



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAGLIARI

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e
Naturali
Corso di Laurea in Fisica

Raggi Cosmici nel rivelatore per muoni dell'esperimento LHCb

Relatore:
Prof. Biagio Saitta

Tesi di Laurea di:
Liliana Mou

Anno Accademico
2007-2008

Indice

Introduzione	1
1 CERN e Rivelatore LHCb	3
1.1 Large Hadron Collider	3
1.2 L’esperimento LHCb	4
1.2.1 Sistema di trigger e Calorimetro	6
1.2.2 Il Rivelatore di Muoni	8
2 Monte Carlo	17
2.1 Generazione e Simulazione	17
2.1.1 Spettro e distribuzione angolare dei muoni	17
2.1.2 Simulazione	23
3 Studio del rumore	27
3.1 Rate di rumore	27
4 Analisi dati	33
4.1 Calcolo dell’efficienza delle camere	33
4.2 Allineamento temporale	46
Conclusioni	51
A Condizioni del rivelatore durante la presa dati	53
B Multiple Scattering	55
C Muon Layout	57

Elenco delle figure

1.1	Complesso degli acceleratori del CERN, con indicati i quattro esperimenti principali.	4
1.2	Il rivelatore LHCb: sezione verticale.	5
1.3	Vista laterale del rivelatore di μ nel piano $y - z$	9
1.4	Schema di un quadrante (Q1) del Muon System di LHCb in cui sono indicate le quattro regioni R1÷R4.	11
1.5	Rappresentazione schematica della singola gap di una camera MWPC.	12
1.6	Suddivisione in torri di un quadrante del rivelatore.	15
1.7	Riconoscimento delle tracce.	16
2.1	Flusso dei muoni al livello del mare, in funzione dell'angolo zenitale, per valori fissati dell'impulso.	18
2.2	Flusso dei muoni al livello del mare, in funzione dell'impulso, per valori fissati dell'angolo di zenit.	19
2.3	Flusso di muoni al livello del mare, in funzione dell'impulso integrato su ogni valore di $\theta(0^\circ-90^\circ)$ ed in funzione di θ integrato su valori dell'impulso tra 1 e 100 GeV.	20
2.4	Flusso di muoni integrato a circa 80 m di profondità.	21
2.5	Rate totale dei muoni, rispetto alla profondità, che incidono su una parete verticale.	22
2.6	Spettro di impulso dei muoni che colpiscono almeno una stazione del rivelatore per muoni.	24
2.7	Spettro di impulso dei muoni per gli eventi in cui vi siano hits in ciascuna stazione.	25

2.8	Spettro dei muoni per gli eventi in cui viene ricostruita una traccia con hits in almeno tre stazioni	25
2.9	Spettro dei muoni per gli eventi in cui viene ricostruita una traccia con hits in tutte e quattro le stazioni	26
3.1	Distribuzione del rumore nelle varie stazioni. Nell'asse x sono riportati i canali logici, nell'asse y è riportato il numero della ODE corrispondente, nell'asse z il numero di conteggi nel rispettivo canale.	28
3.2	Distribuzione del rumore nelle varie stazioni dopo aver rimosso i canali rumorosi. Nell'asse x sono riportati i canali logici, nell'asse y è riportato il numero della ODE corrispondente, sull'asse z i conteggi.	30
3.3	Conteggi	32
4.1	Distribuzione spaziale delle pads colpite in xy per le varie stazioni. Da sinistra verso destra sono riportate le stazioni M2÷M5, dall'alto verso il basso le regioni R1÷R4	34
4.2	Distribuzione spaziale delle pads colpite in xy per le varie stazioni, dopo aver rimosso i canali rumorosi. Da sinistra verso destra sono riportate le stazioni M2÷M5, dall'alto verso il basso le regioni R1÷R4	35
4.3	Numero medio di hits per stazione.	35
4.4	Ricerca delle tracce nei piani xz (alto) e yz (basso). Le sezioni in giallo corrispondono alle cinque stazioni per muoni, in blu al calorimetro elettromagnetico e in viola al calorimetro adronico.	37
4.5	Numero di tracce trovate con 3 o 4 hits.	38
4.6	Distanza tra l'hit trovato nella stazione e la retta che individua la traccia.	39
4.7	Distribuzione angolare delle tracce a quattro hits nei piani yz e xz.	40
4.8	Angoli per le tracce, in 2 dimensioni.	43
4.9	Angoli delle tracce per stazione, in gradi.	44

4.10	Numero di hits oltre quello appartenente alla traccia, per stazione e per evento, per eventi in cui è stata ricostruita una traccia con 4 hits.	46
4.11	Distanza nel piano xy tra tutti gli hits presenti nella stazione e l'hit appartenente alla traccia.	47
4.12	Distanza temporale, in conteggi TDC, tra gli hits e l'hit appartenente alla traccia nella stessa stazione, per le stazioni M2 (in alto) e M5 (in basso). A sinistra (destra) è mostrata questa differenza per hits che distano meno (più) di 80 cm. Un conteggio TDC corrisponde a circa 1.5 ns.	48
4.13	Distribuzione temporale degli hits per tracce in avanti, in conteggi TDC.	49
4.14	Distribuzione temporale per tracce indietro, degli hits per le varie stazioni, in conteggi TDC.	50
B.1	Schema della deviazione causata dallo Scattering Multiplo. . .	55

Elenco delle tabelle

1.1	Stima del rate di particelle nelle diverse parti del rivelatore per muoni (kHz cm^{-2}). D è la distanza media delle varie stazioni dal vertice.	11
1.2	Dimensioni delle pads logiche nelle diverse stazioni e regioni del rivelatore per muoni (in cm^2).	13
3.1	Rate di rumore per stazione.	29
3.2	Rate di rumore per stazione e regione	31
3.3	Percentuale di canali aventi un rate di rumore massimo di 1 kHz.	31
3.4	Rate di rumore per stazione per un run di cosmici.	32
4.1	Efficienza media per stazione. I valori sono percentuali.	41
4.2	Efficienza media per stazione e regione. I valori sono percentuali e gli errori statistici.	42
4.3	Efficienza media per stazione e quadrante. I valori sono percentuali e gli errori statistici.	42
4.4	Efficienza media per stazione per tracce con angolo minore di 20° rispetto alla stazione M2. I valori sono percentuali e gli errori statistici.	43
4.5	Efficienza per stazione e regione per tracce con angolo minore di 20° rispetto alla stazione M2. I valori sono percentuali e gli errori statistici.	44

Introduzione

L'esperimento LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) [1] è uno dei quattro esperimenti presenti presso l'acceleratore LHC (Large Hadron Collider) al Centro Europeo per la Ricerca Nucleare (CERN). Esso si propone lo studio della simmetria di coniugazione di carica e parità (CP) nei decadimenti dei mesoni B e dei decadimenti rari di tali particelle.

Muoni sono presenti negli stati finali di molti decadimenti del B dove si ha violazione di simmetria CP ed il decadimento raro $B_S \rightarrow \mu\mu$ è diventato uno dei più importanti da studiare.

La presenza di muoni di elevato impulso trasverso ($\geq 1-2$ GeV/c) è utilizzata nel trigger dell'esperimento per segnalare l'avvenuto decadimento di un B e quindi identificare gli eventi di interesse. Per questo, la loro corretta identificazione è di primaria importanza in LHCb. A questo scopo sono destinate cinque "stazioni", M1÷M5, equipaggiate con camere multifilo di varie dimensioni.

Il lavoro di questa tesi è consistito nello studio delle prestazioni delle camere multifilo di quattro delle stazioni, per le quali era stata completata l'installazione.

Poichè non sono ancora disponibili collisioni fra particelle, per effettuare questi studi sono stati analizzati dati acquisiti dal rivelatore sfruttando il segnale rilasciato dai muoni presenti nei raggi cosmici.

Questo lavoro di tesi è organizzato nella maniera seguente.

Il primo capitolo illustra l'apparato sperimentale in generale ponendo particolare attenzione al rivelatore di muoni.

Nel secondo capitolo viene descritto il metodo Monte Carlo per la generazione e simulazione del passaggio dei cosmici nel rivelatore convincendoci che il

numero di particelle per secondo che attraversano tutte le stazioni del rivelatore di muoni è sufficiente per permettere una buona calibrazione.

Nel terzo capitolo viene descritto lo studio effettuato sul rumore delle varie stazioni e regioni del rivelatore. E' importante ai fini dell'impostazione delle soglie e quindi ridurre al minimo le ambiguità di tracciamento dei muoni cosmici.

Nel quarto capitolo vengono riportati i risultati sulla efficienza delle stazioni del rivelatore per muoni e discussi alcuni aspetti preliminari dell'allineamento temporale del sistema.

Capitolo 1

CERN e Rivelatore LHCb

1.1 Large Hadron Collider

Il Large Hadron Collider (LHC) è il collisionatore adronico presente al Centro Europeo per la Ricerca Nucleare (CERN) di Ginevra. LHC è un sincrotrone costruito all'interno di un tunnel sotterraneo dove è presente una coppia di anelli lunghi 26.7 km all'interno dei quali vengono accelerati protoni, o ioni, in direzioni opposte. Le collisioni protone-protone e tra ioni pesanti (Pb-Pb) avverranno nel 2009 con energie al centro di massa rispettivamente di $\sqrt{s} = 14$ TeV (cioè 7 TeV per fascio) e $\sqrt{s} = 2.8$ TeV. Nei due tubi di fascio i protoni sono mantenuti in orbita da oltre 1600 magneti superconduttori, raffreddati alla temperatura di 1.9 K da elio liquido superfluido, e che producono un campo magnetico di circa 8.4 T.

I protoni sono strutturati in gruppi, detti *bunches*, separati tra loro spazialmente e distanziati temporalmente di 25 ns. Le collisioni tra due gruppi di protoni che arrivano da direzioni opposte sono dette *bunch crossing*. La luminosità nominale di progetto del collider LHC è $\mathcal{L} = 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Le collisioni avverranno con una frequenza di 40 MHz in corrispondenza dei quattro esperimenti attualmente presenti al CERN (Figura 1.1): ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) ed LHCb. ATLAS e CMS sono esperimenti “*general-purpose*” che si occupano principalmente della ricerca del bosone di Higgs e della ricerca di fenomeni che non possono essere spiegati all'inter-

no del Modello Standard e che in generale vengono detti di “nuova fisica”. ALICE si propone di studiare la fisica degli ioni pesanti ed in particolare lo studio della formazione del plasma di quark e gluoni (QGP), mentre LHCb è dedicato allo studio della fisica dei mesoni B.

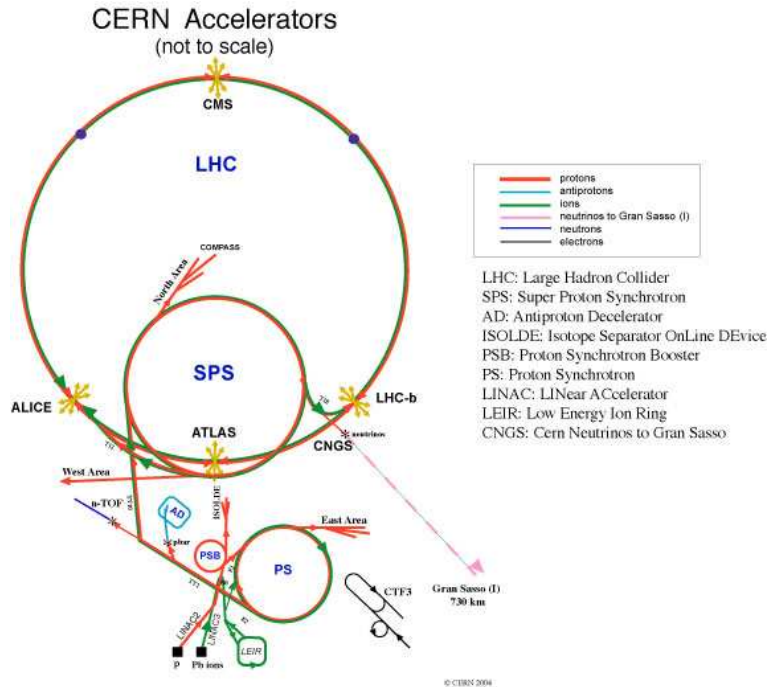


Figura 1.1: Complesso degli acceleratori del CERN, con indicati i quattro esperimenti principali.

1.2 L'esperimento LHCb

L'esperimento LHCb cercherà evidenze di nuova fisica oltre il Modello Standard (MS) dalla scoperta di eventuali nuove sorgenti della violazione della simmetria CP e dalla misura dei *branching ratio* di decadimenti rari dei mesoni B.

LHCb è in fase di completamento all'interno del pozzo 8 di LHC e si prevede l'inizio della presa dati per l'autunno del 2009.

Il rivelatore dell'esperimento LHCb è uno spettrometro a singolo braccio rivolto in avanti sviluppatosi lungo la direzione del fascio, come mostrato in

Figura 1.2. La scelta di questa geometria del rivelatore, che ricorda un esperimento a bersaglio fisso, è giustificata dal fatto che ad alte energie entrambi gli adroni b e \bar{b} sono prodotti prevalentemente nello stesso cono, in avanti o indietro, a valori di pseudorapidità alti. In questo modo si ha la massima accettazione per gli eventi in cui si producono mesoni B.

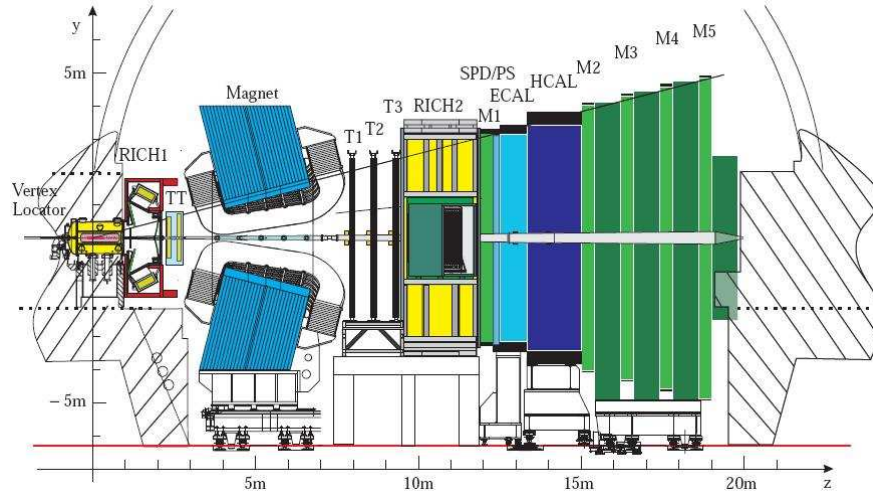


Figura 1.2: Il rivelatore LHCb: sezione verticale.

Il sistema di coordinate di LHCb, come mostrato in Figura 1.2, è destrorso con l'asse z che scorre dal punto di interazione verso le camere a muoni (M1÷M5) lungo la linea di fascio e l'asse y che punta verso l'alto. L'accettanza angolare dell'esperimento è 300 mrad nel piano $x-z$ (piano di curvatura delle particelle dovuto al campo magnetico) e 250 mrad nel piano $y-z$. LHCb lavorerà ad una luminosità di $\mathcal{L} = 2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, due ordini di grandezza più bassa rispetto a quella nominale di LHC. Questo valore è stato scelto per garantire un regime di bassa molteplicità d'interazioni primarie protone-protone per intersezione dei fasci, ed evitare ambiguità circa l'origine dei mesoni B dovute alla presenza di più vertici primari.

Il rivelatore di LHCb è progettato per rivelare i vertici di decadimento dei mesoni B, identificare le particelle prodotte nei decadimenti e ricostruire le tracce delle particelle cariche. I mesoni B hanno massa maggiore delle altre particelle prodotte nell'interazione e sono prodotti con un elevato impulso in avanti.

Gli eventi sono selezionati grazie ad un sistema chiamato *trigger* che identifica gli eventi interessanti tra tutti quelli prodotti, cercando prodotti di decadimento (adroni, muoni ed elettroni) con alto impulso trasverso p_T o con alto parametro d’impatto.

La maggior parte dei sotto-rivelatori di LHCb sono progettati per ottimizzare le prestazioni del sistema di trigger dell’esperimento. Come mostrato in Figura 1.2, LHCb è composto da un rivelatore di vertice (VELO), due rivelatori ad effetto Cherenkov (RICH1 e RICH2), il magnete, tre stazioni di tracciamento (T1, T2 e T3), i calorimetri elettromagnetico (ECAL) ed adronico (HCAL) e il rivelatore di muoni, formato da cinque stazioni (M1÷M5).

1.2.1 Sistema di trigger e Calorimetro

Il sistema di Trigger

Dato che la sezione d’urto di produzione $b\bar{b}$ è piccola rispetto alla sezione d’urto anelastica di collisione protone-protone, è necessario dotare l’apparato di un sistema di trigger che aiuti a distinguere gli eventi di B dal fondo. Il trigger di LHCb è basato su uno schema a due livelli. Il primo livello, denominato L0, è basato completamente sull’*hardware* e realizza una selezione rapida degli eventi. Il secondo livello di trigger, “High Level Trigger” (HLT), è realizzato mediante algoritmi piuttosto sofisticati e quindi relativamente più lenti.

- **L0-Trigger:**

Il trigger L0 seleziona gli eventi in base al valore dell’impulso trasverso degli elettroni, fotoni, adroni e muoni. Il trigger è costituito da tre sistemi indipendenti, che lavorano in parallelo.

