

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'INSUBRIA

Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia - Como

Anno Accademico 2020-2021

Laurea Triennale in Fisica



*CARATTERIZZAZIONE DI UN CALORIMETRO SHASHLIK
PIOMBO-SCINTILLATORE*

Laureando: Stefano Carsi

Matricola 736512

Relatore: Prof.ssa Michela Prest
Università degli Studi dell'Insubria

Correlatore: Dott. Pietro Monti-Guarnieri
Università degli Studi dell'Insubria

I was an ordinary person who studied hard.

There are no miracle people.

Richard Feynman

Indice

Introduzione	2
1 La calorimetria elettromagnetica	3
1.1 Gli sciami elettromagnetici	4
1.2 Tipologie di calorimetri	11
1.3 La risoluzione energetica	17
2 Jack e la sua caratterizzazione in laboratorio	23
2.1 Il calorimetro shashlik Jack	24
2.2 Setup sperimentale	25
2.3 La misure di efficienza	33
2.3.1 Analisi dei dati del primo setup	33
2.3.1.1 Ricostruzione delle tracce	33
2.3.1.2 Selezione degli eventi e calcolo dell'efficienza	35
2.3.2 Analisi dei dati del secondo setup	41
3 La caratterizzazione su fascio	49
3.1 La North Area del CERN	49
3.2 Il setup sperimentale	51
3.3 Procedure e risultati sperimentali	53
3.3.1 La divergenza e il profilo del fascio	57
3.3.2 La posizione di Jack	58
3.3.3 Equalizzazione dei 2 PMT	60
3.3.4 La calibrazione	65
3.3.5 La risoluzione energetica	69
Conclusioni	75
Lista degli acronimi	79
Lista delle figure	81

Lista delle tabelle	83
Bibliografia	85

Introduzione

I rivelatori di particelle sono strumenti che permettono di tracciare e identificare le particelle elementari cariche o neutre. Un'ampia classe di rivelatori è rappresentata dai *calorimetri*. Introdotti originariamente a metà del XX secolo per lo studio dei raggi cosmici, al giorno d'oggi giocano un ruolo fondamentale negli esperimenti di fisica delle particelle con fasci accelerati. I calorimetri sono blocchi di materiale strumentato, che producono un segnale proporzionale all'energia depositata dalle particelle che attraversano il volume sensibile. Per poter misurare l'energia di una particella, essa deve essere completamente assorbita dal calorimetro stesso: la tecnica di rivelazione è quindi distruttiva, e per questa ragione i calorimetri sono sempre posti fisicamente al termine del sistema di rivelazione.

I calorimetri possono essere classificati in base alla tecnica di costruzione (calorimetri omogenei o calorimetri a campionamento) e alla tipologia di particelle rivelate (calorimetri elettromagnetici o calorimetri adronici). In tutti i casi il principio di rivelazione è basato sulla produzione di uno sciame da parte della particella incidente, quando interagisce con un mezzo assorbitore.

Questo lavoro di tesi riguarda la caratterizzazione di "Jack", un calorimetro elettromagnetico a campionamento shashlik. I calorimetri elettromagnetici a campionamento sono costituiti da strati alternati di *materiale assorbitore*, il cui scopo è la generazione di uno *sciame elettromagnetico*, e di un materiale attivo in grado di misurare l'energia dello sciame. Jack è un calorimetro di (11.5×11.5) cm² costituito da strati di piombo di 1.5 mm alternati a strati di 4 mm di scintillatore plastico (per un totale di 19 lunghezze di radiazione), che emette luce di scintillazione a seguito del deposito di energia da parte delle particelle dello sciame. Il calorimetro è attraversato per tutta la sua lunghezza da 144 fibre WLS (WaveLength Shifter), disposte in una matrice 12×12 a passo di 1 cm, il cui scopo è raccogliere la luce di scintillazione prodotta dagli strati plastici del calorimetro e modificarne la lunghezza d'onda per adattarla al range spettrale dei tubi fotomoltiplicatori (PMT).

Questa tesi è suddivisa in tre capitoli: il primo capitolo si apre con la presentazione dei principi fisici alla base della calorimetria elettromagnetica,

per poi passare alla descrizione delle varie tipologie di calorimetri e della risoluzione energetica, parametro chiave per la valutazione delle performance di un calorimetro.

Il secondo capitolo presenta il calorimetro oggetto di questa tesi e la sua caratterizzazione in laboratorio tramite raggi cosmici, la cui traiettoria è ricostruita grazie a rivelatori al silicio ad alta risoluzione spaziale. In particolare il setup di laboratorio ha permesso di misurare l'efficienza di rivelazione dei raggi cosmici da parte delle tile di scintillatore plastico validando in questo modo il sistema di lettura (fibre + PMT).

Nel terzo ed ultimo capitolo sono descritte le misure effettuate presso la linea di fascio estratto H2 della North Area del CERN nel contesto della presa dati per l'indagine sulle interazioni coerenti delle particelle ad alta energia nei cristalli orientati, nell'ambito della preparazione dell'esperimento KLEVER. Jack è stato utilizzato per misurare l'energia degli elettroni deviati da un magnete dopo aver interagito con un bersaglio producendo fotoni tramite bremsstrahlung (e quindi perdendo energia). Il capitolo descrive in dettaglio le procedure di *equalizzazione* e *calibrazione* (con fasci di elettroni nel range di energie 20 – 120 GeV), che consentono di misurare l'energia della particella incidente e la stima della risoluzione energetica.

Capitolo 1

La calorimetria elettromagnetica

Con il termine *calorimetria* si intende l'insieme delle tecniche che permettono di misurare il calore scambiato in seguito ad una reazione chimica o un processo fisico. Nell'ambito della termodinamica, un *calorimetro* è un contenitore ermetico contenente una sostanza della quale si vuole misurare la temperatura in diversi istanti. Nell'ambito della fisica delle particelle risulta complicato misurare le variazioni di temperatura indotte dall'energia ceduta da una particella.

In fisica delle particelle l'energia viene misurata tipicamente in elettronVolt (eV): 1 eV equivale all'energia acquistata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di un 1 V. In termodinamica l'unità di misura dell'energia è invece la chilocaloria (kcal), definita come la quantità di energia necessaria per innalzare di 1 °C un chilo di acqua distillata alla pressione di 1 atm ed alla temperatura di 14.5 °C. Visto che $1 \text{ GeV} \approx 1.6 \times 10^{-10} \text{ J} \approx 3.8 \times 10^{-14} \text{ kcal}$, un deposito di 1 GeV di energia porterebbe ad un aumento di temperatura di $3.8 \times 10^{-14} \text{ K}$, un numero decisamente piccolo, che rende questa tecnica non adatta alla fisica delle alte energie [1] [2] [3]. I calorimetri impiegati in fisica delle particelle rivelano infatti la cascata di particelle secondarie prodotte dalla particella interagente, che depositano energia nel calorimetro stesso.

I calorimetri sono blocchi di materiale strumentato in cui la particella interagente è completamente assorbita e la sua energia trasformata in una quantità misurabile. L'energia depositata infatti viene convertita in un segnale elettrico o luminoso proporzionale all'energia della particella incidente. Il metodo di misurazione è distruttivo e per questa ragione nel setup sperimentale i calorimetri sono solitamente posti al termine del sistema di rivelazione.

Nonostante siano stati introdotti per misurare l'energia, i calorimetri sono dei rivelatori versatili, e possono consentire di determinare posizione e direzione dello sciame oppure di identificare la particella (particle ID) [4].

In questo capitolo si descriveranno i principi fisici della calorimetria; verranno presentate le diverse tipologie di calorimetri e si discuterà la risoluzione energetica, parametro fondamentale per un calorimetro. Infine ci si soffermerà sui calorimetri elettromagnetici a campionamento shashlik, tipologia a cui appartiene il detector *Jack*, oggetto di studio di questa tesi [4].

1.1 Gli sciame elettromagnetici

Nel caso di un calorimetro elettromagnetico lo sciame viene generato da fotoni, elettroni e positroni che interagiscono col materiale del rivelatore stesso. Per energie superiori a qualche decina di MeV i fotoni perdono energia principalmente per produzione di coppie, mentre gli elettroni e i positroni per irraggiamento (bremsstrahlung). Inoltre, per energie superiori al GeV, tali processi risultano indipendenti dall'energia, come si può osservare nelle figure 1.1 e 1.2. Per una trattazione completa si veda [5].

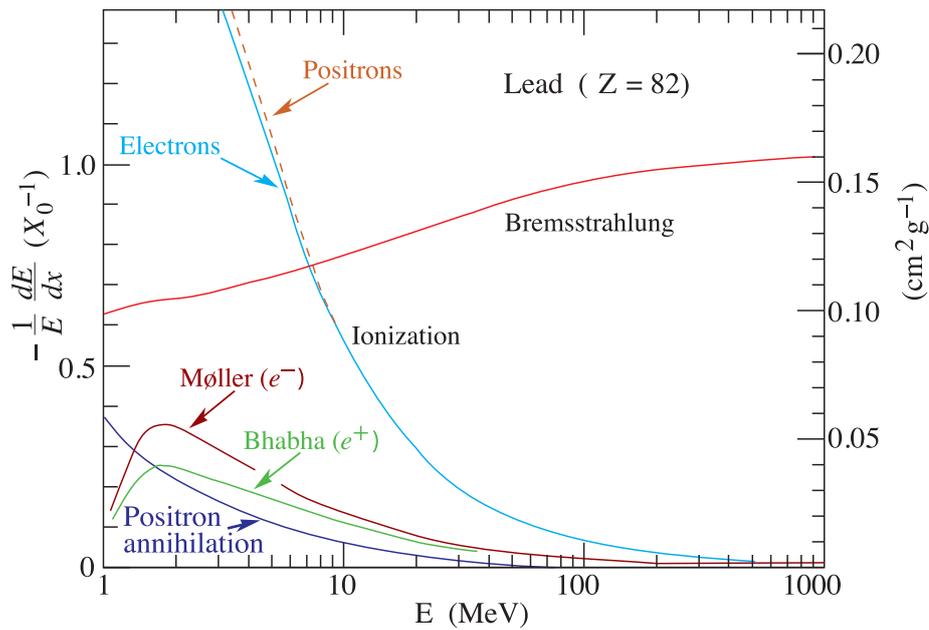


Figura 1.1: Frazione di energia persa per unità di lunghezza di radiazione X_0 (si veda la definizione a pagina 8) e per unità di energia in funzione dell'energia di elettroni o positroni. Si può notare come per energie superiori a qualche decina di MeV domini la perdita per irraggiamento, mentre oltre il GeV la perdita sia pressoché indipendente dall'energia [6].

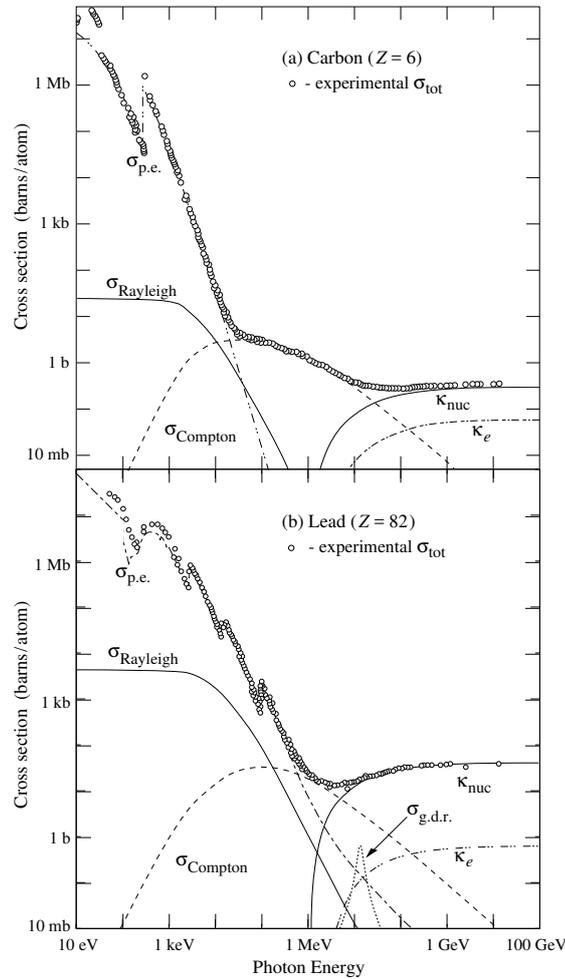


Figura 1.2: Sezione d'urto totale per fotoni in funzione dell'energia all'interno di carbonio e piombo. Sono inoltre mostrati i singoli contributi: $\sigma_{\text{p.e.}}$: effetto fotoelettrico atomico - il fotone viene assorbito, mentre un elettrone viene espulso; σ_{Rayleigh} : scattering coerente Rayleigh - l'atomo non è eccitato né ionizzato; σ_{Compton} : effetto Compton, scattering incoerente; σ_{nuc} : produzione di coppie, campo elettrico nucleare; $\sigma_{\text{g.d.r.}}$: interazioni fotonucleari [6].

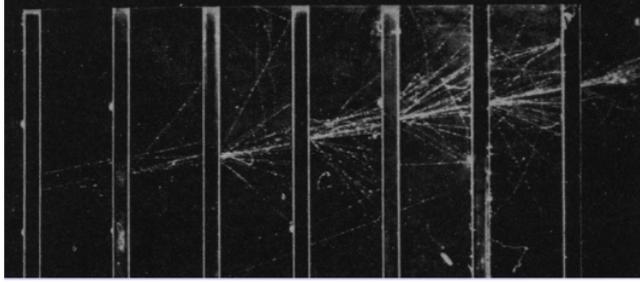


Figura 1.3: Sviluppo longitudinale di uno sciame all'interno di una camera a nebbia con assorbitori in piombo [7].

Si consideri il caso in cui un elettrone di alta energia (≥ 1 GeV) interagisca con un blocco di materiale di numero atomico sufficientemente elevato: l'elettrone può generare un fotone mediante bremsstrahlung. Se il fotone emesso ha sufficiente energia, può convertirsi in una coppia elettrone-positrone. Questi elettroni e positroni secondari, se hanno sufficiente energia, possono nuovamente produrre fotoni via bremsstrahlung innescando un processo a valanga detto *sciame elettromagnetico*. Ad ogni passo il numero di particelle prodotte aumenta mentre diminuisce la loro energia media fino al punto in cui elettroni e positroni raggiungono l'energia critica¹, e la sezione d'urto dello scattering Compton inizierà a diventare confrontabile con quella della produzione di coppie. A questo punto non si avrà più moltiplicazione e il processo si arresta. La profondità a cui la valanga si interrompe è detta *massimo dello sciame*. In figura 1.3 è mostrato lo sviluppo di uno sciame in una camera a nebbia.

L'energia dello sciame viene depositata nel calorimetro dagli elettroni e positroni prodotti dall'interazione dei fotoni col mezzo assorbitore. In altre parole, mentre lo sviluppo dello sciame è governato dalle particelle ad alta energia, il deposito di energia nel rivelatore è causato dalle particelle a bassa energia. In figura 1.4 è riportata una simulazione Monte-Carlo della frazione di energia depositata per ionizzazione in funzione del numero atomico dell'assorbitore: si può notare come la maggior parte delle particelle dello sciame che depositano energia abbiano energia inferiore a 20 MeV.

Le principali caratteristiche di uno sciame elettromagnetico possono essere descritte in termini di un unico parametro detto *lunghezza di radiazione* che

¹Si definisce *energia critica* per elettroni e positroni quell'energia tale per cui le perdite per ionizzazione e irraggiamento si equivalgono.

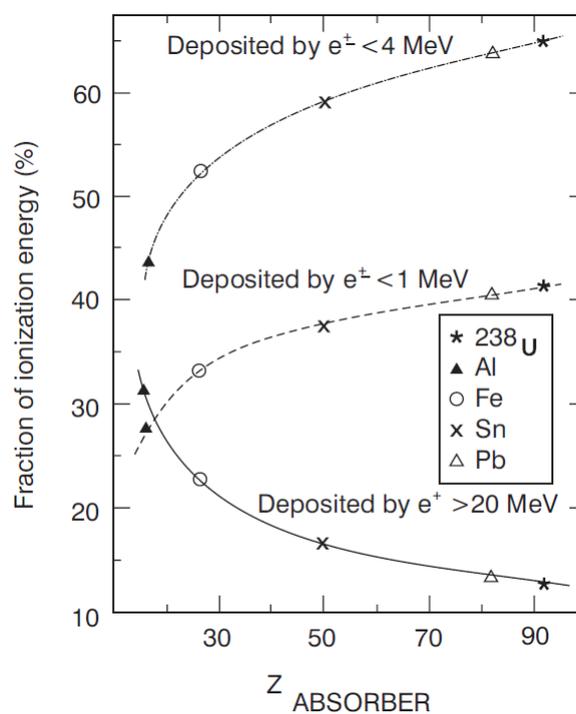


Figura 1.4: Simulazione Monte-Carlo della frazione di energia depositata per ionizzazione in funzione del numero atomico dell'assorbitore. Si può notare come la maggior parte dell'energia sia depositata da particelle con energia inferiore a 20 MeV [5].

dipende dal materiale [6]:

$$X_0 \text{ (g cm}^{-2}\text{)} = \frac{716 \text{ g cm}^{-2} A}{Z (Z + 1) \ln \left(287 / \sqrt{Z} \right)} \quad (1.1)$$

dove Z ed A sono il numero atomico e la massa atomica. La lunghezza di radiazione è definita come la distanza che un elettrone (o un positrone) deve percorrere in un materiale per ridurre la sua energia di un fattore $1/e$ rispetto all'energia iniziale solo tramite bremsstrahlung. Si può inoltre mostrare come l'intensità di un fascio di fotoni venga attenuata di un fattore $1/e$ principalmente tramite produzione di coppie dopo aver percorso una distanza $x = \frac{9}{7} X_0$, ovvero il libero cammino medio di fotoni ad alta energia è $\frac{9}{7} X_0$ [4] [5].

Come mostrato in figura 1.5, ad ogni lunghezza di radiazione si ha il raddoppio del numero di particelle; dopo n lunghezze di radiazione si avranno approssimativamente 2^n particelle ciascuna con un'energia

$$\langle E(n) \rangle \approx \frac{E_0}{2^n} \quad (1.2)$$

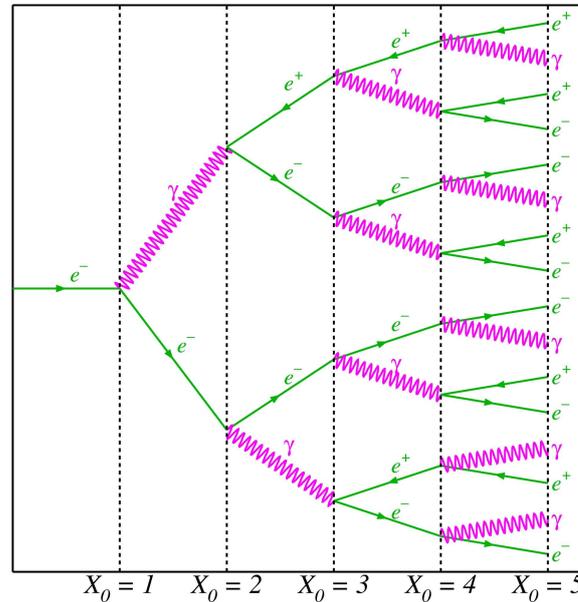


Figura 1.5: Sviluppo di uno sciame elettromagnetico [5].

Passando da un modello semplicistico a una rappresentazione realistica, il *profilo longitudinale* dello sciame, è rappresentabile tramite la seguente approssimazione [5] [8]:

$$\frac{dE}{dx} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)} \quad (1.3)$$

dove $t = x/X_0$ è la profondità all'interno del materiale espressa in unità di lunghezze di radiazione, mentre a e b sono due parametri che dipendono dalla particella incidente, come mostrato in figura 1.6. Il massimo dello sciame, ovvero la profondità a cui si ha il massimo numero di particelle, è dato da:

$$t_{\max} \approx \ln\left(\frac{E_0}{\varepsilon_c}\right) + t_0 \quad (1.4)$$

essendo E_0 l'energia della particella incidente e t_0 un parametro che vale 0.5 o -0.5 rispettivamente per i fotoni, che hanno una sezione d'urto minore, e per gli elettroni, che tendono ad interagire immediatamente con il materiale. Inoltre il massimo dello sciame ha una dipendenza logaritmica dall'energia delle particelle incidenti, il che permette di costruire calorimetri compatti. Si può infine esprimere lo spessore entro il quale è contenuto il 95% dello sciame:

$$t_{95\%} \approx t_{\max} + 0.08Z + 9.6 \quad (1.5)$$

dove t_{\max} e $t_{95\%}$ sono misurati in lunghezze di radiazione. In calorimetri di $25 X_0$, il leakage longitudinale è inferiore all'1% per particelle incidenti con energia fino a 300 GeV [4] [9].

Per quanto riguarda il *profilo laterale* dello sciame elettromagnetico, lo spread è dovuto principalmente a due effetti:

- l'angolo di apertura trasversale nei processi di bremsstrahlung e di produzione di coppia e il multiplo scattering di elettroni e positroni
- l'effetto fotoelettrico e lo scattering Compton, che sono processi in cui i fotoni e gli elettroni non vengono prodotti necessariamente solo nella direzione dell'asse [5].

Nella prima parte dello sciame domina il primo effetto, mentre il secondo diventa rilevante oltre il massimo dello sciame in quanto l'energia per singola particella decresce e l'effetto fotoelettrico e lo scattering Compton non sono più trascurabili.

