



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Costruzione e test di un rivelatore a muoni basato su tubi
a deriva per misure in ambienti radioattivi

Relatore

Prof. Marco Zanetti

Correlatore

Dott. Paolo Checchia

Laureando

Andrea Paccagnella

Anno Accademico 2017/2018

Abstract

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono la costruzione e la successiva caratterizzazione di un rivelatore di muoni, con l'idea che esso possa essere un modello-guida di un prototipo per la tomografia muonica. Questo rivelatore, costruito basandosi sulla tecnologia a "tubi a deriva", deve essere in grado di rilevare la traccia lasciata da ogni muone che lo attraversa anche in ambienti radioattivi come quelli che si trovano in prossimità dei contenitori di combustibile nucleare esausto. La prospettiva finale di questa attività sarà, infatti, la realizzazione di un insieme di rivelatori di muoni dedicati al controllo di tali contenitori per escludere la sottrazione di elementi di combustibile.

Nello specifico, la tesi si propone di descrivere il processo di costruzione e la caratterizzazione del rivelatore e di presentare, inoltre, i risultati del test condotto nella centrale nucleare EnKK di Neckarwestheim in Germania.

Indice

1 Introduzione	1
1.1 Raggi cosmici	2
1.2 Processi fisici utilizzati nella tomografia muonica	3
1.3 Ispezione di contenitori di combustibile nucleare esausto	4
1.4 Problemi legati alla radioattività emessa dal contenitore	6
2 Descrizione del rivelatore	7
2.1 Tubi a deriva	7
2.2 Camera64	8
2.2.1 Costruzione	9
2.2.2 Ponticellato	10
2.2.3 Configurazione per testare lo strumento	11
2.2.4 Velocità di deriva	12
3 Presentazione e analisi dei dati raccolti	13
3.1 Rumore iniziale	13
3.2 Ricostruzione tracce	15
3.3 Correlazione con le camere di CMS	18
3.4 Efficienza	23
3.5 Comportamento in presenza di contenitori di stoccaggio a secco	25
Conclusioni	27
Bibliografia	29

1 Introduzione

La tomografia muonica è una tecnica che utilizza i muoni dei raggi cosmici per ricostruire immagini tridimensionali grazie allo scattering dovuto all'attraversamento delle particelle all'interno di un materiale. Il vantaggio di questa tecnica è che, a differenza dei raggi X, i muoni sono molto più penetranti, quindi è possibile utilizzarla per la ricostruzione di materiali molto densi. Il flusso di muoni al livello del mare è di circa 10000 muoni al minuto al metro quadro. Questa tecnologia, nata nel 2003, presenta svariati vantaggi tra cui, in particolare, l'assenza di acceleratori per produrre le particelle utilizzate per la radiografia; questo consente anche di ricostruire immagini di aree molto grandi utilizzando solamente i muoni cosmici. Questa tecnica è stata sviluppata, originariamente, con lo scopo di rilevare materiale nucleare in veicoli e container per controlli di sicurezza. In questa tesi viene preso in considerazione l'utilizzo della tomografia muonica per ispezionare i contenitori di stoccaggio di combustibile nucleare esausto.

1.1 Raggi cosmici

I raggi cosmici al livello del mare sono principalmente muoni i quali derivano dal decadimento di altre particelle, prodotte nell'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera terrestre (figura 1.1). I raggi cosmici primari, principalmente protoni e particelle alpha, hanno origine da processi galattici

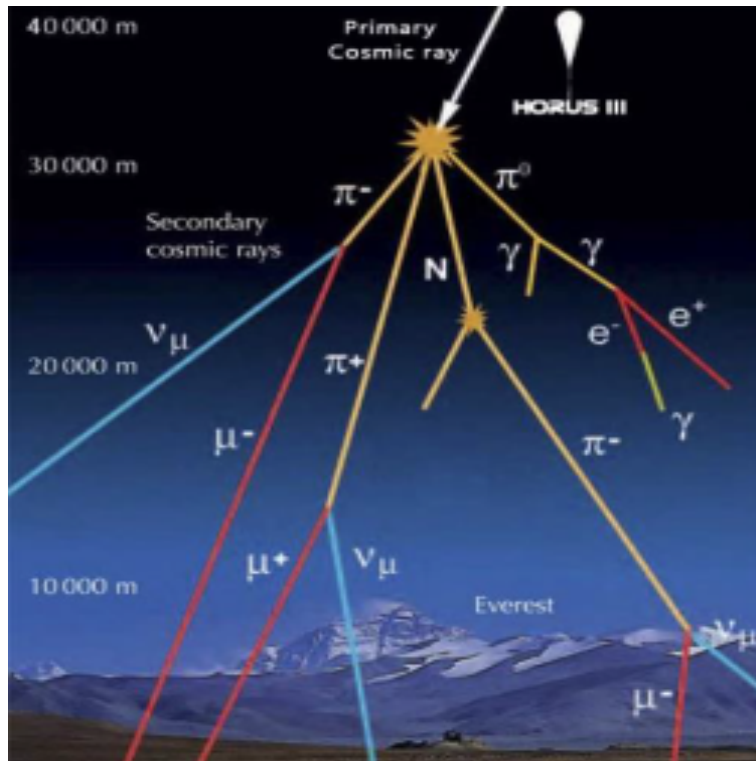


Figura 1.1: Sciame cosmico

quindi il loro flusso sulla terra è costante. Al livello del mare il flusso di muoni è di circa $10^4 \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, con una intensità massima nella direzione verticale e una dipendenza proporzionale a $\cos\theta^2$ dove θ è l'angolo azimutale. Lo spettro di energia dei muoni, al livello del mare, è abbastanza ampio come mostrato in figura 1.2.

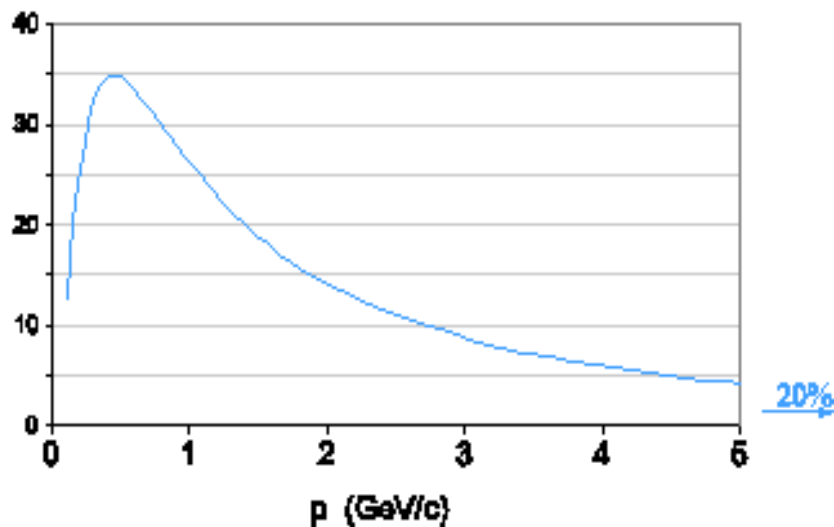


Figura 1.2: Spettro dei muoni al livello del mare

1.2 Processi fisici utilizzati nella tomografia muonica

Grazie ai processi fisici che si verificano quando una particella carica, come un muone dei raggi cosmici, attraversa un materiale denso, è possibile ricostruirne il contenuto. In primo luogo una frazione di muoni viene fermata all'interno del materiale. Infatti, attraversando un materiale, le particelle cariche perdono energia per ionizzazione, come descritto dalla formula di Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (1.1)$$

dove Z è il numero atomico, A è la massa atomica, ρ è la densità e I è il potenziale di ionizzazione medio del materiale. Un'altra causa della perdita di energia dei muoni, quando attraversano un materiale, è la radiazione di frenamento. Questa però non verrà considerata in quanto è predominante per muoni molto energetici (superiori ai 200 GeV). Di seguito (figura 1.3) si riporta un esempio della perdita di energia dei muoni in un materiale a varie energie.

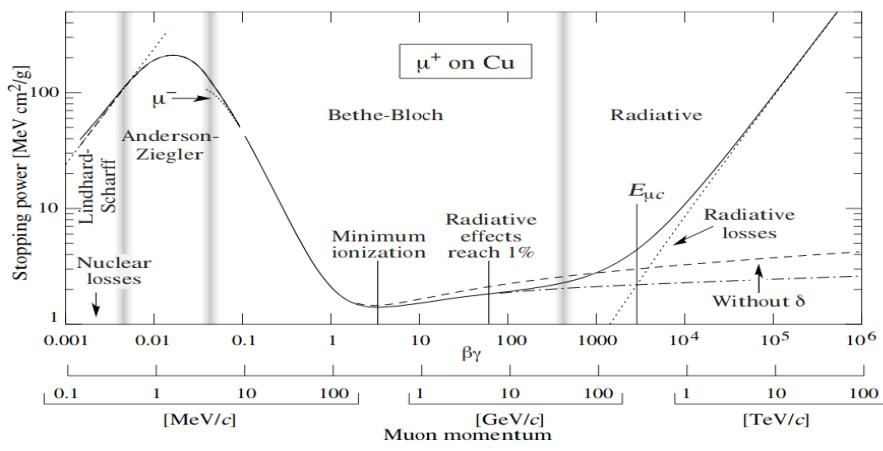


Figura 1.3: Esempio perdita di energia dei muoni

Approssimativamente questo processo dipende dalla densità del materiale attraversato.

Un altro processo fisico, che si può utilizzare, è la deviazione della traiettoria del muone per effetto dello scattering multiplo (figura 1.4). Questo fenomeno fisico, consiste in una deviazione della traiettoria per collisione elastica con il nucleo del materiale.