1. Il trigger elettronico/fotonico usa i dati ricevuti da ECAL. L’elettronica misura l’energia dei cluster elettromagnetici e seleziona quelli con la più alta energia trasversa. Un evento è accettato se l’energia trasversa di un cluster elettronico o fotonico è maggiore di circa 2.5 GeV. Questa condizione di selezione è stata scelta in modo da ridurre di circa un fattore 100 il numero di interazioni anelastiche protone-protone di fondo.

2. Il trigger adronico usa le informazioni del rivelatore HCAL e accetta eventi che abbiano adroni con energia trasversa maggiore di circa 3.5 GeV.
3. Il trigger muonico ricostruisce le tracce che hanno rilasciato hit in tutte e cinque le camere a muoni. Le tracce sono estrapolate alla regione di interazione per stabilire se vi siano muoni d'impulso trasverso elevato. Se l'energia trasversa di un muone è maggiore di circa 1.2 GeV l'evento è accettato.

Tutte le informazioni vengono raccolte dalla "L0 Decision Unit", che formula la valutazione finale dell'evento. Il sistema di trigger L0 è completamente sincrono, ed opera con latenza fissata in $4.2 \mu s$, al termine dei quali viene inviato, o meno, il segnale di accettare l'evento. Il rate atteso di eventi accettati dal L0-Trigger è di circa 1 MHz.

- **High Level Trigger:**

Il trigger di alto livello HLT sfrutta l'informazione proveniente da tutti i rivelatori dell'esperimento. L'HLT effettua una totale ricostruzione dei vertici primari e secondari e delle tracce ed effettua l'identificazione delle particelle coinvolte nel decadimento. I decadimenti ricostruiti vengono catalogati secondo un apposito *database* e memorizzati su disco ad una frequenza di 2 kHz.

I Calorimetri

Il sistema dei calorimetri serve ad identificare adroni, elettroni e fotoni e a fornire la misura della loro energia. È costituito da un calorimetro elettromagnetico ed un calorimetro adronico posti tra la prima e la seconda stazione del rivelatore per muoni.

- Il calorimetro elettromagnetico a campionamento ECAL è in grado di rivelare elettroni e fotoni attraverso sciame di e^+, e^- e fotoni. Esso è costituito da moduli sensibili indipendenti, realizzati intervallando materiale sensibile a materiale convertitore. Ogni modulo impiega 66 piani di materiale convertitore al piombo, ciascuno dello spessore di 2

mm, intervallati a piani di scintillatore plastico di 4 mm di spessore. Lo spessore totale di ciascun modulo corrisponde a 25 lunghezze di radiazione e 1.1 lunghezze d'interazione nucleare. L'ECAL è preceduto da un *preshower*, SPS, composto da uno strato di 12 mm di piombo seguito da 15 mm di scintillatore, che distingue i fotoni e gli elettroni dalla diversa forma che tali sciami inducono nel calorimetro.

- Il calorimetro adronico a campionamento (HCAL) ha la funzione di misurare l'energia trasversa degli sciami adronici per le esigenze del primo livello di trigger e di contribuire a migliorare la discriminazione fra elettroni ed adroni d'impulso elevato. È costituito da 16 mm di ferro e 4 mm di piastrelle di scintillatore, disposte parallelamente al fascio. La luce è raccolta alla fine di ciascuna piastrella mediante apposite fibre con proprietà di *wavelength shifters*.

1.2.2 Il Rivelatore di Muoni

Il rivelatore di muoni è l'ultimo rivelatore nell'ambito della geometria proiettiva di LHCb.

Rivelare i muoni in LHCb è fondamentale perché essi sono presenti in molti canali di decadimento dei mesoni B. In particolare, sono presenti nei seguenti decadimenti sensibili alla violazione di CP:

$$B_d^0 \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K_S^0 \quad (1.1)$$

$$B_s^0 \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\Phi. \quad (1.2)$$

Inoltre i muoni sono presenti in alcuni decadimenti rari dei B che possono essere sensibili a contributi di nuova fisica oltre il MS, come

$$B_s^0 \rightarrow (\mu^+\mu^-) \quad (1.3)$$

I muoni emessi nei decadimenti semileptonici dei mesoni B hanno un alto impulso trasverso utilizzato dal trigger L0 dell'esperimento per la selezione di questo tipo di eventi.

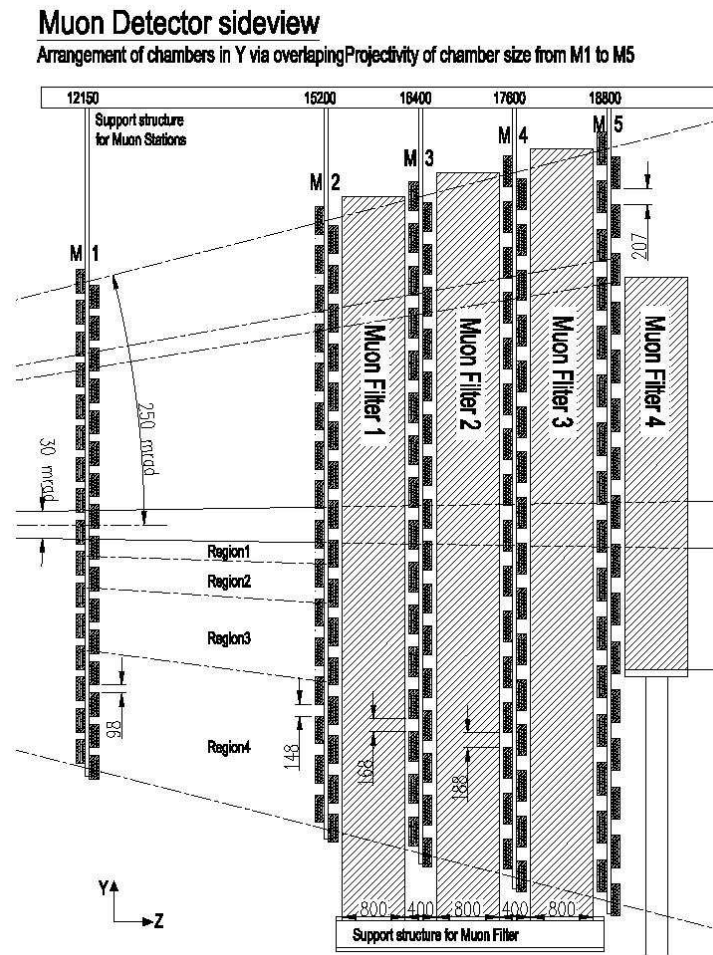


Figura 1.3: Vista laterale del rivelatore di μ nel piano $y - z$.

Le cinque stazioni del rivelatore a muoni sono di forma rettangolare e poste lungo l'asse del fascio, come mostrato in Figura 1.3.

L'intero sistema ricopre un'area totale di 435 m^2 . La stazione M1 è collocata prima dei calorimetri per evitare effetti di multiplo scattering che altererebbero la traiettoria dei muoni. M2÷M5 sono collocate invece oltre il calorimetro adronico e sono separate da piani di assorbitore di ferro spessi 80 cm.

Le stazioni M2 ed M3 vengono utilizzate per il riconoscimento delle tracce mentre M4 ed M5 servono per confermarne l'identificazione.

Caratteristiche del rivelatore per Muoni

La stima del p_T dei muoni, la corretta identificazione del *bunch crossing* (BX) e l'entità del fondo impongono severe richieste sulle prestazioni dei rivelatori utilizzati nel rivelatore per muoni.

- I rivelatori devono avere una buona risoluzione temporale. Presentano infatti un'efficienza superiore al 99% in una finestra temporale di 20 ns per poter associare la traccia del muone al BX corretto.
- I rivelatori devono essere in grado di lavorare ai flussi di particelle incidenti attesi nel rivelatore di muoni (*rate capability*). Infatti il flusso di particelle cambia notevolmente tra le diverse stazioni e all'interno della stessa stazione allontanandosi dal fascio, come mostrato in Tabella 1.1 .
- I rivelatori devono avere una buona risoluzione spaziale per poter determinare correttamente il p_T .
- Queste prestazioni devono essere garantite per i 10 anni di presa dati.

I rivelatori da utilizzare nelle camere per muoni dell'esperimento LHCb sono stati progettati tenendo conto del flusso di particelle presente nelle diverse regioni e della granularità del sistema richiesta dal trigger.

Ogni stazione è divisa in quattro quadranti (Q1÷Q4), disposti in senso orario a partire da Q1, corrispondente al quadrante con $x > 0$ e $y > 0$. Ogni quadrante a sua volta è suddiviso in quattro regioni, formanti quattro cornici concentriche (R1÷R4) attorno alla *beam pipe* (Figura 1.4).

In Tabella 1.1 sono mostrati i rate di particelle previsti per le diverse stazioni e regioni, l'area di ciascuna regione e la distanza media delle varie stazioni dal vertice.

Le stazioni sono realizzate utilizzando camere proporzionali multi filo (Multi Wire Proportional Chambers) tranne in M1R1 dove vengono utilizzati rivelatori a tripla GEM. L'intero rivelatore di muoni è composto da 1380 camere.

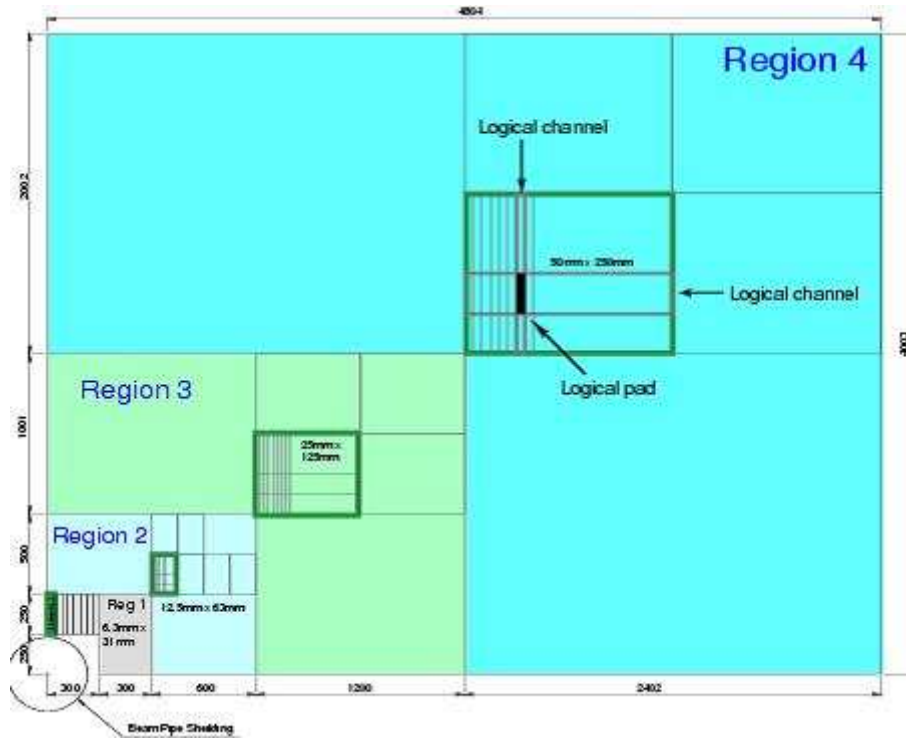


Figura 1.4: Schema di un quadrante (Q1) del Muon System di LHCb in cui sono indicate le quattro regioni R1÷R4.

	M1	M2	M3	M4	M5
D	12.10 m	15.27 m	16.47 m	17.67 m	18.87 m
R1	460 kHz cm ⁻²	37.5 kHz cm ⁻²	10 kHz cm ⁻²	6.5 kHz cm ⁻²	4.4 kHz cm ⁻²
area:	0.6 m ²	0.9 m ²	1 m ²	1.2 m ²	1.4 m ²
R2	186 kHz cm ⁻²	26.5 kHz cm ⁻²	3.3 kHz cm ⁻²	2.2 kHz cm ⁻²	1.8 kHz cm ⁻²
area:	2.3 m ²	3.6 m ²	4.2 m ²	4.8 m ²	5.5 m ²
R3	80 kHz cm ⁻²	6.5 kHz cm ⁻²	1 kHz cm ⁻²	0.75 kHz cm ⁻²	0.65 kHz cm ⁻²
area:	9.2 m ²	14.4 m ²	16.8 m ²	19.3 m ²	22.1 m ²
R4	25 kHz cm ⁻²	1.2 kHz cm ⁻²	0.415 kHz cm ⁻²	0.25 kHz cm ⁻²	0.225 kHz cm ⁻²
area:	36.9 m ²	57.7 m ²	67.2 m ²	77.4 m ²	88.3 m ²

Tabella 1.1: Stima del rate di particelle nelle diverse parti del rivelatore per muoni (kHz cm⁻²). D è la distanza media delle varie stazioni dal vertice.

I rivelatori MWPC presenti nell'esperimento sono rappresentati schematicamente in Figura 1.5.

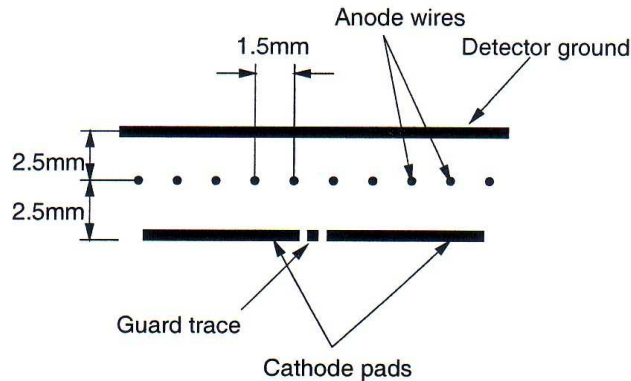


Figura 1.5: Rappresentazione schematica della singola gap di una camera MWPC.

Ciascuna camera ha una cella simmetrica con distanza anodo-catodo di 2.5 mm e distanza tra i fili di 1.5 mm. All'interno dei rivelatori è utilizzata una miscela di gas $Ar/CO_2/CF_4$ con 40% di Ar e concentrazione variabile di CO_2/CF_4 .

Un muone che attraversa i 5 mm della camera MWPC dà luogo in media a 50 elettroni che derivano verso i fili secondo le linee del campo elettrico. Gli ioni invece inducono un segnale sul catodo dando luogo al segnale poi letto dall'elettronica.

Per ottenere l'efficienza richiesta ogni stazione è formata da due strati di rivelatori uguali a doppia gap, con lettura indipendente. I canali omologhi dei due strati di rivelatore, chiamati PCH (*physical channel*), sono posti in OR logico sulla camera (rPCH). Da questa combinazione minimale (o da OR multipli di rPCH) viene formato un canale logico (LCH).

I canali fisici sono 122112 ma per combinazioni logiche vengono ridotti a 25920 (vedere Appendice A).

Le pad logiche, ottenute dall'incrocio di strips orizzontali e verticali, costituiscono l'unità sensibile del rivelatore e sono aree costruite con l'informazione di uno o più canali fisici (vedere Figura 1.4). Per tener conto della proiettività, la dimensione delle pad logiche è scalata di un fattore z_{M1}/z_{Mi} , cioè del

rapporto tra la distanza di M1 dal vertice (z_{M1}) e la distanza della stazione che si sta considerando (z_{Mi}).

Le dimensioni delle regioni e delle pad logiche che le compongono aumentano di un fattore due tra una regione e quella adiacente, allontanandosi dall'asse del fascio, come mostrato in Tabella 1.2 .

	M1	M2	M3	M4	M5
R1	1×2.5	0.5×2.5	0.5×2.5	2×2.5	2×2.5
R2	2×5	1×5	1×5	4×5	4×5
R3	4×10	2×10	2×10	8×10	8×10
R4	8×20	4×20	4×20	16×20	16×20

Tabella 1.2: Dimensioni delle pads logiche nelle diverse stazioni e regioni del rivelatore per muoni (in cm^2).

Dalla Figura 1.4 si nota che la granularità della parte sensibile del rivelatore è più fine nel piano di curvatura delle tracce ($x - z$) in modo da ottenere una migliore risoluzione sulla misura dell'impulso della traccia. La suddivisione è stata scelta in modo tale che ogni regione sia esposta allo stesso flusso di particelle.

Anche la risoluzione spaziale del rivelatore per muoni è legata alla granularità del sistema, quindi alla dimensione dei canali fisici. Questo parametro condiziona la misura del p_T e l'efficienza dell'intero rivelatore. E' inoltre necessario minimizzare la probabilità di avere, nello stesso strato di rivelatore, più canali fisici colpiti dalla stessa traccia. Il parametro che tiene conto del numero dei canali colpiti, mediamente, da una traccia è detto *cluster size*. La dimensione del *cluster* dipende da effetti di *cross talk* tra i canali e dalla geometria del rivelatore (*cluster size geometrica*). Questo effetto è accentuato per tracce inclinate dal momento che dipende dall'angolo medio di attraversamento, dalle dimensioni dei PCH e dalla separazione spaziale tra i due livelli. Si richiede che la *cluster size geometrica* sia compresa tra 1.1 e 1.2 rispettivamente per le zone interne ed esterne.

Il mantenimento di una *cluster size* entro 1.2 si traduce in un limite inferiore sulla dimensione delle pad catodiche nelle MWPC. Per questo motivo è sta-

to impossibile utilizzare le MWPC anche in M1R1 dove è richiesta una più elevata granularità. Utilizzando in M1R1 rivelatori a tripla GEM si riesce a mantenere una *cluster size* di 1.1.

