

Tracciamento dei raggi cosmici

Valerio Bertacchi, Olmo Cerri e Nicolò Foppiani

Dipartimento di Fisica "E. Fermi" - Università di Pisa

11 aprile 2016

Sommario

Durante questa esperienza è stato affrontato il tracciamento dei raggi cosmici eseguito con il telescopio, composto da tre MGRPC, dell'esperimento EEE.

Dalle informazioni grezze in uscita dall'apparato è stata inizialmente investigata la qualità dei dati disponibili. In seguito, dopo la ricostruzione delle *hit* prima e delle tracce poi, è stata messa a punto una procedura di calibrazione e allineamento che ha portato ad una risoluzione di 1.6 cm, 1.4 cm e 190 ps rispettivamente sulla coordinata x , y e t .

A seguito di una caratterizzazione del rumore e di un breve studio della purezza del campione delle tracce ricostruite, sono stati messi a punto due metodi per la misura dell'efficienza delle singole camere che non richiedono un intervento fisico sull'apparato ed eseguibili da remoto. Entrambi i metodi presentano ancora una poca affidabilità dovuta a una scarsa conoscenza del rumore ma prospettano una buona strada per il raggiungimento dell'obiettivo di una procedura automatica.

Infine, i risultati di una simulazione MC dell'intero telescopio sono stati confrontati con quelli ottenuti dalle misure effettuate. È osservabile un buon accordo.

Concludono il lavoro una stima del flusso dei raggi cosmici e una breve lista di punti lasciati in sospeso e proposte di miglioramento.

Indice

1	Introduzione	3
2	Strumentazione	3
3	Da raggi cosmici a hit	4
4	Calibrazione	4
5	Ricostruzione delle tracce	10
5.1	<i>Clustering</i>	11
5.2	Display degli eventi	11
6	Allineamento	11
7	Caratterizzazione del rumore	18
8	Stima della purezza del campione	18
9	Efficienza	19
9.1	Efficienza con <i>trigger</i> a 3	19
9.2	Efficienza con <i>trigger</i> a 2	23

10 Simulazione MC	25
10.1 Caratteristiche del Monte Carlo	25
10.2 Accettanza	25
11 Misure	26
11.1 Distribuzioni Angolari	26
11.2 Flusso dei raggi cosmici	27
12 Conclusioni	28
A Appendice - Spettro dei Raggi Cosmici	30
A.1 Problematiche note a priori	30
A.2 Analisi qualitativa dello spettro	30

1 Introduzione

Il telescopio, messo a disposizione dall'esperimento *Extreme Energy Events* (EEE), è stato utilizzato in questa esperienza al fine di misurare alcuni parametri dei raggi cosmici che giungono al suolo, quali il flusso e le distribuzioni angolari.

Al fine di raggiungere questo scopo, sono stati analizzati inizialmente i dati grezzi in uscita dal telescopio per ricostruire prima le *hit* e poi le tracce. Una fase di allineamento e calibrazione è stata determinante al fine di raggiungere una buona risoluzione.

La misura dell'efficienza automatica, uno degli obiettivi principali che ci erano stati posti, è stata effettuata con due diversi algoritmi.

2 Strumentazione

Il telescopio a disposizione è costituito da 6 *Multi Gap Resistive Plate Chamber* (MGRPC) (di cui solo 3 utilizzabili nell'esperienza) e da un sistema di *trigger* e acquisizione dati. Ogni camera permette di ricostruire la posizione di una particella carica che la attraversa: più camere sovrapposte, un telescopio quindi, permettono di tracciare la traiettoria della particella e grazie alle informazioni temporali risalire alla sua energia.

MGRPC - camera a ionizzazione con miscela di esafluoruro di zolfo (SF_6) e Freon ($\text{C}_2\text{F}_4\text{H}_2$), su cui è applicabile una differenza di potenziale regolabile esternamente (è possibile regolare separatamente i due elettrodi). Gli elettrodi sono costituiti da strip di rame parallele che percorrono tutta la lunghezza della camera (24 per camera); tali *strip* sono litografate su due piastre di vetronite presenti sul piano superiore e inferiore della camera; il segnale prodotto sulle *strip* al passaggio di una particella carica è raccolto separatamente per ogni strip. La tensione della camera è regolata in modo da funzionarla in *avalanche mode*, inoltre le zone riempite dal gas sono intervallate da strati di vetro ai fini di collimare le valanghe e ottimizzare la tracciatura delle particelle. Da notare inoltre che l'utilizzo di vernice resistiva sulle piastre esterne permette di localizzare il tempo morto (per la scarica del segnale) unicamente al punto interessato e non a tutta la camera. Lo schema della camera è mostrato in figura 2.1.

Dimensionamento - Ogni camera è lunga 168 cm \times 82 cm, dove il lato maggiore è quello parallelo alle strip. Le camere sono parallele ed equidistanziate di 46 cm una dall'altra. Tali misure sono state controllate con precisione ± 1 mm (compreso il parallelismo delle camere). Le *strip* sono larghe 2.5 cm, mentre tra una *strip* e l'altra vi sono 0.7 cm. È stata denotata con coordinata x quella parallela alle strip, con 0 fissato a metà della camera; la coordinata y è invece parallela al lato corto della camera, con 0 fissato a metà della camera; la coordinata z è quella ortogonale al terreno, con 0 fissato sulla camera centrale.

Sistema d'acquisizione - il segnale generato sulle *strip* è raccolto ai due estremi della camera e quindi discriminato con soglia opportuna. I due segnali così ottenuti sono mandati a un *Time to Digital Converter* che registra il tempo del fronte di salita e di discesa del segnale. In seguito vi è un'elaborazione tramite FPGA per rendere i dati accessibili all'utente. Da notare che la lunghezza del segnale discriminato sarà proporzionale all'ampiezza del segnale. La precisione della conversione è di 100 ps.

Trigger - su una linea separata rispetto all'acquisizione è presente un canale di *trigger* che agisce, dopo la discriminazione, su un OR tra le 24 *strip* della camera (quindi scatta se un segnale, anche un singolo fronte, è presente su almeno una strip). È possibile inoltre ottenere l'AND dei *trigger* delle camere, cioè selezionare le coincidenze. Il *trigger* ha un *gate* di coincidenza di 70 ns, ma una volta scattato acquisisce dati per 250 ns prima del segnale e 200 ns dopo. Il tempo assoluto del *trigger*, dato dal tempo GPS, ha una precisione di 40 ns.

Sistema Informatico - è presente un software per regolare in maniera automatica la tensione di alimentazione delle camere, con linguaggio proprio. Il valore impostato può differire dal valore riletto dalle centraline ai lati della camera di valori fino a 500 V e per questo è usato per tutto il seguito, quando necessario, il voltaggio misurato e non quello impostato. Si nota comunque che anche la stabilità della misura delle centraline non è eccellente e presenta variazioni fino a 200 V nei 30 secondi che intercorrono tra due campionamenti.

I dati a più basso livello sono salvati in file binari che, grazie ad un eseguibile Windows, possono essere convertiti in Tree di ROOT. I parametri ambientali sono invece in formato testuale. Tutta l'analisi presentata nel seguito è, al momento, effettuata *off-line*.

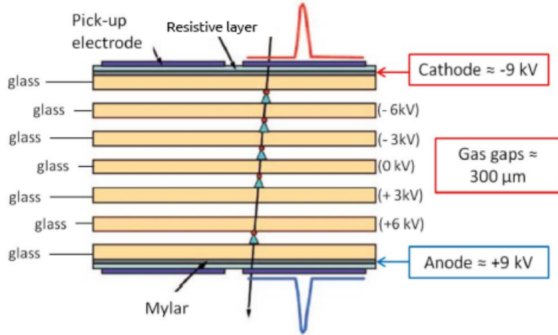


Figura 2.1: Schema di una delle camere tagliata lungo lo spessore

3 Da raggi cosmici a hit

I dati acquisiti vengono salvati in blocchi detti *run* che, di default, contengono 50k eventi. Nel Tree in prodotto in uscita dall'apparato sono presenti le seguenti informazioni:

- Numero dell'evento: un evento corrisponde ad un *trigger*
- Tempo dell'evento: GPS, tempo assoluto per collegare le informazioni dei vari rivelatore, e UnixTime, scandito dal clock del pc.
- Singolo fronte del segnale: informazioni sulla *strip* e sul piano di appartenenza, tempo di arrivo del fronte e lato (destra o sinistra della *strip*), tipologia (salita o discesa)

Da queste informazioni si possono ricostruire le singole hit: infatti, data una hit su una *strip* ci si aspetta di vedere un fronte di salita e uno di discesa su entrambi i lati, e dai tempi di arrivo dei fronti si possono ricostruire la posizione e il tempo di attraversamento della *strip* nel seguente modo:

$$x = c_{strip} \frac{t_{sx} - t_{dx}}{2}$$

$$y = d_{centri} (N_{strip} + \frac{1}{2})$$

$$t = \frac{t_{sx} + t_{dx}}{2}$$

dove c_{strip} è la velocità del segnale nelle strip, misurata nel seguito, e d_{centri} è la distanza tra i centri di due *strip* contigue. Le formule precedenti sono valide a meno di *offset* (presenti inevitabilmente in tutte le strip) che può essere calibrato in fase di analisi.

In particolare, possiamo schematizzare la situazione con due *offset* per strip, uno per lato, che possono essere legati alla lunghezza dei cavi (che possono essere di lunghezza leggermente diversa) che trasportano il segnale o all'apparato all'elettronica. In generale, posto che sia N il numero di *strip* per ogni camera, abbiamo che vi sono 6N *offset* da calibrare: 3N si ottengono richiedendo che i segnali prodotti da una particella che attraversa una *strip* nel suo centro arrivino all'elettronica allo stesso istante; altri N possono essere calibrati richiedendo che il tempo necessario per attraversare lo spazio tra la prima e la seconda camera sia uguale a quello richiesto per attraversare lo spazio tra la seconda e la terza; infine altri N risultano ininfluenti poiché pongono solamente l'origine dei tempi (il tempo 0 dell'evento), per cui rimangono N *offset* non calibrabili.

Questo corrisponde alla scala del tempo assoluta tra due camere, e può essere calibrato solamente utilizzando una sorgente esterna con velocità nota (per esempio può essere fatto imponendo che la velocità dei raggi cosmici sia quella della luce, cosa che ci si aspetta essere vera solo in prima approssimazione).

Inoltre la lunghezza temporale del segnale, ossia la differenza tra l'arrivo del fronte di salita e l'arrivo di quello di discesa, è legato all'energia rilasciata in quella strip: questa informazione è stata usata nella ricostruzione delle tracce per ricostruire le hit relative ad una particella che produce un segnale in due *strip* vicine.

4 Calibrazione

La fase di calibrazione è la prima procedura alla quale sono sottoposti i dati che, nel formato TTree, sono generati dal telescopio.

Questa fase è pensata come un rapido (richiede un tempo macchina inferiore a 0.3 s) controllo di qualità dei dati acquisiti al termine del quale si ha anche

un primo allineamento delle camere e una misura della velocità del segnale all'interno della camera. Infatti il ritardo tra il momento in cui il segnale indotto raggiunge l'estremità della camera e il momento in cui il TDC assegna la *time stamp* al fronte del segnale che non risulta uguale tra le varie *strip* di una stessa camera. La variazione di questo ritardo dipende da vari fattori tra cui le lunghezze delle linee che trasportano il segnale e i tempi dell'elettronica. L'effetto sopra descritto, dato il metodo di ricostruzione delle *hit*, induce un apparente disallineamento delle *strip* e delle camere nei dati sia della posizione spaziale che temporale. Per esemplificare saranno mostrati grafici relativi al run PISA-01-2016-03-22-00014 preso come modello e dai risultati del quale non sono mai stati riscontrate differenze significative.

Qualità dei dati - Prima di una qualsiasi analisi è stato controllato l'aspetto generale dei dati attraverso dei grafici che valutassero la distribuzione dei segnali nelle varie *strip* e camere. Iniziando dal livello più basso per valutare la distribuzione dei fronti di salita è stato creato l'istogramma in fig. 4.1. Da questo si nota subito come la maggioranza delle

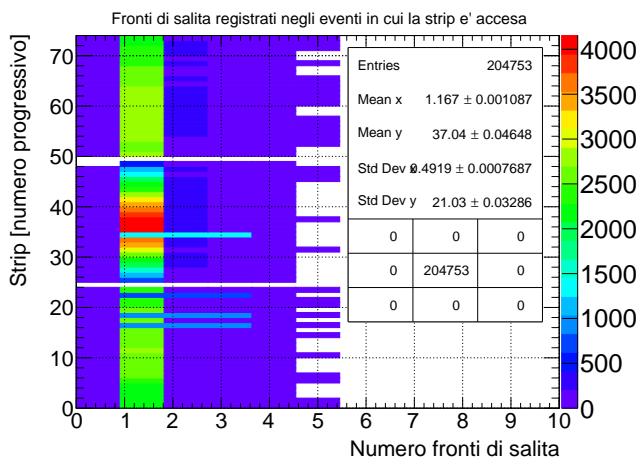


Figura 4.1: Numero massimo tra estremo destro e sinistro della *strip* di fronti di salita registrati in un evento in cui la *strip* è coinvolta in funzione del numero della *strip*.

Il numero progressivo è assegnato in modo crescente dalla camera 0 alla camera 2, lasciando un numero vuoto tra le varie camere.

volte accada che viene generato un solo fronte di salita. Proiettando tale distribuzione si nota che per il 90% delle volte abbiamo un solo fronte e circa il

10% ne abbiamo 2. Resta interessante un 0.2% delle volte in cui vengono registrati 0 fronti di salita e dunque sulla *strip* sono stati visti esclusivamente fronti di discesa mentre il numero di eventi con più di 2 *hit* risultano solo lo 0.1%.

Salendo di livello è stato valutato il numero di *strip* accese per camera dall'istogramma in fig. 4.2. Come da aspettarsi, date le considerazioni sui fronti

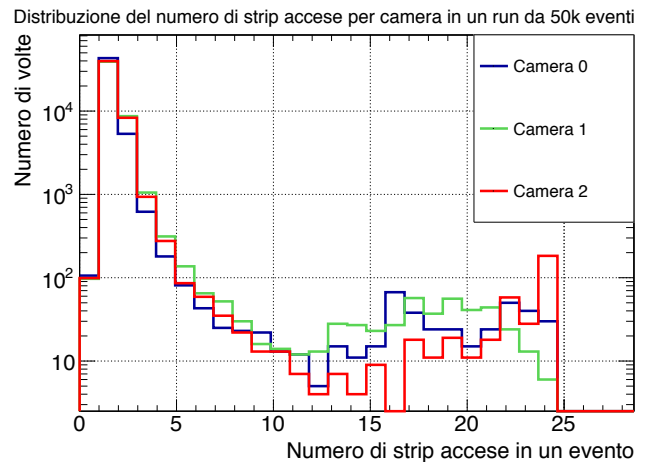


Figura 4.2: Occorrenza del numero di *strip* accese in ogni camera registrate in un run.

di salita, si nota che in circa 40k eventi si accende solamente una *strip* per ogni camera. Si nota tuttavia che in circa l'1% degli eventi più della metà delle *strip* di una camera viene accesa. Questo può essere imputato a segnali di rumore correlato, ovvero eventi in cui la scarica indotta in un certo punto della camera si estende anche alle *strip* limitrofe, oppure a eventi fisici in cui vengono generati sciami di particelle nel volume occupato dal telescopio. Non si è indagato maggiormente in questa direzione.

E' stato inoltre tentato un fit con una distribuzione di *Poisson* nella regione a numero di *strip* accese inferiore a 10 ma tale fit, oltre a non convergere, mostrava che la distribuzione sperimentale non ha la forma di una poissoniana.

Inoltre è stata condotta una prima ricostruzione delle *hit* fatta considerando esclusivamente il primo fronte di salita in ogni *strip*. Dal grafico in fig. 4.3 si nota che l'80% degli eventi presenta un totale di 3 *hit* mentre sono presenti delle code che presentano un gran numero di *hit*. È stata verificato che tali eventi corrispondono a quelli in cui le *strip* di una o più camere sono per la gran parte accese.

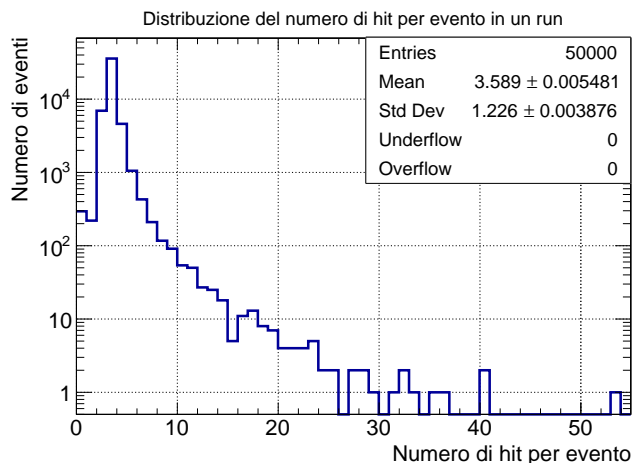


Figura 4.3: Occorrenze del numero di hit registrate in un evento considerando solo il primo fronte di salita in ogni strip.

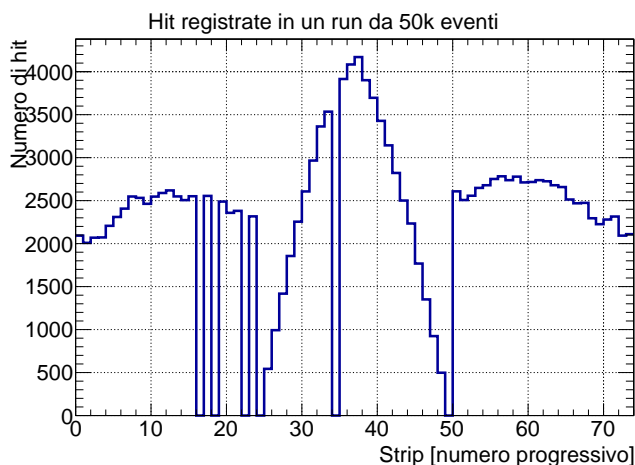


Figura 4.4: Distribuzione delle hit nelle strip. Numero progressivo assegnato in modo analogo a quanto fatto per fig. 4.1.

