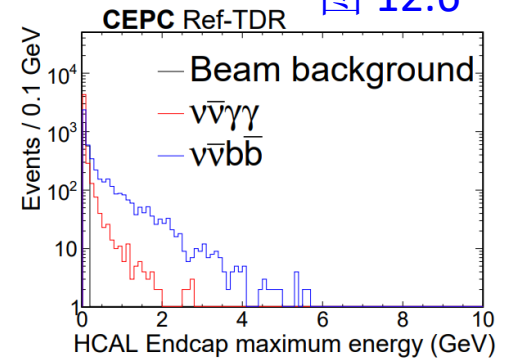


(b)

图 12.6

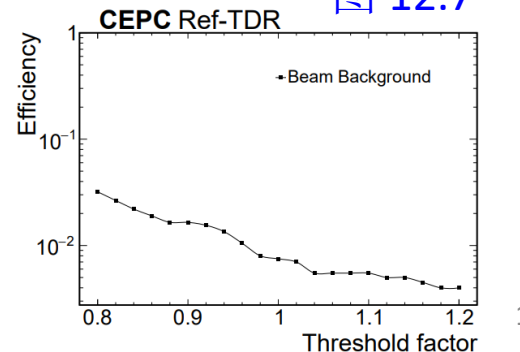
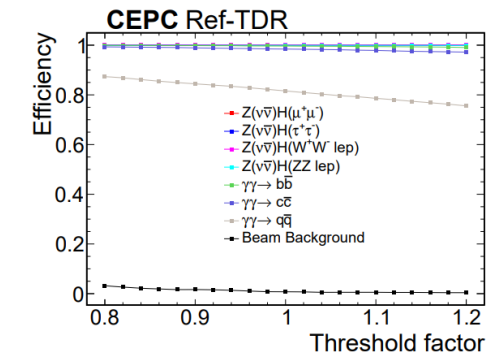


(c)



(d)

图 12.7

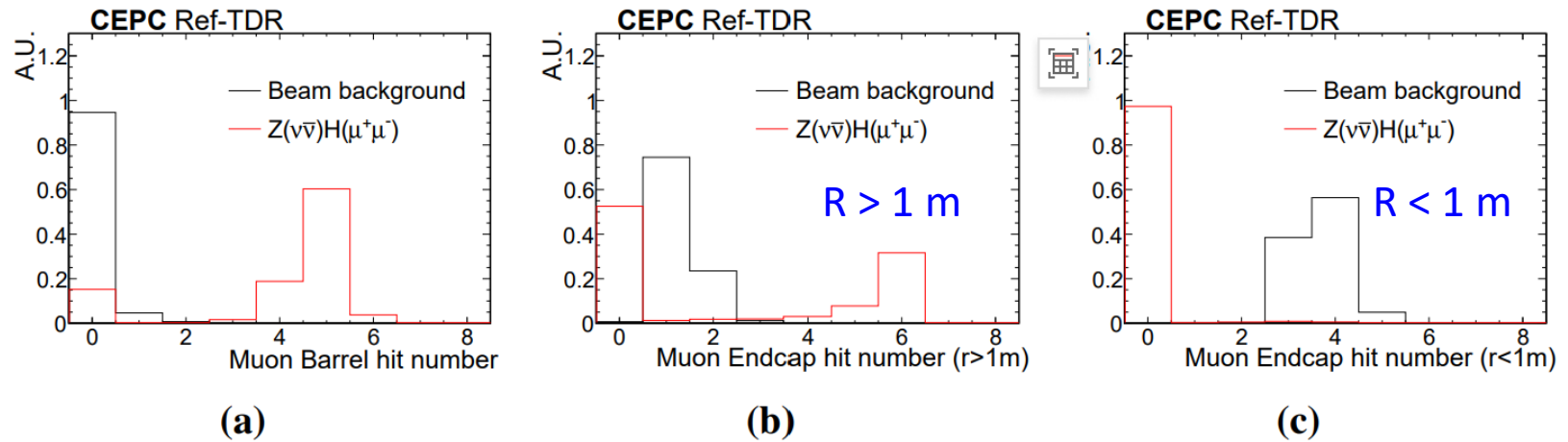


触发模拟结果

Muon 探测器触发单元中的击中与径迹

- 端盖 $R > 1\text{m}$: > 1
- 桶部: > 1

图 12.8



Muon 探测器触发效率与束流本底抑制率

Table 12.8: Muon trigger efficiency for baseline threshold for the Higgs mode for 50 MW and the Z mode for 12.1 MW.

Process	Efficiency(%)	Process	Efficiency(%)		Background	Veto efficiency(%)	
			Higgs mode	Z mode		Higgs mode	Low Lumi. Z mode
$Z(\nu\bar{\nu})H(\mu^+\mu^-)$	99.8	$\mu^+\mu^-$	97.6	98.5	Beam background	99.9	>99.9
		$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$	7.8	2.9			