Selezione dei muoni

Nel rivelatore per muoni ci sono tre livelli di granularità:

- 122112 canali fisici (PCH), costituiti da camere a fili MWPC o rivelatori a tripla GEM;
- 25920 canali logici, ridotti rispetto al numero di canali fisici per limitare le informazioni da inviare al trigger di livello 0 e all'elettronica;
- 55296 pad logiche, ricostruite dall'informazione dei canali logici;

In tutta la stazione M1 e nella prima regione di M4 ed M5 la pad logica coincide con il canale logico. Nelle altre zone del rivelatore per muoni la pad logica è ottenuta incrociando le strip orizzontali e verticali come mostrato in Figura 1.4.

I segnali provenienti dai canali logici vengono inviati all'elettronica, esterna al rivelatore, basata su una scheda chiamata ODE (*Off Detector Electronics*). Ciascuna ODE contiene 24 chip SYNC, deputati alla elaborazione dei segnali in ingresso della ODE. Il SYNC è sincrono con il clock di LHC a 40.08 MHz, che costituisce il riferimento dell'intero sistema. E' dotato di 8 ingressi digitali, ciascuno dei quali riceve un canale logico. Ad ogni segnale è associata una lettura TDC che misura la fase del segnale in arrivo con il clock di LHC, con una risoluzione di 1/16 del periodo del bunch crossing di 25 ns, che coincide con il periodo del clock. La ODE, quindi, accetta in ingresso fino a 192 LCH, elabora i dati e li ridistribuisce al trigger di livello 0 e all'acquisizione dati (DAQ). L'algoritmo di trigger è implementato indipendentemente nei 4 quadranti del sistema. Per ragioni di praticità l'intero rivelatore è stato diviso in 192 torri proiettive verso il vertice, come mostrato in Figura 1.6.

Una singola torre contiene pad logiche con la stessa disposizione (48 pads su M1, 2×96 pads su M2 ed M3, 2×24 pads su M4 ed M5) e questo consente di eseguire lo stesso algoritmo su ciascuna torre.

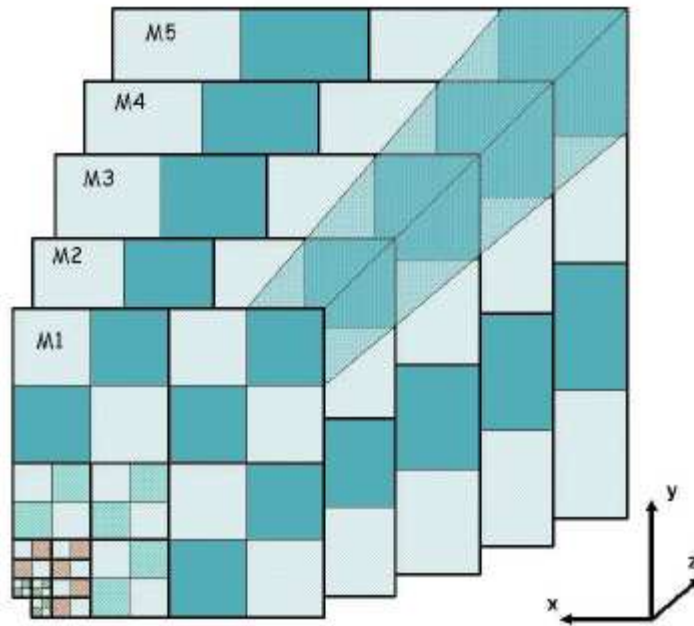


Figura 1.6: Suddivisione in torri di un quadrante del rivelatore.

Ogni torre è connessa ad un'unità di elaborazione chiamata *Processing Unit* (PU). L'algoritmo viene avviato in tutte le PU in parallelo ogni 25 ns.

L'informazione spaziale lasciata da una traccia nel rivelatore sono gli *hits* sulle pad logiche. Ogni pad logica ha una risposta binaria (si ha segnale oppure no).

Il processo di riconoscimento delle tracce nel trigger L0 è schematizzato in Figura 1.7.

Inizialmente si cercano hit nelle pad di M3, chiamate *track seeds*. Per ogni hit trovato in M3 si calcola una traccia che congiunge tale punto con il vertice d'interazione (tenendo conto della curvatura causata dal magnete) e si estrapolano i punti in M2, M4 e M5. In corrispondenza di questi punti, entro delle aree chiamate FOI (*Field of Interest*), si cerca almeno un hit per stazione. La dimensione del campo di interesse dipende dalla stazione: in x è di ± 3 pad su M1, M4 e M5 e ± 5 pad su M2. In y è ± 1 . Se nel FOI viene trovato almeno un hit per stazione la traccia viene conside-

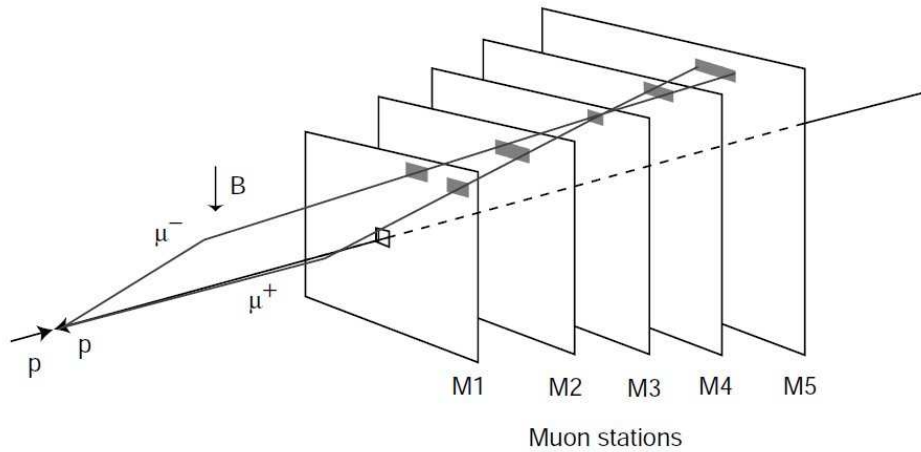


Figura 1.7: Riconoscimento delle tracce.

rata come candidata per il riconoscimento.

La posizione su M1 viene individuata dall'estrapolazione della retta passante tra l'hit individuato su M2 e il seme su M3. Se nel FOI di M1 viene trovato almeno un hit, la traccia trovata è riconosciuta come muone.

Capitolo 2

Monte Carlo

2.1 Generazione e Simulazione

Nel corso degli anni sono stati sviluppati dei programmi al computer, detti Monte Carlo, in grado di riprodurre la cinematica di vari processi fisici. Nel caso della fisica delle particelle elementari questi programmi sono in grado di riprodurre la produzione e il decadimento delle particelle e gli effetti del passaggio di queste particelle attraverso la materia.

Nel caso specifico ci interessa studiare il comportamento del passaggio di raggi cosmici nel rivelatore di muoni LHCb ed al tempo stesso renderci conto se sia possibile utilizzarli per la calibrazione e lo studio delle prestazioni del rivelatore in assenza di fasci di particelle. Esigenza resa più necessaria dai ritardi verificatisi nell'avvio dell'acceleratore. A questo scopo è stata sviluppata ed inserita nel programma di simulazione dell'esperimento una routine ad hoc che genera muoni secondo lo spettro di impulso e la distribuzione angolare attese nella caverna [2] sito dell'esperimento. Queste particelle sono quindi propagate all'interno del rivelatore LHCb tenendo conto della sua geometria.

2.1.1 Spettro e distribuzione angolare dei muoni

Per la generazione è necessario riprodurre il flusso di muoni alla profondità del rivelatore LHCb (~ 80 m) tenendo conto della dipendenza dall'angolo e dall'impulso dei muoni stessi. La relazione che lega l'intensità dei muoni di

impulso (p) e angolo zenitale (θ) all'intensità verticale (I_V), utilizzata per la generazione, è data da [2]:

$$I(p_\mu, \theta) = I_V(\zeta) \cos^3 \theta \quad (2.1)$$

dove $\zeta = p_\mu \cos \theta$.

Questa relazione fornisce, al livello del mare, il flusso dei muoni in funzione dell'angolo θ , per valori fissati dell'impulso, mostrato in Figura 2.1 mentre il flusso in funzione dell'impulso per diversi angoli zenitali è quello mostrato in Figura 2.2.

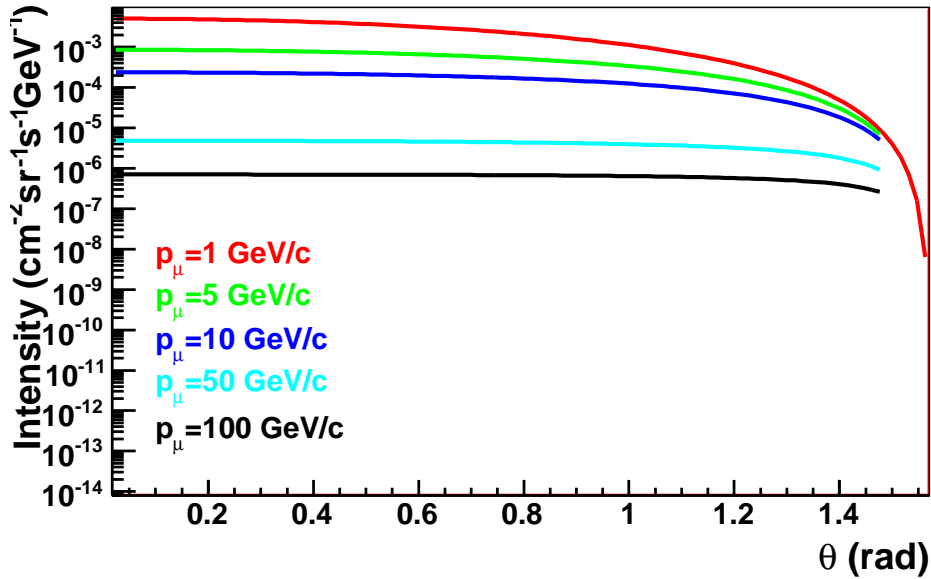


Figura 2.1: Flusso dei muoni al livello del mare, in funzione dell'angolo zenitale, per valori fissati dell'impulso.

Il flusso di muoni integrato è il numero di muoni che attraversano un emisfero di superficie unitaria per unità di tempo ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ed è ottenuto dall'integrazione di $I(\theta, \varphi)$ sull'angolo solido. Il flusso integrale al livello del mare in funzione dell'impulso e dell'angolo θ è mostrato in Figura 2.3.

Il rivelatore LHCb è posto a circa 80 m di profondità e bisogna quindi tenerne conto nel processo di generazione dei muoni. Diversi studi hanno

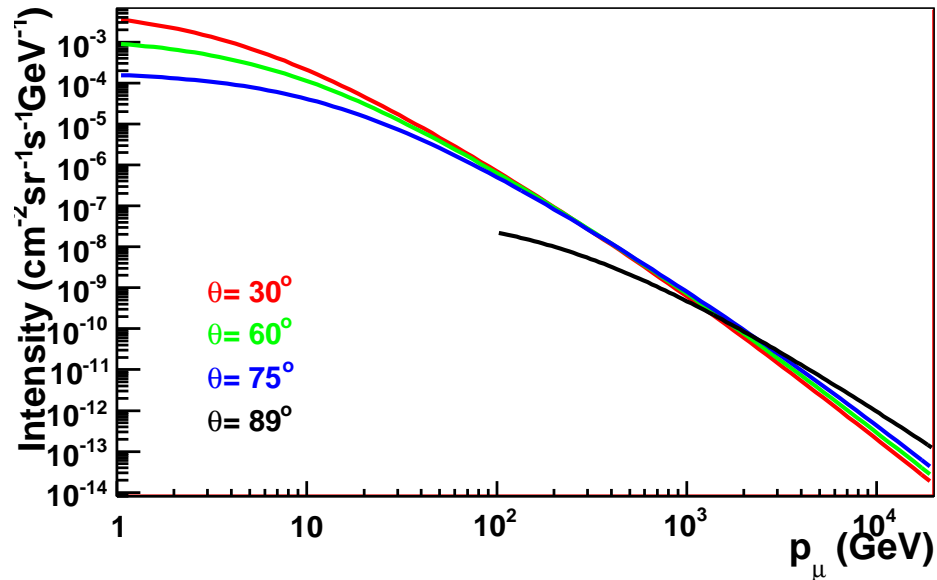


Figura 2.2: Flusso dei muoni al livello del mare, in funzione dell'impulso, per valori fissati dell'angolo di zenit.

dimostrato che la distribuzione angolare del flusso di muoni rimane praticamente immutata almeno fino a 100 metri di profondità. Gli effetti sono visibili solamente nello spettro di impulso. Questo si può notare in Figura 2.4, dove è mostrato il flusso di muoni a 80 m di profondità. Si osservi che la distribuzione dell'angolo zenitale rimane pressochè invariata mentre non lo è quella dell'impulso, il cui valor medio per esempio passa da 5.3 a 26.9 GeV/c. Utilizzando la stessa formula empirica (che è il risultato di un fit ai dati sperimentali) è possibile prevedere il flusso totale di muoni a varie profondità (purchè non troppo elevate). Il rate totale in funzione della profondità è mostrato in Figura 2.5 da cui è possibile evincere che ad LHCb ci si aspetta circa un centesimo del rate al livello del mare e pertanto su una stazione delle dimensioni di M3 incideranno circa 100 muoni al secondo. E' importante tuttavia valutare quanti di essi attraverseranno più di una stazione del rivelatore perchè solo questi saranno utili per gli scopi che ci siamo prefissi.

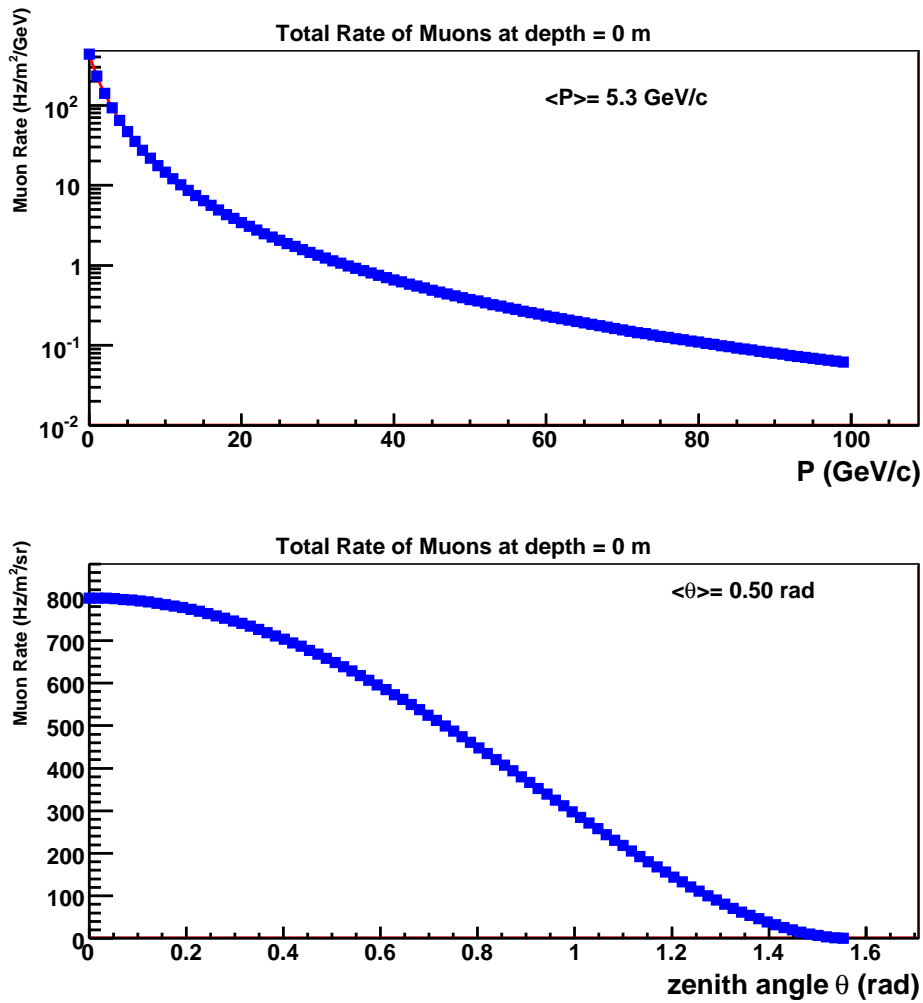


Figura 2.3: Flusso di muoni al livello del mare, in funzione dell'impulso integrato su ogni valore di θ (0° - 90°) ed in funzione di θ integrato su valori dell'impulso tra 1 e 100 GeV.

