



# 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

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2 Il progetto LHC:</b>	<b>3</b>
2.1 Large Hadron Collider . . . . .	3
2.2 Compact Muon Solenoid . . . . .	3
2.2.1 Camere muoniche: . . . . .	4
2.2.2 Sistema di trigger: . . . . .	5



# 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  $\beta$  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 chiamato *bunch crossing*, BX, ed è una unità di misura standardizzata: 1 BX = 25ns.

Prima di essere immessi in LHC, pacchetti formati da  $1.1 \times 10^{11}$  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 in punti di interazione con una energia nel centro di massa  $\sqrt{s} \approx 14$  TeV. Come mostrato in Figura 2.1, i principali punti di interazione dell'LHC sono: ATLAS (IP1), Alice (IP2), CMS (IP5) e LHCb (IP8).

L'LHC alterna periodi di fasi di attività e di raccolta dati (Run) con fasi di arresto in cui vengono effettuate opere di upgrade e di manutenzione. Tra la Run 1, iniziata nel 2009 e finita nel 2013, e la Run 2, tra 2015 e 2018, il sistema di trigger Level-1 (L1T) del CMS ha subito importanti miglioramenti (*Phase 1*) rimpiazzando e potenziando hardware, elettronica e software del sistema di acquisizione dati permettendo, durante la Run 2, un incremento dell'energia di collisione protone-protone nel centro di massa da 8 a 14 TeV [5]. E' in programma nel 2025 un ulteriore upgrade dell'LHC (*Phase 2*) che porterà un incremento della luminosità istantanea fino a  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , aumentando quindi il numero di collisioni medio per BX da 50 a 140 [1]. In contemporanea, al fine di sfruttare appieno l'incremento della luminosità dell'LHC della Phase 2 (noto come *HL-LHC*, High Luminosity LHC), è previsto un upgrade anche del sistema di detector del CMS, ed in particolare sul sistema di trigger Level 1, L1T, di cui parleremo nelle prossime sezioni.

### 2.2 Compact Muon Solenoid

Locato nel punto di interazione IP5 in Cessy, Francia, il 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 [2]. Sono vari gli ambiti 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 al fine di esplorare Nuova Fisica oltre il modello standard. (introduzione alle HSCP??) Al fine di identificare questi eventi è necessario un sistema di trigger molto performante [5] e a questo scopo in gioco il nuovo sistema di trigger che verrà implementato nella *Phase 2*, che permetterà

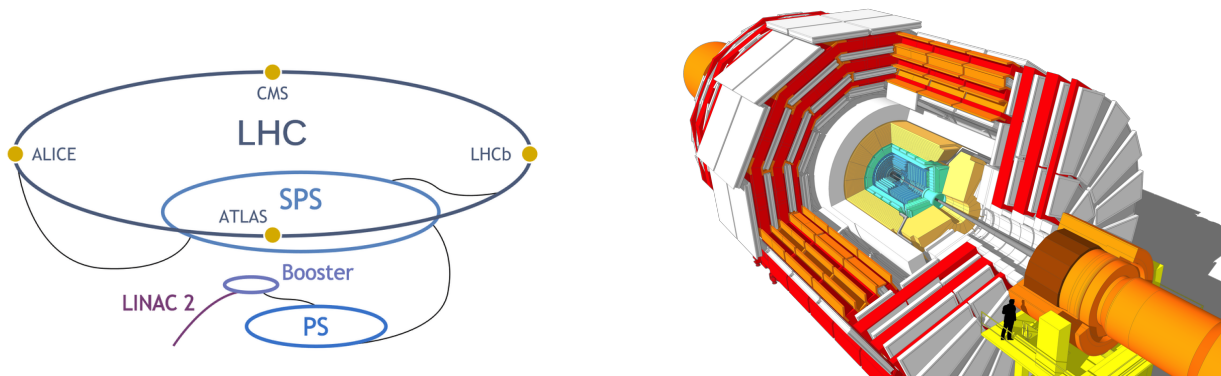


Figura 2.1: Struttura dell'LHC e dei suoi rivelatori nei punti di interazione (sinistra), CMS (destra)

quindi di osservare fenomeni esotici con una risoluzione migliore (assieme ad un nuovo sistema di analisi dati, *Data Scouting*, di cui discuteremo maggiormente dopo aver introdotto il sistema di trigger del CMS (??))

