

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Corso di Laurea Triennale in Fisica

Ricostruzione dei muoni cosmici
nelle camere a deriva
dell'esperimento CMS a LHC

Relatore: Chiar.mo Prof. Francesco Luigi Navarra
Correlatrice: Dott.ssa Francesca Romana Cavallo

Candidato: Salvatore di Maggio

Anno Accademico 2006 - 2007
III Sessione

A Ettore Majorana, come l'albatro di Baudelaire.

Creative Commons License Deed

Copyright 2008 Salvatore di Maggio <http://www.titanicus.it>

Attribution - Noncommercial - Share Alike 3.0 Unported

You are free:

to Share: to copy, distribute and transmit the work

to Remix: to adapt the work

Under the following conditions:

Attribution: You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor (but not in any way that suggests that they endorse you or your use of the work).

Noncommercial: You may not use this work for commercial purposes. Science must be free like freedom, and knowledge must be freely available. Neither restrictions nor control from society or politics must be applied to human thought.

Share Alike: If you alter, transform, or build upon this work, you may distribute the resulting work only under the same or similar license to this one.

- For any reuse or distribution, you must make clear to others the license terms of this work. The best way to do this is with a citation to this work.
- Any of the above conditions can be waived if you get permission from the copyright holder.
- Nothing in this license impairs or restricts the author's moral rights.

For anything not specified, see <http://creativecommons.org>

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 2 | Il Compact Muon Solenoid | 3 |
| 2.1 | Tutto ebbe inizio quando... | 3 |
| 2.2 | Obiettivi e caratteristiche fondamentali di CMS | 4 |
| 2.3 | Il rivelatore in breve | 5 |
| 2.3.1 | Il barrel | 5 |
| 2.3.2 | Gli endcap | 6 |
| 2.4 | La nomenclatura di CMS | 6 |
| 2.5 | La struttura radiale di CMS | 8 |
| 2.5.1 | La zona centrale di collisione | 9 |
| 2.5.2 | Il tracker al silicio | 9 |
| 2.5.3 | Il calorimetro elettromagnetico | 10 |
| 2.5.4 | Il calorimetro adronico | 10 |
| 2.5.5 | Il solenoide superconduttore | 10 |
| 2.6 | I rivelatori di muoni | 11 |
| 2.6.1 | Le camere a deriva del barrel | 12 |
| 2.6.2 | Le Camere a Strisce Catodiche (CSC) | 14 |
| 2.6.3 | Le Resistive Plate Chambers (RPC) e gli RPC muon sorter | 16 |
| 3 | Il software CMSSW | 19 |
| 3.1 | La struttura di CMSSW | 19 |
| 3.1.1 | EDM | 19 |
| 3.1.2 | L'architettura modulare | 20 |
| 3.2 | Degli eventi | 22 |
| 3.2.1 | L'identificazione dei dati all'interno di un Evento | 23 |
| 3.3 | L'elaborazione e la presentazione dei dati | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Il trigger | 25 |
| 4.1 | La selezione dei dati e l'acquisizione | 25 |
| 4.2 | I livelli di trigger | 25 |
| 4.2.1 | Il trigger hardware o di primo livello (L1) | 25 |
| 4.2.2 | Il trigger software o di secondo livello (HLT) | 26 |
| 4.3 | I trigger muonici | 26 |
| 4.4 | DT Trigger | 27 |
| 4.4.1 | I Bunch and Track Identifier (BTI) | 27 |
| 4.4.2 | I Track Correlator (TRACO) | 31 |
| 4.4.3 | I Track Finder del barrel | 33 |
| 5 | La ricostruzione delle tracce di muoni | 35 |
| 5.1 | Generalità | 35 |
| 5.2 | Procedure di calibrazione | 35 |
| 5.3 | L'allineamento | 38 |
| 5.4 | Il processo di ricostruzione delle tracce | 38 |
| 5.4.1 | Ricostruzione Locale | 39 |
| 5.4.2 | Il ruolo della risoluzione nella ricostruzione locale dei muoni. | 40 |
| 5.4.3 | Ricostruzione Standalone (SA) | 41 |
| 5.4.4 | Ricostruzione Globale | 42 |
| 6 | L'analisi con muoni cosmici | 45 |
| 6.1 | Dei muoni cosmici | 45 |
| 6.1.1 | I raggi cosmici e il leptone μ | 45 |
| 6.1.2 | Qualche considerazione energetica | 46 |
| 6.2 | Test delle camere DT con raggi cosmici | 47 |
| 6.3 | Ricostruzione di tracce cosmiche | 48 |
| 6.4 | Condizioni di acquisizione | 49 |
| 6.5 | Il propagatore | 49 |
| 6.6 | Ricostruzione Standalone con CmsicMuonProducer 1.6.3 . . . | 50 |
| 6.6.1 | Definizione di Innermost Point in 1.6.3 | 50 |
| 6.6.2 | Ricostruzione di tracce che attraversano l'intero rivelatore | 54 |
| 6.7 | Ricostruzione Standalone con CmsicMuonProducer 1.7.0 . . . | 56 |
| 6.7.1 | Definizione di Innermost Point in 1.7.0 | 56 |
| 6.7.2 | Ricostruzione di tracce che attraversano l'intero rivelatore | 58 |
| 6.8 | Distribuzioni angolari | 59 |
| 6.9 | Efficienza di ricostruzione delle tracce | 60 |

| | |
|-------------------------|-----------|
| 7 Conclusioni | 63 |
| Bibliografia | 64 |
| 8 Ringraziamenti | 69 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Vista d'insieme del rivelatore CMS con l'indicazione delle parti salienti. Nel mezzo, sotto il cosiddetto "barrel" è disegnata una sagoma umana per dare l'idea delle dimensioni del sistema le cui grandezze principali sono riportate in alto a destra. | 6 |
| 2.2 | Una sezione trasversale di CMS con l'indicazione della convenzione di numerazione delle camere e dei settori. In basso a destra sono mostrate anche le coordinate del sistema di riferimento. Le sagome alla base del disegno danno l'idea delle dimensioni di CMS. | 7 |
| 2.3 | Struttura di una camera a deriva. In alto: si evidenziano i due tipi di superlayer e la struttura a nido d'ape. In basso: rappresentazione di un superlayer composto da 4 layer; due layer adiacenti sono sfasati di mezzo tubo per risolvere l'ambiguità destra/sinistra. | 8 |
| 2.4 | Vista di un settore di CMS negli strati di cui è composto in senso radiale. I protoni di LHC viaggiano perpendicolarmente al disegno. | 9 |
| 2.5 | I tre rivelatori (DT chamber, RPC e CSC) su cui sono basati i trigger di CMS per i muoni. | 11 |
| 2.6 | Fotografia di una camera a deriva: si riescono a distinguere le diverse orientazioni dei DT. | 13 |
| 2.7 | Sezione di un DT con l'indicazione delle tensioni nominali a cui vengono portate le varie parti. | 14 |
| 2.8 | Le camere a strisce catodiche. A sinistra: in evidenza una CSC di un endcap; a destra: un muone attraversa delle CSC. | 15 |
| 2.9 | La ricostruzione delle tracce in una camera a strisce catodiche. | 15 |
| 2.10 | Schema d'insieme dei sistemi di rivelatori di CMS per i muoni. | 17 |
| 4.1 | Schema logico della ricostruzione dei muoni attraverso i diversi tipi di trigger, con il Trigger Muonico Globale a valle di tutti gli altri. La ripetuta azione di filtraggio nei vari stadi dei muoni selezionati in base a p_t , η , φ e la qualità della traccia. | 27 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.2 | Composizione e funzionamento di un super-layer. Sopra: al passaggio di un muone vengono calcolati i tempi di drift per ogni filo anodico, e il meantimer permette di riconoscere una traccia. Sotto: i dati di ogni cella vengono memorizzati e propagati nei registri a scorrimento a partire da un'estremità indicata dalla freccia. | 28 |
| 4.3 | Ricostruzione della relazione del tempo medio generalizzato. | 28 |
| 4.4 | Configurazione geometrica utilizzata da un BTI. | 30 |
| 4.5 | Schema a blocchi dei diversi stadi per la ricostruzione delle tracce a partire dall'elettronica di front-end fino al Muon Regional Trigger. | 31 |
| 4.6 | Raggio di curvatura di una traccia dall'angolo Ω e dalla distanza d | 32 |
| 4.7 | Logica del Drift Tube local trigger. Il TST è il server che smista i dati riguardanti la vista ϑ . TSS e TSM sono i selezionatori di tracce. | 33 |
| 4.8 | Il Track Finder del barrel. | 33 |
| 5.1 | Un esempio di time box: istogramma del tempo di drift di un DT di CMS con una velocità di drift di $55 \mu\text{m}/\text{ns}$ | 37 |
| 5.2 | Distribuzione del tempo medio generalizzato. | 37 |
| 5.3 | La ricostruzione locale dei muoni muove dai RecHit1D per formare un segmento all'interno della camera. | 39 |
| 5.4 | Effetti della risoluzione sulla selezione degli hit: a sinistra la risoluzione δ_1 non è sufficiente per ritenere un hit parte della traccia; a destra, grazie alla risoluzione δ_2 , lo stesso hit può essere ritenuto valido nella ricostruzione della traccia. | 41 |
| 5.5 | La ricostruzione SA dei muoni parte dai segmenti della ricostruzione locale e li unisce per formare una traccia. | 41 |
| 5.6 | La ricostruzione globale dei muoni parte dalle tracce SA e usa le informazioni del tracker. | 43 |
| 6.1 | Formazione della radiazione cosmica secondaria. Le linee tratteggiate indicano che altre reazioni possono avvenire. | 46 |
| 6.2 | Gli hit ricostruiti dalle misure in assenza di campo magnetico giacciono su una retta (punti rossi), mentre i punti nei layer calcolati col propagatore con campo magnetico non nullo (punti neri) giacciono su una curva. | 51 |
| 6.3 | Le traiettorie calcolate col propagatore con campo magnetico fissato a 0 seguono gli hit ricostruiti dalle misure. | 51 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.4 | Alcune tracce osservate nella ruota YB0. Notare le diverse curvature delle tracce propagate. | 52 |
| 6.5 | Distribuzione dei punti innermost (in alto) e outermost (in basso) misurati sul piano (x, y) ottenuti con la versione 1.6.3. | 53 |
| 6.6 | Distribuzioni dei residui tra i punti misurati e i punti estrapolati: l'incremento non avviene nella direzione di propagazione, come invece ci si aspetterebbe a causa dello scattering. Dall'alto a sinistra al basso a destra: S4/MB4, S4/MB1, S10/MB1, S10/MB1. | 54 |
| 6.7 | Distribuzioni del numero di settori, stazioni e layer che contribuiscono alla ricostruzione delle tracce. | 55 |
| 6.8 | Erronea ricostruzione di due tracce indipendenti. | 55 |
| 6.9 | A sinistra: distribuzione del numero di tracce ricostruite per ogni evento; a destra: distribuzione degli angoli compresi fra due tracce distinte negli eventi dove sono presenti. | 56 |
| 6.10 | La definizione dei punti innermost e outermost nella versione 1.7.0 del <code>CmsicMuonProducer</code> . In alto: punti innermost; in basso: punti outermost. | 57 |
| 6.11 | Il corretto incremento dei residui nella direzione di propagazione dei muoni cosmici (cfr. figura 6.6). Dall'alto a sinistra al basso a destra: S4/MB4, S4/MB1, S10/MB1, S10/MB1. | 58 |
| 6.12 | Ricostruzione corretta della traccia che nella figura 6.8 era ricostruita come due tracce distinte. | 59 |
| 6.13 | Distribuzioni del numero di settori, stazioni e layer che contribuiscono alla ricostruzione delle tracce nella versione 1.7.0 del software (cfr. figura 6.7). | 59 |
| 6.14 | A sinistra: distribuzione degli eventi in funzione delle tracce per evento; a destra: distribuzione degli angoli compresi fra due tracce dello stesso evento. | 60 |
| 6.15 | Distribuzione angolare delle tracce ricostruite nei due piani di vista, φ a sinistra e ϑ a destra. | 60 |
| 6.16 | Efficienza di ricostruzione per tracce SA delle camere MB2 per i vari settori, con risoluzione di default ($200 \mu\text{m}$). | 61 |
| 6.17 | Efficienza di ricostruzione per tracce SA delle camere MB1-MB4 per i vari settori, con risoluzione di $900 \mu\text{m}$ | 62 |

Capitolo 1

Introduzione

Questa tesi riguarda l'acquisizione ed il trattamento dei dati nell'esperimento Compact Muon Solenoid (CMS) al Large Hadron Collider (LHC) del CERN. In particolare ci siamo occupati della ricostruzione delle tracce dei muoni cosmici che attraversano il rivelatori di CMS.

Nel capitolo 2 a una premessa di carattere storico per inquadrare come si arrivò agli acceleratori di particelle, fa seguito una descrizione di CMS nei suoi componenti principali. In prima istanza presenta la sua struttura radiale dal centro, dove avvengono le collisioni, fino all'estrema periferia dove trovano alloggio le grandi camere a deriva per la rivelazione dei muoni.

Il capitolo 3 è dedicato alla descrizione del software CMSSW che rappresenta lo strumento per il trattamento dei dati. Se ne evidenzia la struttura modulare, per poi descrivere come esso opera sugli eventi attraverso i tre livelli di trigger.

Un breve inquadramento dei livelli di trigger, che servono a selezionare i dati da acquisire, è l'argomento discusso nel capitolo 4.

Il capitolo 5 descrive le procedure per la ricostruzione delle tracce a partire dai dati scelti dal trigger.

Il capitolo 6 affronta il problema della ricostruzione delle tracce muoniche. L'utilizzo dei muoni cosmici al fine della messa in opera del rivelatore di muoni risulta una scelta obbligata su cui concentrare la propria attenzione durante le fasi in cui CMS non è ancora completamente operativo. Dopo diverse prove preliminari ed utilizzando successive versioni del software CMS-SW, si è proceduto allo studio delle efficienze di ricostruzione delle camere a deriva in una intera ruota di CMS.

Capitolo 2

Il Compact Muon Solenoid

2.1 Tutto ebbe inizio quando...

Come ogni tanto avviene, anche la scoperta del neutrone, di cui già dal 1920 Rutherford suggeriva l'esistenza, fu accidentale: nel 1928, durante un esperimento di bombardamento di berillio con nuclei di elio, si osservò l'emissione di una radiazione elettricamente neutra. Inizialmente si pensò fossero raggi γ , finché non si dovette prendere atto che quella radiazione causava l'espulsione di protoni da paraffina ad essa esposta: una circostanza che i raggi γ non avrebbero potuto causare. Quattro anni dopo, in Inghilterra, James Chadwick dimostrò che la radiazione misteriosa era costituita da quei "protoni neutri", aprendo la strada alla scoperta della fissione. Nello stesso anno Ernest Lawrence e Stanley Livingston costruivano il primo ciclotrone. Aveva un diametro di 30 cm, era immerso in un campo magnetico di 0.5 T ed era in grado di accelerare protoni fino a 1.2 MeV [1].

Dopo la scoperta della radiazione di neutroni, esporre ad essa la materia divenne una moda. Ma non capricciosa: i neutroni, non subendo la repulsione elettrostatica da parte dei nuclei della materia, risultavano ideali per penetrare nell'intimità della materia stessa. Fu Enrico Fermi il leader mondiale in questa ricerca: il suo gruppo intraprese infatti il programma sistematico di bombardare con neutroni gli elementi della tavola periodica.

Nel 1934 i Ragazzi di Via Panisperna giunsero all'uranio, elemento che si mostrò dovizioso di novità: da esso si generarono numerosi altri prodotti radioattivi. Fermi si fece l'opinione che si trattasse di elementi transuranici e, fallito ogni tentativo di dimostrare in essi proprietà chimiche diverse da quelle di elementi già noti (e più leggeri), quell'opinione era dominante ancora nel 1938, anno in cui gli fu conferito il Nobel, appunto, «per aver scoperto la radioattività artificiale indotta da irradiazione con neutroni».

A dire il vero, Ida Noddack-Tacke, una chimica tedesca, aveva suggerito la formazione di elementi leggeri [2]. Ma, vuoi perché era chimica, vuoi perché era poco nota, vuoi soprattutto perché non forniva prove convincenti a quel suo radicale suggerimento, essa fu ignorata [3].

Fu solo nel 1938 che Otto Hahn e Fritz Strassman, in Germania, dimostrarono che uno dei prodotti del bombardamento dell'uranio con neutroni era il bario. Essi informarono dei risultati una ricercatrice del Nobel Institute di Stoccolma, Lise Meitner (una tedesca rifugiata in Svezia), che nel 1939 insieme a suo nipote, il fisico Otto Frisch, si fecero un'idea più precisa del processo e capirono che esso avrebbe dovuto implicare il rilascio di notevoli quantità d'energia [4]. Fatto che dimostrarono, così svelando finalmente che quel che avveniva era proprio la scissione del nucleo.

Nel frattempo, nella seconda metà degli anni '30, Enrico Fermi premeva inutilmente per ottenere nuovi finanziamenti e sviluppare la ricerca. Egli vedeva che negli altri paesi si iniziavano a costruire acceleratori di particelle, e si rendeva conto che il primato internazionale della Fisica italiana, così faticosamente conquistato negli anni, ora veniva progressivamente perso.

Alla fine del 1938 Fermi si recò a Stoccolma per ritirare il premio Nobel e da lì proseguì direttamente per gli Stati Uniti d'America.

Il resto è storia celebrata.

2.2 Obiettivi e caratteristiche fondamentali di CMS

Per tante sfide che la Fisica delle particelle pone sul cammino della conoscenza, il mondo delle alte energie rappresenta un attore di primo piano nell'indagine sui costituenti primi della materia. Con la realizzazione del Compact Muon Solenoid (CMS) al Large Hadron Collider (LHC) del CERN ci si prefigge di raggiungere degli obiettivi che si possono riassumere nel modo seguente:

- l'esplorazione della fisica nella scala dei TeV;
- cercare il bosone di Higgs;
- ricercare l'evidenza per fenomeni oltre il modello standard;
- studiare gli aspetti delle collisioni degli ioni pesanti.

Quanto alle caratteristiche di maggior rilievo del rivelatore CMS, brevemente si possono elencare come segue:

- le dimensioni relativamente contenute (compattezza);
- l'ottimizzazione orientata all'obiettivo del tracciamento dei muoni;
- la potenza del solenoide che genera il campo magnetico.

Entrando più nel merito dell'argomento, di seguito si va a descrivere la composizione essenziale di CMS.

2.3 Il rivelatore in breve

CMS [12] è stato realizzato con l'intento di ottenere un rivelatore *general-purpose* che permetta di studiare numerosi aspetti delle collisioni fra protoni ad una energia di 14 TeV nel centro di massa ad una luminosità di progetto di $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [8]. Esso è formato da diversi sottosistemi, ognuno dei quali è deputato alla misurazione dell'energia e della quantità di moto dei differenti prodotti delle collisioni.

Principalmente CMS è suddiviso in 3 parti:

- la parte cilindrica centrale o **barrel**;
- le 2 parti estreme che chiudono il cilindro dette **endcap**.

2.3.1 Il barrel

Con riferimento alla figura 2.1, procedendo dall'interno verso l'esterno del barrel in senso radiale, si incontrano:

- un **tracker al silicio** per tracciare le particelle cariche;
- un **calorimetro elettromagnetico a cristalli scintillatori** (ECAL, Electromagnetic CALorimeter), atto a produrre sciami dagli elettroni e dai fotoni;
- un **calorimetro a campionamento** studiato per ottenere degli sciami dagli adroni (HCAL, Hadron CALorimeter);
- un **solenioide a superconduttore** in grado di generare una densità di flusso magnetico di 4 T al suo interno;
- i grandi **rivelatori di muoni**.

I rivelatori muonici sono immersi nel cosiddetto **return yoke**, lastre di acciaio esterne al solenoide che servono per chiudere le linee di flusso del campo magnetico con una densità di flusso di ritorno di 1.8 T.