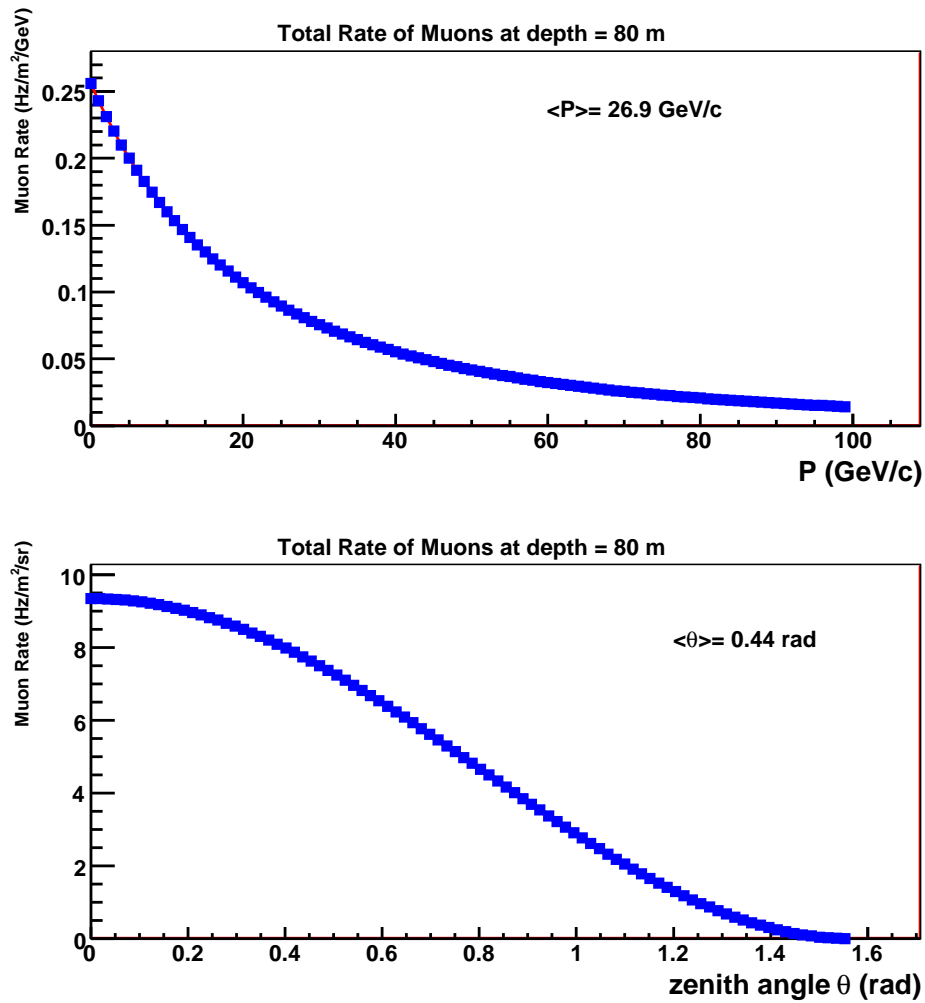


Figura 2.4: Flusso di muoni integrato a circa 80 m di profondità.

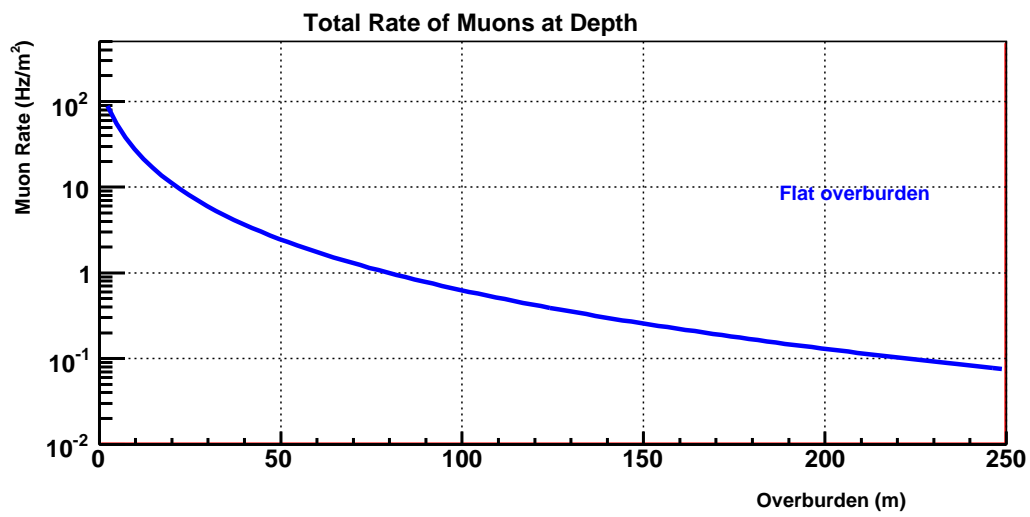


Figura 2.5: Rate totale dei muoni, rispetto alla profondità, che incidono su una parete verticale.

2.1.2 Simulazione

Si è quindi utilizzato il programma di simulazione standard di LHCb, GEANT4 (GEometry ANd Tracking, geometria e tracciamento), per tracciare i muoni all'interno del rivelatore. La simulazione include tutti gli aspetti seguenti:

- *Geometria*
Analizza la disposizione fisica dell'esperimento, inclusi i sottorivelatori, e considera come questa disposizione può influenzare il percorso delle particelle.
- *Tracciamento*
Viene simulato il passaggio delle particelle attraverso la materia tenendo conto di possibili interazioni e processi di decadimento.
- *Risposta dei rivelatori*
Registra quando una particella passa attraverso i volumi dei rivelatori ed, approssimativamente, come un rivelatore reale potrebbe rispondere.
- *Simulazione dell'elettronica*
Viene simulata non solo la risposta del rivelatore al passaggio della particella ma anche la fase di registrazione dei segnali da parte dell'elettronica.

In questo modo è possibile analizzare le informazioni Monte Carlo con gli stessi programmi con i quali si analizzeranno i dati reali dei raggi cosmici. Come già detto, l'effetto della roccia che copre la caverna dove è situato il rivelatore non è tanto di modificare la distribuzione angolare dei muoni quanto piuttosto lo spettro di impulso. D'altro canto la distribuzione angolare determina la frazione di muoni cosmici che attraversano più stazioni del rivelatore, e quindi il rate di eventi utili.

Lo spettro di impulso dei muoni che colpiscono almeno una stazione del rivelatore è mostrato nella Figura 2.6. .

Esso viene modificato nella maniera illustrata in Figura 2.7, dove viene richiesto che vi siano hits in ciascuna stazione, in Figura 2.8 dove si mostra lo spettro per gli eventi in cui viene ricostruita una traccia (nella maniera

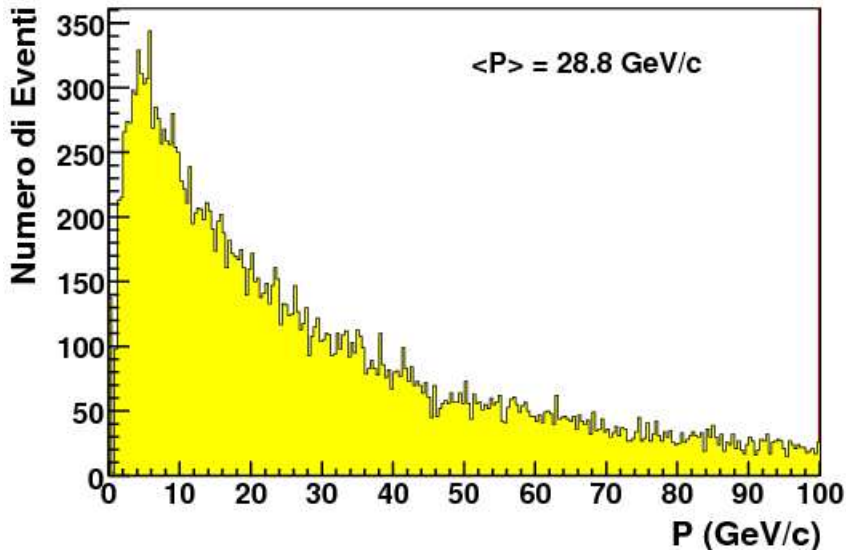


Figura 2.6: Spettro di impulso dei muoni che colpiscono almeno una stazione del rivelatore per muoni.

descritta nei capitoli successivi) in almeno tre stazioni, o in Figura 2.9 per eventi con una traccia ricostruita che attraversa tutte e quattro le stazioni da M2 a M5.

L'effetto sul valor medio dell'impulso è evidente. Esso passa da 28.8 GeV/c a 36.5 GeV/c, facilmente spiegabile dalle diverse configurazioni nelle quali i muoni attraversano sempre più materiale.

Questa analisi fornisce anche la frazione di eventi interessanti, poichè stima che circa il 10% di muoni incidenti sarà ricostruito come traccia che attraversa le quattro stazioni M1÷M5 ¹.

¹Questo comprende anche l'efficienza delle stazioni che nel Monte Carlo è quella corrispondente ai valori nominali per le condizioni di lavoro (alta tensione e miscela di gas) delle camere proporzionali.

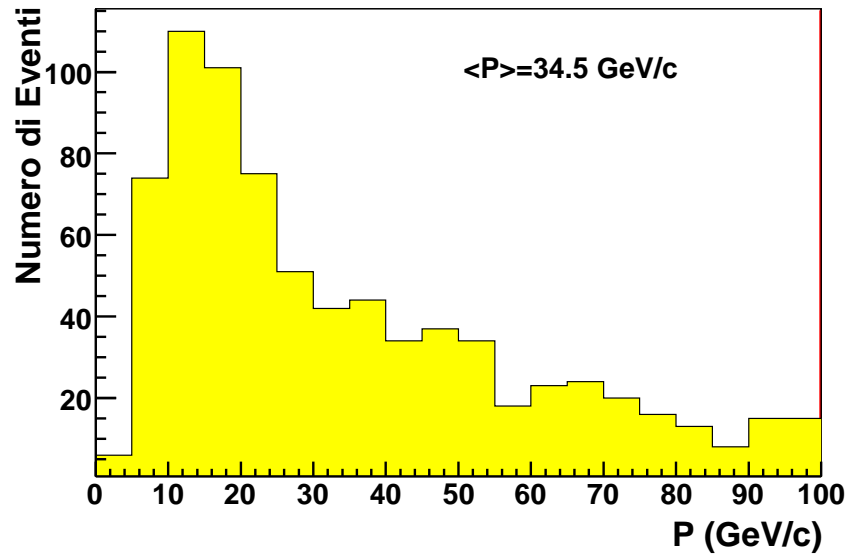


Figura 2.7: Spettro di impulso dei muoni per gli eventi in cui vi siano hits in ciascuna stazione.

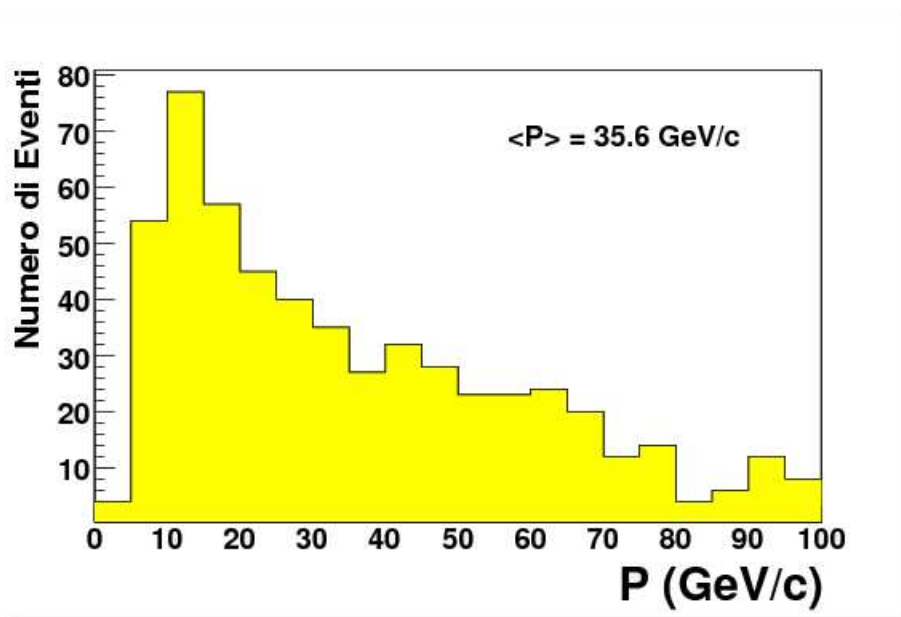


Figura 2.8: Spettro dei muoni per gli eventi in cui viene ricostruita una traccia con hits in almeno tre stazioni

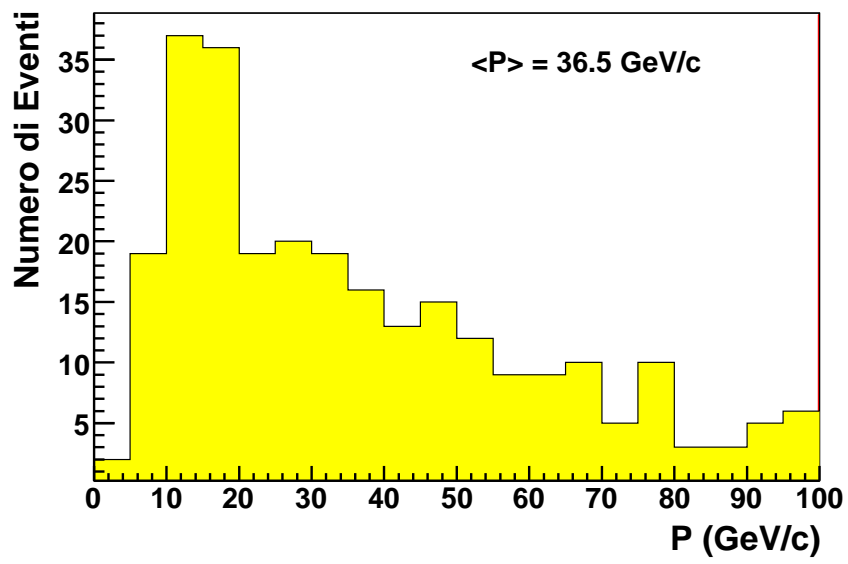


Figura 2.9: Spettro dei muoni per gli eventi in cui viene ricostruita una traccia con hits in tutte e quattro le stazioni

Capitolo 3

Studio del rumore

Questo capitolo si propone principalmente di descrivere lo studio effettuato sul rumore delle varie stazioni e regioni del rivelatore per muoni. E' importante avere un'idea del rate di rumore perchè esso ha un effetto sulla ricostruzione delle tracce che verrà descritta nel capitolo 4.

Le condizioni del rivelatore durante la presa dati e i dati utilizzati per il calcolo del rumore sono descritti in Appendice A.

3.1 Rate di rumore

Nel periodo nel quale sono stati presi i dati che saranno analizzati in questo lavoro di tesi, la prima stazione del rivelatore di muoni era in fase di installazione. Per questa ragione ci si è quindi concentrati sullo studio delle prestazioni delle stazioni M2÷M5.

Il gas presente nelle camere contiene Ar e CO_2 ma non ancora CF_4 .

L'alta tensione nel periodo della presa dati (agosto-settembre 2008) era stata impostata, per tutte le stazioni, a 2.5 kV. Questo valore è più basso di quello usato per testare le camere prima dell'installazione, pari a 2.8÷2.9 kV usando la miscela di gas standard.

Le soglie sulle camere per muoni sono state impostate all'inizio di settembre ad un valore corrispondente a circa 1.3÷1.5 volte il valore nominale scelto usando dati di "test beam". Il valore nominale è diverso per ogni canale.

Per questi motivi non ci aspettiamo le condizioni di progetto per la risolu-

zione temporale e l'efficienza. Il corretto funzionamento delle camere e la corrispondenza dei canali fisici con i segnali dell'elettronica sono stati controllati in dettaglio mediante sofisticati test di connettività [3].

Sono stati inviati trigger casuali a 10 kHz e sono stati registrati tutti i segnali sopra soglia provenienti dai canali logici presenti nelle varie stazioni e presenti in un "gate" di 25 ns. Poichè sono stati analizzati per questo studio 10^6 trigger il tempo integrato corrisponde a 25 ms.