Quando lo spessore x del materiale attraversato da una particella, di carica z , velocità βc e impulso p , è significativo, il numero di interazioni diventa elevato e la deviazione angolare può essere ricondotta ad una distribuzione gaussiana la cui larghezza è data da:

$$\vartheta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \quad (1.2)$$

dove X_0 è la lunghezza di radiazione data da

$$X_0 = \frac{A}{4r_e^2 \alpha N_A Z^2 \rho \ln(183Z^{-1/3})}. \quad (1.3)$$

Essenzialmente la lunghezza di radiazione è inversamente proporzionale al prodotto della densità per il numero atomico Z del materiale attraversato. Pertanto, tanto più questo è denso e costituito da atomi ad alto Z , tanto più la traiettoria del muone sarà deviata.

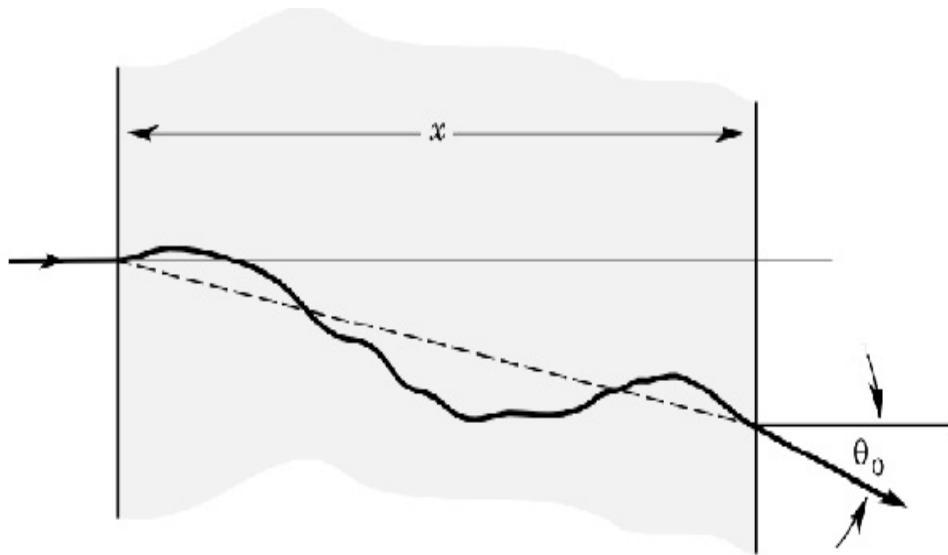


Figura 1.4: Scattering multiplo

1.3 Ispezione di contenitori di combustibile nucleare esausto

L'Unione Europea sottolinea l'importanza degli standard di sicurezza per la gestione dei rifiuti nucleari. Uno dei principali obiettivi che si pone è quello di accertare che nessun materiale nucleare sia stato dirottato dalla sua destinazione d'uso. Da qui nasce la necessità di conoscere la presenza di carburante esausto all'interno dei contenitori di stoccaggio a secco, sia durante il trasporto sia durante la loro permanenza nei depositi. La presenza di materiale nucleare all'interno di un contenitore CASTOR[®] standard (figura 1.3), varia dalle 10 alle 15 quantità significative (1QS = 8Kg di Pu). Ciò implica l'obbligo per gli ispettori nucleari di avere un alto grado di garanzia sulla quantità di materiali nucleari immagazzinati all'interno dei contenitori. La riapertura del CASTOR per il suo monitoraggio richiede diverse procedure di sicurezza che potrebbero non essere fattibili in caso di contenimento a lungo termine. Un CASTOR[®] (figura 1.5) può essere alto circa 4 m e largo 2.5 m, con un peso di circa 95 t a vuoto e 105 t pieno, ma ce ne sono anche di più alti e pesanti. Esternamente si trova un rivestimento di metallo che ricopre un secondo rivestimento di cemento largo circa 0.4 m. All'interno di questo rivestimento si trova la scatola metallica, la quale a sua volta, contiene le barre dove è depositato il carburante esausto.

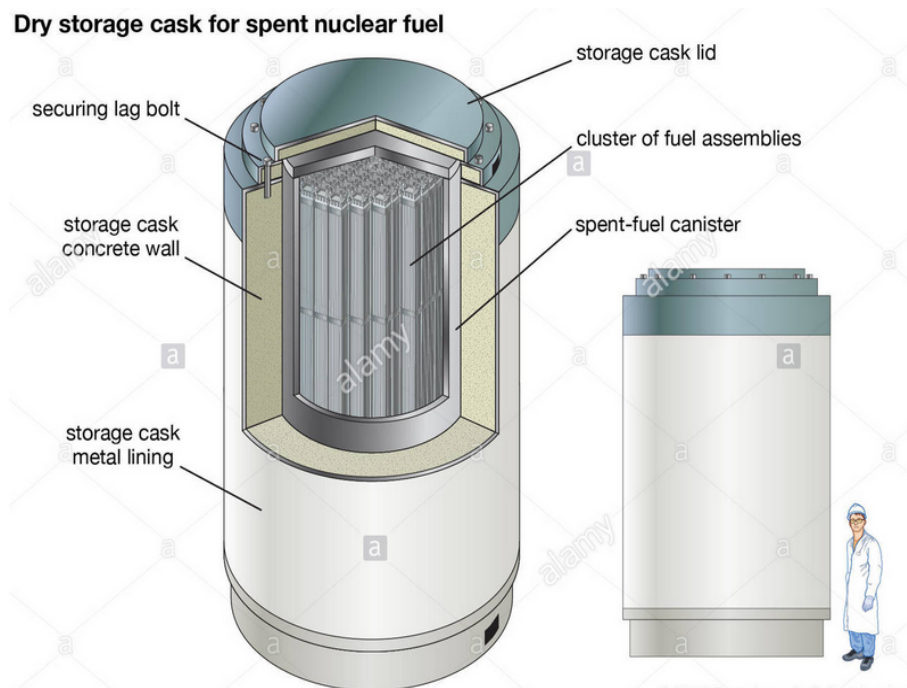


Figura 1.5: Composizione di un CASTOR®.

Viene mostrato in figura 1.6 la composizione di ogni barra, dove vengono depositati i pellet di combustibile esausto.

Sfruttando i fenomeni fisici descritti sopra e circondando il contenitore con dei rivelatori di muoni, è possibile ricostruire l'immagine tridimensionale del materiale ispezionato. Posizionando i rivelatori sulla superficie laterale del contenitore, si possono misurare la posizione e la direzione del muone entrante ed uscente. Con questa configurazione è possibile sapere la quantità di muoni che viene assorbita dal materiale e l'angolo di scattering con cui i muoni escono. La prima informazione è collegata alla densità del materiale presente nel contenitore: l'abbondanza di particelle passanti corrisponde ad una regione poco densa (ad esempio aria) mentre le particelle assorbite si trovano in presenza di regioni più dense. In presenza di un oggetto non omogeneo da ispezionare, ad esempio un contenitore dove manca una barra di combustibile, con questo metodo è possibile sapere quali regioni siano vuote e quali piene. Lo scattering multiplo consente invece di avere una ricostruzione in due o tre dimensioni del materiale osservato.

Cross section of cask CASTOR V/21 A

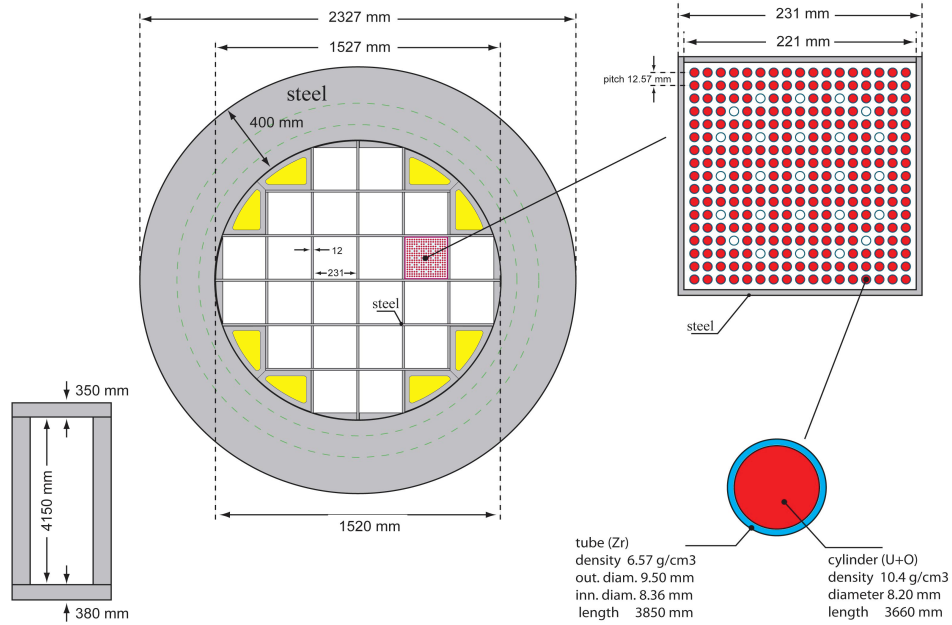


Figura 1.6: Struttura interna delle barre di un CASTOR[®]. I cerchi rossi è dove viene depositato il pellet di combustibile esausto.

1.4 Problemi legati alla radioattività emessa dal contenitore

La radioattività delle barre di combustibile è fortemente schermata dalle pareti, appositamente costruite, del contenitore. Ciononostante, all'esterno si possono osservare attività dell'ordine delle decine di $\mu Sv/h$ di tipo γ e neutroni. Considerando che il flusso dei raggi cosmici corrisponde a circa $0.1 \mu Sv/h$, si potrebbe ipotizzare che le interazioni dei fotoni e dei neutroni possano produrre un numero di segnali casuali tale da disturbare la ricostruzione della traiettoria dei muoni.

Scopo del lavoro connesso a questa tesi, è la dimostrazione che è possibile ricostruire le tracce dei muoni con un rivelatore basato su tubi a deriva anche in presenza della radioattività emessa da un CASTOR[®].

