



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Proprietà dei candidati Muoni del Trigger L1 di CMS

Relatore

Prof./Dr. Nome Cognome

Correlatore

Prof./Dr. Nome Cognome

Laureando

Francesco La Rovere

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Abstract	iii
1 Introduzione	1
2 Il progetto LHC:	3
2.1 Large Hadron Collider	3
2.2 Compact Muon Solenoid	3
2.2.1 Camere muoniche:	5
2.2.2 Sistema di trigger:	5
2.3 Data Scouting e Phase 2	7
2.4 Ricerca di Nuova Fisica al CMS	8
3 Verifica della tecnica di Data Scouting:	9
3.1 Validazione superprimitives	9
3.2 Validazione dell'emulatore Barrel Muon Track Finder	9
3.3 Validazione Global Muon Trigger	9

Abstract

Dalla primavera del 2024 a CMS e' in produzione un sistema per acquisire a 40 MHz (ovvero senza filtro di trigger) i dati relativi ad i candidati oggetti fisici ricostruiti dal sistema di trigger di primo livello; tale sistema e' indicato come L1 Trigger Data Scouting, L1DS. In particolare il L1DS raccoglie le informazioni dai vari passaggi della catena logica dedicata alla identificazione e misura dei muoni, sono in particolare a disposizioni i "segmenti" individuati da ciascuna stazione dello spettrometro e le tracce ottenute a partire da questi. Lo studio che si propone in questa tesi verte sull'analisi di questi dati, con l'obbiettivo di caratterizzarne le proprietà. Appurato che le performance siano compatibili con quanto atteso (sulla base del confronto con i dati sintetici prodotti con simulazioni Monte Carlo), si utilizzeranno questi dati per cercare tracce con uno sviluppo temporale piu' lungo dello standard (in particolare sviluppandosi su piu' "bunch crossing") al fine di mettere le basi per la ricerca di particelle esotiche "lente" ovvero prodotte con β non vicino ad 1.

Capitolo 1

Introduzione

Capitolo 2

Il progetto LHC:

2.1 Large Hadron Collider

Formato da un anello di circonferenza pari a 27 km, il Large Hadron Collider (LHC) situato al CERN a Ginevra, Svizzera, è il più grande acceleratore di particelle mai costruito, disegnato con lo scopo di studiare collisioni tra protoni con un'energia nel centro di massa $\sqrt{s} = 13.6$ TeV e una luminosità istantanea nominale $\mathcal{L} = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, corrispondente ad un rate di interazioni tra protoni di 40MHz, ovvero una collisione ogni 25ns. L'intervallo temporale tra le collisioni è una unità di misura standardizzata chiamata *bunch crossing* (BX) e corrisponde a 25ns.

Prima di essere immessi in LHC, pacchetti formati da 1.1×10^{11} protoni, subiscono varie fasi di accelerazione: inizialmente ad opera dell'acceleratore lineare Linac, poi dal Proton Synchrotron Booster (PSB), quindi dal Proton Synchrotron (PS) e infine dal Super Proton Synchrotron (SPS), dove vengono iniettati in LHC con una energia di 450 GeV. Circolando in due condotti differenti in direzioni opposte, i protoni vengono accelerati fino a 7 TeV collidendo frontalmente nei punti di interazione, (IP), con una energia nel centro di massa $\sqrt{s} \approx 14$ TeV. Come mostrato in figura 2.1, i principali esperimenti di LHC sono ATLAS (IP1), Alice (IP2), CMS (IP5) e LHCb (IP8), nei rispettivi punti di interazione.