In Figura 3.1 sono mostrati i conteggi relativi a tutti i canali logici accesi rispetto alla ODE corrispondente. Osservando le figure si nota la presenza di

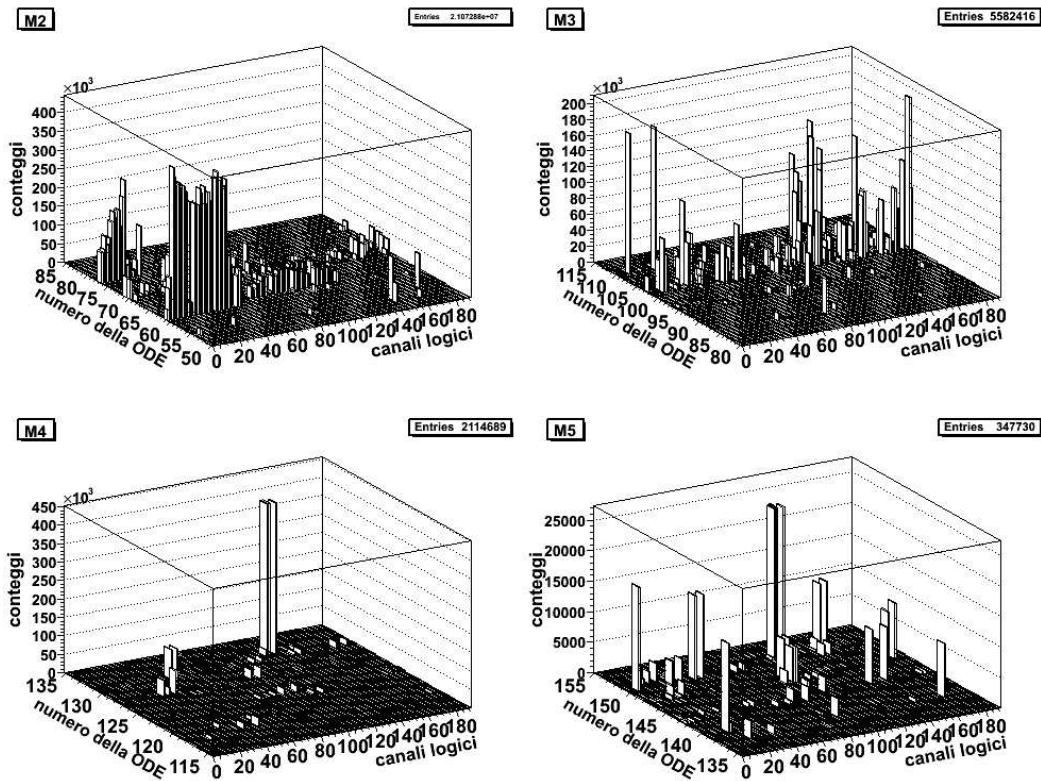


Figura 3.1: Distribuzione del rumore nelle varie stazioni. Nell'asse x sono riportati i canali logici, nell'asse y è riportato il numero della ODE corrispondente, nell'asse z il numero di conteggi nel rispettivo canale.

alcuni canali piuttosto rumorosi, con un numero di entrate molto maggiore rispetto alla maggior parte degli altri canali presenti nella stessa stazione. E'

stato quindi necessario trovare un criterio per escludere i canali più rumorosi. E' stato calcolato il numero di entrate medio per bin come

$$\langle Nentries/ch \rangle = \frac{\sum_{i=0}^{Nch} N_i}{Nch} \quad (3.1)$$

dove N_i è il conteggio del singolo canale e Nch è il numero di canali logici che hanno avuto almeno un conteggio.

Sono stati definiti "canali rumorosi" quelli che hanno un numero di entrate maggiore del 15% in più rispetto al numero di entrate medio. Sono stati rimossi i canali rumorosi ed è stato nuovamente effettuato il calcolo del numero di entrate medio per bin:

$$\langle Nentries/ch \rangle = \frac{\sum_{i=0}^{Nch} N_i}{NLogCh - NchR} \quad (3.2)$$

dove $NLogCh$ è il numero totale di canali logici presenti nella stazione considerata e $NchR$ è il numero di canali rumorosi rimossi.

Le nuove distribuzioni dei canali logici accesi rispetto alla ODE corrispondente, una volta rimossi i canali rumorosi, sono mostrate in Figura 3.2. Queste risultano essere più uniformi di quelle precedenti.

Per il calcolo del rumore, il numero di entrate medio per bin viene a sua volta diviso per il tempo integrato ΔT , dato dal numero di eventi del run considerato per il tempo di acquisizione:

$$\langle Rumore/ch \rangle = \frac{\langle Nentries/ch \rangle}{\Delta T} \quad (3.3)$$

I valori trovati del rate di rumore sono riportati in Tabella 3.1.

	M2	M3	M4	M5
NLogCh	5568 / 2	5568 / 2	2784 / 2	2784 / 2
# canali accesi	1298	1228	604	632
# canali rimossi	195	152	63	56
Rate/ch	15 kHz	6 kHz	4 kHz	1 kHz

Tabella 3.1: Rate di rumore per stazione.

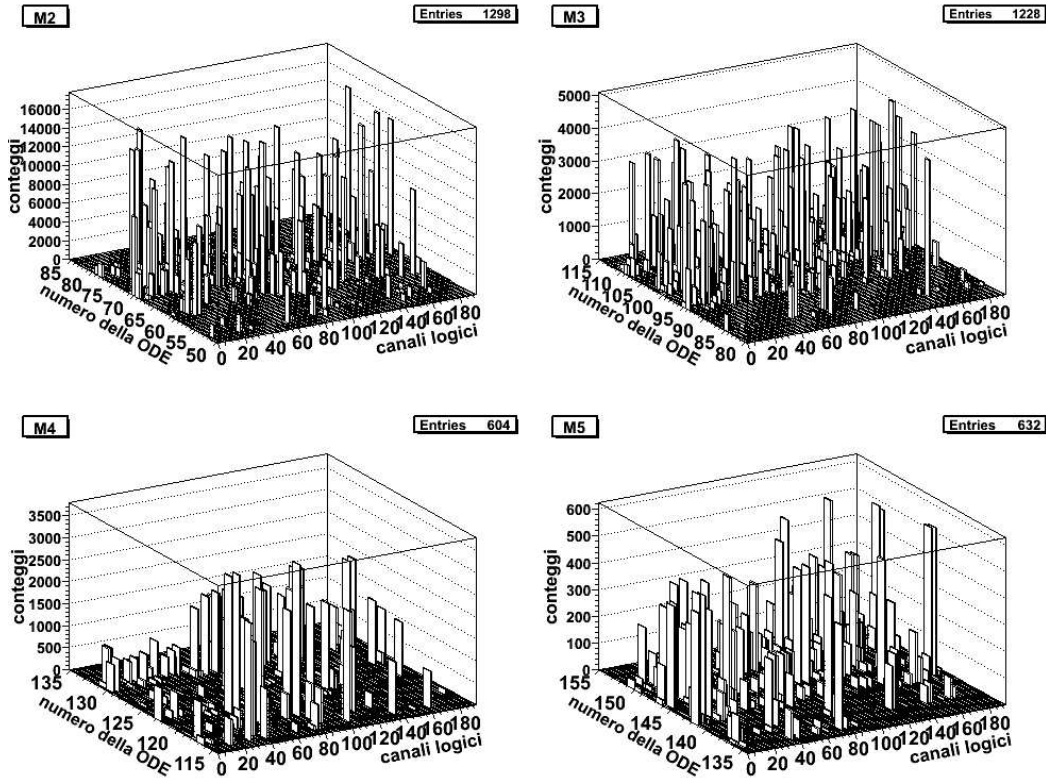


Figura 3.2: Distribuzione del rumore nelle varie stazioni dopo aver rimosso i canali rumorosi. Nell'asse x sono riportati i canali logici, nell'asse y è riportato il numero della ODE corrispondente, sull'asse z i conteggi.

Il numero di canali logici è stato diviso per due perchè nell'acquisizione del run analizzato sono stati utilizzati solo 2 quadranti. I valori trovati sono dell'ordine del kHz e non sono uniformi tra le varie stazioni.

Per studiare più approfonditamente la distribuzione del rate di rumore sono stati ripetuti i conti precedentemente riportati, considerando separatamente le quattro regioni (R1÷R4) per ciascuna stazione. I valori trovati sono riportati in Tabella 3.2.

Le regioni più rumorose risultano essere M2R2 ed M3R3 con valori di decine di kHz. Simulazioni e misure effettuate in superficie indicano però valori medi attesi per canale compresi tra 1-100 Hz. Questa differenza può essere dovuta a valori troppo bassi per le soglie delle camere a muoni presenti

		M2	M3	M4	M5
R1	NLogCh	1344 / 2	1344 / 2	1152 / 2	1152 / 2
	Noise	1.4 kHz	0.3 kHz	0.8 kHz	0.2 kHz
R2	NLogCh	1536 / 2	1536 / 2	672 / 2	672 / 2
	Noise	94 kHz	1 kHz	1 kHz	0.6 kHz
R3	NLogCh	1344 / 2	1344 / 2	480 / 2	480 / 2
	Noise	11.3 kHz	26.8 kHz	3 kHz	1.6 kHz
R4	NLogCh	1344 / 2	1344 / 2	480 / 2	480 / 2
	Noise	3.5 kHz	3 kHz	15.6 kHz	3 kHz

Tabella 3.2: Rate di rumore per stazione e regione

in queste regioni.

I valori elevati ottenuti sono tuttavia dovuti ad un numero limitato di canali che non sono stati esclusi dal taglio effettuato in precedenza, come si può osservare in Figura 3.3.

La percentuale di canali che abbiano nel tempo integrato di acquisizione un conteggio ≤ 25 (corrispondente ad un rate di rumore massimo di 1 kHz) è riportata in Tabella 3.3. In base a quest'analisi le regioni aventi il maggior

		M2	M3	M4	M5
	ChNoise < 1 kHz	54 %	51 %	60 %	65 %
R1	ChNoise < 1 kHz	65 %	64 %	63 %	75 %
R2	ChNoise < 1 kHz	47 %	58 %	70 %	72 %
R3	ChNoise < 1 kHz	42 %	35 %	70 %	64 %
R4	ChNoise < 1 kHz	69 %	65 %	46 %	58 %

Tabella 3.3: Percentuale di canali aventi un rate di rumore massimo di 1 kHz.

numero di canali rumorosi risultano essere M2R3 ed M3R3.

Questi risultati sono stati confrontati con i valori trovati considerando dati acquisiti con trigger di cosmici, corrispondenti ad un tempo integrato di 93 ms. L'ipotesi fatta per il confronto è che i pochi hits corrispondenti al passaggio dei muoni attraverso il rivelatore non hanno effetto sul rate di rumore.

Anche in questo caso, come mostrato in Tabella 3.4, i rate sono dell'ordine

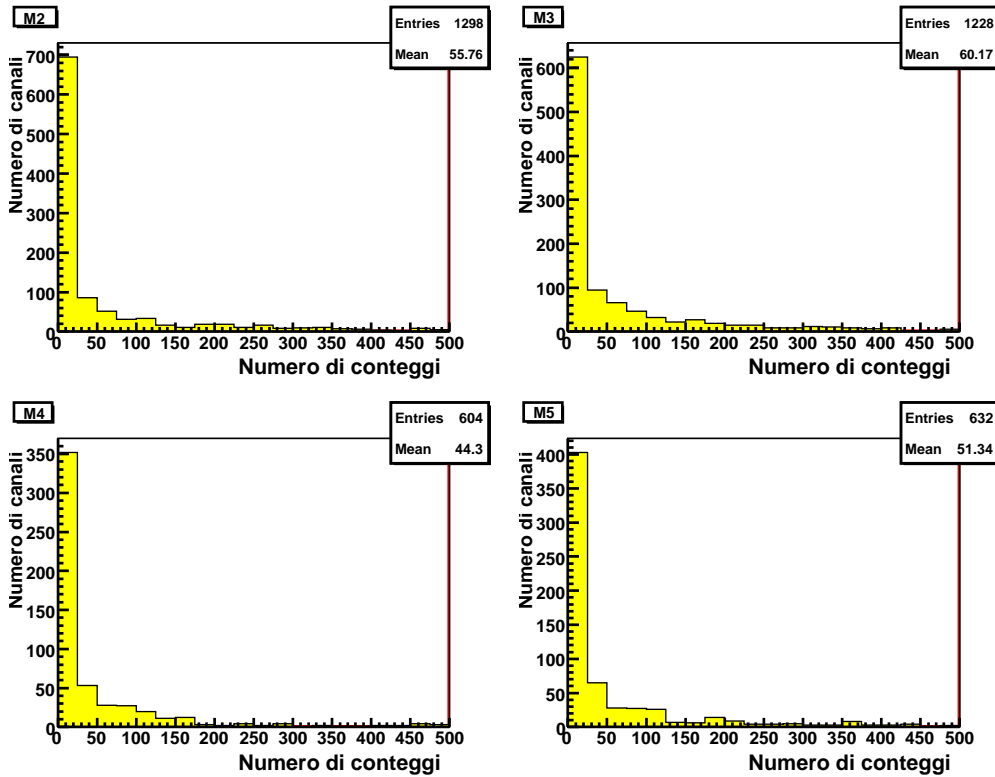


Figura 3.3: Conteggi .

del kHz ma i valori trovati risultano essere più uniformi tra le varie stazioni. Questo è verosimilmente da attribuire a soglie più elevate utilizzate nel corso

	M2	M3	M4	M5
NLogCh	5568	5568	2784	2784
# canali accesi	5182	5251	2527	2550
# canali rimossi	134	133	107	19
Rate/ch	2.3 kHz	1.7 kHz	1.5 kHz	1.6 kHz

Tabella 3.4: Rate di rumore per stazione per un run di cosmici.

di questa seconda acquisizione.

Nell'immediato futuro è prevista l'acquisizione di una serie di runs a diverse soglie per analizzare in dettaglio il rumore nelle singole camere e provvedere ad innalzare le soglie se questo dovesse risultare necessario.

Capitolo 4

Analisi dati

In questo capitolo vengono riportati gli studi sull'efficienza delle stazioni del rivelatore per muoni e dell'analisi della risposta temporale del sistema. Questi studi sono stati effettuati analizzando i runs di cosmici 33878-33892, 34064-34120 e 35664-35671, descritti in Appendice A.

4.1 Calcolo dell'efficienza delle camere

Le stringenti richieste dell'esperimento richiedono per il trigger che l'efficienza delle camere sia elevata, ma ci aspettiamo valori inferiori a quelli attesi a causa dell'accettanza geometrica del rivelatore, della mancanza di CF_4 nella miscela di gas presente nelle camere e della tensione inferiore a quella nominale.

Per calcolare l'efficienza delle stazioni per muoni sono stati analizzati dati acquisiti dal rivelatore sfruttando il segnale rilasciato dai muoni cosmici, quindi ancora in assenza di fascio.

Per questa analisi è stato sviluppato un programma in linguaggio C++ nel *framework* ROOT [4] in ambiente Linux.

Poichè sarà necessario procedere ad una ricostruzione geometrica delle tracce utilizzando hit nelle varie stazioni, sono stati rimossi gli eventi aventi un numero di hits totale maggiore di 50.

Dopo questa selezione, la localizzazione spaziale delle pads colpite per le varie

stazioni e regioni è mostrata in Figura 4.1. Le aree vuote sono dovute a canali

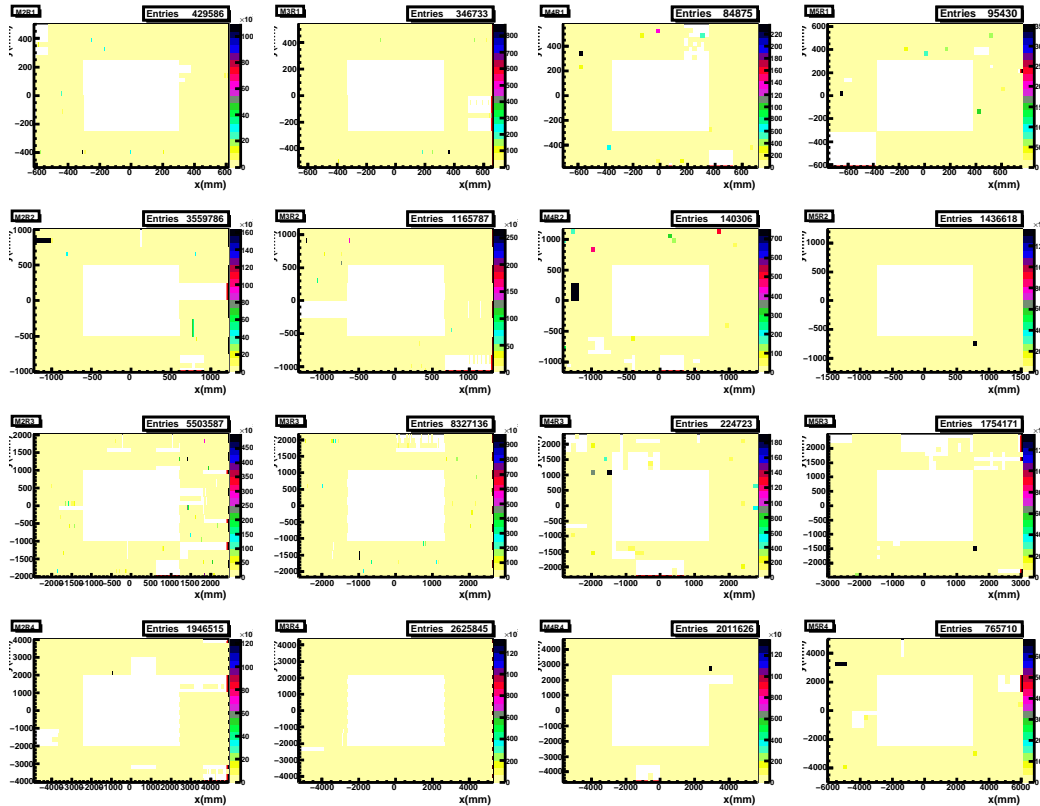


Figura 4.1: Distribuzione spaziale delle pads colpite in xy per le varie stazioni. Da sinistra verso destra sono riportate le stazioni M2÷M5, dall'alto verso il basso le regioni R1÷R4

“mascherati” perchè malfunzionanti (“*dead channels*”), corrispondenti a circa il 5% del totale, e quindi giustamente esclusi dal calcolo dell'efficienza.

Si noti che nella parte centrale ($-300 \text{ mm} \leq x \leq 300 \text{ mm}$ e $-250 \text{ mm} \leq y \leq 250 \text{ mm}$) di ogni grafico presente in Figura 4.1 non sono presenti pads colpite perchè l'area vuota corrisponde alla *beam pipe*.

I canali rumorosi sono stati rimossi secondo la procedura illustrata nel cap.3. In Figura 4.2 è riportata la distribuzione delle pads colpite dopo la rimozione dei canali rumorosi.

