

Introduzione

Le collisioni protone-protone che si verificano al Large Hadron Collider (LHC) producono un flusso di dati dell'ordine di TB/s. A causa delle limitazioni nelle capacità di lettura, elaborazione e archiviazione, l'esperimento CMS ha progettato un sistema di trigger a due livelli per selezionare gli eventi di interesse fisico. Implementato in hardware, il trigger di Livello 1 (L1) riduce il rate di eventi da 40MHz, la frequenza di incrocio dei bunch di LHC, fino a circa 100kHz, utilizzando esclusivamente i dati dei calorimetri e dello spettrometro muonico.

Un nuovo sistema di acquisizione dati, parallelo e complementare al trigger di L1, è in via di sviluppo per la fase ad alta luminosità di LHC. Noto come **40MHz Scouting**, il sistema acquisisce le primitive di L1 alla frequenza di bunch crossing di LHC con il fine di eseguire analisi quasi-online su questi dati a risoluzione limitata.

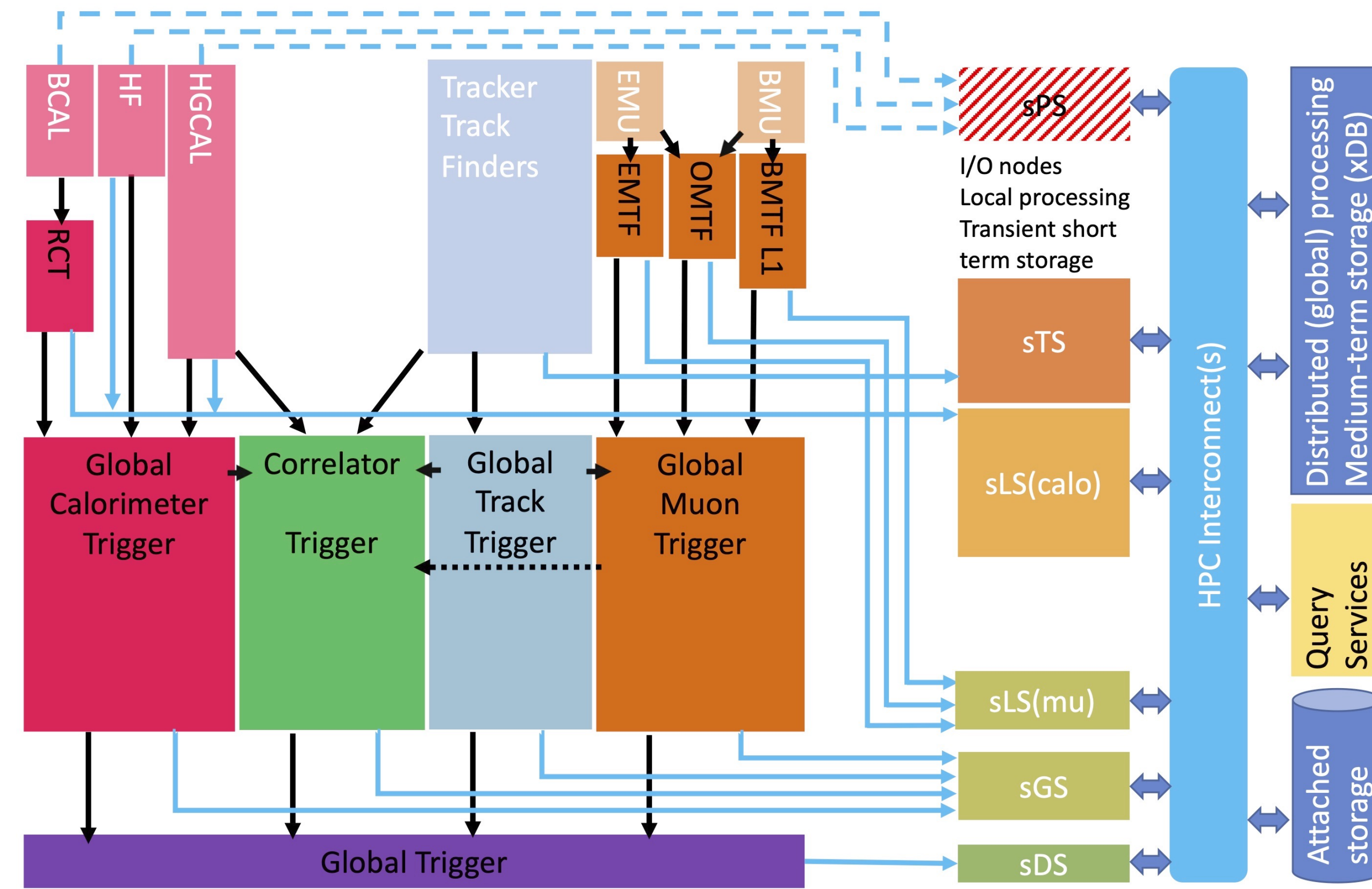
Lo Scouting a 40MHz può quindi fornire un'alta statistica di dati per la diagnostica dei rivelatori e del trigger o per studi di luminosità; consente inoltre lo studio di eventi altrimenti inaccessibili a causa delle selezioni necessarie che vengono effettuate a livello di trigger. Un'analisi basata su i dati di questo sistema può essere vantaggiosa per molteplici processi fisici:

- misure di processi di cromodinamica quantistica (QCD) in regioni dello spazio delle fasi non ancora considerate
- Long Lived Particles (LLP): signature di displaced muon, e.g. da segnali di materia oscura (DM)
- decadimento raro $W \rightarrow \pi\pi\pi$
- eventi con signature che coprono molteplici bunch crossing, e.g. Heavy Stable Charged Particles (HSCPs)

40MHz Scouting per High Luminosity LHC (HL-LHC)

Per la fase di alta luminosità, HL-LHC fornirà una luminosità istantanea fino a $7.5 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, quasi un fattore 4x rispetto alle condizioni di LHC in Run 3; il numero medio di collisioni protone-protone per bunch crossings (pileup) raggiungerà inoltre un valore di circa 200. Per far fronte alle nuove condizioni, il rivelatore CMS sarà sottoposto ad un upgrade significativo. Il sistema di trigger e acquisizione dati (DAQ) dovrà in particolare sostenere rate più elevate: durante la Fase 2 il trigger di L1 raggiungerà un rate di circa 750 kHz e avrà accesso anche alle informazioni del tracciatore e ai dati del calorimetro ad alta granularità [1].

Per HL-LHC, il **L1 Data Scouting system (L1DS)** [2] leggerà le informazioni da diversi sottosistemi della catena di trigger di L1 con un'architettura scalabile basata su due stage.