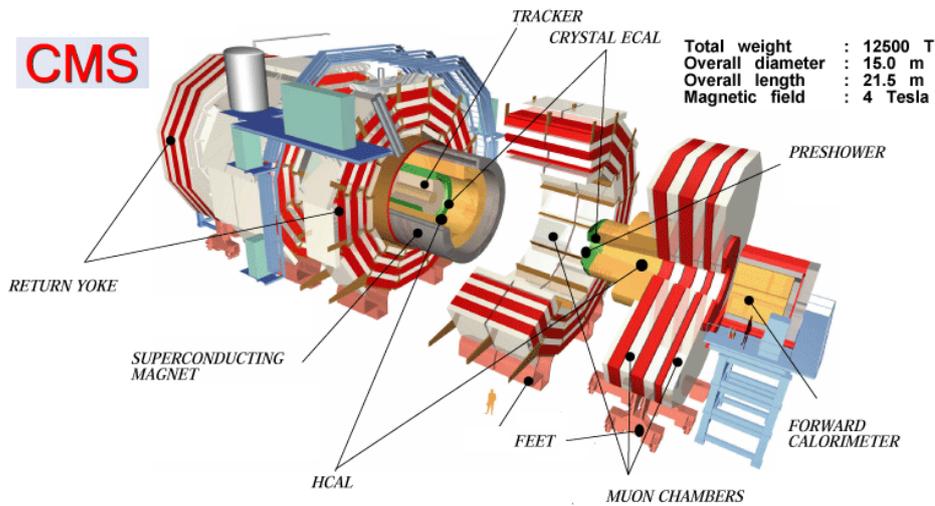


Figura 2.1: Vista d'insieme del rivelatore CMS con l'indicazione delle parti salienti. Nel mezzo, sotto il cosiddetto "barrel" è disegnata una sagoma umana per dare l'idea delle dimensioni del sistema le cui grandezze principali sono riportate in alto a destra.

2.3.2 Gli endcap

Procedendo in senso assiale dall'interno, si incontrano le grandi camere muoniche analoghe a quelle presenti nel barrel e, in posizione più esterna, i **forward calorimeter** che misurano la radiazione Čerenkov emessa dalle particelle con direzione prossima a quella assiale. I forward calorimeter sono composti da fibre di quarzo e assorbitori in acciaio.

2.4 La nomenclatura di CMS

La complessa struttura di CMS ha reso necessario un sistema di identificazione delle varie parti in base alla propria posizione geometrica oltre che alla propria funzione.

La figura 2.2 riporta i dati identificativi delle principali parti di rivelazione dei muoni; in basso a destra è indicato il sistema di riferimento adottato.

Il versore \hat{x} è rivolto verso il centro di LHC, il versore \hat{y} è rivolto verso l'alto, e infine il versore \hat{z} rispetta la relazione $\hat{z} = \hat{x} \wedge \hat{y}$.

A volte si fa riferimento a un sistema di coordinate cilindriche in cui, oltre alla coordinata radiale r e a quella longitudinale z , si presenta la coordinata angolare φ sul piano (x, y) che eredita le convenzioni della circonferenza goniometrica.

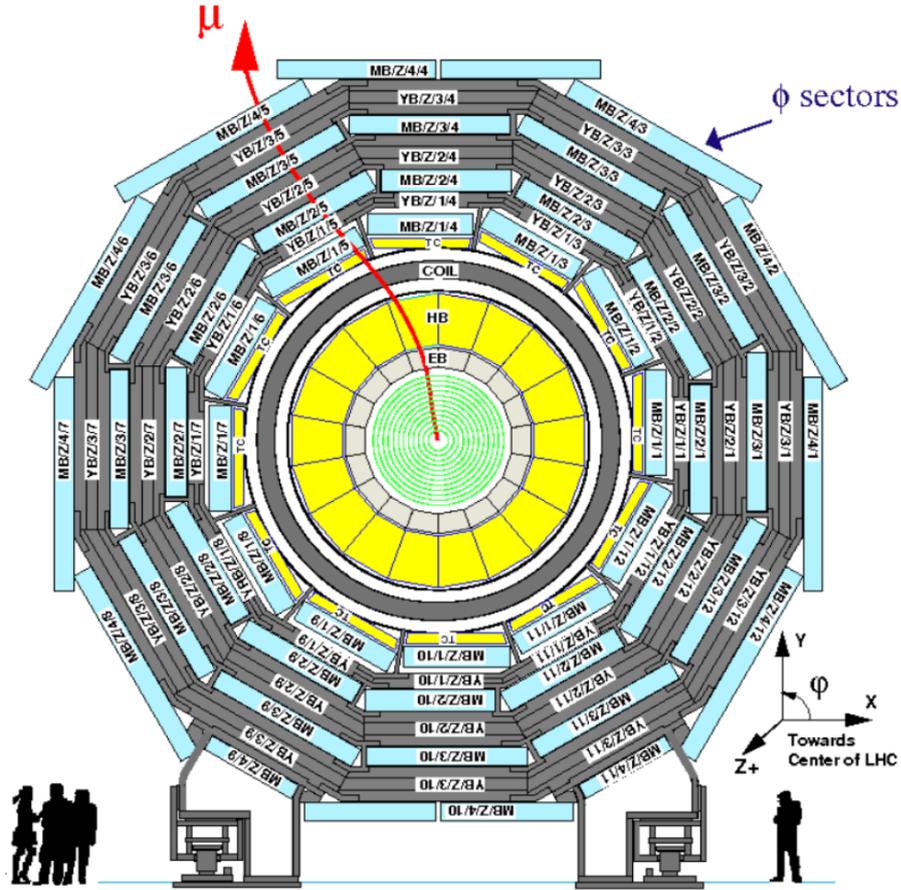


Figura 2.2: Una sezione trasversale di CMS con l'indicazione della convenzione di numerazione delle camere e dei settori. In basso a destra sono mostrate anche le coordinate del sistema di riferimento. Le sagome alla base del disegno danno l'idea delle dimensioni di CMS.

Sul piano (y, z) esiste un ulteriore angolo ϑ misurato a partire dall'asse z . È consuetudine sostituire ϑ con la pseudorapidità η data dalla relazione:

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\vartheta}{2}\right)$$

Per dare un'idea delle grandezze, gli endcap riescono a rivelare muoni fino a un massimo di $|\eta| = 2.4$, mentre i forward calorimeter rivelano particelle fino a $|\eta| = 5.6$.

Nel piano (r, φ) abbiamo 12 settori contenenti ciascuno 4 stazioni. Lungo z la struttura del barrel consiste di 5 ruote uguali dette **Yoke Barrel** e indicate con YBn (YB-2, YB-1, YB0, YB1, YB2).

Le stazioni concentriche dei rivelatori di muoni (camere a deriva, vd. figura 2.3) costituiscono i **Muon Barrel** indicati con MB_n (MB_1 , MB_2 , MB_3 , MB_4). Ognuno di essi è composto da 3 **super-layer**, un insieme di 4 layer ognuno dei quali contiene i tubi a deriva (DT). In totale vi sono 12 layer DT per ogni camera. Due super-layer hanno i DT con l'asse parallelo all'asse z di CMS e servono per misurare la coordinata angolare φ . Un super-layer con i tubi ad asse parallelo all'asse x di CMS serve a misurare z o l'angolo polare ϑ . Fanno eccezione le MB_4 , che presentano solo 2 super-layer φ .

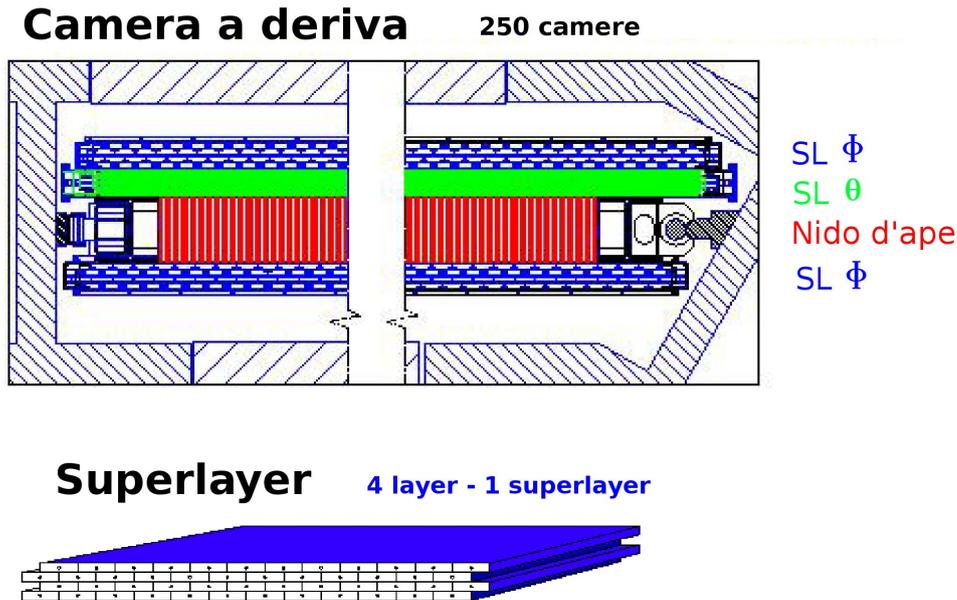


Figura 2.3: Struttura di una camera a deriva. In alto: si evidenziano i due tipi di superlayer e la struttura a nido d'ape. In basso: rappresentazione di un superlayer composto da 4 layer; due layer adiacenti sono sfasati di mezzo tubo per risolvere l'ambiguità destra/sinistra.

In totale le camere sono 250 poichè le MB_4 dei settori 4 e 10 sono divise in due; infatti nella numerazione dei settori si aggiunge il 13 al settore 4, e il 14 al settore 10.

2.5 La struttura radiale di CMS

La sezione trasversale di CMS, schematizzata nella figura 2.2, presenta diversi settori di cui un campione è mostrato nella figura 2.4 nei suoi componenti principali. Procedendo dal centro alla periferia si distinguono diverse regioni che andiamo ora a illustrare separatamente.

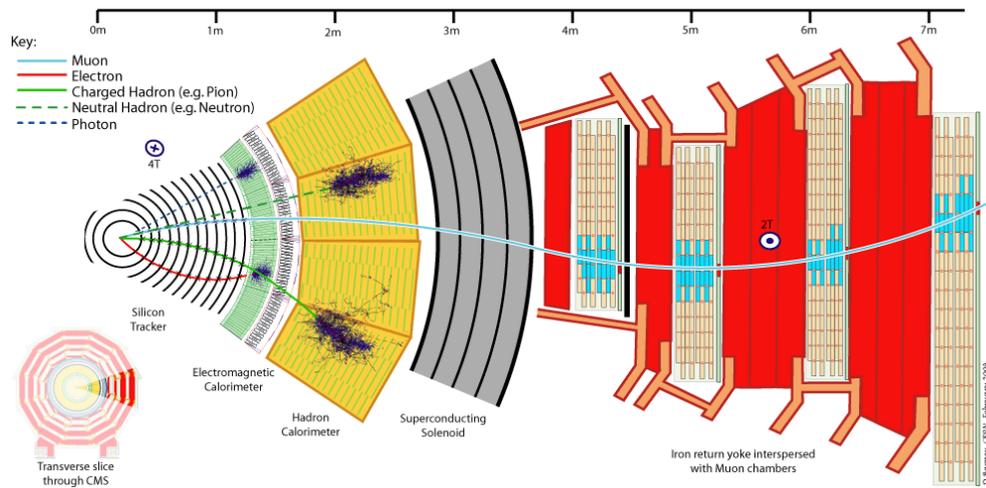


Figura 2.4: Vista di un settore di CMS negli strati di cui è composto in senso radiale. I protoni di LHC viaggiano perpendicolarmente al disegno.

2.5.1 La zona centrale di collisione

Questo è il luogo vero e proprio dove avvengono le collisioni fra le particelle. I fasci di protoni viaggiano in direzioni opposte e i magneti deflettori e di focalizzazione di LHC forzano i fasci ad incrociarsi al centro del rivelatore CMS.

I fasci sono suddivisi in “pacchetti” di protoni. Ogni pacchetto contiene approssimativamente 10^{11} protoni. Date le dimensioni ridotte delle particelle, la probabilità che due protoni vengano in collisione è estremamente ridotta: quando i pacchetti si urtano ci sono all’incirca 20 eventi prodotti dalle collisioni fra i pacchetti in condizioni di progetto.

La maggior parte dei processi che avvengono nell’urto fra due protoni sono ben noti alla letteratura, e per estrapolazione dagli eventi osservati ad energie più basse si prevede che solo poche collisioni su 10^{12} possano produrre nuova Fisica di interesse. Di conseguenza uno degli obiettivi è di realizzare il maggior numero di collisioni possibile, per cui i pacchetti all’interno di un fascio sono piuttosto ravvicinati in modo da ottenere urti ogni 25 ns, ossia con una frequenza di 40 milioni di bunch crossing ogni secondo (40 MHz).

2.5.2 Il tracker al silicio

Diversi sensori al silicio, segmentati con precisione in strisce e pixel, permettono sia di tracciare le particelle sia di misurarne la quantità di moto. Essi

permettono inoltre di risalire ai vertici secondari da cui escono i prodotti di decadimento delle particelle instabili.

La precisione nella misura dell'impulso a grandi angoli è migliore dell'1% per energie delle particelle cariche inferiori a circa 80 GeV.

2.5.3 Il calorimetro elettromagnetico

Per misurare con elevata precisione le energie degli elettroni e dei fotoni, sono stati fabbricati dei cristalli di wolframato di piombo (PbWO_4) usato come scintillatore.

La precisione raggiungibile con questo rivelatore è migliore dello 0.5% per energie di γ/e superiori a 50 GeV.

Un ulteriore rivelatore, il **preshower**, basato su sensori al silicio, permette l'identificazione di elettroni e fotoni negli endcap, i dischi che chiudono ermeticamente CMS ai due estremi della parte cilindrica centrale.

2.5.4 Il calorimetro adronico

Gli adroni sono rivelati da un calorimetro dedicato che permette la determinazione della loro energia: esso è costituito da piani di materiale ad alta densità (ottone all'interno del campo magnetico, acciaio fuori dal campo magnetico) alternati rispettivamente con scintillatore plastico o fibre di quarzo.

Nel barrel la risoluzione sull'energia trasversa dei jet è migliore del 10% per energie trasverse dei jet maggiori di 150 – 200 GeV.

2.5.5 Il solenoide superconduttore

Come molti rivelatori della fisica delle particelle, anche CMS ha un grande magnete solenoidale. Questo ci permette di determinare la quantità di moto delle particelle dalla curvatura delle tracce che esse lasciano nell'attraversamento dei rivelatori posti nel campo magnetico.

Con un solenoide delle dimensioni di circa 13 metri in lunghezza e 6 metri in diametro, e con le spire del magnete costituite da un materiale superconduttore al niobio-titanio refrigerato a 4.4 K con elio liquido, CMS è in grado di produrre un campo magnetico di 4 T.

L'induttanza di 14 H del magnete e la corrente nominale di 19500 A, sono in grado di immagazzinare un'energia di 2.66 GJ, (per avere un'idea, è l'equivalente di energia sprigionata dall'esplosione di circa mezza tonnellata di tritolo). Ci sono perciò dei circuiti di scarico che gestiscono la dissipazione

di questa energia nel caso di passaggio, imposto o accidentale, del superconduttore ad uno stato resistivo (quenching) che porterebbe le temperature a livelli tali da danneggiare molte parti di CMS.

2.6 I rivelatori di muoni

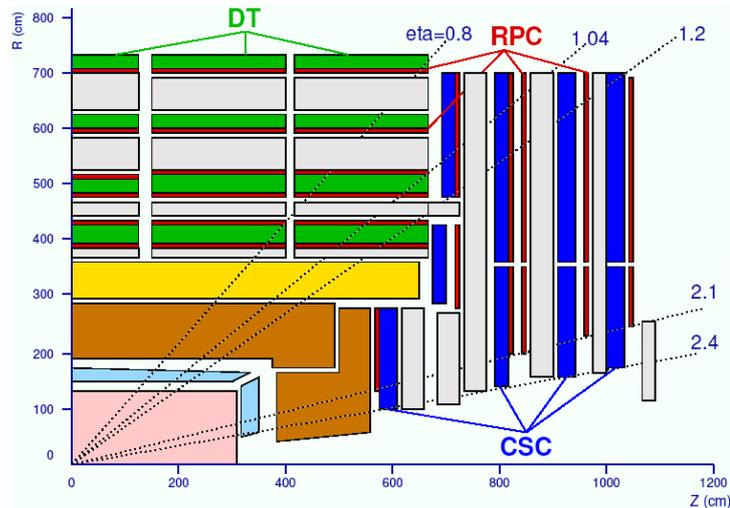


Figura 2.5: I tre rivelatori (DT chamber, RPC e CSC) su cui sono basati i trigger di CMS per i muoni.

Per identificare i muoni e misurarne la quantità di moto, CMS si avvale di 3 rivelatori (figura 2.5): le camere a deriva (DT chamber), le camere a strisce catodiche (CSC) e le camere a piatto resistivo (RPC). Le DT chamber sono usate per misure di precisione della traiettoria nel barrel, mentre le CSC sono usate negli endcap. Poichè i rivelatori basati sui drift potrebbero a priori essere lenti, le RPC sono usate per fornire un segnale di trigger veloce e ridondante al passaggio di un muone attraverso il rivelatore, e sono installate sia nel barrel che negli endcap.

La risoluzione di impulso dei rivelatori di muoni presi da soli (stand-alone) è migliore del 10% a grandi angoli per energie inferiori a 300 GeV e peggiore solo di un fattore 2 per energie fino a 2 TeV.

Data l'importanza primaria che hanno rivestito in questo lavoro le camere a deriva del barrel, se ne presenta di seguito una descrizione più dettagliata.

2.6.1 Le camere a deriva del barrel

Nel barrel le camere a deriva sono alternate con gli strati di ferro spessi 300, 630 e 630 mm che servono sia come assorbitore di particelle, sia come giogo esterno al solenoide per il ritorno del campo magnetico. La densità di flusso magnetico $B = 1.8 \text{ T}$, presente nel giogo, e la misura del raggio di curvatura R della traccia permettono di risalire alla quantità di moto trasversale p_t dei muoni rispetto al campo magnetico secondo la relazione

$$p_t = qBR \quad (2.1)$$

dove q è la carica del muone.

Come anticipato nel paragrafo 2.4, una camera a deriva (figura 2.3) è formata dai cosiddetti **superlayer**, strutture piane ognuna delle quali presenta 4 layer sovrapposti di DT. Procedendo dall'interno verso l'esterno (cioè dal basso verso l'alto in figura 2.3), si incontrano:

1. un superlayer con i DT disposti lungo z (cioè paralleli ai fasci di protoni), per la misura delle coordinate r e φ ;
2. una struttura a nido d'ape per conferire robustezza alla camera e migliorare la precisione nella ricostruzione delle tracce;
3. un superlayer con i DT disposti ortogonalmente a z , per la misura della coordinata ϑ ;
4. un ulteriore superlayer come descritto al punto 1.

La presenza di due superlayer (r, φ) distanziati fra loro è funzionale per il trigger. Infatti, come spiegato nel capitolo 4, il sistema di trigger opera una ricostruzione grossolana e veloce delle tracce e stima il momento trasverso dall'angolo formato dalla traccia con la retta passante per il vertice. Il momento trasverso è la grandezza chiave su cui (attraverso l'applicazione di soglie programmabili) si basa la decisione di trigger.

All'interno di ciascun superlayer i layer adiacenti sono sfasati di mezzo tubo, allo scopo di risolvere l'ambiguità destra/sinistra, come verrà spiegato in dettaglio nel paragrafo 4.4.

Per ottenere la necessaria precisione sulle misure di posizione, le tolleranze di allineamento dei componenti delle camere devono essere le seguenti [13]:

- I fili all'interno del superlayer devono essere posizionati con un errore massimo di $100 \mu\text{m}$;

- Gli spostamenti tra superlayer devono essere contenuti all'interno di $500\ \mu\text{m}$ e sono peraltro misurati con una precisione di $100\ \mu\text{m}$;
- Le camere devono essere installate con un errore dell'ordine del millimetro.



Figura 2.6: Fotografia di una camera a deriva: si riescono a distinguere le diverse orientazioni dei DT.

Nella figura 2.6 è mostrata una fotografia di una camera a deriva in cui si possono distinguere i 12 layer con diversa orientazione.

I layer delle camere a deriva sono costituiti da tubi (figura 2.7) a sezione rettangolare di dimensioni $42 \times 13\ \text{mm}$, riempiti con una miscela di gas all'85% di Ar e al 15% di CO_2 a pressione atmosferica, che viene ionizzata al transito dei muoni.