L'LHC alterna periodi di attività e di raccolta dati (*Run*) con fasi di arresto in cui vengono effettuate opere di upgrade e di manutenzione generale per migliorare le prestazioni del collisore e dei rivelatori. Tra la Run 1, iniziata nel 2009 e finita nel 2013, e la Run 2, tra 2015 e 2018, il sistema di LHC ha subito un incremento dell'energia di collisione protone protone nel centro di massa da 8 a 14 TeV [9]. Anche il sistema di acquisizione dati di CMS ha subito importanti miglioramenti (*Phase 1*) rimpiazzando e potenziando hardware, elettronica e software per gestire il maggiore flusso di dati prodotto dalle collisioni ad alta energia. Tra i miglioramenti della Phase 1 vi è l'introduzione del *Pixel Detector*, che permette una migliore gestione della maggiore luminosità istantanea di LHC [1]. Ulteriori miglioramenti sono stati effettuati al sistema di trigger Level 1, L1T, di cui verrà discusso nel dettaglio nella Sezione 2.2.2

E' inoltre in programma a partire dal 2025, a seguito della Run 3, un ulteriore upgrade di LHC (*Phase 2*) che porterà un incremento della luminosità istantanea fino a $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, aumentando il numero di collisioni medio per BX da 50 a 140 [2]. In contemporanea, al fine di sfruttare appieno l'incremento della luminosità di LHC della Phase 2 (noto come *HL-LHC*, High Luminosity LHC), è previsto un ulteriore upgrade del sistema di detector di CMS, in particolare sul sistema di trigger Level 1.

2.2 Compact Muon Solenoid

Locato nel punto di interazione IP5 in Cessy, Francia, CMS è formato da un corpo cilindrico di 15 m di diametro e 21.6 m di lunghezza, per un peso di circa 14.000 tonnellate [3]. Sono vari gli ambiti

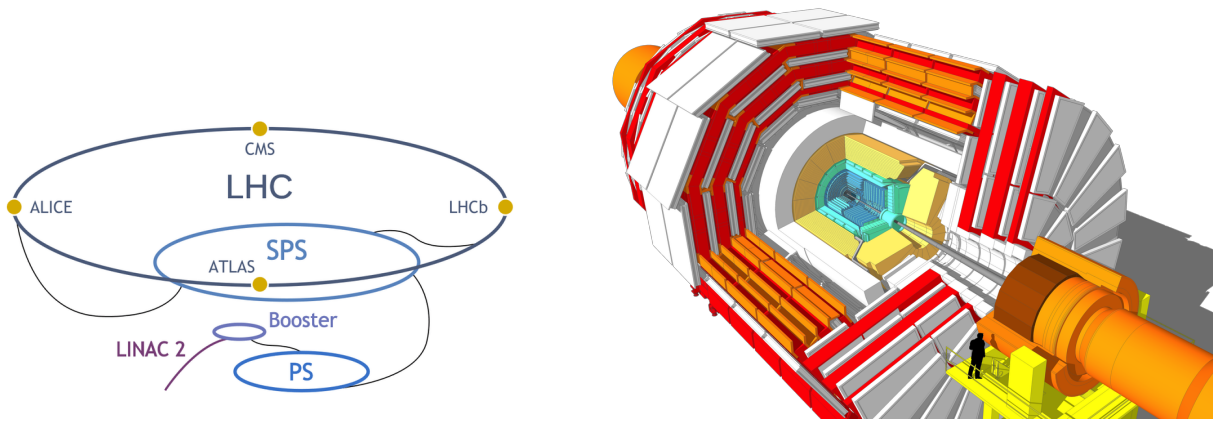


Figura 2.1: Struttura dell'LHC e dei suoi rivelatori nei punti di interazione (sinistra), CMS (destra)

di ricerca del rivelatore nel campo della fisica delle alte energie: dopo la scoperta del bosone di Higgs nel 2012 misurare le sue proprietà, attualmente compatibili con il Modello Standard, è diventato di fondamentale importanza. Ugualmente rilevante è anche la ricerca e lo studio di particelle esotiche e supersimmetriche con l'intento di esplorare Nuova Fisica oltre il Modello Standard. Al fine di identificare questi eventi rari è necessario un sistema di trigger molto performante [9] e a questo scopo assume un'importanza centrale il nuovo sistema di trigger che verrà implementato nella *Phase 2*, che permetterà quindi di osservare fenomeni esotici con una risoluzione migliore.