触发模拟结果

表 12.10

基本 L1 触发算法

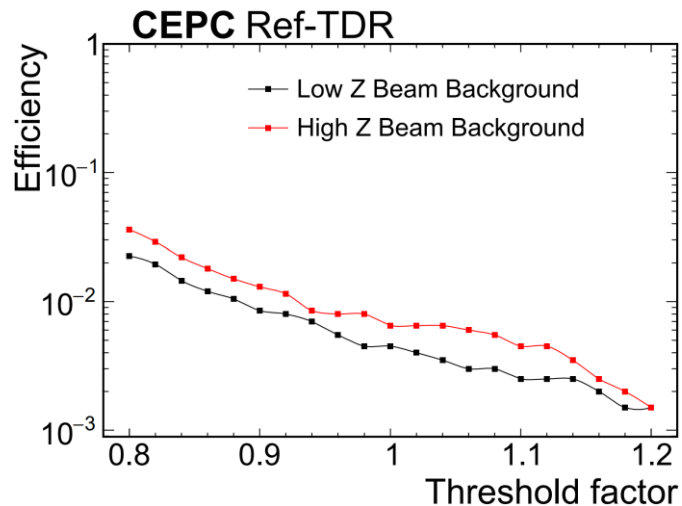
- 量能器 + Muon

触发效率高

本底抑制效率高

- 11.4kHz @ZH

- 90 kHz @低亮度 Z



Higgs mode	Efficiency(%)	Z mode	Efficiency(%)
Higgs production	>99.9	$q\bar{q}$	>99.9
$q\bar{q}$	>99.9	$\mu^+\mu^-$	>99.9
$\mu^+\mu^-$	99.8	$\tau^+\tau^-$	>99.9
$\tau^+\tau^-$	99.6	Bhabha	>99.9
Bhabha	99.9		
Di-photon processes		Di-photon processes	
Di-photon event rate	Efficiency(%)	Di-photon event rate	Efficiency(%)
9.1 kHz	40.3	Low Lumi: 18.5 kHz	42.9
Beam Background		Beam Background	
Background event rate	Veto efficiency(%)	Background event rate	Veto efficiency(%)
11.4 kHz	99.2	Low Lumi: 90.0 kHz	99.3
Total		Total	
20.6 kHz		Low Lumi: 118.9 kHz	

HLT 可接受；高亮度 Z 下触发率偏高

径迹触发模拟

■ 基于 3D Hough 变换的径迹触发研究

- VTX/ITK 击中 >2 个、且 OTK 击中 ≥ 1 个，则记为一条径迹
- Hough 变换找到至少一条径迹即通过选择
- 表 12.6 给出了单 BX 本底事例的效率
 - 此前每个本底事例按 10 BX 计算，即 10 倍安全因子

Table 12.11: Track trigger efficiency at the Higgs mode for 50 MW and the Z mode for 12.1 MW. Each background event includes one bunch crossing only.

Process	Efficiency(%)	Process	Efficiency(%)		Background	Veto efficiency(%)	
			Higgs mode	Z mode		Higgs mode	Z mode
$Z(\nu\bar{\nu})H(b\bar{b})$	99.5	$q\bar{q}$	98.0	99.5	Beam background	98.8	99.7
$Z(\nu\bar{\nu})H(\mu^+\mu^-)$	93.5	$\mu^+\mu^-$	77.0	85.0			

■ 当前结果尚未改善触发筛选性能，需进一步研究

触发与数据率估算



表 12.4

■ L1 触发率

- 预期将束流本底降至 BX 率的 <1%

■ HLT 率

- 预期将束流本底降至 <0.1%
- 预期通过 ROI 减小事例大小

■ DAQ 数据存储量 (两周)

- 0.36 PB @Higgs, 6 PB @低亮度 Z

Running mode	Higgs	Z
SR power	50 MW	12.1 MW
Non-empty bunch crossing rate(MHz)	1.34	12
Luminosity ($10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$)	8.3	26
Physical event rate (kHz)	0.5	10
L1 trigger rate (kHz)	20	120
DAQ readout rate (Gbyte/s)	5.34	11.9
HLT rate (kHz)	1	20
Raw event size (kbyte)	405	333
DAQ storage rate (Gbyte/s)	0.405	6.66

高级触发 (HLT)