Il numero medio di hits per stazione è mostrato in Figura 4.3. Esso risulta maggiore per le stazioni M2 e M3 (circa 7) e questo è consistente con i risultati

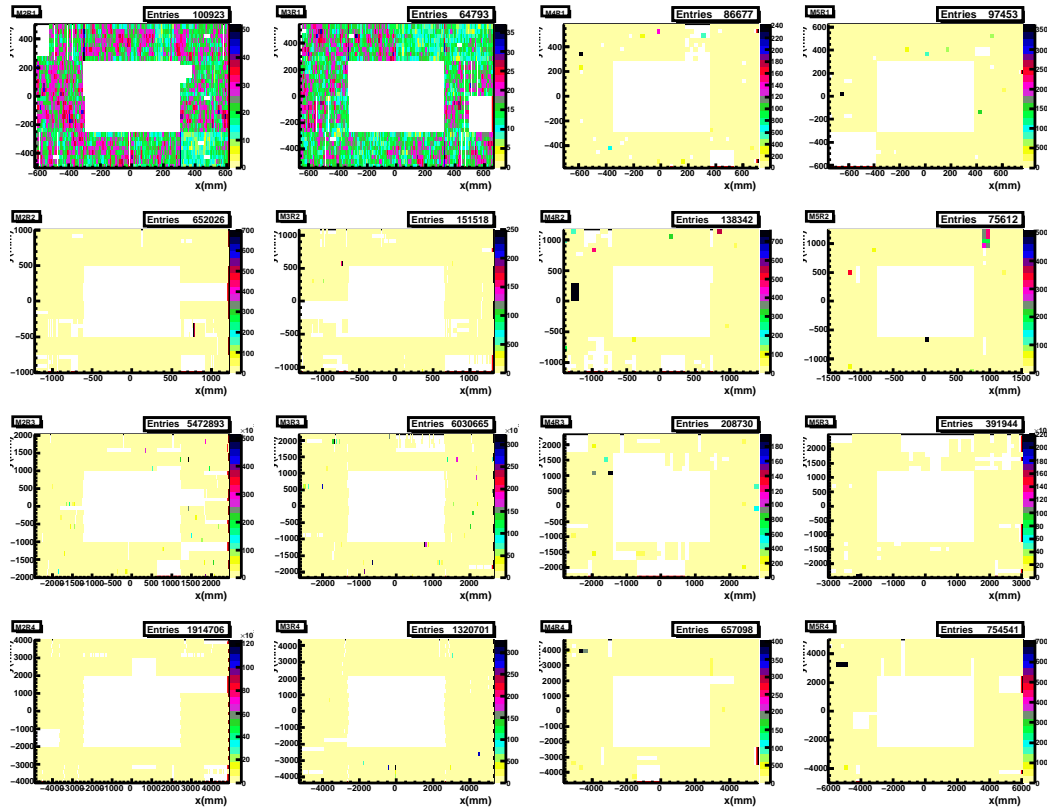


Figura 4.2: Distribuzione spaziale delle pads colpite in xy per le varie stazioni, dopo aver rimosso i canali rumorosi. Da sinistra verso destra sono riportate le stazioni M2÷M5, dall'alto verso il basso le regioni R1÷R4

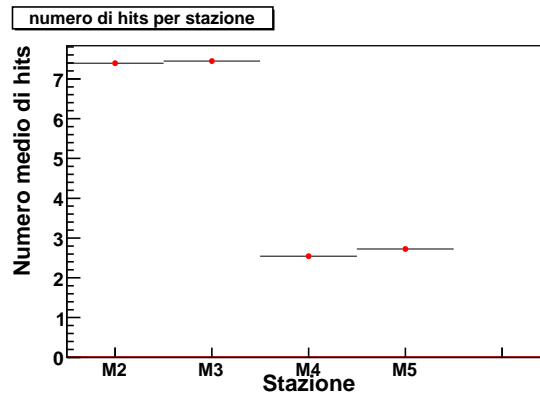


Figura 4.3: Numero medio di hits per stazione.

trovati nel capitolo 3.

Utilizzando per la rimozione dei canali rumorosi un processo iterativo, nelle stazioni M2 ed M3 il numero di hits medio diminuisce fino ad un valore di circa 4.

Ricostruzione delle tracce

Per poter calcolare l'efficienza delle stazioni per muoni con il metodo che verrà descritto nel paragrafo seguente, è necessario effettuare la ricostruzione delle tracce aventi 3 o 4 hits in stazioni separate.

Per selezionare le tracce a 4 hits, a partire da qualunque hit in M2 si traccia una retta per ogni hit trovato anche in M5. Per ogni retta si cerca l'hit in M3 e M4 più vicino all'interpolazione della retta stessa. Questi due passaggi sono mostrati in Figura 4.4. Ad ogni hit viene associata un'incertezza pari a metà della misura della pad più l'errore dovuto allo scattering multiplo (vedere Appendice B). A questo punto si ricalcolano i parametri della traiettoria

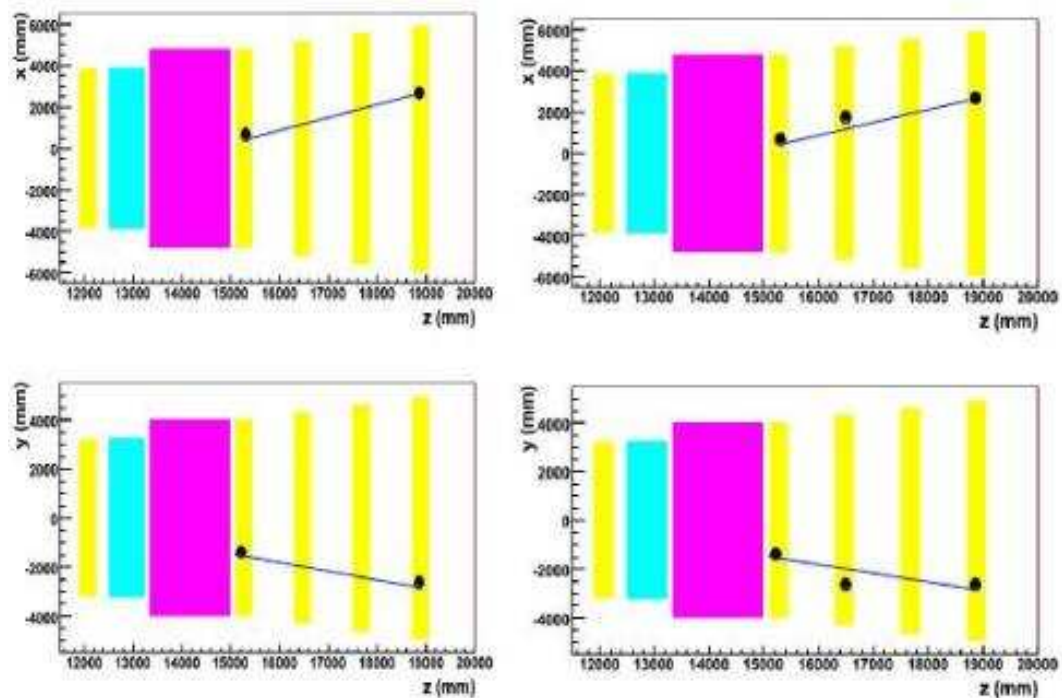


Figura 4.4: Ricerca delle tracce nei piani xz (alto) e yz (basso). Le sezioni in giallo corrispondono alle cinque stazioni per muoni, in blu al calorimetro elettromagnetico e in viola al calorimetro adronico.

lineare della traccia includendo anche il nuovo hit. Se il χ^2 diviso per il numero di gradi di libertà risulta inferiore all'unità la traccia sarà considerata nella analisi successiva.

Con lo stesso criterio, considerando tutte le possibili combinazioni di tre stazioni (cioè non restringendosi al caso discusso in cui è necessaria la presenza di hit in M2 e M5), è possibile selezionare le tracce con tre hits per le quali non è stato trovato il quarto. In Figura 4.5 è mostrato il numero di tracce trovate con 3 e 4 hits.

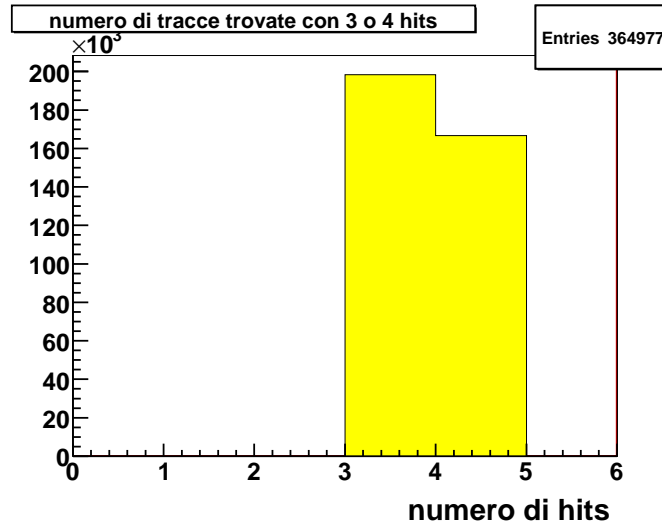


Figura 4.5: Numero di tracce trovate con 3 o 4 hits.

Nel 22.6% degli eventi viene trovata una traccia con $\chi^2 < 1$ con almeno tre stazioni colpite.

In Figura 4.6 sono mostrati i residui, che indicano la distanza tra l'hit trovato nella stazione e la retta che individua la traccia, e come ci aspetta la distribuzione risulta piccata sullo zero.

La differente larghezza delle due distribuzioni dipende della diversa risoluzione spaziale del rivelatore per muoni, infatti la granularità della parte sensibile del rivelatore è più fine nel piano di curvatura delle tracce ($x - z$). Poichè i muoni cosmici incidono sul rivelatore da qualsiasi angolazione dato che la loro distribuzione è isotropa rispetto all'angolo azimutale, le tracce sono state divise in “avanti” e “indietro”. Le tracce in “avanti” sono quelle ricostruite a partire da un muone che arriva sul rivelatore nella direzione del fascio, quindi incidendo prima su M2 e solo successivamente in M5. Viceversa, per le tracce “indietro” il muone incide prima sulla stazione M5 e poi

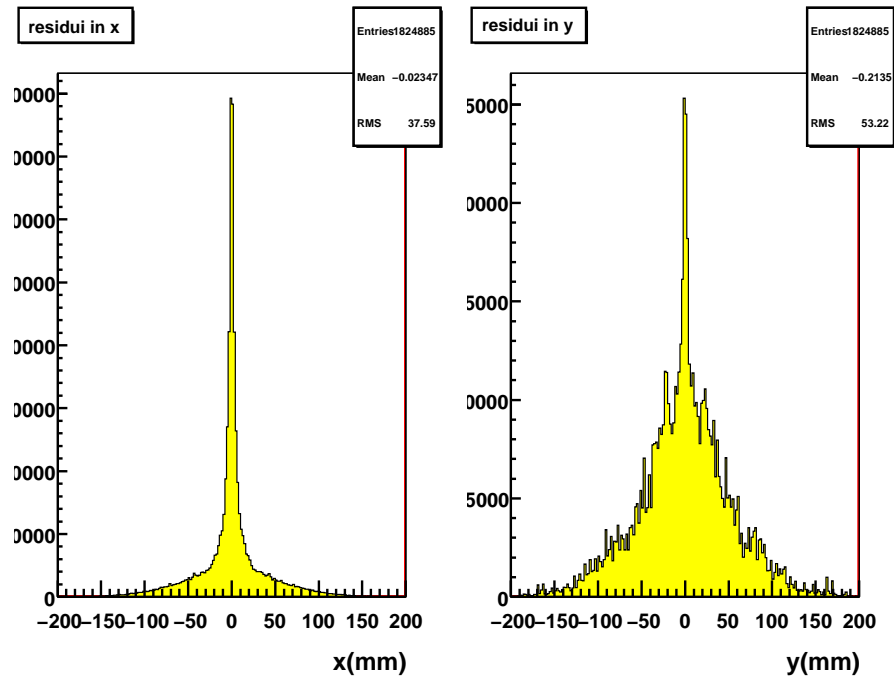


Figura 4.6: Distanza tra l'hit trovato nella stazione e la retta che individua la traccia.

su M2. La distribuzione angolare delle tracce a quattro hits così selezionate, nei piani yz e xz , è mostrata in Figura 4.7. L'angolo considerato è quello compreso tra la traccia e l'asse y (nel piano yz) e x (xz). Si osserva lo stesso comportamento per i due campioni di tracce considerati. Si hanno queste distribuzioni perchè mentre il rivelatore dell'esperimento LHCb ha una geometria proiettiva, i muoni cosmici incidono sul rivelatore da qualsiasi angolazione e questo fá sí che la distribuzione angolare delle tracce nel piano xz sia distribuita attorno allo zero. Osservando la distribuzione angolare nel piano yz si nota che non troviamo tracce aventi angoli prossimi a 90° e 0° . Troviamo poche tracce ad angoli piccoli perchè è poco probabile avere tracce pressochè orizzontali. Non troviamo tracce a 90° perchè i muoni cosmici che arrivano con queste inclinazioni non attraversano tutte e quattro le stazioni e di conseguenza non si ha il riconoscimento di una traccia.

Nella distribuzione angolare delle tracce nel piano yz si nota una certa struttura, verosimilmente dovuta alla geometria del rivelatore e alla diversa

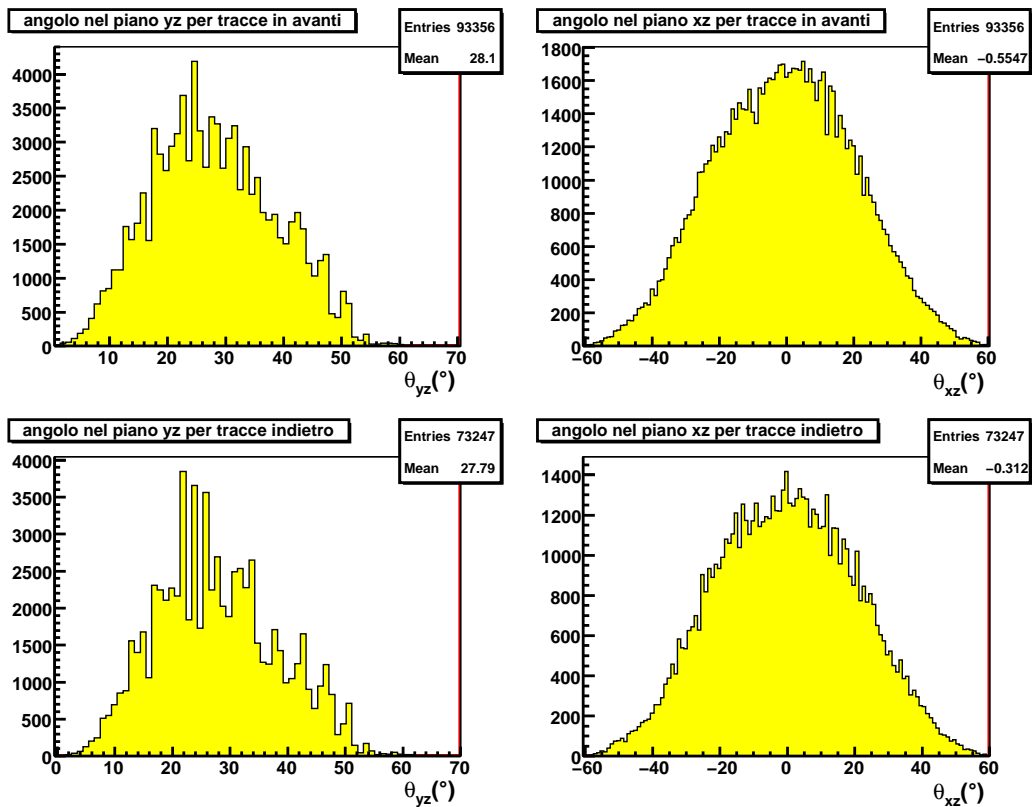


Figura 4.7: Distribuzione angolare delle tracce a quattro hits nei piani yz e xz .

granularità delle pads nella direzione y .

Calcolo dell'efficienza complessiva delle stazioni per muoni

Considerando il numero di tracce trovate con 4 hits (N_4) e tutte le varie combinazioni delle tracce con 3 hits nelle stazioni j, k e l (N_{jkl}^3), è possibile effettuare il calcolo dell'efficienza per stazione.

Se N_T è il numero totale di tracce di cosmici che attraversano il rivelatore ed ε_j è l'efficienza della stazione j -ma, il numero di tracce con 4 hits è dato da:

$$N_4 = \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \varepsilon_5 N_T. \quad (4.1)$$

Il numero di tracce con 3 hits, per le quali non è stato trovato il quarto hit entro l'accettanza geometrica della stazione stessa (entro la cornice esterna della stazione e fuori dalla "beam pipe"), è dato da:

$$\begin{cases} N_{345}^3 = \varepsilon_3 \varepsilon_4 \varepsilon_5 (1 - \varepsilon_2) N_T \\ N_{245}^3 = \varepsilon_2 \varepsilon_4 \varepsilon_5 (1 - \varepsilon_3) N_T \\ N_{235}^3 = \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_5 (1 - \varepsilon_4) N_T \\ N_{234}^3 = \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 (1 - \varepsilon_5) N_T \end{cases} \quad (4.2)$$

dove $(1 - \varepsilon_i)$ rappresenta l'inefficienza della stazione i -ma nella quale non è stato trovato il quarto hit.