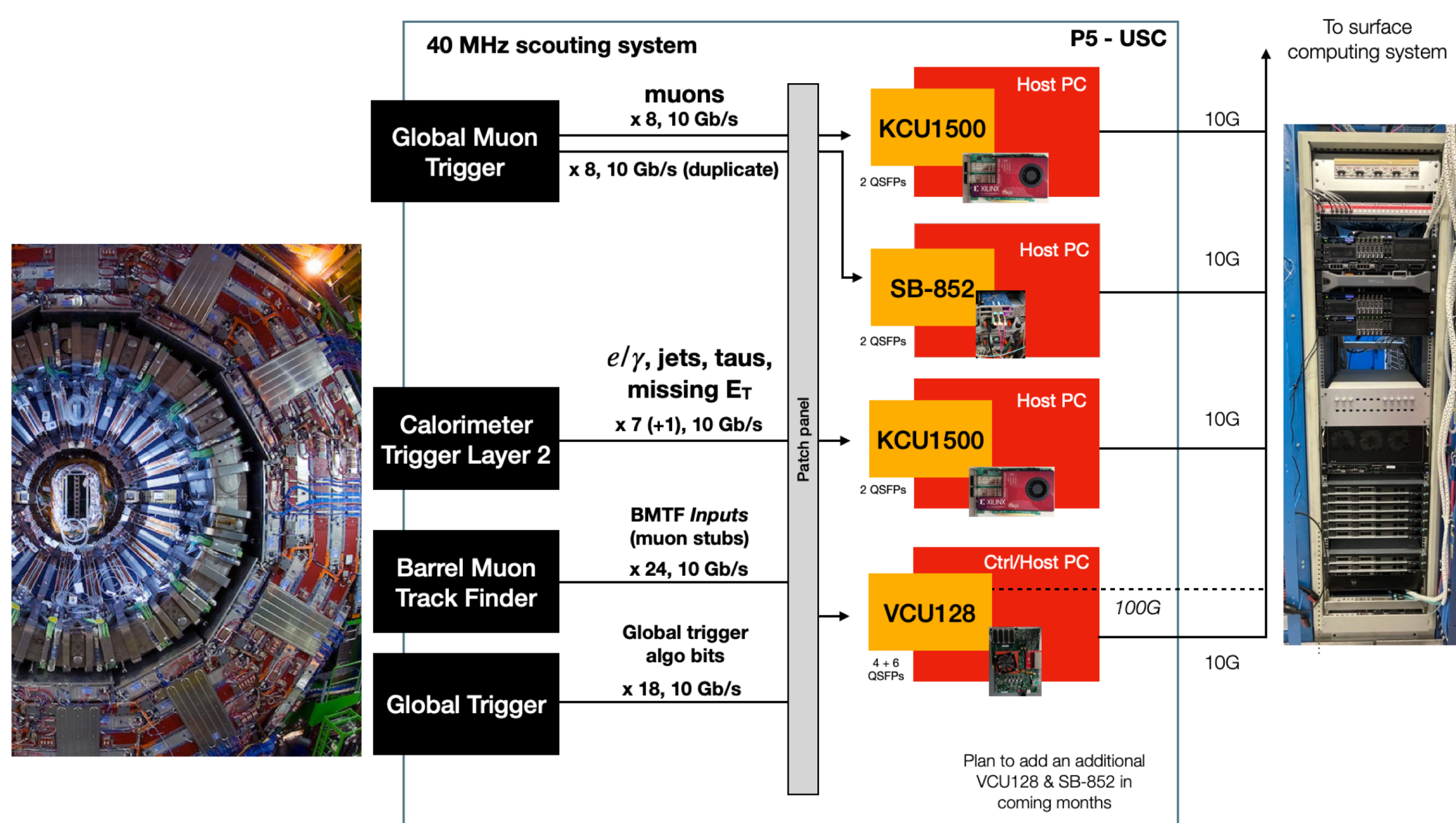
Stage 1

- scouting Global System (sGS): dati dal Correlator, Global Calorimeter, Global Track e Global Muon Trigger
- scouting Decision System (sDS): input e output dal Global Trigger (GT)
- Implementato con sette schede DAQ800, le stesse usate dal sistema di DAQ di Fase 2.

Stage 2

- scouting Local System (sLS): può essere aggiunto nelle fasi successive per includere ulteriori sottosistemi del L1 trigger

Dimostratore dello Scouting a 40MHz per Run 3



Il sistema 40MHz Scouting è stato introdotto nel 2018 a fine del Run 2. Il dimostratore per Run 3 è stato ampliato per ricevere dati da molteplici sorgenti ed è implementato con tre diversi tipi di schede.