2 Descrizione del rivelatore

In base a quanto detto, si è pensato di realizzare un rivelatore di muoni a tubi cilindrici, quasi portatile, leggero e facilmente trasportabile, per poter verificare che, anche in vicinanza di un CASTOR[®], è possibile ricostruire la traccia dei muoni.

2.1 Tubi a deriva

Un rivelatore del tipo denominato "tubo a deriva" è composto come nello schema (figura 2.1).

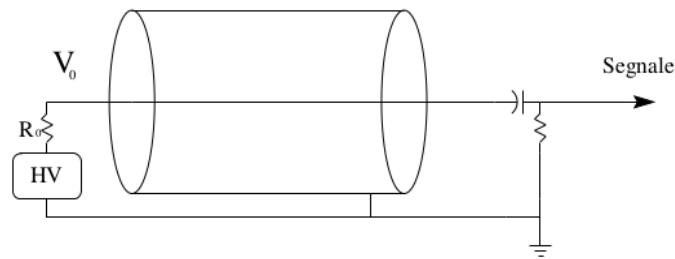


Figura 2.1: tubo a deriva

Si tratta di un tubo cilindrico di alluminio riempito con una certa miscela di gas, con un filo anodico coassiale posto ad un certo potenziale positivo e l'alluminio che funge da catodo posto a massa. In questa configurazione è presente un campo elettrico E che diminuisce come $1/r$ al crescere della distanza dal filo. Quando una particella carica attraversa il gas, lo ionizza generando coppie ione-elettrone. Sotto l'azione del campo elettrico, gli ioni si spostano verso il catodo mentre gli elettroni verso il filo anodico. Questi, a loro volta, quando sono in prossimità del filo, grazie all'elevato campo elettrico, raggiungono un'energia tale da ionizzare gli atomi vicini. Questo fenomeno è detto "effetto valanga". Una volta arrivati sul filo gli elettroni rilasciano un segnale in carica ne , dove n è la somma degli elettroni che si formano durante la valanga. Tale segnale, attraverso un pre amplificatore di carica, viene poi convertito in un segnale in tensione $V = ne/C$.

2.2 Camera64

Per rispondere alle esigenze richieste, si è costruito un rivelatore a tubi cilindrici composto da 8 piani di tubi, di seguito chiamati "layer", ognuno dei quali composto da 8 canali per un totale di 64 canali e pertanto denominata camera64 (figura 2.2). La posizione di ogni layer è sfalsata di un passo corrispondente a metà del diametro di un tubo. I tubi stessi sono incollati assieme per formare un unico blocco e ottenere uno strumento il più possibile compatto.



Figura 2.2: Camera 64

Ogni tubo ha un diametro di 50 mm con uno spessore di 1.5 mm ed è lungo 2 m. Al suo interno, in posizione centrale, è posizionato un filo anodico, in rame berillio, di diametro 100 μm , fissato agli estremi del tubo con una tensione meccanica di 6000 N e posto ad un potenziale di 3000V, scelti dopo aver determinato la curva di efficienza con uno scan in tensione. Si produce quindi un campo elettrico radiale rispetto alla posizione del filo con un andamento $E \propto 1/r$.

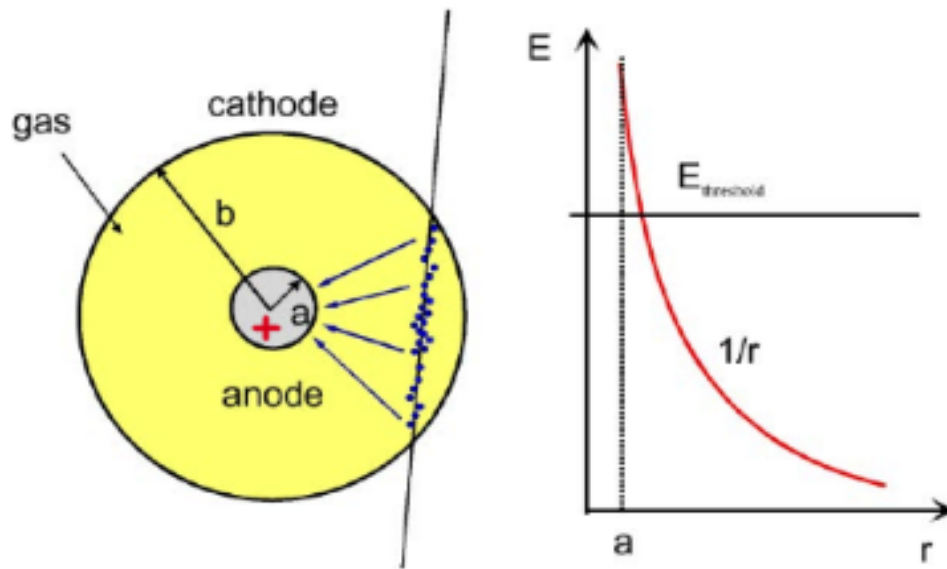


Figura 2.3: Andamento campo elettrico all'interno della camera, dove a è il raggio del filo e come avviene la ionizzazione

Il rivelatore lavora in modalità proporzionale, ovvero: l'amplificazione è modesta e la carica raccolta è

proporzionale alla carica iniziale. Si è scelta una miscela di gas $AR/CO_2 = 85\%/15\%$, la quale fluisce all'interno dei tubi con un flusso di 100 ml/min . La massa totale dello strumento è di circa 100 kg . Questa configurazione consente un numero minimo di canali per misurare correttamente la traccia dei muoni ed è sufficientemente leggera per esser trasportata.

2.2.1 Costruzione

La costruzione del rivelatore è avvenuta ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), ad opera del gruppo INFN di Padova, dedito a studi di tomografia muonica, che disponeva già di un numero di tubi funzionanti. Per completare il prototipo è stato sufficientemente incollare assieme tutti i tubi in un unico blocco, equipaggiarli con il sistema di alta tensione e completare il sistema di distribuzione del gas che conette i tubi in serie. Il sistema di lettura, situato dalla parte opposta a quello dell'alta tensione è costituito da: un pre-amplificatore in carica a basso rumore, uno shaper, un comparatore di soglia regolabile (tutto questo contenuto in un modulo "MAD"), un time to digital converter (TDC) ottenuto tramite un sistema integrato Field-Programmable Gate Array (FPGA) installato nel rivelatore e un sistema di lettura che trasmette i dati a un computer online.

Sono state aggiunte lateralmente alla camera due sbarre per lato in modo da avere un sistema rigido che permetta di mantenerla in posizione verticale e in generale per poterla muovere. Questa posizione è analoga a quella che avrebbe un rivelatore completo attorno ad un CASTOR[®] (figura 2.4).



Figura 2.4: Sistema di barre laterali per posizionare la camera verticalmente

2.2.2 Ponticellato

Di seguito (figura 2.5) viene mostrato il sistema di coordinate tridimensionali con cui è orientata la camera. L'origine dell'asse x è posto all'estremità del canale più a sinistra con direzione positiva verso

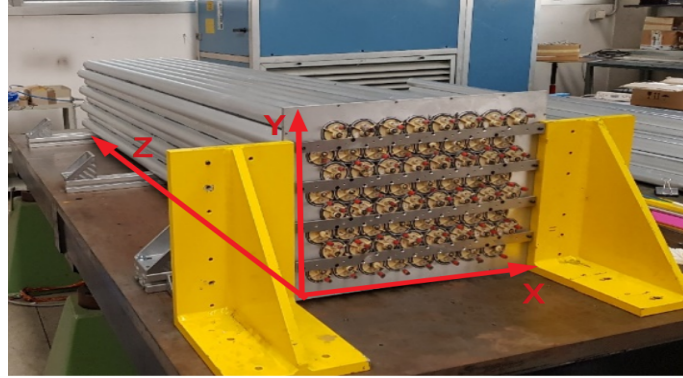


Figura 2.5: Sistema di coordinate della camera

gli altri canali, l'asse y si trova in posizione perpendicolare verso l'alto con direzione positiva dal layer 1 al layer 8 mentre l'asse z è perpendicolare al piano xy con direzione positiva dal sistema di lettura all'elettronica di alta tensione. L'angolo azimutale si estende nel piano yx con origine nell'asse positivo delle y.

Questa configurazione, con un solo rivelatore, consentirebbe di avere una visione della traccia del muone solo nel piano xy, non avendo alcuna informazione sull'asse z e rendendo quindi impossibile una ricostruzione tridimensionale della traccia e quindi di un eventuale oggetto ispezionato. Per ovviare a questo problema si è pensato di unire a due a due il sistema di alta tensione dei canali che si trovano nei layer più esterni (uno, due, sette, otto).

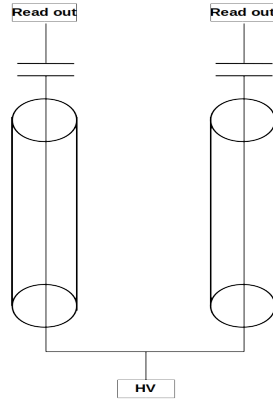


Figura 2.6: Sistema ponticellato

Questo consente di avere una misura anche sull'asse z in quanto, quando un muone colpisce uno dei due tubi, entrambi manderanno un segnale al sistema di lettura. Quello che effettivamente è stato colpito invierà un segnale in un tempo minore rispetto all'altro, a causa del tempo di transito del segnale nel filo. Utilizzando la relazione

$$z = \Delta t * v_{segn} \quad (2.4)$$

dove $\Delta t \equiv (t_1 - t_2)$ è la differenza tra il tempo t_1 e il tempo t_2 registrati, rispettivamente, dai due tubi ponticellati e v_{segn} la velocità di propagazione del segnale, possiamo sapere in che posizione lungo l'asse z è passata la particella. Combinando questa informazione per ognuno dei due layer inferiori e superiori siamo in grado di ricostruire in maniera tridimensionale il passaggio del muone.