■ 事例筛选与数据压缩

- 分布式计算
- 先进软件工具
- 实时约束

■ 实现功能

- 特征提取
- 径迹种子寻找
- 轻量级 PID
- 刻度
- 物理筛选/ROI

■ 需研发高效兼容的接口软件以调用离线算法

■ 除 CPU 外，利用 GPU 和 FPGA 加速

- 120 kHz L1 输入，需约 36k CPU 核
- 基于 0.3 s/核/事例 的假设

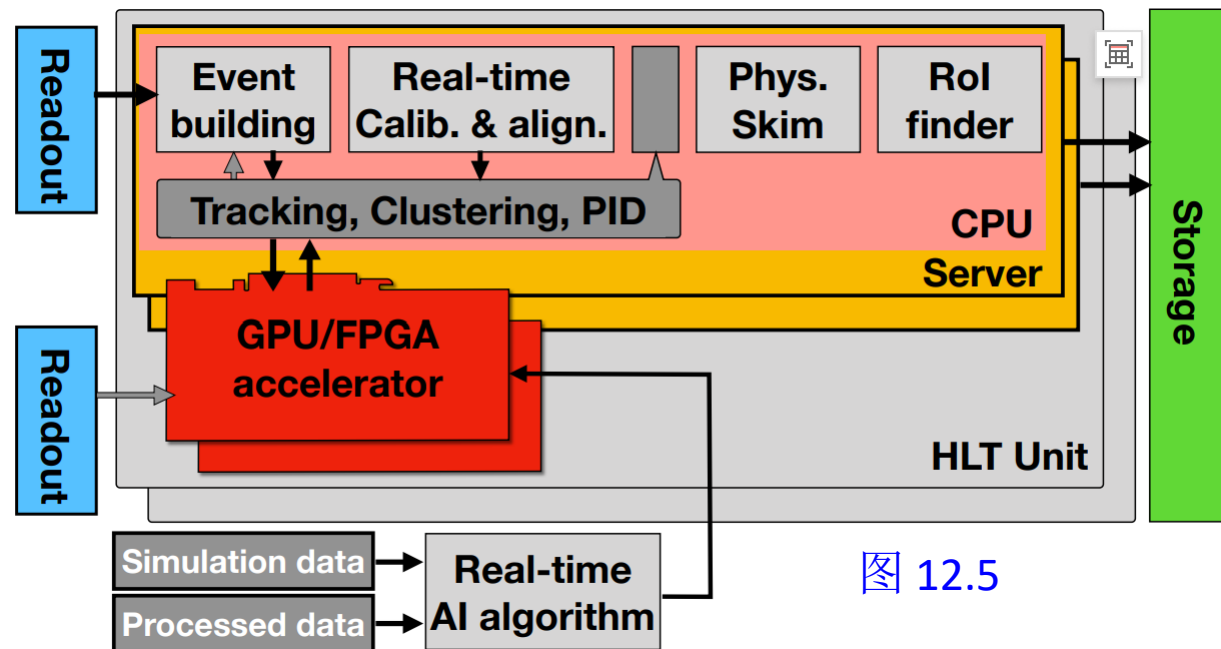


图 12.5

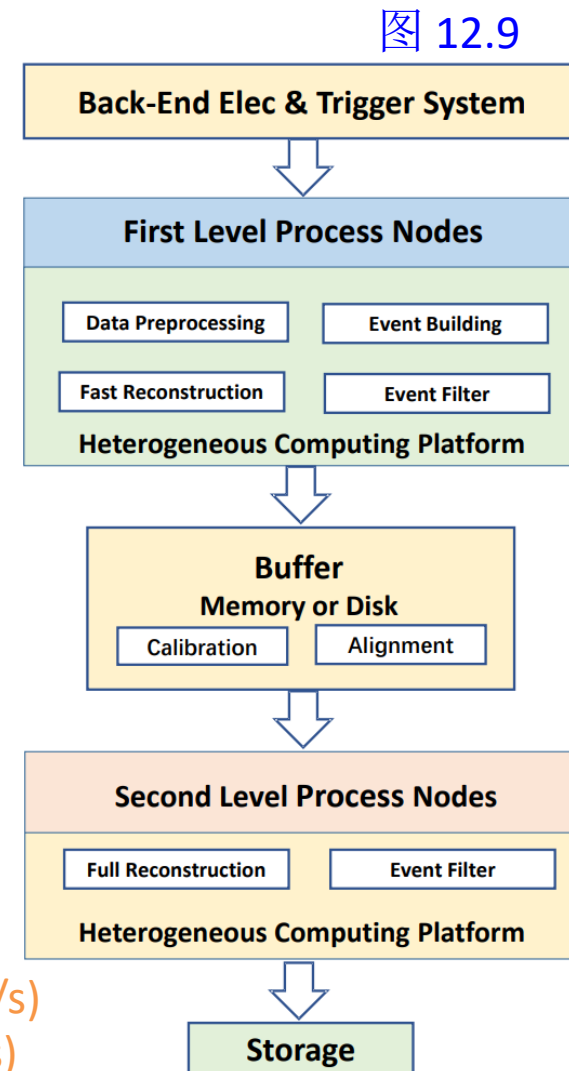
DAQ 架构设计

- 兼容有无硬件触发的设计
 - 可平滑升级至全软件触发
- 全 COTS 商用硬件
- RADAR 软件框架升级
 - 异构计算
 - GPU/FPGA 加速 HLT
- 两级 HLT 设计
 - HLT1: 快速重建
 - HLT2: 含在线刻度的全重建
- 磁盘或内存缓冲
 - 计算环境解耦
 - 完整离线算法可在线运行