Di seguito una panoramica della struttura del CMS, dalle componenti più interne fino a quelle più esterne [3] (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 ( $\text{PbWO}_4$ ), 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.
- **Solenoido superconduttore:** 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:** 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 tubes* (DT), *resistive plate chamber* (RPC) e *cathode strip chamber* (CSC) [4] (Figura 2.2).

### 2.2.1 Camere muoniche:

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 è uno strumento utile per studiare tali fenomeni. Una misurazione precisa di muoni è quindi di centrale importanza a CMS [2]. 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.

Il forte campo magnetico nella regione delle camere muoniche (figura 2.2), permette una buona risoluzione del momento e capacità di trigger. (andrebbe aggiunto qualcosa)

In particolare la regione di barrel, come mostrato in figura 2.1 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 regione di barrel, dove gli eventi di background sono minimi, per la rivelazione di muoni vengono impiegati drift tubes (DT), ricoprendo la pseudorapidità

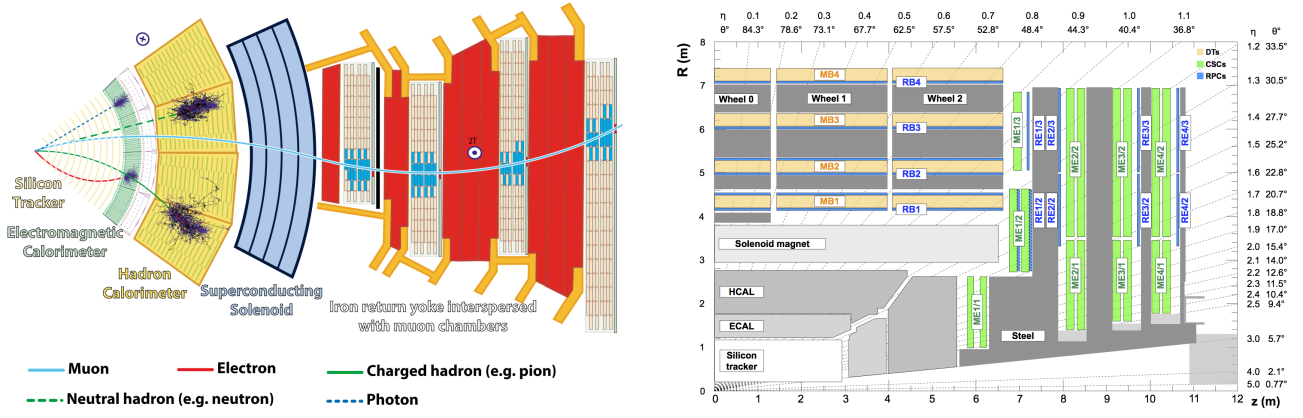


Figura 2.2: Settore di CMS (sinistra), vista di CMS nella variabile  $\eta$  di CMS (destra)

nel range  $|\eta| < 1.2$ . I DTs sono 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 [3]. In totale il CMS contiene 250 DTs, disposti nella regione di barrel come in figura 2.2. 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 [3], [2].

### 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 processo 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, usando 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 mantenendo gli eventi che, in base a logiche interne, hanno (qualità elevata NON MI PIACE). Il processo di 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 si articola in tre processi di analisi preliminare degli eventi: *locale*, *regionale* e *globale* [3]. Il sistema di trigger quindi raccoglie le informazioni *locali* riguardanti i calorimetri elettromagnetici e adronici (ECAL, HCAL) e le informazioni sul sistema muonico (DTs, RPCs, CSCs). Le informazioni provenienti da processi locali sono chiamate Trigger Primitive Generators (TPG). Queste vengono combinate dai *trigger regionali* che effettuano una classifica degli eventi sulla base di parametri come energia, momento e qualità. Quindi il *trigger globale* (GT) determinerà se mantenere l'evento o se passarlo all' HLT.

Di fondamentale importanza in questo lavoro di tesi 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  $\eta$  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 [5].