Al centro del DT è teso un filo anodico che presenta una d.d.p. di 4.8 kV rispetto alle strisce catodiche poste sulle pareti più piccole. Le pareti larghe presentano due ulteriori strisce di elettrodi tenuti a una tensione intermedia fra anodo e catodo e che hanno la funzione di rendere il campo elettrico più uniforme possibile, in modo che gli elettroni ionizzati derivino a velocità pressochè costante verso l'anodo. L'intensità del segnale ai capi del filo è

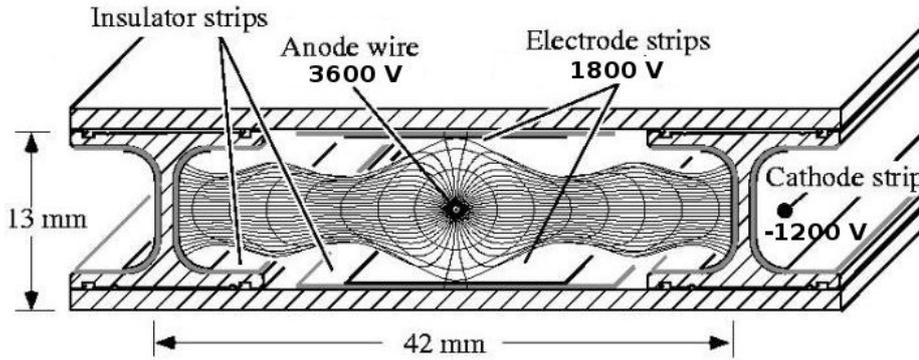


Figura 2.7: Sezione di un DT con l'indicazione delle tensioni nominali a cui vengono portate le varie parti.

proporzionale alla carica elettrica che lo raggiunge. Come in altre camere a fili, nei DT si realizza un processo di amplificazione del segnale attraverso il meccanismo di produzione di una “valanga” di elettroni nei pressi dell'anodo. Si tratta di un processo a catena che si propaga in presenza di un intenso campo elettrico in cui gli elettroni guadagnano un'energia sufficiente a ionizzare a loro volta.

Trascurando gli effetti di bordo, in condizioni statiche la densità di carica λ lungo il filo anodico è uniforme; il campo elettrico in un intorno del filo è

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{\lambda}{r^2} \vec{r}$$

dove ϵ è la costante dielettrica della miscela Ar-CO₂ presente nel DT e \vec{r} è il vettore normale al filo.

Si vede chiaramente che l'effetto valanga è favorito da un elevato λ ed una breve distanza dal centro del filo; λ dipende da V , mentre il minimo valore di r è il raggio stesso del filo, che per i DT è $25 \mu\text{m}$.

2.6.2 Le Camere a Strisce Catodiche (CSC)

Ogni stazione muonica degli endcap (figura 2.8) è equipaggiata da una CSC a 6 layer (figura 2.9) di forma trapezoidale. Le CSC sono disposte ad anelli concentrici al fascio. Ogni layer contiene delle strisce catodiche radiali e dei fili ad esse perpendicolari. Le strisce misurano la coordinata φ mentre i fili forniscono la coordinata r .

Le CSC operano nell'intervallo delle $0.9 < |\eta| < 2.4$ dove i DT non possono essere utilizzati a causa dell'orientazione del campo magnetico.

A livello di trigger la posizione di un muone è misurata con la precisione

di metà striscia (2 - 8 mm). Quando si verifica una coincidenza in cui almeno 4 strisce sono interessate da una ionizzazione, allora viene riconosciuta valida una traccia locale. Anche per i fili è richiesta una coincidenza di almeno 4 eventi su 4 layer distinti.

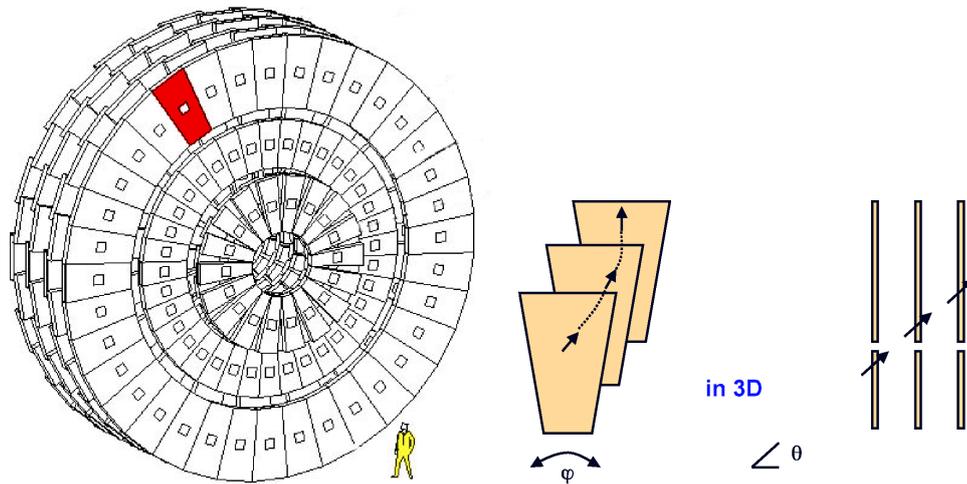


Figura 2.8: Le camere a strisce catodiche. A sinistra: in evidenza una CSC di un endcap; a destra: un muone attraversa delle CSC.

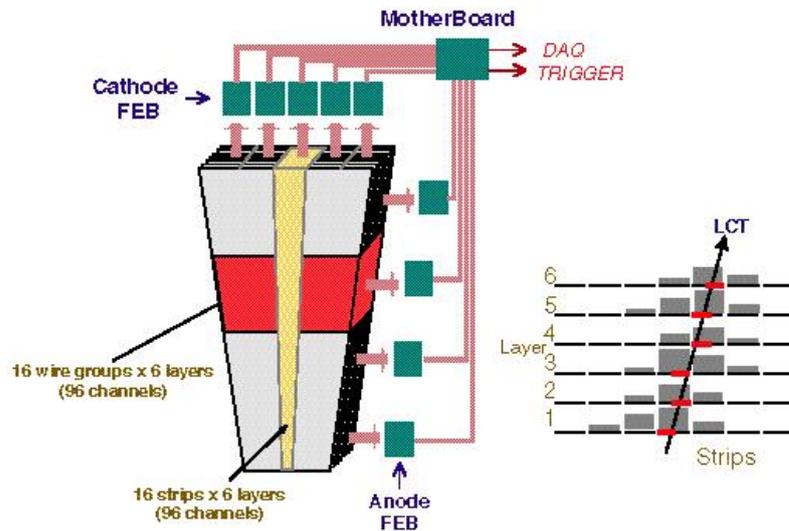


Figura 2.9: La ricostruzione delle tracce in una camera a strisce catodiche.

2.6.3 Le Resistive Plate Chambers (RPC) e gli RPC muon sorter

Le RPC sono rivelatori con trigger dedicato, presenti sia nel barrel che negli endcap, utilizzate per aumentare l'efficienza del trigger e per permettere controlli incrociati dato che hanno un'elevata risoluzione temporale (~ 2 ns).

Nel barrel (figura 2.5) abbiamo due RPC prima e dopo le stazioni MB1 e MB2, una davanti alla MB3 e una davanti alla MB4. Esse sono costituite da piani di bachelite alternati da camere contenenti una miscela di freon e isobutano; ai piani è applicata una differenza di potenziale che produce un segnale elettrico quando il gas è ionizzato dalle particelle che lo attraversano. Il segnale è letto da strette strisce di alluminio che rendono possibile la misura di p_t fino a 50 – 100 GeV. Tale misura viene fatta dal **Pattern Comparator Trigger** (PACT) che confronta i segnali delle strisce nelle varie stazioni con pattern predefiniti corrispondenti a diversi p_t , scegliendone al massimo 4 nel barrel e 4 negli endcap. I muoni candidati sono in seguito filtrati e ordinati per qualità e p_t dal cosiddetto **RPC Muon Sorter**.

RPC Muon Sorter

Un RPC Muon Sorter è costituito da un insieme di chip, collegati ad albero, ognuno dei quali accetta fino a 8 muoni in ingresso e presenta in uscita al massimo 4 muoni. Complessivamente, dopo una serie di chip in cascata, all'uscita si hanno i migliori 4 muoni del barrel e i migliori 4 muoni degli endcap.

In chiusura, con la figura 2.10 presentiamo una vista d'insieme del sistema di rivelatori dei muoni che abbiamo descritto in questo capitolo.

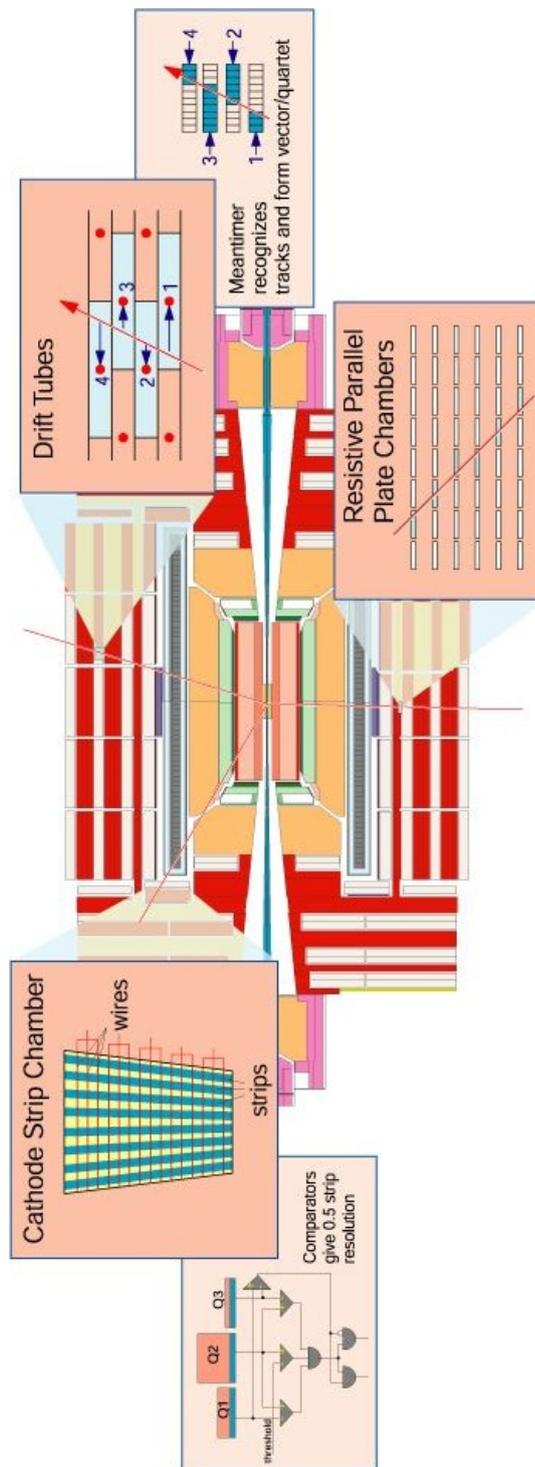


Figura 2.10: Schema d'insieme dei sistemi di rivelatori di CMS per i muoni.

Capitolo 3

Il software CMSSW

3.1 La struttura di CMSSW

Con il termine “CMSSW” viene identificato un sistema software costruito attorno ad una Infrastruttura, a un **Event Data Model** (EDM), e a dei Servizi costituiti da strumenti per il trattamento delle informazioni. Tali servizi assolvono diverse funzioni per la simulazione e la calibrazione dei sistemi e della strumentazione, oltre a servire i moduli di ricostruzione che processano i dati degli eventi in modo che si possano effettuare le analisi [22].

Infrastruttura e EDM sono progettati con l’obiettivo di favorire in modo efficiente lo sviluppo, la diffusione e il porting delle applicazioni e del software.

CMSSW è lanciato dal comando `cmsRun`: questo è un eseguibile in grado di cambiare il valore dei parametri e le impostazioni in modo flessibile prima di lanciare le elaborazioni, evitando di modificare i sorgenti e ricompilarli.

In particolare `cmsRun` specializza le sue operazioni attraverso un file di configurazione che gli viene passato come parametro. In tale file sono specificati i dati da elaborare, i moduli da eseguire (ognuno dei quali può a sua volta avere dei parametri da impostare), e l’ordine in cui lanciaarli. Tali moduli sono caricati dinamicamente all’avvio di `cmsRun`.

3.1.1 EDM

L’entità principale dei dati, quella da cui si parte e che accompagna tutto il processo di elaborazione, è l’**Evento**, concetto attorno al quale è centrato il “CMS Event Data Model”. Un Evento è un oggetto di tipo C++ chiamato `edm::Event` in cui sono memorizzati tutti i dati, quelli grezzi (**RAW data**) e quelli ricostruiti. Ad ogni passo della ricostruzione nuove informazioni si aggiungono a quelle esistenti nello stesso Evento, e servono da input per i

passi successivi. Nella elaborazione, i dati vengono passati da un modulo all'altro come `Evento`, e come `Evento` è possibile accedervi.

Ad ogni `Evento` di EDM (puro oggetto informatico) corrisponde un evento fisico, inteso come un fenomeno che produce segnali nel rivelatore, come per esempio una collisione tra protoni di LHC, o il passaggio di un muone cosmico. Difatti ogni evento fisico consiste in un insieme di informazioni da registrare ed elaborare in un `Evento` di EDM.

EDM memorizza gli `Eventi` in file ROOT rendendoli disponibili anche per l'analisi interattiva e la visualizzazione [24].

3.1.2 L'architettura modulare

Una notevole caratteristica di CMSSW è la struttura modulare. I moduli sono singoli componenti software che implementano una ben precisa funzionalità di elaborazione. Questi componenti sono messi a disposizione come plug-in da appositi servizi, e compilati tutti assieme come **shared libraries**.

I moduli che è possibile caricare dinamicamente durante le elaborazioni sono di diverso tipo:

Source: legge i dati di un `Evento` da un file in formato ROOT o genera un evento Monte Carlo, pubblica le informazioni sullo stato dell'`Evento`, e infine può aggiungere dati direttamente, oppure predisporre un sistema che pubblica i dati a successive richieste. Un modulo **Source** legge altresì informazioni necessarie all'analisi e salvate in appositi database, quali costanti di calibrazione, mappe del rivelatore, geometrie, ecc.

Nelle nostre elaborazioni si è fatto ampio uso del modulo `PoolSource` che legge gli `Eventi` da un file di ROOT;

EDProducer: è un modulo che aggiunge dati all'`Evento`; esso legge i dati di un `Evento` in un certo formato e produce ulteriori informazioni; i prodotti dei moduli **EDProducer** sono memorizzati all'interno dell'`Evento` come **REConstructed data Objects** (RECO). In questo modo l'`Evento` contiene sia i dati acquisiti dall'evento fisico, sia i dati derivati dalle elaborazioni dei moduli. In più l'`Evento` contiene i cosiddetti **metadata** che descrivono:

- la configurazione del software utilizzato per la ricostruzione di ogni oggetto di tipo `dati` in esso contenuto;
- le condizioni e i dati di calibrazione usati per tale ricostruzione.

EDFilter: processa i dati di un `Evento` e restituisce un booleano che indica se proseguire o no nella elaborazione dell'`Evento`. Un tipico esempio di

EDFilter è il filtro **StopAfterNEvents** che ferma i processi sugli Eventi dopo che il modulo ne ha elaborato un certo numero.

EDAnalyzer: è un tipo di modulo destinato esclusivamente all'analisi. Un **EDAnalyzer** legge i dati da un Evento, ma non ne aggiunge altri. Tipici risultati di un analyzer sono istogrammi e tabelle.

EDLooper: è un modulo che può essere utilizzato per controllare un ciclo a passaggi multipli su dei sorgenti di dati. Può anche modificare un **EventSetup** a istanti ben definiti. Questo tipo di moduli è usato sulle tracce nelle procedure di allineamento;

OutputModule: legge i dati da un Evento e li registra su memorie esterne, tipicamente (ma non sempre) un file in formato ROOT su hard-disk.

Un modulo può essere inserito dinamicamente durante l'elaborazione attraverso il comando **cmsRun**: la Infrastruttura si occupa di caricare il plug-in e istanziare il modulo laddove viene richiesto dal file di configurazione letto da **cmsRun**. Non c'è nessuna necessità da parte dell'utente di ricompilare il proprio file sorgente.

Un processo di **cmsRun** segue questa serie di passi successivi:

1. Prima di tutto **cmsRun** legge all'interno del file di configurazione e crea una stringa per ogni classe che dovrà essere caricata dinamicamente;
2. passa questa stringa a SEAL, il programma che gestisce la funzionalità di plug-in;
3. in base alla mappa che associa le stringhe alle librerie, SEAL inoltra alla Infrastruttura le librerie che contengono le classi richieste in precedenza;
4. l'Infrastruttura carica le librerie;
5. l'Infrastruttura crea un oggetto di tipo PSet (Parameter Set) in base al contenuto del blocco "process" del file di configurazione; quindi consegna tale oggetto al costruttore;
6. il costruttore costruisce una istanza per ogni modulo;
7. **cmsRun** esegue il modulo successivo nell'ordine specificato nel file di configurazione.

3.2 Degli eventi

Un evento fisico è una serie di informazioni ricavate dal rivelatore (lettura di canali di elettronica) che si assumono come riconducibili ad una stessa interazione fondamentale (collisione pp , passaggio di un muone cosmico, ecc.).

Fra milioni di eventi che interessano il rivelatore, il Sistema di Trigger e Acquisizione Dati (TriDAS) deve selezionarne solo un centinaio al secondo e memorizzarli per la successiva analisi. A tal fine ogni evento deve passare tre fasi successive di test indipendenti, o **Trigger Level** (che saranno trattati nel capitolo 4).

A valle di questo processo di selezione degli eventi da parte dei trigger, abbiamo finalmente i dati grezzi che contengono:

- i dati del rivelatore;
- i risultati del trigger di livello 1;
- i risultati delle selezioni del sistema HLT (High Level Trigger);
- alcuni degli oggetti di più alto livello creati durante le operazioni degli HLT.

I dati dell'Evento vengono infine registrati selettivamente su un file ROOT, in modo da ottenere insieme i dati con il desiderato livello di completezza.

Esempi frequenti sono:

1. i dati completi di un Evento (Full Event Data, FEVT) che sono i dati grezzi più i dati RECO;
2. i soli dati grezzi, o **RECO**, questa volta intesi distinti gli uni dagli altri, al contrario dei FEVT;
3. gli **Analysis Object Data** (AOD) che sono un sottoinsieme di dati RECO in un Evento, selezionati in base alle proprie esigenze; gli AOD sono utili per il fatto che, per molti tipi di analisi di tipo fisico, da soli sono sufficienti agli scopi più frequenti. Essi sono i dati più evoluti e sintetici che contengono soltanto le informazioni finali delle ricostruzioni e dell'identificazione di tracce e jet: "oggetti" fisici, cioè particelle, pronti per l'analisi fisica vera e propria.

È importante porre l'accento sul fatto che l'architettura dei dati negli Eventi è modulare come il resto dell'infrastruttura. Possono essere configurati diversi livelli di dati, e una data applicazione può usare uno o più livelli, trattandoli come oggetti autonomi e indipendenti.

In qualsiasi momento si possono pertanto riprocessare i dati. Per esempio, se l'AOD non contiene esattamente i dati che ci servono, si possono riprocessare i RECO (per esempio applicando nuove selezioni) per produrre gli AOD desiderati.

In un punto qualsiasi del processo, le informazioni prodotte dall'utente nella elaborazione possono essere aggiunte agli oggetti già esistenti nell'Evento. In questo modo la distinzione fra "dati CMS" e "dati dell'utente" può cambiare nel ciclo di vita dell'esperimento.

3.2.1 L'identificazione dei dati all'interno di un Evento

I diversi insiemi di dati all'interno di un Evento sono identificati da quattro parametri:

Tipo di classe C++: indica a quale classe appartengono i dati, per esempio `edm::PSimHitContainer` o `reco::TrackCollection`;

Etichetta del modulo: l'etichetta che viene assegnata dal modulo che ha creato i dati, per esempio `SimG4Objects` o `TrackProducer`;

Etichetta di istanza del prodotto: un'etichetta assegnata all'oggetto dal modulo (per default è una stringa vuota) per identificarlo nel caso in cui più oggetti dello stesso tipo C++ siano istanziati all'interno del singolo modulo;

Nome del processo: il nome del processo che ha eseguito la particolare elaborazione che ha creato i dati in oggetto.

3.3 L'elaborazione e la presentazione dei dati

Come detto nel paragrafo 3.1, gli Eventi sono processati sottoponendo ognuno di essi ad una serie di moduli, la cui sequenza esatta viene specificata dall'utente nell'istruzione `path` del file di configurazione. Un `path` è una lista ordinata di moduli che imposta l'ordine esatto della loro esecuzione. Quando un Evento viene passato a un modulo, questo prende i dati esistenti o può inserirne di nuovi; in questo caso, verranno memorizzate nell'Evento anche le informazioni sulla provenienza dei dati.

L'elaborazione fa uso di informazioni sullo stato e l'ambiente in cui opera il rivelatore. Queste informazioni non sono legate a un singolo evento, ma piuttosto al periodo di tempo per il quale esse sono valide, il cosiddetto **intervallo di validità** o IOV, e uno IOV tipicamente è lo stesso per molti eventi.