Il profilo laterale di uno sciame elettromagnetico è caratterizzato dal *raggio di Molière*:

$$\rho_M = E_S \frac{X_0}{\varepsilon_c} \quad (1.6)$$

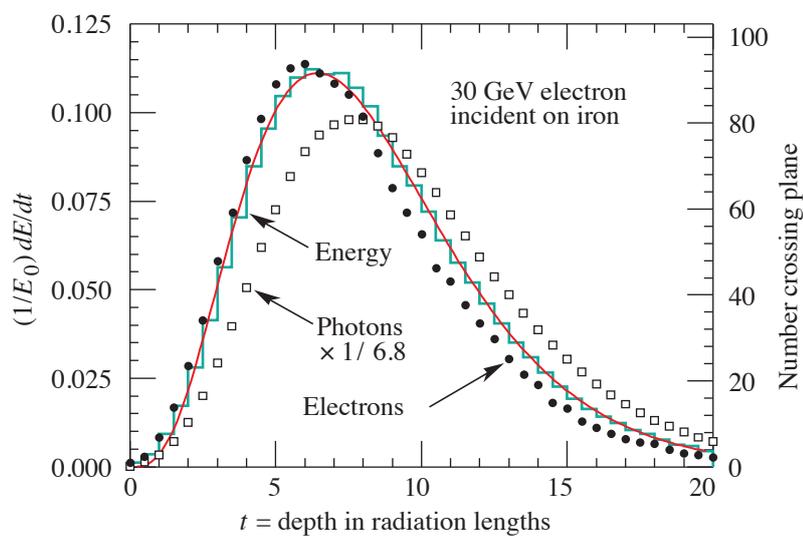


Figura 1.6: Simulazione EGS4 della cascata indotta da elettroni di 30 GeV in un blocco di ferro. L'istogramma mostra la frazione di energia depositata per unità di lunghezza di radiazione, mentre la curva fittata è descritta dall'equazione (1.3). I cerchi indicano il numero di elettroni con energia totale superiore a 1.5 MeV che attraversano piani distanziati di $X_0/2$ (scala a destra). I quadrati indicano il numero di fotoni con energia superiore a 1.5 MeV che attraversano i piani (risalati per avere la stessa area della distribuzione degli elettroni) [6].

essendo E_S la scala di energia

$$E_S = m_e c^2 \sqrt{4\pi/\alpha} = 21.2 \text{ MeV} \quad (1.7)$$

Il raggio di Molière rappresenta la deflessione laterale media degli elettroni all'energia critica dopo aver percorso una lunghezza di radiazione. In media, in un cilindro avente raggio pari a due volte il raggio di Molière è contenuto il 90 % dello sciame.

La figura 1.7 presenta la simulazione del profilo radiale in funzione della distanza dall'asse.

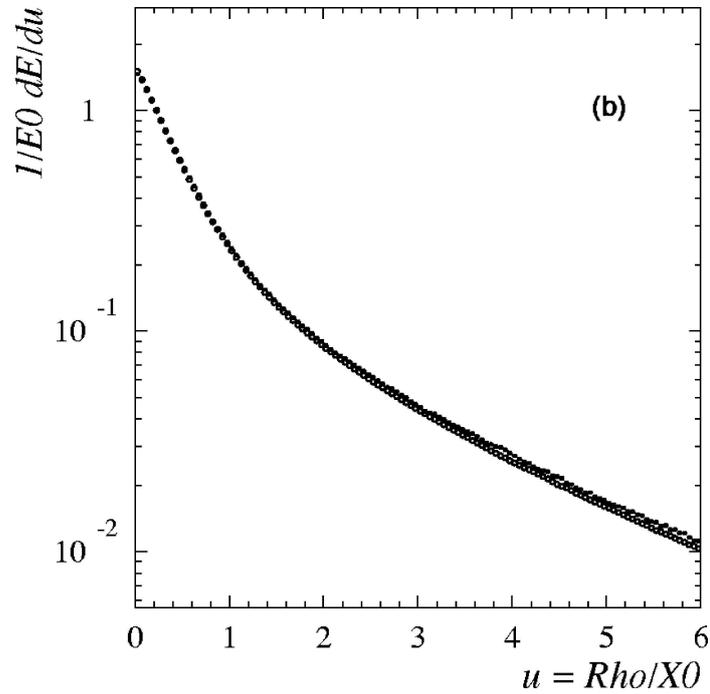


Figura 1.7: Simulazione del profilo radiale di uno sciame elettromagnetico in funzione della distanza radiale dall'asse dello sciame per elettroni incidenti su PbWO_4 di energia 1 GeV e 1 TeV [2].

1.2 Tipologie di calorimetri

I calorimetri possono essere suddivisi per tecnica di costruzione o per tipo di particelle di cui sono in grado di misurare l'energia. Per una trattazione completa si veda [4] [10].

Per quanto riguarda il tipo di particelle rivelate, i calorimetri si dividono in:

Calorimetri elettromagnetici: consentono di misurare l'energia di particelle che interagiscono con l'assorbitore mediante interazione elettromagnetica. Vengono impiegati principalmente per elettroni, positroni e fotoni.

Calorimetri adronici: consentono di misurare l'energia di particelle che interagiscono con la materia principalmente attraverso l'interazione forte. Sono quindi specifici per effettuare misure di adroni carichi e neutri.

Relativamente alla tecnica di costruzione, i calorimetri si dividono in:

Calorimetri omogenei Si tratta di calorimetri costituiti da un solo materiale che permette sia la generazione dello sciame che la sua rivelazione. Sono caratterizzati da un'ottima risoluzione energetica in quanto tutta l'energia viene depositata nella parte attiva del calorimetro. Sono utilizzati nell'ambito della fisica delle particelle ogni qualvolta si necessita di una risoluzione particolarmente spinta: infatti i valori tipici per la risoluzione sono compresi nell'intervallo $1 - 5\%/\sqrt{E}$. Sono impiegati inoltre nei campi della fisica del neutrino e dell'astrofisica, dove si vogliono indagare eventi rari e sono quindi necessari grossi volumi, costituiti da materiali poco costosi, come per esempio acqua o aria. A loro volta, i calorimetri omogenei si suddividono in 4 famiglie a seconda del tipo di segnale prodotto:

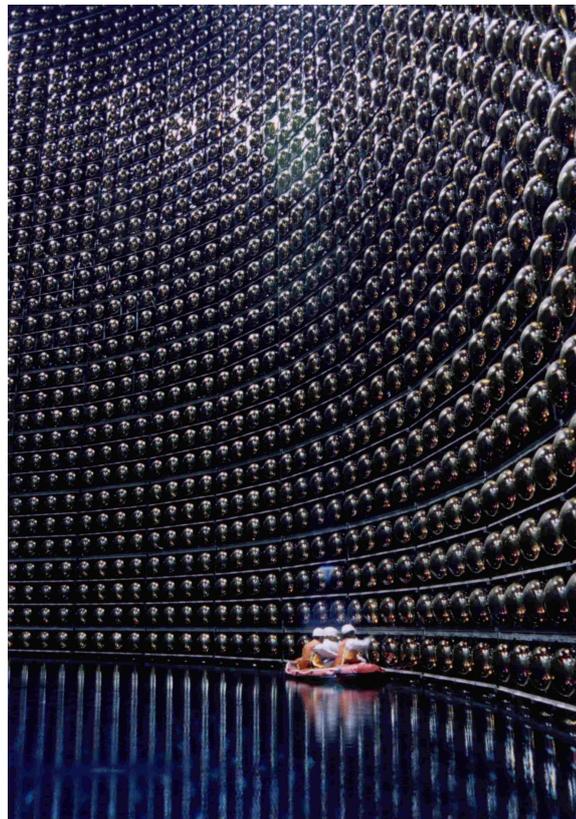
- Calorimetri a semiconduttore, caratterizzati da un'eccellente risoluzione energetica. Sono molto costosi e realizzati tramite silicio o germanio.
- Calorimetri Cherenkov, generalmente poco costosi e facili da operare, basati sulla rivelazione della radiazione Cherenkov² prodotta dagli elettroni in un materiale trasparente. Trovano applicazioni sia nell'ambito degli acceleratori che della fisica del neutrino. La figura 1.8a presenta un'immagine del calorimetro di OPAL, un calorimetro elettromagnetico omogeneo costituito da vetro al piombo³, mentre in figura 1.8b è riportata una foto del calorimetro Cherenkov di SuperKamiokande, dove 50 000 tonnellate di acqua pura sono lette da 12000 tubi fotomoltiplicatori, per studiare l'interazione dei neutrini.

²Si tratta di una radiazione che viene prodotta da una particella che si muove in un mezzo con una velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo stesso.

³55 % PbO e 45 % SiO₂.



(a)



(b)

Figura 1.8: Esempi di calorimetri elettromagnetici omogenei Cherenkov: (a) calorimetro in vetro al piombo di OPAL [11]; (b) calorimetro di SuperKamiokande [12].

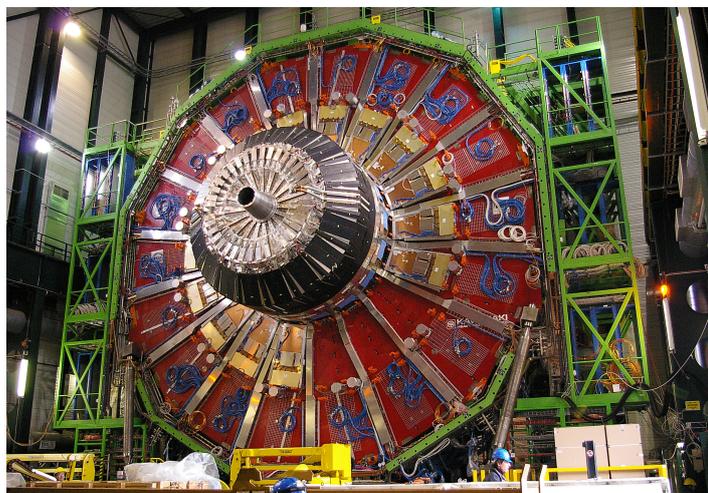
- Calorimetri a scintillatore: sono basati sulla rivelazione della fluorescenza in materiali quali il BGO, lo ioduro di cesio e il PbWO_4 . La figura 1.9 presenta il calorimetro a cristalli di BGO impiegato nell'esperimento L3 al CERN (a) e il calorimetro a cristalli di PbWO_4 utilizzato nell'esperimento CMS.
- Calorimetri a liquido nobile: in questa tipologia di calorimetri metà dell'energia va in ionizzazione mentre l'altra metà va in scintillazione. La lettura si basa sulla raccolta della ionizzazione. Il materiale più usato è l'argon mentre il kripton è caratterizzato da una minor lunghezza di radiazione e quindi consente di costruire calorimetri più compatti. In figura 1.10 è riportata un'immagine del calorimetro omogeneo a kripton utilizzato nell'esperimento NA48, il cui scopo era la misurazione della violazione della simmetria CP nei sistemi di kaoni neutri.

Calorimetri a campionamento Sono costituiti da strati alternati di materiale assorbente ad alto Z (tipicamente piombo, ferro, rame o uranio) avente la funzione di generare lo sciame, e di materiale attivo (contatore proporzionale o scintillatore plastico, come nel caso di questa tesi), in grado di raccogliere l'energia depositata dalle particelle. Il vantaggio è che si possono scegliere indipendentemente i due materiali in base ai requisiti dell'esperimento; tuttavia la risoluzione è peggiore ($5 - 15\%/\sqrt{E}$) di quella dei calorimetri omogenei. I calorimetri a campionamento possono essere facilmente segmentati longitudinalmente e trasversalmente: questo consente di studiare lo sviluppo tridimensionale dello sciame e di effettuare particle ID [4] [10]. Anche questi calorimetri si dividono in 4 sottofamiglie:

- Calorimetri a scintillatore (plastico): si tratta di calorimetri poco costosi e molto versatili dal punto di vista geometrico. Sono soggetti a fenomeni di invecchiamento e a danni prodotti dalle radiazioni. In figura 1.11 è riportato lo schema di KLOE, un calorimetro costituito da un blocco di piombo spesso 23 cm al cui interno sono inserite delle fibre scintillanti di 1 mm di diametro e lunghe 4 m.
- Calorimetri a gas: molto facili da costruire con costi contenuti sono stati ampiamente utilizzati (per esempio negli esperimenti di LEP). Hanno una risoluzione energetica meno buona rispetto a quelli omogenei (circa $20\%/\sqrt{E}$). La figura 1.12 presenta una foto del calorimetro di ALEPH, costituito da strati di piombo alternati a camere multifilo.



(a)



(b)

Figura 1.9: Immagini relative a due calorimetri elettromagnetici omogenei a scintillatore: (a) calorimetro a cristalli di BGO impiegato nell'esperimento L3 [2]; (b) calorimetro a cristalli di PbWO_4 impiegato nell'esperimento CMS [13].



Figura 1.10: Immagine del calorimetro elettromagnetico a kripton liquido utilizzato nell'esperimento NA48 [14].

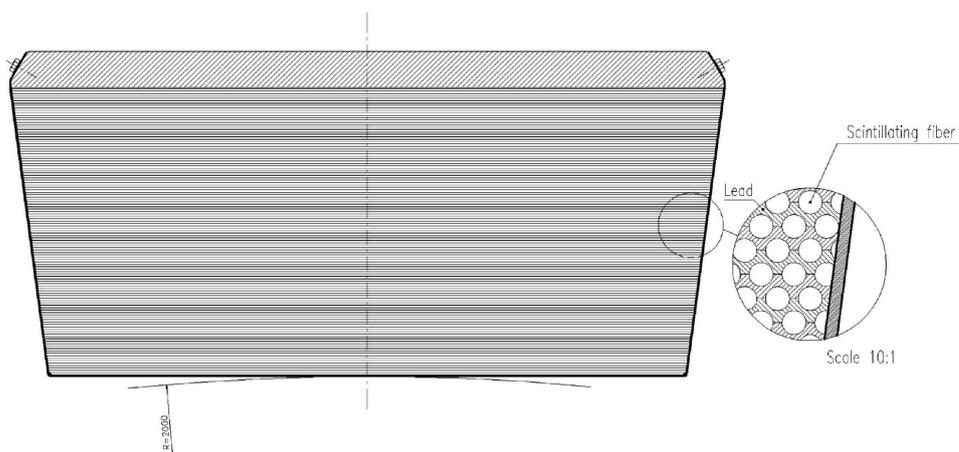
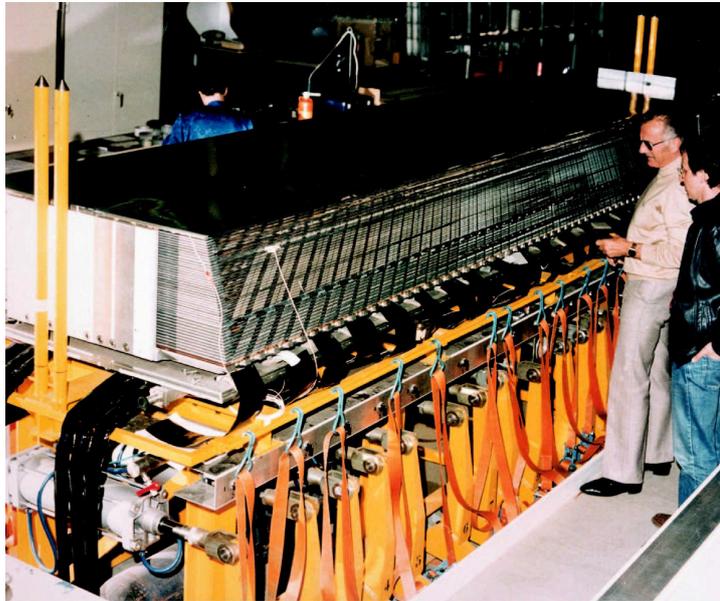


Figura 1.11: Rappresentazione schematica del calorimetro di KLOE [10].



An ECAL barrel model emerging.

Figura 1.12: Immagine del calorimetro di ALEPH [10].

- Calorimetri a stato solido: per questa tipologia di calorimetri molto costosi, il mezzo attivo è tipicamente il silicio. La densità è più di tre ordini di grandezza maggiore rispetto ai calorimetri a gas. La figura 1.13 presenta il calorimetro a silicio-tungsteno di OPAL, un monitor di luminosità costituito da 12 strati di tungsteno intervallati da altrettanti strati di silicio.
- Calorimetri a liquido: si suddividono in calorimetri a "liquido caldo", ovvero a temperatura ambiente, e a "liquidi criogenici". Mentre i primi risultano essere poco resistenti alla radiazione, i secondi, oltre ad essere più resistenti, risultano anche più facili da calibrare in quanto il mezzo è uniformemente distribuito in tutto il volume.

1.3 La risoluzione energetica

Il parametro fondamentale per caratterizzare un calorimetro è la *risoluzione energetica*, ovvero la precisione con cui l'energia di una particella può essere misurata.

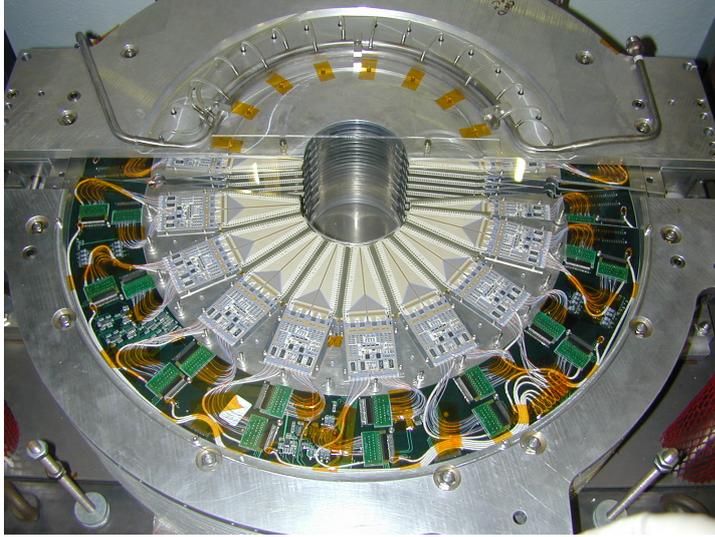


Figura 1.13: Immagine del calorimetro a silicio-tungsteno di OPAL [15].

La risoluzione energetica può essere espressa come una somma in quadratura di tre termini:

$$R = \frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (1.8)$$

Di seguito verrà descritto brevemente ciascun termine; per una trattazione completa si veda [4] [5]:

- Il primo termine, detto *termine stocastico*, include le fluttuazioni statistiche connesse allo sviluppo dello sciame. Questo termine rappresenta la risoluzione energetica intrinseca. La misura dell'energia totale è basata sul fatto che l'energia rilasciata all'interno del calorimetro sia proporzionale all'energia della particella incidente. Sia ora T_0 la lunghezza totale della traccia, vista come la somma di un gran numero di tracce indipendenti. Essa può essere espressa come

$$T_0 \approx X_0 \frac{E_0}{\varepsilon_c} \quad (1.9)$$

essendo $\frac{E_0}{\varepsilon_c}$ il numero di particelle cariche all'interno del calorimetro. Considerando che la lunghezza delle singole tracce, evento per evento, può fluttuare in accordo con la statistica di Poisson, nell'ipotesi in cui l'energia depositata sia proporzionale alla lunghezza totale T_0 , si ha

$E \approx T_0$ e $\sigma_E \approx \sqrt{T_0}$ da cui

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{\sqrt{T_0}}{T_0} \approx \frac{\sqrt{E_0}}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{T_0}} \quad (1.10)$$

Questi ragionamenti risultano rigorosi solo nel caso di un calorimetro omogeneo e infinitamente grande. Nel caso di un calorimetro a campionamento, come quello utilizzato per questa tesi, vanno considerate anche le fluttuazioni nel numero di particelle cariche N_c che attraversano gli strati di materiale attivo evento per evento. N_c risulta proporzionale al rapporto E_0/t essendo t lo spessore degli strati di materiale assorbitore del calorimetro in unità di lunghezza di radiazione. Queste fluttuazioni sono dette *fluttuazioni di campionamento*.

La risoluzione in questo caso può essere espressa come

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{1}{N_c} \approx \frac{1}{\sqrt{N_c}} \approx \sqrt{\frac{t}{E_0 \text{ (GeV)}}} \quad (1.11)$$

La risoluzione quindi migliora quanto più è sottile lo strato di assorbitore. Le risoluzioni tipiche hanno valori nel range $5 - 20\% / \sqrt{E \text{ (GeV)}}$.

Nel caso di calorimetri a campionamento, un altro parametro interessante è la frazione di campionamento f_{samp} :

$$f_{\text{samp}} = \frac{E_{\text{mip}}(\text{active})}{E_{\text{mip}}(\text{active}) + E_{\text{mip}}(\text{absorber})} \quad (1.12)$$

che esprime la frazione di energia rilasciata da una MIP⁴ (particella al minimo di ionizzazione) nel mezzo attivo rispetto all'energia totale. Poiché con ottima approssimazione una MIP rilascia sempre la stessa quantità di energia all'interno di un dato materiale, questo termine consente di valutare le fluttuazioni causate dagli strati di assorbitore.

- Il secondo termine, detto *termine di rumore*, tiene conto del rumore introdotto dalla catena elettronica di lettura. Se l'energia depositata è convertita in cariche elettriche, è necessario utilizzare un amplificatore che a sua volta porta un contributo in termini di rumore. Se l'energia viene convertita in luce, è possibile leggere il segnale tramite fotomoltiplicatori che garantiscono un alto guadagno e un basso livello di rumore. Questo termine scala come l'inverso dell'energia.

⁴Particella il cui rate medio di perdita di energia nella materia è prossimo al minimo della curva di Bethe-Bloch.

- Il terzo termine viene detto *termine costante* e raccoglie tutti i contributi che non dipendono dall'energia, e deve essere mantenuto piccolo.

Alcuni tra gli elementi che contribuiscono a questo termine sono per esempio:

- la perdita longitudinale, che si verifica quando il calorimetro non è sufficientemente spesso da contenere l'intero sciame
- la perdita trasversale, che si verifica quando la sezione del calorimetro non è sufficientemente grande da contenere completamente lo sciame
- il materiale che precede il calorimetro
- la presenza di zone morte all'interno del rivelatore a causa della geometria o della struttura meccanica
- il gradiente di temperatura, il danno da radiazione e l'invecchiamento del materiale attivo.

La figura 1.14 riporta un esempio di risoluzione energetica in funzione dell'energia per il calorimetro a kripton liquido dell'esperimento NA48.

Una classe di calorimetri a campionamento di particolare interesse in fisica delle particelle è quella dei calorimetri shashlik, formati da strati alternati di materiale scintillante attivo e materiale assorbitore, con lettura della luce di scintillazione eseguita grazie a fibre inserite perpendicolarmente alle sezioni di materiale. L'interesse per questi calorimetri, sviluppati nei tardi anni '90, è cresciuto notevolmente negli ultimi decenni, dato che la loro risoluzione energetica è comparabile a quella di un calorimetro omogeneo (a patto che la frazione di campionamento sia adeguata) [5]. Nei capitoli successivi verrà descritta la caratterizzazione di un calorimetro shashlik piombo-scintillatore, sia in termini di efficienza di rivelazione con misure in laboratorio con raggi cosmici che di risoluzione energetica con misure su fascio di elettroni ad alta energia.

