



Università degli Studi di Perugia
Dipartimento di Fisica e Geologia
Corso di Laurea Triennale in Fisica

Tesi di Laurea

**Studio della fattibilità e delle
prestazioni temporali di un sistema
tracciante 4D al silicio tramite
simulazione numerica**

Relatori

**Dott. Matteo Duranti
Dott. Valerio Formato**

Candidato

Francesco Faldi

Anno Accademico 2017-2018

Indice

1	Introduzione	3
2	Raggi Cosmici	4
2.1	Composizione e caratteristiche	4
2.2	Raggi cosmici galattici ed extragalattici:	5
2.3	Raggi cosmici e antimateria	6
3	Rivelatori	7
3.1	Camera a ionizzazione	9
3.2	Contatore proporzionale	10
3.3	Scintillatori	11
3.4	Tracciatori a semiconduttore	12
3.5	Calorimetri	15
3.6	Esperimenti con tracciatori al silicio	15
3.7	Tracciamento temporale	17
4	Simulazione del tracker di silicio	20
4.1	Descrizione della simulazione	22
4.2	Particelle	22
5	Analisi Dati	23
5.1	Protoni	24
5.2	Elettroni	27
5.3	Istogrammi con risoluzione temporale	29
6	Conclusioni	32

1 Introduzione

Lo studio dei raggi cosmici ha permesso di effettuare le prime scoperte sulle particelle che compongono l'atomo: il positrone, la prima particella di antimateria ad essere stata scoperta (1932), è un esempio dei risultati ottenuti, insieme alla scoperta del muone, del pione ed altri mesoni.

Fino all'introduzione degli acceleratori di particelle, i raggi cosmici costituivano le uniche fonti di particelle ad alta energia e sono tutt'oggi di grande interesse.

Lo scopo di questo lavoro è quello di studiare un ideale rivelatore a semiconduttore predisposto per misurare carica ed energia dei raggi cosmici, con varie configurazioni di sensori in grado di effettuare misure temporali al passaggio delle varie particelle, in generale protoni, nuclei ed elettroni.

Lo studio è stato effettuato tramite la simulazione di un semplice tracker formato da un modulo rettangolare contenente un numero variabile di layer di silicio e da un calorimetro posto direttamente alla fine del modulo.

Nella progettazione di tale simulazione sono stati considerati dei modelli reali e operativi di tracciatori, tra cui quelli degli esperimenti Fermi [1], AMS [2] e Dampe [3]. Un aspetto di particolare interesse per i futuri rivelatori a semiconduttore è la possibilità di implementare il tracciamento temporale del passaggio delle particelle all'interno del rivelatore, in quanto porterebbe a risolvere alcuni problemi dei rivelatori esistenti che rendono complicata l'analisi dei dati acquisiti; perciò il lavoro qui presentato è dedicato a verificare se questa funzione sia effettivamente utile ed eventualmente ad ottimizzarla.

La tecnologia attuale permette di raggiungere una risoluzione temporale di molto superiore a 100 ps (picosecondi), ancora non sufficiente per motivi che verranno discussi in seguito, anche se ultimamente si è reso possibile raggiungere questo valore con i sensori al silicio in uso ed elettronica di nuova generazione: questo traguardo potrebbe essere sufficiente per ottenere ottimi risultati ed è quello che si prefigge di dimostrare questa simulazione. D'altra parte sono in via di sviluppo nuovi metodi per realizzare sensori a semiconduttore (LGAD, Low Gain Avalanche Detector)[5] che permetterebbero di abbassare questo valore di un ordine di grandezza, rendendo appetibile la possibilità di implementare la funzione di tracciamento temporale in tutti i rivelatori che possono sfruttare questo tipo di sensori.

2 Raggi Cosmici

In questa tesi l'obiettivo è quello di studiare un rivelatore per studiare principalmente protoni ed elettroni, per questo motivo viene presentata di seguito un'introduzione sui raggi cosmici, soggetto principale della simulazione del tracker al silicio.

2.1 Composizione e caratteristiche

Con il termine "raggi cosmici" si fa riferimento a tutte quelle particelle che arrivano sulla Terra dopo essere state espulse da varie sorgenti, in generale stelle, supernovae e gamma-ray bursts, incluso il nostro Sole.

I raggi cosmici sono detti "primari" prima che essi raggiungano l'atmosfera terrestre e producano sciami di altre particelle e sono composti principalmente da protoni e particelle alpha, ma possono contenere anche nuclei ionizzati di altri elementi, fino ad arrivare all'uranio.

La composizione dei raggi cosmici primari non include soltanto nuclei, ma anche elettroni e particelle di antimateria, quest'ultime in percentuali molto basse ma di grande interesse scientifico.