Global Muon Trigger (GMT)

- Fino a 8 muoni
- $8 \times 10 \text{ Gb/s}$ link da 1 processore
- 64 bits per oggetto

Barrel Muon Track Finder (BMTF)

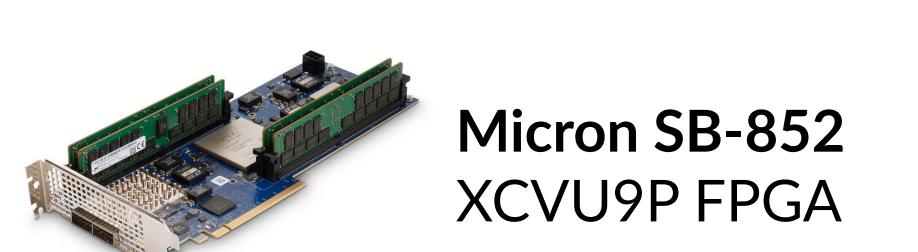
- Muoni in input
- $24 \times 10 \text{ Gb/s}$ link da 8 processori

Layer-2 Calorimeter Trigger (DeMux)

- Fino a 12 jets, e/γ , taus
- Energia traversa mancante, somme
- $7 \times 10 \text{ Gb/s}$ link da 1 processore
- 32 bits per oggetto

Global Trigger (GT)

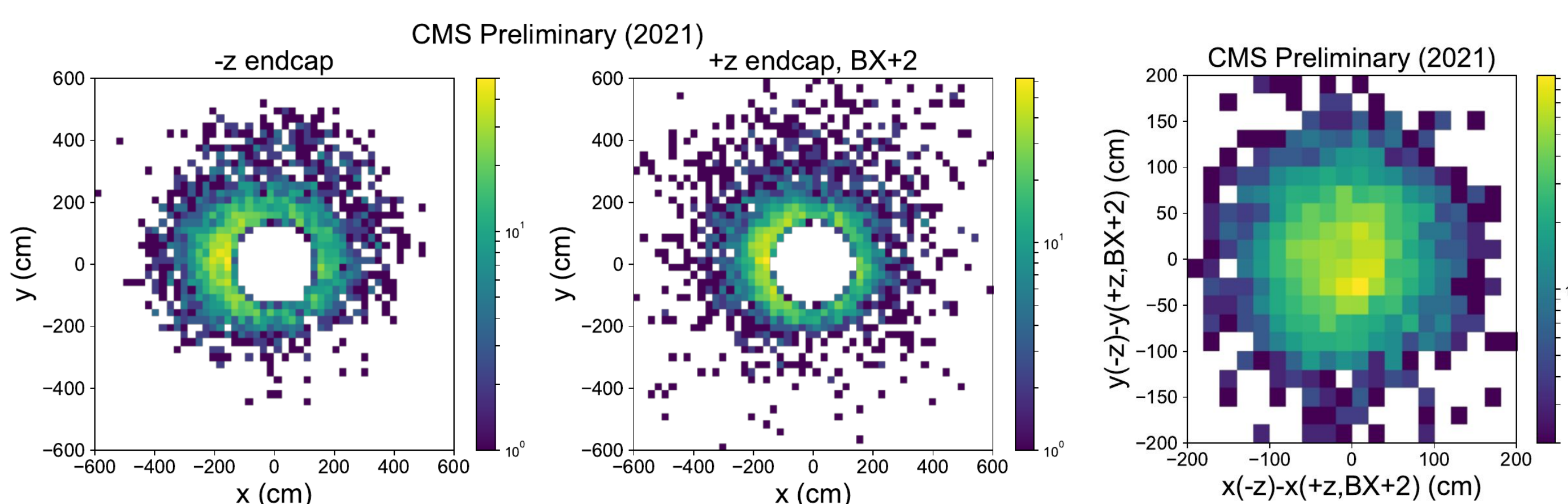
- Bits degli algoritmi decisionali in output
- $18 \times 10 \text{ Gb/s}$ link da 6 processori



Risultati dei primi test

I primi test con il dimostratore per Run 3 sono stati eseguiti durante un test beam di LHC nell'ottobre 2021. Grazie alla capacità del sistema 40MHz Scouting di registrare le primitive di trigger per tutti i bunch crossings (BXs), si possono osservare effetti come l'alone del fascio. I muoni dell'alone sono dovuti all'interazione del fascio con il materiale dell'acceleratore o a molecole di gas residue nel tubo a vuoto. Il flusso di muoni è parallelo alla linea del fascio.