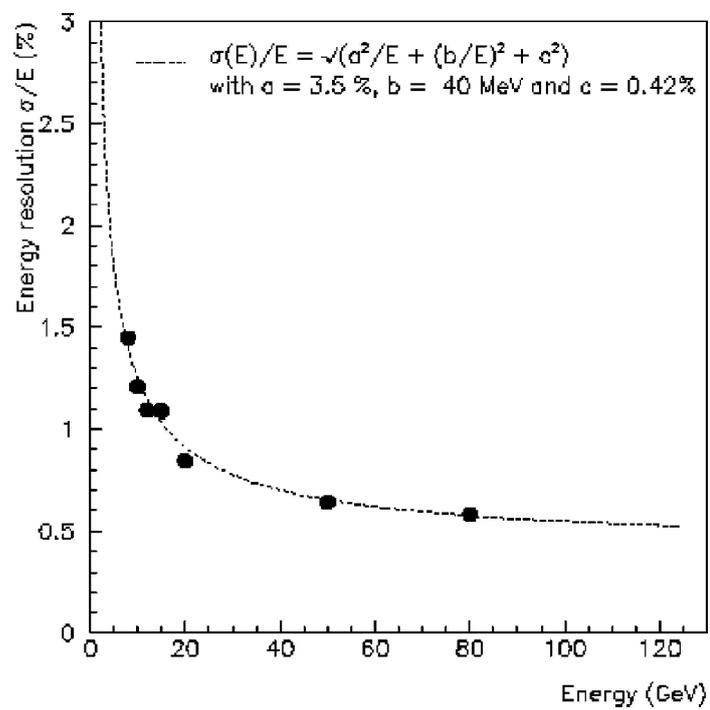


Figura 1.14: Risoluzione energetica in funzione dell'energia per il calorimetro a kripton liquido di NA48 [2].

Capitolo 2

Jack e la sua caratterizzazione in laboratorio

Una tra le prime quantità da misurare per la caratterizzazione di un rivelatore è l'*efficienza* di rivelazione, definita come il rapporto tra il numero di particelle che hanno prodotto un segnale distinguibile all'interno del calorimetro, rispetto a quante hanno attraversato il suo volume sensibile. Questo tipo di misura può essere effettuata in qualsiasi laboratorio, sfruttando i raggi cosmici.

I *raggi cosmici* sono una forma di radiazione ad alte energie che ha origine nello spazio galattico ed extragalattico e che si muove a velocità prossime a quelle della luce raggiungendo corpi celesti, tra cui anche la Terra [16].

I raggi cosmici costituiscono a tutti gli effetti una sorgente di particelle con energie comparabili o superiori a quelle di un fascio collimato prodotto da un acceleratore. Il vantaggio dei raggi cosmici è che sono una sorgente naturale e gratuita, con un flusso pressoché costante e disponibili ovunque; lo svantaggio è invece che non si ha alcun controllo sulla loro composizione, così come sulla distribuzione angolare e non sono un fascio collimato. Inoltre l'intensità dei raggi cosmici risulta essere di gran lunga inferiore a quella che si può avere con un fascio da acceleratore.

I raggi cosmici primari sono costituiti per il 90% da protoni, per il restante 10% da nuclei di elio e in minima parte da fotoni, elettroni ed altri nuclei leggeri. A livello del mare invece arrivano principalmente muoni, prodotti nell'interazione delle particelle primarie in alta atmosfera, con energia dell'ordine di qualche GeV, che risultano quindi essere MIP. Una stima del flusso medio è data da

$$\Phi = 10^4 \frac{\text{particelle}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad (2.1)$$

mentre la distribuzione angolare rispetto alla normale alla superficie terrestre è la seguente:

$$f(\theta) = \frac{4}{\pi} \cos^2 \theta \quad \text{con } \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (2.2)$$

ove il prefattore ha lo scopo di garantire la normalizzazione. La distribuzione rispetto all'angolo azimutale è uniforme $f(\varphi) = 1/2\pi$ [17] [18].

In questo capitolo verrà dapprima descritto il calorimetro utilizzato per questo lavoro di tesi. Successivamente si descriveranno i test effettuati in laboratorio con i raggi cosmici: verrà illustrato il setup sperimentale e quindi l'analisi dei dati acquisiti.

2.1 Il calorimetro shashlik Jack

"Jack" è un calorimetro elettromagnetico a campionamento di tipo shashlik. I calorimetri shashlik sono una sottofamiglia dei calorimetri a campionamento, costituiti da un'alternanza di strati di materiale assorbitore e scintillante, letti tramite fibre WLS (WaveLength Shifter [19] [20]), che attraversano il calorimetro in tutta la sua lunghezza. Il loro scopo è quello di raccogliere e trasmettere la luce di scintillazione, modificando la lunghezza d'onda delle componenti nell'ultravioletto e adattandola all'intervallo di maggiore sensibilità del fotomoltiplicatore.

Jack è costituito da 70 strati di scintillatore plastico spesso 4 mm, intervallati da 69 strati di piombo zincato da 1.5 mm ciascuno, per un totale di circa 19 lunghezze di radiazione; il raggio di Molière è di circa 6 cm. Ogni strato ha sezione quadrata di lato pari a 11.5 cm. Il volume sensibile del calorimetro è incapsulato in un involucro di alluminio spesso 1 cm che ricopre la parte superiore ed inferiore. In figura 2.1 sono mostrati lo schema laterale e frontale del calorimetro.

Al suo interno, in direzione perpendicolare ai vari strati, sono inserite 144 fibre WLS Saint-Gobain BCF-92 [21] di diametro 1.2 mm, in una matrice di 12×12 fori a passo di 1 cm in modo tale che ciascuna fibra raccolga la luce proveniente da tutti i piani di scintillatore. Le fibre sono quindi state raggruppate in due supporti plastici contenenti 72 fibre ciascuno ed accoppiate a due tubi fotomoltiplicatori (PMT), rispettivamente di modello Hcz photonics Xp2262 [22] e Hamamatsu R1828-01 [23]. La tabella 2.1 riporta le caratteristiche delle fibre utilizzate. Le tile di scintillatore non sono segmentate ulteriormente e quindi tutte le fibre, seppur con efficienza diversa, vedono la luce prodotta dal passaggio di una particella. La tabella 2.2 invece riporta alcune specifiche dei PMT. In figura 2.2 sono riportate alcune foto del rivelatore, mentre la figura 2.3 mostra come sono state raggruppate le

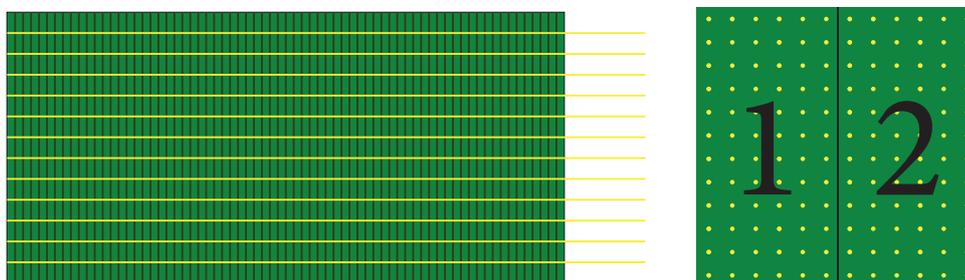


Figura 2.1: Schema laterale (sinistra) e frontale (destra) del calorimetro Jack. In verde sono rappresentati gli strati di scintillatore plastico, mentre in grigio gli strati di assorbitore. In giallo sono state disegnate le fibre WLS. I numeri si riferiscono ai due diversi canali di lettura.

fibre: un supporto circolare stampato in 3D in delrin più grosso nel quale sono incastrate 18 boccole più piccole, ciascuna delle quali raccoglie 4 fibre.

Tabella 2.1: Caratteristiche delle fibre WLS [21].

Produttore	Saint-Gobain
Modello	BCF-92
Colore di emissione	Verde
Picco di emissione	492 nm
Tempo di decadimento	2.7 ns
Caratteristiche/applicazioni	Fast blue to green shifter

2.2 Setup sperimentale

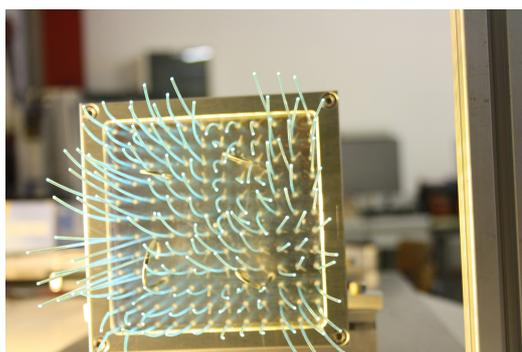
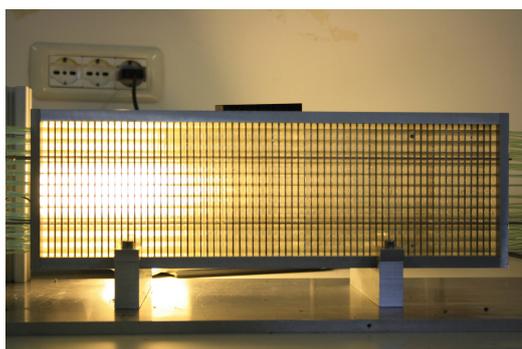
Nel laboratorio INSULAB dell'Università degli Studi dell'Insubria sono stati allestiti due setup in grado di caratterizzare il calorimetro Jack sfruttando i raggi cosmici. Nelle figure 2.4 e 2.5 sono riportati gli schemi in cui si possono vedere i vari rivelatori presenti e le distanze relative. Nel secondo setup erano presenti anche altri rivelatori sotto test, irrilevanti ai fini di questo lavoro di tesi.

Le componenti principali utilizzate, comuni ad entrambi i setup, sono state le seguenti:

- due scintillatori plastici (S1 e S2) di $10 \times 10 \text{ cm}^2$ nel primo setup e $20 \times 20 \text{ cm}^2$ nel secondo letti da PMT, utilizzati in coincidenza, per

Tabella 2.2: Caratteristiche dei PMT.

Caratteristica	Xp2262	R1828-01
Diametro del tubo	51 mm	51 mm
Lunghezza d'onda (corta)	290 nm	300 nm
Lunghezza d'onda (lunga)	650 nm	650 nm
Lunghezza d'onda (picco)	420 nm	420 nm
Materiale della finestra	vetro soda-lime	vetro borosilicato
Materiale del fotocatodo	Bialkali	Bialkali
Numero di dinodi	12	12
Struttura dei dinodi	A focalizzazione lineare	A focalizzazione lineare
Tensione di alimentazione anodo-catodo	1800 V	2500 V
Massima tensione anodo-catodo	2400 V	3000 V
Corrente di buio anodica	10 nA	50 nA

**(a)****(b)****Figura 2.2:** Fotografie del calorimetro Jack: (a) vista frontale; (b) vista laterale.

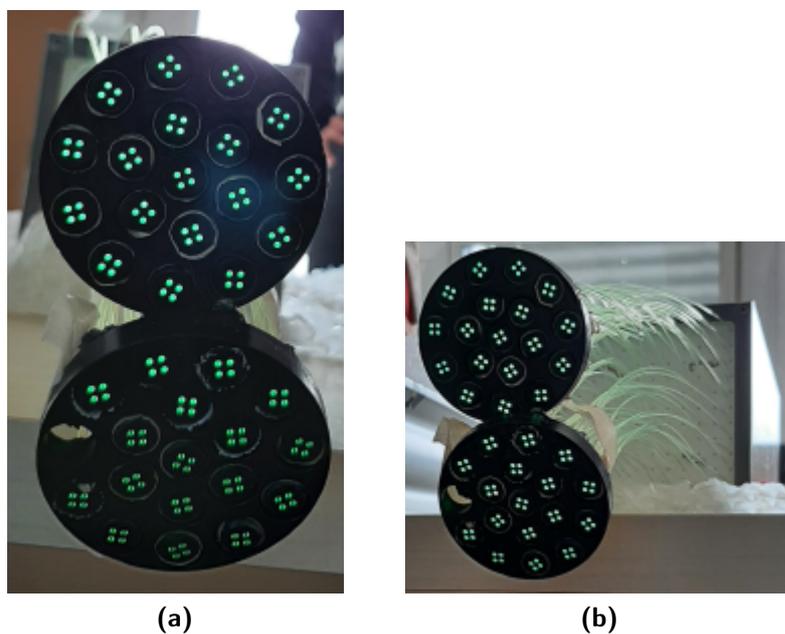


Figura 2.3: Particolare dei supporti plastici che vengono accoppiati ai PMT, in cui si vede come sono state raggruppate le fibre del calorimetro Jack.

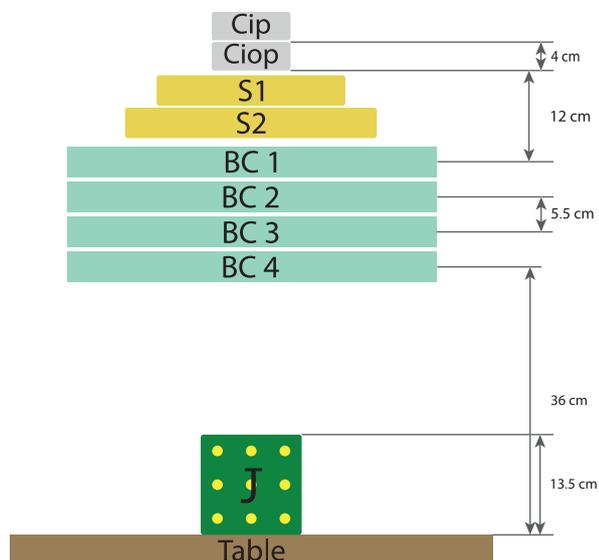


Figura 2.4: Rappresentazione schematica del primo setup in laboratorio. Cip/Ciop e S1/S2: scintillatori plastici; BC: camere a microstrip di silicio; J: calorimetro Jack.

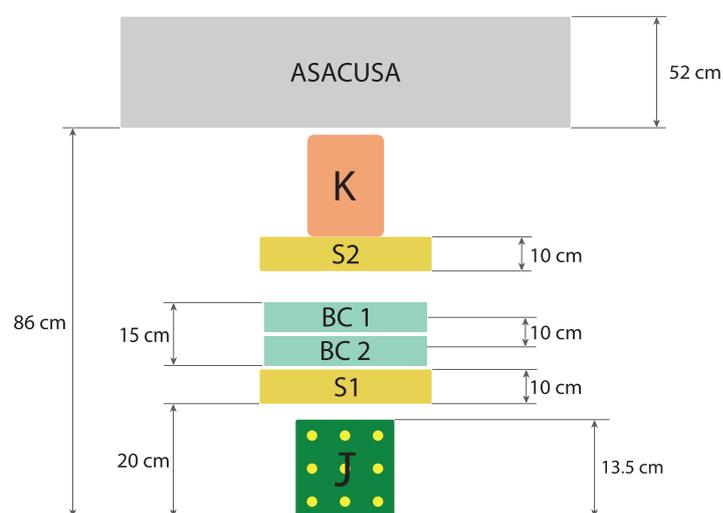


Figura 2.5: Rappresentazione schematica del secondo setup in laboratorio. S1/S2: scintillatori plastici; BC1/BC2: camere a microstrip di silicio; J: calorimetro Jack; ASACUSA: modulo con barre di scintillatore plastico; K: calorimetro Cherenkov "Kowalski". Gli ultimi due rivelatori non sono stati utilizzati per questo lavoro di tesi.

generare il trigger dell'acquisizione. La loro differente distanza relativa, tra il primo e il secondo setup, determina una diversa accettazione angolare rispetto ai raggi cosmici incidenti. I segnali provenienti dagli scintillatori vengono discriminati e messi in coincidenza per generare il trigger dell'intero sistema, realizzato mediante una scheda VME (VERSAbus Module Eurocard) dedicata.

- due (o quattro) rivelatori a microstrip di silicio (Beam Chamber, BC), il cui scopo è ricostruire la traiettoria dei raggi cosmici (figura 2.6). Per poter misurare l'efficienza di generazione e raccolta della luce del calorimetro, è necessario misurare con precisione numero e direzione delle particelle incidenti, per capire quante hanno attraversato il rivelatore sotto esame.

Nel primo setup, ciascuno dei quattro moduli è costituito da due piani di silicio di $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$, con microstrip orientate in direzioni perpendicolari tra loro, in modo da ricostruire la posizione di passaggio delle particelle lungo la direzione x e y . Ogni piano è spesso $410 \mu\text{m}$ ed è costituito da 384 strip (con una *strip floating*), i cui segnali sono letti da tre ASIC (Application Specific Integrated Circuit) TAA1. La risoluzione spaziale delle BC è di circa $30 \mu\text{m}$. La tabella 2.3 riporta le specifiche dei rivelatori [24].

Per quanto riguarda il secondo setup sono stati utilizzati due rivelatori di maggiori dimensioni; la figura 2.7 presenta una foto di uno dei piani di rivelazione. Si tratta di 4 rivelatori di $8.9 \times 8.9 \text{ cm}^2$ prodotti dalla ST Microelectronics, accoppiati a 2 a 2 per realizzare delle "ladder" lunghe 19 cm, con passo di lettura di $456 \mu\text{m}$ e una strip floating. L'area attiva risulta 4 volte più estesa rispetto alle beam chamber. La tabella 2.4 riporta le specifiche di questi tracciatori al silicio.

Tabella 2.3: Specifiche dei rivelatori al silicio delle *beam chamber*.

Numero di strip per lato	384
Spessore	$410 \mu\text{m}$
Dimensioni	$9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$
Passo fisico	$121 \mu\text{m}$
Passo di lettura	$242 \mu\text{m}$
Resistenza di polarizzazione	$40 \text{ M}\Omega$
Capacità di accoppiamento	527 pF
Corrente di buio	1.5 nA

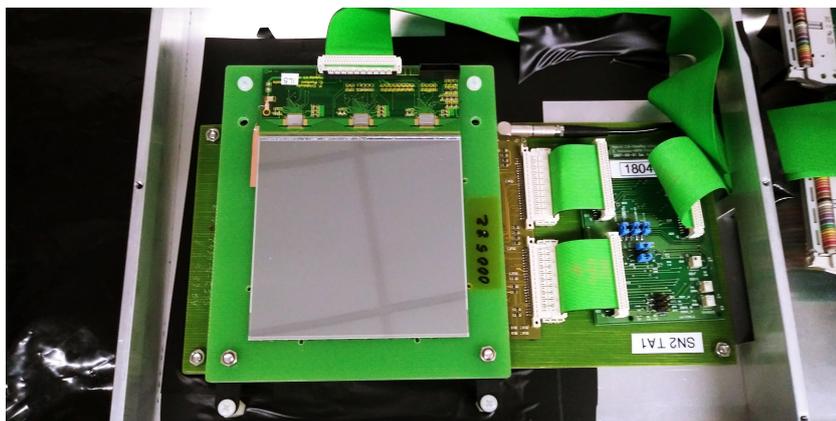


Figura 2.6: Foto di una beam chamber a microstrip di silicio.

Tabella 2.4: Specifiche dei rivelatori al silicio del secondo setup.

Numero di strip per lato	384
Spessore	410 μm
Dimensioni	18 \times 18 cm^2
Passo fisico	228 μm
Passo di lettura	456 μm
Croce centrale (area non attiva)	2 mm

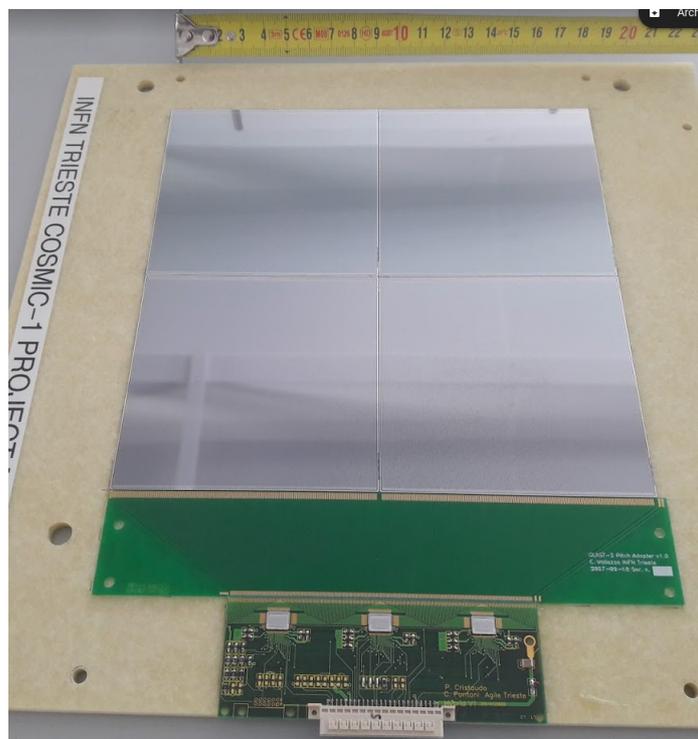


Figura 2.7: Uno dei piani dei rivelatori a microstrip di silicio del secondo setup.

Il sistema di acquisizione è basato sullo standard VME ed è controllato da un PC tramite una scheda di interfaccia SBS Bit3. Ogni beam chamber è letta tramite una scheda VRB (VME Readout Board); una delle schede agisce da master nei confronti delle altre (slave). Le schede VRB hanno le seguenti funzioni [25]:

- la scheda master riceve il segnale di trigger generato dalla coincidenza dei segnali prodotti dai due scintillatori e genera il segnale di "busy", che a sua volta agisce da trigger per le schede slave e per il digitizer utilizzato per la lettura dei due PMT (vedi punto successivo)
 - ogni scheda VRB genera un segnale di "hold", che campiona nel punto di massimo della pulse height il segnale analogico delle strip
 - nella fase di readout i segnali in output vengono digitalizzati da schede ADC dedicate e inviati alle rispettive schede VRB, dove sono inseriti in un buffer temporaneo nel quale rimarranno fino all'invio su PC tramite bus VME.
- il calorimetro Jack, ovvero il rivelatore che si vuole caratterizzare, è stato posizionato con le fibre WLS perpendicolari alla direzione verticale: in questo modo i raggi cosmici con angoli piccoli rispetto alla verticale non attraverseranno i vari strati di scintillatore e assorbitore.

I due PMT sono collegati al CAEN DT5730 [26], un digitizer ad 8 canali, a 14 bit con una frequenza di campionamento pari a 500 Ms^{-1} , come quello presentato nella figura 2.8. Il digitizer, collegato al PC di acquisizione mediante fibra ottica, campiona il segnale analogico e restituisce il massimo del segnale e l'istante di tempo rispetto al trigger all'interno di una finestra di acquisizione regolabile.