Esempi di questo tipo di dati non legati agli eventi includono calibrazioni, allineamenti, descrizioni delle geometrie dei vari sistemi, campo magnetico e condizioni di esecuzione registrate durante l'acquisizione dei dati, ecc., il tutto memorizzato in appositi database. Il sistema **EventSetup**, che si incarica di gestire queste informazioni che non sono di tipo Evento, utilizza due categorie di moduli, la **ESSource** e la **ESProducer**. Essi fanno uso del concetto di **Record**, un costrutto di **EventSetup** contenente i dati e i servizi che hanno identici IOV.

Capitolo 4

Il trigger

4.1 La selezione dei dati e l'acquisizione

Ad ogni bunch crossing (BX) in LHC si verificano circa 20 collisioni, per cui la frequenza degli eventi è dell'ordine di 1 GHz. Con gli attuali mezzi è impossibile (oltre che inutile) memorizzare tutte le informazioni di questa grande quantità di eventi, per cui si rende necessario ridurre i dati al minimo indispensabile.

I segnali prodotti dal rivelatore sono analizzati dal sistema di trigger che seleziona quegli eventi che con più probabilità possano mostrare nuovi interessanti fenomeni della Fisica. Data l'elevata frequenza di collisione dei pacchetti, questa selezione deve essere estremamente rapida: al primo livello essa è affidata a dispositivi elettronici, cioè realizzata in hardware.

Il passo successivo utilizza informazioni più particolareggiate ed è realizzato in software, anche se con algoritmi meno sofisticati di quelli usati per la successiva analisi offline, oggetto principale di questa tesi.

4.2 I livelli di trigger

4.2.1 Il trigger hardware o di primo livello (L1)

La prima selezione degli eventi (primo livello di trigger) riduce la frequenza degli eventi sotto i 100 kHz (massima frequenza di input dei trigger di secondo livello). Tutti i sottorivelatori contribuiscono in vario modo al trigger. Per i muoni la selezione avviene secondo un criterio basato sulla valutazione di p_t e di un indice di qualità. I dati, memorizzati in buffer a scorrimento, sono elaborati in parallelo per minimizzare i tempi morti. Sebbene la decisione del trigger se accettare o meno un evento arrivi decine di BX dopo che l'evento

stesso si è verificato, la parallelizzazione del calcolo riduce il rischio di perdere eventi interessanti.

Nonostante questo primo filtro sia necessariamente rozzo e basato su informazioni parziali, esso riduce la frequenza di un fattore $\sim 10^4$.

4.2.2 Il trigger software o di secondo livello (HLT)

L'High Level Trigger raccoglie i dati degli eventi selezionati dal livello 1 e li elabora online per decidere se memorizzarli o scartarli. Questo processo finale di HLT riduce la frequenza degli eventi a 100 Hz.

Analizziamo ora più da vicino i trigger che riguardano i rivelatori di muoni e in particolare il trigger delle camere a deriva.

4.3 I trigger muonici

Il primo stadio dell'elettronica di read out delle DT chamber sono i cosiddetti minirate (MC), lunghi contenitori, montati a capo di ciascuna camera, in cui sono assemblate un insieme di schede elettroniche: le Read Out Board (ROB) e le Trigger Board (TRB). Le ROB contengono i TDC (Time to Digital Converter) che servono alla digitalizzazione del tempo; le TRB attuano la logica di trigger di primo livello sui segnali che provengono dall'elettronica di front-end.

Con un meccanismo in cascata che parte da una prima selezione degli hit dei layer, in ogni fase si procede all'elaborazione e al successivo filtraggio dei migliori candidati muoni, che verranno passati alla fase successiva fino ad arrivare alla selezione globale. Con l'ausilio della figura 4.1 vediamo più nello specifico come funziona il trigger muonico.

Per ogni camera vengono raccolti gli hit e ricostruiti i segmenti di traccia locali. Quindi si passa a livello regionale, più ampio, che coinvolge i segmenti trovati in camere diverse per formare tracce complete; in questa fase vengono ricalcolati posizione e direzione. Ciascun trigger regionale (DT, CSC, RPC del barrel e RPC degli endcap) fornisce al **Global Muon Trigger** (GMT) fino a un massimo di quattro candidati muoni per ogni bunch crossing: ad ogni candidato viene attribuita una misura di p_t , φ , η ed un indicatore di qualità.

Nel GMT avviene un'ulteriore selezione: dal confronto dei dati dei Track Finder e dei Pattern Comparator Trigger, con criteri di selezione basati sulla qualità e sulla pseudorapidità, il GMT elimina i falsi muoni e il rumore di fondo, e passa poi i quattro migliori candidati al trigger globale di CMS.

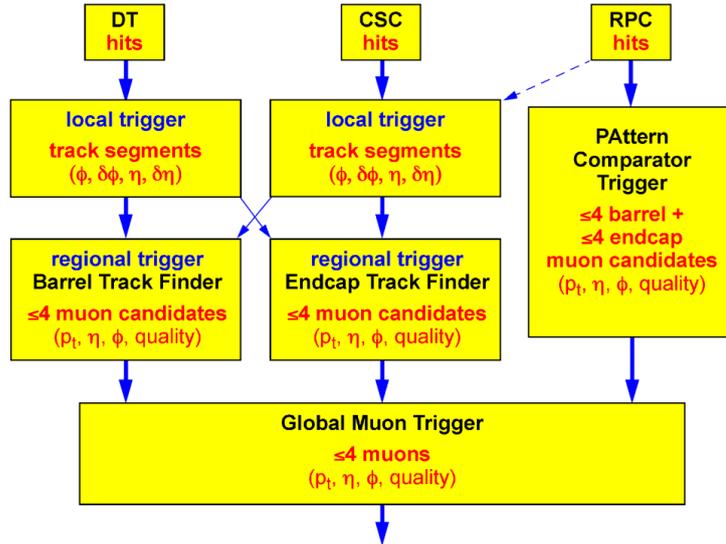


Figura 4.1: Schema logico della ricostruzione dei muoni attraverso i diversi tipi di trigger, con il Trigger Muonico Globale a valle di tutti gli altri. La ripetuta azione di filtraggio nei vari stadi dei muoni selezionati in base a p_t , η , φ e la qualità della traccia.

4.4 DT Trigger

4.4.1 I Bunch and Track Identifier (BTI)

I circuiti che identificano le tracce e i relativi BX da associare ad esse sono chiamati **Bunch and Track Identifier** (BTI) e raccolgono le informazioni sul tempo di arrivo dei segnali ai fili di ciascun superlayer.

Ogni BTI è connesso a 9 fili ed ogni superlayer è equipaggiato con un BTI ogni 4 fili: ciò significa che i BTI sono sovrapposti su 5 fili e questa ridondanza serve a garantire il trigger anche nel caso di fallimento da parte di uno dei BTI.

Consideriamo ora un superlayer. Quando un BTI acquisisce il segnale da un tubo a deriva, lo inietta in un registro a scorrimento (figura 4.2) dove viene propagato ad una velocità corrispondente alla velocità di drift (disegno in basso della figura 4.2). Questo significa che ogni cella del registro occupata dai dati corrisponde a un colpo di clock $t_s = 12.5 \text{ ns}$ (cioè una frequenza di 80 MHz) relativo a una certa distanza s_d percorsa con una velocità di drift v_d che nel nostro caso è di $55 \mu\text{m}/\text{ns}$. Il tempo per percorrere tutto il registro a scorrimento corrisponde a T_{max} , tempo in cui un elettrone percorrerebbe metà cella a velocità v_d . Il tempo di drift per la cella i -esima è pertanto $t_i = T_{\text{max}} - i t_s$ (figura 4.2).

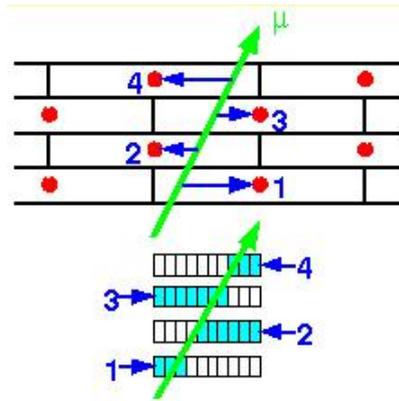


Figura 4.2: Composizione e funzionamento di un super-layer. Sopra: al passaggio di un muone vengono calcolati i tempi di drift per ogni filo anodico, e il meantimer permette di riconoscere una traccia. Sotto: i dati di ogni cella vengono memorizzati e propagati nei registri a scorrimento a partire da un'estremità indicata dalla freccia.

Partendo dall'istante in cui viene rilevato un segnale al filo n -esimo, ad ogni $t_s = 12.5 \text{ ns}$ viene incrementato i e ricalcolato t_i di tutte le celle che hanno presentato un segnale.

Presentiamo ora il calcolo che porta alla relazione del tempo medio generalizzato.

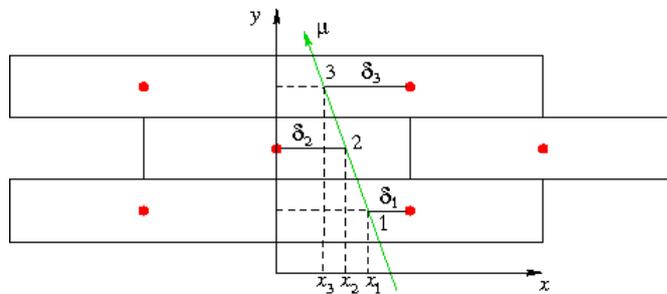


Figura 4.3: Ricostruzione della relazione del tempo medio generalizzato.

La figura 4.3 mostra 3 layer adiacenti con un sistema di riferimento cartesiano ortogonale. Siano 1, 2 e 3 i punti in cui un muone ionizza il gas nelle celle. Chiamiamo con S la distanza pari alla larghezza di metà cella, e con δ_1 , δ_2 e δ_3 le distanze rispettivamente dei punti 1, 2 e 3 dal filo della cella in cui giacciono. Si ha:

$$\begin{aligned}
x_1 &= S - \delta_1 \\
x_2 &= \delta_2 \\
x_3 &= S - \delta_3
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Dato che i punti 1, 2 e 3 sono punti equidistanti giacenti sulla stessa retta, si trova

$$x_2 - x_1 = x_3 - x_2.$$

Sostituendo a x_1 , x_2 e x_3 i valori delle 4.1, si ricava

$$\delta_2 - (S - \delta_1) = (S - \delta_3) - \delta_2$$

che equivale a scrivere

$$\delta_3 + 2\delta_2 + \delta_1 = 2S.$$

Dato che $\delta_1 = t_1 v_d$, $\delta_2 = t_2 v_d$, $\delta_3 = t_3 v_d$ e $S = T_{\max} v_d$, si arriva alla cosiddetta relazione del **tempo medio generalizzato** o **mean time**, che, scritta per 3 generici layer adiacenti ($i - 1$, i e $i + 1$), ha la forma:

$$t_{i-1} + 2t_i + t_{i+1} = 2T_{\max} \tag{4.2}$$

Pertanto un segmento può essere riconosciuto valido solo quando tre celle adiacenti soddisfano la relazione 4.2. Per come sono disposti i registri a scorrimento, al momento in cui si trova l'allineamento, ogni hit ha percorso nel registro una "distanza" $S - \delta_i$. Il tempo totale trascorso dal passaggio del muone all'istante in cui si trova l'allineamento è quindi

$$\Delta T_i = \frac{\delta_i}{v_d} + \frac{S - \delta_i}{v_d} = \frac{S}{v_d} = T_{\max}.$$

Il primo termine del secondo membro è il tempo fra il passaggio del μ e la produzione del segnale (incognita), il secondo è il tempo (noto) fra la produzione del segnale e l'allineamento. Si identifica così l'istante di attraversamento del μ , cioè il BX.

Ad ogni colpo di clock i BTI procedono anche alla determinazione di due parametri, X e K , che servono come stima rispettivamente della posizione e della direzione di traccia: prendiamo come esempio la coppia di layer B e D della figura 4.4. Con le grandezze ivi indicate abbiamo due equazioni che correlano i parametri X e K :

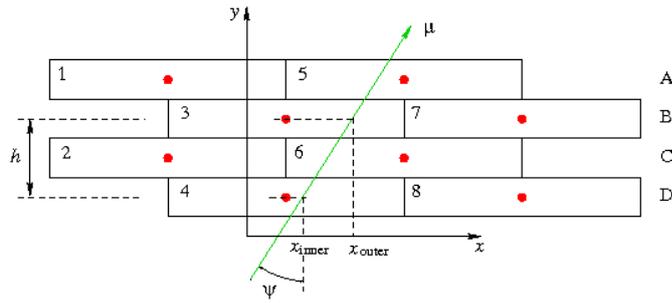


Figura 4.4: Configurazione geometrica utilizzata da un BTI.

$$X = \frac{x_{outer} + x_{inner}}{2}$$

$$K = \frac{x_{outer} - x_{inner}}{2} = \frac{h}{2} \tan \psi$$

Ogni parametro viene calcolato per tutte le 6 coppie di layer AB, AC, AD, BC, BD e CD. In caso di allineamento i 6 parametri angolari ψ devono coincidere entro una certa tolleranza programmabile. Laddove un hit venga a mancare (o per un errore di rilevazione al filo o perché non è accettabile temporalmente), si può ancora ottenere la validazione dei parametri angolari, ma in questo caso il trigger viene contrassegnato con un indicatore di *Low quality trigger* o LTRG. In caso di 4 hit validi, il trigger invece viene indicato come HTRG, *High quality Trigger*.

In definitiva i BTI forniscono segmenti di traccia ricostruiti nei superlayer e definiti da: BX (tempo), X (posizione), K (angolo), qualità (numero di punti).

Le misure della posizione e dell'angolo dipendono in modo significativo dalla velocità di drift usata dai BTI per calcolare x_{inner} e x_{outer} : essa viene misurata con massima precisione durante le fasi di calibrazione, tenendo conto anche del fatto che non è uniforme in ogni punto della cella. Un altro parametro importante che serve ai calcoli è la frequenza di clock. Poiché metà cella misura $s = 21 \text{ mm} = 21 \cdot 10^3 \mu\text{m}$, con una velocità di drift $v_d = 55 \mu\text{m/ns}$ un elettrone di drift percorre metà cella in un tempo $T_{max} = s/v_d \simeq 382 \text{ ns}$. Dato che a 80 MHz la risoluzione temporale è di 12.5 ns, il registro a scorrimento ha bisogno di 32 celle. Inoltre con la risoluzione temporale di 12.5 ns la risoluzione spaziale risulta di $55 \cdot 12.5 = 687.5 \mu\text{m} \sim 0.7 \text{ mm}$.

Le ghost tracks o false tracce

Sono frequenti i casi in cui i trigger LTRG siano in realtà delle false tracce. Infatti avendo 4 hit allineati, 3 di essi possono essere identificati dal BTI come appartenenti al valore di clock precedente o successivo a un HTRG. Questo tipo di false tracce è eliminato dal BTI scartando LTRG contigui a un HTRG.

Un secondo tipo di false tracce può essere il risultato di una mancata risoluzione dell'ambiguità destra/sinistra. In questo caso vengono eliminate dai Track Correlator nel passo successivo.

4.4.2 I Track Correlator (TRACO)

I risultati dei BTI provenienti da due super-layer (r, φ) sono associati fra loro dai circuiti correlatori di tracce (TRACO) (figura 4.5) che riducono il rumore e migliorano la risoluzione angolare. Questo miglioramento si deve

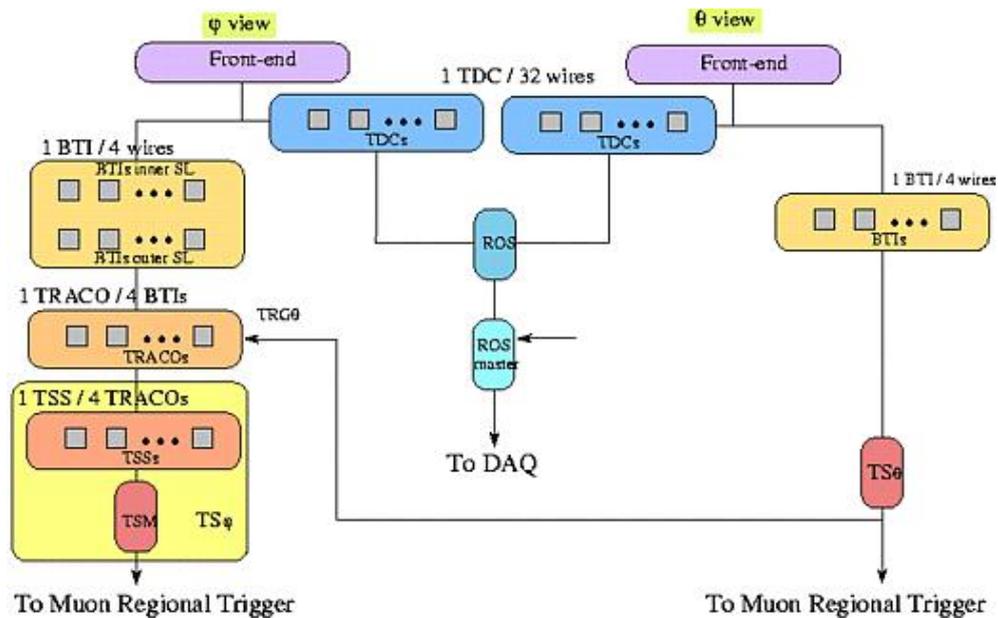


Figura 4.5: Schema a blocchi dei diversi stadi per la ricostruzione delle tracce a partire dall'elettronica di front-end fino al Muon Regional Trigger.

sostanzialmente alla distanza tra i due superlayer, come accennato nel capitolo 5. Ricordiamo che la sua importanza risiede nel fatto che la curvatura, che permette di risalire al momento trasverso del muone, è stimata attraverso l'angolo Ω compreso fra la direzione della traccia calcolata nella camera dal

BTI, e la direzione del segmento che unisce la posizione calcolata dal BTI e il vertice dell'interazione, come da figura 4.6.

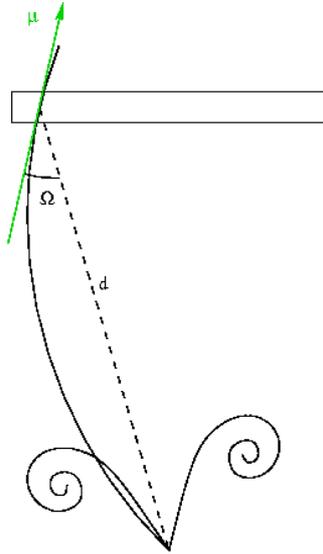


Figura 4.6: Raggio di curvatura di una traccia dall'angolo Ω e dalla distanza d .

Si ha:

$$R = \frac{d}{2 \sin \Omega}. \quad (4.3)$$

Ogni disallineamento dei fili nello spazio si riflette sui calcoli effettuati dai BTI e dai TRACO per valutare l'allineamento degli hit; non è possibile infatti in questa fase applicare correzioni per l'allineamento, come si fa offline. Questo è il motivo per cui vi sono strette tolleranze nella costruzione delle camere, come visto nel paragrafo 2.6.1.

Alle tracce correlate dal TRACO è attribuito un nuovo valore della qualità sulla base della qualità dei segmenti correlati.

Le tracce in uscita dai TRACO sono comunque trasmesse al **Trigger Server** (TS), anche in assenza di correlazione (figura 4.7).

Gli indici di qualità delle tracce che i TRACO inoltrano al TS assumono 7 valori, da 0 a 6, per cui sono necessari 3 bit per l'assegnazione di tali indici:

L_0 : Traccia non correlata LTRG del superlayer esterno

L_1 : Traccia non correlata LTRG del superlayer interno

H_0 : Traccia non correlata HTRG del superlayer esterno

H_1 : Traccia non correlata HTRG del superlayer interno

LL : Traccia correlata costituita da 2 LTRG (6 layer)

HL : Traccia correlata costituita da 1 HTRG e 1 LTRG (7 layer)

HH : Traccia correlata costituita da 2 HTRG (8 layer)

I TS riordinano i candidati segmenti di traccia per qualità e p_t e selezionano i due migliori per ogni camera dopo aver rimosso le false tracce. I segmenti di traccia di stazioni differenti sono inviati al **Track Finder** a formare tracce complete.