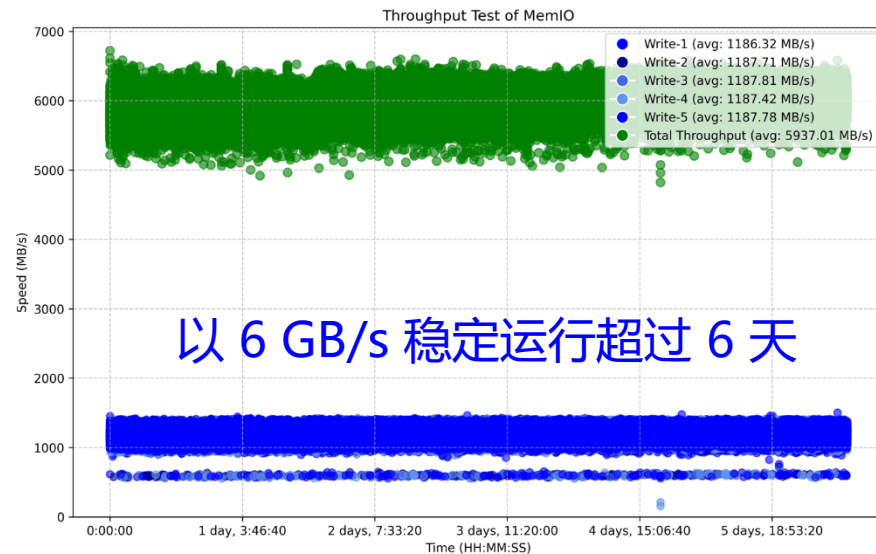
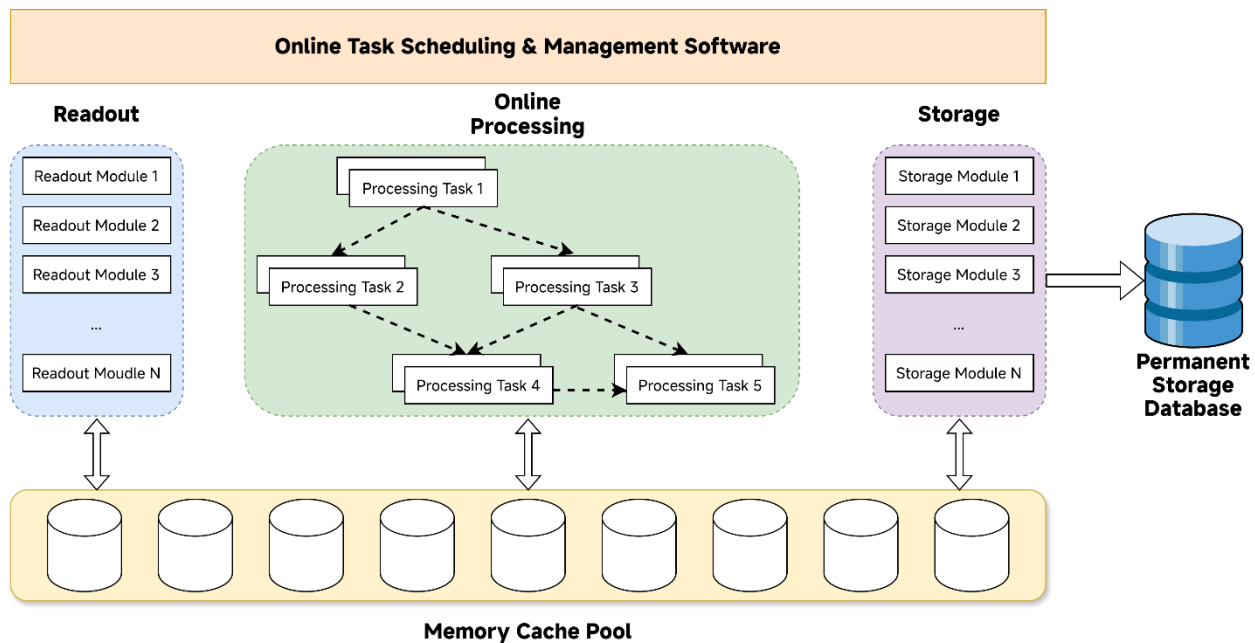
数据率降低后，结构可进一步简化

50kHz (6GB/s)
120 kHz (8.7GB/s)
400kHz (78GB/s)

1kHz (0.3 GB/s)
20kHz (5GB/s)
154kHz (50GB/s)



MemIO: 分布式内存缓存软件



设计动机:

- 解耦读出与在线处理模块
- IO 支持动态读出与动态在线处理

需求:

- 高吞吐能力
- 高运行效率
- 高可靠性

功能开发已完成

在数据率较低时可简化系统结构

详情参见[广州研讨会报告 \(张航畅\)](#)

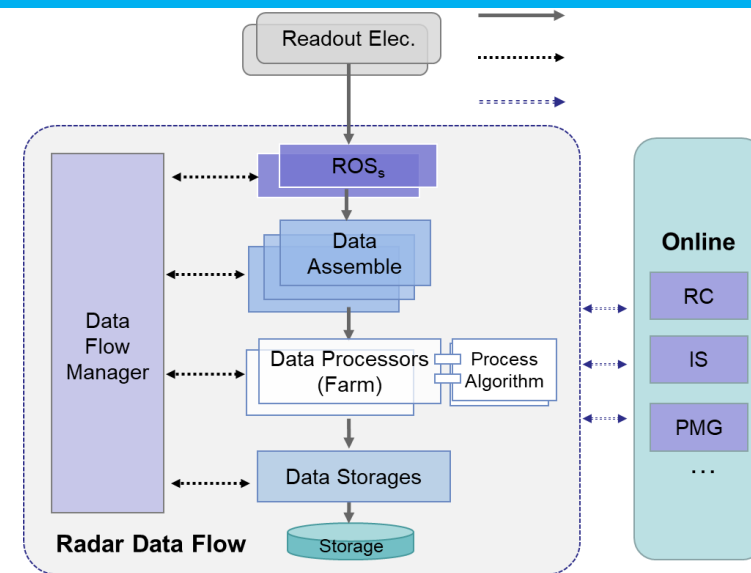
流式软件框架 — RADAR

异构数据采集与处理架构

- **V1:**部署于LHAASO (3.5 GB/s数据率), 软件触发模式
- **V2:**升级用于JUNO (40 GB/s数据率), 混合触发模式
- **V3:**面向CEPC (~TB/s数据率), 开发中



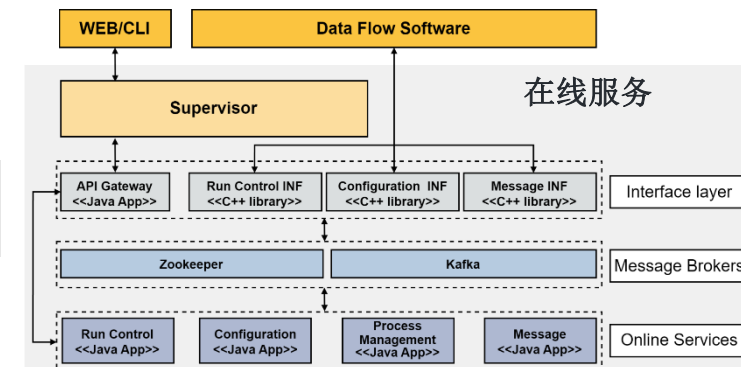
- **设计动机:**
 - 高通量数据采集与处理
- **现状:**
 - 十余年积累取得显著进展, 经实验验证
- **近期重点:**
 - GPU 异构在线处理平台
 - 实时数据处理加速方案
- **拓展方向:**
 - 多领域应用 (DAQ、触发、控制等)
 - AI 技术集成 (ML、NLP、专家系统等)