Il sistema di acquisizione dati (DAQ) acquisisce i segnali provenienti dai rivelatori e li salva su un PC in file in formato HBOOK [27]. Tali file vengono processati da una procedura online che seleziona gli eventi nei quali è presente una singola particella e produce un file ASCII in cui ogni riga corrisponde ad un evento mentre ogni colonna corrisponde ad una diversa quantità misurata: 2 colonne per ciascun silicio, contenenti le coordinate x e y del punto di impatto, 8 pulse height e 8 tempi relativi agli 8 canali del digitizer, tempo dall'inizio del run e tempo assoluto¹.

Per selezionare la singola particella, la procedura ricostruisce per ogni piano di silicio il cluster, ovvero l'insieme delle microstrip che hanno raccolto

¹Numero di secondi trascorsi dal 1 Gennaio 1970.

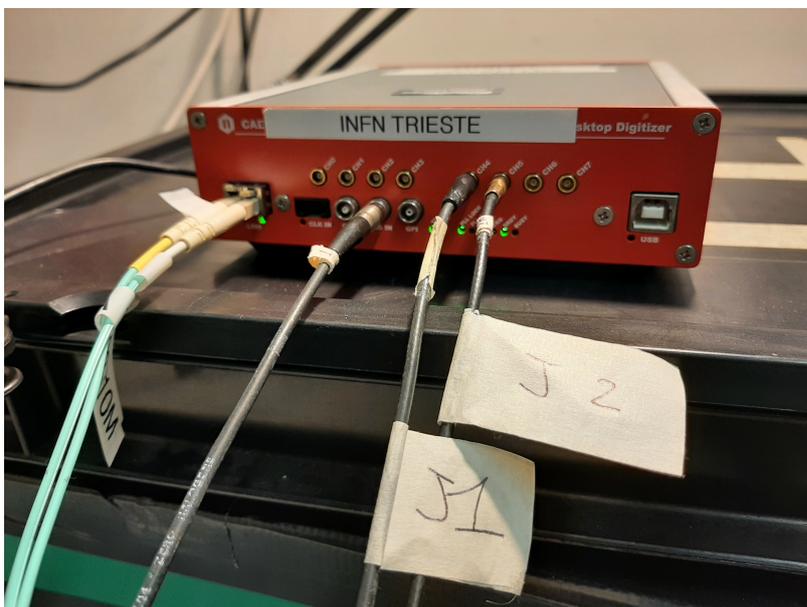


Figura 2.8: Digitizer CAEN DT5730 utilizzato per la lettura dei due PMT. Si possono notare in particolare i due cavi LEMO inseriti nei canali 5 e 6.

il segnale corrispondente al deposito di energia della particella stessa, e ne calcola la posizione tramite il baricentro della carica depositata.

2.3 La misure di efficienza

Le misure effettuate con i due setup descritti nella sezione precedente sono volte in prima analisi a stimare l'*efficienza* del rivelatore, definita come il rapporto tra il numero di particelle rivelate dallo strumento rispetto al numero totale di particelle incidenti.

2.3.1 Analisi dei dati del primo setup

2.3.1.1 Ricostruzione delle tracce

Per poter stabilire il numero di particelle che sono passate attraverso Jack è necessario *ricostruire la traiettoria* delle particelle stesse. Sono stati utilizzati i dati relativi ai punti di impatto sui rivelatori a microstrip di silicio BC1 e BC4; tracciando una retta per due punti e conoscendo le distanze

relative tra i vari rivelatori presenti nel setup², è stato possibile ricostruire la traccia nei piani zOx e zOy , essendo z la direzione verticale (figura 2.9):

$$y(z) = \frac{y_4 - y_1}{\Delta z} z + y_1 \quad (2.3)$$

dove $\Delta z = 16.5$ cm.

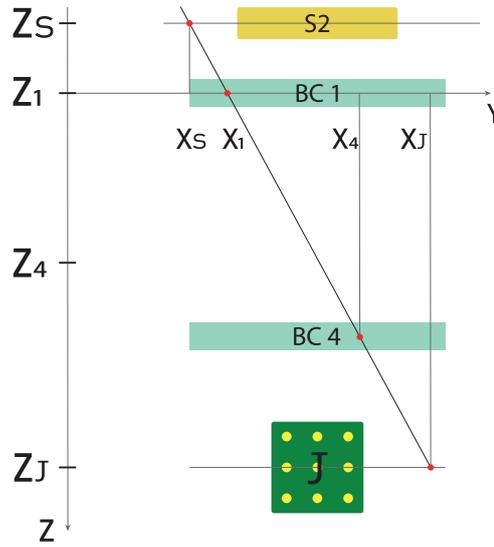


Figura 2.9: Schema del sistema di riferimento per la ricostruzione delle tracce.

La figura 2.10 riporta la proiezione delle tracce sul piano dello scintillatore: si può notare un addensamento in una regione quadrata di lato 10 cm, che corrisponde alla dimensione dello scintillatore di trigger impiegato; questa è una verifica che si stanno ricostruendo le tracce in modo autoconsistente.

È quindi stato costruito il profilo dei raggi cosmici, ovvero la distribuzione dei punti di impatto in x e y sul piano di BC1 (figura 2.11); la figura 2.12 presenta la distribuzione delle particelle stesse nel piano xOy . L'angolo rispetto alla verticale nei piani zOx e zOy è dato da:

$$\theta = \arctan \left(\frac{y_4(x_4) - y_1(x_1)}{\Delta z} \right) \quad (2.4)$$

²I vari rivelatori sono estesi anche in direzione z : sono stati approssimati come un piano esteso in direzione xy , collocato a metà della loro altezza.

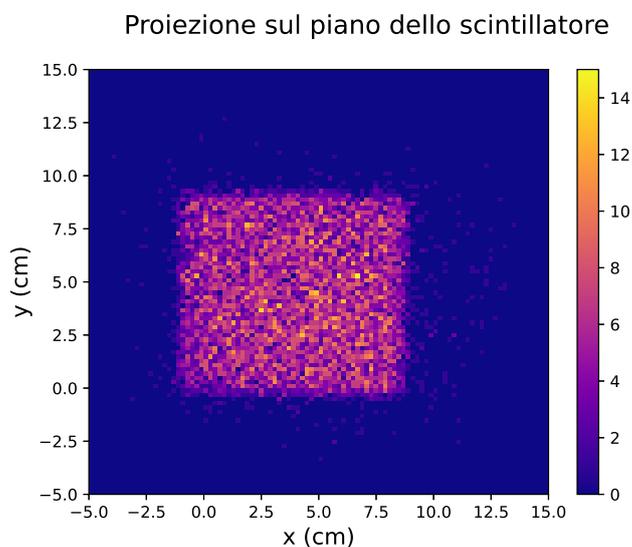


Figura 2.10: Ricostruzione delle tracce sul piano dello scintillatore di trigger.

La figura 2.13 riporta la distribuzione angolare dei raggi cosmici a cui è stato sovrapposto il fit nella regione centrale con l'andamento generale previsto dalla (2.2). Si noti come nei plot precedenti non siano stati considerati tutti i raggi cosmici incidenti sulla superficie di BC1: l'accettanza angolare risultava limitata dal fatto che una singola particella doveva attraversare lo scintillatore di trigger affinché l'evento venisse acquisito ed anche la camera BC4, utilizzata per la ricostruzione della traiettoria. Questo fatto è visibile in particolar modo nel profilo dei raggi cosmici: anziché essere uniforme come atteso, presenta un picco al centro e decresce spostandosi verso i bordi. Una particella incidente nelle regioni centrali ha un'accettanza angolare maggiore rispetto ad una particella che incide sul bordo.

2.3.1.2 Selezione degli eventi e calcolo dell'efficienza

Per poter calcolare l'efficienza è necessario stabilire quanti eventi sono stati visti da Jack rispetto al numero di particelle che hanno attraversato il suo volume sensibile. Per questa misura sono stati messi insieme tre differenti file acquisiti nelle medesime condizioni, per un totale di circa 12 000 raggi cosmici. La figura 2.14 mostra il biplot delle *pulse height* (PH) rispetto ai tempi: la pulse height è data semplicemente dal massimo del segnale in unità di ADC, mentre il tempo è l'istante del massimo del segnale analogico, misurato rispetto al trigger. Basandosi su questo plot è possibile distinguere il segnale dal rumore effettuando sia un *taglio in tempo* che un *taglio in PH*. Si

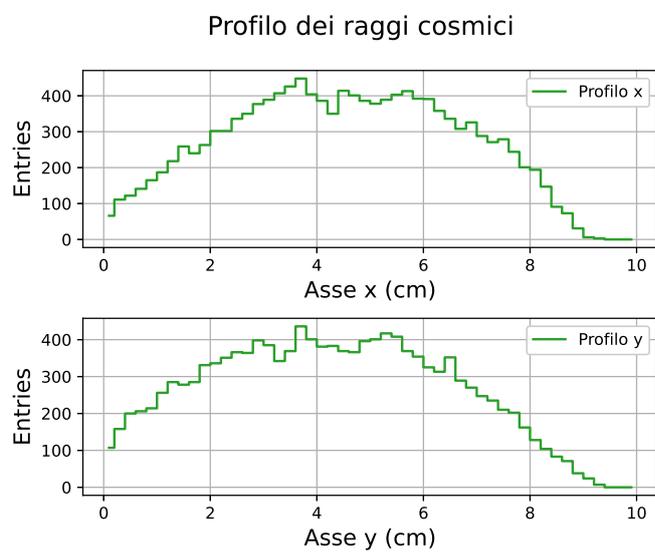


Figura 2.11: Profilo dei raggi cosmici sul piano di BC1.

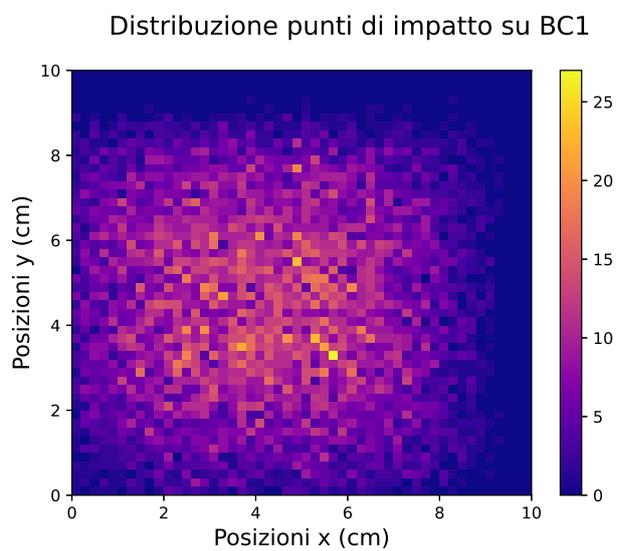


Figura 2.12: Distribuzione dei punti di impatto sul piano di BC1.

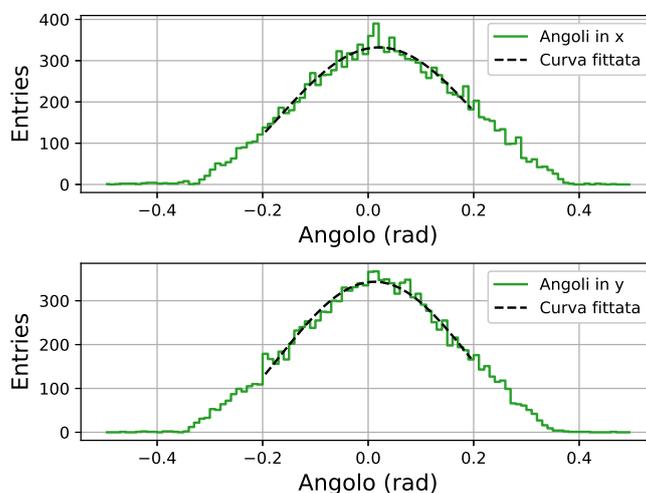


Figura 2.13: Distribuzione angolare dei raggi cosmici. In nero è stato sovrapposto il fit con la funzione $A \cos(Bx + c)$ per verificare l'andamento previsto dalla (2.2).

può in particolare notare come a basse PH vi sia una distribuzione uniforme nel tempo: tali eventi corrispondono ad eventi in assenza di particelle (noise). Superata quella soglia in PH, si hanno eventi solamente in una limitata banda di tempi: il valore assoluto dipende dalla lunghezza dei cavi, dalla propagazione del segnale nella catena elettronica e dal pretrigger (numero di campionamenti salvati, prima dell'arrivo del trigger), mentre la larghezza dipende dal timewalk dei discriminatori di trigger.

La figura 2.15 riporta la distribuzione dei tempi con anche l'intervallo scelto, mentre la figura 2.16 presenta la distribuzione delle pulse height con la soglia di taglio, che permette di separare il rumore dal segnale dovuto al passaggio di una particella.

La figura 2.17 presenta la distribuzione della pulse height del primo canale in funzione della distribuzione della pulse height del secondo canale, ovvero sono state studiate le correlazioni tra le ampiezze dei due canali. Si possono notare due addensamenti, il primo in corrispondenza di $y = 1000$ mentre il secondo in corrispondenza di $x = 1600$, che risultano essere in anti-coincidenza: per come è costruito e posizionato il rivelatore, l'energia depositata da una particella che attraversa il calorimetro non al centro (rispetto alla dimensione perpendicolare alla sua lunghezza) verrà rivelata preferibilmente da uno dei due canali.

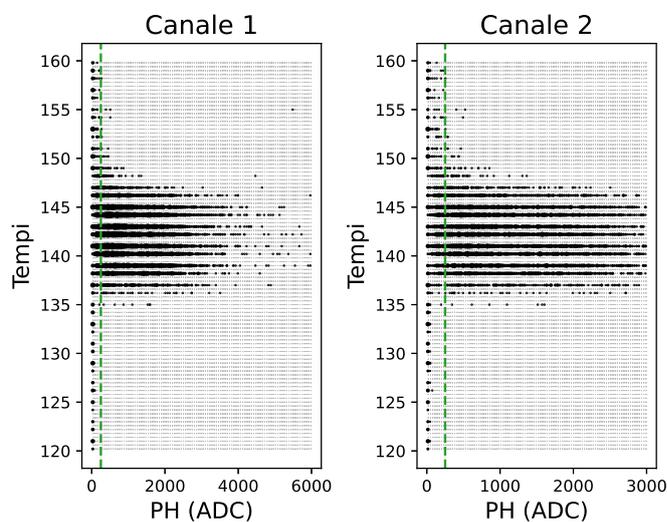


Figura 2.14: Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi. In verde è stata rappresentata la soglia di taglio in pulse height.

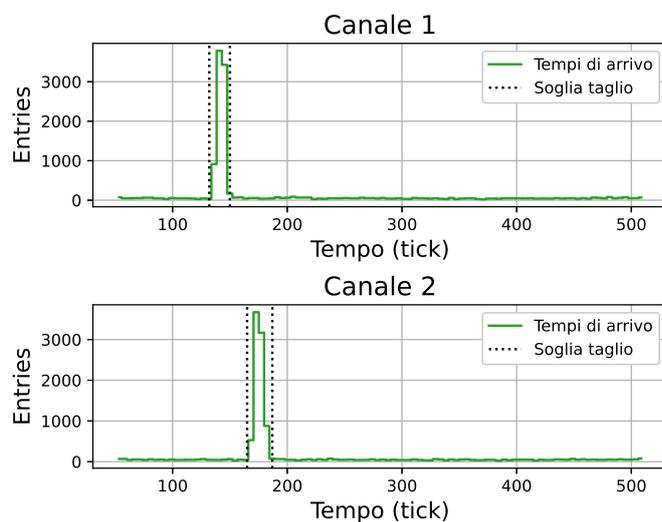


Figura 2.15: Distribuzione dei tempi del massimo. In nero è stata rappresentata la regione considerata. Ogni tick corrisponde a 2 ns.

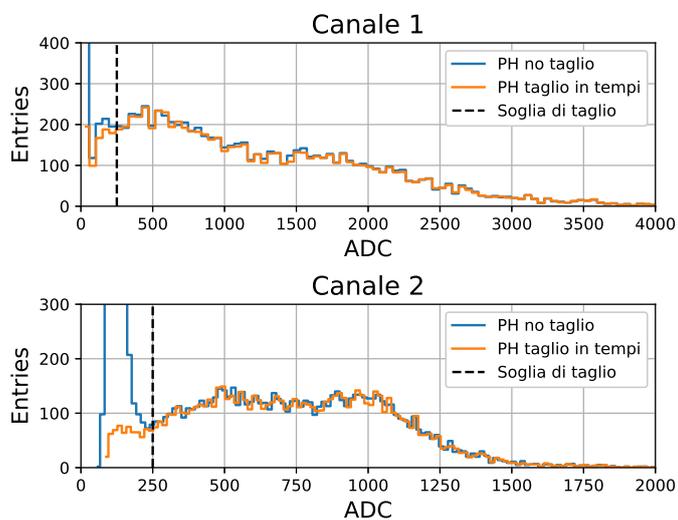


Figura 2.16: Distribuzione delle pulse height con e senza taglio in tempo. In nero è stata rappresentata la soglia di taglio in pulse height, ovvero la soglia sopra la quale si ritiene che un evento corrisponda a segnale.

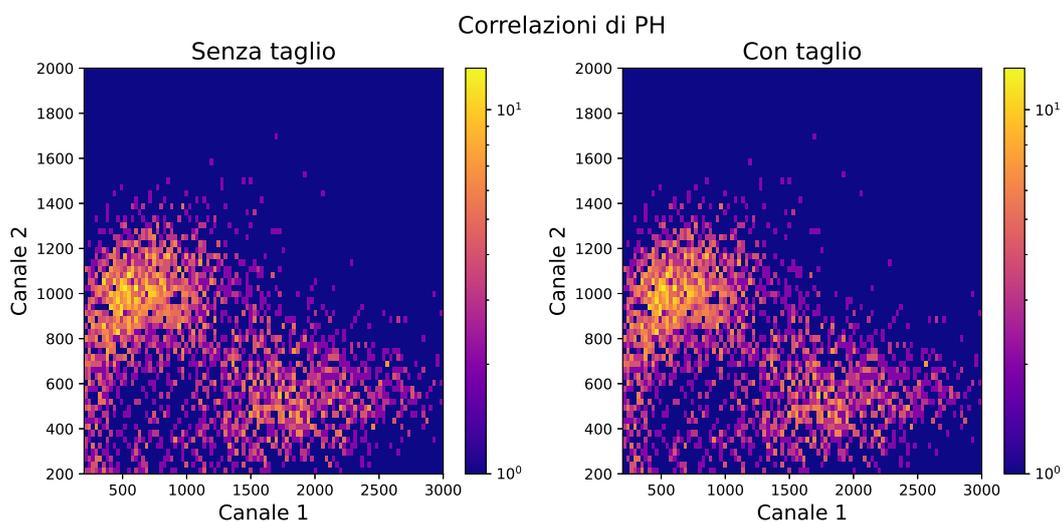


Figura 2.17: Correlazioni di pulse height. La figura a sinistra è riferita a tutti i dati acquisiti, mentre per quella a destra sono stati operati tagli in tempo e pulse height sui singoli canali.

La figura 2.18 presenta le pulse height riscalate dei due canali di Jack in funzione della coordinata y ovvero quella che va dal canale 1 al canale 2. Per costruire questo grafico, dopo aver equalizzato il secondo canale, moltiplicandolo per il rapporto tra il picco più alto del canale 1 e del canale 2, è stato operato sia il taglio in pulse height che una selezione angolare, considerando angoli nell'intervallo $[-0.1, 0.1]$ rad rispetto alla verticale. Anche in questo grafico si può notare come le PH siano anticorrelate, ovvero se una particella rilascia la sua energia da un lato, questa sarà vista solamente da uno dei due PMT. Questo grafico costituisce un possibile modo per stimare il punto di incidenza della particella.

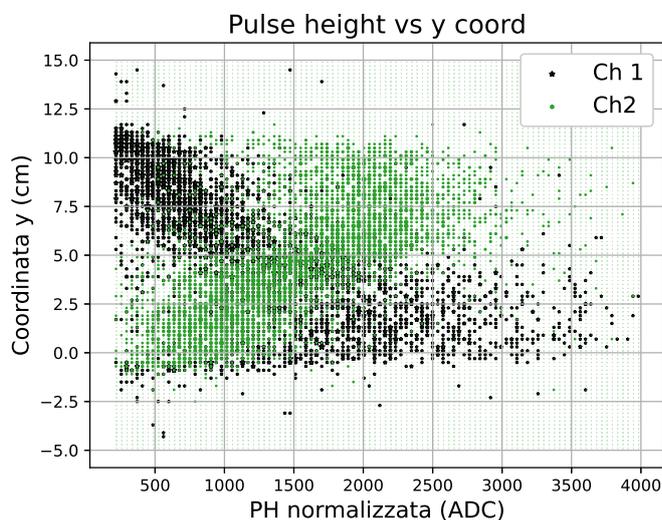


Figura 2.18: Pulse height in funzione della coordinata y .

L'ultimo step prima di poter calcolare l'efficienza consiste nello stabilire la condizione per ritenere un evento come "visto" dal calorimetro. Oltre al taglio in tempo, si è richiesto che la pulse height di almeno uno dei due PMT fosse sopra la soglia fissata in precedenza, ovvero è stato eseguito l'OR logico tra i due canali. È quindi stata costruita la distribuzione dei punti di impatto su Jack con e senza la condizione: il rapporto di queste due distribuzioni costituisce la *mappa di efficienza* (figura 2.19), ovvero il rapporto tra il numero di particelle rivelate dal calorimetro e il numero di particelle che l'hanno attraversato.

Per poter valutare quantitativamente l'efficienza, sono state effettuate le medie per righe e per colonne della precedente matrice, quindi è stato

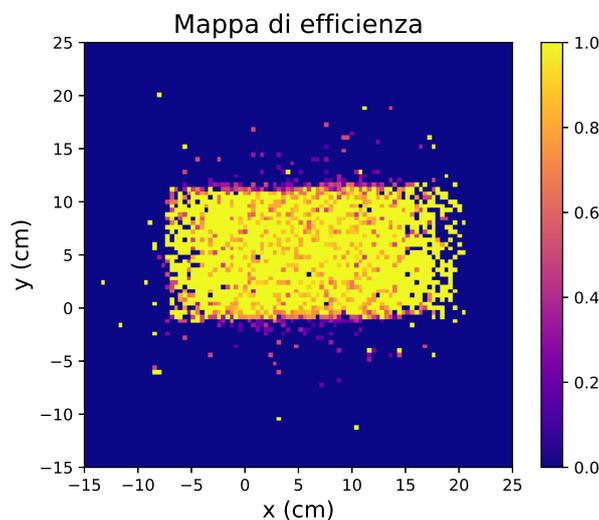


Figura 2.19: Mapa di efficienza.

effettuato un fit costante nella regione piatta (figura 2.20). In entrambi i casi il valore del fit è risultato del $(95 \pm 0.3) \%$.