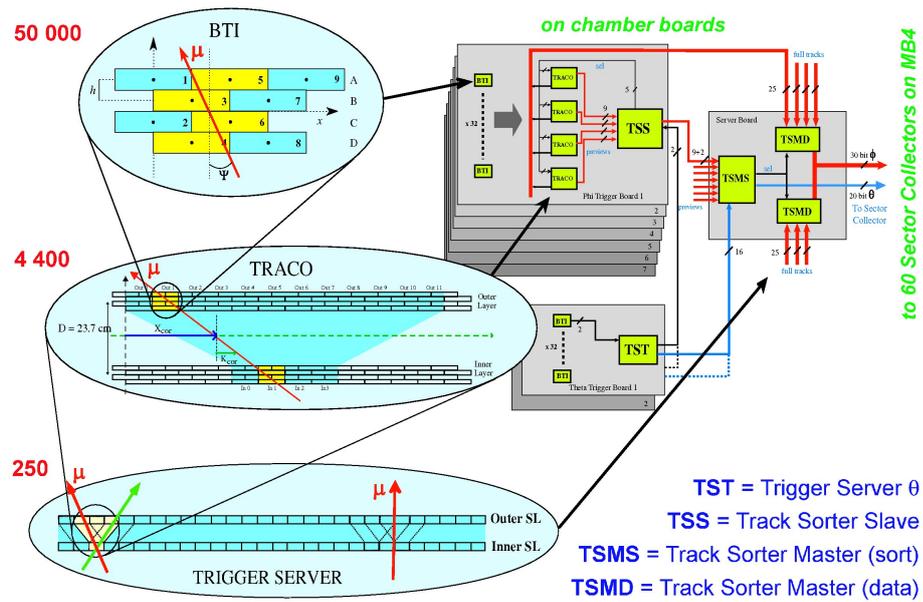


Figura 4.7: Logica del Drift Tube local trigger. Il TST è il server che smista i dati riguardanti la vista ϑ . TSS e TSM sono i selezionatori di tracce.

4.4.3 I Track Finder del barrel

Il Track Finder (TF) del barrel (figura 4.8) unisce i vettori ricevuti dalle varie stazioni DT del barrel a formare le tracce complete a p_t definiti.

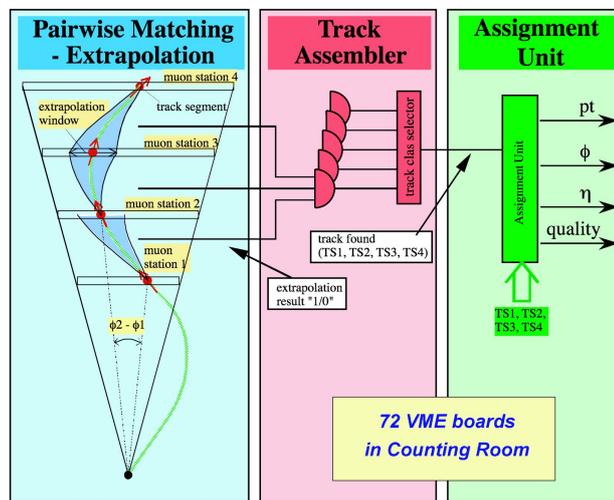


Figura 4.8: Il Track Finder del barrel.

Per ogni candidato, partendo dai segmenti di traccia di una camera di

partenza, il TF ricava la **finestra di estrapolazione**, parte di piano - in (r, φ) e in (r, ϑ) - entro cui dovrà cadere il segmento di traccia della stazione successiva. Questo calcolo viene fatto prima procedendo con le stazioni dall'interno verso l'esterno, poi in verso opposto. In parallelo ci sarà anche un tracciamento per la vista ϑ (o η).

Ogni volta che un muone cade nella finestra di estrapolazione, viene associato un bit TRUE alla traccia compresa fra due stazioni, altrimenti le viene associato un bit FALSE. I tre bit risultanti dalle estrapolazioni, vengono messi in AND fra loro; un selettore di classe di tracce seleziona i dati in base ai bit ricevuti e li inoltra a una unità di assegnamento. Qui finalmente si associano alla traccia i valori di p_t , φ , η e qualità.

L'uscita del TF va al Global Muon Trigger (GMT) che raccoglie dati analoghi anche dalle CSC e dalle RPC. Il GMT fornisce il flag Level 1 Accept (L1A), che abilita la scrittura dei dati su supporto permanente, da dove in seguito passeranno agli High Level Trigger. In mancanza di L1A i dati dei TDC, contenuti in memorie temporanee, sono cancellati.

Capitolo 5

La ricostruzione delle tracce di muoni

5.1 Generalità

L'espressione "ricostruzione delle tracce" si riferisce all'insieme delle procedure necessarie a identificare e a misurare le tracce che hanno attraversato il rivelatore. Queste procedure si applicano ai segnali "grezzi", prelevati alle uscite dei vari canali di elettronica che convogliano all'esterno le informazioni generate dalle parti attive del rivelatore.

Nel caso dei DT i segnali grezzi sono le uscite di TDC i quali digitalizzano il tempo trascorso dall'arrivo del segnale al front-end fino al momento in cui il trigger ne abilita la lettura.

L'uscita del TDC è dunque determinata dal tempo di drift e quindi dalla distanza del muone dal filo. La ricostruzione delle tracce nei DT consiste inizialmente nel ricavare, dall'uscita dei TDC, coppie di punti nello spazio equidistanti dai fili, e in seguito nel selezionare e associare questi punti a formare una traccia.

5.2 Procedure di calibrazione

Per una ricostruzione offline dei muoni, è necessario determinare preventivamente alcuni parametri.

Come detto, il primo passo nella ricostruzione dei muoni è l'individuazione della posizione di un hit partendo da un dato temporale di TDC. In generale per ricavare la distanza dal filo dato il tempo di drift, è sufficiente conoscere la velocità di drift v_d .

Nel caso dei TDC è però necessaria in primo luogo una procedura di

calibrazione che consiste nel ricavare dall'uscita del TDC (espressa in TDC units) il vero tempo di drift in ns. Questa operazione consiste non solo nella banale correzione per un fattore noto di conversione da TDC units a ns ($25/32 = 0.78$), ma soprattutto nella determinazione del piedistallo da sottrarre.

Nella pratica ciò significa procedere come qui riportato:

1. Si determina $t_0^{(i)}$ di ogni tubo, cioè il valore in unità di TDC corrispondente a tempo di drift $t_d = 0$ (come se il muone attraversasse il tubo sul filo). Questo valore è il tempo che passa fra la scarica elettronica sul filo e l'ingresso del segnale nel TDC; esso può risultare diverso per ogni canale a causa delle tolleranze dei componenti elettronici.

Per il test si invia un impulso in parallelo su 4 fili di una colonna di DT, simulando così il passaggio di un muone nel superlayer. Questa operazione è svolta in run appositi, chiamati run di "Test Pulse", la cui elaborazione fornisce per ogni canale il $t_0^{(i)}$ corrispondente che viene immagazzinato in un database e utilizzato in seguito per la calibrazione. I $t_0^{(i)}$ sono dell'ordine di alcune unità di TDC.

2. Si è detto che il TDC misura il tempo che trascorre dall'arrivo del segnale sul filo all'arrivo del trigger. Poiché il trigger è lo stesso per tutti i canali e poiché il segnale di trigger è prodotto a un tempo fisso dopo il passaggio del muone (vd. capitolo 4) l'uscita del TDC esprime il tempo di drift a meno di un segno e di una costante che deve essere determinata e sottratta, che chiamiamo T_{trig} globale, cioè comune a tutti i canali. Il T_{trig} viene ricavato fittando la salita della distribuzione, chiamata **Time Box**, già corretta per i $t_0^{(i)}$ (equalizzazione). La Time Box viene costruita e fittata separatamente per ciascun superlayer in modo che i valori ottenuti per T_{trig} tengano conto anche dell'effetto del tempo di volo del muone all'interno del rivelatore (~ 30 cm/ns).

La distribuzione dei tempi corretti per il T_{trig} e per i $t_0^{(i)}$ è una Time Box che inizia a tempo $t = 0$ (drift nullo, caso di un muone che ha attraversato la cella in corrispondenza del filo) e finisce a tempo T_{max} (drift massimo, caso di un muone che ha attraversato la cella in corrispondenza del catodo) come mostrato in figura 5.1. Questi dati esprimono quindi i veri tempi di drift;

3. Determinazione della velocità di drift. v_d potrebbe essere ricavata direttamente da T_{max} , misurato come larghezza della Time Box. Si è trovato però che una misura più accurata di T_{max} si ottiene dalla distribuzione del mean time (vd. capitolo 4) di cui un esempio è mostrato

in figura 5.2. Essa viene costruita calcolando il mean time dai tempi di drift misurati su terne di layer contigui e il suo fit gaussiano fornisce direttamente il T_{\max} come posizione del picco. Dalla figura 5.2 si nota che tale distribuzione è piuttosto piccata, per cui bastano poche centinaia di misure per avere una precisione migliore dello 0.2% sulla stima della v_d .

La massima distanza di drift (20.35 mm) divisa per il T_{\max} (368.1 ns, in figura 5.2) fornisce $v_d \simeq 55 \mu\text{m}/\text{ns}$.

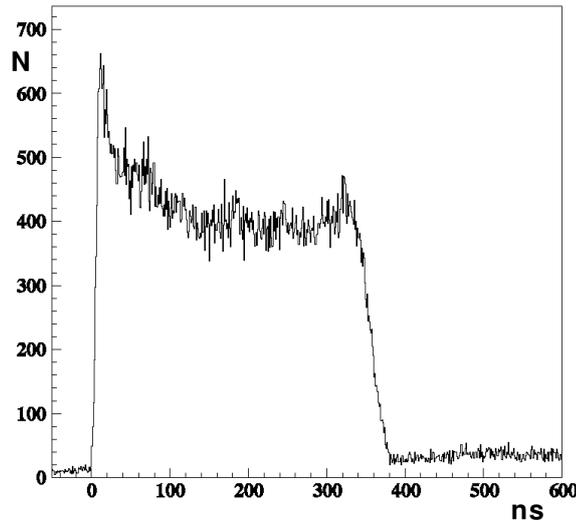


Figura 5.1: Un esempio di time box: istogramma del tempo di drift di un DT di CMS con una velocità di drift di $55 \mu\text{m}/\text{ns}$.

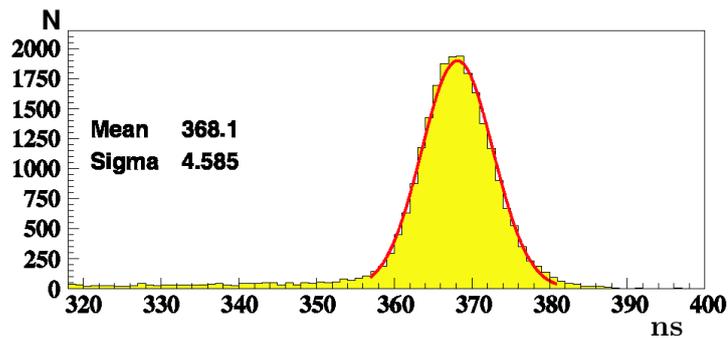


Figura 5.2: Distribuzione del tempo medio generalizzato.

Diversamente dai $t_0^{(i)}$, i T_{trig} e la v_d sono soggetti a variazioni e quindi devono essere periodicamente verificati. Il T_{trig} dipende dalla confi-

gurazione del trigger, poichè a diverse configurazioni corrispondono in generale diversi tempi di elaborazione. La v_d dipende invece dalle condizioni del gas, dal campo elettrico e dal campo magnetico; in generale quindi essa può risultare diversa da un punto all'altro del rivelatore.

Come anticipato all'inizio del paragrafo, dai tempi di drift e dalla velocità di drift si ricava, per ogni cella che ha dato un segnale, una coppia di punti nello spazio a uguale distanza dal filo.

Le coppie di punti espresse in coordinate globali vengono chiamate, nel linguaggio di CMSSW, **RecHit1D** (il suffisso "1D" si riferisce all'unico grado di libertà spaziale che caratterizza i punti).

Per ricostruire le tracce muoniche è necessario conoscere le coordinate degli hit; questo richiede di conoscere, oltre alla loro posizione locale (cioè in una cella) rispetto ai fili, le coordinate dei fili stessi. Dato che la precisione della ricostruzione dipende in modo determinante da tali coordinate, è fondamentale misurare in maniera accurata gli allineamenti e le distanze delle varie parti fra loro. La determinazione esatta della posizione dei fili è lo scopo di una procedura apposita, detta **allineamento**.

5.3 L'allineamento

Le possibili cause di disallineamento nel rivelatore muonico sono:

tolleranze di costruzione delle camere: queste sono inevitabili tolleranze geometriche nella costruzione delle parti delle camere come il posizionamento dei fili nel proprio layer o lo spostamento relativo dei superlayer durante l'assemblaggio;

effetti dovuti all'installazione, all'apertura e alla chiusura del rivelatore, le deformazioni per il peso proprio, per il campo magnetico e per le variazioni di temperatura. Tutte cause che possono generare deformazioni al telaio di alluminio.

Per controllare gli allineamenti durante i collaudi e in configurazione finale, CMS combina misure di sistemi opto-meccanici con i risultati di algoritmi basati su tracce che attraversano il rivelatore; i dati vengono immagazzinati in database pronti ad essere utilizzati per la ricostruzione.

5.4 Il processo di ricostruzione delle tracce

La ricostruzione delle tracce si realizza in diversi passi successivi:

Ricostruzione Locale: a partire dai RecHit1D si arriva a formare candidati segmenti all'interno di ciascuna stazione;

Ricostruzione Standalone: dai candidati segmenti prodotti dalla ricostruzione locale si giunge a ricostruire le tracce limitatamente ai rivelatori muonici;

Ricostruzione Globale: dalle tracce ricostruite nel barrel e negli endcap, si procede nel tracker verso il vertice di interazione: è questo il primo momento in cui si considerano anche i dati provenienti da rivelatori diversi dalle DT chamber e dalle CSC.

5.4.1 Ricostruzione Locale

La ricostruzione locale consiste nel partire dagli hit ricostruiti, che, ricordiamo, sono coppie di punti equidistanti dal filo, per ottenere segmenti di traccia che riguardano una singola camera (figura 5.3).

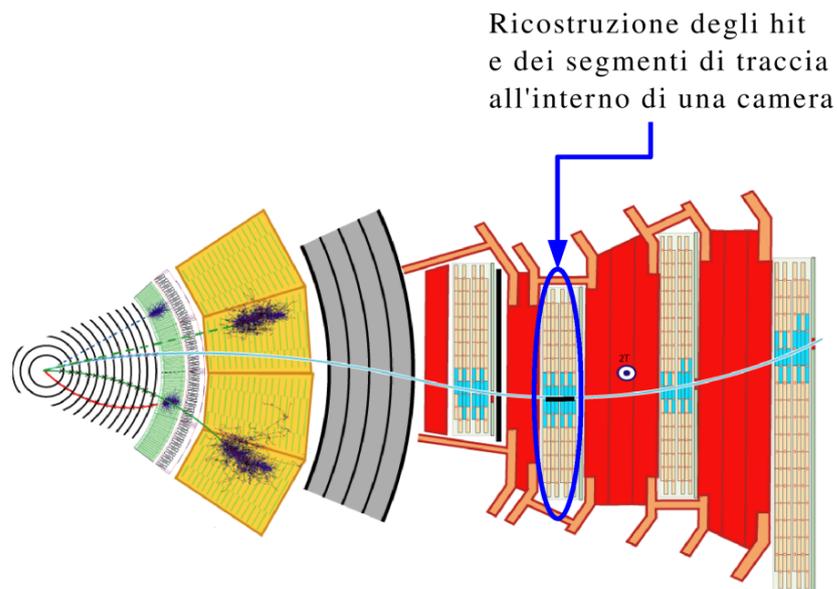


Figura 5.3: La ricostruzione locale dei muoni muove dai RecHit1D per formare un segmento all'interno della camera.

Inizialmente su due layer non consecutivi di uno stesso superlayer si prendono due punti; poi negli altri layer si cercano tutti gli hit che insieme ai due precedenti possono formare dei segmenti mediante fitting lineare entro un errore fissato.

In seguito si selezionano solo gli insiemi di hit con un minore χ^2 , risolvendo, in questo modo, anche l'ambiguità destra/sinistra.

A questo punto abbiamo un insieme di candidati segmenti; si procede pertanto al controllo degli hit comuni a più segmenti: in caso affermativo, si assegnano gli hit al segmento che ha il minore χ^2 e il maggior numero di hit associati.

Segmenti di questo tipo vengono chiamati “2D” in riferimento ai gradi di libertà spaziali che li caratterizzano. Ognuno di essi è infatti definito su un piano - (r, φ) ed (r, z) - ed è determinato da una posizione e da un angolo. Gli hit associati a segmenti ricostruiti nei superlayer φ vengono poi rifittati per formare segmenti estesi a comprendere al massimo 8 hit.

Coppie di segmenti 2D nelle due proiezioni vengono associati a formare i segmenti cosiddetti “4D”: essi non sono ancora veri e propri segmenti nello spazio tridimensionale, ma sono dotati di informazioni nelle tre dimensioni. In particolare l'associazione di una coordinata z a un segmento φ permette anche di definire la posizione del muone lungo il filo e quindi calcolare un'ulteriore correzione al tempo di drift che tiene conto del tempo di propagazione del segnale sul filo dal punto in cui è generato fino al frontend, cioè all'ingresso nel TDC. Dopo questa correzione gli hit vengono aggiornati e si procede con un nuovo fitting dei segmenti.

5.4.2 Il ruolo della risoluzione nella ricostruzione locale dei muoni.

Si è detto che nel corso del fit lineare si associa ad ogni punto un errore fisso. L'entità di questo errore (che in generale non cambierebbe i parametri del fit intercetta e pendenza) è importante in questo contesto in quanto, come detto, vengono scartati i punti con residui troppo grandi.

Dato che un segmento raramente passa esattamente per le coordinate dei diversi hit, si accetta una certa tolleranza o **risoluzione** della posizione di un hit rispetto al candidato segmento. Sulla sinistra della figura 5.4 il secondo hit, considerato con la sua risoluzione δ_1 , non sarà ritenuto valido nella ricostruzione della traccia e, quindi, scartato.

Sulla destra della stessa figura si vede che aumentando la risoluzione a $\delta_2 > \delta_1$ il candidato segmento intercetta l'intervallo in cui il secondo hit può essere considerato valido nella ricostruzione della traccia. In questo caso esso non viene scartato. Come vedremo nel capitolo 6, questo fenomeno gioca un ruolo fondamentale per il calcolo dell'efficienza della camere effettuato mediante i muoni cosmici.

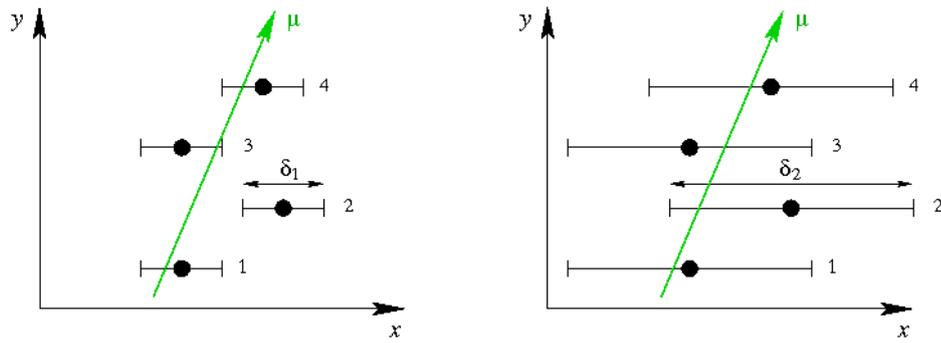


Figura 5.4: Effetti della risoluzione sulla selezione degli hit: a sinistra la risoluzione δ_1 non è sufficiente per ritenere un hit parte della traccia; a destra, grazie alla risoluzione δ_2 , lo stesso hit può essere ritenuto valido nella ricostruzione della traccia.

5.4.3 Ricostruzione Standalone (SA)

La ricostruzione SA fa uso delle informazioni dell'intero rivelatore di muoni per ricostruire una traccia a partire dai risultati della ricostruzione locale in diverse camere (figura 5.5).