2.2.3 Configurazione per testare lo strumento

Per caratterizzare il rivelatore, quest'ultimo è stato posto nel dimostratore di tomografia muonica presente a LNL (figura 2.7). Il dimostratore è costituito da due camere a deriva utilizzate nell'esperimento CMS, le quali hanno una precisione in φ di 2 mrad . Questa configurazione permette a ogni camera di fornire una precisa ricostruzione del passaggio dei muoni fornendo anche un sistema di trigger per la camera64.

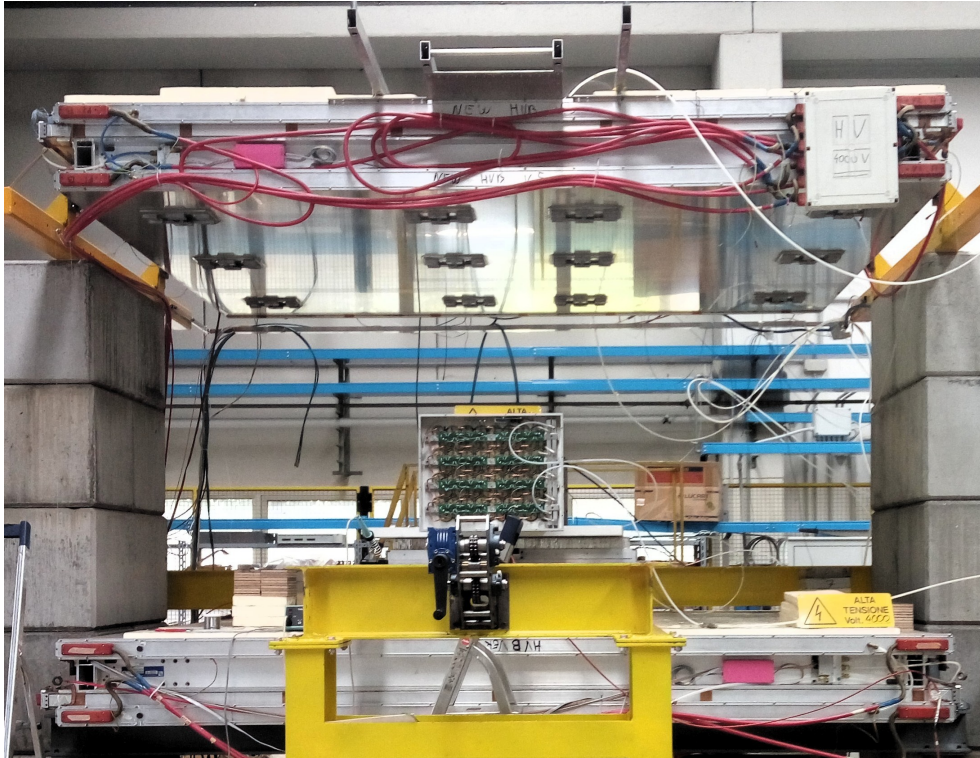


Figura 2.7: configurazione iniziale per la caratterizzazione della camera64

2.2.4 Velocità di deriva

Grazie alle due camere di CMS è stato possibile ricavare la velocità di deriva all'interno dei tubi della camera64, necessaria per la ricostruzione delle tracce una volta che la camera dovrà ricostruire le tracce in modo autonomo. Si è partito da un grafico che mettesse in relazione la distanza a cui è passata la traccia dal filo con il suo tempo di deriva misurato (figura 2.8)

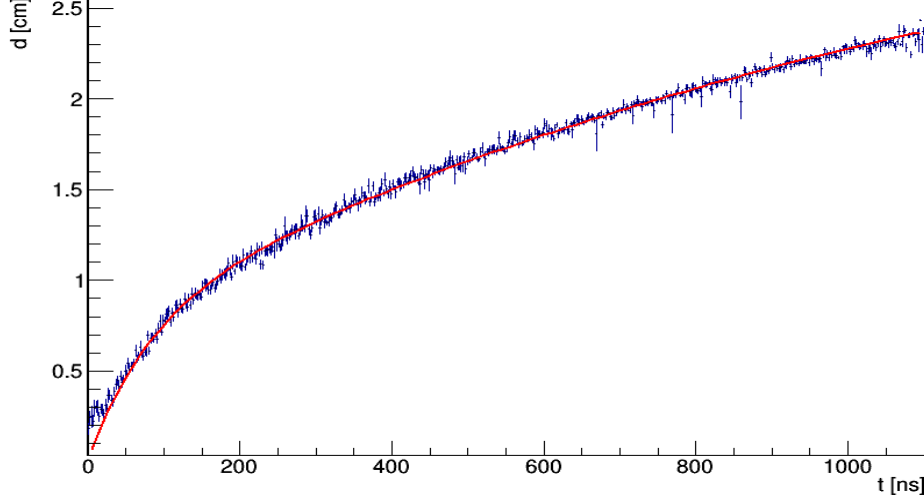


Figura 2.8: Relazione spazio tempo con fit di interpolazione

dove in blu troviamo i dati misurati mentre in rosso il fit con cui sono stati interpolati:

$$d(t) = p_0 + p_1(1 - e^{-\frac{t}{p_2}} + p_3t + p_4t^2) \quad (2.5)$$

dove $p_0 = (0.005 \pm 0.001)cm$, $p_1 = (0.797 \pm 0.009)cm$, $p_2 = (82 \pm 1)ns$, $p_3 = (2.44 \pm 0.06)10^{-3}(ns)^{-1}$, $p_4 = (-5.95 \pm 0.28)10^{-7}(ns)^{-2}$ sono i parametri del fit. Grazie a questa relazione ora possiamo trovare l'andamento della velocità di deriva derivando in funzione del tempo la relazione $d(t)$, trovando

$$v(t) = p_1(\frac{1}{p_2}e^{-\frac{t}{p_2}} + p_3 + 2p_4t). \quad (2.6)$$

Di seguito (figura 2.9) si mostra in grafico l'andamento della velocità, dove

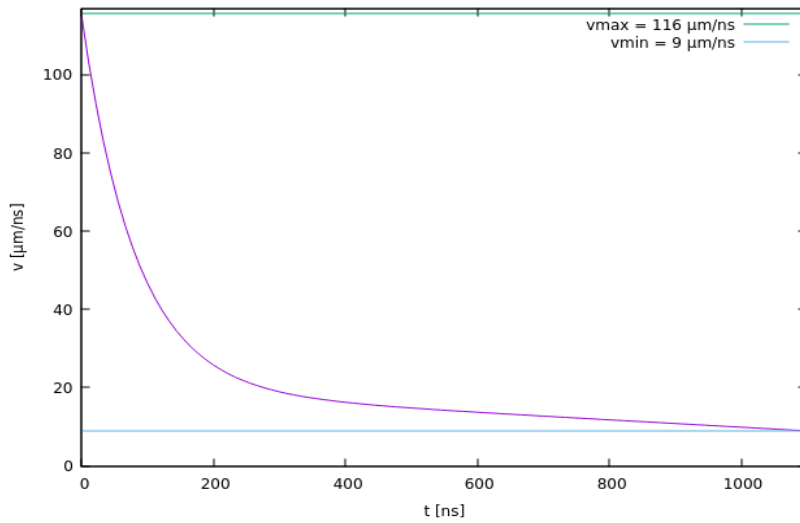


Figura 2.9: Andamento della velocità di deriva in funzione del tempo

si vede che quest'ultima diminuisce al crescere del tempo di deriva e quindi è minore a distanze maggiori dal filo. Questo era atteso in quanto, come si è detto, il campo elettrico E va come $1/r$ e la velocità di deriva, per questa miscela di gas, tende a decrescere per valori decrescenti del campo.

3 Presentazione e analisi dei dati raccolti

3.1 Rumore iniziale

Durante la fase iniziale di test del rivelatore sono sorti alcuni problemi di rumore e questo faceva sì che la camera inviasse un segnale al sistema di acquisizione anche senza il passaggio effettivo del muone. Di seguito (tabella 3.1) viene mostrata una delle prime acquisizioni

	canale1	canale2	canale3	canale4	canale5	canale6	canale7	canale8
layer8	0	0	0	0	0	0	0	0
layer7	0	0	0.893	0	0	0	0	0
layer6	0	0	0	0	0	0	0	0
layer5	0	0	0.652	0	0	0	0	0
layer4	0	0	0	0	0.001	0	0	0
layer3	0	0	0	0	0	0	0	0
layer2	0	0.076	0	0.003	0	0.002	0	0
layer1	0	0	0.001	0	0	0	0.001	0

Tabella 3.1: Rumore per ogni canale in mHz . Una delle prime raccolte dati con eventi molto rumorosi.

ottenuta facendo il rapporto tra gli eventi che hanno dato un segnale anche quando il muone non è passato e gli eventi totali; la frequenza che è stata riportata è in mHz . Questo rumore iniziale era dovuto ad impurità presenti all'interno dei tubi, le quali sono parzialmente scomparse facendo fluire in maniera continua per alcuni giorni la miscela di gas all'interno della camera64. Dalla seguente tabella (tabella 3.2) si vede che i valori sono migliorati e il rumore si è abbassato.

	canale1	canale2	canale3	canale4	canale5	canale6	canale7	canale8
layer8	0	0	0	0	0	0	0.003	0
layer7	0	0.006	0	0	0	0.002	0	0
layer6	0	0.005	0	0	0	0.012	0	0.011
layer5	0.039	0	0	0.002	0	0	0	0.029
layer4	0	0	0	0	0	0	0	0
layer3	0	0	0.025	0	0	0	0.003	0.002
layer2	0	0	0	0	0.003	0	0	0
layer1	0	0	0.002	0.002	0	0.002	0	0.002

Tabella 3.2: Rumore per ogni canale in mHz . Configurazione non ponticellata.