Infine il numero di *hit* registrato in un *run* completo da ogni *strip* è visibile in fig. 4.4. Si può notare come prima cosa che in alcune *strip* non è mai stata rilevata una *hit*: tali *strip* verranno considerate *strip* morte (vedere in seguito il paragrafo in merito).

Caratteristica è la forma delle distribuzioni nelle varie camere. La camera 1 (quella centrale) ha una distribuzione dettata strettamente dall'accettazione geometrica in quanto, essendo tutti eventi registrati con *trigger* di AND su tutte e tre le camere, se un RC attraversa tutte le camere è maggiormente probabile che attraversi la camera centrale nella zona centrale.

Le due camere esterne, nelle quali ci saremmo aspettati una distribuzione sostanzialmente piatta, risentono invece di un'asimmetria. Tale effetto può avere fonti multiple che vanno da disomogeneità nel materiale attraversato dai RC che giungono con un certo angolo oppure a un'efficienza non costante tra le varie strip.

Facendo attenzione alla forma delle distribuzioni si può concludere che esiste una direzione a tasso di incidenza minore. Questo, riscontrabile dal fatto che le due camere esterne hanno l'asimmetria opposta, è ragionevole considerato che: il telescopio si trova sul lato dell'edificio con le *strip* parallele alla pianta e quindi i raggi provenienti da una delle due parti devono attraversare tutto l'edificio mentre gli altri devono attraversare praticamente solo l'atmosfera. Questa asimmetria non è stata indagata ulteriormente.

Alla fine di tale analisi è stato deciso di applicare alcuni tagli per scartare gli eventi dominati dal rumore. In particolare sono stati scartati gli eventi con più di un fronte di salita su almeno una *strip* o con un numero totale di *hit* superiore a 10. In tutto ciò che segue, se non diversamente specificato, questi tagli vengono applicati.

Calibrazione spaziale - Come spiegato precedentemente, la posizione spaziale di una *hit* può essere ricostruita dall'informazione del numero della *strip* colpita e dalla differenza tra i tempi di arrivo del segnale ai due estremi della camera.

Acquisendo i fronti di salita presenti nel *tree raw* che viene prodotto in uscita dall'apparato e elaborandoli come sopra descritto è possibile ricostruire una distribuzione spaziale 2D delle *hit* (fig. 4.5) e iniziare così a mappare la posizione fisica ricostruita delle varie camere. Si nota ad occhio che le *strip* non risultano essere ricostruite come allineate, mentre sappiamo che nel laboratorio sono allineate all'interno di una camera con la precisione di $\sim 100\mu\text{m}$ e tra le varie camere con una precisione almeno di pochi centimetri ($\sim 50\text{ps}$). Il disallineamento visibile all'interno di una camera è invece di qualche centinaio di ps. Inoltre la camera centrale mostra uno spostamento netto verso sinistra: tale effetto è in gran parte dovuto al fatto che il cavo che collega TDC e centralina al lato destro della camera centrale è più lungo di quello al lato sinistro di 3 ns.

Un'ulteriore caratteristica interessante della di-

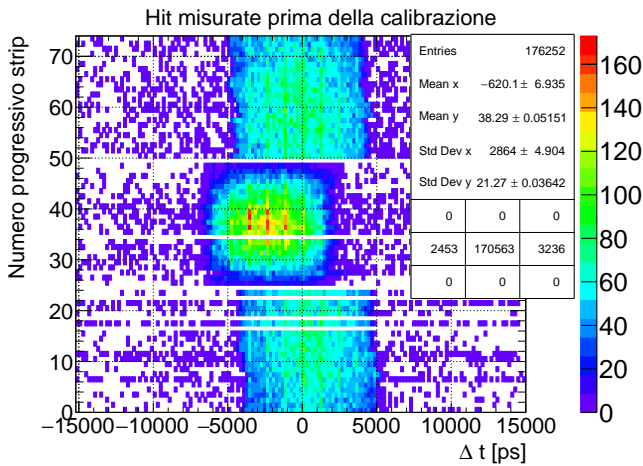


Figura 4.5: Distribuzione delle hit misurate prima della calibrazione. Una coordinata spaziale è sostituita dalla semi-differenza dei tempi del fronte di salita $\Delta t = (t_{sx} - t_{dx})/2$, mentre l'altra è sostituita dal numero progressivo di strip.

La distribuzione in fig. 4.5 è la presenza di linee verticali più popolate che si protraggono su tutte le camere. Questo, data la mancanza di correlazione tra le varie camere a questo livello e alla periodicità di tale struttura, è imputabile a un effetto dell'elettronica digitale (è stato verificato che non fosse un problema di software legato alla dimensione delle variabili). Per verificare che tali strutture non fos-

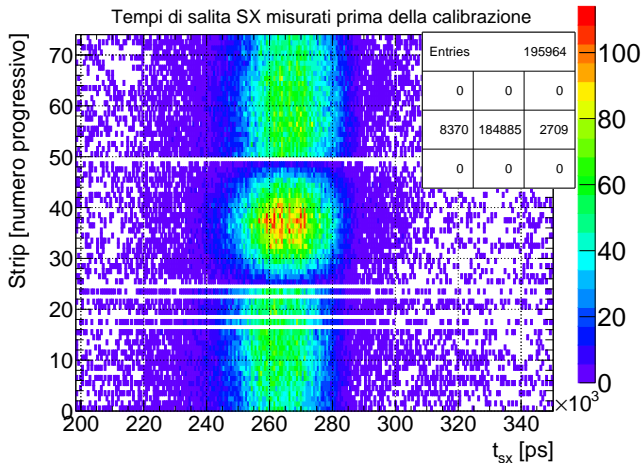


Figura 4.6: Distribuzione dei tempi dei fronti di salita registrati all'estremo sinistro delle camere.

Non si nota la struttura periodica di strisce più popolate che era presente in figura 4.5 né in questa distribuzione né nell'analoga per il lato destro (qui non riportata per brevità). Resta inoltre il fatto interessante che il lato di sinistra non presenta canali morti nella camera centrale, ciò sarà spiegato nel paragrafo dedicato alla strip morte.

sono dovute a un effetto di digitalizzazione del TDC sono state studiate le distribuzioni analoghe dei soli tempi dei fronti di salita a destra e sinistra (esempio in fig. 4.6) ma non è stato riscontrato un effetto simile.

Non è stata trovata una spiegazione delle strisce periodiche più popolate, effetto che comunque non risulta rilevante nel resto dell'analisi poiché se ne perde le tracce dopo l'inserimento delle costanti di calibrazione per l'allineamento delle strip.

Per procedere dunque a una prima procedura di calibrazione per allineare le strip è stata determinata una costante, diversa per ogni strip, da aggiungere con segno opposto al tempo raw di salita a destra e sinistra in modo da spostare la semi-differenza ma non la media (utilizzata per il time stamp della hit) dei due tempi. Tale costante è stata determinata con lo scopo di centrare tutte le strip a un valore di Δt nullo. Per raggiungere questo scopo, senza che il rumore presente nelle code della distribuzione potesse influenzare l'analisi, è stata usata come stimatore della posizione del centro della strip la media Winsorized della distribuzione di hit di ogni strip. In particolare è stata usata una media Winsorized al 10%, cioè una media della distribuzione dopo che da essa erano state tagliate le code a destra a sinistra in un punto tale da escludere il 10% dell'area totale da entrambe le parti, interpretabile come una media sull'80% centrale dei dati.

Le medie Winsorized misurate per le varie strip, prima di applicare una correzione secondo il metodo appena descritto, sono riportate in fig. 4.7. Dal grafico presente in tale figura si nota, in merito alla camera centrale, quanto già anticipato prima sulla differente lunghezza dei cavi di collegamento del lato destro. Il valore delle medie così misurate viene dunque aggiunto (con segni opposti) ai tempi raw in modo da riportare il valore centrale di ogni strip a 0.

Il risultato di tale operazione è visibile in fig. 4.8. La precisione di allineamento raggiunta dopo questa fase è dell'ordine del centimetro, corrispondente alla larghezza dei bin degli istogrammi utilizzati per valutare la media della distribuzione. Questo procedimento, che potrebbe in linea di principio essere iterato più volte, raggiunge i risultati esposti dopo una sola iterazione, risultati che sono stati ritenuti sufficienti come prima approssimazione dato che è prevista una successiva fase di allineamento.

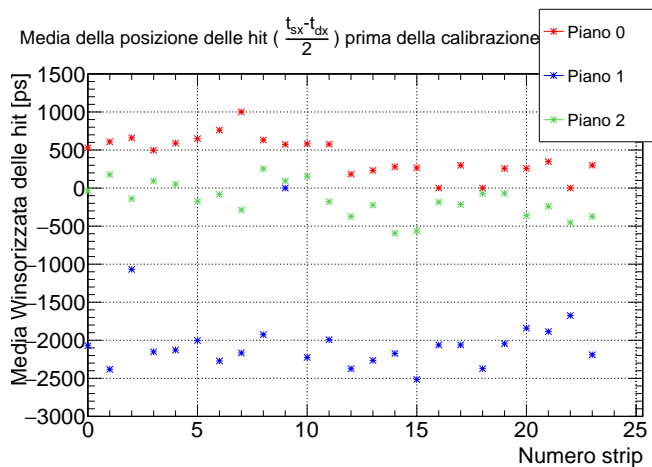


Figura 4.7: Media Winsorizzata al 10% delle varie strip prima della procedure di calibrazione.

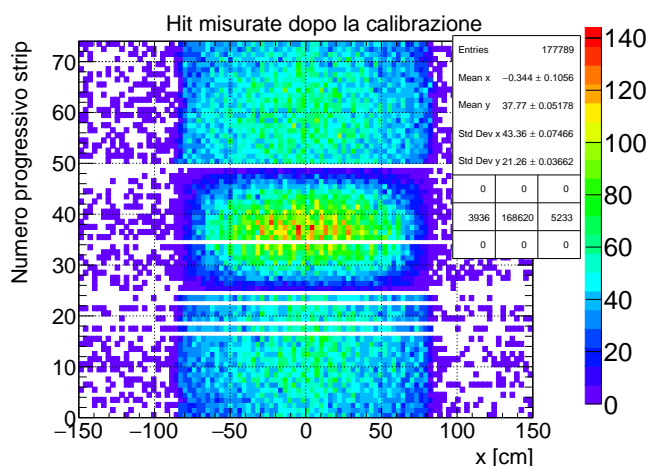


Figura 4.8: Distribuzione delle hit dopo la calibrazione sul valore centrale. La coordinata y resta il numero progressivo della strip mentre la coordinata x è stata ottenuta riscaldando la semi differenza dei tempi di salita con la velocità del segnale nella camera stimata come descritto nel paragrafo successivo.

Come già commentato in precedenza la forma delle distribuzioni è detta principalmente dall'accettazione geometrica imposta dal tipo di trigger con il quale i dati vengono raccolti.

Calibrazione temporale - Una procedura simile a quella precedentemente fatta per calibrare la posizione spaziale può essere eseguita per calibrare il tempo associato ad ogni *hit*. Esso, stimato come la media tra i tempi di arrivo dei fronti di salita all'estremità destra e sinistra della camera, non può essere calibrato in assoluto, come fatto per la posizione nel paragrafo precedente, a causa della mancanza di un riferimento esterno che possa permettere di

fissare uno zero. L'unica calibrazione possibile in questo caso è dunque quella che permette di imporre che la media di tutti i tempi delle *hit* misurate su una stessa camera sia uguale a un valore, stimato come valore medio dei valori medi misurati dalle *strip* appartenenti a tale camera. Anche in questo caso la media del tempo delle *hit* è stimato con una media *Winsorized* al 10% della distribuzione registrata per ogni strip. Tali medie misurate prima

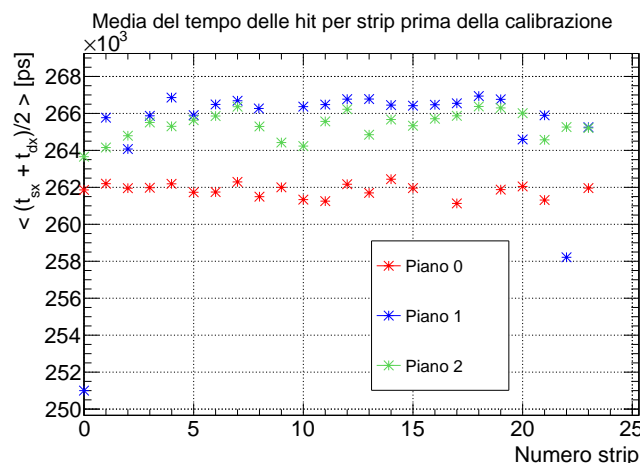


Figura 4.9: Medie Winsorizzate al 10% della distribuzione dei tempi delle hit misurate in ogni strip prima della calibrazione. La mancanza di punti relativi ad alcune strip è associata al fatto che tali strip risultano morte.

della calibrazione sono riportate in fig. 4.9.

Con i valori così misurati è possibile dunque applicare una costante di calibrazione, diversa per ogni strip, ai tempi *raw* al fine di ottenere quanto sopra specificato. In questo caso la costante dovrà essere aggiunta con lo stesso segno a entrambe le estremità così da non influenzare la semi differenza, e dunque la calibrazione sulla posizione.

Dopo l'applicazione della costante di calibrazione (fig. 4.10) le medie risultano distribuite, come da attese, attorno a un valore medio costante con una precisione dell'ordine del ns (larghezza dei *bin* delle distribuzioni usate).

In questo caso per ottenere i risultati citati sono state necessarie 2 iterazioni dell'algoritmo. Comunque, anche questa procedura, è solo un primo tentativo che verrà raffinato nella fase di allineamento, la quale però necessita un certo grado di precisione al fine di poter portare a termine una prima ricostruzione delle tracce.

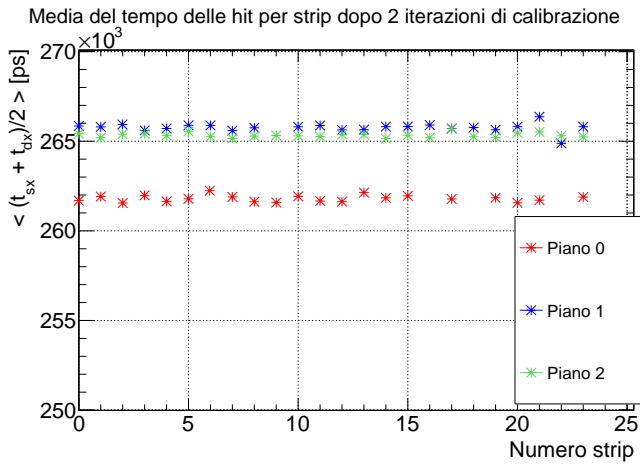


Figura 4.10: Medie Winsorized al 10% della distribuzione dei tempi delle hit misurate in ogni strip misurate dopo l'aggiunta delle costanti di calibrazione alla seconda iterazione dell'algoritmo.

Misura della velocità del segnale - Durante la fase di calibrazione viene inoltre misurata la velocità del segnale all'interno delle camere. Per fare questo si utilizza l'informazione che il conduttore di cui sono fatte le *strip* è steso sulle lastre di lunghezza 168.0 cm, tagliate con una precisione di qualche millimetro.

Sapendo ciò e misurando dalle distribuzioni in figura 4.5 il valore massimo e il valore minimo della semi differenza dei tempi dei fronti di salita destri e sinistri (senza considerare *hit* puramente di rumore che stanno nelle code), è possibile stimare il tempo totale che impiega un segnale ad attraversare tutta la lunghezza della camera come la differenza dei due valori estremali. Dividendo infine per la lunghezza del piano la velocità dei segnali risulta:

$$c_{strip} = \frac{L_{camera}}{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}$$

Come stimatore della quantità $\Delta t_{max} - \Delta t_{min}$ è stata presa, per ogni strip, la larghezza al 10% del massimo della distribuzione delle posizioni delle *hit* registrate prima della calibrazione (sezione della distribuzione in fig. 4.5 relativa ad una data strip).

Un esempio di tale procedimento è riportato in figura 4.11. Il valore della velocità del segnale stimato alla fine della procedura viene dunque calcolato come la media dei valori della velocità del segnale misurata in ciascuna strip, escludendo quelle con meno 100 *hit* registrate durante tutto il *run*. Nel *run* in esempio la stima finale è di $c_{strip} = 20.4 \pm 0.6$ cm/ns.

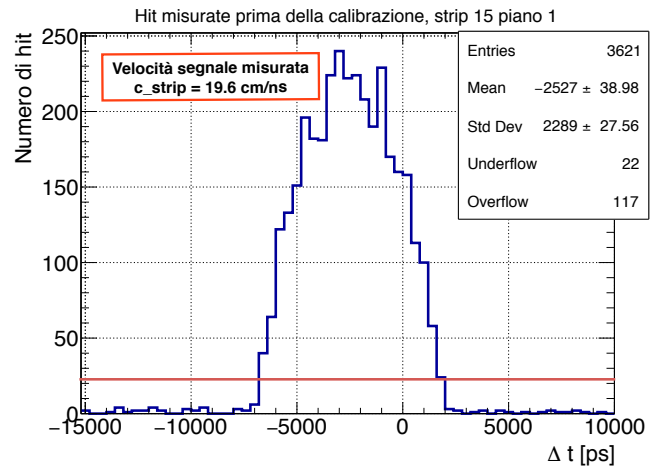


Figura 4.11: Distribuzione delle hit in una strip prima della calibrazione.

La linea rossa rappresenta il 10% del valore al picco massimo mentre nel riquadro in alto è mostrato il valore della velocità del segnale misurata come il rapporto tra la larghezza della camera e la larghezza della distribuzione all'altezza della linea rossa.