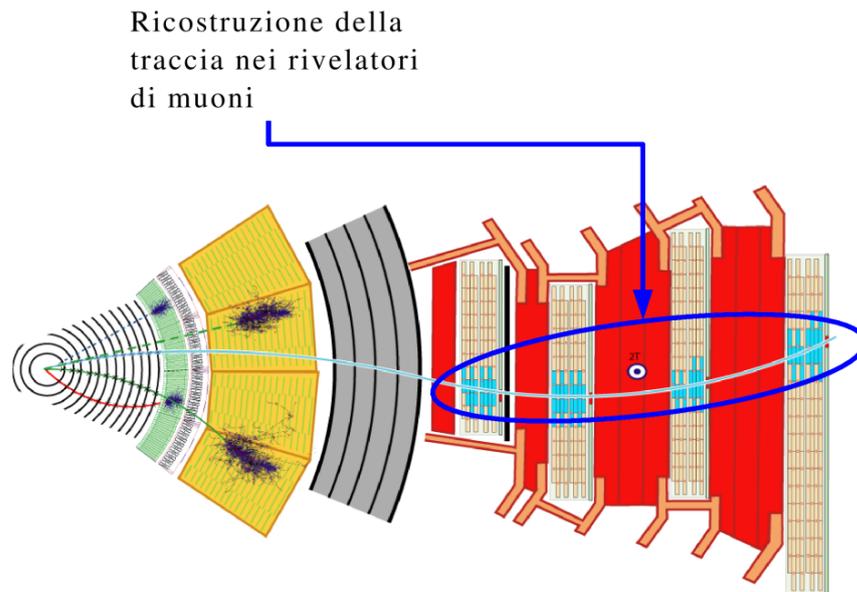


Figura 5.5: La ricostruzione SA dei muoni parte dai segmenti della ricostruzione locale e li unisce per formare una traccia.

Poichè le tracce SA hanno una lunghezza dell'ordine di alcuni metri, in

questa fase non si può più fare uso di fit lineari, in quanto su tali distanze non si possono più trascurare gli effetti di curvatura della traiettoria dovuti al campo magnetico e allo scattering multiplo dei muoni nel ferro tra le camere.

L'algoritmo usato si basa sul filtro di Kalman [26]. In primo luogo viene individuato uno stato di partenza, definito da due vettori corrispondenti rispettivamente alla posizione e al momento della traccia nel punto in cui essa penetra nel rivelatore. Come stato di partenza viene scelto il primo punto misurato, che per eventi prodotti al vertice d'interazione di LHC è anche il più interno tra i punti misurati. Esso viene ricavato dall'insieme dei risultati del passo precedente, vale a dire dai segmenti 4D.

La posizione, la direzione e il momento iniziali, sono usati da un **propagatore** che, tenendo conto della perdita di energia nel materiale e del campo magnetico, circoscrive un cono in cui cercare hit successivi da associare alla traccia da ricostruire. L'associazione di hit ulteriori fa variare i parametri della traccia e la procedura prosegue iterativamente fino all'uscita dal rivelatore in corrispondenza dell'ultimo (e più esterno) punto misurato.

Notiamo subito che questa procedura non è reversibile: sia per l'effetto del campo magnetico che per la perdita di energia, ogni traiettoria ricostruita può essere percorsa solo in un verso e non nel verso opposto.

Il risultato della ricostruzione è un oggetto C++ che ha tra i suoi membri le informazioni della traccia nel primo e nell'ultimo punto misurato.

5.4.4 Ricostruzione Globale

In questa fase per la ricostruzione delle tracce vengono usati anche gli hit del tracker così da costruire tracce che attraversino l'intero rivelatore a partire dal vertice d'interazione (figura 5.6).

Questo passo non è mai stato provato su dati reali perchè non sono ancora disponibili dati con le informazioni simultanee del tracker e del rivelatore di muoni.

Il lavoro svolto in questa tesi e presentato nel prossimo capitolo è costituito invece in un'applicazione della ricostruzione SA a dati cosmici acquisiti con diversi settori di camere DT.

Ricostruzione della traccia
combinando le informazioni
del tracker e del muon system

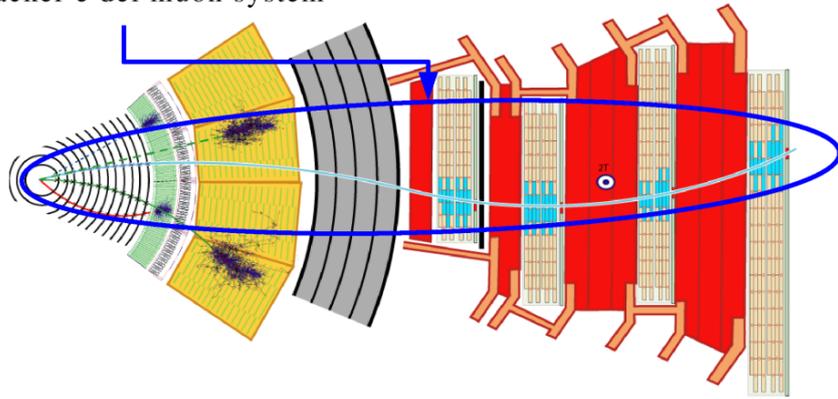


Figura 5.6: La ricostruzione globale dei muoni parte dalle tracce SA e usa le informazioni del tracker.

Capitolo 6

L'analisi con muoni cosmici

6.1 Dei muoni cosmici

Nell'attesa delle collisioni a LHC, per collaudare le diverse parti di CMS si ricorre a particelle provenienti dal cosmo, nel nostro caso i muoni, che arrivano a noi come prodotti delle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera ad una quota di circa 12-15 km.

6.1.1 I raggi cosmici e il leptone μ

Da quasi 100 anni è noto che la Terra è perennemente esposta alla radiazione cosmica, una radiazione naturale proveniente dallo spazio.

Al di là dell'atmosfera i raggi cosmici sono costituiti principalmente da protoni. Giunte vicino alla Terra, tali particelle interagiscono con i nuclei delle molecole presenti nell'alta atmosfera formando così, in un processo a cascata, nuove particelle dirette verso il suolo terrestre (figura 6.1). I secondari prodotti possono interagire a loro volta oppure decadere in volo. I muoni cosmici sono principalmente il risultato del decadimento dei π (e dei K) carichi.

La radiazione secondaria al livello del mare è costituita da due componenti, molle e dura, che hanno diverso comportamento nell'attraversamento di mezzi molto densi (ferro, piombo, ecc.).

La componente molle (circa il 30% della radiazione secondaria), composta in gran parte da elettroni e fotoni, è capace di attraversare solo pochi centimetri di assorbitore. La componente dura (circa il 70%), composta da muoni, riesce a penetrare spessori maggiori di 1 metro.

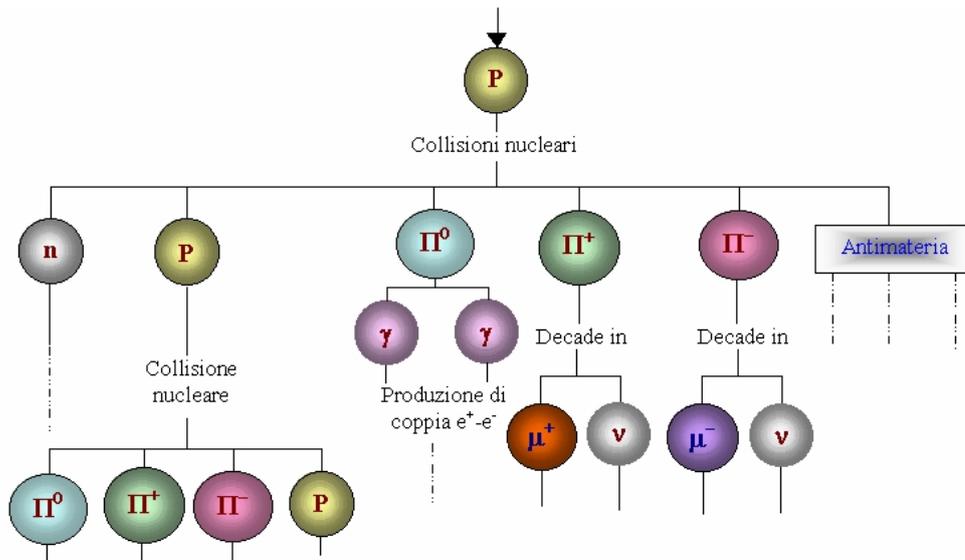


Figura 6.1: Formazione della radiazione cosmica secondaria. Le linee tratteggiate indicano che altre reazioni possono avvenire.

6.1.2 Qualche considerazione energetica

Il flusso medio delle particelle cariche su una superficie orizzontale al livello del mare è circa $200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con una distribuzione angolare rispetto alla normale alla superficie della Terra descrivibile da una funzione del tipo $f(\vartheta) = k \cos^2 \vartheta$, dove k è una costante.

Come detto, i μ sono prodotti in alta atmosfera principalmente dal decadimento di π carichi:

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{aligned}$$

Alla produzione essi possiedono energie tali che la dilatazione relativistica della vita media permette loro di giungere al livello del mare.

Possiamo calcolare l'ordine di grandezza dell'energia con cui arrivano al suolo terrestre. Se indichiamo con s la distanza percorsa dal muone, m la sua massa, τ la sua vita media e p la sua quantità di moto, con la consueta notazione della relatività, le relazioni che legano queste grandezze sono:

$$p = \beta \gamma m c \tag{6.1}$$

$$s = \beta \gamma c \tau = \frac{p}{m} \tau \tag{6.2}$$

Se nella 6.2 prendiamo $s \gtrsim 12000$ m la distanza percorsa dal muone, $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ la sua massa [7], e $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6}$ s la sua vita media, perché il muone arrivi al livello del mare deve possedere un'energia $E \simeq p \cdot c \gtrsim 2 \text{ GeV}$. Queste stime sono in accordo con le misure.

6.2 Test delle camere DT con raggi cosmici

Come accennato, prima che le camere a deriva per muoni vengano utilizzate per rivelare eventi prodotti dalle collisioni pp , sono state, e sono tutt'ora, sottoposte a varie fasi di collaudo.

I primi test furono effettuati nei siti di produzione per controllare il corretto assemblaggio delle parti meccaniche (catodi, fili, strips) e dell'elettronica di lettura (Front End Boards o FEB). Le camere furono quindi installate nel giogo di ritorno del campo magnetico di CMS, costituito dalle 5 ruote mostrate in figura 2.1, che costituiscono anche la struttura portante del rivelatore.

Prima e dopo l'installazione si eseguirono altri test per verificare sia eventuali danni causati dal trasporto delle camere, sia il funzionamento dei nuovi componenti installati. In particolare, dopo l'installazione, ogni singola camera fu sottoposta a test con raggi cosmici in regime di autotrigger: il segnale per l'acquisizione dei dati veniva cioè derivato dal sistema di trigger locale della camera stessa [14]. Questi dati, opportunamente analizzati, permisero di determinare l'efficienza di ogni singolo filo e l'efficienza di ricostruzione dei segmenti di traccia eseguita con gli algoritmi standard di fit di CMS (vd. capitolo 5).

Un'altra importante fase di test fu costituita dal Magnet Test and Cosmic Challenge che si svolse al CERN tra l'estate e l'autunno del 2006. In questo test si utilizzarono soltanto tre settori di DT per un totale di 14 camere, ma, benchè le particelle rivelate fossero sempre muoni cosmici, per la prima (e al momento ultima) volta si presero dati in presenza del campo magnetico: come suggerisce l'espressione "MTCC", il test costituì infatti anche un primo collaudo del magnete, che fu portato per la prima volta al valore di 4 T. Non solo si videro dunque per la prima volta tracce che attraversavano più camere, ma si poterono studiare anche gli effetti del campo magnetico sul rivelatore e sul funzionamento del sistema di trigger [14].

A installazione ultimata le ruote sono state calate nella caverna. Le camere sono state poi "cablate", cioè connesse individualmente ai sistemi di alimentazione e di lettura definitivi che permettono loro di essere utilizzate simultaneamente come nella configurazione finale. Si è potuto quindi proce-

dere a test via via più estesi (*sector test* prima, *wheel test* poi) acquisendo cioè contemporaneamente dati prodotti da un numero crescente di camere.

Per l'analisi che presentiamo in questo capitolo, abbiamo utilizzato dati di questo tipo, raccolti dalla ruota centrale YB0.

6.3 Ricostruzione di tracce cosmiche

I raggi cosmici sono una risorsa utile, economica e abbondante che permette di collaudare i componenti del rivelatore prima della sua entrata in funzione a LHC. Tuttavia CMS è stato progettato nell'intento di studiare la Fisica delle collisioni dove le particelle seguono un percorso che procede dal centro di massa dei fasci (che è il centro del rivelatore), verso l'esterno.

Il caso dei muoni cosmici, invece, è nettamente diverso: essi differiscono da quelli prodotti dalle collisioni in LHC, oltre che per lo spettro di energia, per tre caratteristiche che influenzano significativamente sia la rivelazione che la ricostruzione:

1. in generale non passano per il vertice di interazione;
2. attraversano le camere in istanti del tutto casuali con probabilità uniforme;
3. non percorrono il rivelatore dal centro verso la periferia ma lo attraversano in ogni direzione, provenendo per lo più dall'alto; questo significa che certi settori vengono percorsi in direzione opposta a quella di progetto, e che singole tracce attraversano entrambi gli emisferi del rivelatore.

Mentre della prima caratteristica si tiene conto facilmente nella configurazione del trigger e nella ricostruzione, la seconda caratteristica riduce intrinsecamente l'efficienza del trigger. Infatti, come spiegato nel capitolo 4, il sistema di trigger è basato su un clock che ha la stessa frequenza di LHC ed è con esso sincronizzato. Ci aspettiamo dunque una minore efficienza per i muoni che attraversano il rivelatore a metà di un ciclo di clock. Inoltre, poichè dallo stesso clock si ricava il tempo t_0 da attribuire all'evento e quindi alle singole tracce, tempo che funge da istante iniziale di riferimento per la determinazione dei tempi di drift, le tracce asincrone rispetto al clock si vedono assegnare un t_0 meno accurato; l'inaccuratezza si trasmette ai tempi di drift e quindi alle posizioni degli hit. Si avranno quindi in generale insiemi di punti meno allineati rispetto a quelli ricostruiti per le tracce sincrone con il clock e una conseguente maggiore probabilità di fallimento del fit lineare applicato per ricostruire i segmenti di traccia.

La terza caratteristica influisce sull'efficienza della ricostruzione “stand alone” attraverso molte camere. La procedura iterativa di questo fit non lineare tiene infatti conto del materiale attraversato poichè su lunghe distanze i suoi effetti sulla propagazione delle tracce non possono essere trascurati e la perdita di energia fissa il verso in cui ogni traiettoria viene percorsa.

Ci aspettiamo dunque che la ricostruzione ottimizzata per eventi pp non sia efficiente per i cosmici che penetrano dall'esterno percorrendo parte del rivelatore in senso opposto.

6.4 Condizioni di acquisizione

I dati utilizzati per l'analisi oggetto di questa tesi sono stati raccolti nella caverna di CMS, con le sole camere DT (run locali) e con ruote singole e isolate. Essendo il rivelatore aperto, non c'era naturalmente campo magnetico.

Nel run 26402 venivano letti tutti i settori della YB0 (la ruota centrale) ma solo i settori inferiori (7-12) davano il trigger.

Nel run 23946 venivano letti i settori 4 e 10 (cioè i due settori orizzontali in alto e in basso) della YB+2 e entrambi davano il trigger.

Per il trigger in entrambi i casi si era usata una configurazione “tecnica”, destinata ad incrementare il rate di acquisizione che per i cosmici in caverna è ~ 100 volte più basso che in superficie. Questa configurazione consiste di un OR del trigger delle singole camere.

6.5 Il propagatore

L'algoritmo che abbiamo usato per la ricostruzione SA era già stato adattato per i cosmici in modo da funzionare su tracce che non passano per il vertice e che attraversano uno o più settori dall'esterno all'interno. Questa versione adattata, `CosmicMuonProducer`, non era stata però ancora provata in modo sistematico su dati reali.

Abbiamo quindi ritenuto opportuno, prima di procedere ad analisi statistiche, controllare visivamente, evento per evento, alcune tracce ricostruite in relazione ai punti misurati (`RecHit1D`).

A questo scopo abbiamo usato il **propagatore** `SteppingHelixPropagator`. Si tratta di uno strumento software implementato in `CMSSW`, che a partire da una traccia ricostruita, definita da un insieme di valori di coordinate e di momento riferiti a un certo punto dello spazio, “propaga”, appunto, la traccia tenendo conto del materiale attraversato e dell'eventuale campo magnetico,

e calcola i corrispondenti valori di coordinate e momento su una qualsiasi superficie intersecata dalla traccia e definita dall'utente.

Per verificare il funzionamento della ricostruzione abbiamo dunque propagato alcune tracce ricostruite con la versione 1.6.3 di `CosmicMuonProducer` per trovarne le posizioni sui singoli layer delle camere attraversate, così da confrontare queste posizioni con i punti effettivamente misurati e “associati” alla traccia, utilizzati cioè dall'algoritmo di ricostruzione per formare la traccia in questione.

Dopo aver registrato su un file le coordinate sia delle posizioni estrapolate della traccia sui layer che dei punti associati, li abbiamo visualizzati con ROOT, segnando in nero i punti estrapolati e in rosso i punti misurati.

Il primo (sfortunato) risultato di tale procedura è mostrato in figura 6.2. Il lato del plot è di 16 m, adeguato a contenere l'intero rivelatore: a questa scala i punti distinguibili si riferiscono non ai singoli layer ma ai superlayer. I punti misurati sono dunque nelle 4 camere del settore 11. Essi sono disposti, come ci si aspetta, su una linea retta. La traccia ricostruita (visualizzata attraverso le sue intersezioni con i layer, punti neri nel plot) segue invece una traiettoria curvilinea. Questo dimostra che nella procedura di ricostruzione il software ha fatto indebitamente uso di un campo magnetico non nullo. Di fatto il campo magnetico nominale di CMS era implementato di default attraverso il modulo `VolumeBasedMagneticField`.

La presenza di un campo magnetico (fittizio) faceva sì che alle tracce ricostruite venisse assegnata anche una carica (che in assenza di campo magnetico ovviamente non può essere determinata), come si vede nelle figure 6.4 in cui diverse tracce mostrano curvatura ora levogira, ora destrógira. Tale carica veniva probabilmente determinata dall'inclinazione dei segmenti di traccia nel primo punto misurato.

L'esclusione del campo magnetico ha richiesto l'interfacciamento del software con il modulo (già disponibile) `UniformMagneticField` che, come il nome suggerisce, descrive un campo magnetico uniforme lungo z e il cui valore può essere fissato dall'utente. Fissato a 0 il valore del campo magnetico le traiettorie ricostruite hanno assunto il previsto aspetto rettilineo (figura 6.3).

6.6 Ricostruzione Standalone con `CosmicMuonProducer` 1.6.3

6.6.1 Definizione di `Innermost Point` in 1.6.3

Come si è detto nel paragrafo 5.4.3, la traccia ricostruita è definita nel primo e nell'ultimo punto misurato. Nel caso di tracce prodotte al vertice di collisione,

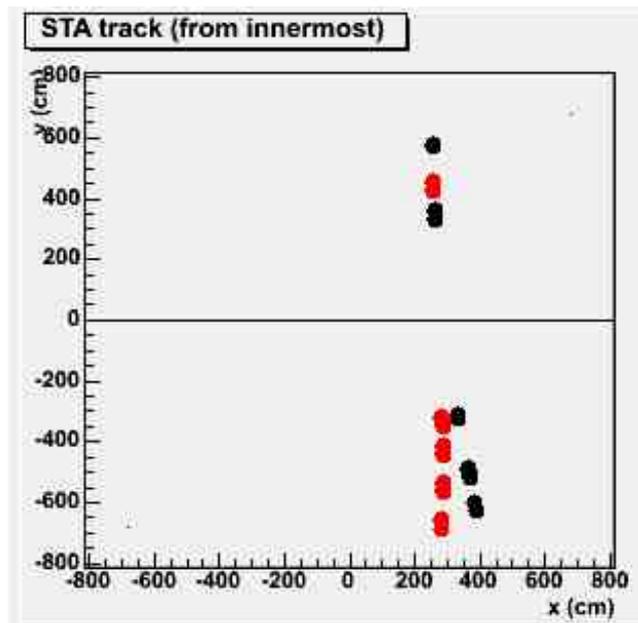


Figura 6.2: Gli hit ricostruiti dalle misure in assenza di campo magnetico giacciono su una retta (punti rossi), mentre i punti nei layer calcolati col propagatore con campo magnetico non nullo (punti neri) giacciono su una curva.