Anche nel caso del sistema ponticellato (figura 3.3) si può vedere che il rivelatore è solo poco più rumoroso rispetto alla configurazione singola.

	canale1	canale2	canale3	canale4	canale5	canale6	canale7	canale8
layer8	0	0	0	0	0	0	0.002	0
layer7	0	0.003	0	0	0	0.002	0.002	0
layer6	0	0	0.002	0	0	0	0.030	0
layer5	0.042	0.041	0.002	0	0.003	0.008	0.041	0.008
layer4	0.004	0	0	0.002	0	0.004	0	0
layer3	0.044	0.010	0.025	0	0	0.005	0.002	0.002
layer2	0	0	0	0	0	0	0.002	0
layer1	0.002	0	0.002	0.003	0.002	0.001	0	0

Tabella 3.3: Rumore per ogni canale in mHz . Configurazione ponticellata.

Una volta risolto il problema del rumore si è proceduto con l'analisi dati completa.

3.2 Ricostruzione tracce

L'intero processo di ricostruzione consiste in quattro passaggi: l'individuazione dei tubi che hanno dato un segnale, la selezione dei tubi in cui è passata la traccia, l'inizializzazione dei parametri del fit, il fit della traccia utilizzando la posizione dei segnali ricavati dal tempo di deriva.

Inizialmente sono considerati tutti i tubi che hanno dato un segnale e per ognuno di questi viene considerato solo il tempo di deriva minore, che corrisponde al tempo di deriva degli elettroni prodotti alla distanza minima dal filo. L'evento viene scartato se il numero di tubi è inferiore di un numero minimo N_{min} .

Il secondo passaggio è quello di selezionare i segnali prodotti in canali dove è passato il muone. Viene eseguito un fit lineare ai minimi quadrati della posizione dei fili dei tubi colpiti e vengono scartati i tubi con un residuo maggiore di $3cm$. Il metodo viene iterato finchè tutti i residui sono entro la soglia decisa.

Per ogni tubo il tempo di deriva (t_d) è misurato sommando il tempo di deriva delle cariche dentro la cella (t_h), il tempo di passaggio del muone (t_m) e il ritardo del segnale elettrico (t_e). Mentre quest'ultimo ritardo può essere calcolato, ed è circa lo stesso per tutti i tubi, il tempo di passaggio del muone è sconosciuto e quindi assunto come parametro del fit. A questo punto il tempo t_e può essere sottratto a t_d per ogni tubo e il più piccolo valore di $t_d - t_e$ ottenuto è usato come prima approssimazione di $t_m = (t_d - t_e)_{min}$ e viene ulteriormente sottratto per ottenere una valutazione grossolana del tempo di deriva di ogni tubo: $t_h^{app} = t_d - t_m$. In questo modo il tempo di deriva è utilizzato per calcolare la distanza della traccia dal filo ($d(t_h^{app})$) tramite l'eq. (2.5). Il fit trova le migliori tangenti alle circonferenze centrate nel filo e di raggio $d(t_h^{app})$. Inizialmente per ogni traccia vengono considerati solo il tubo superiore e quello inferiore della camera64 e si calcolano le quattro tangenti a queste circonferenze. Viene scelta la tangente che minimizza la distanza da tutte le circonferenze di raggio $d(t_h^{app})$ della traccia. Questa fornisce i parametri iniziali del fit. Alla fine, il fit fornisce: il tempo di passaggio del muone (t_0) assieme alla pendenza (m) e l'intercetta (q) della traccia. Il fit minimizza iterando il χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{h=1}^{N_{min}} \frac{[|\Delta_h| - d(t_h^{app}, t_0)]^2}{\sigma_h^2} \quad (3.7)$$

dove σ_h è la stima dell'errore del singolo tubo sulla distanza che include sia il contributo della misura sia quello dello scattering multiplo. Nella formula viene specificata la dipendenza di d da t_0 mentre Δ_h dipende da m e da q . Di seguito viene mostrato un esempio di fit (tipo I, figura 3.1) all'interno della camera64

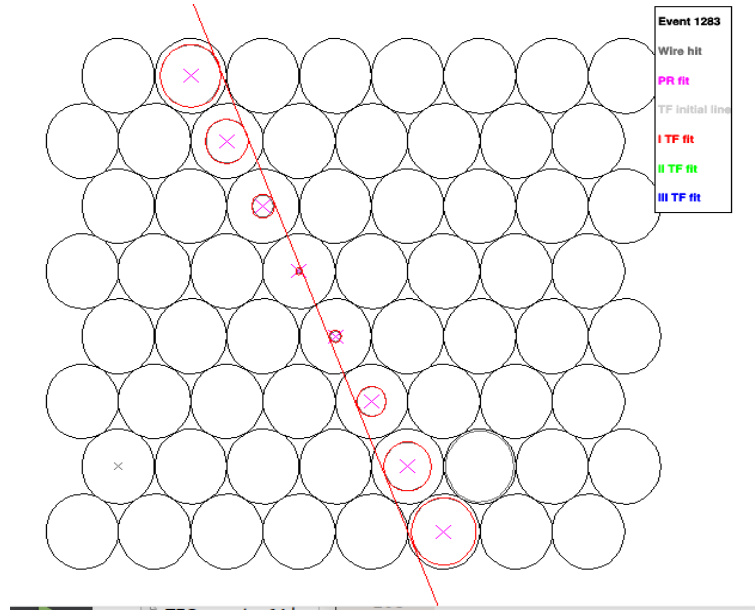


Figura 3.1: Un esempio di fit della traccia con vista x,y, fit tipo I

dove a sinistra si può vedere, tramite una x grigia, un tubo che ha dato un segnale ma che successivamente non è stato selezionato per fare la ricostruzione della traccia. I tubi con la x rosa sono quelli che sono stati selezionati per la ricostruzione della traccia, i cerchi rossi sono quelli di raggio $d(t_h^{app}, t_0)$ ed infine la traccia rossa, tangente a tutti i cerchi, è quella che minimizza il χ^2 . Vengono mostrati altri due esempi di fit (tipo II, figura 3.2):

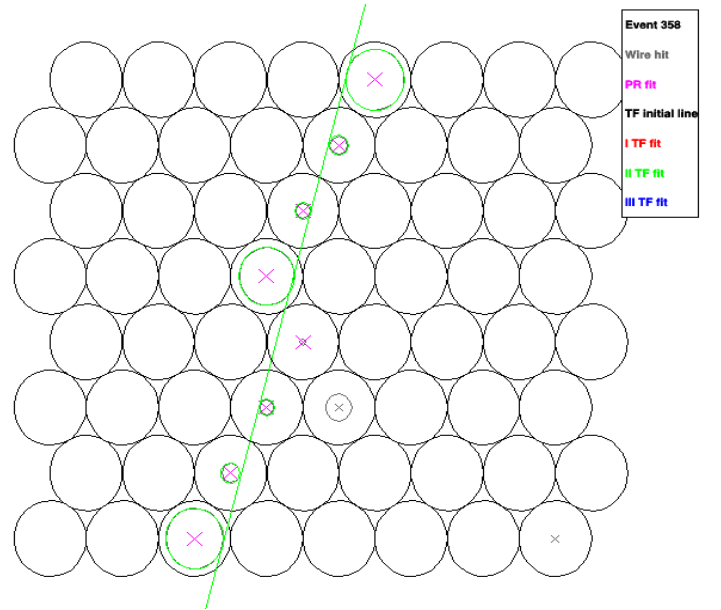


Figura 3.2: Un esempio di fit della traccia con vista x,y, fit tipo II

dove durante l'iterazione è stato escluso un tubo anche se era stato inizialmente selezionato per la ricostruzione della traccia. Un altro esempio di fit (tipo III, figura 3.3) è quando vengono esclusi due tubi.

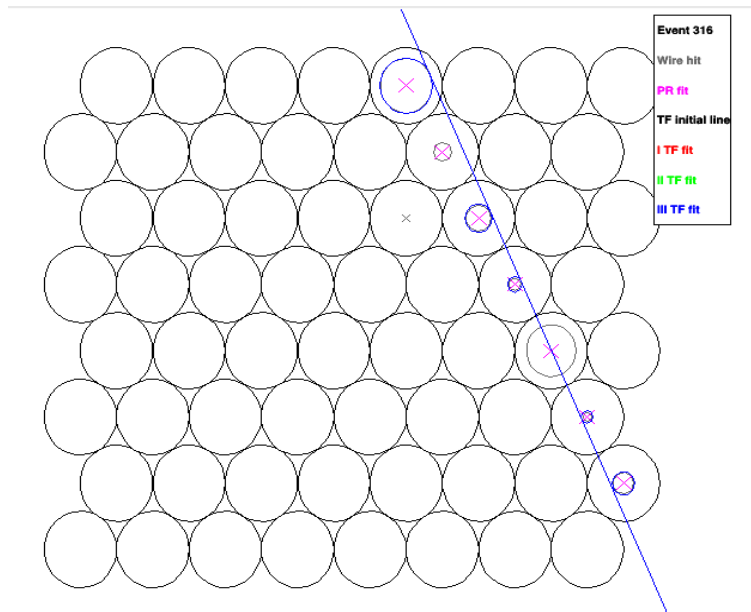


Figura 3.3: Un esempio di fit della traccia con vista x,y, fit tipo III

Per la ricostruzione sono stati impostati come parametri: $N_{min} = 5$ e numero di iterazioni massime del fit=5. Si mostra infine un esempio di fit in configurazione quando la camera è ponticellata

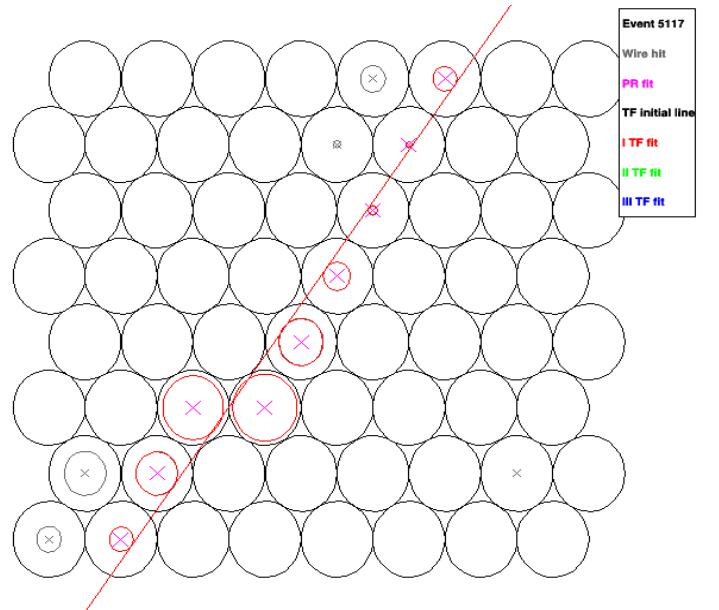


Figura 3.4: Un esempio di fit della traccia con vista x,y, con la camera in configurazione ponticellata, fit tipo I

dove si può vedere che i due tubi in alto e in basso hanno mandato entrambi inizialmente un segnale. Successivamente durante la fase di selezione della traccia sono stati scartati quelli dove non è passato il muone.