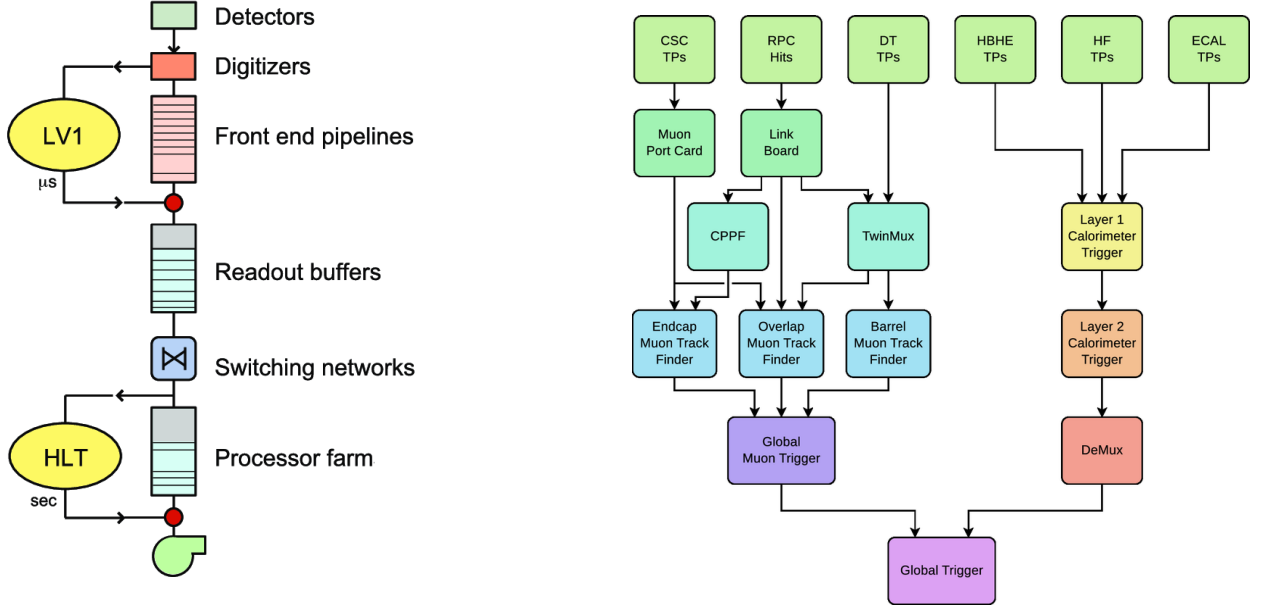


Figura 2.3

Nella regione  $\eta < 1.2$ , le Trigger Primitives (TP) provenienti da DT e RPCs della stessa stazione vengono combinate dal TwinMux, un sistema introdotto con la *Phase 1* che permette di ottenere una migliore risoluzione spaziale e temporale; i segnali combinati in uscita dal TwinMux sono chiamate *superprimitives*, o stubs, ed ad ognuna viene assegnata una *qualità*, che dipende dalle coordinate  $\eta$  e  $\phi$  dei TP in ingresso al TwinMux, e un *angolo di curvatura interno*  $\phi_b$ . 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) che ricostruiranno la traccia del muone usando le informazioni sulla qualità e sull'angolo di curvatura, ricavando informazioni anche 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  $\phi$  ed  $\eta$  che verranno mandate al sistema di tracciamento dell'endcap, *Endcap Muon Track Finder* (EMTF).

Infine il GMT, *Global Muon Trigger* riceve fino a 108 *candidati muoni* provenienti da BMTF, OMTF, EMTF, classificandoli 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. Infine fino ad 8 muoni vengono inviati al Global Trigger, GT.

Parameter	Bits	Range	Description
$\phi$	12	$[-2048, 2047]$	Relative position of a segment inside a sector
$\phi_B$	10	$[-512, 511]$	Bending angle
<i>quality</i>	3	$[0, 7]$	Number of superlayers used to construct the stub
$\eta$ hits	7	"pattern"	Each bit corresponds to one chamber area
			0 : no hit (less than 3 SL hits)
			1 : hit (3 or 4 SL hits)
$\eta$ quality	7	"pattern"	Each bit corresponds to one chamber area
			0 : 3 SL hits
			1 : 4 SL hits

Tabella 2.1: Parameter description



# Bibliografia

- [1] CMS Collaboration. The phase-2 upgrade of the cms data acquisition and high level trigger. Technical report, 2021.
- [2] Cms Collaboration et al. The cms experiment at the cern lh. *Journal of instrumentation*, 3(August 2008):1–334, 2008.
- [3] Nicolò Lai. Anomaly detection on trigger-less muon data streams. 2023.
- [4] J. G. Layter. *The CMS muon project: Technical Design Report*. Technical design report. CMS. CERN, Geneva, 1997.
- [5] 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.