L'efficienza così calcolata è da intendersi come una convoluzione dell'efficienza del materiale scintillante e delle fibre WLS e dell'accoppiamento di queste ultime ai PMT: il calorimetro infatti non è impiegato nel modo usuale ovvero con un fascio che incide perpendicolarmente ai piani e che deposita l'intera energia all'interno.

La misura effettuata con i raggi cosmici ha consentito di studiare l'efficienza di rivelazione delle MIP da parte del calorimetro, tuttavia non consente di stimare la risoluzione energetica per la quale è necessario un fascio di elettroni. Nel prossimo capitolo verrà descritta la misura effettuata su un fascio di elettroni presso il CERN.

2.3.2 Analisi dei dati del secondo setup

Nell'ottobre del 2021 Jack è stato posto sotto test una seconda volta in laboratorio con i raggi cosmici, acquisendo dati per un mese consecutivo: sono stati acquisiti più di 250 000 eventi. Con la grande statistica a disposizione si voleva verificare se fosse possibile distinguere gli strati di scintillatore plastico dagli strati di piombo.

La matrice assemblata presenta una piccola zona morta a forma di croce e larga circa 2 mm nella zona di raccordo tra due ladder. Tale croce può essere

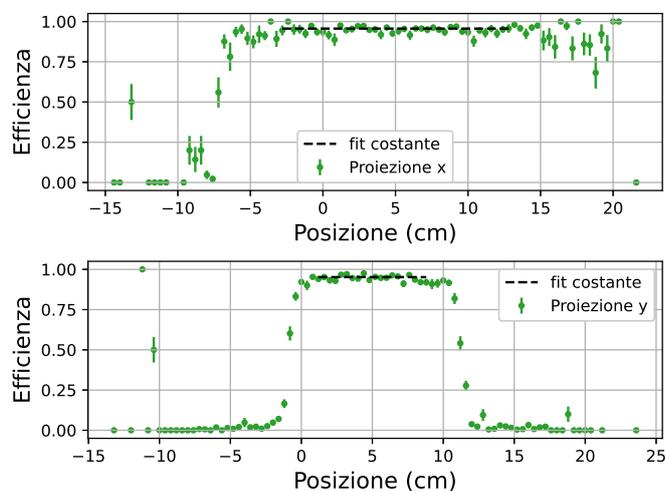


Figura 2.20: Proiezioni per righe e per colonne della mappa di efficienza. In nero è stato sovrapposto il fit costante nella regione centrale.

notata non solo nella fotografia (figura 2.7) ma anche nel profilo dei raggi cosmici (figura 2.21) e nella mappa dei punti di impatto sul primo piano di rivelazione (figura 2.22).

Per capire se vi fosse la possibilità di identificare i piani, è stata costruita una mappa di efficienza come quella descritta nella sezione precedente, nell'ottica di rivelare una modulazione dell'efficienza stessa nella direzione perpendicolare ai vari strati.

Procedendo sulla falsariga di quanto già descritto in precedenza, il primo passo è stato lo studio del biplot (figura 2.23) relativo alla distribuzione delle pulse height rispetto ai tempi: a partire da questo grafico è stata stabilita una soglia in PH e un intervallo di tempi, che consente di considerare un evento come associato al passaggio di una particella. La figura 2.24 presenta la distribuzione dei tempi e delle PH con la relativa soglia.

La statistica raccolta non ha permesso l'utilizzo di un binning dell'istogramma sufficientemente fitto per identificare i singoli piani come si vedrà in seguito.

La figura 2.25 presenta la mappa di efficienza con i due canali in OR, ovvero è stato richiesto che almeno uno dei due canali avesse una PH superiore alla soglia e un tempo nell'intervallo scelto. Al centro si può distinguere chiaramente il calorimetro Jack, di forma rettangolare. Nella parte inferiore del plot si nota la presenza delle fibre WLS che portano la luce ai PMT. Le

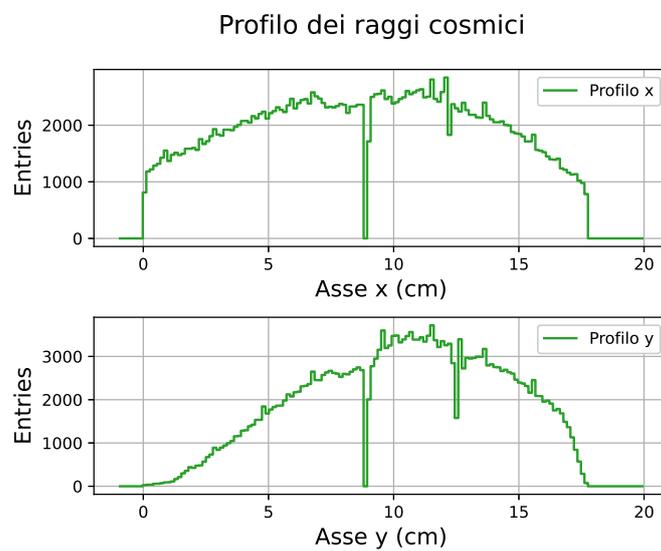


Figura 2.21: Profilo dei raggi cosmici sul piano del rivelatore 1 del secondo setup: si può notare la presenza della zona morta in corrispondenza di $x = 9$ cm e $y = 9$ cm.

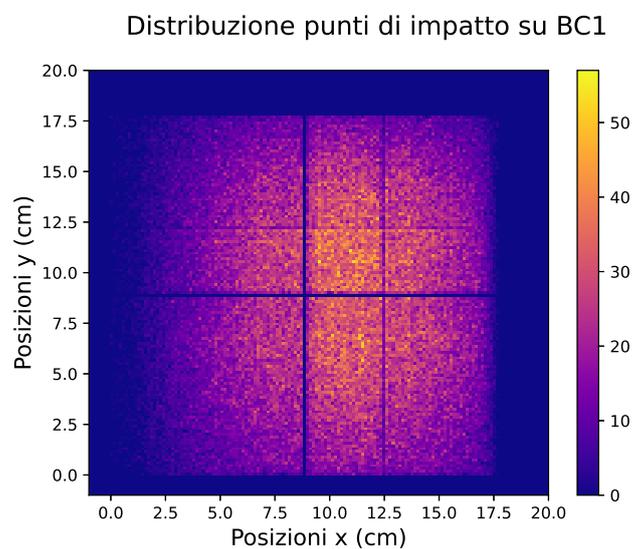


Figura 2.22: Distribuzione dei punti di impatto sul piano del primo rivelatore del secondo setup.

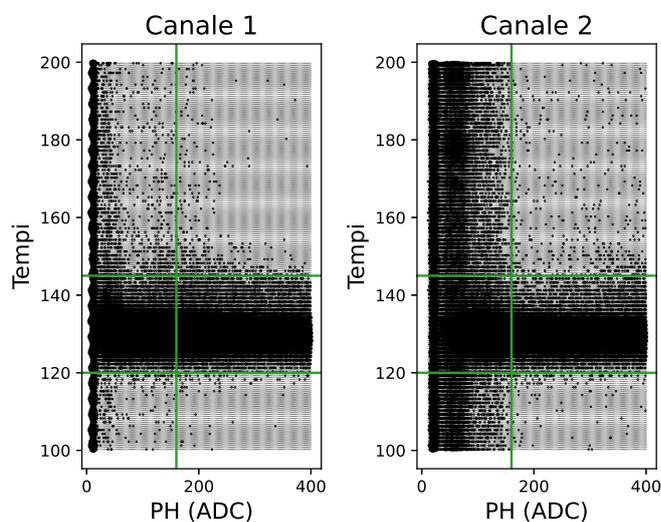


Figura 2.23: Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi. In verde è stata rappresentata la soglia di taglio in pulse height e l'intervallo di tempi scelto.

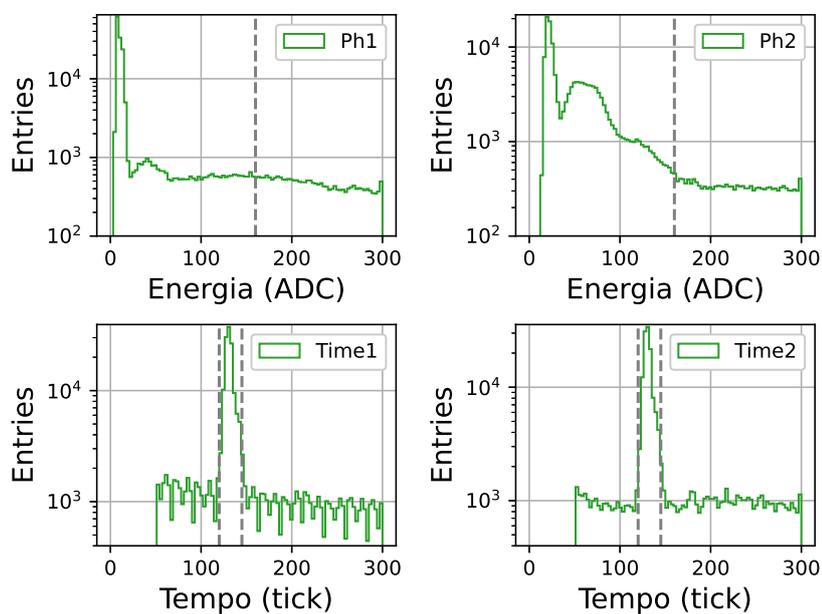


Figura 2.24: Zoom della distribuzione delle pulse height e dei tempi relativi ai due canali di Jack. La linea tratteggiata indica la soglia di taglio in PH e l'intervallo di tempi considerato. Un tick equivale a 2 ns.

fibre sono infatti a loro volta debolmente scintillanti e, se colpite da una particella, possono emettere luce che viene rivelata.

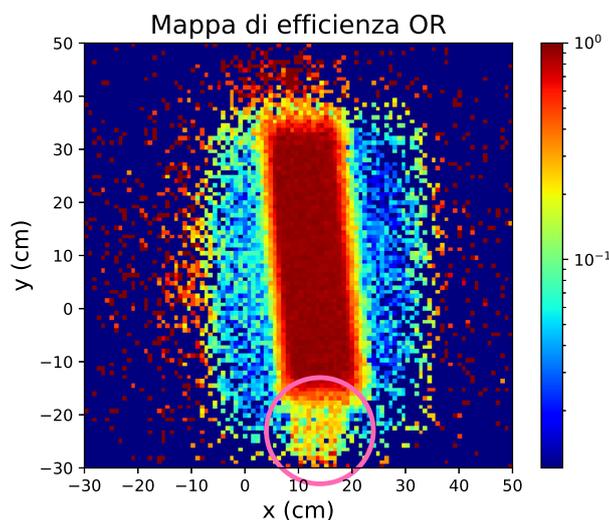


Figura 2.25: Mappa di efficienza con i due canali in OR: nella parte inferiore del calorimetro (regione cerchiata) si possono distinguere le fibre WLS che escono dal calorimetro.

La figura 2.26 presenta la mappa di efficienza con i due canali in AND: non più solo un canale ma entrambi i canali devono soddisfare il taglio in tempo e PH. Si può notare come il calorimetro sia ancora chiaramente visibile, tuttavia non è più uniforme ma viene privilegiata la regione centrale: questo è dovuto al fatto che una particella incidente al centro è più probabile che depositi sufficiente energia per mandare entrambi i canali sopra soglia rispetto ad una particella incidente in una regione laterale, dove la maggior parte dell'energia sarà raccolta solamente dal lato in cui arriva.

La figura 2.27 presenta la mappa di efficienza sempre con i due canali in OR, ma nel caso in cui vengano selezionati bassi valori per la PH: in questo caso si vede emergere il perimetro del calorimetro. Una particella che passa attraverso il bordo potrebbe non attraversare il calorimetro per tutta la sua altezza ma solo per una parte, e quindi depositare meno energia.

Da tutte e tre le figure presentate in precedenza si può notare come il calorimetro sia ruotato rispetto agli assi. È stata quindi operata una rotazione alle coordinate tramite la matrice di rotazione

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

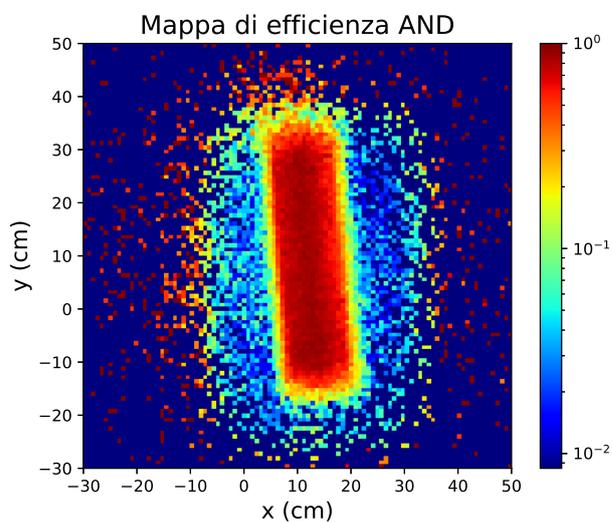


Figura 2.26: Mappa di efficienza con i due canali in AND: si può notare come in questo caso il calorimetro non appaia più uniforme ma viene privilegiata la regione centrale.

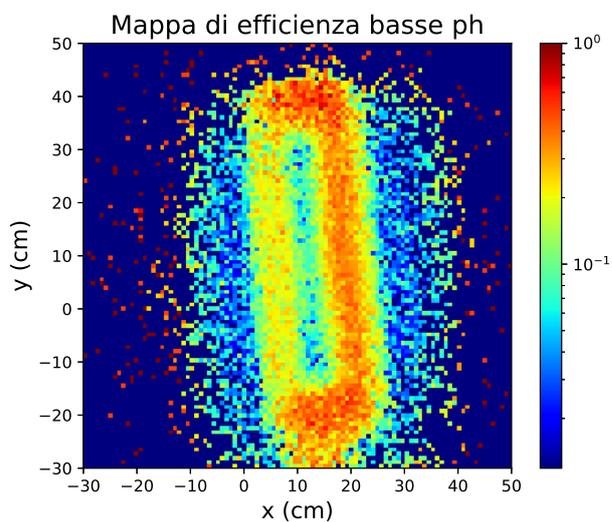


Figura 2.27: Mappa di efficienza con i due canali in OR selezionando basse PH: si può distinguere il bordo esterno del calorimetro

variando θ a step di 0.5° fino a quando il rettangolo non risultasse allineato con gli assi. La figura 2.28 presenta la mappa di efficienza con i canali in OR già descritta ma con le coordinate ruotate di $\theta = 4.5^\circ$.

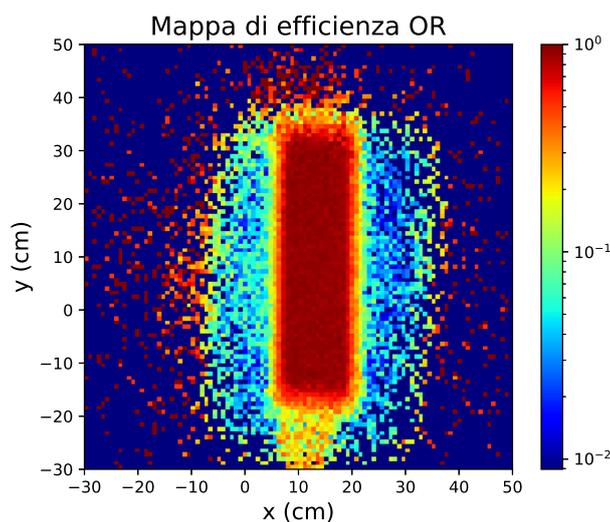


Figura 2.28: Mappa di efficienza con i due canali in OR e coordinate ruotate.

A questo punto, considerando la regione verticale compresa tra $x = 12$ cm e $x = 15$ cm è stata effettuata la proiezione della mappa di efficienza relativa ai due canali in OR con le coordinate ruotate (figura 2.28). Inoltre è stata effettuata una selezione sull'angolo di incidenza rispetto alla direzione y , perpendicolare ai vari strati che costituiscono il calorimetro, per scartare eventi troppo inclinati, che quindi attraversano più strati. La figura 2.29 presenta due particolari della proiezione: i vari strati non risultano chiaramente separati, tuttavia si può osservare una modulazione nell'ampiezza che corrisponde all'alternarsi di strati di scintillatore e piombo, con il periodo atteso (5.5 mm).

Per poter distinguere più chiaramente i vari strati sarebbe opportuno disporre di un fascio collimato di maggiore intensità e incidente parallelamente sul calorimetro.

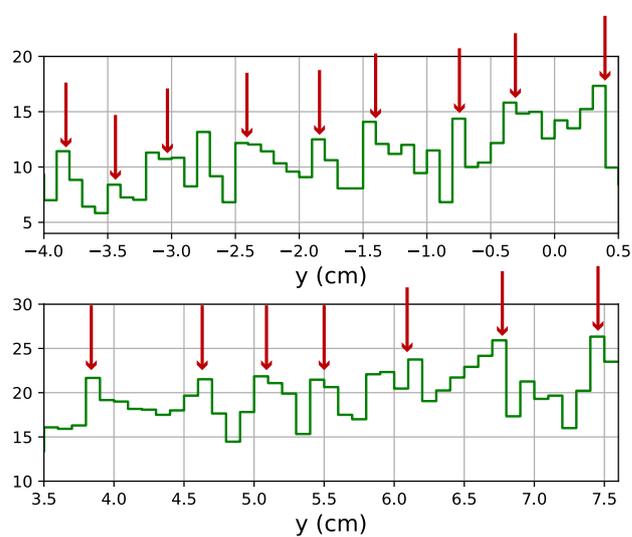


Figura 2.29: Proiezione della mappa di efficienza nella direzione perpendicolare agli strati e relativa alla regione verticale compresa tra $x = 12$ cm e $x = 15$ cm: si può osservare una modulazione nell'ampiezza che corrisponde all'alternarsi di strati di scintillatore e piombo.

Capitolo 3

La caratterizzazione su fascio

Il tema centrale di questa tesi è la caratterizzazione del calorimetro Jack. Per poterne misurare la risoluzione energetica è necessario disporre di un fascio di elettroni o positroni collimato e di cui si conosce con precisione l'energia. Poiché i raggi cosmici non hanno le caratteristiche desiderate, è stato necessario effettuare una misura presso un acceleratore di particelle capace di raggiungere energie di centinaia di GeV.

Dopo una presentazione sull'area sperimentale e sul setup allestito, in questo capitolo verranno descritte le procedure di equalizzazione e calibrazione del calorimetro per poi misurare la risoluzione energetica.

3.1 La North Area del CERN

Nel mese di agosto del 2021 sono state condotte delle prese dati sul fascio estratto della linea H2 della North Area del CERN, nel contesto di misure di indagine sulle interazioni coerenti delle particelle ad alta energia nei cristalli orientati, nell'ambito della preparazione dell'esperimento KLEVER [28].

L'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare, comunemente conosciuta con la sigla CERN, è il più grande laboratorio al mondo di fisica delle particelle, posto al confine tra Svizzera e Francia, alla periferia ovest della città di Ginevra, nel comune di Meyrin. Il complesso di acceleratori del CERN (figura 3.1) è un insieme di strutture acceleratrici che, in successione, accelerano le particelle a energie sempre più elevate. Tutto inizia dall'acceleratore lineare *Linac4* che, a partire dal 2020, è diventato la sorgente di fasci di protoni del CERN: in particolare accelera ioni di idrogeno negativi H^- fino a 160 MeV, che successivamente vengono iniettati nel *Proton Synchrotron Booster* (PSB). Durante questo processo i due elettroni di ciascuno ione vengono strappati e rimangono quindi solamente protoni. Il PSB accelera quindi i protoni fino

a 2 GeV, per poi iniettarli nel *Proton Synchrotron* (PS), che porta l'energia del fascio di protoni fino a 24 GeV. Infine i protoni vengono iniettati nel *Super Proton Synchrotron*, un acceleratore di 7 km di circonferenza, costituito da 1317 magneti caldi (a temperatura ambiente, ovvero non raffreddati) di cui 744 dipoli per curvare il fascio attorno all'anello, dove possono venire ulteriormente accelerati e raggiungere energie fino a 450 GeV [29].

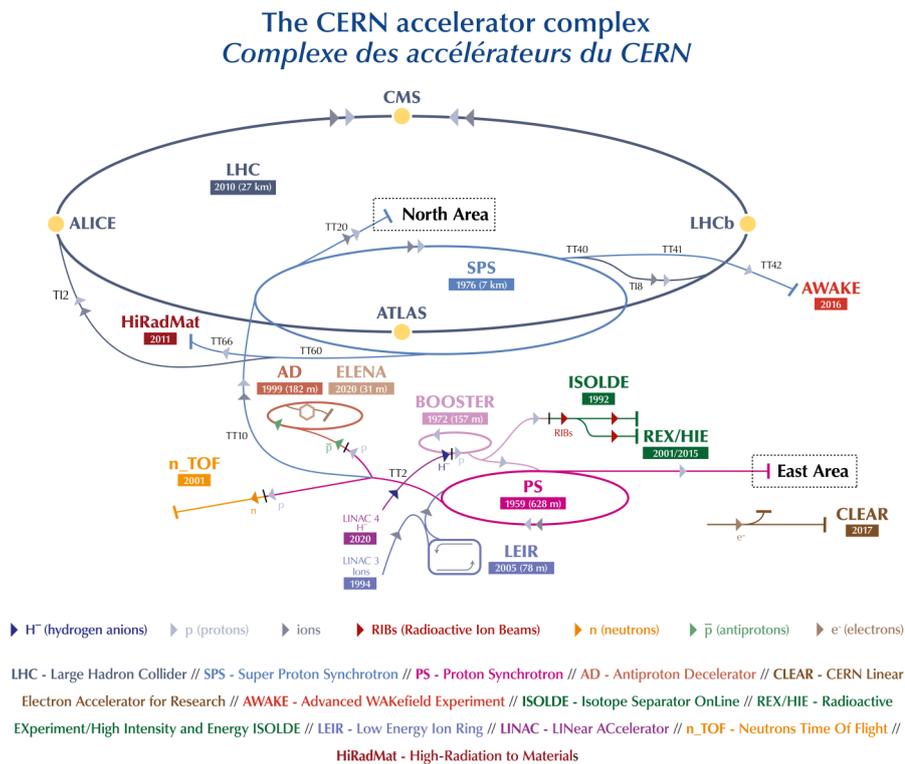


Figura 3.1: Schema del complesso di acceleratori del CERN [29].