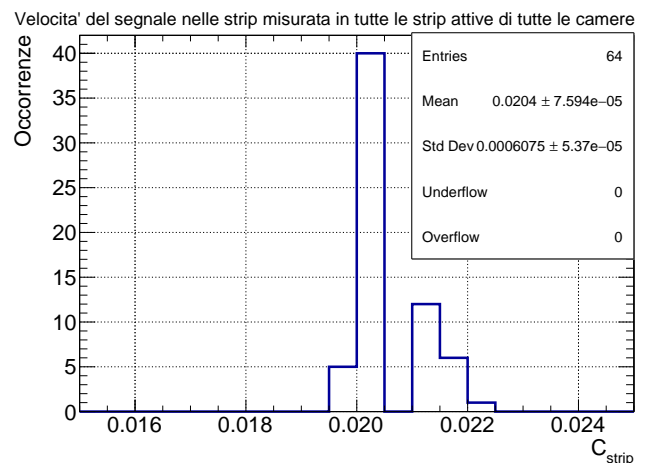


Figura 4.12: Distribuzione della velocità del segnale misurata in un run nelle strip attive. Si nota come esse siano ragionevolmente compatibili e sia quindi sensato farne la media per migliorare la stima di c_{strip} estrapolata dal singolo run.

In fig. 4.12 è mostrata la distribuzione delle velocità del segnale misurata nelle *strip* attive nel *run* di esempio.

Una stima finale della velocità del segnale nelle *strip* è data, supponendo tale valore costante nel tempo, mediando sui risultati ottenuti in tutti i 21 *run* acquisiti. Il valore finale quotato è di $\bar{c}_{strip} = 20.41 \pm 0.06$ e la distribuzione delle velocità misurate è riportata in fig. 4.13.

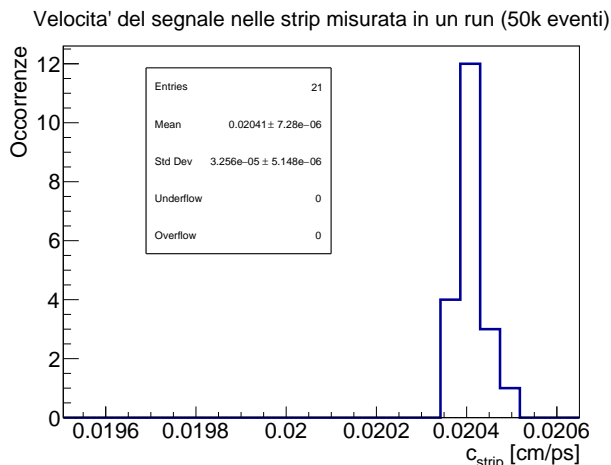


Figura 4.13: Distribuzione della velocità del segnale misurata in tutti i run della presa dati. La distribuzione in figura sembra inoltre giustificare a posteriori l'ipotesi di costanza della velocità.

Strip morte - Come visto nei paragrafi precedenti, accade che in interi *run* una o più *strip* non risultano mai avere una *hit*. *strip* con questa caratteristica vengono chiamate nella relazione "strip morte".

In realtà questo effetto non corrisponde necessariamente a un guasto fisico della *strip* e in particolare non vi corrisponde mai in tutti i dati da noi analizzati. Questo è visibile da fig. 4.6 o fig. 4.1 dalle quali si evince che se ci accontentiamo di guardare il segnale che arriva a un solo estremo, senza richiedere come si fa per ricostruire le *hit* la presenza di un fronte di salita rivelato dal TDC da entrambi i lati, la *strip* non risulta avere nessun tipo di problema. Inoltre guardando gli eventi singolarmente si nota che si registrano eventi in cui sono presenti solamente due *hit* nonostante il *trigger* sia impostato in modo tale da richiedere la presenza di un segnale su tutte le camere.

Quanto sopra è consistente poiché il segnale analizzato dal *trigger* è ottenuto direttamente in uscita dalla centraline ai lati delle 3 camere e non dipende quindi dal funzionamento del canale del TDC addetto a una data *strip*.

È possibile dedurre quindi che il fenomeno delle "strip morte" sia più propriamente legato a canali del TDC non funzionanti. In questa ottica il segnale diretto al *trigger* non subisce nessuna ostruzione e i tempi registrati su quella *strip* dal lato non collegato al canale mal funzionante del TDC vengono acquisiti senza problemi. In conclusione tali *strip morte* entrano nell'insieme dei dati raccolti facendo scat-

tare il *trigger*, ma non corrispondono poi a nessun segnale ricostruibile dato che manca l'informazione TDC su uno o due estremi della *strip*.

5 Ricostruzione delle tracce

Dopo la fase di calibrazione è possibile ricostruire le tracce utilizzando l'informazione sulla posizione ma non quella sul tempo, perché quest'ultimo è calibrato all'interno di una camera ma non lo è tra le varie camere.

Per ricostruire le tracce vengono effettuati i fit lineari a tutte le possibili terne di hit, prese una ogni piano, separatamente per le coordinate x , y e t , e viene salvato il χ^2_{tot} , ossia la somma dei χ^2 provenienti dai vari fit. Quindi sono stati scartati tutti i fit con $\chi^2_{tot} > 13.8$ nel caso di un fit a due gradi di libertà e $\chi^2_{tot} > 16.3$ nel caso di un fit a tre gradi di libertà, entrambi corrispondenti ad un quantile del 99.9% della distribuzione del χ^2 per i rispettivi gradi di libertà.

Questo taglio è in un certo senso legato alla nostra efficienza di ricostruzione, che quindi ci aspettiamo rimanga molto vicino a 1, e al contempo alla contaminazione del rumore. Successivamente è stata valutata questa contaminazione grazie alle distribuzioni del χ^2 : per ulteriori dettagli rinviamo alla apposita sezione (8).

La distinzione tra due e tre gradi di libertà è importante poiché non è possibile eseguire il fit temporale immediatamente dopo la fase di calibrazione: infatti, come si è visto, è presente un grande *offset* temporale sulla camera centrale, dovuto ad un cavo di lunghezza sensibilmente diversa. Durante una successiva fase di calibrazione più raffinata, che è stata denominata "allineamento", è stato possibile calibrare anche questo *offset* usando le tracce stesse che sono state ricostruite durante la prima fase di tracciamento. Come risultato di ciò, prima della fase di allineamento è possibile effettuare soltanto i fit lungo le coordinate spaziali, e pertanto ci si aspetta che il χ^2_{tot} sia distribuito come un χ^2 a due gradi di libertà (in realtà non è proprio così poiché le risoluzioni non sono note con buona precisione e perché la coordinata y è discretizzata e il suo χ^2 risente di questo effetto). Dopo la fase di allineamento invece diventa possibile eseguire il fit anche sulla coordinata temporale per cui il χ^2_{tot} diverrebbe distribuito

come un χ^2 a tre gradi di libertà, poste le stesse considerazioni fatte prima.

Alla fine il programma di ricostruzione salva in un *tree* tutte le tracce assieme ad alcuni parametri interessanti tra i quali: il numero dell'evento di appartenenza, il tempo GPS e Unix, le *hit* misurate e fittate, gli angoli polari e azimutali e il valore del χ^2 al minimo dei vari fit.

L'angolo azimutale ϕ è definito come l'angolo tra il vettore dato dalla direzione ortogonale alle *strip* e verso crescente con il numero di *strip* e la proiezione, con verso di percorrenza, della traccia del raggio sul piano delle camere. L'angolo ϕ cresce in senso anti-orario ed è definito tra 0 e 2π .

L'angolo polare θ è invece definito come l'angolo tra la traccia e la verticale.

Il programma richiede un tempo di circa 1s per analizzare un *run* da 50k eventi.

5.1 Clustering

Circa nel 30% dei casi sono presenti due *hit* vicine (per esempio appartenenti a *strip* contigue e con piccola distanza spaziale lungo la coordinata x) che danno entrambe un fit che supera il taglio. In questo caso le due *hit* sono state interpretate come un'unica particella che ha generato segnale su due *strip* contigue (per esempio attraversando la camera nella regione tra le due), e pertanto si è sviluppato un algoritmo per raggrupparle in un'unica *hit*, assegnando a questa la media delle tre coordinate pesate con l'ampiezza del segnale.

Si è notato inoltre che il rapporto tra l'area di una camera non coperta dalle *strip* e l'area totale è circa il 25%, stima non troppo distante dal numero di eventi in cui sarà effettuato il *clustering*. Quindi in prima approssimazione è vero che se un raggio cosmico colpisce direttamente una *strip* attiva solo quella, altrimenti attiva le due adiacenti.

Per eseguire il *clustering* si calcolano le distanze tra le *hit*, e, se due *hit* sono a meno di una distanza limite, che è stata fissata a 5 cm, vengono raggruppate in un'unica *hit*. È stato scelto 5 cm come valore della distanza limite, che è il doppio della larghezza di una *strip*, senza eseguire alcuna ottimizzazione di questa distanza. Un possibile metodo per ottimizzare la distanza limite potrebbe essere quello di guardare il numero di *clustering* che vengono eseguiti al variare della distanza limite, e vedere quando si raggiunge un plateau: ci si aspetta, infatti, che

oltre una certa distanza il numero di *clustering* in un *run* vari di poco, variazione dovuta solamente all'inclusione di nuovo rumore. In aggiunta, non è stata utilizzata l'informazione temporale per eseguire il *clustering* delle *hit*: dopo aver eseguito l'allineamento temporale sarebbe possibile discriminare tra due *hit* prodotte dal passaggio della stessa particella carica e il caso di una *hit* prodotta da una particella e una *hit* di rumore che casualmente si trovavano a distanza piccola tra loro.

Infine non è stata valutata l'efficienza dell'algoritmo di *clustering*, né la contaminazione del rumore nelle *hit* dopo il *clustering*.

5.2 Display degli eventi

È stato inoltre sviluppato un software di visualizzazione degli eventi, che permette di visualizzare le *hit* registrate e le tracce ricostruite nello spazio e nelle due proiezioni sulle coordinate x e y . Un esempio è riportato nella figura 5.1.

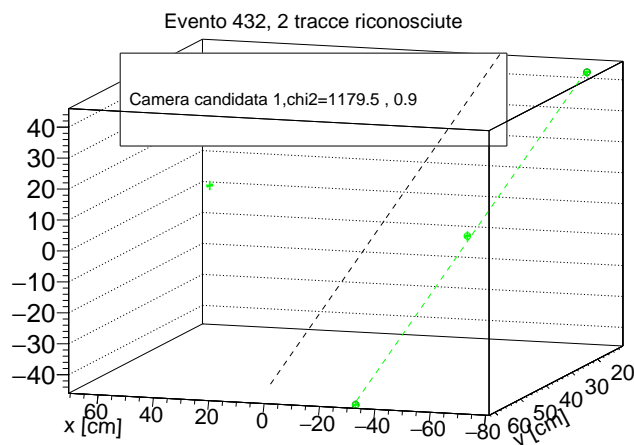


Figura 5.1: Un esempio di visualizzazione degli eventi nel quale si può notare la presenza di tre *hit* molto ben allineate, per le quali è stata riconosciuta una traccia che ha superato la selezione, accompagnate da una *hit*, molto probabilmente di rumore, usando la quale è stata fittata una traccia con un χ^2 più grande del limite per passare la selezione.

6 Allineamento

Questa seconda fase consiste nell'eseguire un allineamento di precisione delle coordinate spaziali e temporali.

Dopo la prima fase di calibrazione basata sui fronti di salita e discesa, è possibile ricostruire le tracce (usando solamente l'informazione spaziale), ma non è possibile valutare con precisione la risoluzione dell'apparato e di conseguenza le distribuzioni delle tracce negli angoli e nelle velocità. In particolare, senza aver effettuato un buon allineamento, le distribuzioni osservate sono allargate da un effetto di convoluzione con i disallineamenti: ciò falsifica la larghezza osservata e la conseguente risoluzione che si può ricavare.

L'allineamento delle camere è una procedura che viene fatta a livello di *pattern recognition*, ovvero richiedendo soltanto che le tracce che vengono viste siano rette percorse a velocità costante. Rimangono quindi certi gradi di libertà del rivelatore che non possono essere calibrati usando questo metodo (ovvero tutte le deformazioni del rivelatore che mandano rette in rette). In particolare si è ciechi a un disallineamento globale delle tre camere.

I gradi di libertà che sono stati considerati sono traslazioni delle *strip* spaziali lungo la direzione x e temporali. Entrambi i disallineamenti sono principalmente dovuti a lunghezze dei cavi variabili e *jitter* dell'elettronica (eventuali disallineamenti geometrici sono sicuramente più piccoli visto che le camere vengono costruite con macchine a controllo numerico). Eventuali disallineamenti sulla coordinata y , dovuti in questo caso esclusivamente a disallineamenti geometrici, non sono stati valutati a causa delle difficoltà nate dalla discretizzazione.

Un approccio vincente potrebbe essere quello di eseguire un fit a un grosso insieme di tracce, lasciando come parametri liberi del fit i disallineamenti delle camere. Questo però comporta l'eseguire un fit ad un grosso numero di parametri liberi (quattro per ogni traccia più i disallineamenti) che è difficile da implementare efficientemente livello software.

È stato quindi preferito l'utilizzo di un metodo basato sul guardare dove si posiziona, in media, una *hit* di una traccia rispetto a dove ci si aspetta di trovarla. Il metodo viene descritto approfonditamente nel paragrafo seguente.

Metodo degli pseudo-residui Per eseguire l'allineamento sono state scelte soltanto le tracce più pulite, richiedendo che nell'evento fossero presenti esattamente 3 *hit*, che non fosse stato eseguito alcun *clustering*, e che $\chi_{tot}^2/dof < 4.1$. Questo è ne-

cessario per far sì che gli allineamenti che vengono eliminati siano reali e non prodotti come artefatti da eventi di fondo.

Fissata una traccia, si esclude una delle tre *hit* e si costruisce la retta passante per le altre due; viene definito quindi pseudo-residuo (pseudo in modo da non essere confuso con le differenze tra fit e misurato) la distanza tra l'intersezione della retta con la camera esclusa e la terza *hit*. Questa risulta essere una funzione della *strip* e della camera della *hit* esclusa, mentre è stata ignorata l'informazione delle *strip* di appartenenza delle altre due camere. Analiticamente queste variabili risultano essere:

$$\delta_1[i] = \frac{1}{2}(x_0[j] + x_2[k]) - x_1[i] \quad (6.1)$$

$$\delta_0[j] = 2x_1[i] - x_0[j] - x_2[k] = \delta_2[k] = 2\delta_1[i] \quad (6.2)$$

dove il pedice 0, 1, 2 si riferisce alla camera, mentre l'indice i, j, k è il numero della *strip*.

Per un rivelatore ben allineato la distribuzione degli pseudo residui ha media nulla, e la sua larghezza è legata alla risoluzione nel seguente modo (assumendo risoluzione uguale per tutte le *strip* e tutte le camere):

$$\sigma(\delta_1) = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma(\delta_0) = \frac{1}{2}\sigma(\delta_2) \quad (6.3)$$

Tutto il ragionamento si può ripetere con il tempo di impatto della particella sulla camera.

In questo caso, "essere ben allineato" equivale a chiedere che il tempo che la particella impiega per percorrere lo spazio tra la prima e la seconda camera sia uguale a quello impiegato per tra la seconda e la terza camera. Ciò è strettamente correlato alla configurazione geometrica dell'apparato, ovvero è stato imposto che il rivelatore sia composto da tre camere parallele ed equi-distanziate. Questa assunzione è stata verificata, come visto nel paragrafo iniziale, con la precisione di qualche mm, assumendo che le camere all'interno dell'involucro di alluminio siano identiche. Inoltre l'incertezza dovuta al fatto che il segnale viene generato all'interno della regione sensibile con una coordinata z di inizio valanga distribuita in modo non conosciuto (ma compresa all'interno degli 1.5 cm di spessore) contribuisce peggiorando la risoluzione sulle altre

coordinate, senza però introdurre *bias* (sotto l'assunzione che la distribuzione ignota sia uguale per tutte e tre le camere).

Per allineare il rivelatore si grafica la distribuzione degli pseudo-residui per ogni *strip* di ogni camera; successivamente si riempie una matrice di costanti di calibrazione con le medie delle distribuzioni; quindi vengono ricostruite nuovamente le *hit* e le tracce aggiungendo alle coordinate metà della costante di calibrazione così calcolata.

Questo è necessario poiché gli pseudo-residui delle varie *strip* sono tra di loro correlati, e pertanto lo spostamento di una *strip* su una camera provoca la modifica delle distribuzioni degli pseudo-residui delle altre due. Questa operazione può essere quindi iterata fino a raggiungere la precisione richiesta: la nostra richiesta è stata che la media delle distribuzioni fosse compatibile con zero entro l'errore.

Inoltre, inizialmente si era provato a riempire la matrice di calibrazione con le medie ottenute eseguendo un fit gaussiano alle distribuzioni degli pseudo-residui (visto che ci si aspetta che le risoluzioni, e conseguentemente le distribuzioni degli pseudo-residui siano gaussiane), in modo da essere maggiormente indipendenti dalle code e dal *binning*; purtroppo però l'algoritmo risultava instabile nei casi di bassa statistica (per esempio sulle *strip* esterne della camera centrale) rendendo più lenta e difficile la convergenza, e pertanto è stato sostituito dal semplice calcolo della media.

Tutti gli esempi mostrati nelle prossime sezioni sono relativi al *run* PISA-01-2016-03-22-00014. I risultati sono, in buona approssimazione, indipendenti dal tempo assoluto del *run* e comunque senza un chiaro andamento temporale.

Allineamento e risoluzione su x - In figura 6.1 è mostrato, per ogni *strip*, la media con il suo errore (barra rossa) e la deviazione standard (nera, blu e azzurra) della distribuzione degli pseudo residui, prima di aver effettuato l'allineamento, mentre in figura 6.2 è mostrato lo stesso plot dopo nove iterazioni di allineamento. Come è possibile vedere, i disallineamenti iniziali sono dell'ordine del centimetro e risultano incompatibili con zero, mentre, dopo l'allineamento tutte le medie risultano compatibili con zero entro l'errore sulla media, e le larghezze delle distribuzioni della camera centrale risultano

essere circa la metà di quelle delle camere esterne, come da attese.