Risolvendo il sistema (4.2) si trova che l'efficienza della stazione i -ma è data dall'espressione:

$$\varepsilon_i = \frac{N_4}{(N_{jkl}^3 + N_4)}. \quad (4.3)$$

In questo modo sono stati ottenuti i valori per l'efficienza media per stazione mostrati in Tabella 4.1:

Considerando separatamente le quattro regioni, i valori dell'efficienza otte-

	M2	M3	M4	M5
Efficienza	77.7 ± 0.1	82.2 ± 0.1	82.8 ± 0.1	83.6 ± 0.1

Tabella 4.1: Efficienza media per stazione. I valori sono percentuali.

nuti per ciascuna stazione sono riportati in Tabella 4.2. Questi valori variano da ~60% per le regioni più interne a ~85% per le regioni più esterne, dove

	M2	M3	M4	M5
R1	69.0 ± 1.0	60.0 ± 1.0	65.0 ± 1.0	73.0 ± 1.0
R2	69.9 ± 0.4	61.4 ± 0.5	73.4 ± 0.5	82.6 ± 0.5
R3	77.2 ± 0.2	76.5 ± 0.2	73.4 ± 0.2	79.4 ± 0.2
R4	79.0 ± 0.1	87.3 ± 0.1	86.5 ± 0.1	84.6 ± 0.1

Tabella 4.2: Efficienza media per stazione e regione. I valori sono percentuali e gli errori statistici.

la statistica è più alta.

Considerando separatamente i quattro quadranti, sono stati ottenuti i risultati riportati in Tabella 4.3. Come verificato dai dati, ad eccezione di M2, sono stati ottenuti valori abbastanza uniformi tra quadranti della stessa stazione.

Questi valori sono in ogni caso inferiori a quelli necessari per l'esperimento

	M2	M3	M4	M5
Q1	65.6 ± 0.2	78.8 ± 0.2	85.4 ± 0.2	81.4 ± 0.2
Q2	81.3 ± 0.2	83.8 ± 0.2	86.9 ± 0.1	86.4 ± 0.1
Q3	81.0 ± 0.2	81.3 ± 0.2	75.8 ± 0.2	82.7 ± 0.2
Q4	82.9 ± 0.2	84.4 ± 0.2	83.4 ± 0.2	83.5 ± 0.2

Tabella 4.3: Efficienza media per stazione e quadrante. I valori sono percentuali e gli errori statistici.

(> 98%). In parte ciò è dovuto alle condizioni non ideali in cui operavano le camere multifilo al momento della presa dati. Inoltre ci aspettiamo che l'inefficienza dovuta ai canali morti o mascherati sia dell'ordine del 5%. Rimane quindi da capire quali altri fattori possono aver influenzato i valori ottenuti per l'efficienza.

C'è da osservare che il rivelatore è progettato per avere una geometria proiettiva e quindi copertura geometrica per tracce che provengono dal vertice di interazione. I raggi cosmici non obbediscono a questa proiettività e questo potrebbe essere un possibile motivo di inefficienza. E' stato quindi effettuato uno studio dell'efficienza in funzione dell'inclinazione della traccia. Per ogni traccia con $\chi^2 < 1$ sono stati calcolati gli angoli compresi tra la traccia stessa

e la congiungente tra i singoli hit e l'origine del sistema di coordinate in 3 dimensioni. In Figura 4.8 è mostrata la rappresentazione bidimensionale. Le

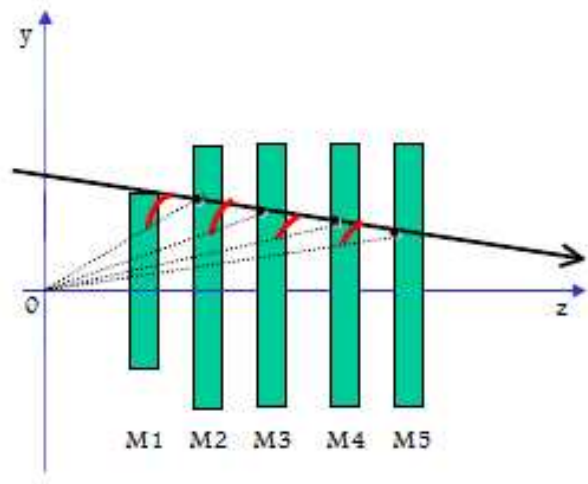


Figura 4.8: Angoli per le tracce, in 2 dimensioni.

distribuzioni di tali angoli, per stazione e per tracce con quattro hits, sono mostrate in Figura 4.9. Si noti la diversa distribuzione per stazione. In caso di perfetta proiettività della traccia tale angolo sarà zero.

E' stato quindi ripetuto il calcolo dell'efficienza complessiva per le stazioni M2÷M5 per angoli tra la traccia e l'hit in M2 compresi tra 0° e 20° (Tabella 4.4), con l'intento di selezionare le tracce più proiettive tra tutte quelle riconosciute. Considerando separatamente le quattro regioni è stato ripetuto il

	M2	M3	M4	M5
Efficienza	92.2 ± 0.1	96.1 ± 0.1	94.8 ± 0.1	95.1 ± 0.1

Tabella 4.4: Efficienza media per stazione per tracce con angolo minore di 20° rispetto alla stazione M2. I valori sono percentuali e gli errori statistici.

calcolo dell'efficienza per le stazioni M2÷M5, sempre per angoli tra la traccia e l'hit in M2 compresi tra 0° e 20° (Tabella 4.5).

I valori ottenuti sono più alti di quelli mostrati in Tabella 4.1 e in Tabella 4.2. Questo è una prova che parte dell'inefficienza trovata è dovuta alla

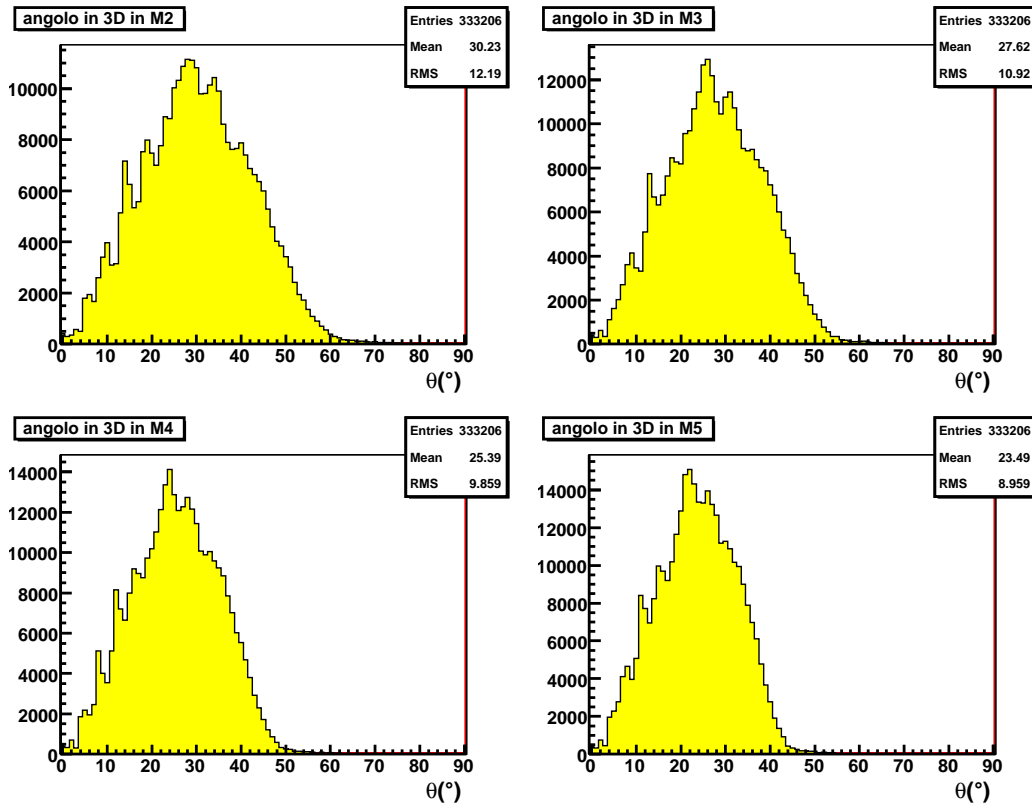


Figura 4.9: Angoli delle tracce per stazione, in gradi.

	M2	M3	M4	M5
R1	93.0 ± 1.0	92.0 ± 1.0	93.0 ± 1.0	93.0 ± 1.0
R2	92.8 ± 0.5	92.6 ± 0.5	95.9 ± 0.4	95.8 ± 0.4
R3	96.5 ± 0.1	96.6 ± 0.1	94.5 ± 0.2	95.2 ± 0.2
R4	90.4 ± 0.1	96.3 ± 0.1	95.2 ± 0.1	95.3 ± 0.1

Tabella 4.5: Efficienza per stazione e regione per tracce con angolo minore di 20° rispetto alla stazione M2. I valori sono percentuali e gli errori statistici.

geometria proiettiva del rivelatore. Infatti, per valori maggiori dell'angolo, aumentano le zone scoperte (zone in cui non vi è volume sensibile) del rivelatore causando un peggioramento dell'efficienza complessiva.

Altri effetti che sono al momento in esame sono il Multiple Scattering, la presenza di noise e l'eccessiva severità dei requisiti richiesti dal metodo usato

per la ricerca del quarto hit.

4.2 Allineamento temporale

Per gli eventi nei quali è stata selezionata una traccia a 4 hits con $\chi^2 < 1$, si è controllato il numero di hits presenti nelle varie stazioni oltre l'hit appartenente alla traccia (Figura 4.10).

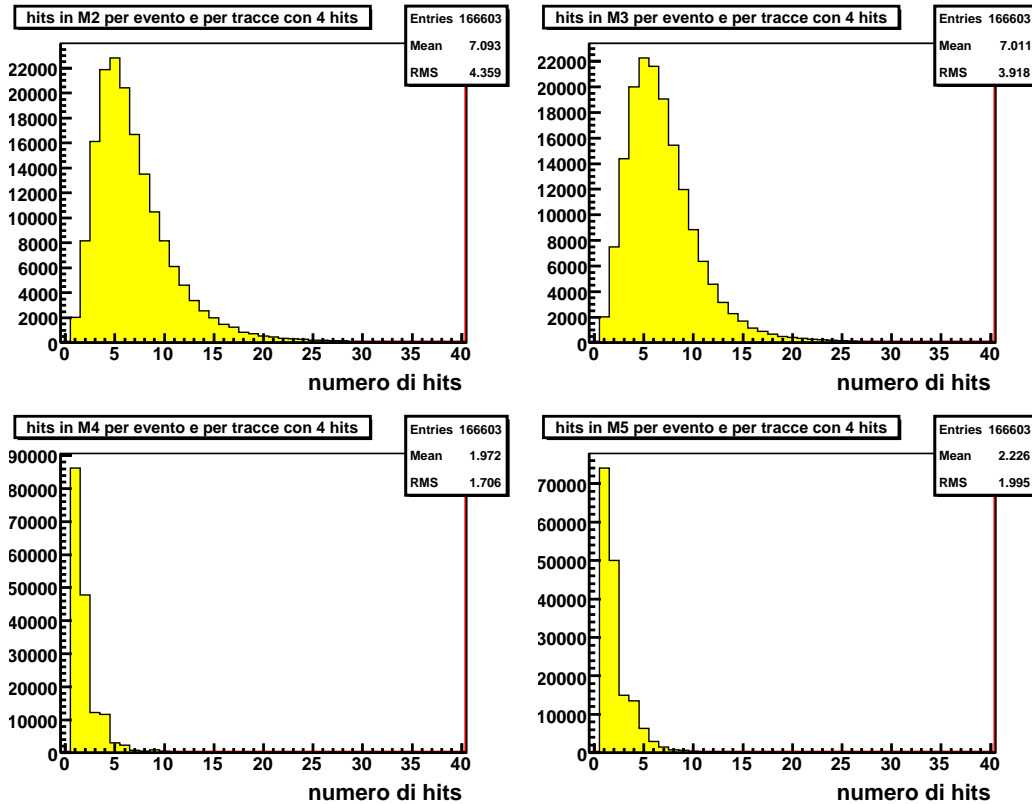


Figura 4.10: Numero di hits oltre quello appartenente alla traccia, per stazione e per evento, per eventi in cui è stata ricostruita una traccia con 4 hits.

Le stazioni M2 ed M3 hanno un numero di hit per evento maggiore rispetto a quelli presenti nelle stazioni M4 ed M5. Questo è consistente con i valori del rumore trovati, che indicano come stazioni più rumorose M2 ed M3.

Per questi hits è stata calcolata la distanza nel piano xy tra tutti gli hits presenti nella stazione e l'hit appartenente alla traccia. La distribuzione spaziale così ottenuta per le varie stazioni è mostrata in Figura 4.11.

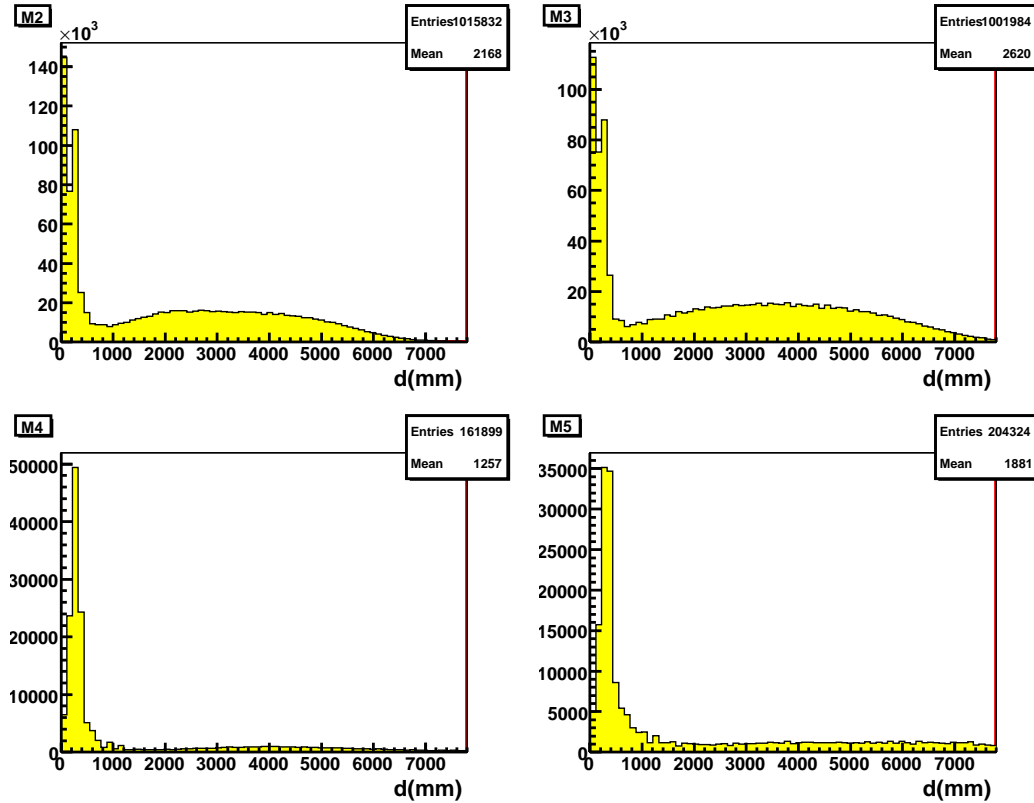


Figura 4.11: Distanza nel piano xy tra tutti gli hits presenti nella stazione e l'hit appartenente alla traccia.

In tutte e quattro le distribuzioni si nota un picco a piccole distanze, indicativo del fatto che la maggior parte degli hits risulti essere correlata spazialmente con l'hit appartenente alla traccia. Nelle stazioni M2 ed M3 è presente anche una grande quantità di hit a grandi distanze corrispondente a hits per i quali non si apprezza nessuna correlazione spaziale.

Per capire meglio il legame tra i diversi hits è stata analizzata la differenza tra i tempi TDC (~ 1.5 ns) dei vari hits della stazione e il tempo TDC dell'hit appartenente alla traccia, distinguendo tra hits correlati o scorrelati spazialmente. Le distribuzioni sono mostrate in Figura 4.12.

Per gli hits che distano meno di 80 cm dall'hit appartenente alla traccia, la differenza temporale risulta piccata e centrata sullo zero, mentre per gli hits più distanti la distribuzione è molto più larga.