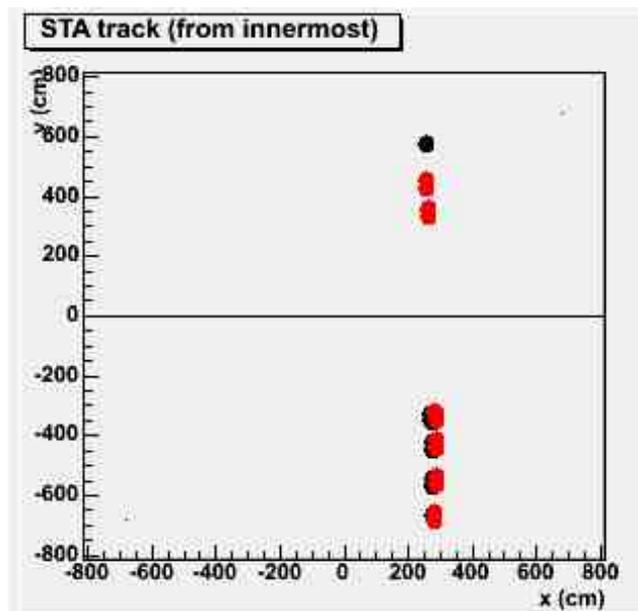


Figura 6.3: Le traiettorie calcolate col propagatore con campo magnetico fissato a 0 seguono gli hit ricostruiti dalle misure.

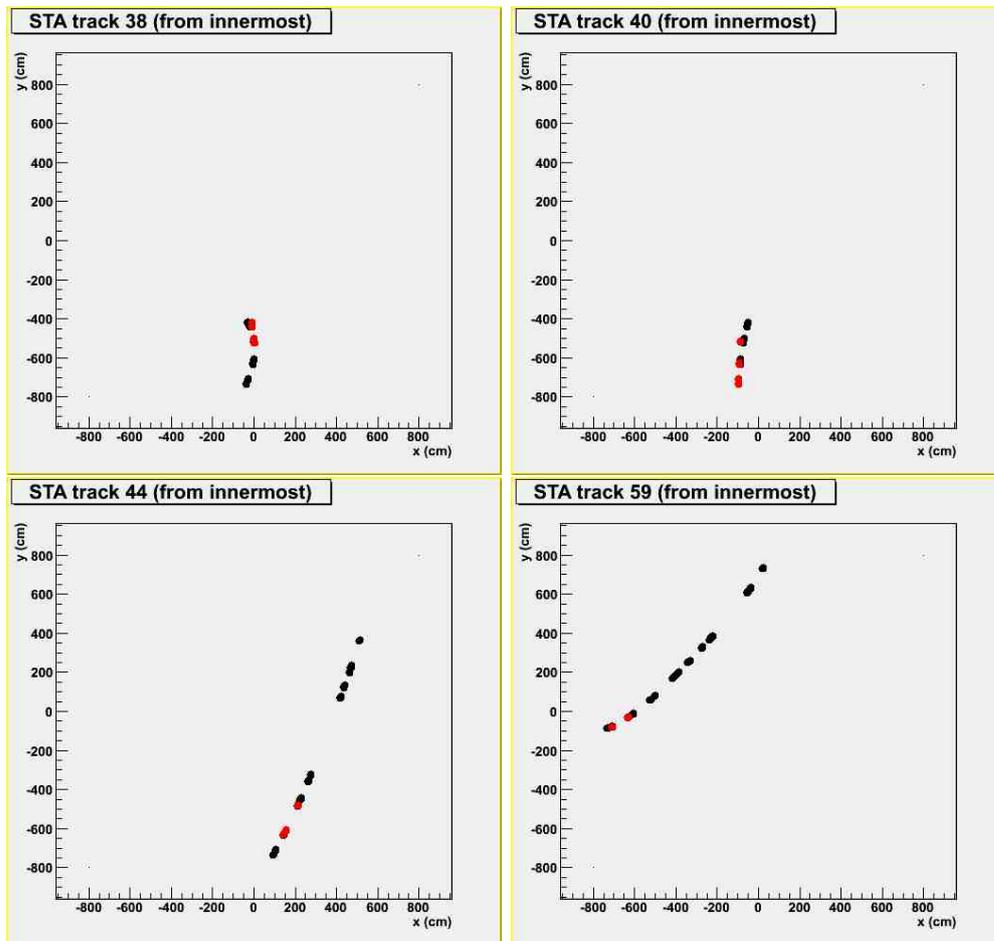


Figura 6.4: Alcune tracce osservate nella ruota YB0. Notare le diverse curvature delle tracce propagate.

il primo punto misurato è sempre anche il punto più interno. Nel caso dei cosmici questa corrispondenza non esiste: tenendo conto della distribuzione angolare dei cosmici ci aspettiamo che il primo punto misurato sia nella parte alta del rivelatore.

Questa osservazione non è confermata dalle distribuzioni dei punti innermost e outermost misurati sul piano (x, y) (figura 6.5) ottenuti con la versione 1.6.3. Come si vede la massima concentrazione dei punti innermost è nelle camere MB4 dei settori inferiori e MB1 dei settori superiori. Viceversa per i punti outermost.

La definizione di primo punto misurato non è arbitraria in quanto, come già detto nel paragrafo 5.4.3, la propagazione delle tracce nel materiale del rivelatore ha una direzione fissata.

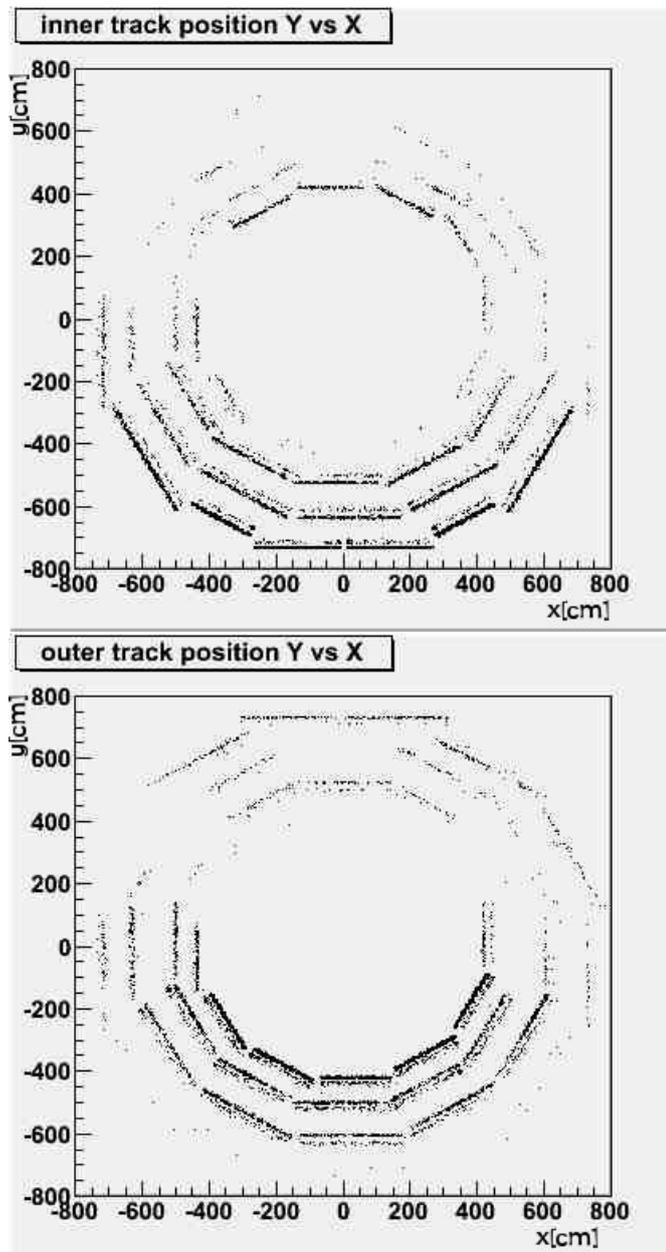


Figura 6.5: Distribuzione dei punti innermost (in alto) e outermost (in basso) misurati sul piano (x, y) ottenuti con la versione 1.6.3.

Possiamo verificare questo osservando le distribuzioni dei residui (figura 6.6), cioè della distanza tra punto misurato e corrispondente punto estrapolato nel layer (rispettivamente punti rossi e neri nei plot di visualizzazione degli eventi).

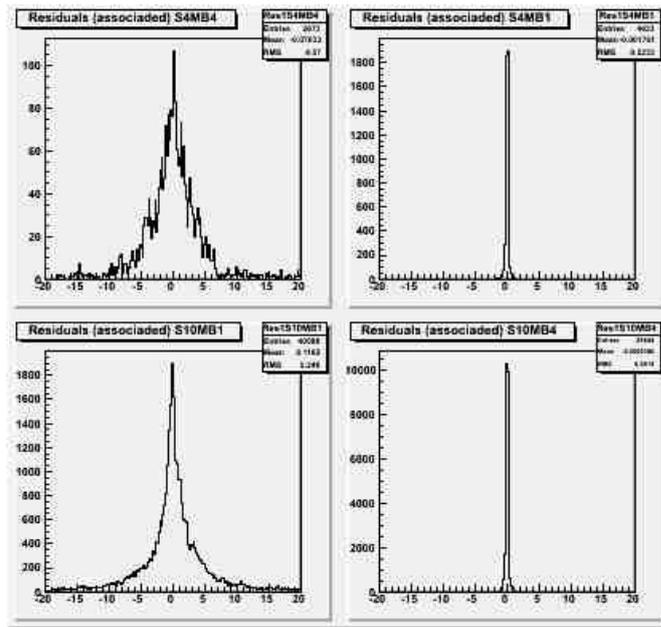


Figura 6.6: Distribuzioni dei residui tra i punti misurati e i punti estrapolati: l'incremento non avviene nella direzione di propagazione, come invece ci si aspetterebbe a causa dello scattering. Dall'alto a sinistra al basso a destra: S4/MB4, S4/MB1, S10/MB1, S10/MB1.

Queste distribuzioni confermano che i residui sono maggiori nelle camere superiori di ciascun settore e che lo scattering coulombiano è applicato dal basso verso l'alto, contrariamente al verso di propagazione dei muoni cosmici.

6.6.2 Ricostruzione di tracce che attraversano l'intero rivelatore

Per verificare il funzionamento della ricostruzione su tracce che attraversano l'intero rivelatore abbiamo osservato quanti settori, quante stazioni e quanti layer contribuiscono a ciascuna traccia ricostruita. Le distribuzioni sono mostrate in figura 6.7.

Da questi plot si osserva che, sebbene occasionalmente fino a 4 settori contribuiscono ad una traccia, il numero di stazioni non è mai superiore a 4 e il numero di layer non è mai superiore a 44, il che indica che quando si ha più di un settore non si tratta mai di settori opposti ma contigui. Nel campione di tracce ricostruite, cioè, non vi sono tracce che attraversino entrambi gli emisferi.

Eventi di questo tipo danno luogo nella ricostruzione a due tracce separa-

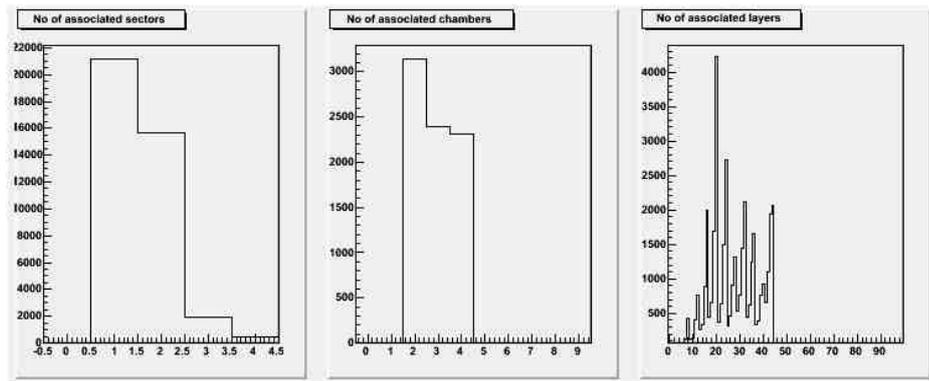


Figura 6.7: Distribuzioni del numero di settori, stazioni e layer che contribuiscono alla ricostruzione delle tracce.

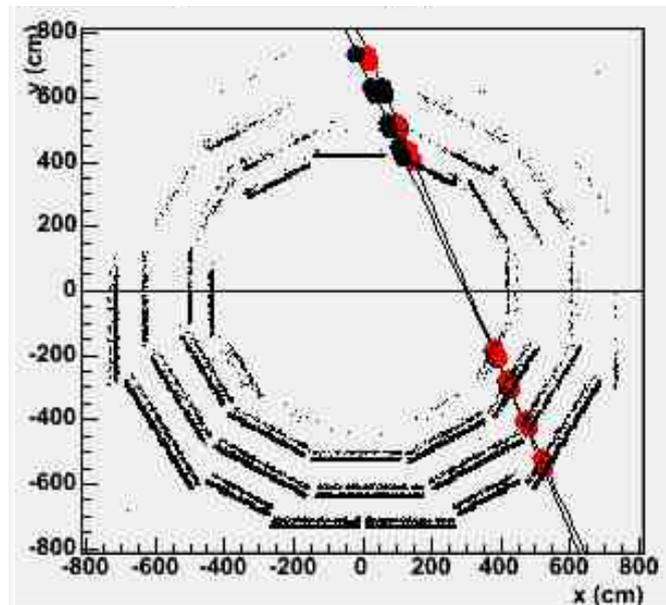


Figura 6.8: Erronea ricostruzione di due tracce indipendenti.

te, una in ciascun emisfero. Un esempio è l'evento 46 del run 26402 mostrato in figura 6.8 dove due tracce indipendenti sono state ricostruite nel settore 12 e nei settori 3 e 4 rispettivamente, ma la visualizzazione dell'evento mostra che in realtà si tratta di un'unica traccia che entra nel settore 4 e esce dal settore 12. Per dare un riferimento spaziale, come sfondo è stata aggiunta la distribuzione del primo punto misurato di tutte le tracce.

La frazione di eventi di questo tipo può essere stimata dalla distribuzione del numero di tracce ricostruite per evento (figura 6.9). Essa ammonta al

3.8% e osservando l'angolo compreso tra le due tracce (a destra della figura), abbiamo la conferma che si tratta di tracce parallele, quindi provenienti da un'unica traccia erroneamente sdoppiata dalla ricostruzione.

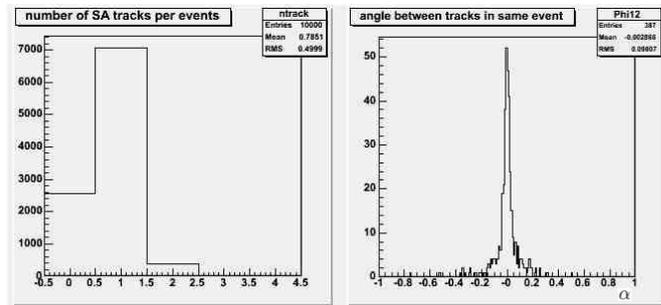


Figura 6.9: A sinistra: distribuzione del numero di tracce ricostruite per ogni evento; a destra: distribuzione degli angoli compresi fra due tracce distinte negli eventi dove sono presenti.

6.7 Ricostruzione Standalone con ComicMuonProducer 1.7.0

Avendo segnalato le stranezze della 1.6.3 ai responsabili del programma di ricostruzione, in una successiva versione dell'algoritmo e del codice, `ComicMuonProducer 1.7.0`, i problemi riscontrati per la versione 1.6.3 sono stati risolti.

6.7.1 Definizione di Innermost Point in 1.7.0

La definizione di innermost point è ora in accordo con quanto ci si aspetta per i cosmici: il primo punto misurato si colloca cioè nelle stazioni superiori e l'ultimo (outermost) in quelle inferiori (vd. figura 6.10).

Ricordiamo che questi eventi sono stati acquisiti con la ruota YB0 isolata, e triggerati dai settori inferiori. Per questa ragione un'alta percentuale di tracce ha il primo punto misurato nelle MB1 dell'emisfero inferiore.

Anche la distribuzione dei residui è ora conforme alle aspettative: per effetto dello scattering coulombiano, infatti, aumentano i residui nella giusta direzione di propagazione, cioè dall'alto verso il basso (vd. figura 6.11).

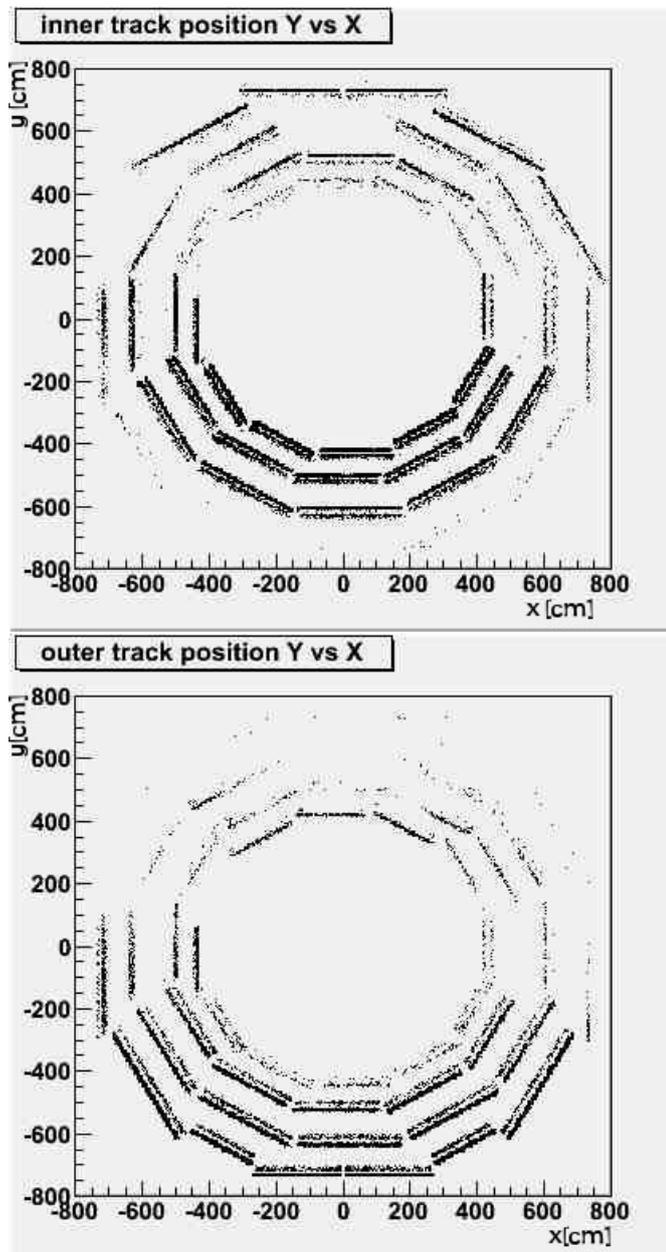


Figura 6.10: La definizione dei punti innermost e outermost nella versione 1.7.0 del CmsicMuonProducer. In alto: punti innermost; in basso: punti outermost.

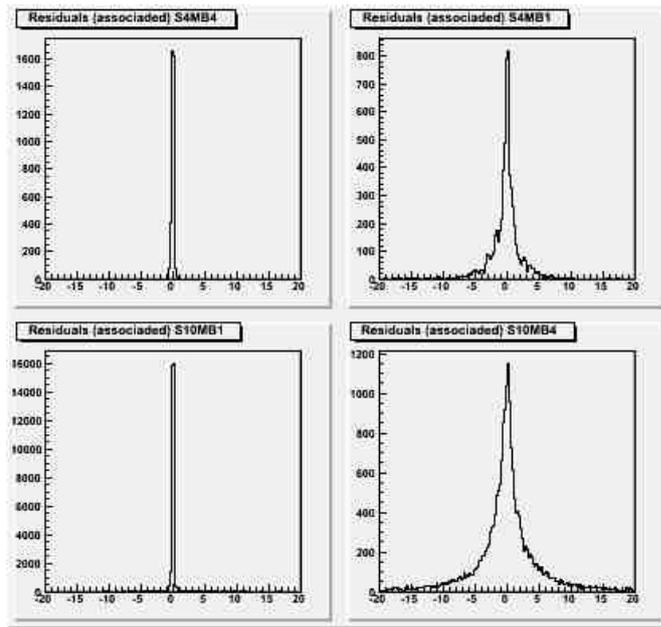


Figura 6.11: Il corretto incremento dei residui nella direzione di propagazione dei muoni cosmici (cfr. figura 6.6). Dall'alto a sinistra al basso a destra: S4/MB4, S4/MB1, S10/MB1, S10/MB4.

6.7.2 Ricostruzione di tracce che attraversano l'intero rivelatore

Nella versione 1.7.0 è stato risolto anche il problema delle tracce che attraversano l'intero detector. Nella figura 6.12 mostriamo l'evento 46 come ricostruito con la nuova versione, in cui, come atteso, si vede un'unica traccia che attraversa i due emisferi.

Questo risultato si può verificare in modo statistico con le distribuzioni del numero di settori, di camere e di layer che contribuiscono alle tracce ricostruite (vd. figura 6.13). Il numero di camere si estende ora fino a 8 e il numero di layer fino a 88.