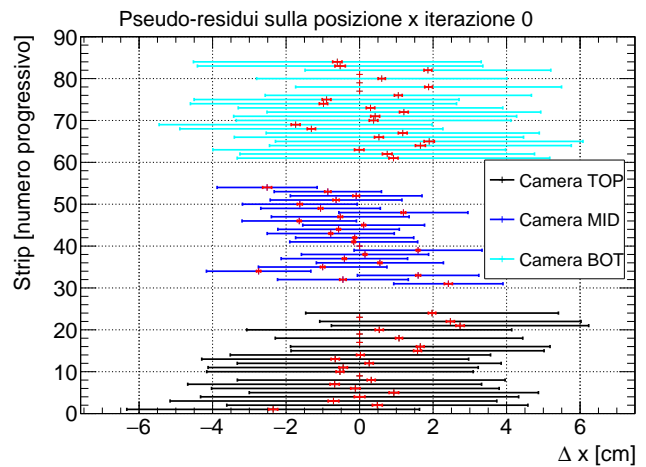


Figura 6.1: Per ogni *strip* (asse verticale) è mostrata la media con il suo errore (barra rossa) e l'RMS (barra colorata di nero, blu o azzurro) della distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata x di quella *strip*, integrata sulle *strip* delle altre due camere. Dove è presente solo un punto rosso senza barre vi è una *strip* morta. Come si può notare le medie si discostano da zero in modo casuale, di una distanza dell'ordine del centimetro, risultando così in disaccordo con zero entro l'errore sulla media.

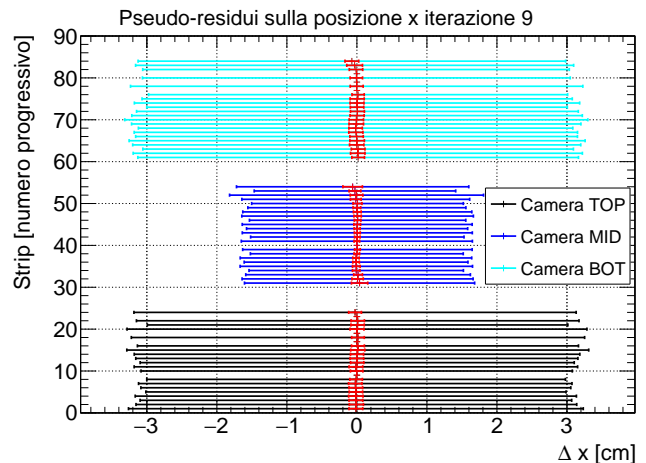


Figura 6.2: Dopo aver effettuato nove iterazioni di allineamento le medie delle distribuzioni degli pseudo residui risultano tutte in accordo con zero entro il loro errore. Inoltre gli RMS delle distribuzioni mostrano un ragionevole accordo sia all'interno delle varie camere (ci si aspetta che siano tutte uguali all'interno di una camera) sia tra le varie camere (ci si aspetta che la larghezza della distribuzione sulle camere esterne sia uguale tra loro e doppia di quella sulla camera interna).

A questo punto è stato possibile valutare la risoluzione sulla coordinata x : per fare ciò è stata plottata la distribuzione degli pseudo-residui integrata su tutte le *strip* di uno stesso piano, ed è stato rimosso il taglio che selezionava le tracce "pulite". Nelle figure 6.3 e 6.4 sono graficate (insieme ad un fit gaussiano rappresentato dalla linea rossa), rispettivamente, la distribuzione suddetta prima e dopo l'allineamento, calcolata per la camera centrale (ricordiamo che per le camere esterne la distribuzione è la stessa a meno di un fattore numerico, come mostrato dall'equazione 6.2). Ricordando l'equazione 6.3, si ottiene che la risoluzione spaziale, passa da $\sigma_r(x) = 1.87$ cm a $\sigma_r(x) = 1.66$ cm. Inoltre si può notare che, prima dell'allineamento, la distribuzione è ragionevolmente gaussiana, mentre dopo l'allineamento presenta code non gaussiane molto larghe, cosa che risulta evidente se si osserva la distribuzione in scala y-logaritmica (figura 6.5). Questo si può interpretare nel seguente modo: la risoluzione non è gaussiana, ma, prima dell'allineamento, grazie alla convoluzione di tante curve, si otteneva qualcosa di simile ad una gaussiana.

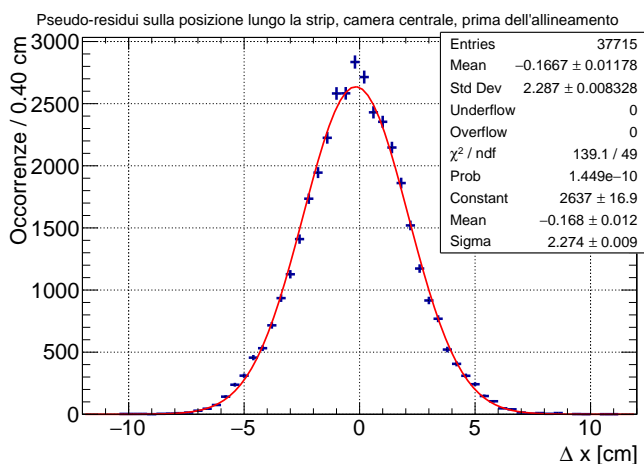


Figura 6.3: Distribuzione, prima dell'allineamento, degli pseudo-residui sulla coordinata x , sommata su tutte le *strip* della camera centrale (dopo aver eseguito questa somma la distribuzione che si otterrebbe per le altre due camere sarebbe esattamente la stessa a parte un fattore -2). Come si può osservare la distribuzione mostra un ragionevole accordo visivo con il fit gaussiano (linea rossa).

Si è infine considerata anche la distribuzione degli pseudo-residui sommata su tutte le *strip*, calcolata solo utilizzando le tracce usate per eseguire l'allineamento. Questa distribuzione risulta più stretta

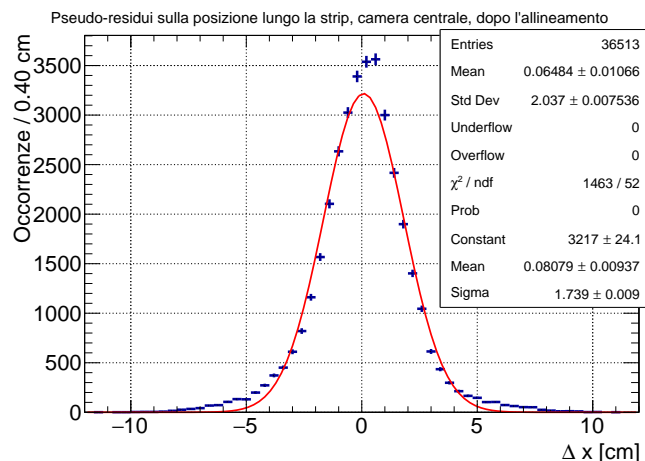


Figura 6.4: Dopo aver eseguito nove iterazioni della procedura di allineamento, la distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata x , sommata sulle *strip* della camera centrale. Si vede in modo chiaro l'incompatibilità con il fit gaussiano (linea rossa), dovuta principalmente alle code molto larghe. La deviazione standard risulta ora più piccola di circa il 15% minore rispetto a prima dell'allineamento, mostrando ora la curva di risoluzione intrinseca dell'apparato, privata dell'allargamento introdotto dai disallineamenti.

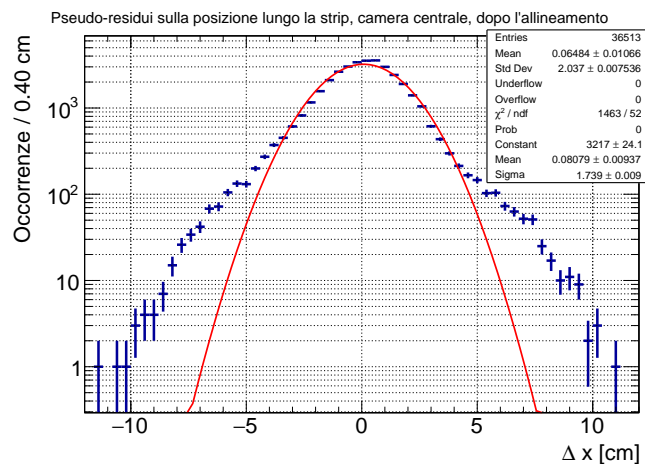


Figura 6.5: In figura è mostrata la stessa distribuzione mostrata in figura 6.4, ovvero la distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata spaziale x dopo l'allineamento, utilizzando questa volta la scala y-logaritmica, così da enfatizzare la presenza di code non gaussiane.

ta di quella ottenuta considerando tutte le tracce (la larghezza si riduce a 1.66 cm, corrispondente ad una risoluzione di 1.36 cm) non mostrando comunque accordo con l'ipotesi di gaussianità a causa delle code larghe.

Allineamento e risoluzione su t - Nel valutare l'allineamento sulla coordinata t bisogna tenere conto del fatto che, come discusso in precedenza, vi è un *offset* non calibrabile. Questo *offset* potrebbe essere calibrato, per esempio utilizzando una sorgente esterna di particelle con velocità nota. Una possibilità potrebbe essere anche quella di fissare il picco della distribuzione in velocità dei raggi cosmici al valore $\beta = 1$ (cosa ragionevole visto che lo spettro di energia dei raggi cosmici è stato misurato), stando però attenti all'allargamento indotto dalle risoluzioni spaziali e temporali dell'apparato. Questa richiesta non è stata applicata.

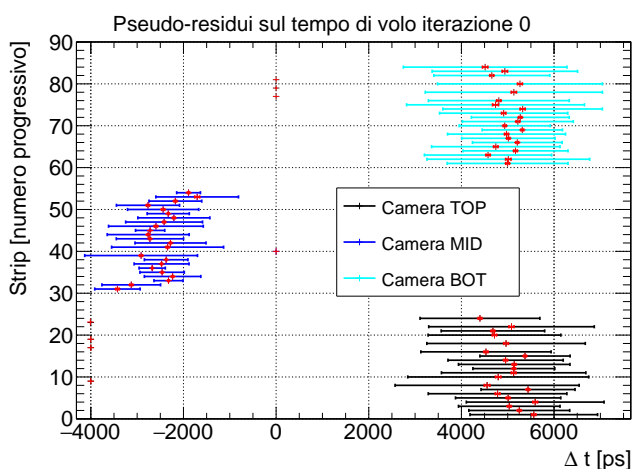


Figura 6.6: Analogamente alla figura 6.1 sono mostrate media con relativo errore (barra rossa) e RMS (barra colorata di nero, blu o azzurro) della distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata temporale, strip per strip, prima dell'allineamento. In questo caso vi è un forte disallineamento dovuto alla presenza di cavi significativamente più lunghi tra le varie camere. Notiamo però che anche all'interno di una stessa camera vi è un disallineamento dell'ordine del ns.

Posto ciò, si è proceduto nello stesso modo visto nel paragrafo precedente: nelle figure 6.6 e 6.7 è mostrato l'allineamento temporale, rispettivamente prima e dopo aver eseguito l'algoritmo di allineamento. Il forte disallineamento iniziale è principalmente dovuto alla presenza di un cavo da 5 ns in più rispetto alle altre due camere, ma in ogni caso sono presenti grossi disallineamenti all'interno di una stessa camera anche dell'ordine del ns.

Dopo aver eliminato il disallineamento è stata valutata la risoluzione temporale: nelle figure 6.8 e 6.9 sono graficate le distribuzioni degli pseudo-residui per la camera centrale prima e dopo l'alli-

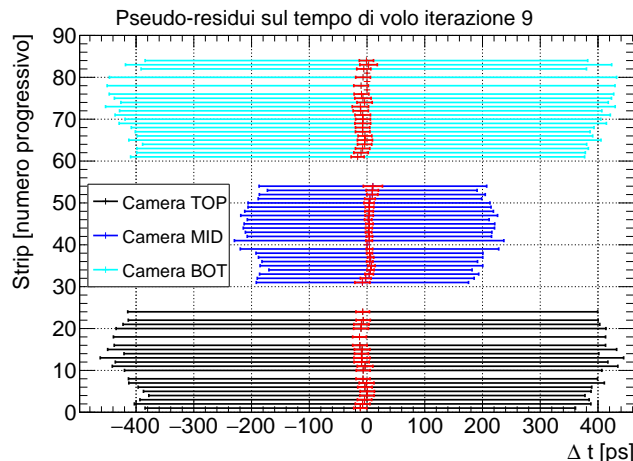


Figura 6.7: Dopo aver eseguito la procedura di allineamento, le distribuzioni degli pseudo residui sulla coordinata t strip per strip mostrano la media in accordo con zero entro l'errore per ogni strip, e, come nel caso della coordinata x (figura 6.2), le larghezze delle distribuzioni in accordo con quanto atteso (larghezze uguali all'intervallo di una camera, larghezza della camera centrale uguale a metà di quelle esterne).

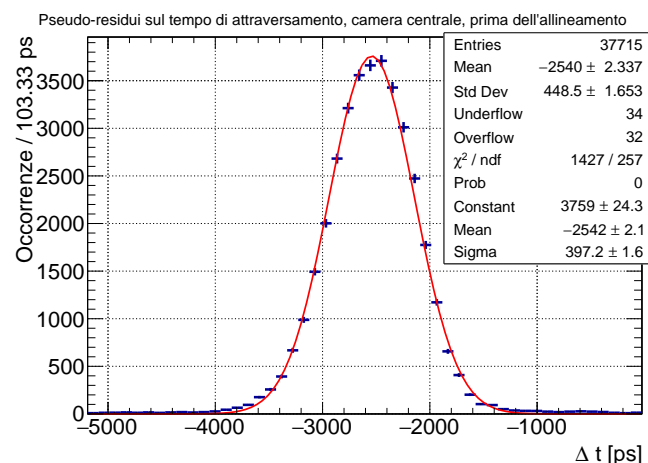


Figura 6.8: Distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata temporale, sommata su tutte le strip della camera centrale, prima dell'allineamento. Come si può notare, a causa del forte disallineamento temporale delle camere la distribuzione ha la media molto lontana dalla zero; inoltre il fit gaussiano (linea rossa) presenta un ragionevole accordo visivo con i dati, nonostante il valore del p -value sia pressoché nullo.

neamento. La risoluzione passa da $\sigma_r(t) = 366$ ps a $\sigma_r(t) = 192$ ps. Anche per questa coordinata è presente l'effetto visto su x (quasi-gaussianità prima dell'allineamento, code larghe dopo l'allineamento) seppur in maniera meno marcata (come si può osservare in figura 6.10).

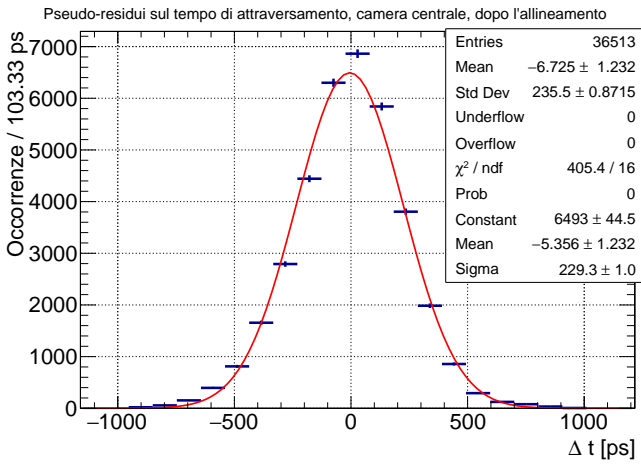


Figura 6.9: Dopo la procedura di allineamento la distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata temporale risulta centrata nello zero a meno di pochi ps, e con larghezza circa dimezzata rispetto a prima. Il fit gaussiano (linea rossa) non presenta un buon accordo, soprattutto a causa della presenza di code molto larghe.

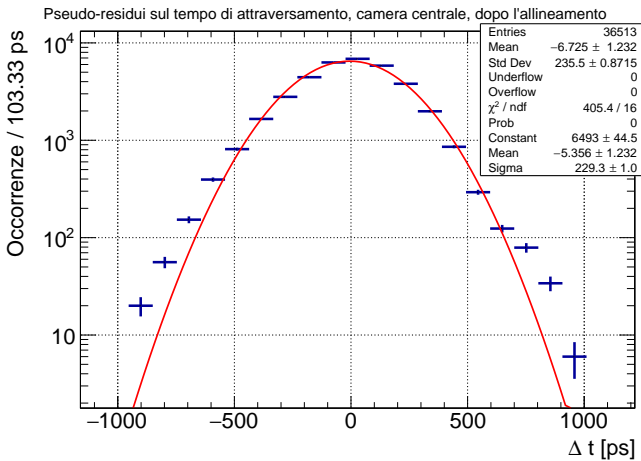


Figura 6.10: In figura è mostrata la distribuzione analoga a quella mostrata in figura 6.4, ovvero la distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata temporale dopo l'allineamento, utilizzando questa volta la scala y -logaritmica, così da enfatizzare la presenza di code non gaussiane.

Inoltre, come fatto in precedenza, è stata considerata anche la distribuzione degli pseudo-residui sommata su tutte le strip, calcolata utilizzando solo le tracce usate per eseguire l'allineamento. A differenza del caso della coordinata x , la distribuzione per le sole tracce "pulite" non risulta significativamente più stretta (la larghezza si riduce a 219 ps, corrispondente ad una risoluzione di 180 ps) di quella ottenuta considerando tutte le tracce.

Nuovamente l'ipotesi di gaussianità non è verificata a causa delle code larghe.

Dopo l'allineamento sulla coordinata t , è finalmente possibile tenere conto della distanza temporale tra due *hit* sia nella procedura di fit che di clustering. Infatti, se vi sono due *hit* vicine spazialmente ma lontane temporalmente è verosimile che non siano state entrambe generate dal passaggio di una particella carica. Di questa cosa non è stato tenuto conto, e rappresenta un possibile miglioramento dell'analisi, mentre è stata utilizzata l'informazione temporale nei fit fatti dopo l'allineamento temporale.