Di seguito una panoramica della struttura di CMS, dalle componenti più interne fino a quelle più esterne [4](Figura 2.1):

- **Silicon Strip Tracker (SST):** Esegue una ricostruzione delle tracce e misurazione del momento trasverso di particelle originate da processi di interazione.
- **Electromagnetic Calorimeter (ECAL):** Misure di energia di fotoni ed elettroni vengono eseguite grazie al tungstato di piombo (PbWO_4), materiale scintillante di cui è costituito l'ECAL.
- **Hadronic Calorimeter (HCAL):** Permette la misurazione delle energie degli adroni grazie al fenomeno della *cascata adronica*, indotta dai materiali di cui è costituito l'HCAL e rivelata da materiali scintillatori plastici.
- **Solenoidi superconduttori:** Formato dal superconduttore Niobio-Titanio (NbTi), produce un campo magnetico di intensità 3.8T nel nucleo. Un campo magnetico così elevato è fondamentale per permettere la curvatura di particelle cariche prodotte dalle collisioni, la cui rivelazione di tale curvatura permette di risalire a momento e carica delle stesse.
- **Camere muoniche:** Essendo i muoni particelle elementari cariche poco interagenti, il sistema di rilevazione muonico occupa una significativa porzione del volume di rivelatori di CMS. Suddiviso in tre regioni, *barrel*, *overlap* ed *endcap*, il sistema delle camere muoniche copre il piano della pseudorapidità nel range $|\eta| < 2.4$, permettendo la rivelazione delle tracce di muoni usando tre diverse tecnologie: *Drift Tube* (DT), *Resistive Plate Chamber* (RPC) e *Cathode Strip Chamber* (CSC) [5] (Figura 2.2).

L'origine del sistema di coordinate del Compact Muon Solenoid è centrato nel punto di collisione nominale dei fasci di protoni. L'asse y è verticale, l'asse x punta verso il centro di LHC e l'asse z , segue la regola della mano destra, verso le montagne del Giura. L'angolo azimutale ϕ è misurato nel piano x - y e l'angolo polare θ dall'asse z . Sono di comune utilizzo variabili Lorentz invarianti nel contesto di condizioni ultrarelativistiche: per questo motivo la pseudorapidità, definita come $\eta = -\ln(\theta/2)$, è spesso preferita alla coordinata angolare θ . Per tanto il sistema di coordinate adottato a CMS è il sistema R - η - ϕ [8].

2.2.1 Camere muoniche:

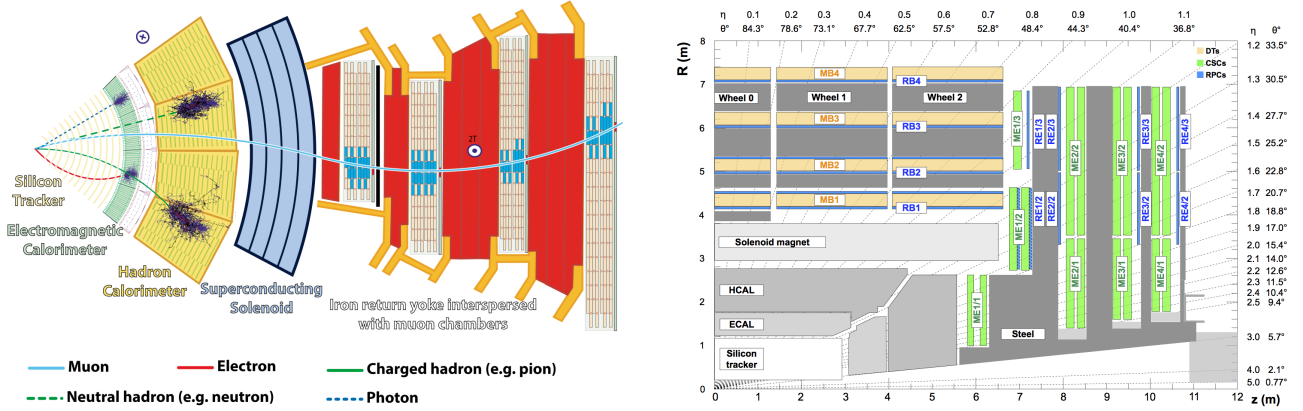


Figura 2.2: Settore di CMS (sinistra), vista di CMS nella variabile $\eta > 0$ (destra)