La frazione di eventi con più di 4 stazioni è comunque piccola a causa dell'accettazione della singola ruota YB0 nella vista ϑ .

Questa frazione si può valutare dalla distribuzione del numero di tracce ricostruite per evento (figura 6.14) dove si vede che il numero di eventi con due tracce ricostruite è sceso all'1%; poichè nella versione 1.6.3 questi eventi costituivano il 3.8% del totale, questo significa che il 75% delle tracce doppie vengono ora ricostruite correttamente.

Il restante 1% appare ancora effetto di una ricostruzione erronea, dato

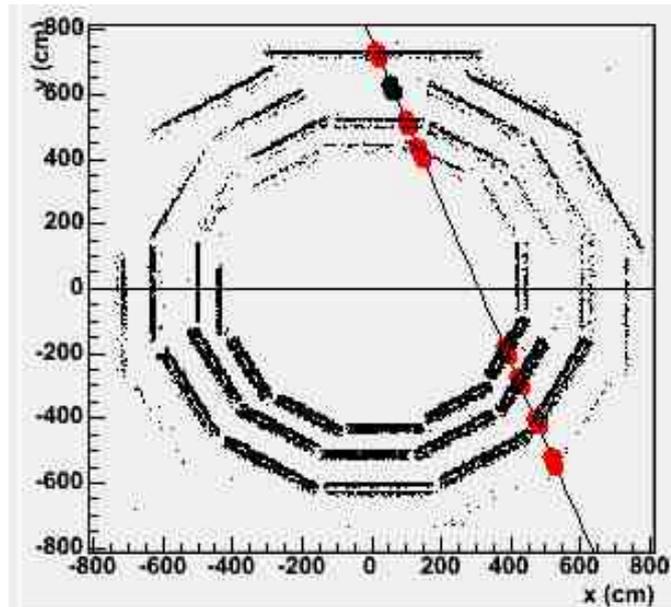


Figura 6.12: Ricostruzione corretta della traccia che nella figura 6.8 era ricostruita come due tracce distinte.

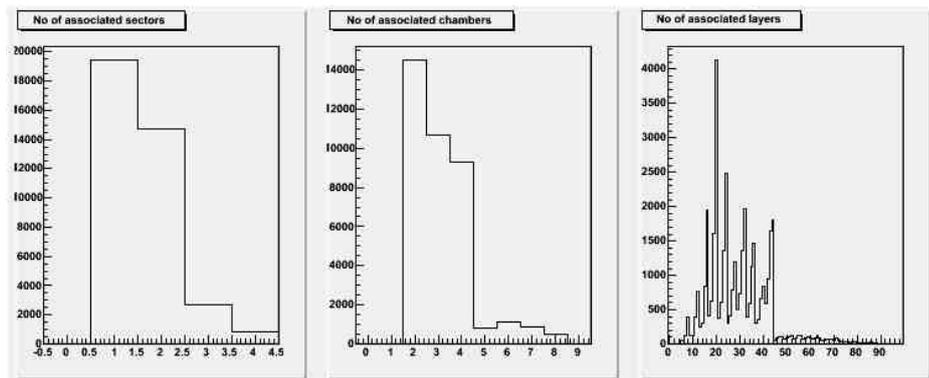


Figura 6.13: Distribuzioni del numero di settori, stazioni e layer che contribuiscono alla ricostruzione delle tracce nella versione 1.7.0 del software (cfr. figura 6.7).

che la distribuzione dell'angolo ha ancora un piccolo accentuato sullo zero.

6.8 Distribuzioni angolari

Un'ulteriore verifica della attendibilità della ricostruzione si riferisce alle distribuzioni angolari delle tracce ricostruite mostrate in figura 6.15 a sinistra per la vista φ e a destra per la vista ϑ .

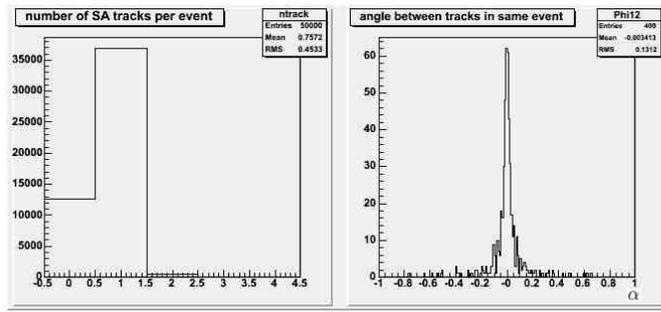


Figura 6.14: A sinistra: distribuzione degli eventi in funzione delle tracce per evento; a destra: distribuzione degli angoli compresi fra due tracce dello stesso evento.

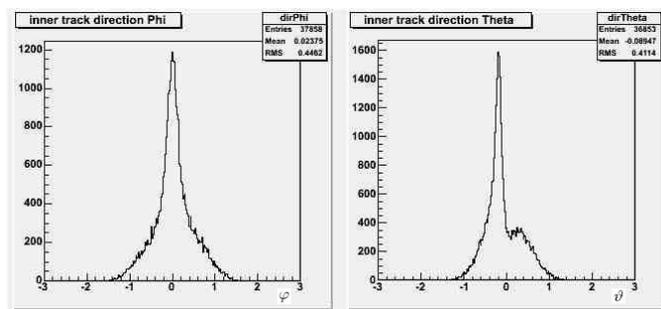


Figura 6.15: Distribuzione angolare delle tracce ricostruite nei due piani di vista, φ a sinistra e ϑ a destra.

La distribuzione φ si estende fino a ± 1.5 rad, corrispondenti a $\pm 86^\circ$ circa. Il picco sullo zero è più pronunciato rispetto all'andamento $\cos^2 \varphi$, dato plausibile se si considera che questi eventi sono stati acquisiti a 100 metri di profondità nel sottosuolo dove la distribuzione dei raggi cosmici risulta filtrata rispetto alla superficie.

La distribuzione ϑ si estende a ± 1.2 rad pari a circa $\pm 67^\circ$ e presenta un alto picco asimmetrico dovuto alla presenza del pozzo attraverso il quale il rivelatore è stato calato nella caverna e attraverso il quale i muoni cosmici penetrano senza la schermatura dovuta alla roccia.

6.9 Efficienza di ricostruzione delle tracce

Per valutare l'efficienza di associazione degli hit alle tracce, abbiamo confrontato gli hit associati con gli hit aspettati in base alla presenza di valide intersezioni delle tracce con i layer.

Abbiamo definito quindi camera per camera l'efficienza:

$$\varepsilon_n = \frac{M_n}{N} \quad (6.3)$$

dove N = numero di tracce che hanno intersezioni valide con tutti gli 8 layer φ della camera in questione, e M_n = sottoinsieme delle N tracce che hanno nella camera in questione n hit associati.

Un esempio dei primi risultati ottenuti con questa analisi è riportato nella figura 6.16. Si osserva un'efficienza di associazione con 8 hit inferiore al 50% anche nei settori che danno il trigger.

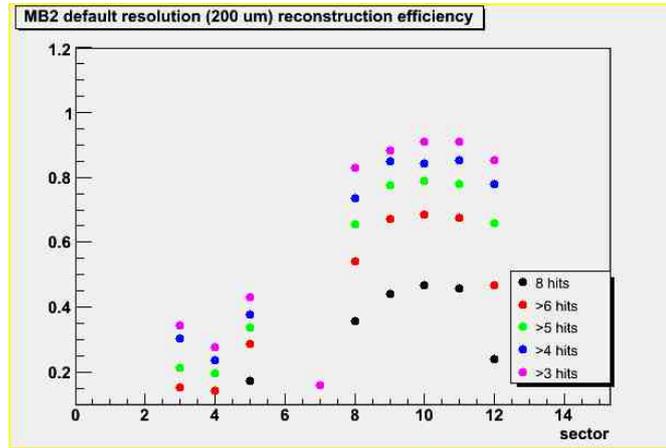


Figura 6.16: Efficienza di ricostruzione per tracce SA delle camere MB2 per i vari settori, con risoluzione di default (200 μm).

Abbiamo ipotizzato che tale scarsa efficienza potesse essere dovuta all'errore associato al singolo RecHit1D, errore che, come spiegato al paragrafo 5.4.2, può determinare l'inclusione o meno di singoli hit nel fit. L'errore applicato in questo primo calcolo dell'efficienza era infatti quello fissato per default nei Monte Carlo degli eventi pp , cioè 200 μm . Abbiamo visto che la natura asincrona dei cosmici rispetto al trigger determina una maggiore indeterminazione nel tempo di passaggio del muone e quindi un maggiore errore sulla misura dei tempi di drift e sulla posizione degli hit. Abbiamo dunque rieseguito la procedura di ricostruzione applicando questa volta un errore di 900 μm ai singoli punti, e abbiamo ricalcolato l'efficienza di associazione sul nuovo set di tracce così ottenuto.

I risultati di questa seconda elaborazione sono mostrati nella figura 6.17: l'efficienza risulta sensibilmente maggiore, in particolare quella con 8 hit si attesta su valori superiori a $\sim 70\%$ per tutti i settori inferiori che danno il trigger.

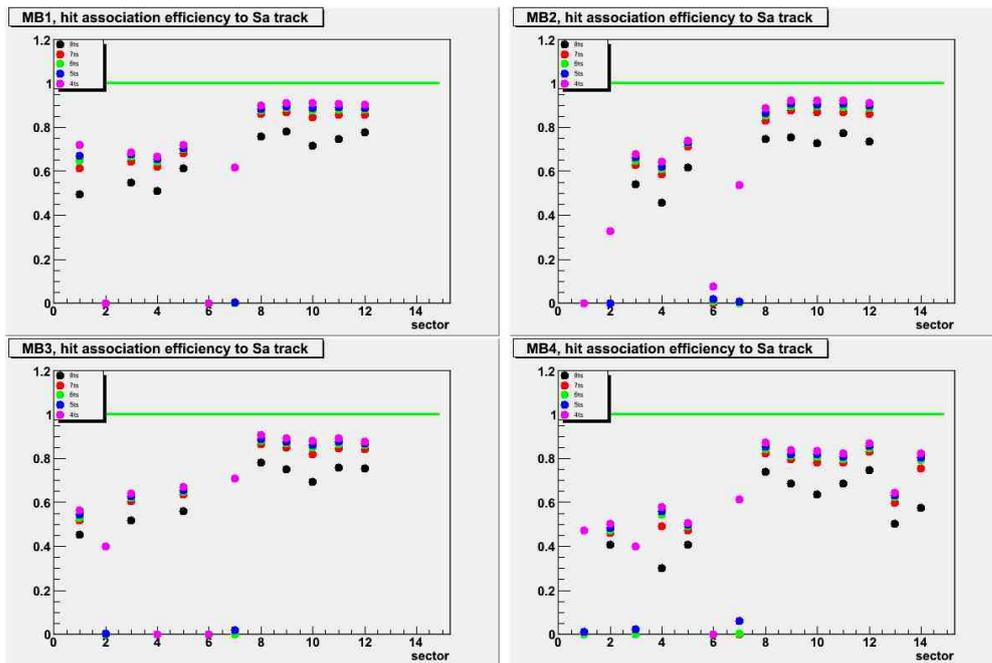


Figura 6.17: Efficienza di ricostruzione per tracce SA delle camere MB1-MB4 per i vari settori, con risoluzione di $900 \mu\text{m}$.

L'efficienza si mantiene tuttavia bassa nei settori superiori. Questa deficienza di hit richiederà analisi più approfondite. Infatti mentre una scarsità di tracce nei settori superiori può essere spiegata dalla configurazione di trigger, una scarsità di hit in eventi comunque triggerati e per tracce che attraversano i settori in questione non è immediatamente comprensibile. Essa potrebbe essere dovuta a problemi di sincronizzazione oppure di allineamento e sarà comunque oggetto di indagini ulteriori.

Capitolo 7

Conclusioni

E' stata applicata per la prima volta la ricostruzione di dati reali nel rivelatore DT di CMS con muoni cosmici, utilizzando i dati raccolti con una intera ruota installata in caverna.

Durante la fase iniziale del lavoro sono state notate alcune incongruenze nei risultati ottenuti con le versioni disponibili del software di ricostruzione CMSSW. In particolare il comportamento delle tracce ricostruite non era affatto in accordo con le condizioni sperimentali della misura: assenza di campo magnetico nel rivelatore e verso di propagazione dei raggi cosmici dall'alto verso il basso. La segnalazione di queste incongruenze ai responsabili dello sviluppo del codice ha prodotto sensibili miglioramenti che sono stati inseriti nelle versioni successive.

E' stata quindi studiata l'efficienza di ricostruzione delle tracce in funzione dell'errore che si aspetta sui punti misurati. Mentre per le tracce originate dalle collisioni pp che avvengono a tempi ben definiti la simulazione del rivelatore prevede un errore di $200 \mu\text{m}$, nel caso dei raggi cosmici la loro natura casuale e quindi asincrona rispetto al trigger implica errori molto più grandi. Ciò è stato puntualmente verificato osservando un considerevole aumento nell'efficienza di associazione degli hit alle tracce ove si assuma un errore di $900 \mu\text{m}$.

Tutto il lavoro svolto in questa tesi si riferisce alla versione cosiddetta Stand Alone del software, relativa cioè a tutto il rivelatore DT per i muoni a grande angolo.

Bibliografia

- [1] E. O. Lawrence, M. S. Livingston
The Production of High Speed Light Ions Without the Use of High Voltages
Phys. Rev. 40 (1932) 19-35

- [2] I. Noddack-Tacke
Über das Element 93
Angewandte Chemie 47 (1934), 653-655

- [3] T. Hopper
She was ignored: Ida Noddack and the discovery of nuclear fission
Master's Thesis - Stanford University, 1990

- [4] CHF - Chemical Heritage Foundation
Otto Hahn, Lise Meitner and Fritz Strassmann
<http://www.chemheritage.org/classroom/chemach/atomic/hahn-meitner.html>

- [5] CERN - Laboratoire Européen pour la Physique des Particules
CMS - Physics Technical Design Report - Addendum on High Density QCD with Heavy Ions
CERN/LHCC - 5 March 2007

- [6] I. J. R. Aitchison, A. J. G. Hey
Gauge Theories in Particle Physics - Volume II: QCD and the Electroweak Theory
Third Edition (2004) - Institute of Physics

- [7] W.-M. Yao, et al.
Particle physics booklet
Extracted from the *Review of Particle Physics*
Institute of Physics publishing

- [8] R. Sacchi on behalf of CMS Muon Group
Drift tube muon detectors for the CMS experiment
http://www.geocities.com/nuppac/NUPPAC_05_139.pdf
- [9] C. Mencuccini, V. Silvestrini
Fisica II
Terza edizione - Liguori Editore
- [10] G. Giacomelli
Introduzione alla fisica delle particelle elementari
Servizio Documentazione - Biblioteca Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna - 2002
- [11] B. R. Martin, G. Shaw
Particle Physics
John Wiley & Sons, 1997 - Second Edition
- [12] CERN - Laboratoire Européen pour la Physique des Particules
CMS - The Compact Muon Solenoid - Technical Proposal
CERN/LHCC - 15 Dicembre 1994
- [13] CERN - Laboratoire Européen pour la Physique des Particules
CMS NOTE-1998/064 - Performance and Mechanical Tolerances Achieved with a Full Size Prototype of a CMS Barrel Muon Drift Tubes Chamber
CERN/LHCC - 15 Ottobre 1998
- [14] S. Urbinati
Alcuni aspetti del Magnet Test and Cosmic Challenge di CMS
Tesi di Laurea - Università di Bologna - A. A. 2005 - 2006
- [15] F. Halzen, A. D. Martin
Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics
John Wiley & Sons, Jan 1984
- [16] P. Giacomelli
The Cms Muons Detector
VCI - Vienna Conference on Instrumentation 2001 - 19-23/02/2001
- [17] CMS official website
<http://cms.cern.ch/>

-
- [18] Muon Trigger Brief overview official website
<http://cmsdoc.cern.ch/cms/TRIDAS/mutrig/html/mtover.htm#DriftTubes>
- [19] The CMS Trigger and Data Acquisition Group
The CMS High Level Trigger
<http://arxiv.org/pdf/hep-ex/0512077>
- [20] CMS DT commissioning site
<http://dt-sx5.web.cern.ch/dt-sx5/>
- [21] CMS Muon Wiki Pages
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/MuonWikiHome>
- [22] Preface to CMS Offline Software website
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/SWGuidePreface>
- [23] CMSSW 1_6_3 Documentation site
http://cms-service-sdtweb.web.cern.ch/cms-service-sdtweb/doxygen/CMSSW_1_6_3/doc/html/
- [24] CMS Software Page
<http://cmsdoc.cern.ch/cms/cpt/Software/html/General/>
- [25] CMS Stand-Alone Muon Reconstruction website
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/WorkBookStandAloneMuonReco>
- [26] Y. Fisyak
Kalman Filter Approach for Track Finding and Fitting in the CMS Muon and Inner Tracker Systems
CMS TN/94-297
- [27] CERN - Laboratoire Européen pour la Physique des Particules
CMS Physics - Technical Design Report - Volume I: Detector Performance and Software
CERN/LHCC - 2006-001

Capitolo 8

Ringraziamenti

Doviziosa è la lista delle persone che mi sento di ringraziare, non basterebbero le poche pagine che mi corre obbligo di rispettare. Per cui farò delle scelte che non hanno l'intenzione di offendere o trascurare questo o quello, ma saranno solo riferite ai punti salienti della mia rinnovata vita da studente universitario.

In primo luogo il Prof. F. L. Navarra, per l'opportunità che mi ha dato di conoscere e affrontare questi argomenti così affascinanti, e per la sapienza con cui ha saputo gestire il lavoro presentato in questa sede.

La Dott.ssa F. R. Cavallo è stata l'ottimo nocchiero di questa tesi, primario riferimento di conoscenza e non meno faro di pazienza e disponibilità. Il ringraziamento che da questa pagina emana non rende nè punto nè poco il debito di cui mi sento latore.

Be', mia madre: col tifo sfegatato con cui ha seguito questa mia avventura, ha espresso in modo ben poco celato tutte le sue speranze riposte in me, i suoi entusiasmi alimentati dalle mie fatiche e dai miei traguardi.

Amphibia... eh... cara Amphibia, in quell'ottobre 2003 al bar di Agraria sei stata tu che mi hai dato l'ultima spintarella che mi mancava. Magari un giorno ci perderemo di vista, perché così è la vita; magari un giorno non andremo più d'accordo, perché così è la vita; ma anche se dovessimo guardarci in cagnesco, sappi che non verrò mai meno al ringraziamento per quel piccolo "cuccio" che ha cambiato le mie vicende. Per una piccola parte anche tu sei coautrice di questa laurea.

Me stesso.

Salvatore, Joe, Tit... quali che siano nomi e nomignoli che mi sono stati regalati negli anni, sarò sempre e comunque davanti a me stesso.

Colui che nelle sue faccende e nelle sue mansioni prova una passione analoga a quella che provo io nella conoscenza della Fisica, può comprendere

in modo naturale cosa spinge tanti uomini alla più estrema abnegazione che sovente costa solitudine, sudore e fame.

Sì, ho fatto sacrifici, ho affrontato momenti di sconforto, ingoiato veleni e operato scelte che hanno tutto il sapore delle rinunce, ma che rinunce non sono mai state: l'entusiasmo che mi ha fatto compagnia in questi anni non solo ha mantenuto inalterata tutta la sua freschezza iniziale, ma si è alimentato delle continue meraviglie che la Natura ha reso parte del mio mondo. Quel piacere infantile, quello che ci fa stupire perfino dell'apparente semplicità di un filo d'erba, quello che ci alimenta la curiosità della scoperta fine a se stessa, è la riprova genuina che tanta umanità alberghi negli animi dei più; quel piacere è lo spirito che trova la propria controparte nello slancio dell'artista che segue d'istinto il nobile principio "Ars gratia artis".

Forse perché scarsamente sostenuto da un'autostima forte e sicura, forse perché conscio che la convivenza di lavoro e studio non è altro che una tenzone spietata tra nobili intenti, ho profuso moltiplicati i miei sforzi, e i brillanti maestri che ho saputo apprezzare mi hanno fatto crescere, per loro merito, ben al di là delle mie più rosee aspettative.

Ecco, tutto questo l'ho fatto per me stesso, d'accordo, ma gli ostacoli gratuiti di malvagi indefessi, non li meritavo proprio.

Taccio il mio sentire, affinché il lettore non abbia a pensare cose men che oneste intorno alle persone che furono avverse al mio cammino.

La Scienza che vado a imparare è la mia risposta.