3.3 Correlazione con le camere di CMS

Per studiare la risoluzione angolare del rivelatore, vengono messe a confronto le tracce ricostruite da CMS e passanti per la camera64 con quelle ricostruite dalla camera64 (figura 3.5).

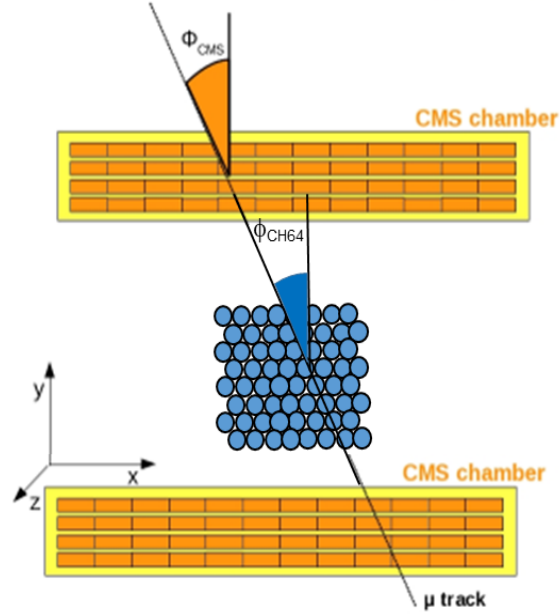


Figura 3.5: Vista schematica (non in scala) della configurazione usata per studiare la risoluzione

L'angolo Φ_{CMS} è stato calcolato facendo l'arcotangente della differenza tra la posizione in x della traccia, della camera di CMS inferiore e quella superiore divisa per la loro distanza ($\Phi = \arctan(\Delta X/Y)$). In figura 3.6 vengono mostrate le distribuzioni sovrapposte degli angoli Φ_{CMS} e Φ_{CH64} .

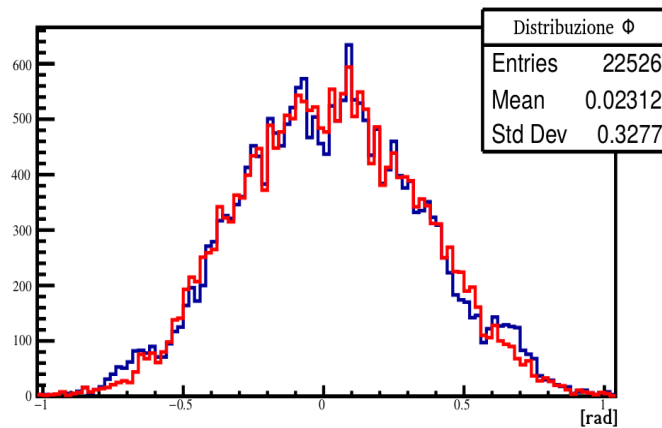


Figura 3.6: Distribuzione in radianti degli angoli di CMS(blu) e della camera64(rosso)

Mettendo poi in relazione queste due distribuzioni (figura 3.7)

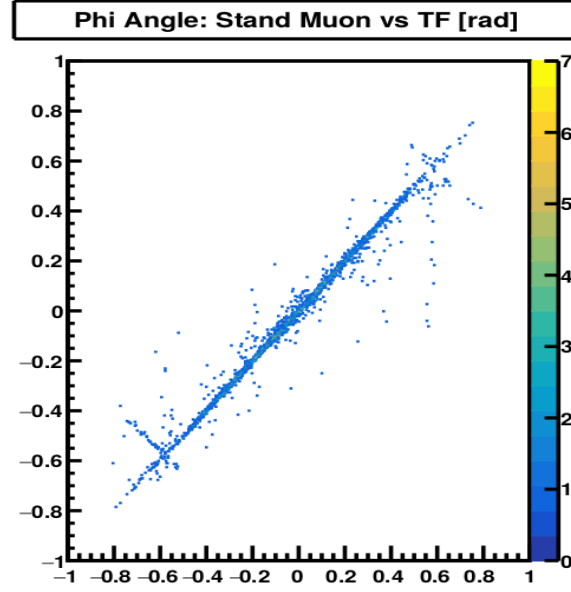


Figura 3.7: Viene mostrato in asse y Φ_{CMS} mentre in asse x Φ_{CH64}

si nota un andamento per lo più lineare e questo vuol dire che nella maggior parte dei casi la ricostruzione della camera64 comporta valori angolari pressochè uguali a quelli ottenuti dalle ricostruzioni delle camere di CMS. Tuttavia si notano delle code trasversali per gli angoli più esterni, dovute a eventi che attraversano la camera64 in diagonale, come mostrato in figura 3.8.

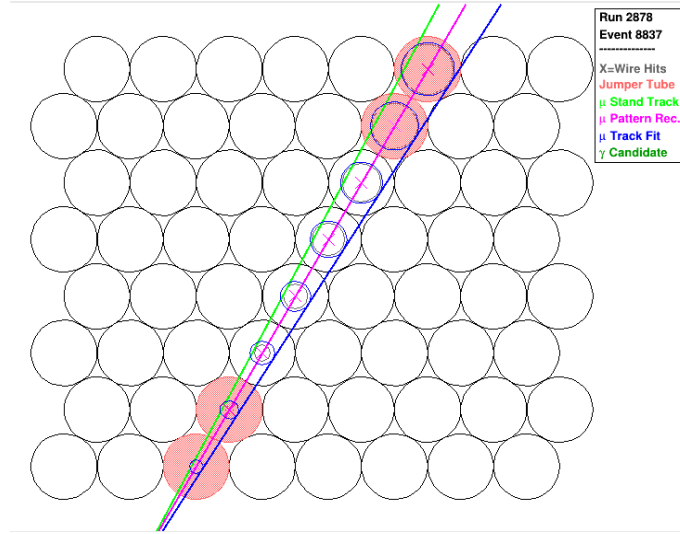


Figura 3.8: In verde la traccia dov'è passata realmente, misurata dalle camere di CMS. In blu la traccia ricostruita dalla camera64

In questo caso l'angolo Φ misurato dalla camera64 è di -0.63 rad mentre quello di CMS è di -0.53 rad . Questo tipo di incongruenza non è risolvibile con questo tipo di geometria e pertanto si stanno studiando diverse disposizioni geometriche per risolverla.

Facendo poi la differenza tra le due distribuzioni ($\Delta\Phi = \Phi_{CMS} - \Phi_{CH64}$) e interpolando con una curva gaussiana, troviamo la risoluzione angolare della camera64 (figura 3.9), che corrisponde alla sigma della gaussiana.

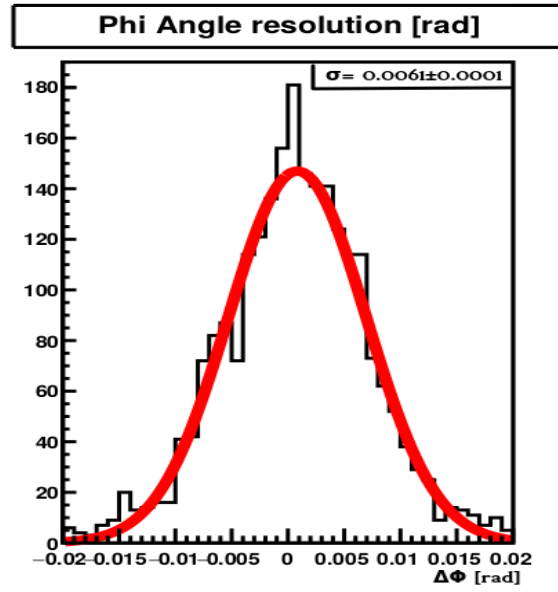


Figura 3.9: Distribuzione angolare dei muoni ($\Delta\Phi$), delle tracce ricostruite nelle camere di CMS e nella camera64

Ripetendo gli stessi procedimenti anche per il sistema ponticellato, si trova la seguente distribuzione angolare (figura 3.10).