- 通用分布式框架
- 轻量化结构
- 插件式模块设计
- 微服务架构

已开发调度原型, 用于融合离线算法, GPU算法计算研究

详情参见[广州研讨会报告 \(张旭\)](#)



探测器控制系统 (DCS) 设计

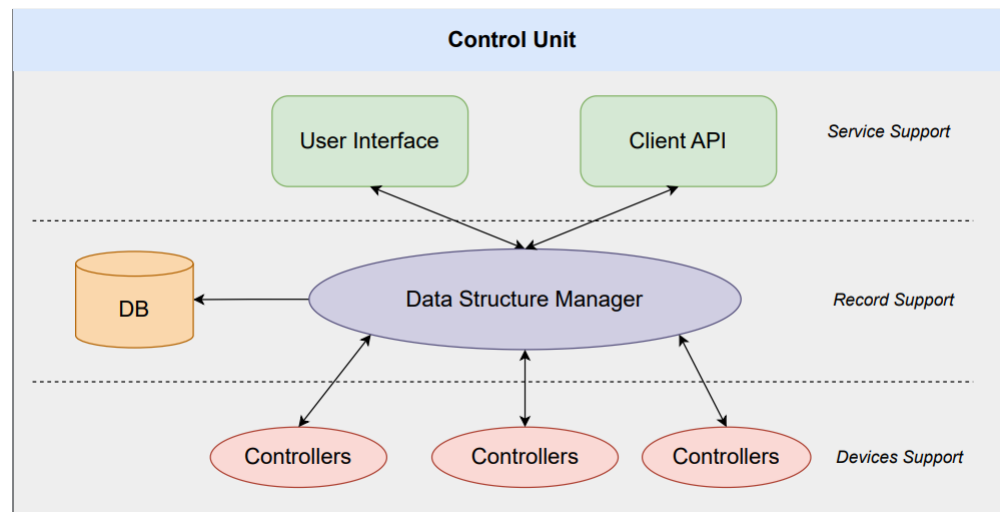
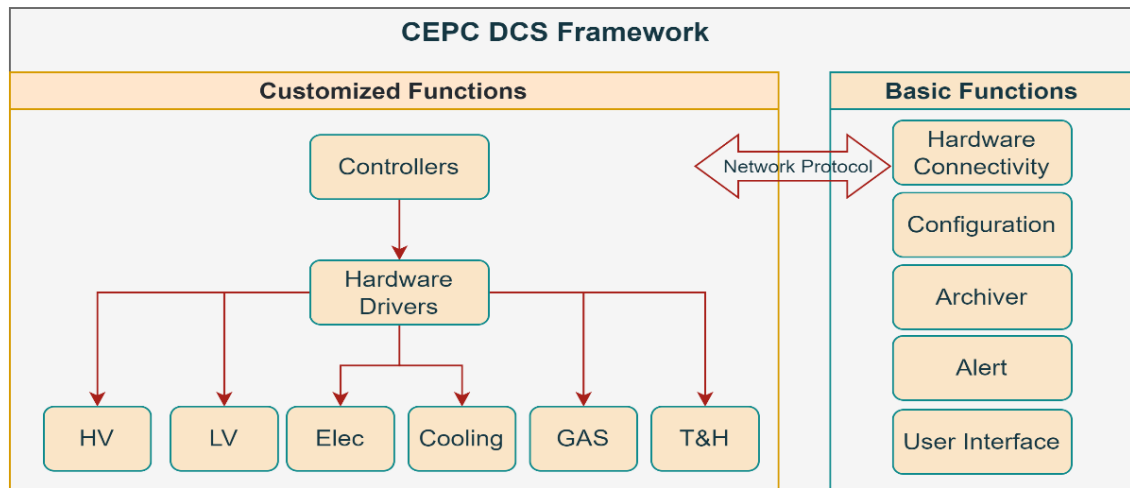
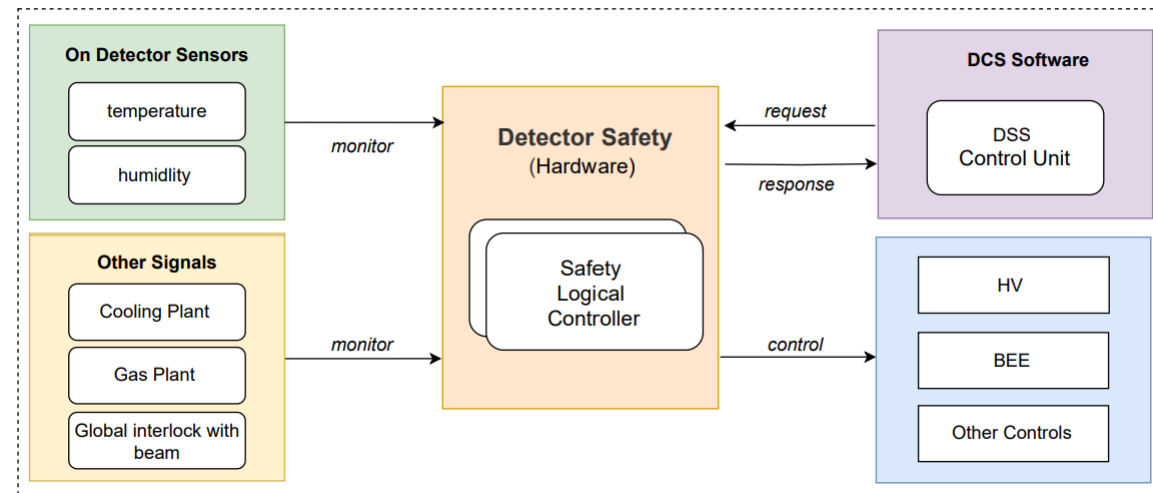