Allineamento e risoluzione su y - Per quanto riguarda la coordinata y la situazione è più complessa a causa della discretizzazione del rivelatore. Visto che le *strip* sono state posizionate con macchine a controllo numerico abbiamo assunto che non vi siano disallineamenti tra le *strip* di una stessa camera, e che l'unico disallineamento possibile sia quello geometrico di una camera rispetto alle altre due. È stato quindi utilizzato il metodo degli pseudo-residui integrando su tutte le strip. Come si può notare dalla fig. 6.11, il disallineamento risulta essere dell'ordine di 0.3 mm, e pertanto trascurabile (visto che è comparabile con le incertezze sugli allineamenti su x).

La risoluzione è stata stimata considerando due effetti sommati, poi, in quadratura:

- Larghezza della strip: assumendo una distribuzione uniforme delle *hit* sulla *strip* si ottiene
$$\sigma_y = \frac{l_{strip}}{\sqrt{12}} \simeq 0.72 \text{ cm}$$
- Larghezza della distribuzione degli pseudo residui: è stata valutata la larghezza della distribuzione separatamente per le tracce senza cluster e per quelle con presenza di cluster.

Dopo l'allineamento sulle altre coordinate si ottiene si ottiene un leggero miglioramento per le tracce con *cluster* (fig. 6.13) e nessun cambiamento per quelle senza *cluster*.

Il risultato è

$$\sigma_r^c(y) = 0.72 \text{ cm} \oplus 0.9 \text{ cm} = 1.15 \text{ cm}$$

per quelle con *clustering* e

$$\sigma_r^{nc}(y) = 0.72 \text{ cm} \oplus 1.2 \text{ cm} = 1.39 \text{ cm}$$

per quelle senza *clustering*.

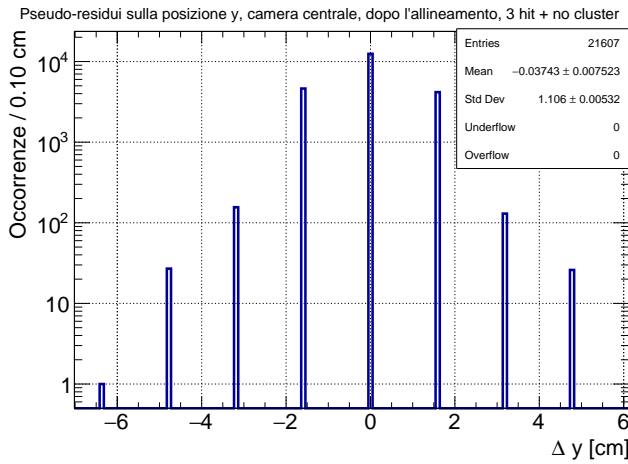


Figura 6.11: Distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata y per la camera centrale, sommata su tutte le strip, per gli eventi che presentano solo 3 hit e nessun cluster. Il grafico è stato prodotto dopo l'allineamento, ma non vi è alcuna differenza tra prima e dopo visto che l'allineamento su x e t non influenza in alcun modo la coordinata y . Si evince la discretizzazione dovuta al rivelatore: la scala logaritmica enfatizza la presenza delle code.

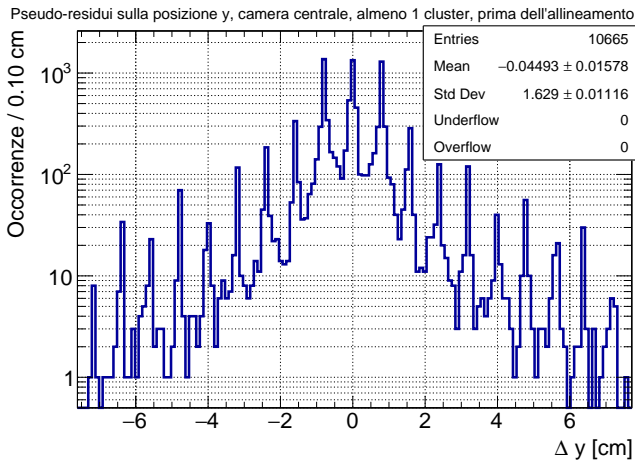


Figura 6.12: Distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata y per la camera centrale, sommata su tutte le strip, per gli eventi che presentano almeno un cluster, prima dell'allineamento. In questo caso l'allineamento ha un effetto sulla distribuzione, poiché il clustering coinvolge anche la coordinata x . La distribuzione è simile a quella senza cluster, ma presenta un allargamento dei picchi dovuto proprio al clustering.

Risoluzione angolare e sulla velocità dei raggi cosmici

- Dopo aver misurato le risoluzioni del rivelatore nella misura delle coordinate x , y e t è possibile determinare la conseguente risoluzione sull'angolo polare θ , su quello azimutale ϕ e sulla

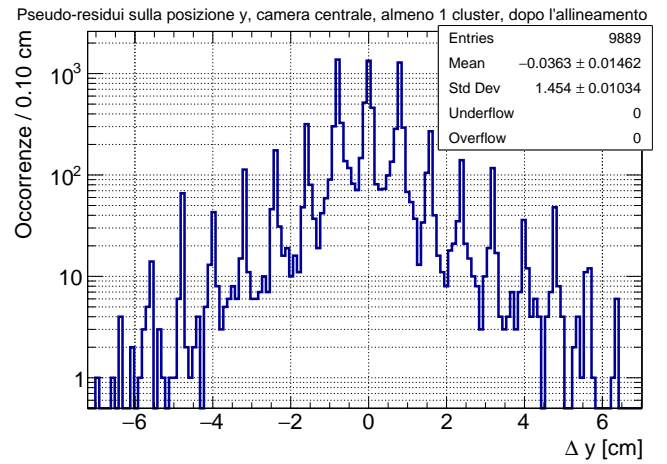


Figura 6.13: Distribuzione degli pseudo-residui sulla coordinata y per la camera centrale, sommata su tutte le strip, per gli eventi che presentano almeno un cluster, dopo l'allineamento. La differenza tra prima e dopo il cluster è piccola ma apprezzabile: la larghezza, dal valore di 1.63 cm diminuisce a 1.45 cm.

velocità della particella.

Posto $\Delta_x = x_2 - x_0$, $\Delta_y = y_2 - y_0$, $\Delta_z = z_2 - z_0$ e $\Delta_t = t_2 - t_0$ (ricordiamo che per un fit lineare per tre punti con ascissa equi-danziata, come nel nostro caso, si ha $y_2^{fit} - y_0^{fit} = y_2 - y_0$), e ponendo $\rho = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$ e $l = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2}$ si ha:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\rho}{\Delta_z}\right); \quad \phi = \arctan\left(\frac{\Delta_y}{\Delta_x}\right); \quad v = \frac{l}{\Delta_t}$$

Per calcolare le risoluzioni su questi parametri si può propagare l'errore, avendo accortezza di sommare in quadratura gli errori statistici su Δ_x , Δ_y e Δ_t , e di sommare invece in modo lineare l'incertezza sistematica su Δ_z relativa alla distanza fra le camere. I risultati sono quindi:

$$\sigma_\theta = \frac{\tan \theta}{1 + \tan^2 \theta} \left[\frac{\sqrt{2}}{\rho^2} \sqrt{(\Delta_x \sigma_x)^2 + (\Delta_y \sigma_y)^2} + \frac{\sigma_z}{\Delta_z} \right]$$

$$\sigma_\phi = \frac{\tan \phi}{1 + \tan^2 \phi} \sqrt{\frac{2\sigma_x^2}{\Delta_x^2} + \frac{2\sigma_y^2}{\Delta_y^2}}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{2\Delta_x^2 \sigma_x^2 + 2\Delta_y^2 \sigma_y^2}{l^2 \Delta_t^2} + \frac{2l^2 \sigma_t^2}{\Delta_t^4} + \frac{\sqrt{2} \Delta_z \sigma_z}{l \Delta_t}}$$

che ovviamente mostrano una dipendenza dall'angolo e dalla velocità, e che pertanto non sono di immediato utilizzo.

Per l'interpretazione delle distribuzioni sperimentali risulta quindi più conveniente utilizzare una simulazione MC in cui le tracce generate subiscono un allargamento dipendente dalla risoluzione sperimentale.

7 Caratterizzazione del rumore

Come visto nelle sezioni precedenti, l'apparato presenta una quantità di rumore non trascurabile e di varia natura: all'interno della stessa camera è presente sia del rumore indipendente tra le varie *strip* sia del rumore correlato dovuto alla vicinanza fisica delle *strip* tra loro.

L'analisi del rumore da noi condotta si limita alla misura del tasso di conteggi delle camere al variare della tensione di alimentazione.

La strategia usata è quella di acquisire i dati con *trigger* impostato sulla singola camera.

La problematica principale è invece che, alle tensioni nominali di lavoro le camere scattano ad un tasso dell'ordine del kHz, mentre l'elettronica di acquisizione degli eventi è limitata ad un tasso di circa 200 Hz. Pertanto l'unica informazione che può essere acquisita è il tasso di *trigger* letto da un contatore posto a monte del TDC.

In fig. 7.1 sono mostrate le curve registrate.

Come si può vedere a tensioni inferiori a 8 kV il *rate* di rumore è comparabile con il *rate* di raggi cosmici atteso (ordine di 30 Hz per le coincidenze triple e ordine di 100 Hz per il *trigger* in singola dato il rapporto delle accettanze), per cui le curve andrebbero corrette per il *rate* atteso data l'efficienza della camera a quella tensione.

Per quanto riguarda tensioni maggiori di 9 kV, alle quali il *rate* diventa ordine del kHz, la probabilità di coincidenza doppia nello stesso *trigger* diventa rilevante, motivo per cui sarebbe necessario studiare le singole *hit* all'interno di ogni *trigger*.

Infine, un'altra problematica della misura è il fatto che la lettura del contatore del numero di *trigger* non può essere fatta in modo automatico, ma necessita della presenza di una persona che legga a schermo i valori salvati all'interno dei registri del contatore.

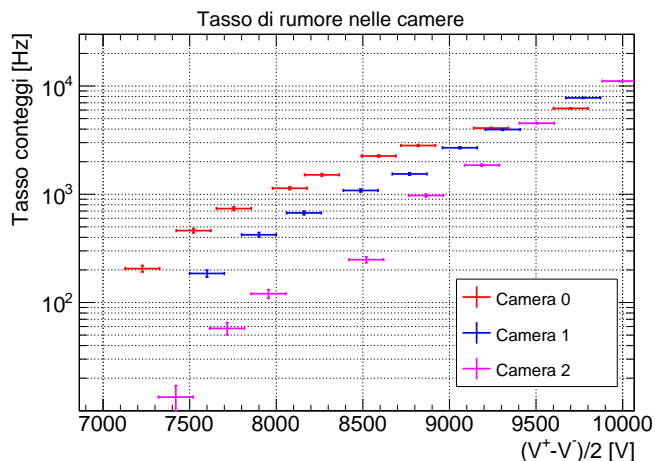


Figura 7.1: Curve di rumore delle camere registrate al variare della tensione di alimentazione.

Si nota che a bassa tensione le curve differiscono fino ad un ordine di grandezza tra le varie camere, mentre alla tensione nominale di 9.4 kV le discrepanze sono sicuramente inferiori ad un fattore 3.

8 Stima della purezza del campione

Per stimare la purezza del campione di tracce ottenuto con la ricostruzione si è provato ad eseguire un fit alla distribuzione del χ^2 delle tracce stesse. L'idea è che, per gli eventi prodotti da raggi cosmici, il χ^2 nelle due coordinate continue (x e t) dovrebbe essere distribuito come un χ^2 a 1 grado di libertà, mentre per gli eventi di fondo, (dati da coincidenze casuali di rumore su tutte e tre le camere o di raggi cosmici e rumore) il χ^2 segue una distribuzione diversa, che si può ottenere attraverso una simulazione MC. Eseguendo quindi un fit della frazione relativa di segnale e rumore è possibile determinare la purezza del campione.

Sono state quindi simulate le distribuzioni del χ^2 per rumore e segnale (figura 8.1), che sono state usate per eseguire il fit (figura 8.2).

Il risultato mostra una purezza superiore al 90%, risultato ragionevolmente accurato ma non particolarmente preciso: i parametri di fit hanno errori del 100%. Ciò è dovuto al fatto che le distribuzioni del fondo e del segnale sono abbastanza simili (hanno entrambe il massimo a 0) e che solo nella coda ad alto χ^2 il rumore diventa significativamente più importante del segnale e quindi meglio distinguibile. In questa zona, tuttavia, il numero di eventi si riduce notevolmente a causa della bassa statistica.

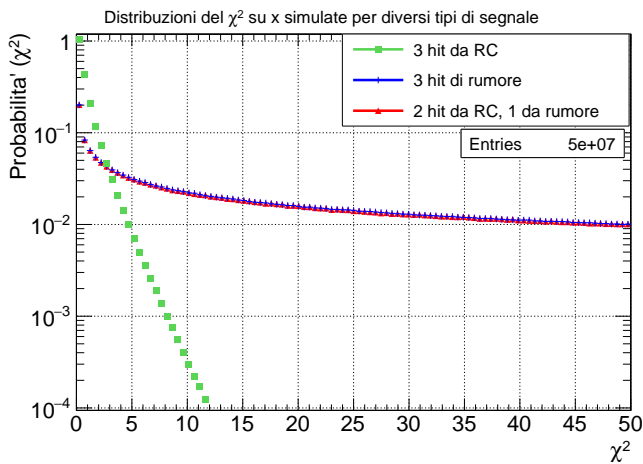


Figura 8.1: Distribuzioni del χ^2 simulate per gli eventi di segnale e per quelli di rumore. Come si può notare la situazione prodotta da tre hit di rumore e da una hit di rumore più due date da un raggio cosmico sono indistinguibili. Inoltre le due distribuzioni per il segnale e per il rumore presentano andamenti simili, con la differenza che il rumore ha una coda molto più larga.

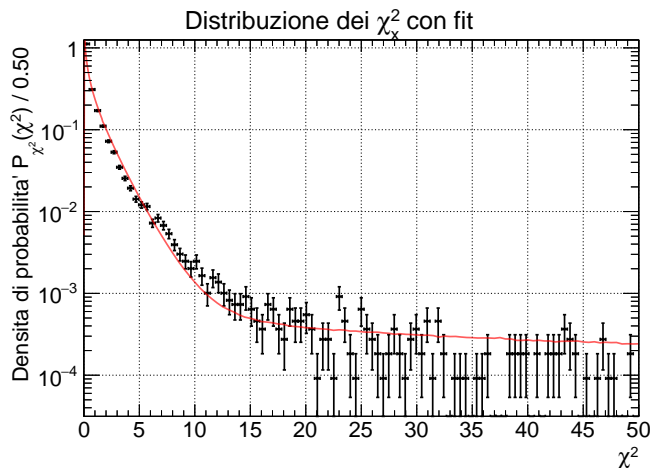


Figura 8.2: Fit della frazione segnale-rumore della distribuzione del χ^2 lungo la coordinata x . Il fit converge ma i parametri non sono molto significativi a causa degli errori che risultano essere confrontabili con i valori dei parametri stessi, principalmente a causa della scarsa popolazione della coda.

Ci aspettiamo che utilizzando insieme il χ_x^2 e il χ_t^2 il fit diventi capace di separare più adeguatamente le due classi di eventi. Un ulteriore problema è dovuto al fatto che il χ^2 delle tracce segue la distribuzione del χ^2 solamente se la risoluzione è gaussiana: in questo caso questa condizione non è rispettata a causa delle code molto larghe.

Concludendo, il metodo risulta interessante ma ne-

cessita di ulteriore lavoro per risolvere i problemi sopra elencati; inoltre il metodo si basa sul rumore, e pertanto, anche in questo caso, è necessaria una migliore caratterizzazione del rumore.

9 Efficienza

Uno degli scopi principali che erano stati indicati al nostro gruppo per quest'esperienza era lo sviluppo di una procedura per misurare l'efficienza in maniera automatica, cioè senza dover intervenire fisicamente sul rivelatore in modo di poterla eseguire da remoto.

Sono stati sviluppati due metodi indipendenti e confrontabili, entrambi con la caratteristica richiesta, ma con sostanziali differenze nel *setup* dell'apparato.

9.1 Efficienza con *trigger* a 3

Un primo metodo permette di misurare l'efficienza di tutte le camere del rivelatore durante un normale *run* di presa dati e quindi, in particolare, mantenendo invariata la richiesta di *trigger*. Poiché tale richiesta introduce un ovvio *bias* e quindi per funzionare il metodo deve basarsi sull'idea di "ingannare" il *trigger*.

Per valutare l'efficienza di una camera, infatti, è necessario sapere in maniera indipendente dalla camera in esame che un raggio cosmico è passato attraverso essa e andare a verificare poi se la camera lo ha realmente rivelato. Dato che per le richieste fatte in tutti gli eventi acquisiti tutte e tre le camere devono avere almeno una *hit* e l'unica possibilità per poter valutare l'efficienza è:

1. Assicurarsi che nella camera in esame sia passato un raggio cosmico usando l'informazione data dalle altre 2 camere
2. Controllare che il *trigger* possa essere scattato indipendentemente dalla rivelazione del raggio cosmico sulla camera (e.g. richiedendo la presenza di una *hit* di rumore nella camera in esame entro la finestra di *trigger* delle altre due), altrimenti già solo il fatto di vedere il dato evento rappresenterebbe un *bias*
3. Verificare la rivelazione o meno del RC dalla camera in esame

Un metodo di questo tipo ha dei notevoli vantaggi tra i quali il fatto che non necessita di *run* dedicati e può essere fatto online visto che non richiede condizioni di *trigger* diverse da quelle della presa dati; inoltre permette di misurare l'efficienza anche a posteriori e dandone una stima direttamente alle condizioni di lavoro a cui è stata svolta la presa dati e infine permetterebbe di sviluppare un sistema per monitorare continuamente l'efficienza dell'apparato e la sua dipendenza dai parametri ambientali.

Al contempo alcuni svantaggi sono intrinseci del metodo: ha una bassa statistica su cui poter valutare il flusso a causa delle richieste che è necessario fare sugli eventi; ha bisogno di una certa complessità software; essendo basato sul rumore ne richiede un'attenta caratterizzazione e, infine, introduce, anche se in maniera limitata, una correlazione tra le misure fatte sui dati e l'efficienza.