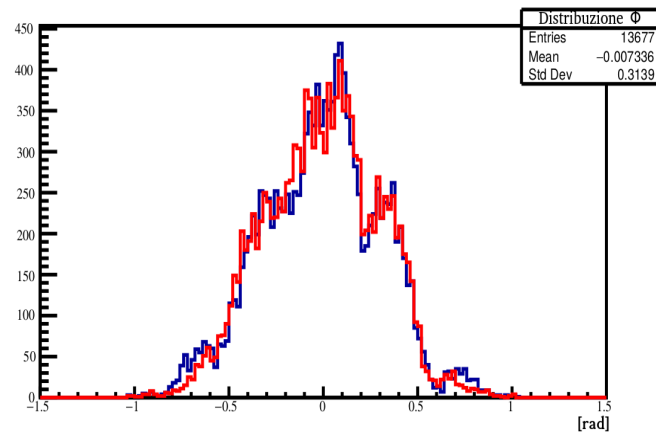


Figura 3.10: Distribuzione in radianti delle pendenze di CMS(blu) e della camera64(rosso)

Mettendole poi in relazione troviamo (figura 3.11):

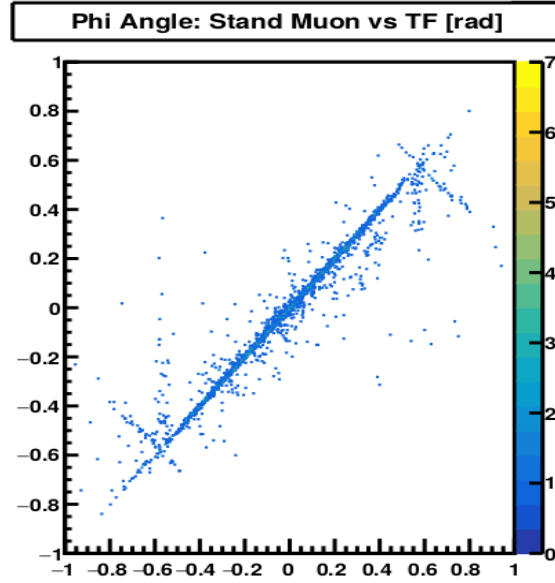


Figura 3.11: Viene mostrato in asse y Φ_{CMS} mentre in asse x Φ_{CH64}

dove anche in questo caso si osserva una dipendenza per lo più lineare. Facendo anche in questo caso la differenza tra $\Delta\Phi = \Phi_{CMS} - \Phi_{CH64}$ ed interpolando con una curva gaussiana troviamo la risoluzione per il sistema ponticellato (figura 3.12).

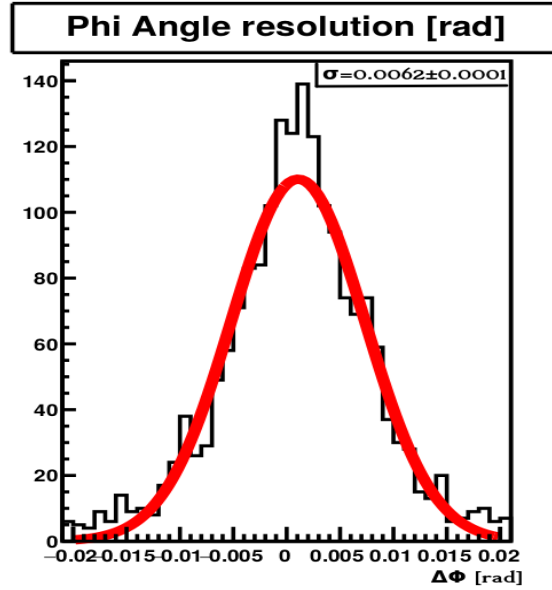


Figura 3.12: Distribuzione angolare dei muoni ($\Delta\Phi$), delle tracce ricostruite nelle camere di CMS e nella camera64

Dove si può notare una risoluzione, entro gli errori, uguale rispetto alla configurazione singola. Questo ci fa capire che il rivelatore, anche in configurazione ponticellata, ricostruisce le tracce con la stessa precisione della configurazione singola.

Si ricorda che con questa configurazione è possibile avere una lettura anche sulla posizione del passaggio della particella lungo l'asse z. Viene mostrato in figura 3.13 la relazione tra misura in z della camera64 e quella di CMS.

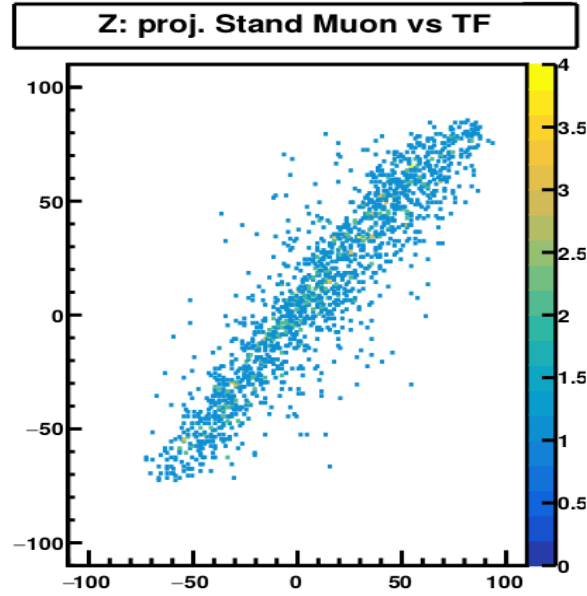


Figura 3.13: Viene mostrato z_{CMS} verso z_{CH64}

Facendo poi la differenza tra le due posizioni ($\Delta z = z_{CMS} - z_{CH64}$) ed interpolando sempre con una curva gaussiana è possibile trovare la risoluzione sulla posizione in z (figura 3.14):

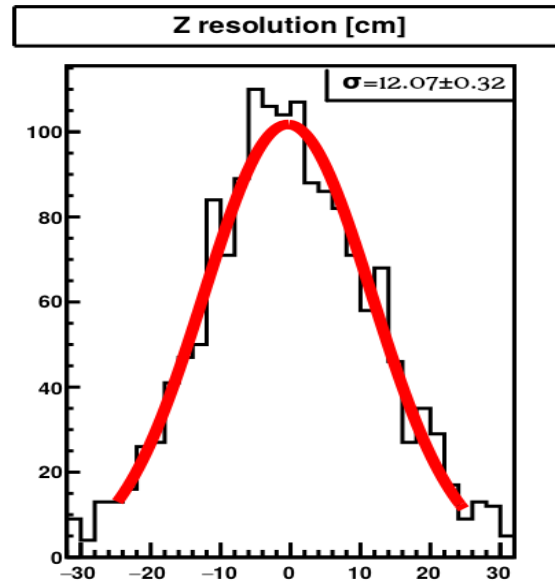


Figura 3.14: Distribuzione spaziale dei muoni (Δz), delle tracce ricostruite nelle camere di CMS e nella camera64

la modesta risoluzione è dovuta al fatto che la camera64 per ricostruire la posizione in z utilizza misure basate sulla differenza di tempo di arrivo del segnale intrinsecamente poco precise e disponibili generalmente solo per quattro tubi.

3.4 Efficienza

Il passo successivo è stato quello di calcolare l'efficienza della camera64. Si è individuata sia quella dei singoli tubi sia quella relativa alla ricostruzione tracce.

Per individuare l'efficienza di ogni singolo canale, si è fatto il rapporto tra il numero di tracciate viste dalla camera64 e il numero di tracce totali passate. Le ultime corrispondono alle tracce ricostruite dalle camere di CMS. Vengono riportati, per il sistema ponticellato, in tabella 3.4 i valori ottenuti:

	canale1	canale2	canale3	canale4	canale5	canale6	canale7	canale8
Layer8	0,88	0,91	0,87	0,90	0,89	0,89	0,89	0,91
Layer7	0,94	0,80	0,89	0,81	0,93	0,81	0,92	0,852
Layer6	0,85	0,85	0,78	0,90	0,86	0,84	0,79	0,91
Layer5	0,90	0,81	0,83	0,84	0,91	0,82	0,84	0,86
Layer4	0,81	0,82	0,77	0,90	0,88	0,88	0,81	0,92
Layer3	0,87	0,74	0,84	0,81	0,92	0,81	0,83	0,84
Layer2	0,81	0,90	0,79	0,92	0,58	0,93	0,82	0,93
Layer1	0,89	0,86	0,88	0,87	0,90	0,91	0,90	0,88

Tabella 3.4: Efficienza di ogni singolo tubo ricavate per il sistema ponticellato.

dove si nota che nella maggior parte dei casi, si ha un'efficienza per canale maggiore del 80%. Per trovare invece l'efficienza relativa alla percentuale di tracce ricostruite della camera64, si è considerato il processo di ricostruzione delle tracce. In questo caso l'efficienza totale è data, dalla percentuale di traccie totale ricostruite dalla camera64, rispetto a quelle ricostruite dalle camere di CMS (figura 3.15).

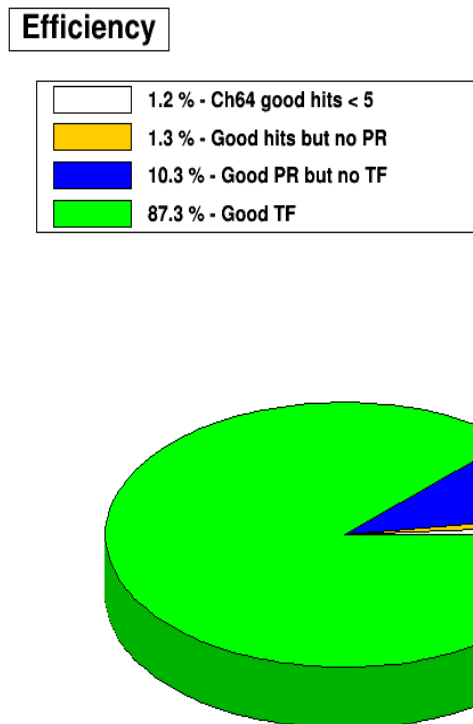


Figura 3.15: vengono mostrate le varie percentuali dei processi che portano al fit, per la configurazione ponticellata. L'efficienza totale corrisponde alla parte in verde.

Ripetendo quest'ultimo passaggio anche per il sistema non ponticellato si è visto che l'efficienza è poco più alta (88.7% Good TF). Da questo si è capito che usare la camera64 in configurazione ponticellata non comporta una perdita di informazione, per quanto riguarda il numero di traccie ricostruite, ma

anzi permette di avere un'informazione in più in più, ovvero la lettura della posizione della particella lungo l'asse z .

3.5 Comportamento in presenza di contenitori di stoccaggio a secco

In fine, dopo la caratterizzazione, vengono presentati i dati raccolti dalla camera in presenza di un CASTOR[®]. Questo rivelatore è stato pensato per funzionare in presenza di radioattività significative. L'interazione di neutroni e fotoni producono una distribuzione casuale di segnali nello spazio e nel tempo. Al contrario, il passaggio di un muone produce una serie di segnali allineati in una finestra temporale dell'ordine del μs . Sfruttando questa differenza, è stata realizzata un'elettronica capace di fornire un trigger in presenza del passaggio di un muone, basato sulla molteplicità dei tubi e dei layer che hanno dato un segnale.