Table 12.16: Summary of detector control and monitoring quantities

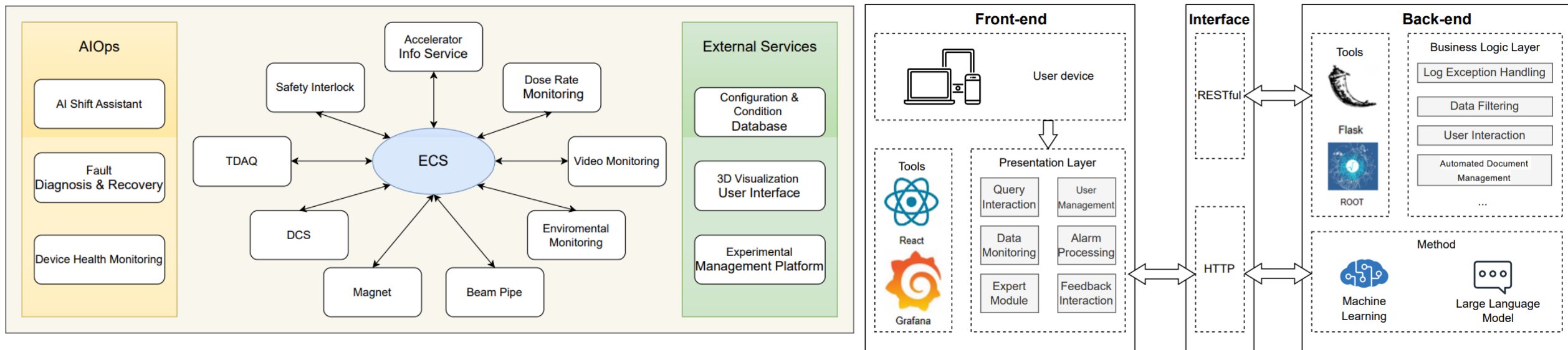
Equipment	Channel Number	Control and Monitoring Items	Total Count
AC-DC Crate	55	Switch, voltage, current, etc., about 6 items	330
AD-DC Channel	550	Switch, voltage, current, etc., about 6 items	3300
FEE Power Crate	390	Switch, voltage, current, etc., about 6 items	2340
FEE Power Channel	17696	Switch, voltage, current, etc., about 6 items	106,176
FEE Board	27984	Voltage, current, temperature, etc., about 10 items	279,840
BEE Crate	110	Switch, fan, status, etc., about 10 items	1100
BEE Board	1018	Switch, voltage, current, etc., about 6 items	6,108
Trigger Crate	20	Switch, fan, status, etc., about 10 items	200
Trigger Board	150	Switch, fan, status, etc., about 10 items	1500
HV Crate	91	Switch, fan, status, etc., about 10 items	910
HV Channel	18694	Voltage, current, status, etc., about 6 items	112,164
Gas	1	Flow control, humidity, etc., about 30 items	30
Environmental	3568	Temperature, humidity	5448
Total			~520,000



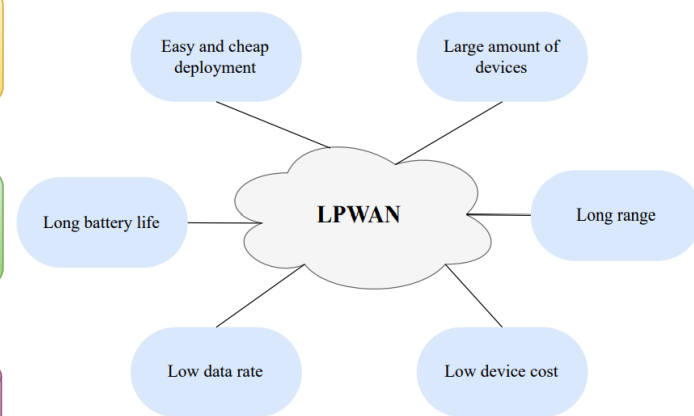
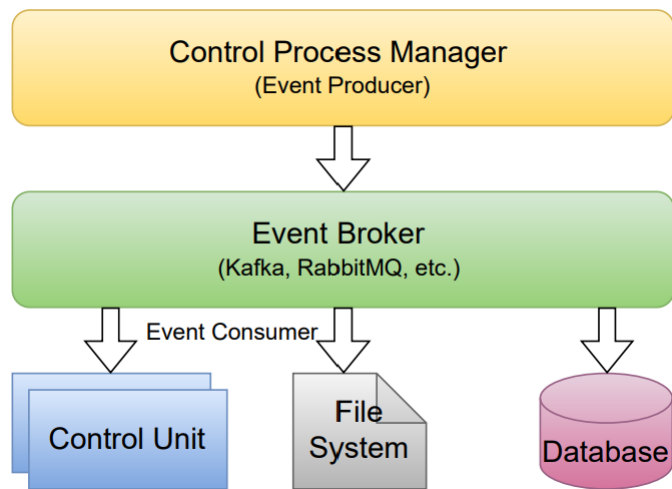
基于已有方案设计了框架