Implementazione - A livello di implementazione pratica il metodo presenta delle complicazioni, molte delle quali legate al fatto che il telescopio è composto solo da 3 camere e, quando non se ne utilizza una (la candidata), il numero di *hit* rimaste è esattamente uguale al numero di parametri liberi della traccia (bastano 2 punti per definire una retta) e quindi non è possibile usare informazioni spaziali per determinare il passaggio di un raggio cosmico. Inoltre, poichè si basa sulla ricostruzione di tracce necessita che la fase di allineamento sopra descritta sia stata condotta con esito positivo.

Per prima cosa, per seguire l'idea sopra esposta ed evitare problemi legati a un elevato numero di *hit* di rumore, vengono considerati esclusivamente gli eventi con un totale di 3 o 4 *hit*. Dopodichè si cerca di determinare la camera della quale si può indagare l'efficienza con l'evento considerato. A questo punto, due problemi principali sorgono a livello pratico: risolvere l'ambiguità circa di quale camera si vuole controllare l'efficienza negli eventi con solo 3 *hit* (senza ulteriori richieste tutte le coppie di *hit* potrebbero esser state generate da un RC); determinare, nel caso in cui una camera esterna è presa in considerazione, se il RC sia passato o meno entro la sua accettazione.

Per superare i problemi sopra esposti e valutare l'efficienza, l'algoritmo usato si divide in due fa-

si: candidatura e selezione. Una camera è detta "candidata" se rispetta le seguenti condizioni:

- Le altre due camere hanno esattamente una *hit* ciascuna
- Le *hit* presenti sulle altre due camere hanno una distanza temporale compatibile con una particella che viaggia alla velocità della luce, cioè che

$$\left| \Delta t_{exp} - \frac{\Delta L}{c} \right| < t_{thr}$$

dove ΔL è la distanza fisica tra le *hit* e t_{thr} è una data soglia

- La retta passante per le *hit* presenti sulle altre due camere intersechi la camera candidata entro una regione fiduciale (si noti che questa richiesta non è necessaria se si sta valutando la candidatura della camera centrale e pertanto non è verificata in questo caso)

Nel caso in cui un evento risulti avere più di una camera candidata ne viene estratta a sorte una. L'estrazione viene fatta secondo una distribuzione piatta a causa di una bassa conoscenza del rumore, tuttavia sarebbe più appropriato estrarre secondo una distribuzione proporzionale al tasso di rumore presente nelle varie camere.

A posteriori si nota che meno dell'1% degli eventi presenta più di un candidato.

Una volta individuata la camera candidata, vengono ricostruite tutte le tracce presenti nell'evento (senza limiti di χ^2). Una camera viene dunque selezionata se, dopo esser stata candidata, risulta presente nell'evento una traccia "cattiva", cioè con χ^2 superiore a un dato limite. Questo equivale a dire che l'evento in oggetto può essere usato per valutare l'efficienza della camera selezionata. Inoltre le *hit* della traccia cattiva devono avere una coordinata temporale tale da poter far partire un segnale di *trigger* se messe in AND.

Il valore del limite sul χ^2 per la definizione di tracce cattive non influenza l'analisi se posto sufficientemente alto perché equivale a chiedere che le *hit* di rumore stiano a una certa distanza dalla traccia. Aumentando il limite si diminuisce solamente la statistica poiché si richiede la presenza di rumore in una zona più ristretta, mentre non si influenza le tracce "buone" visto che la probabilità di trovare una di esse con χ^2 molto alto è essenzialmente nulla

oltre un certo valore dettato dalla statistica. Nell'analisi svolta il χ^2 limite è definito da

$$\chi_{bad}^2/\text{dof} = 50$$

Infine quando una camera è selezionata si dice che essa è stata efficiente se è presente una traccia "buona" nell'evento, cioè ricostruita dall'algoritmo di tracciamento. L'efficienza della camera risulta quindi il rapporto tra il numero di eventi in cui la camera è stata efficiente (N_3) e il numero di eventi in cui la camera è stata selezionata (N_2).

Simulazione MC - Per verificare la consistenza del metodo e studiare la definizione corretta delle soglie è stata fatta una simulazione MC dedicata. La simulazione è stata eseguita generando direttamente le *hit* sui vari piani e fissando a uno il numero massimo di *hit* di rumore in una camera.

Come prima cosa è stato applicato il metodo di questa misura utilizzando direttamente le informazioni MC, cioè andando a vedere direttamente quale *hit* è stata generata come rumore e quale come RC. Al termine di questo studio è stato possibile concludere che il metodo esposto funziona e non presenta *bias* concettuali. Si nota inoltre che per raggiungere una precisione dell'1% sulla misura dell'efficienza totale del telescopio, utilizzando le informazioni MC, è necessario valutarla su un campione totale di circa 5000 eventi selezionati equidistribuiti tra le 3 camere.

Come seconda fase gli eventi generati MC sono stati passati direttamente all'algoritmo per la misura di efficienza utilizzato anche sui dati sperimentali.

Studiando il comportamento dell'algoritmo in questa situazione controllata è stato verificato che è presente un *bias* (fig. 9.1) nella misura dell'efficienza nel caso in cui non venga definita una zona fiduciale ma venga semplicemente fatta la richiesta che il prolungamento della retta passante per le due *hit* delle camere non selezionate intersechi il terzo piano. Tale *bias*, che fa stimare una efficienza inferiore a quella inserita in generazione, è rimovibile definendo una zona fiduciale che restringa l'area accettata per la posizione della *hit* attesa, in pratica si taglia una striscia di rivelatore ai bordi. Si noti che la definizione di una zona fiduciale influenza la misura solo se questa è troppo piccola ed un numero

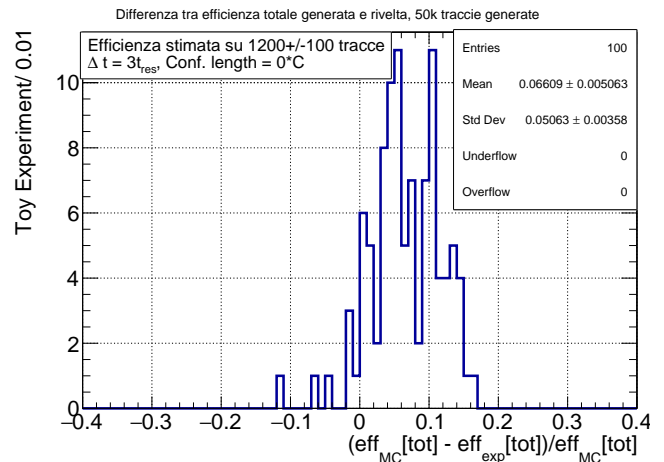


Figura 9.1: Confronto tra efficienza MC e prodotto delle efficienze delle tre camere misurato sugli eventi MC, nel caso in cui non venga definita la zona fiduciale ma richiedendo solo l'intersezione con il piano.

Si nota una discrepanza del 6% non compatibile con 0 nella media della distribuzione.

significativo di eventi non voluti rispetta le richieste fatte per fluttuazioni casuali.

Dopo un breve studio, è stato deciso di definire la zona fiduciale come 4 volte la risoluzione su x e 3 volte la risoluzione su y da entrambi i lati del rivelatore nelle rispettive direzioni. Così facendo (fig. 9.2) il *bias* risulta nullo.

È stato inoltre fissato il valore limite t_{thr} a 3 volte

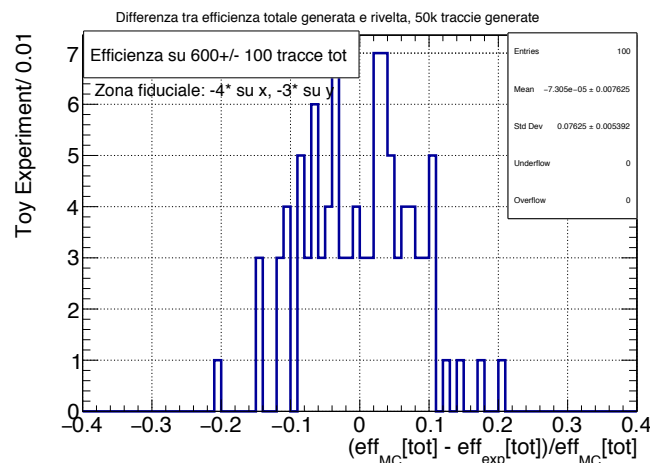


Figura 9.2: Differenza tra efficienza MC ed efficienza misurata su eventi MC. Si nota che con la definizione di zona fiduciale il bias sulla media della risoluzione diventa nullo.

Inoltre si nota che utilizzando circa 600 tracce in totale la risoluzione sulla misura dell'efficienza è di poco migliore del 10%.

la risoluzione dell'apparato sul tempo.

A questo punto, per valutare la precisione attesa sulla misura dell'efficienza con questo metodo, sono stati generati 100 *toy experiment* sui quali è stata effettuata la misura con un totale di 600 tracce, circa equidistribuite tra le camere. È stato scelto questo numero di tracce perchè confrontabile con quello che si ottiene in un *run* di dati sperimentali da 50k eventi.

Il risultato, visibile in fig. 9.2, mostra che la precisione raggiungibile è del $7.6 \pm 0.5\%$.

Infine, dallo studio MC, emerge il fatto che il metodo sopra esposto presenta una notevole instabilità nel caso in cui il tasso di rumore sia confrontabile con l'efficienza mentre non risulta avere problemi particolari nel caso in cui le efficienze delle tre camere presentino differenze dell'ordine del 10%. Questo mostra ancora una volta la necessità di una caratterizzazione accurata del rumore prima di poter fare affidamento su una misura di questo tipo.

Risultati sui dati sperimentali - Dopo una caratterizzazione MC gli algoritmi sviluppati sono stati applicati ai dati registrati dal telescopio.

Sono stati presi in esame 21 *run*: per ognuno di questi l'efficienza complessiva del telescopio è stata valutata su un insieme di 587 ± 105 eventi, dove sono quotati la media e lo scarto quadratico medio della distribuzione del numero di eventi soddisfacenti le richieste per la misura di efficienza in un *run*.

Si nota, in generale, un minor numero di eventi in cui le camere esterne risultano candidate, sempre compreso tra 100 e 150. Questo è parzialmente attribuibile alla richiesta in meno che viene fatta per candidare la camera centrale ma non esclusivamente poiché la frazione degli eventi con la camera centrale selezionata non è compatibile con il rapporto tra area totale e area della zona fiduciale. Probabilmente il tasso di rumore non è uguale nelle tre camere, come intuibile dal grafico presentato nella sezione dedicata.

Nelle figure 9.4 e 9.3 sono riportati i risultati ottenuti.

Osservando la misura dell'efficienza sulle singole camere nei vari *run* si possono notare delle fluttuazioni del valore compatibili con le attese MC. Tuttavia questo non è direttamente riconducibile alla risoluzione del metodo poiché i *run* in considerazione sono stati registrati a distanze temporali dell'or-

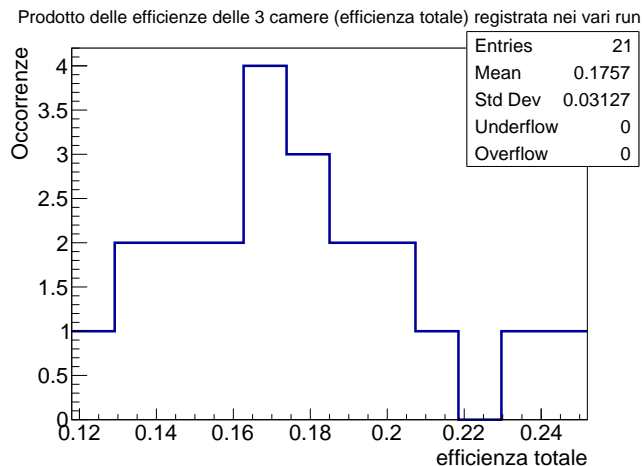


Figura 9.3: Efficienza totale registrata nei vari run. I valori misurati risultano significativamente inferiori a quanto stimato con altri metodi e/o da gruppi precedenti.

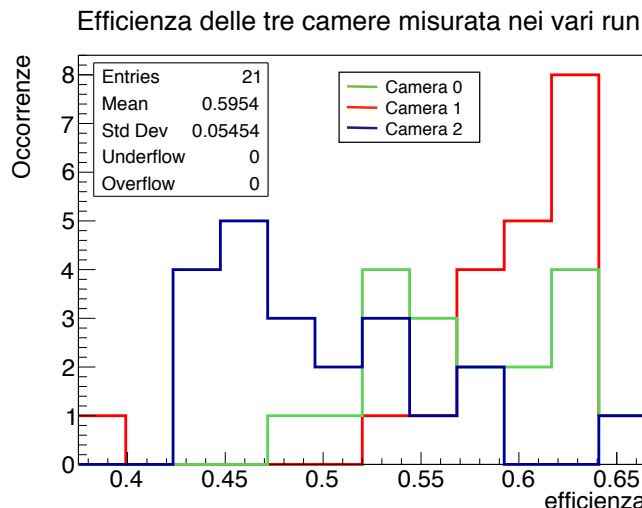


Figura 9.4: Efficienza delle singole camere registrata nei vari run. Si nota una scarsa costanza del valore misurato su tutte le camere. La dispersione risulta compatibile con le attese MC ma non è direttamente attribuibile alla risoluzione della misura.

dine di qualche settimana e presentano differenze nell'alimentazione delle camere di qualche centinaia di volt. Inoltre, i singoli valori e il valore totale dell'efficienza risultano significativamente inferiori a misure precedenti di altri gruppi e incompatibili con la misura effettuata con un altro metodo (vedi sezione successiva).

In conclusione, il metodo sembra essere applicabile e restituire risultati sensati anche se non compatibili con valori attesi. Esso necessita indubbiamente di affinamenti e di una maggiore conoscenza

del rumore ma presenta un'ottima possibilità per sviluppare una procedura che permetta di misurare l'efficienza *on-line* e da remoto senza dover intervenire sull'apparato.

L'affidabilità di questo metodo risulta quindi bassa ma si crede possa essere promettente per sviluppi futuri.

9.2 Efficienza con *trigger* a 2

È stato sviluppato un secondo metodo per la misura dell'efficienza delle camere, che utilizza una strategia fondamentale diversa. Questo secondo metodo non è stato ideato e implementato per ovviare alle problematiche e ai difetti della misura dell'efficienza con *trigger* su tre camere, ma vuole essere un'alternativa da poter utilizzare. Questa strategia evita alcuni dei problemi incontrati precedentemente, ma perde potenza su alcuni punti di forza del metodo con *trigger* a 3.

Si supponga di voler misurare l'efficienza ε_i della camera i . A questo scopo, si imposta il *trigger* sulla coincidenza delle altre 2 camere (j, k). In tal modo, nonostante il *rate* registrato sia più alto di quello con *trigger* a 3 camere (un *run* dedicato da 10k eventi contro i circa 600 selezionati dal metodo a 3), questo risulta sufficientemente ridotto da poter acquisire i dati completi e non solo il conteggio di *trigger* come per *trigger* singolo. Quindi si ricostruiscono le *hit* sulle tre camere a partire dai dati così raccolti, e si selezionano unicamente gli eventi "puliti", ossia quelli con esattamente 1 *hit* sulle due camere di *trigger* j, k e al più 3 *hit* in tutto l'evento. All'interno di tale classe di eventi si selezionano unicamente quelli in cui le due *hit* sulle camere di risultano compatibili temporalmente con una particella che si propaga tra i due punti alla velocità della luce. Questo viene fatto calcolando t_{misurato} (differenza tra le *hit time* delle due *hit* sulle camere di *trigger*) e t_{atteso} (distanza spaziale tra le due *hit* di *trigger* diviso la velocità della luce), quindi valutando se $\Delta t = |t_{\text{misurato}} - t_{\text{atteso}}| < t_{th}$, dove t_{th} è un'opportuna soglia di compatibilità dell'ordine di grandezza della risoluzione temporale dell'apparato (scelti 500 ps nell'analisi effettuata). In caso affermativo l'evento supera questa prima selezione. Da notare che in questo modo stiamo aggiungendo l'informazione esterna che la velocità dei segnali sia prossima a c , elemento che potrebbe introdurre un piccolo bias, che però non è stato valutato. Suc-

cessivamente si opera una seconda selezione, prolungando la retta passante per le due *hit* considerate sulla terza camera e osservando se cade o meno all'interno di una zona fiduciale (analoga a quella dell'efficienza con *trigger* a 3). In caso affermativo si decide che le due *hit* corrispondono a un raggio cosmico che ha attraversato. Definiamo allora l'insieme degli N_2 come gli eventi che hanno superato queste due selezioni. Trattando ora unicamente gli eventi N_2 , si va a cercare l'eventuale terza *hit* sulla camera i di cui si sta misurando l'efficienza. Viene quindi applicata la procedura di *tracking* utilizzata precedentemente per riconoscere le tracce, e se vi è una traccia riconosciuta l'evento è contato nell'insieme N_3 . Fondamentalmente si è operata una ulteriore selezione degli eventi scegliendo solo quelli la cui traccia per 3 punti ha χ_{tot}^2 inferiore alla soglia di *tracking*. Gli insiemi N_2, N_3 sono ora ben definiti, ma non si è trattata la possibilità che un evento di N_2 sia frutto di una coincidenza temporale dovuta al rumore (per gli eventi N_3 la possibilità di essere rumore è remota, poiché dovrebbe essere frutto di una coincidenza casuale e temporale di 3 camere, cosa estremamente improbabile). Per rimuovere tale fondo a N_2 è stata osservata la distribuzione di Δt (con la definizione sopra data, rimuovendo però il valore assoluto) prima di qualsiasi selezione; si riconoscono due strutture: un picco gaussiano, dovuto evidentemente alla dispersione della risoluzione sperimentale intorno a $\Delta t = 0$, e un fondo costante, associabile alla presenza di rumore scorrelato sulle due camere di *trigger*. È stato allora eseguito un fit con un modello di costante sommata a una gaussiana¹, ed è stato quindi rimosso a N_2 il numero di eventi imputabili a questo fondo costante all'interno dell'intervallo selezionato $\Delta t < t_{th}$ (tecnicamente è stato rimosso $N_{\text{rumore}} = k \cdot \mathcal{N}_{\text{bin} \in [-t_{th}, t_{th}]}$ dove k è la costante risultato del fit). Gli eventi così rimossi sono circa un 1% di N_2 . In figura 9.5 è mostrato un esempio di tale fit.