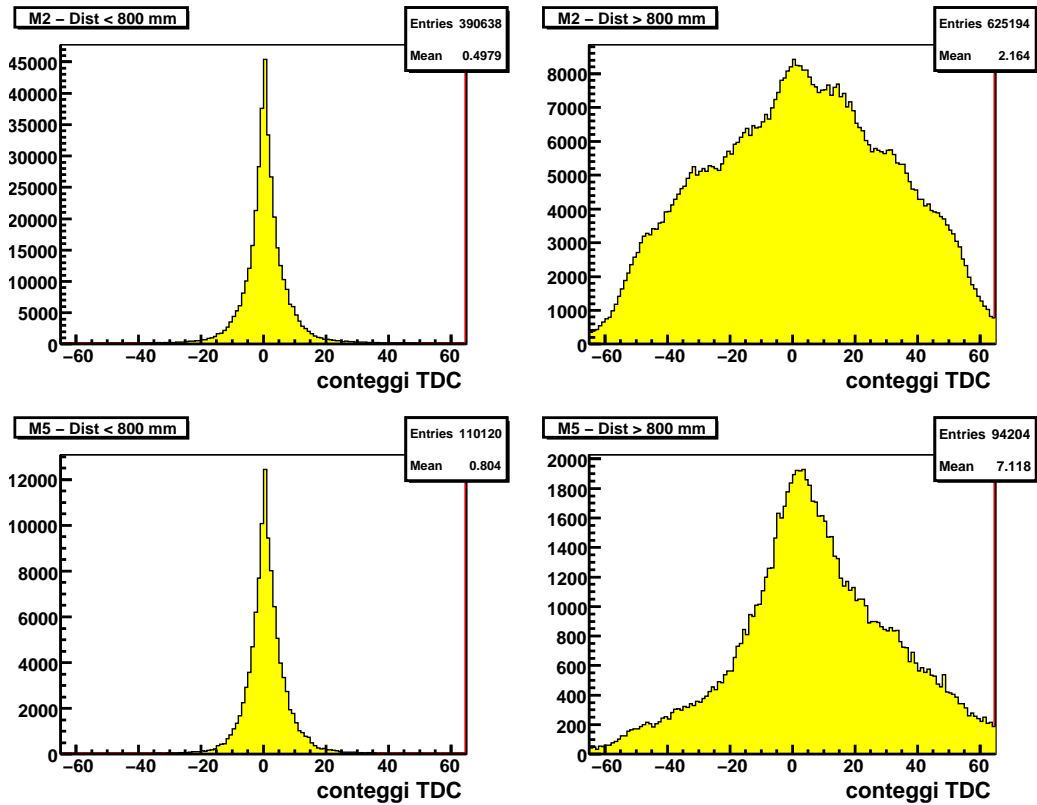


Figura 4.12: Distanza temporale, in conteggi TDC, tra gli hits e l'hit appartenente alla traccia nella stessa stazione, per le stazioni M2 (in alto) e M5 (in basso). A sinistra (destra) è mostrata questa differenza per hits che distano meno (più) di 80 cm. Un conteggio TDC corrisponde a circa 1.5 ns.

Esiste quindi una correlazione sia spaziale che temporale per gli hits più vicini all'hit appartenente alla traccia. Gli hits spazialmente più lontani potrebbero invece essere associati a rumore della stazione.

In questo contesto è interessante analizzare la distribuzione temporale, per le varie stazioni, degli hits appartenenti a tracce con 4 hits.

In Figura 4.13 è riportata la distribuzione temporale, per le quattro stazioni, degli hits appartenenti alle tracce avanti.

Tutte e quattro le distribuzioni sono centrate attorno al bin 8, che corrisponde al bin centrale della suddivisione in 16 bin della lettura del tempo fine da parte del TDC. Questo è consistente con la correzione dei tempi applicata già a livello hardware che tiene conto del tempo di volo delle particelle.

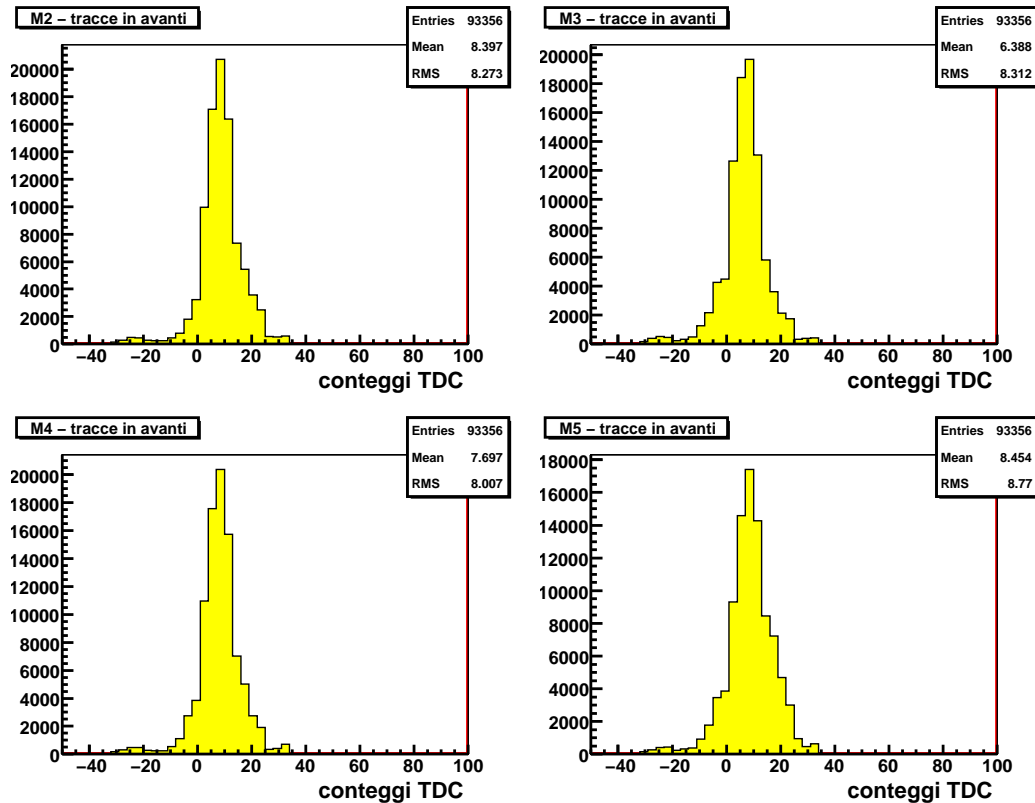


Figura 4.13: Distribuzione temporale degli hits per tracce in avanti, in conteggi TDC.

Questa correzione è stata applicata su tutte le tracce, senza distinguere tra tracce in avanti e tracce indietro. Questo fá sí che alle tracce indietro sia stata applicata una correzione errata, opposta a quella che avrebbero dovuto avere. Questo è evidente nelle distribuzioni mostrate in Figura 4.14. Per una traccia indietro il muone incide prima sulla stazione M5 e solo dopo un tempo determinato dal tempo di volo del muone stesso e dall'inclinazione della traccia, incide sul calorimetro. Solo in questo momento viene dato il consenso all'acquisizione e quindi i tempi letti sulle quattro stazioni, associati al passaggio del muone, hanno un valore negativo. La correzione applicata a questi tempi, studiata solo per le tracce in avanti, accentua questo effetto, come si può osservare in Figura 4.14.

Inoltre le distribuzioni dei tempi per tracce indietro non si presentano

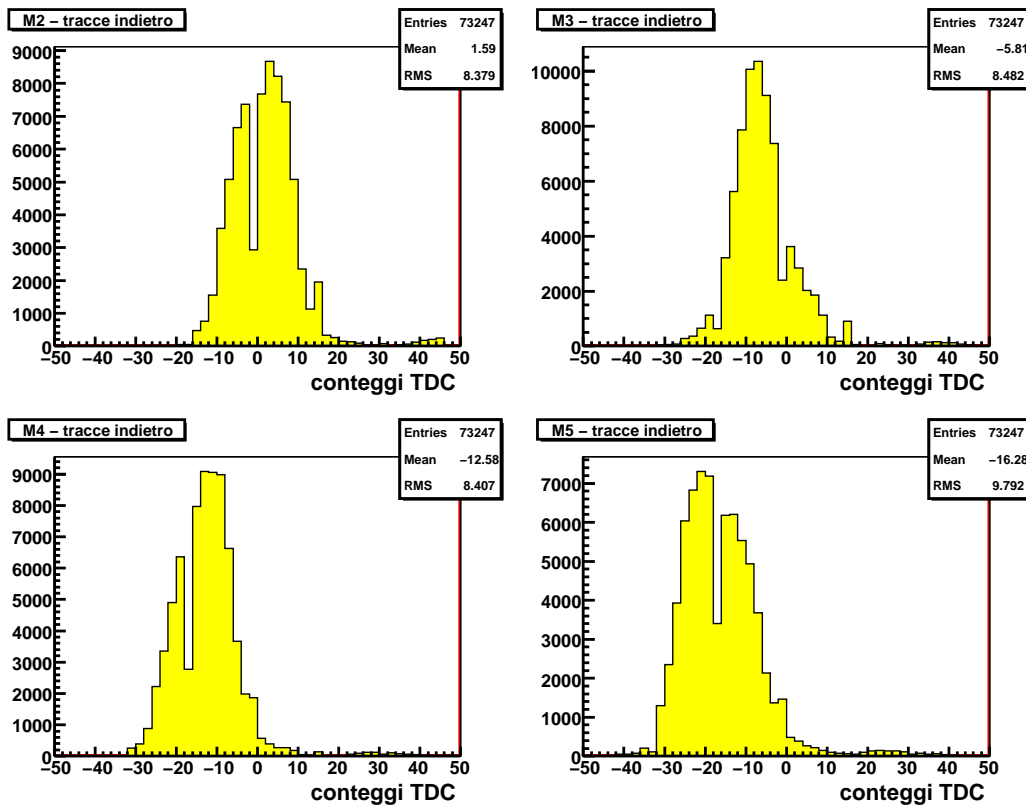


Figura 4.14: Distribuzione temporale per tracce indietro, degli hits per le varie stazioni, in conteggi TDC.

uniformi e sono visibili delle discontinuità. Questo potrebbe essere dovuto ad un problema all'assegnazione del valore del TDC che al momento è in fase di studio.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state studiate le prestazioni iniziali delle stazioni M2÷M5 del rivelatore di muoni dell'esperimento LHCb.

A causa del ritardo nelle operazioni di avvio dell'acceleratore LHC si è reso necessario l'impiego di cosmici non potendo utilizzare particelle provenienti da collisioni fra fasci.

Simulazioni Monte Carlo hanno mostrato che il rate atteso è sufficiente almeno per le calibrazioni preliminari.

Uno studio sul rumore è stato effettuato utilizzando dati acquisiti appositamente per questo scopo. Esso si è rivelato superiore a quello ottenuto in misure in superficie e rende verosimilmente necessaria una verifica accurata dei livelli di soglia fissati nelle camere multifilo.

L'efficienza per singole stazioni o per quadranti e/o regioni è stata misurata utilizzando tracce di cosmici che attraversano tutto il rivelatore di muoni. Queste sono globalmente di $\sim 78-84\%$, inferiori quindi a quelle necessarie per un buon funzionamento del trigger dell'esperimento. Una parte è da assegnare alle condizioni di lavoro non ottimali. Inoltre è stato mostrato che questa riduzione dell'efficienza è in gran parte dovuta alla cospirazione fra la geometria del rivelatore (proiettiva per tracce provenienti dal vertice d'interazione) e gli angoli di incidenza dei cosmici. L'efficienza aumenta infatti fino a valori di $\sim 92-96\%$ quando si usano tracce proiettive.

E' stato infine mostrato che esiste una correlazione temporale tra gli hits spazialmente vicini alla traiettoria del raggio cosmico.

Appendice A

Condizioni del rivelatore durante la presa dati

Sono stati analizzati i seguenti runs:

- **Run 30080 (19.08.08)**

Questo run è stato preso inviando trigger casuali ad una frequenza di 10 kHz. L'acquisizione è stata effettuata per un singolo bunch in un periodo di 25 ns.

Su disco sono stati registrati 32M di eventi, 1M di questi analizzati in questa tesi.

Sono stati utilizzati due soli quadranti.

- **Runs 33878-33892 (18-19.09.08)**

Questi runs sono stati presi con un trigger "CALO" che richiede almeno un hit in uno dei calorimetri.

La frequenza di trigger era ~ 10 Hz con eventi multibunch (± 3 BX). L'acquisizione è stata quindi effettuata in un periodo di 175 ns.

Sono già presenti delle correzioni sui conteggi del TDC che tengono conto del tempo di volo delle particelle, introdotte per le tracce in avanti.

Su disco sono stati registrati 500K eventi.

- **Runs 34064-34120 (19-21.09.08)**

Questi runs sono stati presi con un trigger CALO-OR-MUON, che richiede un hit in uno dei calorimetri o in ciascuna delle quattro stazioni

di muoni all'interno del FOI, con eventi multibunch (± 3 BX) e nelle stesse condizioni del run precedente.

Su disco sono stati registrati ~ 400 K eventi. Gli eventi con trigger MUON sono stati eliminati dall'analisi.

- **Runs 35664-35671 (19.10.08)**

Questi runs sono stati presi con un trigger "CALO" che richiede almeno un hit in uno dei calorimetri.

L'acquisizione è stata effettuata con eventi multibunch (± 2 BX).

Sono già presenti delle correzioni sui conteggi del TDC che tengono conto del tempo di volo delle particelle, introdotte per le tracce in avanti.

Su disco sono stati registrati circa 425K eventi.

Appendice B

Multiple Scattering

Una particella carica che attraversa un mezzo viene deflessa da molti urti a piccoli angoli. Parte di questa deflessione è dovuta allo Scattering Compton tra i nuclei, come illustrato in Figura .

E' necessario tener conto di questo effetto per identificare il tragitto percorso dai muoni nell'attraversare le stazioni per muoni.

La correzione da applicare a causa dello Scattering Multiplo è data da [5]:

$$\delta\theta = (0.0136/p) * \sqrt{x/x_0 \cos\alpha} \quad (\text{B.1})$$

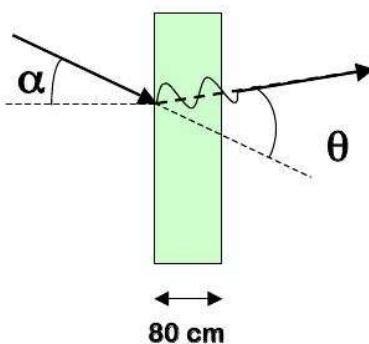


Figura B.1: Schema della deviazione causata dallo Scattering Multiplo.

dove:

- θ = angolo di deviazione;
- α = angolo che la traccia forma con l'asse z;

- $x_0 =$ lunghezza di radiazione ($x_0(Fe) = 1.76$ cm);
- $x =$ percorso attraverso la materia ~ 80 cm.

Per un valore dell'impulso pari a $p = 6$ GeV (limite superiore) e sapendo che la distanza tra le stazioni è $L \simeq 120$ cm, si può calcolare la correzione da applicare nella ricostruzione delle tracce che risulta essere pari a:

$$\delta x = L * \sin(\delta\theta) \sim 2.4 \text{ cm} * \sqrt{1/\cos\alpha} \sim 2.4 \text{ cm} \quad (\text{B.2})$$

Appendice C

Muon Layout

Nella pagina seguente è riportata una tabella riassuntiva con tutte le caratteristiche delle camere a fili nelle diverse stazioni e regioni delle 5 stazioni di muoni presenti nell'esperimento LHCb.

type	readout	# of chambers	logical pad size	pads per chamber	# of logical pads	pads per sector	# of sectors	# of logical channels	# of physical channels
M1R1	GEM	12	1x2.5	24x8	2304	—		2304	4608
M1R2	PAD	24	2x5	24x4	2304	—		2304	9216
M1R3	PAD	48	4x10	24x2	2304	—		2304	9216
M1R4	WIRE	192	8x20	12x1	2304	—		2304	9216
sum		276			9216			9216	32256
M2R1	P+W	12	0.5x2.5	48x8	4608	6x8	96	1344	2688
M2R2	P+W	24	1x5	48x4	4608	12x4	96	1536	5376
M2R3	PAD	48	2x10	48x2	4608	24x4	48	1344	9216
M2R4	WIRE	192	4x20	24x1	4608	24x4	48	1344	9216
sum		276			18432			5568	26496
M3R1	P+W	12	0.5x2.5	48x8	4608	6x8	96	1344	2688
M3R2	P+W	24	1x5	48x4	4608	12x4	96	1536	5376
M3R3	PAD	48	2x10	48x2	4608	24x4	48	1344	9216
M3R4	WIRE	192	4x20	24x1	4608	24x4	48	1344	9216
sum		276			18432			5568	26496
M4R1	PAD	12	2x2.5	12x8	1152	—		1152	2304
M4R2	PAD	24	4x5	12x4	1152	3x4	96	672	2304
M4R3	PAD	48	8x10	12x2	1152	6x4	48	480	4608
M4R4	WIRE	192	16x20	6x1	1152	6x4	48	480	9216
sum		276			4608			2784	18432
M5R1	PAD	12	2x2.5	12x8	1152	—		1152	2304
M5R2	PAD	24	4x5	12x4	1152	3x4	96	672	2304
M5R3	PAD	48	8x10	12x2	1152	6x4	48	480	4608
M5R4	WIRE	192	16x20	6x1	1152	6x4	48	480	9216
sum		276			4608			2784	18432
TOTAL	1380				55296			25920	122112

Bibliografia

- [1] A. A. Alves *et al.* [LHCb Collaboration], “The Lhcb Detector At The Lhc,” JINST **3**, S08005 (2008).
- [2] D. Reyna, “A simple parameterization of the cosmic-ray muon momentum spectra at the surface as a function of zenith angle,” arXiv:hep-ph/0604145.
- [3] R.Berutti, A.Lai, B.Saitta - Metodi per l’analisi della connettività e dell’allineamento temporale del rivelatore per muoni dell’esperimento LHCb, Tesi, Cagliari 2007
- [4] ROOT, an object-oriented data analysis framework, <http://root.cern.ch>
- [5] C. Amsler *et al.* [Particle Data Group], “Review of particle physics,” Phys. Lett. B **667**, 1 (2008).