Spesso l'alto rate di eventi di background a seguito di processi di interazione ad alta luminosità in LHC cela fenomeni interessanti: in questo contesto la rivelazione di muoni a CMS è uno strumento fondamentale per studiare tali fenomeni poiché i muoni sono particelle penetranti e per tanto meno soggette a interazioni con i materiali del rivelatore [3]. Il sistema muonico di CMS ha quindi tre funzioni: identificazione di muoni, misurazione del momento e trigger di muoni. Di seguito vengono descritti i sistemi di rilevazione dei muoni.

Come mostrato in figura 2.1 e 2.2 la regione di barrel è formata da cinque ruote (*wheel*), ognuna composta da dodici settori (*sector*) e a loro volta da quattro stazioni concentriche (*station*) interspaziate da una struttura di ferro nella quale è presente un campo magnetico di intensità circa 2T. Nella regione di barrel, dove gli eventi di background sono minimi, per la rivelazione di muoni vengono impiegati drift tube (DT), celle contenenti fili di acciaio inossidabile anodico disposte in modo adiacente una all'altra separate da barre di alluminio che fungono da catodo: anodo e catodo operano ad un voltaggio rispettivamente di +3600V e -1200V. Quando un muone attraversa un DT la distanza tra la sua traiettoria e il filo di acciaio viene misurata a partire dal tempo di drift degli elettroni ionizzati che vengono attratti dal campo elettrico generato dalla differenza di potenziale tra catodo e anodo [4]. In totale CMS contiene 250 DTs, disposti nella regione di barrel come in figura 2.2 ricoprendo la pseudorapidità nel range $|\eta| < 1.2$.

Nelle regioni di endcap di CMS, dove il rate di muoni e livello di background è elevato ed il campo magnetico non uniforme, vengono impiegate CSCs che, grazie al loro design, permettono di ricavare precise informazioni spaziali e temporali sulle tracce di muoni nel range di pseudorapidità $0.9 < \eta < 2.4$. Le RPCs sono invece impiegate sia nella regione di barrel che nella regione di endcap, e assicurano una migliore misurazione del momento dei muoni grazie al loro rapido tempo di risposta [4], [3].

2.2.2 Sistema di trigger:

Non è possibile analizzare in tempo reale la mole di informazioni generata dal tasso di collisioni pari a 40MHz, per questo CMS è dotato di un sistema di trigger implementato come primo passo nella selezione di un evento fisico al fine di ridurre il volume di dati, mantenendo però gli eventi interessanti. Il sistema di trigger si suddivide in due fasi: il *Level 1 Trigger* (L1T) e l' *High Level Trigger* (HLT) (figura 2.3).

Il Level 1 Trigger è implementato via hardware nel sistema di CMS sfruttando dispositivi programmabili come Field Programmable Gate Arrays (FPGA) e Lookup Table (LUTs) che, unendo informazioni del sistema muonico e del calorimetro, riducono il tasso di accettazione di eventi a 100KHz. Il processo di analisi preliminare e selezione deve avvenire rapidamente, in un tempo limite di 25 ns, per permettere a tutti gli eventi di essere analizzati dal trigger e ridurre quindi il numero di possibili eventi mancati; per questo il sistema di trigger L1 è articolato a sua volta in tre processi di analisi preliminare: *locale*, *regionale* e *globale* [4]. Il sistema di trigger quindi raccoglie le informazioni *locali*