Una volta rimosso il fondo è stata valutata $\varepsilon_i = \frac{N_3}{N_2}$ con $\Delta\varepsilon_i = \frac{1}{N_2} \sqrt{N_3(1 - \varepsilon_i)}$ (propagato sulle variabili indipendenti N_3 e $N_2 - N_3$).

La procedura è stata quindi iterata su tutte le camere al variare della tensione di alimentazione (sono stati raccolti *run* con *trigger* a 2 camere su

¹su alcuni *run* con statistica inferiore tale fit non converge, a causa di un fondo troppo poco popolato che lascia bin vuoti. In tal caso si è assunto il fondo di rumore trascurabile.

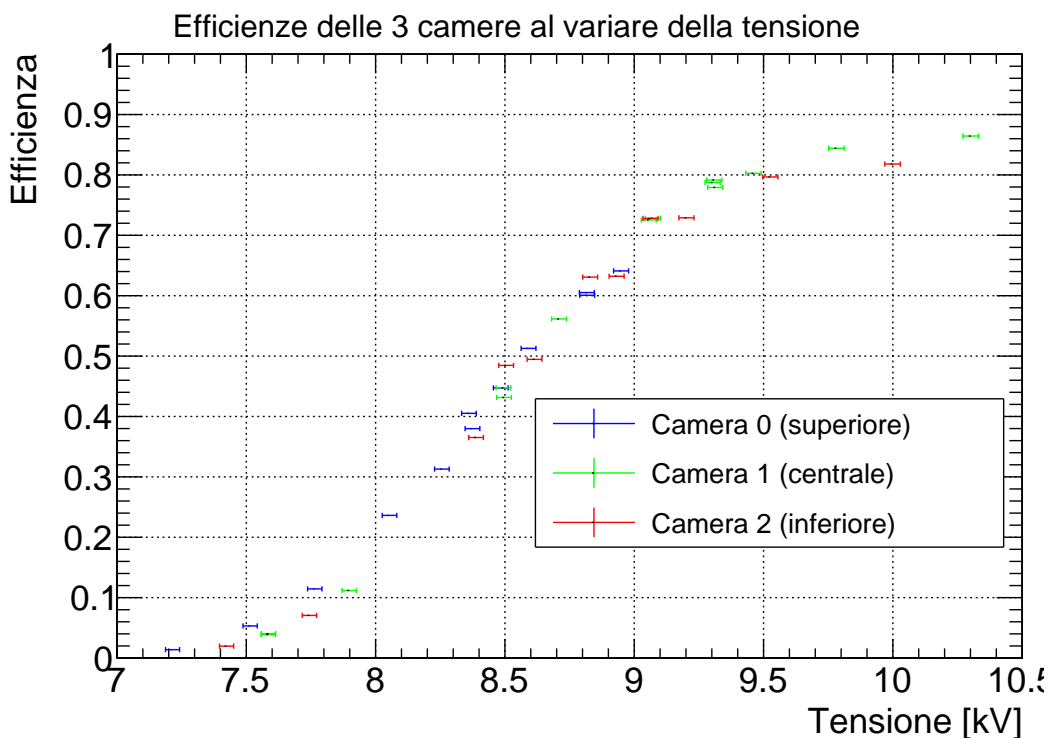


Figura 9.6: Curve di efficienza calcolate con il metodo di *trigger* su due camere. La curva della camera 0 si ferma a 9 kV perché non sono stati presi dati oltre tale tensione.

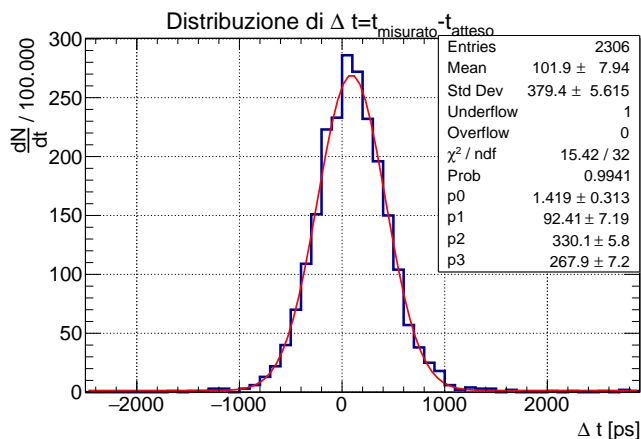


Figura 9.5: Distribuzione della differenza tra il tempo atteso, data la distanza spaziale delle hit, e il tempo misurato. Il parametro p_0 rappresenta la costante, mentre gli altri sono i parametri relativi alla gaussiana.

tutto l'intervallo di tensione indagabile). Per poter ottenere una funzione matematica che descrive la curva di efficienza è stato tentato in primo luogo un fit polinomiale, ma tale fit non converge in modo soddisfacente. Per tale ragione si è preferito utilizzare un'interpolazione numerica nell'intervallo

considerato². In figura 9.6 sono mostrate tali curve di calibrazione.

Con tale interpolazione è quindi possibile correggere per il valore dell'efficienza alla corretta tensione ogni run di dati in seguito raccolto (ad esempio per la stima del flusso di raggi cosmici).

Viene immediatamente alla luce la problematica principale di questo metodo di misura dell'efficienza: si valuta l'efficienza su un set di dati che non è quello su cui si applica la correzione, poiché si utilizzano dei *run* dedicati con *trigger* a 2 camere per ricavare le curve di efficienza. Se il valore dell'efficienza variasse nel tempo e in funzione dei parametri ambientali (come è ragionevole che sia) si correggerebbe per un valore errato, motivo per cui le curve di efficienza non sono utilizzabili a posteriori su un lungo periodo. Un'ulteriore problematica di tale metodo consiste nella valutazione del rumore: una migliore caratterizzazione di quest'ultimo potrebbe ridurre l'errore sistematico che è stato necessario aggiungere a N_2 dovuto all'errore sulla stima del fondo (ordine del 0.1%).

²la curva è costruita come una serie di parabole per 3 punti opportunamente raccordate

D'altro canto tale metodo, proprio per l'utilizzo di *run* dedicati, permette di eseguire la misura dell'efficienza su una quantità di dati superiore a quella relativa al metodo con *trigger* su tre camere; infine data la minore complessità software, ci si aspetta che questo metodo sia maggiormente accurato.

10 Simulazione MC

Una fase importante dell'analisi è stato il confronto tra i dati e la simulazione MC sviluppata. Il MC è stato usato per simulare nella maniera più fedele possibile il funzionamento dell'apparato di misura a partire da una sorgente di raggi cosmici distribuita secondo le aspettative.

Dall'analisi dei risultati della simulazione è possibile comprendere se i dati sono stati trattati nel modo corretto e se le interpretazioni date alle distribuzioni osservate rispecchiano fenomeni compresi (che sono quindi stati inseriti nella simulazione). In secondo luogo il MC permette di ottenere informazioni necessarie all'analisi dei dati che sarebbero però estremamente difficili da ottenere per via analitica, come la corretta descrizione dell'accettanza geometrica dell'apparato.

10.1 Caratteristiche del Monte Carlo

È stato deciso di sviluppare un MC che generasse dati a livello più alto rispetto a quelli che il reale apparato sperimentale fornisce. È stato infatti ritenuto necessario testare principalmente l'analisi ad alto livello (*clustering*, fit delle tracce, *display* degli eventi. . .) e non a quella a basso livello (ricostruzione della posizione, calibrazione). La simulazione genera infatti raggi cosmici distribuiti uniformemente sulla superficie del piano superiore, con distribuzione dell'angolo polare $\frac{dN}{d\theta} \propto \cos^3 \theta \sin \theta$ e con distribuzione uniforme nell'angolo azimutale ϕ . Quindi vengono calcolate le coordinate delle *hit* di ogni raggio cosmico incidente, su ognuno dei tre i piani. Ad ognuna di esse è aggiunta una dispersione gaussiana in modo da simulare la risoluzione dell'apparato. La simulazione genera un singolo raggio cosmico alla volta quindi esclude ogni problema combinatorio.

Nel fare questo si è tenuto conto della presenza delle *strip* sulla coordinata y , costruendo un modello semplificato. Ogni *strip* è larga 2.5 cm, e tra

una *strip* e l'altra vi sono 0.7 cm: nel modello utilizzato se un raggio cosmico impatta nei 2.5 cm di *strip* viene rivelato solamente su quella *strip*, mentre se colpisce la zona tra una *strip* e l'altra si attivano entrambi le *strip* adiacenti. Confrontando però la frequenza di eventi simulati e registrati nei quali si accendono due *strip* adiacenti, ci si accorge che è quella simulata risulta essere molto superiore a quella effettivamente osservata utilizzando i dati reali. È stato quindi necessario raffinare la simulazione restringendo la zona di doppia attivazione a soli 0.3 cm, cosicché se il raggio cosmico colpisce i 0.2 cm prossimi ad una *strip* solo quella *strip* registra un segnale. In tal modo la frequenza di accensione di *strip* contigue diventa compatibile con quella sperimentale.

In secondo luogo la simulazione comprende la presenza di *strip* non funzionanti (d'ora in poi denotate con *strip morte*) distribuite in maniera casuale sui tre piani. Dato che sperimentalmente le *strip morte* variano tra un *run* e un altro sia in posizione che in numero la simulazione le genera distribuite, per ogni piano, come una Poissoniana di media 4. È stata scelta tale distribuzione poiché riproduce in modo abbastanza accurato il numero di *strip morte* osservate sperimentalmente.

Il MC prevede anche la possibilità di inserire manualmente le *strip morte*, se si vuole verificare la distribuzione in uno specifico *run*.

Infine la simulazione è stata ultimata inserendo una procedura di *clustering* simile a quella utilizzata sui dati: se un raggio cosmico attiva 2 *strip* adiacenti si genera al loro posto una *hit* nel punto medio tra le due *strip*.

10.2 Accettanza

La simulazione MC è essenziale per determinare l'accettanza geometrica del rivelatore. Questo parametro è essenziale per due motivi: in primo luogo per comprendere le distribuzioni di eventi per unità di superficie, osservate sulle tre camere; in secondo luogo per la corretta valutazione del flusso dei raggi cosmici.

All'interno della simulazione l'accettanza del telescopio è calcolata come la probabilità che un raggio cosmico generato su una delle camere con θ e ϕ opportunamente estratti dalle corrette distribuzioni, intercetti le altre 2 camere. All'interno del MC si itera il calcolo di tale valore su 10^3 *run* in

modo da poter considerare media e varianza della distribuzione così generata. Ad ogni iterazione si aggiunge una dispersione uniforme (larghezza 0.5 cm) su i valori delle lunghezze fisiche della camera, per simulare l'errore sulla misura di queste ultime. La distribuzione così ottenuta è in buona approssimazione gaussiana, e la sua media e l'RMS sono stati utilizzati rispettivamente come valore e incertezza dell'accettanza.

Il valore di accettanza del telescopio risultante è $\mathcal{A}_3 = 0.378 \pm 0.05$.

Un secondo valore rilevante è la probabilità che un raggio cosmico generato su una camera intercetti solo una delle altre due camere. Iterando su un ciclo di simulazioni come precedentemente descritto si ottiene $\mathcal{A}_2 = 0.619 \pm 0.05$.

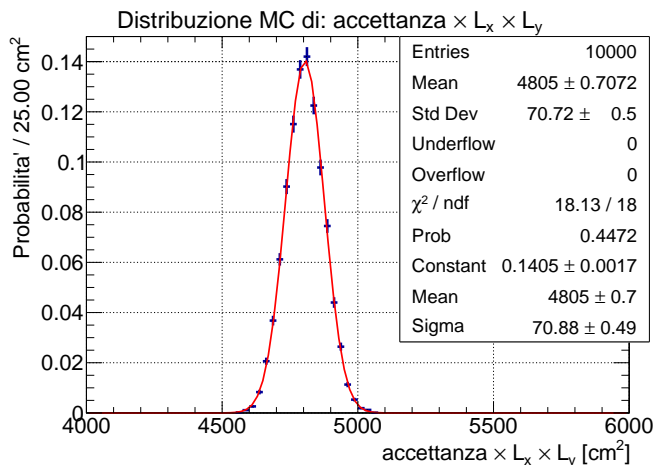


Figura 10.1: Distribuzione del prodotto tra accettanza e superficie delle telescopio simulata con MC. La distribuzione è stata ottenuta ripetendo la simulazione su 10^4 toy experiment ed è normalizzata all'unità.

Un ulteriore valore importante per il calcolo dell'efficienza è $\mathcal{A}_3 L_x L_y$, dato che tale prodotto compare nella formula che dà il flusso dei raggi cosmici. In particolare le grandezze \mathcal{A}_3 , L_x e L_y sono correlate, e pertanto risulta difficile propagare gli errori in maniera analitica. Il valore ottenuto è $\mathcal{A}_3 L_x L_y = 0.481 \pm 0.007 \text{ m}^2$, stimato come media e RMS dell'istogramma in fig. 10.1.

Infine, unicamente per avere un riscontro qualitativo del buon funzionamento della simulazione può essere utile osservare la distribuzione delle *hit* simulate sulle 3 camere e confrontarla con quanto osservato sperimentalmente. Da una differenza degli istogrammi 2D della distribuzione delle *hit* (e.g. fig. 4.8) misurata e simulato si nota un buon accor-

do, indice di una comprensione del funzionamento della camera.

11 Misure

In questa sezione sono presentati i risultati sulle misure dei parametri dei raggi cosmici. A un confronto tra MC e dati sulle distribuzioni angolari, ne segue uno tra la misura del flusso eseguita con i due diversi metodi per la misura dell'efficienza, le stime precedentemente fatte e i dati di letteratura.

11.1 Distribuzioni Angolari

Un'analisi in cui è essenziale l'utilizzo della simulazione MC sviluppata è quella delle distribuzioni angolari dei raggi cosmici. Le distribuzioni angolari osservate non sono semplicemente una distribuzione uniforme per l'angolo ϕ e del tipo $\frac{dN}{d\theta} \propto \cos^3 \theta \sin \theta$ per l'angolo polare, come ci si aspetterebbe, ma risultano modificate dall'accettanza non uniforme nei due angoli (data dalla geometria del rivelatore) e dalla discretizzazione lungo la coordinata y .

Complessivamente quindi, non è possibile eseguire un fit alle distribuzioni con un modello analitico, e pertanto si è utilizzato un confronto con la simulazione MC.

In figura 11.1 è mostrato il confronto tra la distribuzione in θ simulata e sperimentalmente misurata. Si possono osservare i picchi a $\theta < 0.6$ dovuti alla discretizzazione della coordinata y , ben descritti dalla simulazione, mentre non sono presenti a θ maggiori data la geometria del telescopio. Nonostante ci sia un buon accordo sull'*end-point* della distribuzione, ad alto θ c'è un'evidente discrepanza: la simulazione sottostima notevolmente la distribuzione sperimentalmente. Questo probabilmente è dovuto a una discrepanza tra il flusso osservato e la distribuzione $\frac{dN}{d\theta} \propto \cos^3 \theta \sin \theta$ (corrispondente alla sorgente MC), cosa del tutto plausibile dato che tale descrizione analitica rappresenta (da letteratura) solo un andamento approssimativo.

In figura 11.2 è invece mostrato il confronto tra le distribuzioni in ϕ . L'andamento non uniforme è dettato dalla geometria rettangolare delle camere. Elemento evidente sono i due picchi a $\phi = \frac{\pi}{2}$ e $\pi = \frac{3}{2}\pi$ dovuti alla discretizzazione in y : a tali angoli corrispondono raggi cosmici che colpiscono

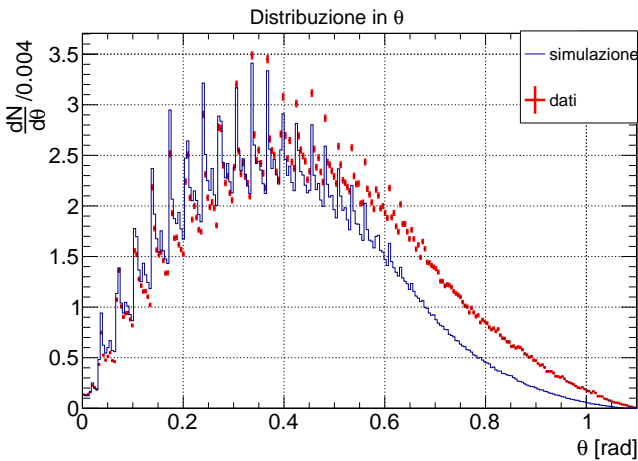


Figura 11.1: Distribuzioni in θ simulata e misurata considerando tutti i 21 run a disposizione. Da notare che le due distribuzioni sono state normalizzate allo stesso numero di eventi considerando solo gli eventi con $\theta < 0.35$, in modo da riuscire a mostrare la buona descrizione dei picchi discreti, ma peggiorando ancora l'accordo ad alto θ .

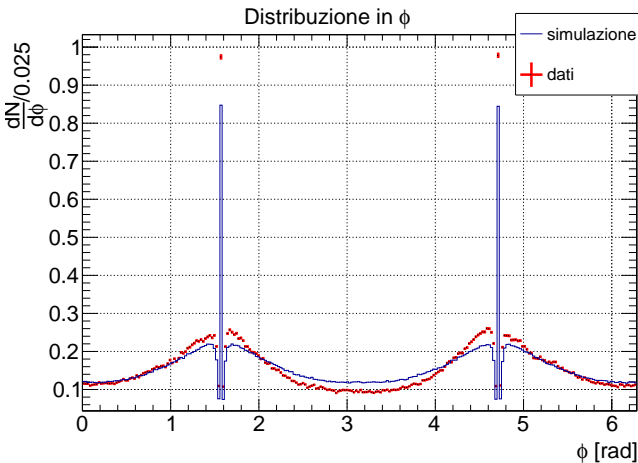


Figura 11.2: Distribuzioni in ϕ simulata e misurata considerando tutti i 21 run a disposizione. In questo caso le due distribuzioni sono state normalizzate allo stesso numero di eventi su tutto l'intervallo considerato. Si nota visibilmente che la distribuzione è maggiormente popolata nella zona attorno a 0 di quanto lo sia nella zona attorno a π . Questo è in accordo con quanto osservato nella sezione sulla qualità dei dati.

l'apparato parallelamente alle strip.