L'SPS non è l'acceleratore più grande del CERN: il fascio di protoni può essere iniettato in LHC (Large Hadron Collider), un acceleratore di 27 km di circonferenza, in grado di raggiungere energie per singola particella di 7 TeV. Dall'SPS sono estratte 6 linee, di cui due vanno in due esperimenti fissi (NA62 e COMPASS), mentre altre quattro linee (denominate H2, H4, H6 e H8) vengono mandate alla *Experimental Hall North 1* (EHN1, *Building 887*). Si tratta dell'area sperimentale più grande del CERN con i suoi 55 m di larghezza e 330 m di lunghezza, costruita nel 1976, data in cui venne acceso l'SPS, situata nel sito di Prévessin, nella parte francese. Nonostante il termine

"North Area" venga talvolta impiegato per riferirsi a tale spazio, esso in realtà racchiude anche la *Neutrino Platform*, installata in un'estensione dell'edificio 887, nonché altre aree sperimentali, tra cui NA61 (SHINE), così come altre aree di test essenziali per lo sviluppo di componenti per acceleratori e rivelatori futuri [30].

I fasci estratti dagli acceleratori possono essere inviati su dei bersagli prima di raggiungere l'area sperimentale per produrre fasci secondari di diverso tipo. In particolare, durante il beam test dell'agosto 2021 è stato utilizzato un fascio di elettroni ad alta purezza la cui massima accettazione per $\Delta p/p$ è 2%, e con momento nel range 20 – 120 GeV/c.

3.2 Il setup sperimentale

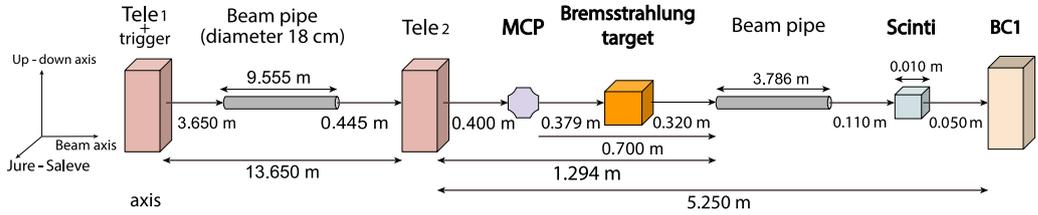
Nonostante nel setup sperimentale completo (figura 3.2) fossero presenti molti rivelatori, per quanto riguarda gli scopi di questo lavoro di tesi il setup sperimentale (figura 3.3) è analogo a quello descritto nel capitolo precedente:

- due scintillatori plastici, di cui uno forato, messi in anti-coincidenza per generare il segnale di trigger
- quattro rivelatori a microstrip di silicio per il tracciamento delle particelle. Due di essi sono analoghi a quelli descritti nel capitolo precedente (BC), mentre gli altri, detti *telescopi*, hanno un'area sensibile minore ($1.92 \times 1.92 \text{ cm}^2$) e sono inoltre rivelatori double-side: entrambi i lati di ogni giunzione sono collegati all'elettronica di readout, in modo da misurare sia gli elettroni prodotti durante le interazioni nel silicio, sia le lacune. Anche in questo caso le strip risultano disposte ortogonalmente sui due lati. Il passo delle strip è di 50 μm (con una strip floating dal lato giunzione e nessuna dal lato ohmico)
- il calorimetro Jack, ovvero il rivelatore che si vuole caratterizzare.

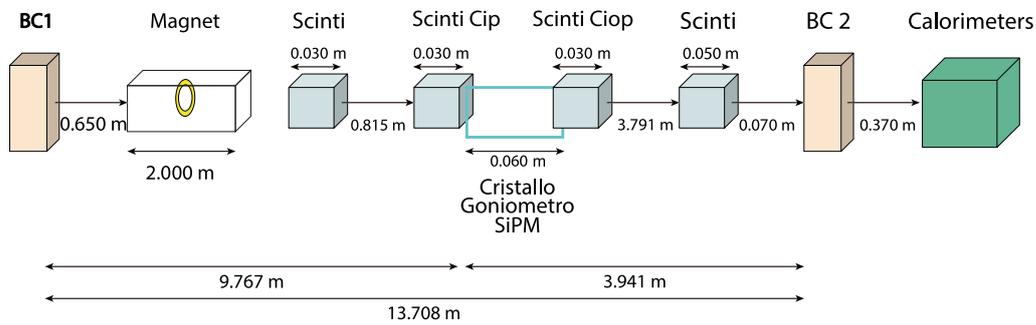
La figura 3.4 presenta una fotografia di un telescopio e del piano su cui erano appoggiati i calorimetri (Desy table [31]), mentre la figura 3.5 riporta alcune immagini dei calorimetri impiegati: si può riconoscere Jack dalla presenza dei due PMT di lettura.

Il fascio dell'SPS è organizzato in pacchetti, che vengono forniti alle linee estratte per un periodo detto *spill*. La durata della spill è di circa 4 s: all'interno di ogni ciclo (della durata di 30 s/40 s/60 s a seconda delle necessità) vengono erogate una o due spill.

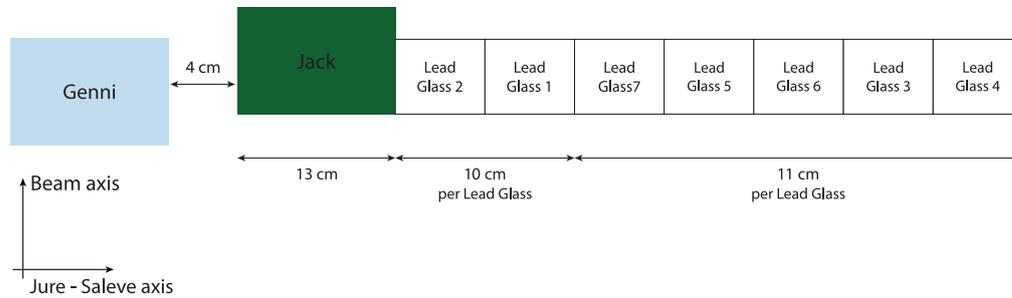
Per massimizzare il rate di acquisizione, la lettura dei rivelatori di tracciamento avviene in modalità *zero suppression*, ovvero vengono salvate solamente



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2: Schema completo del setup sulla linea H2. Tele1/Tele2 e BC1/BC2: rivelatori a microstrip di silicio; beam pipe: tubi a vuoto attraverso cui passa il fascio; box azzurri: scintillatori (non tutti uguali tra loro); magnet: magneti per deviare particelle cariche; calorimeters: Desy table su cui sono appoggiati i calorimetri utilizzati. Oltre al calorimetro Jack sono presenti 7 vetri al piombo e il calorimetro Genni, costituito da 9 cristalli di BGO. (a) e (b): intero sistema di rivelazione sulla linea del fascio, le due immagini sono da intendersi come un'unico schema continuo; (c): calorimetri disposti sulla Desy table, si noti che gli assi sono orientati diversamente rispetto alle due precedenti figure.

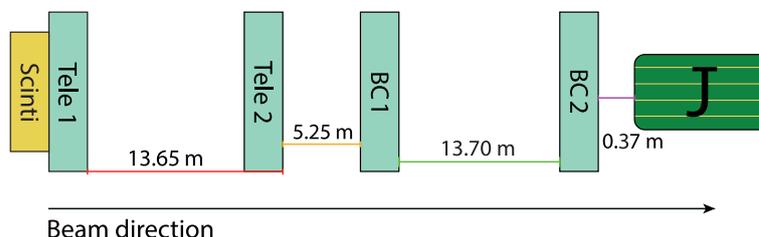


Figura 3.3: Rappresentazione schematica del setup al CERN. Scinti: scintillatore plastico di trigger; Tele1/Tele2 e BC1/BC2: rivelatori a microstrip di silicio; J: calorimetro Jack.

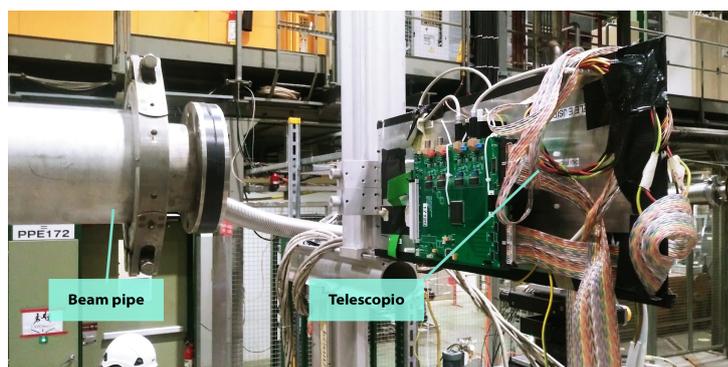
le strip sopra una certa soglia definita in base al rapporto segnale/rumore di ciascuna strip. L'intensità del fascio è scelta cercando di massimizzare gli eventi con una singola particella, per i quali, in media, si hanno circa 5 strip sopra soglia per modulo. Gli eventi vengono scritti su disco nel periodo *inter spill*, cioè la parte del ciclo in cui non vengono erogate particelle.

Analogamente a quanto descritto nel capitolo precedente, una procedura online seleziona gli eventi con un singolo cluster nei due telescopi e produce un file ASCII. Per rendere conto della complessità dell'intero setup, nella tabella 3.1 vengono descritte le 8376 colonne che costituiscono i file ASCII.

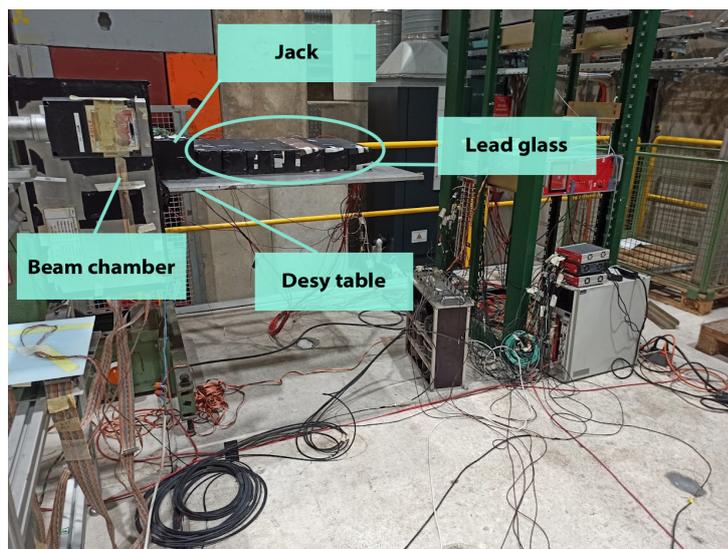
3.3 Procedure e risultati sperimentali

Lo scopo di un calorimetro è la misura dell'energia di una particella. Nel contesto dell'esperimento complessivo, lo scopo di Jack era quello di misurare l'energia degli elettroni deviati da un campo magnetico dopo aver interagito con un bersaglio e aver prodotto fotoni per bremsstrahlung, perdendo quindi energia. Jack era posizionato accanto al calorimetro per la misura dell'energia dei fotoni, e quindi copriva il range energetico 100 – 120 GeV.

In questa sezione verrà discussa l'analisi che consente, a partire dai segnali restituiti dai due PMT, di stabilire la corrispondente energia in GeV, di misurare il profilo e la divergenza del fascio oltre alla risoluzione energetica di Jack.

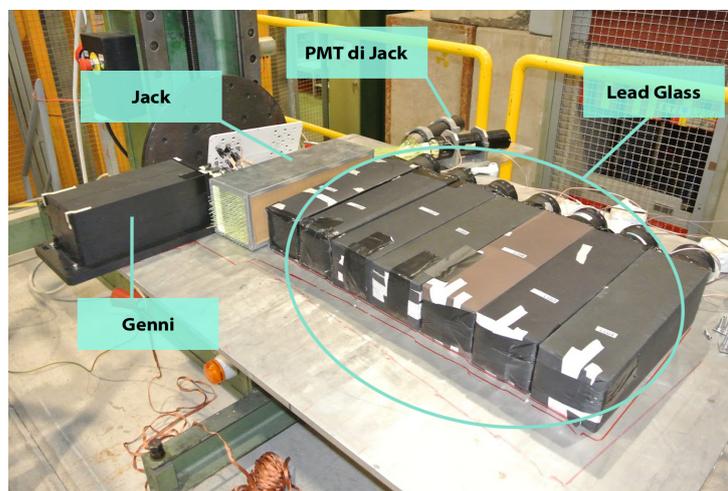


(a)

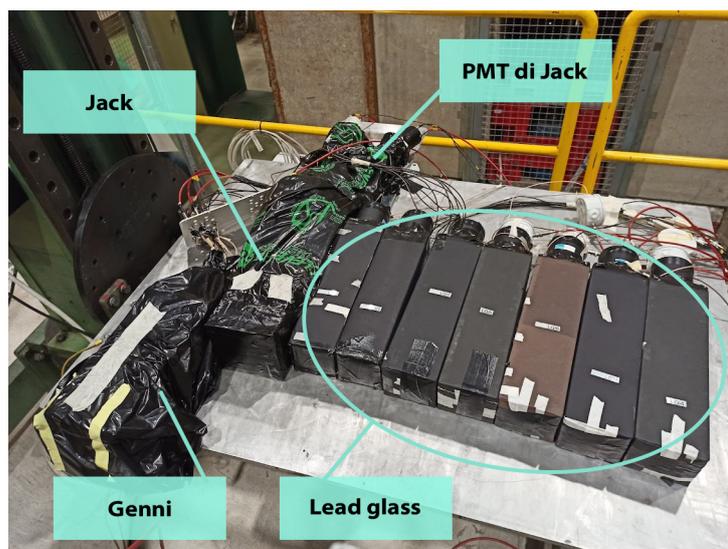


(b)

Figura 3.4: Immagini relative al setup sperimentale sulla linea H2: (a) immagine di un telescopio; (b) fotografia di una BC (a sinistra) e della Desy table (al centro) su cui sono appoggiati i calorimetri.



(a)



(b)

Figura 3.5: Immagini relative ai calorimetri utilizzati sulla linea H2. Da sinistra: Genni, Jack e 7 vetri al piombo collocati sulla Desy table. Nell'immagine (a) si possono notare le fibre di Jack che sporgono dalla faccia esposta al fascio, mentre nell'immagine (b) è stato avvolto da materiale nero per oscurarlo dalla luce esterna. In entrambi i casi si possono notare i due PMT uscire dal retro di Jack.

Tabella 3.1: Descrizione delle colonne salvate nei file ASCII.

Nome colonne	Numero colonne	Descrizione
xRaw	8	Posizioni x e y di impatto su ciascun rivelatore a microstrip di silicio
nStripHit	8	Numero totale di strip del cluster per ogni evento in ciascun rivelatore a microstrip di silicio
nHit	8	Numero di cluster per ogni evento in ciascun rivelatore a microstrip di silicio
digiBase	32	Baseline dei canali di 4 digitizer da 8 canali ciascuno
digiPh	32	Pulse height dei canali di 4 digitizer da 8 canali ciascuno
digiTime	32	Tempi dei canali di 4 digitizer da 8 canali ciascuno
gonio	5	Posizione del goniometro nei suoi 5 gradi di libertà: rotazione, cradle, orizzontale, orizzontale big e verticale big ^a
spill	1	Numero di spill associato ad ogni evento
step	1	Posizione di scan del goniometro per ogni evento
eventNumber	1	Numero associato a ciascun evento
waveN	8192	1024 colonne per ogni $N \in [0, 7]$, che contengono la forma d'onda campionata dal digitizer

^a Nella presa dati si voleva caratterizzare un materiale cristallino, allineandolo in diversi modi rispetto al fascio incidente: il goniometro collegato al sistema di acquisizione consentiva di eseguire spostamenti micrometrici da remoto e di effettuare scansioni lungo una certa direzione.

3.3.1 La divergenza e il profilo del fascio

A differenza del setup in laboratorio in cui i rivelatori erano appoggiati uno sopra l'altro e vincolati alla medesima rotaia, in questo contesto i rivelatori si trovavano posizionati ad alcuni metri di distanza: pertanto è possibile eseguire solo un allineamento grossolano del setup, in fase di montaggio. Se vi è sovrapposizione di una porzione significativa delle aree attive, è possibile perfezionare l'allineamento via software. In particolare, avendo a disposizione un fascio collimato, ogni particella proseguirà su una traiettoria rettilinea in assenza di ostacoli e di campo magnetico. Se non sono perfettamente allineati la ricostruzione della traccia della particella incidente potrebbe non essere corretta [25].

Per l'allineamento sono stati considerati come riferimento i primi due rivelatori: i telescopi. Per allineare il secondo rivelatore rispetto al primo, è stata costruita la distribuzione degli angoli nei piani xOz e yOz , essendo z la direzione di propagazione del fascio. Fittando tale distribuzione con una gaussiana (figura 3.6) è possibile trovare l'angolo relativo tra i due rivelatori, approssimabile come il valore medio di tale distribuzione. Conoscendo la distanza è possibile trovare l'offset del secondo rivelatore, rispetto al primo.

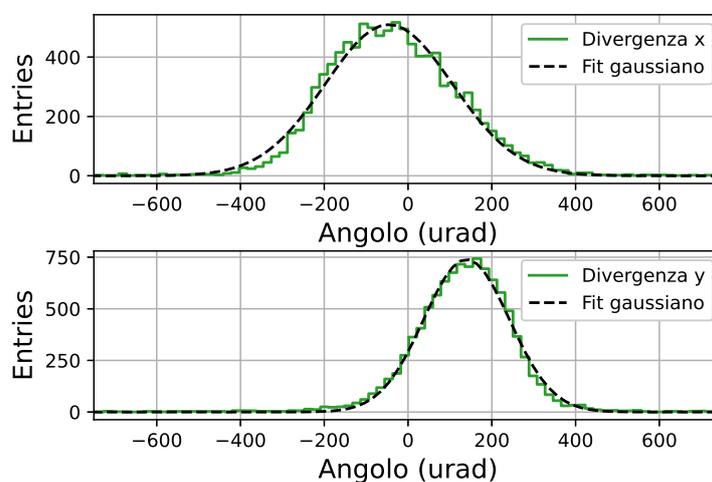


Figura 3.6: Distribuzione angolare delle tracce, prima dell'allineamento dei due telescopi, relativo al run 669. In nero è stato sovrapposto il fit gaussiano.

Se si provasse a ripetere la medesima procedura dopo aver applicato gli offset spaziali appena ricavati al secondo rivelatore, si troverebbe una distribuzione centrata sullo 0 (figura 3.7). Questo fit fornisce anche un'altra

informazione importante: la larghezza della distribuzione è detta *divergenza del fascio* e rappresenta una misura di quanto un fascio tenda ad aprirsi a cono durante la propagazione. In particolare è stata ottenuta una divergenza di $164 \mu\text{rad}$ in x e $102 \mu\text{rad}$ in y a 80 GeV (run 669) e di $139 \mu\text{rad}$ in x e $79.5 \mu\text{rad}$ in y a 120 GeV (run 717).

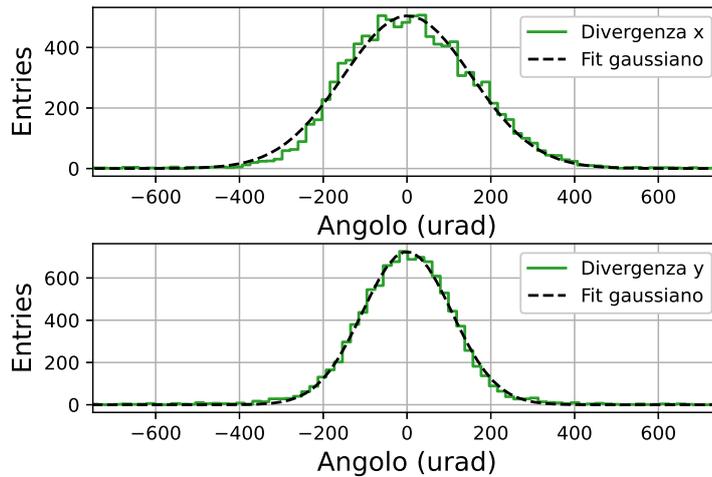


Figura 3.7: Distribuzione angolare delle tracce, dopo l'allineamento dei due telescopi, relativo al run 669. In nero è stato sovrapposto il fit gaussiano.

La figura 3.8 presenta il *profilo del fascio* in x e in y , ovvero la distribuzione dei punti di impatto sui rivelatori a microstrip di silicio. Si può osservare come il range sia differente tra i telescopi e le camere.

3.3.2 La posizione di Jack

Avendo allineato i telescopi è stato possibile ricostruire i punti di impatto sul piano della faccia di Jack. La figura 3.9 presenta la distribuzione dei punti di impatto pesati in PH relativi al run 669, quando il fascio incideva al centro della faccia del calorimetro. La distanza tra il primo telescopio e Jack è 31.48 m . Se la divergenza del fascio è $100 \mu\text{rad}$, significa che ogni metro il fascio si allarga in entrambe le direzioni di $100 \mu\text{m}$, ovvero 1 mm ogni 10 m e quindi, in circa 30 m si allarga approssimativamente di 3 mm , come si può osservare nel grafico.

Successivamente è stato considerato il run 668, corrispondente alla situazione in cui il calorimetro è stato traslato orizzontalmente affinché il fascio

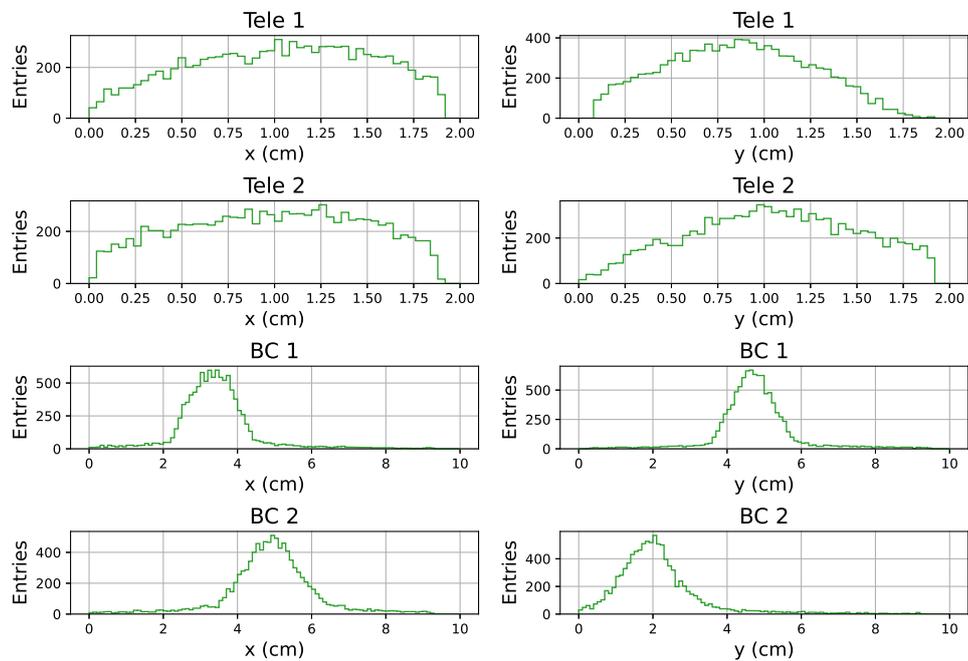


Figura 3.8: Profili del fascio misurati dai 4 rivelatori a microstrip di silicio nelle direzioni x e y relativi al run 669. Si noti come il range dei telescopi e delle camere sia differente.