Alone del fascio nelle regioni estreme (endcaps)

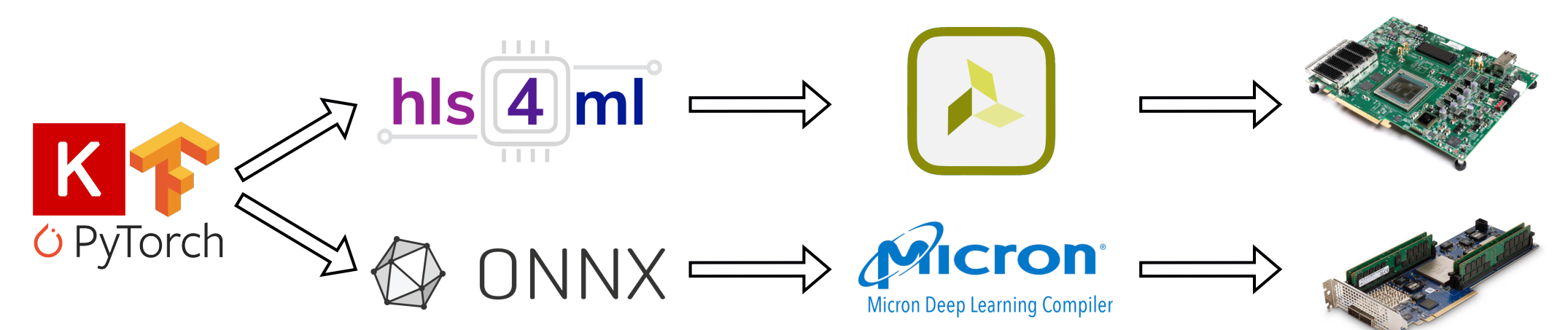


- Muoni del GMT ricostruiti negli endcaps: selezione di coppie di muoni in endcap opposti, con cariche opposte e con $\Delta BX = 2$, corrispondente a 50ns, in BXs che non collidono in CMS.
- Occupazione dei muoni nella regione negativa (-z) e positiva (+z) dopo 2 BX (sinistra e centro)
- Differenza nelle coordinate trasversali tra i due muoni (destra): le coordinate sono correlate, la coppia corrisponde a un singolo muone dovuto all'alone che attraversa il rivelatore

Applicazioni di Machine Learning (ML)