Tutti questi raggi cosmici sono rivelati come paralleli alle strip, dato che intersecano la stessa *strip* su tutte le camere, e sono quindi assegnati a $\phi = \frac{\pi}{2}$ o $\pi = \frac{3}{2}\pi$ a seconda della direzione. Tale assegnamento popola maggiormente i *bin* corrispondenti a questi due angoli e riduce la popolazione nei *bin*

adiacenti.

I picchi dati da questo effetto sono correttamente descritti dalla simulazione.

Si nota un buon accordo qualitativo ma è anche chiaro che restano delle discrepanze dovute alla non perfetta accuratezza della descrizione lungo y . Nella simulazione infatti l'errore su y è considerato gaussiano con larghezza corrispondente a quanto misurato in fase d'allineamento. Tale descrizione dà il giusto ordine di grandezza, ma distribuendo gli errori esattamente come gli pseudo-residui osservati si otterrebbe una simulazione più verosimile.

11.2 Flusso dei raggi cosmici

Dal momento che i due metodi presentati per la misura dell'efficienza presentano profonde differenze tra loro, e che non vi è accordo tra i risultati ottenuti nei due casi, il valore del flusso dei raggi cosmici nei diversi *run* è stato stimato due volte usando separatamente le due misure dell'efficienza.

La differenza tra i due metodi è profonda: infatti il metodo che utilizza il *trigger* a tre (EFF3) stima l'efficienza con bassa statistica ma nel momento stesso in cui il *run* è stato acquisito e pertanto ogni *run* ha una misura dell'efficienza specifica.

Al contrario il metodo che utilizza il *trigger* a due (EFF2) porta ad una stima dell'efficienza fatta con maggiore statistica utilizzando però dati presi in un momento separato e quindi si riferisce, per tutti i *run*, all'apparato nelle condizioni in cui era al momento del *run* dedicato ed estrapolando nei punti mancanti.

I *rate* R utilizzati nella stima del flusso sono stati ottenuti contando il numero di tracce riconosciute in un *run* e dividendo tale numero per il tempo totale di acquisizione di quel *run*. Di conseguenza il flusso è dato da:

$$\Phi = \frac{R}{\epsilon_{tot} \mathcal{A}_3 L_x L_y}$$

I risultati ottenuti nei due modi sopra esposti per la misura del flusso sono riportati in fig. 11.3. Si noti che, nel caso del metodo dell'efficienza a 3, si è trascurata la correlazione (che ci si aspetta essere piccola) tra il valore dell'efficienza e il valore del *rate*, introdotta dall'utilizzare lo stesso campione per stimare entrambe le grandezze.

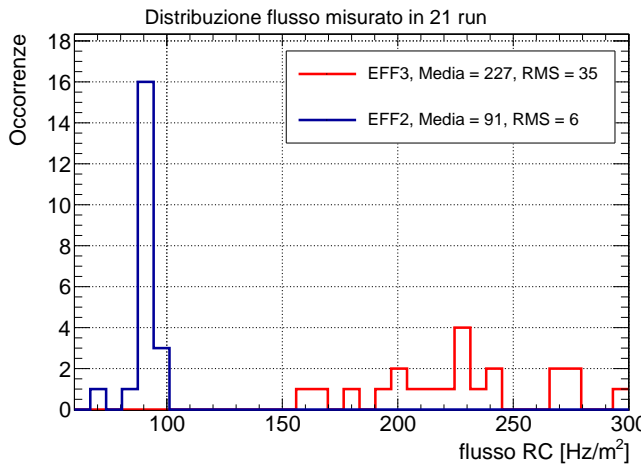


Figura 11.3: Distribuzione delle misure del flusso dei raggi cosmici effettuate nei 21 run di presa dati. Si nota che il metodo del trigger a due (EFF2) risulta decisamente preciso ma poco accurato. Il metodo che utilizza il trigger a 3 (EFF3) presenta un'accuratezza ancora inferiore.

Dai grafici riportati si evince che il valore del flusso stimato risulta

$$\Phi_{EFF3} = 227 \pm 35 \text{ Hz/m}^2$$

$$\Phi_{EFF2} = 91 \pm 6 \text{ Hz/m}^2$$

Questi valori sono da confrontare con la stima di letteratura fornita in [1] di $\Phi_{PDG} = 130 \text{ Hz/m}^2$, nel quale si specifica che esso è però solo un valore approssimativo, e con $\Phi_{prelim} = 122 \pm 7 \text{ Hz/m}^2$, stima da noi fatta durante l'esperienza preliminare.

Il confronto tra i numeri sopra esposti evidenzia un chiaro disaccordo tra le varie misure e in particolare come Φ_{EFF2} sia una misura precisa ma poco accurata e, invece, Φ_{EFF3} sia, allo stesso tempo, poco precisa e poco accurata.

12 Conclusioni

Alla fine di circa un mese di lavoro è stato possibile raggiungere i risultati presentati nel corso di questa relazione. Durante il lavoro è stato sviluppato un sistema integrato di analisi (circa 7800 linee di codice nella versione finale) che permette, dati in ingresso i TTree prodotti dal telescopio, di ottenere tutte le informazioni esposte.

Allo stato attuale è stato sviluppato e applicato un algoritmo di calibrazione che permette, ricostruendo solo le *hit*, di misurare la velocità della luce

nelle *strip* e allineare alla precisione del cm le camere in un tempo macchina inferiore a 0.8 secondi. A seguito, è stato utilizzato un metodo di allineamento che, in circa 10 iterazioni ($\sim 1s$ a iterazione), permette, attraverso la ricostruzione delle tracce e la *pattern recognition*, di allineare spazialmente le camere al decimo di millimetro e temporalmente a qualche decina di ps. Anche la risoluzione dell'apparato è misurata durante la procedura e risulta essere di 1.6 cm, 1.4 cm e 190 ps rispettivamente sulla coordinata x, y e t .

Inoltre sono state sviluppate due procedure per la misura dell'efficienza delle tre camere di cui è composto il telescopio. Una di esse, basata sul *trigger* a 3, permetterebbe la misura *on-line* dell'efficienza ma pecca di bassa statistica e richiede ancora del lavoro prima di essere affidabile ed essere impiegata regolarmente.

L'altra, basata sul *trigger* a 2, ha, come la precedente, la caratteristica di automatismo richiesta ma necessita di *run* dedicati e non permette una misura con i parametri del *run* di presa dati. Questa procedura dà un risultato ragionevole, anche se i risultati ottenuti sono di poco inferiori a quelli presentati dal gruppo precedente che aveva condotto la misura con scintillatori esterni.

Infine, grazie ad una simulazione MC, è stato possibile verificare con buona precisione l'accordo delle distribuzioni angolari misurate dei RC con quelle attese data la letteratura.

Durante il lavoro è stata fatta anche una caratterizzazione sommaria del rumore (procedura non completamente automatica) ed è stato tentato lo sviluppo di un metodo per la misura della purezza del campione di tracce ricostruite.

Conclude un breve elenco di punti che non sono stati affrontati, principalmente per motivi di tempo, e che sono ritenuti di un certo interesse.

- Sarebbe interessante, ed utile allo scopo di migliorare molte delle misure effettuate in questa esperienza, poter condurre uno studio più approfondito del rumore. Per questo scopo sarebbe fondamentale l'utilizzo di un *trigger* pre-scalato con il quale poter acquisire degli eventi a *trigger* su singola camera così da poter analizzare tutta l'informazione di questi eventi.
- Provare ad utilizzare un maggior numero di

camere per risolvere alcuni dei problemi legati al basso numero di gradi di libertà del sistema

- Raffinare l'algoritmo per la misura dell'efficienza con il *trigger* a 3 conducendo uno studio più accurato sulle soglie di selezione
- Approfondire il comportamento della camera quando un RC colpisce nello spazio tra due *strip* così da poter meglio modellizzare il comportamento della camera e la generazione di segnali su strip contigue.
- Scrivere uno *script* che converta in maniera automatica i file binari e di stato in uscita dal

telescopio in file di tipo *.root* che incorpora in se anche i parametri ambientali

- Migliorare il metodo per la stima della purezza estendendolo a tutte le coordinate
- Analizzare il flusso dei RC su lunghi periodi temporali per indagare su possibili variazioni periodiche su brevi e lunghi lassi temporali
- Misurare la vita media dei muoni

Ringraziamo l'esperimento EEE nella persona di E. Bossini per il tempo messoci a disposizione.

A Appendice - Spettro dei Raggi Cosmici

A.1 Problematiche note a priori

Le analisi sullo spettro in energia riportate in seguito sono ricavate a partire dalle distribuzioni in tempo di volo misurate che potrebbero essere arbitrariamente traslate a causa dell'*offset* intrinseco non calibrabile. Conseguentemente le distribuzioni in $\beta \propto \frac{1}{t_{TOF}}$ e in energia sono deformate in maniera non banale.

La scala dell'energia riportata è non accurata ed eventuali discrepanze rispetto alle attese non devono destare preoccupazione.

Inoltre non è stata deconvoluta la risoluzione dell'apparato dalla distribuzione misurata: pertanto, nonostante vengano fatte alcune stime numeriche, l'analisi è qualitativa.

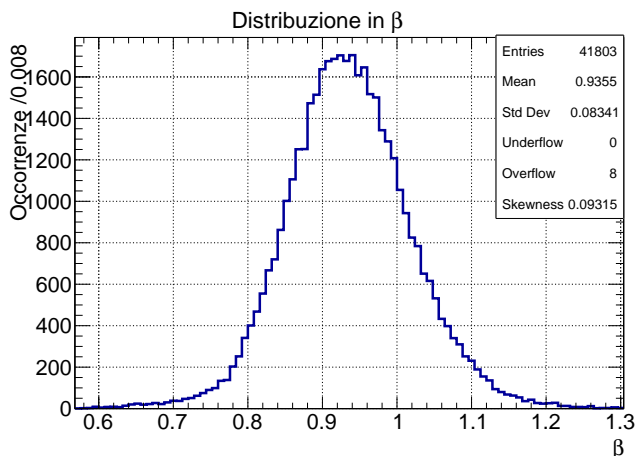


Figura A.1: Spettro in β dei raggi cosmici osservati. Si nota che la distribuzione non è piccata su $\beta = 1$, ma questo è probabilmente imputabile all'*offset* globale presente su t . La larghezza della distribuzione è compatibile con la risoluzione dell'apparato in β (approssimativamente 0.06, assumendo un RC verticale a velocità c), ma la leggera asimmetria che si osserva fa pensare che si riesca a distinguere parzialmente alcuni andamenti della distribuzione fisica delle velocità.

A.2 Analisi qualitativa dello spettro

Dalla letteratura ci si aspetta che i raggi cosmici misurati, fondamentalmente muoni, abbiano uno spettro energetico del tipo:

$$\frac{dN}{dE} = \text{cost.} \quad E < 10\text{GeV} \quad (\text{A.1a})$$

$$\frac{dN}{dE} = E^{-2.7} \quad E > 10\text{GeV}. \quad (\text{A.1b})$$

Dai dati raccolti si osserva lo spettro mostrato in figura A.2. Ad alta energia, qualitativamente l'andamento è quello atteso, nonostante la pendenza del fit sia superiore alle previsioni. Tale discrepanza è riconducibile all'intervallo scelto per il fit: il range è molto ridotto e al di sotto della soglia di 10 GeV. Non è però possibile indagare energie superiori del numero troppo ridotto di dati.

A bassa energia (sotto i 200 MeV) il *rate* non è costante come ci si aspetta ma va rapidamente a 0. Analizzando lo spettro in scala lineare si può facilmente osservare l'andamento gaussiano di tale decrescita. Eseguendo un fit con una gaussiana l'operazione converge ($\chi_{\text{rid}}^2 \simeq 3$) ad una gaussiana con media 201 ± 2 MeV e $\sigma = 25.6 \pm 0.8$ MeV. Tale andamento è interpretabile come una dispersione dovuta alla risoluzione dell'apparato (a partire dalle risoluzioni temporali dell'apparato valutate in fase d'allineamento si ottiene una risoluzione di $\sim 80 \div 100$ MeV). Portando avanti questa ipotesi, e supponendo di isolare quindi tale allargamento dovuto alla risoluzione dell'apparato il *rate* di raggi cosmici osservati ha un *cut-off* a circa 200 MeV. Quest'effetto è imputabile all'assorbimento nei materiali che i raggi cosmici attraversano prima di essere rivelati (l'edificio sovrastante e l'apparato di rivelazione stesso), infatti la distribuzione nelle equazioni A.1 tiene di conto unicamente dell'assorbimento atmosferico (o meglio degli effetti combinati di assorbimento e creazione di sciami) ma non di interazioni con il terreno o altre strutture.

Per valutare correttamente tale *cut-off* sarebbe necessario conoscere con precisione la composizione dell'edificio sovrastante e per effettuare il confronto, a rigore sarebbe necessaria una deconvoluzione della risoluzione dell'apparato dalla distribuzione in energia, in modo da misurare con precisione la minima energia misurata.

Dato che ai fini della misura del flusso di raggi cosmici l'effetto dominante è quello dovuto alla risoluzione dell'apparato, basta effettuare una stima dell'ordine di grandezza del fenomeno di assorbimento per comprendere se l'effetto supposto è corretto.

Considerando per semplicità l'edificio costituito da cemento (4 piani per un totale di $0.8 \simeq 1$ m) con densità $\rho \simeq 2.3$ g/cm³ si ha che l'energia rilasciata

da una particella al *MIP* (il $\beta\gamma$ dei μ osservati è sufficientemente vicino al *mip* per la stima che si vuole fare e con tale approssimazione si fa una sottostima dell'energia persa) è:

$$\Delta E = \int \frac{dE}{dx} dx \simeq \left. \frac{dE}{dx} \right|_{mip} \cdot \Delta x \simeq 393 \text{ MeV},$$

dell'ordine di grandezza previsto. Quindi tutti i μ con $\beta\gamma$ inferiore al *mip* sono arrestati dall'edificio. L'edificio non può invece alterare il flusso a energie superiori, dato che presumibilmente non sono presenti materiali in grado di fermare raggi cosmici a energie dell'ordine del GeV o superiori.

La soglia così individuata non altera sensibilmente il flusso di raggi cosmici misurato, dato che ci si aspetta che l'energia media dei μ sia intorno ai 3 GeV. Dalla distribuzione sperimentale però l'energia media è intorno ai 340 MeV, scala alla quale in *cut-off* diverrebbe non trascurabili ai fini del flusso. Questo fa supporre, come del resto ci si poteva aspettare, una errata valutazione delle scale di energia dato l'*offset* globale sul tempo di volo.

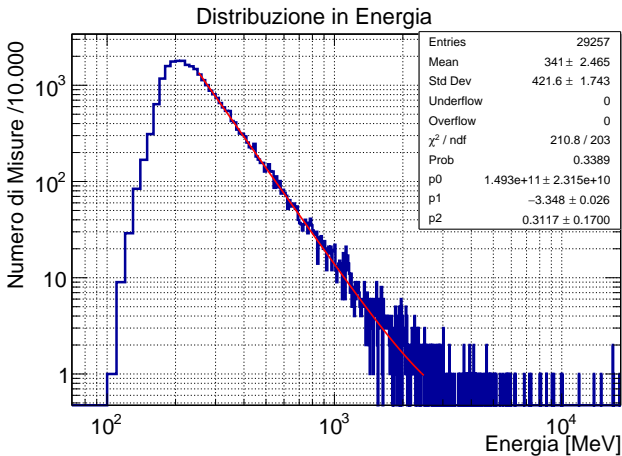


Figura A.2: Spettro in energia dai dati di un singolo run. Il fit è stato eseguito solo nell'intervallo $250 \text{ MeV} < E < 2.5 \text{ GeV}$ con una funzione del tipo $p_0 \cdot E^{p_1} + p_2$ con p_0, p_1, p_2 parametri di fit

Composizione dello Sciame - Un altro fattore, del tutto trascurato fino ad ora, è la composizione degli sciame osservati. Si sono sempre trattati esclusivamente muoni, quando nello sciame è presente anche una componente adronica (p, n) e elettronica³. Gli elettroni però sono immediatamente arrestati da un qualsiasi assorbitore solido (i primi strati di soffito, in questo caso), mentre i p hanno un'altra probabilità di interagire forte e generare π , che decade in μ prima di una possibile rivelazione. In conclusione quindi la composizione dello sciame è trascurabile ai fini della determinazione del flusso.

Distribuzione Angolare - La dipendenza angolare prevista ($\frac{dN}{d\theta} \propto \cos^3 \theta \sin \theta$) tiene conto dell'assorbimento atmosferico pesato sullo spettro previsto. L'assorbimento nell'edificio a priori potrebbe alterare tale distribuzione dato che lo spessore solido attraversato sarà dipendente dall'angolo di incidenza.

Come sopra detto però i raggi cosmici all'energia media prevista non riescono ad essere fermati dai materiali comunemente presenti (a meno di situazioni improbabili come blocchi di piombo di alcune decine di centimetri, campi magnetici molto intensi in prossimità dell'apparato di rivelazione...), mentre quelli a bassa energia sono una componente minoritaria del flusso totale.

³più ovviamente la componente neutra non rivelabile (n, γ) e le particelle con un τ troppo ridotto per essere misurato (π, K).

Riferimenti bibliografici

- [1] K. A. Olive *et al.* [Particle Data Group Collaboration], *Chin. Phys. C* **38** (2014) 090001.
doi:10.1088/1674-1137/38/9/090001