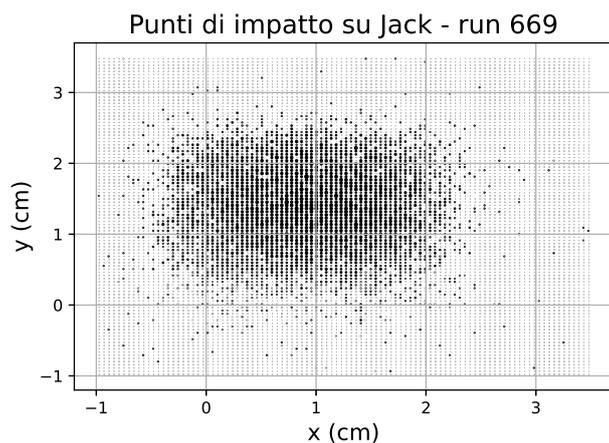


Figura 3.9: Distribuzione dei punti di impatto sul piano di Jack pesata in PH relativa al run 669.

incidesse sul bordo di Jack. In questo caso non tutte le particelle incidenti depositeranno la loro energia nel calorimetro. Dopo aver stabilito una soglia in pulse height (figura 3.10) è stata definita una sorta di mappa di efficienza, ovvero il rapporto tra la distribuzione delle particelle incidenti che hanno depositato energia nel calorimetro e il numero totale di particelle incidenti. La figura 3.11 consente di distinguere il bordo di Jack.

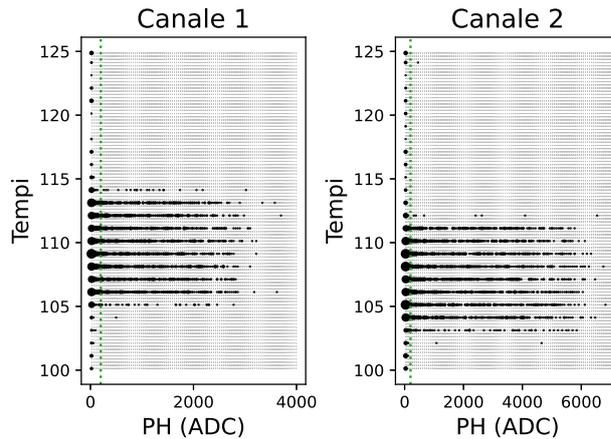


Figura 3.10: Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi per il run 668.

3.3.3 Equalizzazione dei 2 PMT

Quando una particella incide sul calorimetro Jack, deposita tutta la sua energia, che viene convertita in luce di scintillazione, raccolta dalle fibre e portata ai due PMT. Pertanto per misurare l'energia di una particella incidente non è utile analizzare i due canali indipendentemente, ma è necessario sommarli. Trattandosi di due componenti differenti dotate di alimentazioni distinte, essi possono avere un guadagno differente, e quindi una semplice somma delle due pulse height non sarebbe un valore proporzionale all'energia depositata. L'*equalizzazione* è quella procedura che permette di trovare un coefficiente moltiplicativo per il secondo canale, che consenta quindi di sommare i valori dei due canali, ottenendo un valore proporzionale all'energia depositata.

Per effettuare l'equalizzazione sono stati usati i run elencati nella tabella 3.2. Ad energia fissata (in questo caso 80 GeV), è stata effettuata una scansione muovendo il calorimetro parallelamente all'asse y che congiunge

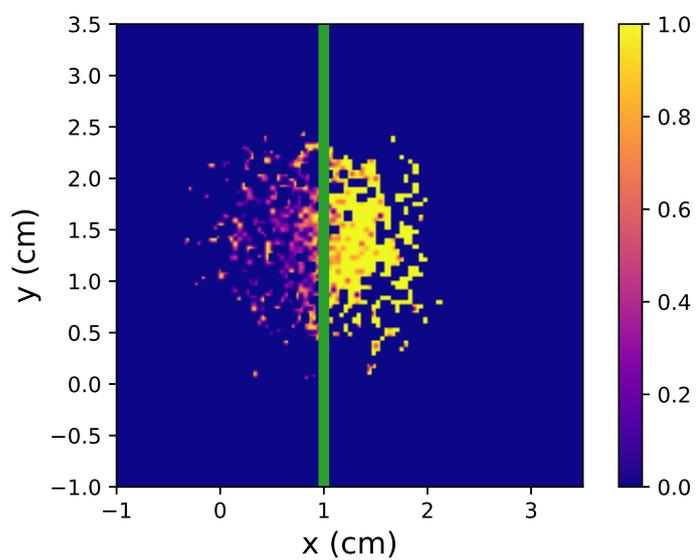


Figura 3.11: Bordo di Jack: rapporto tra la distribuzione delle particelle incidenti che hanno depositato energia nel calorimetro e il numero totale di particelle incidenti, relativa al run 668. La linea verde evidenzia il bordo.

il canale 1 al canale 2. Il movimento del calorimetro può essere effettuato da remoto poiché è installato su una *Desy Table*, ovvero una piattaforma mobile controllata a distanza (figura 3.12) tramite un opportuno sistema di comandi [31]. Nell'ipotesi in cui i due PMT rispondessero in modo uguale, ci si aspetterebbe che in condizioni equivalenti le pulse height fossero uguali. In particolare, quando il fascio incide ad $1/4$ e $3/4$ da un bordo, ci si aspetta che l'energia depositata venga rivelata principalmente solo da uno dei due PMT e che la pulse height corrispondente sia uguale. In generale ciò non si verifica, e il rapporto delle due pulse height in questa condizione rappresenta un possibile coefficiente di equalizzazione.

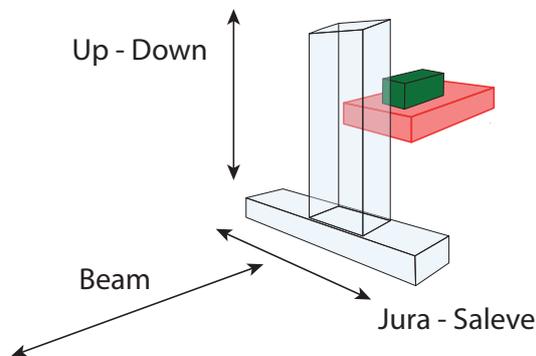


Figura 3.12: Schema di funzionamento di una Desy table: può traslare in verticale e nella direzione Jura-Saleve, ortogonale alla direzione del fascio.

Procedendo sulla falsa riga dell'analisi descritta nel capitolo precedente, si sono guardati i biplot della distribuzione delle pulse height in funzione della distribuzione dei tempi di arrivo. La figura 3.13 riporta a titolo esemplificativo il grafico relativo al run 669. Avendo a disposizione un fascio collimato ad alta energia ed un sistema di trigger più elaborato, si può notare come non vi sia una baseline a bassi ADC estesa per ogni tempo; è stato comunque effettuato un taglio in tempo. Le figure 3.14 e 3.15 presentano rispettivamente la distribuzione delle pulse height e dei tempi di arrivo nel caso dello stesso run.

Si può osservare come praticamente ogni evento acquisito sia stato visto da Jack: questo è dovuto al fatto che si sta lavorando con un fascio collimato.

Fittando il picco per ciascuna distribuzione delle pulse height con una gaussiana (figura 3.16 per il run 669) e plottando il valore del picco in funzione

Tabella 3.2: Run utilizzati per l'equalizzazione di Jack. Sono riportate anche le coordinate verticali (V) ed orizzontali (H) della Desy table su cui il calorimetro era posizionato.

Numero run	Energia (GeV)	H	V
659	80	20 850	-41 004
660	80	22 850	-41 004
661	80	24 849	-41 004
662	80	26 884	-41 004
663	80	28 818	-41 004
664	80	27 844	-41 004
665	80	18 850	-41 004
666	80	16 881	-41 004
667	80	14 876	-41 004
668	80	15 848	-41 004
669	80	21 813	-41 004

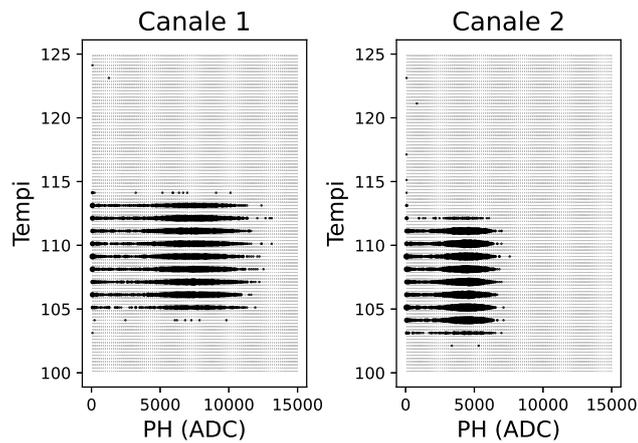


Figura 3.13: Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi per il run 669.

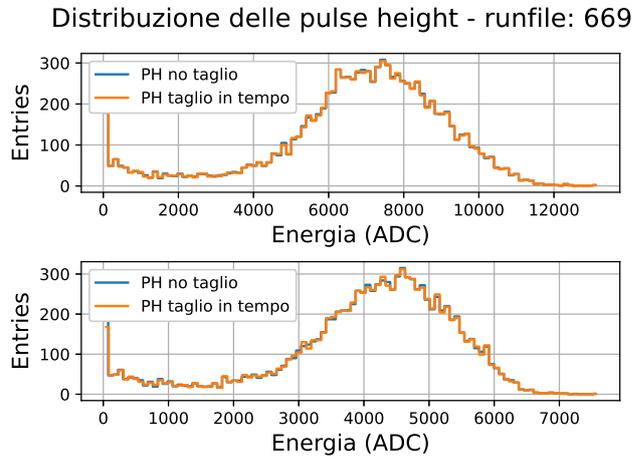


Figura 3.14: Distribuzione delle pulse height con e senza taglio in tempo per il run 669.

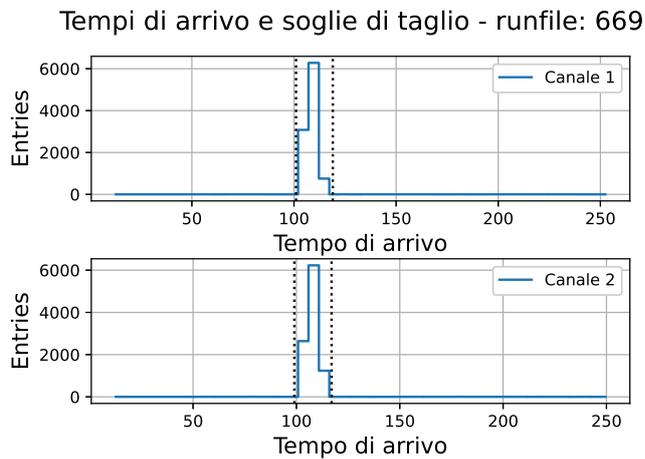


Figura 3.15: Distribuzione dei tempi del massimo. La linea puntinata rappresenta la regione considerata per il run 669.

della coordinata y (figura 3.17) si può notare come le due distribuzioni abbiano andamento simmetrico ma i massimi abbiano valori differenti. Il rapporto dei massimi è risultato essere 1.74 e rappresenta il coefficiente di equalizzazione, ovvero quel coefficiente che consente di riscalare le pulse height del secondo canale e, dopo averle sommate alle pulse height del primo canale, di ottenere un valore proporzionale all'energia depositata.

Un altro modo possibile per stimare il coefficiente di equalizzazione consiste nell'effettuare il rapporto tra i massimi delle pulse height quando il fascio incide al centro del calorimetro: questo è il caso del run 669. Il rapporto tra i massimi in questo caso vale 1.63 che risulta prossimo a quello ottenuto nel modo precedente. Il fatto che non siano perfettamente uguali può dipendere dal fatto che il fascio non incideva esattamente in corrispondenza del centro analitico.

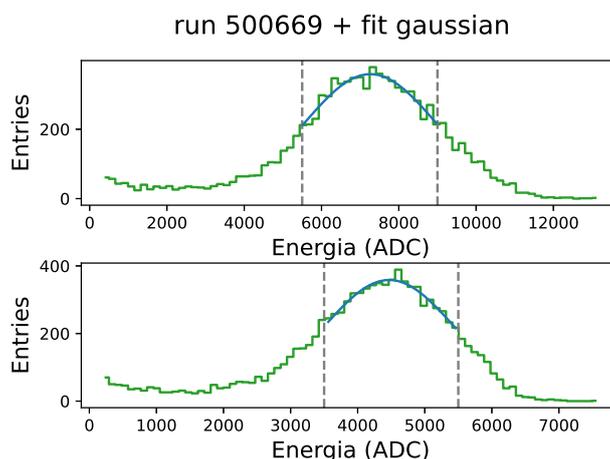


Figura 3.16: Fit gaussiano della distribuzione delle pulse height per il run 669.

La figura 3.18 presenta il biplot della distribuzione delle PH equalizzate dei due canali di Jack relativa al run 760: un fascio da 80 GeV incidente nel centro della faccia del calorimetro. In questa situazione tutta l'energia viene depositata all'interno del volume sensibile. Si può infatti notare come le due PH siano anticorrelate, ovvero la somma è costante ed equivale all'energia totale della particella incidente, ma varia la frazione di energia rivelata da ciascun PMT.

3.3.4 La calibrazione

Per poter convertire le energie misurate dall'unità arbitraria (ADC) ai GeV è necessario effettuare la *calibrazione*. Fasci di energie note e differenti

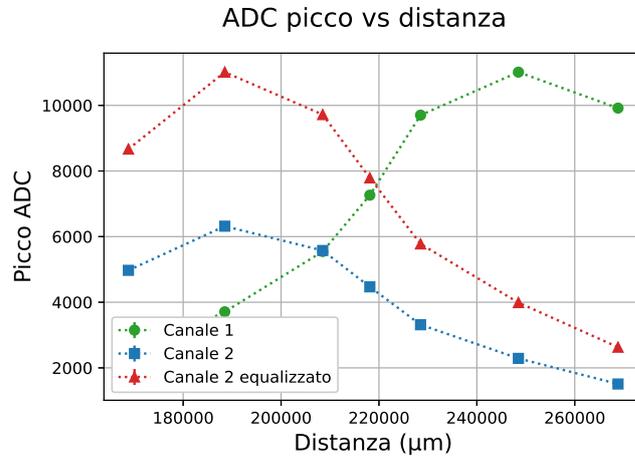


Figura 3.17: Massimo della distribuzione delle pulse height in funzione della coordinata y .

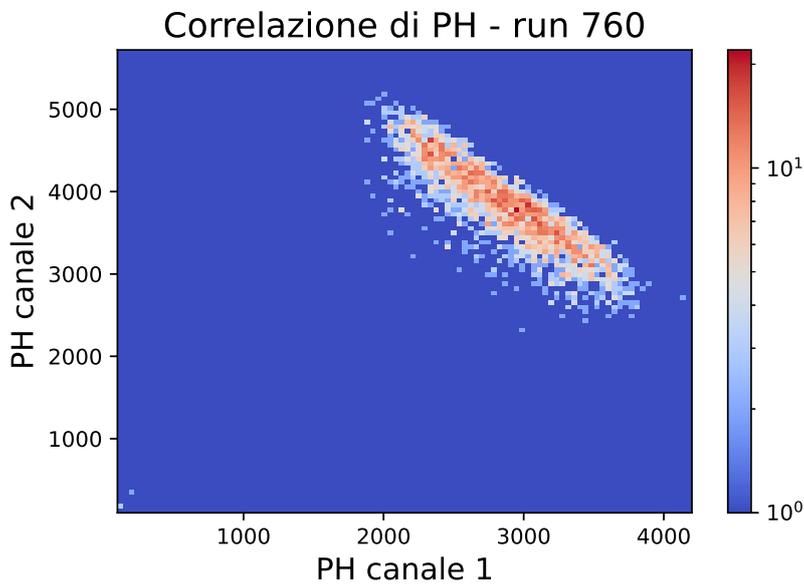


Figura 3.18: Biplot della distribuzione delle PH equalizzate dei due canali di Jack relativa al run 760: si può notare come vi sia anti-correlazione.

vengono fatti incidere al centro del calorimetro. I run utilizzati sono riportati nella tabella 3.3.

Tabella 3.3: Run utilizzati per la calibrazione di Jack.

Numero run	Energia (GeV)
717	120
757	100
760	80
778	60
781	20

I due canali equalizzati vengono sommati per ottenere un valore proporzionale all'energia depositata: questo valore viene poi plottato in funzione dell'energia vera. È stato utilizzato come coefficiente di equalizzazione sia quello descritto nella sezione precedente, sia quello ottenuto facendo il rapporto dei massimi della distribuzione delle pulse height nel caso in cui il fascio incidesse sul centro analitico del calorimetro. Si procede quindi ad effettuare un fit lineare (figura 3.19): tale retta costituisce l'inverso della *retta di calibrazione*, ovvero la funzione che consente di convertire energie espresse in unità di ADC in energie in GeV. La tabella 3.4 riporta i valori del coefficiente angolare estratto dal fit: si può osservare come i due valori ottenuti risultino prossimi, ma a causa della ridotta incertezza, non compatibili entro 3σ . Nell'analisi futura verrà utilizzato come coefficiente quello ottenuto a partire dalla procedura di equalizzazione descritta. Per quanto riguarda l'intercetta, nonostante le incertezze risultino più grandi, si può osservare come in entrambi i casi sia compatibile con 0.

Tabella 3.4: Parametri estratti dal fit lineare della retta di calibrazione.

Coeff. scelto	m	δ_m	q	δ_q	$\bar{\chi}^2$
Equalizzazione	82.52	0.53	-32.15	39.32	4.1
Centro	79.32	0.86	-18.19	71.42	3.7

Per verificare la bontà della calibrazione effettuata è stata considerata la distanza relativa (risalata al picco misurato) tra il picco misurato e calibrato in energia e il valore vero dell'energia del fascio in funzione di quest'ultimo (figura 3.20): si può notare come siano tutti prossimi allo 0.

L'ultima colonna della tabella 3.4 riporta il valore del $\bar{\chi}^2$ per entrambi i fit. Si può notare come tale valore sia dell'ordine dell'unità. L'andamento

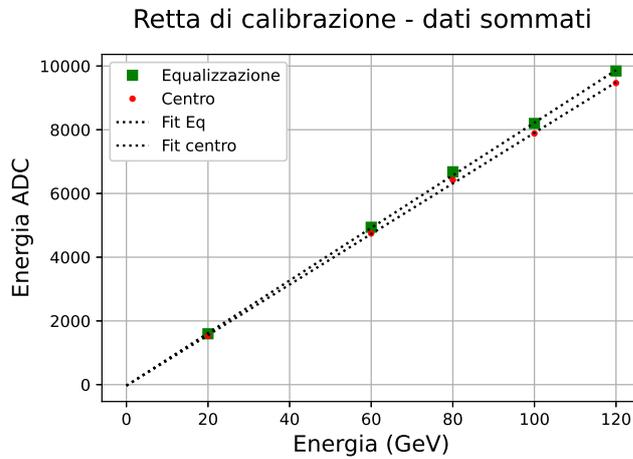


Figura 3.19: Retta di calibrazione relativa sia al coefficiente di equalizzazione ottenuto come descritto nella sezione 3.3.3 sia a quello ottenuto facendo il rapporto dei massimi della distribuzione delle pulse height nel caso in cui il fascio incidesse sul centro analitico del calorimetro.

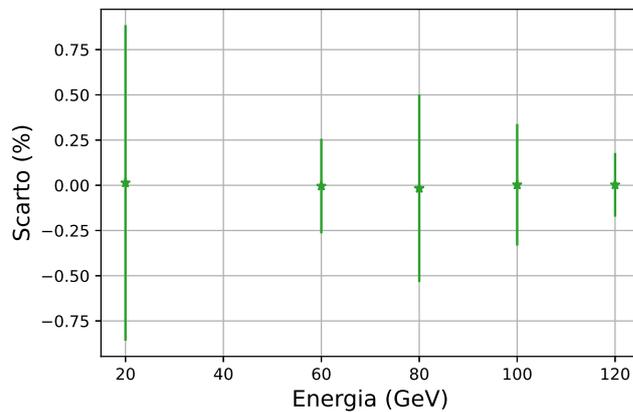


Figura 3.20: Distanza relativa (risalata al picco misurato) tra il picco misurato e calibrato in energia e il valore vero dell'energia del fascio in funzione di quest'ultimo.

lineare è stato verificato e si può quindi stabilire che non vi sia consistente leakage longitudinale o trasversale dovuto al non contenimento dell'intero sciame prodotto.

Nella prima fase della presa dati ad alte energie si era riscontrata una situazione di *saturazione* : l'energia in ADC, anziché crescere linearmente al crescere dell'energia vera, tendeva ad appiattirsi. Uno dei vantaggi dei tubi fotomoltiplicatori è che si può agire sul bias: ridurre la tensione di alimentazione comporta una riduzione del guadagno. Si può quindi regolarlo al punto in cui non si ha saturazione e si ottenga linearità per tutte le energie considerate.

3.3.5 La risoluzione energetica

Dopo aver equalizzato e calibrato Jack, è possibile ottenere una misura dell'energia delle particelle incidenti e quindi stimare la risoluzione energetica. I run utilizzati sono gli stessi della calibrazione.

Dopo aver convertito le pulse height in unità di GeV ed aver propagato le incertezze, tali distribuzioni sono state fittate con una gaussiana per ottenere valor medio e relativa incertezza (come σ della gaussiana). La figura 3.21 riporta il caso del run 778.