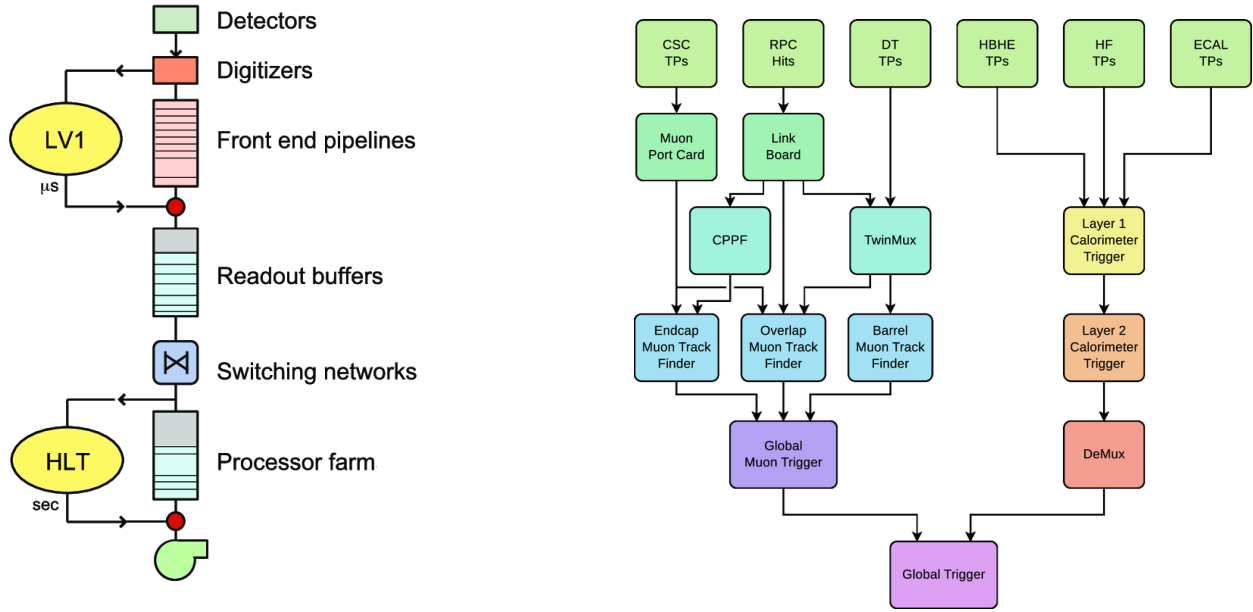


Figura 2.3

dei calorimetri elettromagnetici e adronici (ECAL, HCAL) e informazioni sul sistema muonico (DTs, RPCs, CSCs). Le informazioni provenienti da processi locali, chiamate Trigger Primitive Generators (TPG) vengono combinate dai *trigger regionali* che effettuano una classifica degli eventi sulla base di parametri come energia, momento trasverso e qualità. Quindi vengono passate al *trigger globale* (GT) che determinerà se mantenere l'evento per una analisi ulteriore o se passarlo all' HLT.

Di fondamentale importanza in questo studio è il **sistema di Trigger Muonico** che permette la rilevazione e il tracciamento di muoni nelle tre regioni delle camere muoniche. Questo può essere suddiviso nelle tre regioni in η descritte in sezione 2.2 al fine di migliorare l'efficienza di ricostruzione dei muoni. Di seguito è riportata una più dettagliata descrizione di questo sistema [9].

Nella regione $|\eta| < 1.2$, le Trigger Primitives (TP) provenienti dai detector DTs e RPCs della stessa stazione vengono processate dal TwinMux, un sistema introdotto con la *Phase 1* che permette, combinando le informazioni dei due detector, di ottenere una migliore risoluzione spaziale e temporale; i segnali combinati in uscita dal TwinMux sono chiamati *superprimitives*, o stubs, ed ad ognuna viene assegnata una *qualità*, che dipende dalle coordinate η e ϕ delle TP in ingresso al TwinMux, e un *angolo di curvatura interno* ϕ_b . Le stubs vengono inviate quindi ai sistemi di tracciamento nella regione di barrel (*Barrel Muon Track Finder*, BMTF) e nella regione di overlap (*Overlap Muon Track Finder*, OMTF), immagine 2.3. Queste ricostruiranno la traccia del muone usando le informazioni sulla qualità e sull'angolo di curvatura, ricavando anche informazioni riguardanti il momento trasverso p_T . Similmente nella regione di endcap ($1.2 < \eta < 2.4$) sono presenti delle schede CPPF (Concentrator Pre-Processor and Fan-out) che uniscono i segnali derivanti dalle Trigger Primitives delle RPCs della regione di endcap, ottenendo le coordinate ϕ ed η che verranno mandate al sistema di tracciamento dell'endcap, *Endcap Muon Track Finder* (EMTF).