顶点和 ITK/OTK 所需

实验控制系统 (ECS) 设计



- 中央控制模块
- 数据采集与管理模块
- 用户界面模块
- AI 集成层, 运控智能体



总结

- Ref-TDR 已给出 TDAQ 通用基线方案
 - 涵盖触发模拟、硬件触发、HLT、DAQ 和控制系统
- 本底数据率降低后, TDAQ 架构可简化
 - 倾向采用最小化 L1 触发, 仅用量能器和 Muon
- 多个技术研究方向持续推进中



谢谢各位！

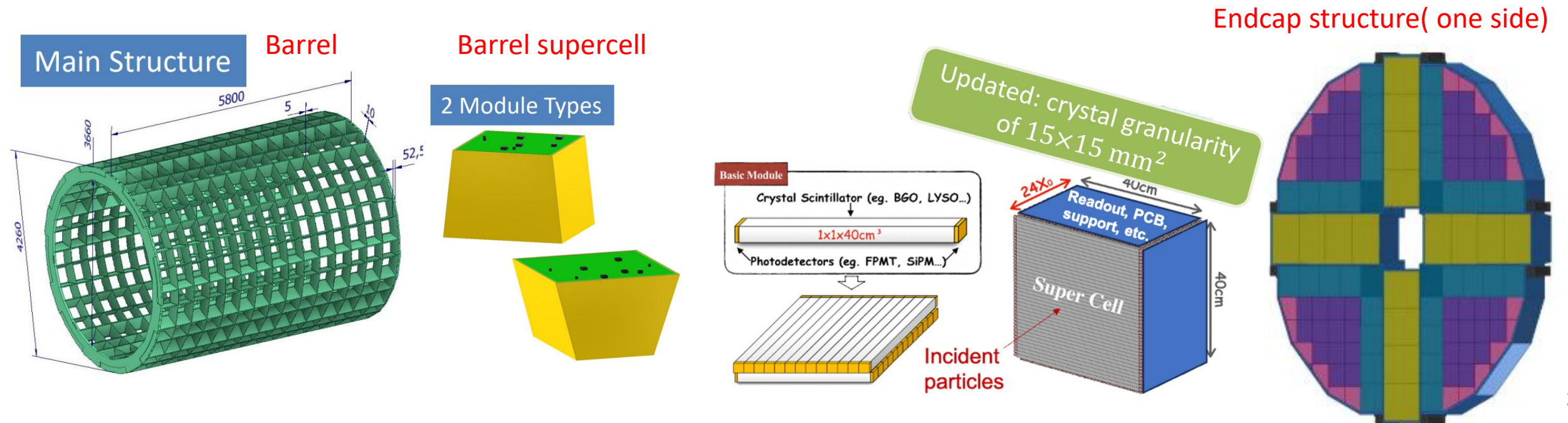


中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

备用

ECAL 触发方案

- 桶部触发单元: 一个模块 (40cm×40cm×18层) 作为一个触发单元 (supercell)
 - 共计: 480 supercell = 32(R-Φ)×15(Z)
- 端盖触发单元: 一个模块 (6种不同梯形模块) 作为触发单元
 - 共计: 224 supercell, 单侧 112 (异形模块未计入)
- 在触发 supercell 内生成能量、簇射信息 (位置、大小和深度)
- 全局触发逻辑中实现能量阈值、簇团计数、背对背、能量平衡或径迹寻找



HCAL 触发方案

■ GS-HCAL: 桶部16个分区, 两个端盖

- 桶部厚度1315 mm
- 桶部内径2140 mm
- 桶部长度 6460 mm
- 层数: 48层

■ 桶部:

- ϕ 方向两个合并、z 方向一分为二 (绿框)
- 20(Z)×32(ϕ) 在 Z- ϕ 平面 (~匹配 ECAL)