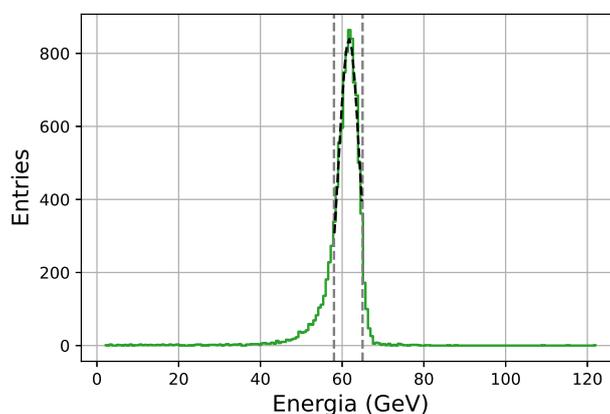


Figura 3.21: Distribuzione delle pulse height in GeV per il run 778. In nero è stato sovrapposto il fit gaussiano.

Per ciascun valore di energia è stata calcolata la corrispondente risoluzione energetica $R = \sigma_E/E$ percentuale. Tali valori sono quindi stati fittati con la formula (1.8) (figura 3.22). I valori ottenuti e le rispettive incertezze sono

riportati nella tabella 3.5. L'eccessiva incertezza sul termine di rumore è dovuta alla scarsità di punti a basse energie. In particolare, si è verificato come variando tale parametro in quell'ampio range, la curva fittata esplori tutta la banda di errore del punto a 20 GeV senza modificarsi per i restanti punti.

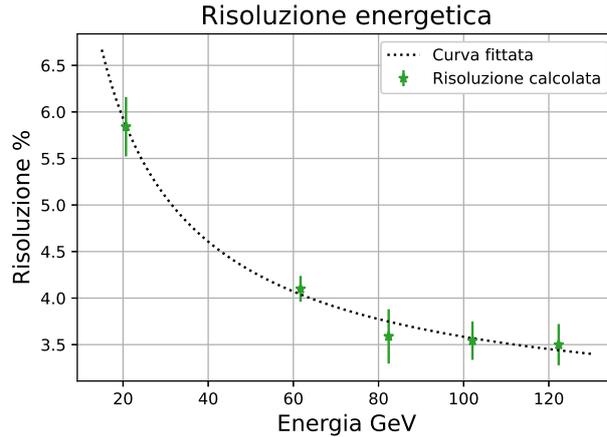


Figura 3.22: Risoluzione energetica percentuale del calorimetro Jack e relativo fit.

Tabella 3.5: Parametri estratti dal fit con la (1.8) e rappresentanti i tre termini della risoluzione energetica.

Parametro	Valore	Incertezza
Termine di rumore ($\%/E$ (GeV))	0.0173	71 487
Termine stocastico ($\%/\sqrt{E}$ (GeV))	23.6216	3.3477
Termine costante (%)	2.6966	0.2387

I valori ottenuti sono in linea con quelli in [5]. Le grosse incertezze nei parametri sono da attribuire in primo luogo alla grande incertezza sui singoli punti, dovuta alla scarsità della statistica: per ciascun file si avevano a disposizione qualche migliaio di eventi. Inoltre è stato effettuato un fit a 3 parametri utilizzando solamente 5 punti: di questi, a bassa energia ve ne era solamente uno. La ragione risiede nel fatto che i dati acquisiti durante il beam test erano volti ad effettuare l'equalizzazione e la calibrazione del calorimetro Jack e non sono stati acquisiti con il preciso intento di misurarne la risoluzione energetica. Per effettuare una misura più accurata della risoluzione sarebbe stato opportuno acquisire più eventi, soprattutto a basse energie [2].

Il valore del termine costante fissa un limite nella risoluzione sotto al quale non si può scendere, ovvero indipendentemente dall'energia non si potrà ottenere una risoluzione minore di 2.7%. Inoltre, nonostante il termine stocastico possa sembrare alto (23%), bisogna ricordare che scala come la radice dell'energia: in altre parole a 100 GeV fornirà un contributo del 2.3% che, sommato al termine costante, si traduce in una risoluzione del 3.55% a 100 GeV. Si può quindi concludere che il calorimetro è da preferire per misurare alte energie.

Infine, il fatto che il termine di rumore sia compatibile con 0 non deve stupire: per la lettura sono stati utilizzati dei PMT, che consentono di avere un alto guadagno mantenendo basso il noise, e non è stato necessario introdurre una catena elettronica di amplificazione.

Per quanto riguarda il termine costante sono invece da escludere problemi di non contenimento dello sciame o di saturazione dei PMT, in quanto è stato verificato l'andamento lineare per tutti i punti a disposizione.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha riguardato la caratterizzazione di un calorimetro elettromagnetico a campionamento. I calorimetri sono blocchi di materiale strumentato, che generano un segnale proporzionale all'energia depositata dalle particelle. A seconda della tecnica di costruzione, i calorimetri possono essere classificati in due famiglie: "a campionamento" ed "omogenei". I primi sono costituiti da strati alternati di materiale assorbitore, deputato alla produzione dello sciame elettromagnetico, e materiale attivo, in grado di misurare l'energia depositata.

Jack, il rivelatore utilizzato in questa tesi, è un calorimetro elettromagnetico a campionamento di tipo shashlik, costituito da 70 strati di scintillatore plastico, di spessore 4 mm, alternati a 69 strati di piombo, di spessore 1.5 mm, di sezione quadrata ($11.5 \times 11.5 \text{ cm}^2$) per un totale di circa 19 lunghezze di radiazione, attraversati da 144 fibre scintillanti WLS Saint-Gobain BCF-92 di diametro 1.2 mm, in una matrice di 12×12 fori a passo di 1 cm in modo tale che ciascuna fibra raccolga la luce proveniente da tutti i piani di scintillatore. Le fibre sono lette da due PMT, rispettivamente di modello Hcz photonics Xp2262 e Hamamatsu R1828-01.

La prima grandezza studiata è stata l'*efficienza del sistema di lettura* (fibre+PMT e relativo accoppiamento ottico) definita come il rapporto tra il numero di particelle viste dal rivelatore e il numero totale di particelle che lo hanno attraversato. Per questa misura, effettuata in laboratorio, sono stati utilizzati i raggi cosmici, la cui traiettoria è stata ricostruita tramite un sistema di tracciamento al silicio. Per poter distinguere il segnale associato al passaggio di una particella dal rumore è stata analizzata la distribuzione dei massimi delle pulse height e del rispettivo tempo rispetto al trigger: dopo aver definito una soglia minima sulle pulse height e un intervallo di tempi, l'efficienza di rivelazione dei raggi cosmici è risultata essere $(95 \pm 0.3) \%$.

Sempre sfruttando i raggi cosmici è stata condotta una acquisizione ad alta statistica della durata di un mese per verificare se si riuscissero a distinguere i vari piani costituenti il calorimetro, una misura che normalmente viene effettuata utilizzando fasci ad alta intensità. La statistica è risultata non

sufficiente, ma ha permesso di osservare una modulazione nell'efficienza con il passo corretto.

La caratterizzazione delle performance del calorimetro è stata fatta grazie ai dati acquisiti nel contesto dell'esperimento KLEVER presso la linea H2 del CERN utilizzando un fascio di elettroni con energia nel range 20–120 GeV, ad alta purezza, con massima accettanza per $\Delta p/p$ al 2% e divergenza (misurata tramite un sistema di tracciamento al silicio) che è risultata essere 139 μrad in x e 79.5 μrad in y a 120 GeV. Anche in questo caso per distinguere il rumore dal segnale associato al passaggio di una particella è stato studiato l'andamento dei tempi rispetto al trigger e la distribuzione delle pulse height. I due canali del calorimetro sono stati *equalizzati* studiando l'andamento del valore più probabile della distribuzione delle PH al variare del punto di impatto del fascio sul calorimetro, e considerando il rapporto dei massimi di queste distribuzioni. Sfruttando invece fasci ad energie differenti ed incidenti al centro del calorimetro, è stato possibile costruire la *retta di calibrazione* e quindi stabilire una corrispondenza tra la pulse height e l'energia in GeV.

Successivamente è stata misurata la *risoluzione energetica* del calorimetro e il contributo dei tre parametri (stocastico, di rumore e costante). Il *termine stocastico* è legato alle fluttuazioni statistiche connesse allo sviluppo dello sciame, e costituisce la risoluzione energetica intrinseca del calorimetro. Questo termine scala come l'inverso della radice dell'energia. Il *termine di rumore* tiene conto del rumore introdotto dalla catena elettronica di lettura. Questo termine scala come l'inverso dell'energia. Infine il *termine costante*, raccoglie tutti i contributi che non dipendono dall'energia.

Il termine di rumore è risultato essere $(0.02 \pm 71.49) \% / E$ (GeV), compatibile con zero: i PMT per la lettura della luce consentono di avere un buon guadagno mantenendo al tempo stesso basso il livello di rumore. La grossa incertezza ottenuta su questo parametro dipende dalla scarsità di statistica a disposizione: dei 5 dati a disposizione ve n'era solamente uno a basse energie, ovvero nella regione in cui domina il termine di rumore. Il termine costante è risultato essere $(2.70 \pm 0.24) \%$, mentre per il termine stocastico si è trovato $(23.62 \pm 3.35) \% / \sqrt{E}$ (GeV): tale valore può sembrare alto, ma considerando che Jack era impiegato per la misura dell'energia di elettroni nel range (100 – 120) GeV, per quelle energie, risulta inferiore a 2.4%. Sommando in quadratura i vari termini, si è trovata come risoluzione energetica a 100 GeV 3.55%. I valori misurati in [5] nel test ad alta energia sono $(12.66 \pm 0.9) \% / \sqrt{E}$ (GeV) per il termine stocastico e $(1.9 \pm 0.1) \%$ per il termine costante.

Jack accoppiato a PMT è un calorimetro ideale per fasci di test: è compatto, con un sistema di lettura buono e una risoluzione adeguata. La differenza tra il valore ottenuto nei due casi è legata al diverso sistema di

lettura (fotomoltiplicatori al silicio, SiPM, nel caso migliore e PMT in questa tesi). L'utilizzo di SiPM è vantaggioso in quanto si tratta di device con maggiore efficienza quantica e con migliore accoppiamento ottico alle fibre, il che permette di massimizzare la risoluzione energetica. Inoltre, in [5] la misura della risoluzione energetica era la misura principale della presa dati, mentre nel test del 2021 è risultata una misura accessoria finalizzata alla verifica del funzionamento corretto di Jack.

Per una misura più accurata della risoluzione sarà necessaria una presa dati con più statistica, e con più energie a disposizione soprattutto nella regione (1 – 10) GeV.

La lettura tramite due PMT della luce nelle due metà del calorimetro potrebbe inoltre fornire indicazioni sul punto di impatto della particella: lo studio di un algoritmo adeguato è in corso.

Lista degli acronimi

ADC	Analog to Digital Converter
ALEPH	Apparatus for LEP PHysics
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BC	Beam Chamber
BGO	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ - Germanato di Bismuto
CERN	Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire - Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare
CMS	Compact Muon Solenoid
CP	Charge-Parity
DAC	Digital to Analog Converter
DAQ	Data AcQuisition
EHN	Experimental Hall North
ID	IDentification
KLOE	K_L^0 LOng Experiment
LEP	Large Electron-Positron collider
LHC	Large Hadron Collider
LINAC	LINear ACcelerator
MIP	Minimun Ionizing Particle
NA48	North Area 48th experiment

OPAL	Omni-Purpose Apparatus for LEP
PC	Personal Computer
PH	Pulse Height
PMT	PhotoMultiplier Tube
PS	Proton Synchrotron
PSB	Proton Synchrotron Booster
SiPM	Silicon PhotoMultiplier
SPS	Super Proton Synchrotron
VME	VERSAbus Module Eurocard
VRB	VME Readout Board
WLS	WaveLength Shifter

Elenco delle figure

1.1	Perdita di energia per unità di lunghezza di radiazione e per unità di energia per elettroni e positroni.	4
1.2	Sezione d'urto dei fotoni in funzione dell'energia.	5
1.3	Sciame in una camera a nebbia	6
1.4	Frazione dell'energia depositata per ionizzazione in funzione dello Z dell'assorbitore.	7
1.5	Sviluppo di uno sciame elettromagnetico	8
1.6	Sviluppo longitudinale dello sciame all'interno di un blocco di ferro.	10
1.7	Profilo radiale di uno sciame elettromagnetico.	11
1.8	Il calorimetro di OPAL e la vasca di SuperKamiokande	13
1.9	Il calorimetro di L3 e quello di CMS.	15
1.10	Il calorimetro a kripton liquido di NA48.	16
1.11	Schema del calorimetro di KLOE	16
1.12	Il calorimetro elettromagnetico di ALEPH.	17
1.13	Immagine del calorimetro a silicio-tungsteno di OPAL.	18
1.14	Risoluzione energetica in funzione dell'energia.	21
2.1	Schema del calorimetro Jack.	25
2.2	Fotografie del calorimetro Jack	26
2.3	Raggruppamento delle fibre del calorimetro Jack	27
2.4	Schema del primo setup in laboratorio.	27
2.5	Schema del secondo setup in laboratorio.	28
2.6	Foto di una beam chamber.	30
2.7	Area attiva dei rivelatori a microstrip di silicio del secondo setup.	31
2.8	Digitizer CAEN DT5730 utilizzato per la lettura dei due PMT.	33
2.9	Schema del sistema di riferimento per la ricostruzione delle tracce.	34
2.10	Ricostruzione delle tracce sul piano dello scintillatore.	35
2.11	Profilo dei raggi cosmici sul piano di BC1.	36
2.12	Distribuzione dei punti di impatto sul piano di BC1.	36

2.13	Distribuzione angolare dei raggi cosmici.	37
2.14	Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi.	38
2.15	Distribuzione dei tempi del massimo.	38
2.16	Distribuzione delle pulse height.	39
2.17	Correlazioni di pulse height.	39
2.18	Pulse height in funzione della coordinata y	40
2.19	Mappa di efficienza.	41
2.20	Proiezioni per righe e per colonne della mappa di efficienza. . .	42
2.21	Profilo dei raggi cosmici sul piano del rivelatore 1 del secondo setup.	43
2.22	Distribuzione dei punti di impatto sul piano del rivelatore 1 del secondo setup.	43
2.23	Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi.	44
2.24	Distribuzione delle pulse height e dei tempi relativi ai due canali di Jack.	44
2.25	Mappa di efficienza con i due canali in OR.	45
2.26	Mappa di efficienza con i due canali in AND.	46
2.27	Mappa di efficienza con i due canali in OR selezionando su basse PH.	46
2.28	Mappa di efficienza con i due canali in OR e coordinate ruotate. .	47
2.29	Proiezione della mappa di efficienza nella direzione perpendi- colare agli strati.	48
3.1	Schema del complesso di acceleratori del CERN	50
3.2	Schema completo del setup sulla linea H2.	52
3.3	Schema del setup al CERN.	53
3.4	Immagini relative al setup sperimentale sulla linea H2.	54
3.5	Immagini relative ai calorimetri utilizzati sulla linea H2.	55
3.6	Distribuzione angolare delle tracce prima dell'allineamento. . .	57
3.7	Distribuzione angolare delle tracce dopo l'allineamento.	58
3.8	Profili del fascio misurati dai 4 rivelatori a microstrip di silicio nelle direzioni x e y	59
3.9	Distribuzione dei punti di impatto sul piano di Jack pesata in PH.	59
3.10	Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi.	60
3.11	Bordo di Jack.	61
3.12	Schema di funzionamento di una Desy table.	62

3.13	Biplot della distribuzione della pulse height in funzione della distribuzione dei tempi.	63
3.14	Distribuzione delle pulse height.	64
3.15	Distribuzione dei tempi del massimo.	64
3.16	Fit gaussiano della distribuzione delle pulse height.	65
3.17	Massimo della distribuzione delle pulse height in funzione della coordinata y	66
3.18	Biplot della distribuzione delle PH equalizzate dei due canali di Jack.	66
3.19	Retta di calibrazione.	68
3.20	Distanza relativa (risalata al picco misurato) tra il picco misurato e calibrato in energia e il valore vero dell'energia del fascio in funzione di quest'ultimo.	68
3.21	Distribuzione delle pulse height in GeV.	69
3.22	Risoluzione energetica percentuale del calorimetro Jack e relativo fit.	70

Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche delle fibre WLS.	25
2.2	Caratteristiche dei PMT.	26
2.3	Specifiche dei rivelatori al silicio delle <i>beam chamber</i>	29
2.4	Specifiche dei rivelatori al silicio del secondo setup.	30
3.1	Descrizione delle colonne salvate nei file ASCII.	56
3.2	Run utilizzati per l'equalizzazione di Jack.	63
3.3	Run utilizzati per la calibrazione di Jack.	67
3.4	Parametri estratti dal fit lineare della retta di calibrazione. . .	67
3.5	Parametri rappresentanti i tre termini della risoluzione energetica.	70

Bibliografia

- [1] R. Arcidiacono. *Calorimetry in particle physics experiments*. URL: http://personalpages.to.infn.it/~arcidiac/calor_intro.pdf.
- [2] F. Ronchetti. *Caratterizzazione di un calorimetro a BGO con fasci di elettroni e muoni*. Bachelor Thesis, Università degli Studi dell'Insubria. 2019. URL: <https://drive.google.com/file/d/1X8f0CbIjP0I5LxQHcxCHFSajIvtW7PYT/view?usp=sharing>.
- [3] I. Gregor. *Detectors for high energy physics*. DESY Summerstudents. 2019.
- [4] C. W. Fabjan e F. Gianotti. «Calorimetry for particle physics». In: *Reviews of modern physics* 75 (ott. 2003). DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.1243>. URL: <https://cds.cern.ch/record/692252/files/RevModPhys.75.1243.pdf>.
- [5] A. Berra. *Silicon photomultipliers in high energy and space applications*. PhD Thesis, Università degli Studi dell'Insubria. 2012. URL: https://drive.google.com/file/d/1H_ALTDaVdJIGV8K2VOYbKe7aZr0cfhTD/view?usp=sharing.
- [6] Particle Data Group, P. A. Zyla et al. «Review of Particle Physics». In: *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2020.8 (ago. 2020). 083C01. ISSN: 2050-3911. DOI: 10.1093/ptep/ptaa104. eprint: <https://academic.oup.com/ptep/article-pdf/2020/8/083C01/34673722/ptaa104.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>.
- [7] S. Stapnes. *Detector for particle physics*. URL: https://indico.cern.ch/event/130206/contributions/119291/attachments/91542/130922/NTP_Detectors.pdf.
- [8] K. Nakamura et al. «The Review of Particle Physics». In: *J. of Phys. G*, 37:075021 (2010). DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/37/7A/075021>. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/37/7A/075021/pdf>.

- [9] P. G. Ratcliffe. *Introduction to nuclear and subnuclear physics*. Lecture notes. 2021.
- [10] M. Prest. *Radiation and Detectors*. Lecture notes. 2020.
- [11] CERN. *OPAL detector e-m calorimeter*. URL: <https://www.sciencedirect.com/media/798/view/opal-detector-e-m-calorimeter-cern>.
- [12] *Super-Kamioande photo album*. URL: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/gallery/index-e.html>.
- [13] STFC. *CMS ECAL Endcaps photographs*. URL: <https://hepwww.pp.rl.ac.uk/groups/CMSvpt/bestphotos/Point%205/General%20-%20Other/slides/CERN%20Pt5%20CMS%20Constn%20Hall1%20-%20CMS%20endcap.htm>.
- [14] *The CERN experiment on direct CP violation in the decays of neutral kaons to two pions*. URL: https://palesti2.web.cern.ch/na48_page.htm.
- [15] *OPAL Silicon Tungsten Luminometer*. URL: <https://cds.cern.ch/record/43986>.
- [16] A. Selmi. *Costruzione e test di un rivelatore portatile per raggi cosmici*. Bachelor Thesis, Università degli Studi dell'Insubria. 2019. URL: <https://drive.google.com/file/d/1rGKyxpTwJmxUxyL096FnXiq0vrbfRKQY/view?usp=sharing>.
- [17] J. Blanchard. *A measurement of the angular distribution of cosmic muons*. Research Project Final Report, McGill University. 2012. URL: https://www.physics.mcgill.ca/~francois/projects/spark/Reports/201209_blanchard_spark.pdf.
- [18] Y. Kuo. *Determination of the angular distribution of cosmic rays at sea level*. Bachelor Thesis, Massachusetts Institute of Technology. 2010. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/61208/701107722-MIT.pdf;sequence=2>.
- [19] A. C. Benvenuti et al. «A shashlik calorimeter with longitudinal segmentation for a linear collider». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 461 (2001). DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/P01028. URL: <http://hedberg.web.cern.ch/hedberg/home/caleido/papers/caleido5.pdf>.

- [20] J. Badier et al. «Shashlik calorimeter Beam-test results». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 348.1 (1994), pp. 74–86. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90844-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90844-3). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294908443>.
- [21] *Scintillating Fiber*. URL: <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/scintillating-fiber>.
- [22] *Photomultiplier XP2262*. URL: <https://web.archive.org/web/20190306085421/http://www.hzcpotonics.com/products/XP2262.pdf>.
- [23] Hamamatsu. *Photomultiplier tube R1828-01*. URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/R1828-01/index.html>.
- [24] M. Prest et al. «The AGILE silicon tracker: an innovative γ -ray instrument for space». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 501.1 (2003). Proceedings of the 10th International Workshop on Vertex Detectors, pp. 280–287. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)02047-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)02047-8). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900202020478>.
- [25] G. Ballerini. *Testing coherent channeling phenomena for the KLEVER project*. Master Thesis, Università degli Studi dell’Insubria. 2018. URL: <https://cds.cern.ch/record/2674207?ln=it>.
- [26] *DT5730 / DT5730S: 8 Channel 14 bit 500 MS/s Digitizer*. URL: <https://www.caen.it/products/dt5730/>.
- [27] R. Brun et al. *HBOOK : Statistical Analysis and Histogramming : Reference Manual*. URL: <http://cds.cern.ch/record/2296378>.
- [28] F. Ambrosino et al. *KLEVER: An experiment to measure $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ at the CERN SPS*. 2019. arXiv: 1901.03099 [hep-ex].
- [29] *CERN accelerator complex*. URL: <https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>.
- [30] C. Pralavorio. *LS2 Report: Focus on the North Area*. URL: <https://home.cern/news/news/engineering/ls2-report-focus-north-area>.
- [31] J. Kvasnicka. *DESY table*. URL: <https://confluence.desy.de/display/Calice/DESY+table>.