A questo punto fino a 108 tracce generate dai tre sistemi di tracking, corrispondenti a *candidati muoni*, vengono inviate al Global Muon Trigger (GMT) che le classifica in base alla qualità, momento trasverso p_T e provenienza (candidati muoni provenienti dalla regione di barrel possiedono infatti una qualità maggiore rispetto alla regione di endcap e overlap) e rimuovendo i duplicati. A questo punto fino ad 8 muoni vengono inviati al Global Trigger (GT).

Infine il Global Trigger applica fino a 512 algoritmi di selezione ai muoni ricevuti dal GMT, decidendo se inviare un segnale di accettazione (Level 1 Accept) passando quindi l'evento all'HLT, riducendo l'output di rate di muoni a 100KHz [7].

L'HLT gioca un ruolo fondamentale nel filtrare ulteriormente gli eventi in uscita dal GT, mantenendo

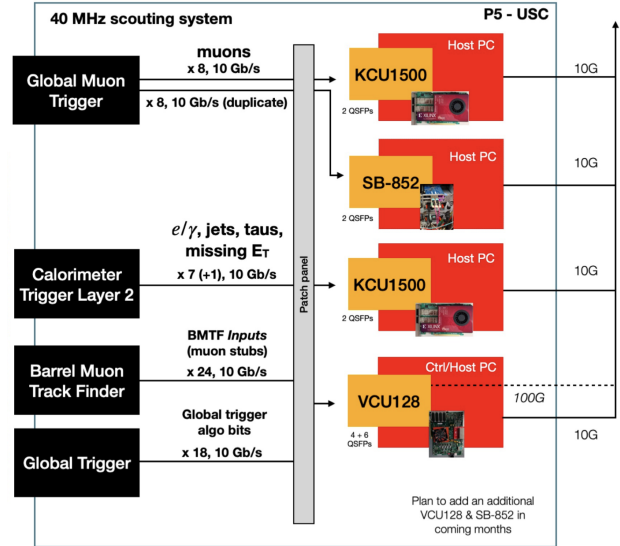
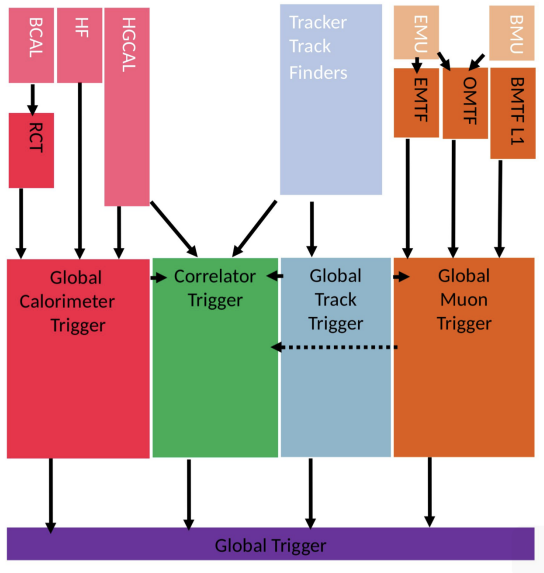


Figura 2.4

solamente quelli che hanno una importanza significativa e riducendo l'output a un rate di eventi pari a 1KHz . Al contrario del trigger L1, l'High Level Trigger è implementato via software e viene eseguito in una infrastruttura computazionale che conta 16000 CPU.

Complessi algoritmi filtrano e selezionano gli eventi per soddisfare i requisiti di riduzione del volume di informazioni in entrata dell'HLT. I dati finali vengono quindi trasferiti nell'infrastruttura di storage del CERN [4].