■ 端盖

- 划分为 350 mm^2 网格

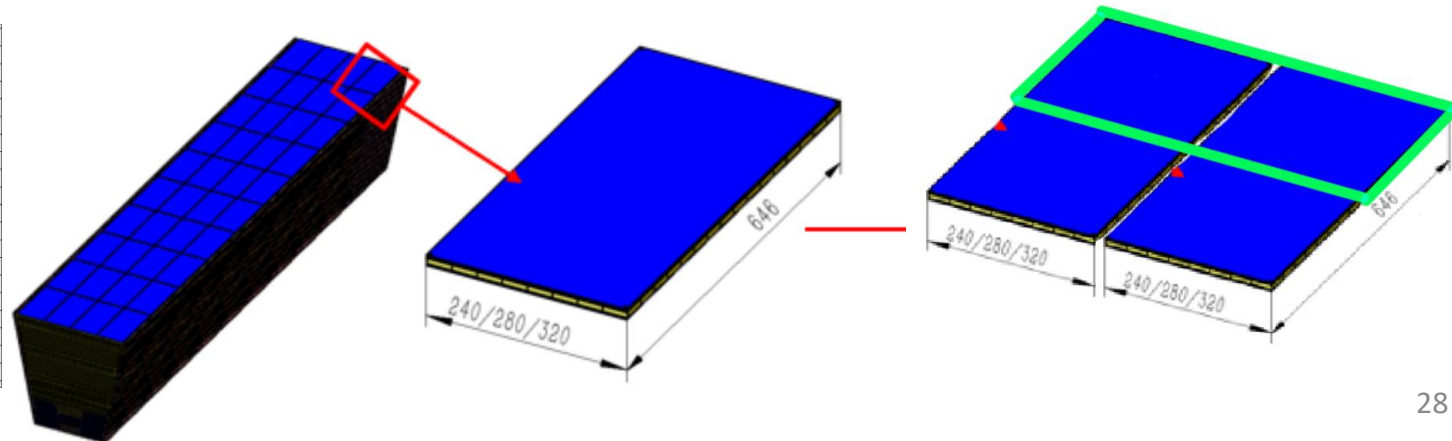
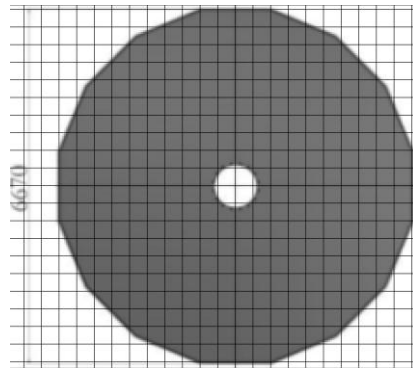
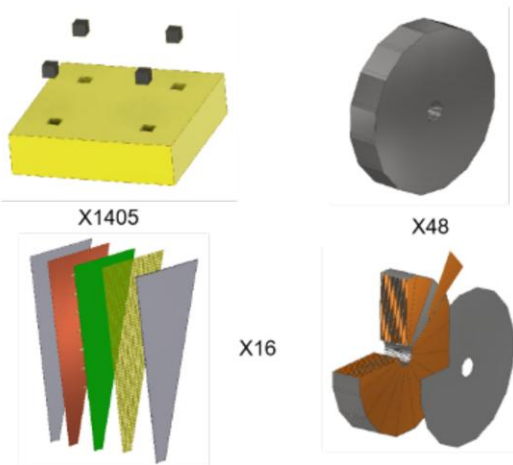
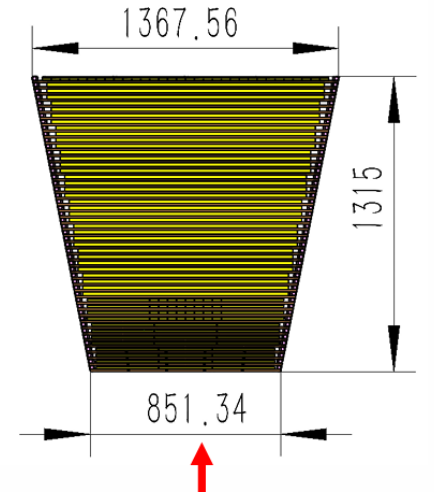
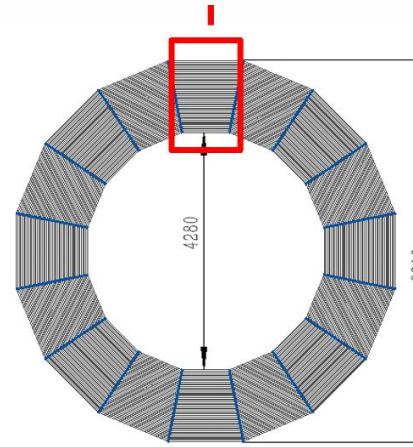


Figure 8.88: Formation of the endcap HCAL model

Muon 触发方案

- 12 面螺旋线
- 主要事例 $Z(\nu\nu)H(\mu\mu)$
- 计数小锥角内的 Muon 击中数
 - 角间距: $dR = \sqrt{(d\text{Eta}^2 + d\text{Phi}^2)}$
 - Eta: 赝快度
 - 桶部: $dR < 0.05$
 - 端盖: $dR < 0.01$

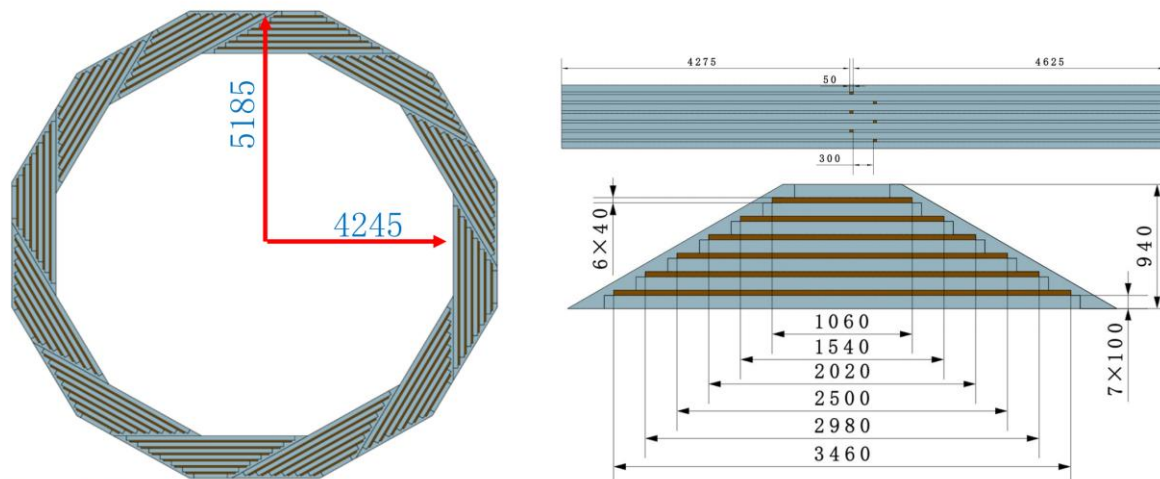


Figure 9.15: Left: the detailed design of the Barrel, featuring a 12-sided polygon structure and the arrangement of modules within it. Right: a trapezoidal module of the Barrel geometry featuring six super-layers, with their lengths labeled in the figure for reference.