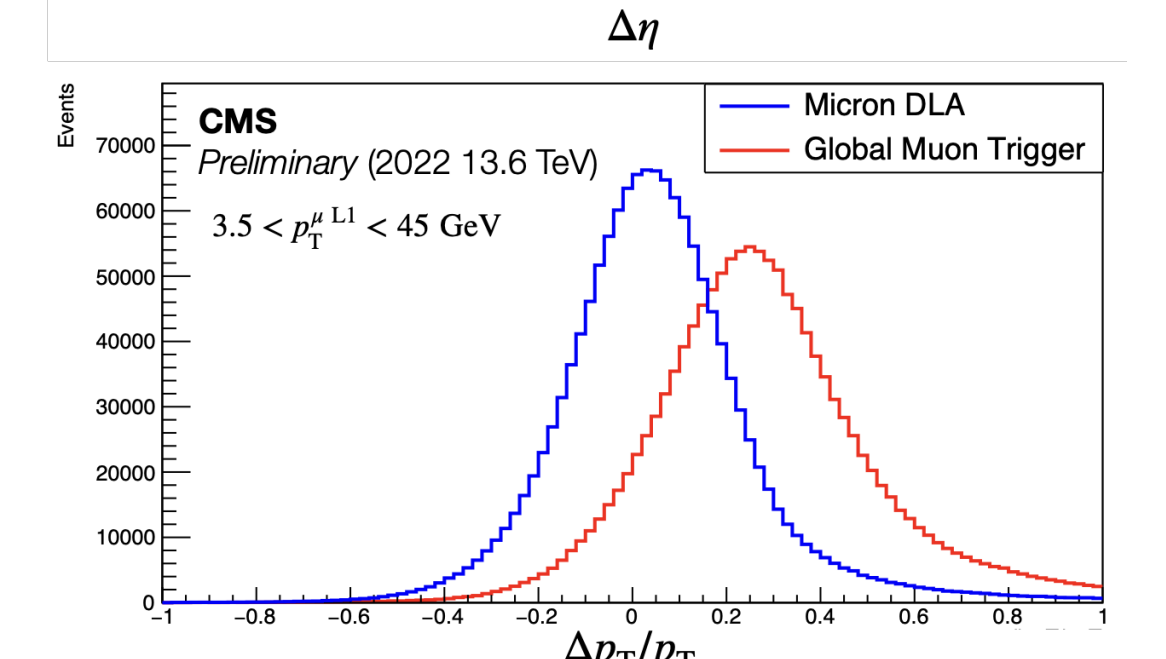
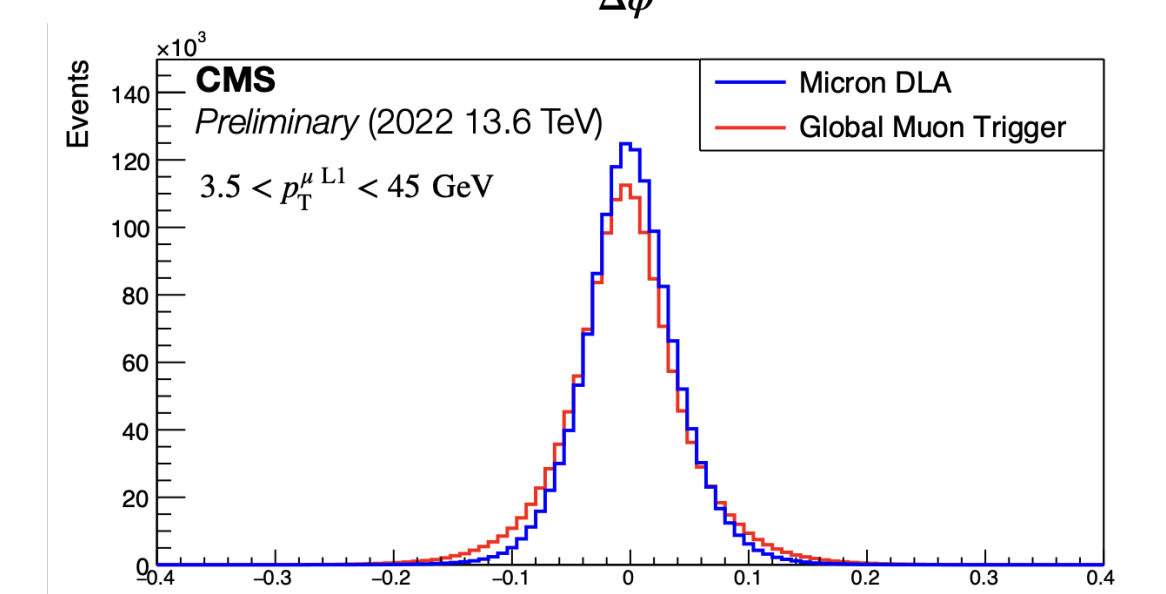
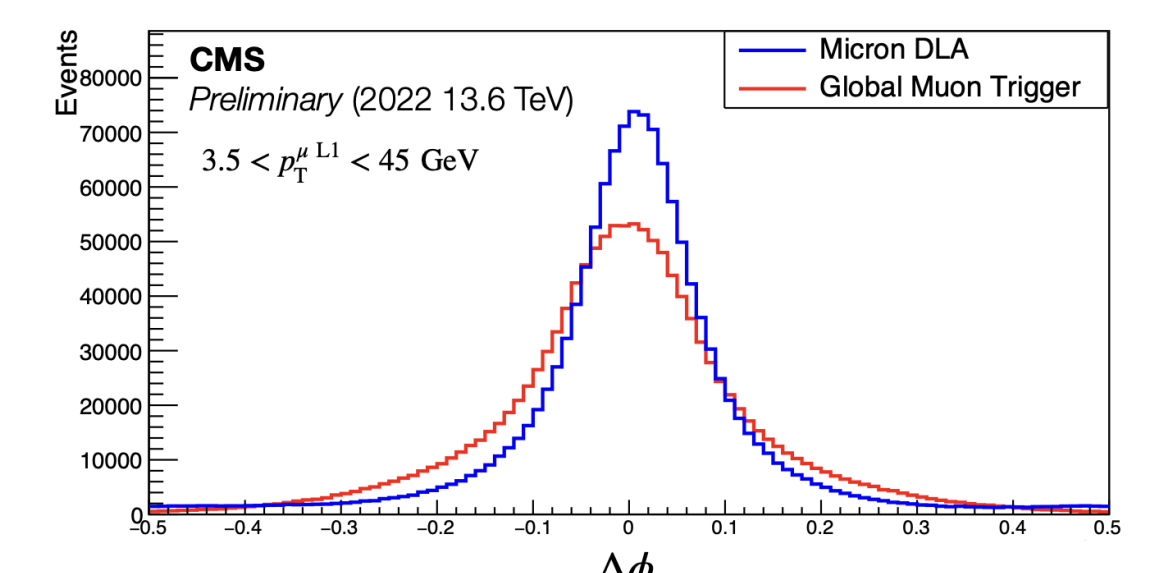
Algoritmi di ML per l'analisi possono essere implementati nella catena dello Scouting grazie a strumenti che permettono di tradurre reti neurali (NN) in linguaggio hardware.