2.3 Data Scouting e Phase 2

A seguito dell'interazione protone protone, il sistema di Trigger di CMS seleziona solamente una frazione degli eventi per una analisi più accurata, escludendone una porzione prevalente. Indubbiamente ciò introduce un *pregiudizio* (bias) nella porzione di eventi minoritari che non vengono eliminati in quanto il sistema di Trigger filtra e seleziona dati che seguono leggi della fisica attualmente conosciute, possibilmente celando fenomeni sconosciuti e non teorizzati dal Modello Standard.

In questo contesto il **Data Scouting** (DS) è un approccio che si basa sulla analisi degli eventi direttamente nella catena di Trigger, estraendo e processando i dati online, aggirando il bias introdotto dal Trigger: evidentemente quindi più si esegue Scouting in superficie nella catena di trigger minore è il bias introdotto. L'approccio del Data Scouting si concentra sull'acquisizione di dati con un livello di risoluzione ridotto, consentendo però di raccogliere una statistica maggiore.

La tecnica di Data Scouting è stata utilizzata per la prima volta a livello dell'High Level Trigger dove, per costruzione, solo 1 evento su 400 viene accettato. Qui è infatti possibile introdurre una nuova pipeline parallela al percorso standard dell'HLT che effettui Data Scouting su oggetti fisici che verrebbero possibilmente rigettati dal Trigger. La minore risoluzione di questi oggetti permetterebbe anche una analisi online e un immagazzinamento molto più efficace nel sistema di storage.

Come già accennato in Sezione 2.1, a seguito della Run 3, nel 2025, verranno effettuati importanti aggiornamenti alle componenti di LHC, permettendo di raggiungere un picco di luminosità istantanea pari a $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Di conseguenza CMS, ed in particolare il sistema di Trigger, deve essere a sua volta aggiornato per poter collezionare efficientemente il nuovo volume di informazioni di HL-LHC. Verranno implementati nuovi sensori che permetteranno di estendere la regione di raccolta dati fino a $|\eta| < 3.8$ e verranno modificati i sensori esistenti per avere una risoluzione migliore. Nel sistema di Trigger, verrà aumentato il rate di output massimo di eventi del L1T fino a 750KHz e quello di HLT fino a 7.5KHz. Ciò sarà possibile grazie all'utilizzo di nuovo hardware per l'analisi e per la ricostruzione delle tracce dei muoni usando GPU [2].

Upgrade così importanti permetteranno di implementare la tecnica di Data Scouting nel Trigger Level 1 piuttosto che nell'HLT. Ciò offrirà una ancora più alta statistica di dati (relativamente) unbiased. Il sistema di Data Scouting nel L1T funzionerà in parallelamente e indipendente dal sistema di Trigger descritto in Sezione 2.2.2: verranno implementate schede FPGA dedicate che riceveranno i dati direttamente dagli output ottici delle schede di Trigger [4].

Al fine di sperimentare l'utilizzo della tecnica di Data Scouting usando dati reali, durante la Run 3 un sistema apposito è stato implementato per raccogliere informazioni dai principali step di trigger del L1T. Più nel dettaglio il sistema raccoglie informazioni dal Barrel Muon Track Finder (BMTF), dal Calorimeter Trigger, dal Global Muon Trigger (GMT) e Global Trigger (GT) sfruttando una serie di schede FPGA diverse. In particolare, come mostrato in figura 2.4 sono impiegate due schede *Xilinx KCU1500*, una scheda *Micron SB852* e una *Xilinx VCU128*.

(Parte del lavoro sul data scouting)

2.4 Ricerca di Nuova Fisica al CMS

Proposto inizialmente nel 1961 da Sheldon Glashow, e raffinato da Steven Weinberg e Abdus Salam nel 1968, il Modello Standard (SM) descrive le tre interazioni (Forte, Debole ed Elettromagnetica) che agiscono tra le particelle fondamentali che costituiscono la materia. Il beneficio di avere un frame completo come il Modello Standard risiede nella capacità di prevedere il comportamento di particelle subatomiche conoscendo la struttura teorica alla base. Una delle maggiori conquiste dello SM è la scoperta del bosone di Higgs, teorizzato per la prima volta da Higgs nel 1964 e rilevato a CMS nel 2012.