Il test sul campo del rivelatore, è stato eseguito nel deposito temporaneo della centrale nucleare EnKK, di Neckarwestheim in Germania. I dati sono stati raccolti in due configurazioni: la prima distante dal CASTOR[®], in modo che la radioattività emessa raggiunga il rivelatore in quantità trascurabile; la seconda vicino al CASTOR[®], come viene mostrato in figura 3.16.



Figura 3.16: Immagini della presa dati nelle due posizioni: lontano dal (sinistra) e vicino al (destra) CASTOR[®]

Lo scopo di questo test è quello di dimostrare che anche in presenza della radioattività del CASTOR[®], il rivelatore è in grado di ricostruire la traccia dei muoni che lo hanno attraversato. La dose misurata a 22 cm dal contenitore era di $14 \mu Sv/h$ per i gamma, mentre per i neutroni era di $29 \mu Sv/h$. Due esempi di ricostruzione di tracce lasciate da muoni sono mostrati in figura 3.17.

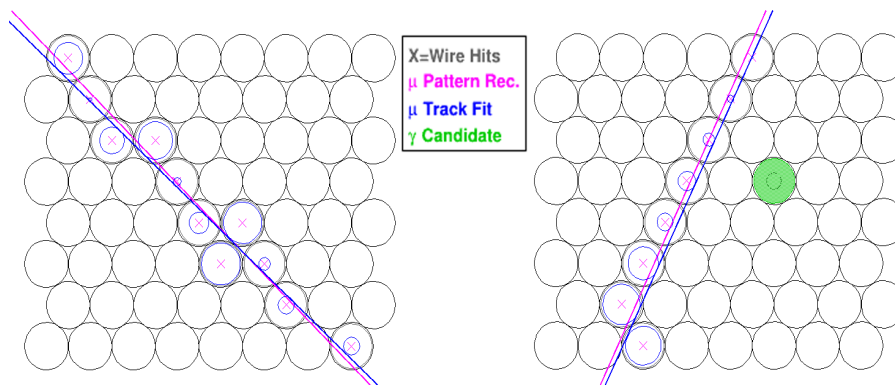


Figura 3.17: Ricostruzione della traccia dei muoni nel piano orizzontale, con il rivelatore in vicinanza del CASTOR[®]. Le croci rosa corrispondono alle posizioni dei fili il cui segnale è stato utilizzato per la ricostruzione delle tracce, i cerchi blu rappresentano la distanza radiale, rispetto al centro, dove è passato il muone. L'area verde rappresenta il segnale del tubo candidato ad essere radiazione emessa dal CASTOR[®].

In entrambi i casi la serie di tubi colpiti, dal muone, nei diversi layer è ben visibile. Inoltre, la ricostruzione della traccia, con le giuste distanze dal filo, è stata eseguita correttamente. Altri segnali, compatibili in tempo col passaggio del muone ma distinguibili dalla sua traccia sono rappresentati in verde. Per quantificare il numero di segnali prodotti dalla radioattività, è necessario sottrarre tutti gli altri effetti indistinguibili (es. "scariche" occasionali all'interno della camera64, rumore dovuto all'elettronica, ecc.). Per sottrarli si possono contare tutti i segnali, emessi dalla camera64, a cui non corrisponde il passaggio del muone, durante la presa dati lontana dal CASTOR[®]. Si è visto che comunque durante la presa dati vicina e lontana dal CASTOR[®], il numero di segnali non associato al passaggio del muone è abbastanza piccolo (<1.5) e la differenza è più piccola dell'unità. Questo fatto è molto importante, perché dimostra che è molto difficile che la radioattività induca un segnale che possa disturbare la ricostruzione della traccia dei muoni. Il numero di segnali aggiuntivi in coincidenza con la traccia lasciata dal muone, attribuiti alla radiazione del CASTOR[®], dipende dal numero di canali presenti nel rivelatore e dalla loro lunghezza. Per questo prototipo, con 64 canali, si è trovato $n_{\gamma/\mu}^{64} = 0.4 \pm 0.2$ dove l'errore è dominato da effetti sistematici. Questo tipo di risultato può essere espresso anche in termini di probabilità, $p_{\gamma/\mu}^{ch}$, ovvero, la probabilità di avere un segnale prodotto dalla radioattività, nella finestra temporale del μs , lungo i 2m di lunghezza del canale. Si trova un valore di $p_{\gamma/\mu}^{ch} = (6 \pm 3)10^{-3}$. Questo valore è sufficiente basso per escludere problemi in vicinanza di un CASTOR[®].

In fine, per avere una stima di quanto il flusso di muoni venga ridotto in vicinanza del CASTOR[®], viene mostrato in figura 3.18 la distribuzione angolare dell'angolo di elevazione, in configurazione "vicina" e "lontana" dal CASTOR[®].

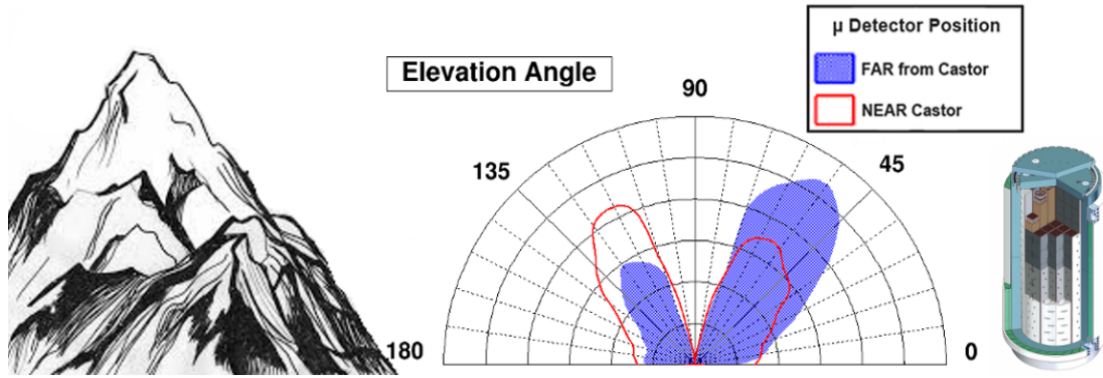


Figura 3.18: La distribuzione dell'angolo di elevazione, mostra gli effetti dovuti alla geologia dell'ambiente e al CASTOR[®]. L'area blu e rossa sono state normalizzate rispetto al numero totale di segnali raccolti.

Questa misura è stata fatta considerando la posizione delle particelle lungo la direzione del filo del tubo. Bisogna inoltre considerare che il sito, nel quale sono state effettuate le misure, si trova in un ambiente parzialmente scavato sotto la collina (rappresentata da una montagna in figura 3.19) posta in direzione opposta rispetto a quella che punta al CASTOR[®]. Infatti, dal grafico si capisce che il flusso di muoni è maggiore nella direzione del CASTOR[®], in configurazione "lontana", in quanto molti di essi sono bloccati dalla montagna. Invece, nella configurazione "vicina", si può notare come il flusso di muoni sia minore in vicinanza del CASTOR[®].

Date le condizioni di prova, tutte le distribuzioni sono compatibili con le aspettative e non sono state rivelate anomalie indotte dalla presenza del CASTOR[®]. Quindi si può affermare che l'obiettivo del test sul campo sia stato raggiunto.

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro era costruire e testare un rivelatore di muoni, per verificarne il suo corretto funzionamento anche in ambienti radioattivi. Si è scelta una tecnologia basata su tubi a deriva, rendendo il prototipo il più possibile compatto e leggero in modo che sia facilmente trasportabile. Il lavoro di costruzione e caratterizzazione è avvenuto presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), ad opera del gruppo INFN di Padova, sfruttando il dimostratore di tomografia muonica lì presente. Si è visto che questo rivelatore, ha una risoluzione di $6.1 \pm 0.1 mrad$ dell'angolo in Φ con un'efficienza dell' 87.3%. Il lavoro svolto ha portato ad un esito positivo, mostrando che la camera64 è in grado di ricostruire il passaggio del muone anche in vicinanza di un CASTOR[®]. Grazie a questi risultati e ai dati presi sul campo, si hanno le informazioni necessarie per simulare il comportamento dettagliato di un rivelatore di media o grande dimensione, da installare attorno al CASTOR[®] per ricostruirne il contenuto.

Bibliografia

- [1] P.Checchia, et al., Muon Tomography for spent nuclear fuel control, ESARDA BULLETIN, No.54, June 2017.
- [2] S.Vaccaro, et al., Challenges and advancements in spent fuel safeguards in European Union, in current Symposium proceeding, IAEA Symposium on International Safeguards Vienna International Centre, CN267-101 (2018).
- [3] K.Aymanns, et al., Cooperation between Germany, the European Commission and the IAEA in safeguarding spent fuel intermediate storage facilities, in current Symposium proceeding, IAEA Symposium on International Safeguards Vienna International Centre, CN267-036 (2018).
- [4] E.P.George, Cosmic rays measure overburden of tunnel, Commonwealth Engineer (1955) 455.
- [5] K.R.Borozdin, et al., Surveillance: Radiographic imaging with cosmic-ray muons, Nature 422 (2003) 277.
- [6] E.Marton, et al., Muons scanner to detect radioactive sources hidden in scrap metal containers Final report, DOI:10.2777/75975.
- [7] S.Chatrchyan, et al., The cms experiment at the cern lhc, JINST 3 (08) (2008) S08004.
- [8] F.Gonella and M.Pegoraro, "The MAD", a Full Custom ASIC for the CMS Barrel Muon Chambers Front End Electronics, Proceeding of the 7th Workshop on Electronics for LHC Experiments (2001).
- [9] M. Benettoni et al., Noise reduction in muon tomography for detecting high density objects, JINST 8 P12007 (2013).