- hls4ml [3]: implementazioni di modelli di ML con un linguaggio di sintesi di alto livello
- Micron Deep Learning Accelerator (MDLA) [4] motore proprietario di inferenza della Micron



Ricalibrazione dei muoni del GMT in Run 3

- Risoluzione limitata degli oggetti a L1 (no tracciatore)
- Calibrazione non ottimale per un'analisi di fisica
- Oggetti ricostruiti offline (RECO) come learning target di una NN
- Ricalibrazione con NN allenata su dati di Run 3 acquisiti con trigger dedicati senza filtri
- Input: parametri dei muoni del GMT
 - coordinate angolari φ e η , momento trasverso p_T , qualità Q , carica q
- Target: parametri dei muoni RECO (global) associati ai muoni di L1 con $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} < 0.1$
- Architettura NN: $4 \times \{\text{Dense}(128) - \text{Batch Norm.} - \text{ReLU}\}$
- Prestazioni basate sulle differenze $\Delta\varphi$, $\Delta\eta$, Δp_T tra:
 - Valori predetti dalla NN o estrapolati dal GMT
 - Valori dei muoni RECO



Bibliografia

- [1] The Phase-2 Upgrade of the CMS Level-1 Trigger Technical Design Report. Geneva, 2020. URL: <https://cds.cern.ch/record/2714892>.
- [2] Dinyar Rabady et al. "A 40 MHz Level-1 trigger scouting system for the CMS Phase-2 upgrade". In: NIMA (2022), p. 167805. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167805>.
- [3] FastML Team. fastmachinelearning/hls4ml. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.1201549. URL: <https://github.com/fastmachinelearning/hls4ml>.
- [4] Micron Technology. Micron DLA Software Development Kit - SDK. URL: <https://github.com/micronDLA/SDK>.