Nonostante negli ultimi 50 anni molte siano le conferme sperimentali del Modello Standard, ci sono fenomeni che non possono essere spiegati esaurientemente dal modello e questo suggerisce la presenza di fisica oltre il Modello Standard (Beyond Standard Model, BSM).

Diversi modelli di fisica oltre il Modello Standard suggeriscono la presenza di particelle cariche *longeve* con masse di svariate centinaia di GeV/c^2 , chiamate Heavy Stable Charged Particles (HSCPs). I modelli prevedono la presenza di due principali categorie di HSCPs: di tipo *leptonico* o di tipo *adronico*. Generalmente questi ultimi sono chiamati adroni-R (R-hadrons) [8].

Come gli adroni, gli adroni-R possono subire fenomeni di scattering da parte dei nuclei del materiale di cui sono formati i detector (scattering adronici). I modelli teorici suggeriscono però che la perdita di energia degli adroni-R a seguito scattering adronico sia molto ridotta e per tanto difficilmente rilevabile in calorimetri adronici; questo rende le HSCPs particelle estremamente penetranti, ciò indica che tali particelle si comportino come muoni e per tanto possano essere rilevate nelle camere muoniche.

Essendo inoltre particelle cariche con un elevato tempo di vita medio (maggiore di 1ns) sono in grado di attraversare il detector prima di decadere, producendo ionizzazione nei detector.

Le principali firme sperimentali di HSCPs sono quindi una anormale perdita di energia per unità di lunghezza $-\langle \frac{dE}{dx} \rangle$ e un maggiore tempo di volo (ToF) [6], riconducibili ad una velocità molto minore rispetto alla velocità della luce ($\beta < 1$).

Prima della Phase 1 al CMS era implementato un sistema di trigger specifico per la ricerca di particelle massive con un lungo tempo di volo e una velocità molto minore della velocità della luce. Ciò era possibile in quanto, con una minore luminosità, vi era mediamente una collisione ogni 50ns. Con la Phase 1 e quindi con un aumento della luminosità istantanea, ovvero un minore tempo di Bunch Crossing (uno ogni 25ns) il sistema di trigger per particelle esotiche è stato rimosso.

(Parte del lavoro sulla ricerca di particelle esotiche)

Capitolo 3

Verifica della tecnica di Data Scouting:

3.1 Validazione superprimitives

3.2 Validazione dell'emulatore Barrel Muon Track Finder

3.3 Validazione Global Muon Trigger

Bibliografia

- [1] The CMS Phase-1 Pixel Detector Upgrade. *JINST*, 16(02):P02027, 2021.
- [2] CMS Collaboration. The phase-2 upgrade of the cms data acquisition and high level trigger. Technical report, 2021.
- [3] Cms Collaboration et al. The cms experiment at the cern lhc. *Journal of instrumentation*, 3(August 2008):1–334, 2008.
- [4] Nicolò Lai. Anomaly detection on trigger-less muon data streams. 2023.
- [5] J. G. Layter. *The CMS muon project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. CERN, Geneva, 1997.
- [6] Giovanni Mocellin. Heavy stable charged particles at lhc with the cms detector: search and results for a trigger implementation. 2017.
- [7] Thomas James Nicolò Lai, Rocco Ardino. Barrel muon track reconstruction with deep learning for level-1 trigger data scouting in the cms experiment. 2023.
- [8] Loïc Quertenmont. *Search for Heavy Stable Charged Particles with the CMS detector at the LHC*. PhD thesis, Louvain U., 2010.
- [9] Albert M Sirunyan, Armen Tumasyan, Wolfgang Adam, Federico Ambrogi, Bernhard Arnold, Herbert Bergauer, Thomas Bergauer, Marko Dragicevic, J Ero, A Escalante Del Valle, et al. Performance of the cms level-1 trigger in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ tev. *Journal of Instrumentation*, 15(10), 2020.