Le caratteristiche di un flusso di raggi cosmici sono elencate di seguito:

Spettro: Lo spettro energetico di queste particelle varia di molti ordini di grandezza, a partire da poche centinaia di MeV, fino ad arrivare a $10^{20} - 10^{21}$ eV, anche se il punto di massima abbondanza dello spettro corrisponde ad energie intorno a 2-3 GeV: parte dei raggi cosmici di più bassa energia (MeV) sono prodotti dal Sole e vanno a formare il "vento solare", mentre quelli di altre origini, esterne al Sistema Solare, hanno energie dell'ordine del GeV o maggiori. Nell'immagine in Fig.1 è rappresentato il flusso di raggi cosmici in funzione dell'energia.

Innanzitutto si può osservare che lo spettro segue una legge di potenza: $\Phi(E) \propto E^{-\gamma}$, con un indice spettrale γ generalmente pari a 2.8; tuttavia sono presenti due zone in cui questo valore è differente.

La prima zona si trova nell'intervallo tra i 10^{14} e i 10^{15} eV (intervallo denominato "ginocchio"), in cui la curva si irripidisce e l'indice spettrale passa da $\gamma = 2.7 - 2.8$ a $\gamma = 3$.

Una seconda zona si trova a circa $5 \cdot 10^{19}$ eV, detta "caviglia", in cui l'indice spettrale torna a $\gamma = 2.7$.

Si pensa che queste anomalie nello spettro siano dovute a cambiamenti nella composizione e nelle sorgenti dei raggi cosmici [6].

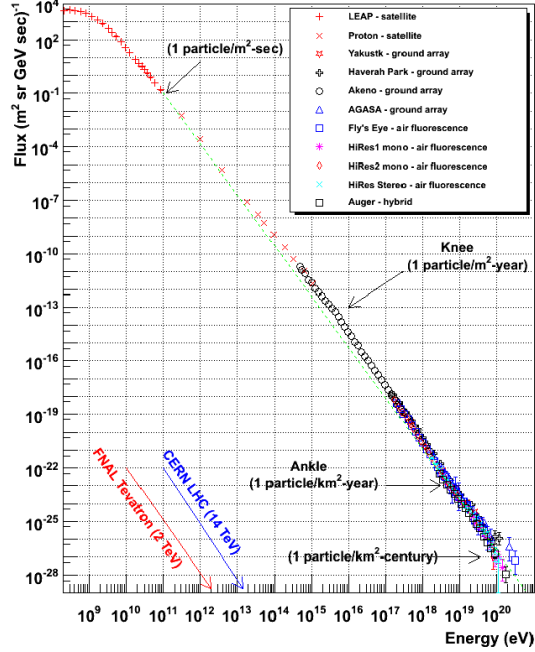


Figura 1: Spettro dei raggi cosmici

Raggi cosmici secondari: Con l'arrivo dei raggi cosmici sulla Terra, questi subiscono collisioni con i nuclei degli atomi presenti nell'atmosfera, producendo una cascata di particelle più leggere, principalmente pioni e kaoni.

I mesoni prodotti decadono in muoni, i quali compongono gran parte dei raggi cosmici secondari che arrivano sulla superficie terrestre; la parte rimanente consiste di elettroni positroni e fotoni, anch'essi prodotti di decadimento. Il flusso di muoni a livello del mare corrispondente al picco nello spettro energetico (1 GeV) è in media pari a 1 per secondo per centimetro quadrato, anche se bisogna considerare che sulla superficie terrestre esso non è isotropo a causa di alcuni effetti, come l'attività solare e il campo magnetico terrestre.

2.2 Raggi cosmici galattici ed extragalattici:

Come già detto in precedenza, i raggi cosmici di più alta energia (10^{14} eV) provengono da sorgenti al di fuori del Sistema Solare e, se si esclude l'influenza del campo magnetico solare, la loro direzione d'arrivo sulla Terra è isotropa. Per capire quali processi siano all'origine della propagazione di particelle di tale energia, si possono fare delle ipotesi in base ad alcune evidenze sperimentali:

Meccanismi di accelerazione: Innanzitutto, poichè lo spettro energetico dei raggi cosmici segue una legge di potenza, si possono escludere processi di accelerazione termici, ovvero emissione tramite radiazione di corpo nero, in quanto l'andamento sopra descritto non si concilia con la Legge di Planck, che definisce lo spettro di corpo nero. In secondo luogo, i raggi cosmici molto energetici includono abbondanze di elementi pesanti che possono essere prodotti soltanto in eventi come le supernovae.

Un primo candidato che rientra in queste condizioni è costituito dalle supernovae di tipo II, dato che le onde d'urto generate in questi processi possono accelerare nuclei ionizzati ed elettroni almeno fino al range energetico del "knee", in base alle osservazioni compiute sullo spettro dei raggi gamma provenienti dai resti di supernova: tali raggi gamma infatti derivano dal decadimento di pioni neutri prodotti durante interazioni elastiche tra nuclei accelerati ed il gas interstellare, indicando che di fatto vengono accelerati ioni fino a quelle energie. Un'altro indizio è costituito dal fatto che durante le fasi finali di queste supernovae vengono prodotti elementi più pesanti del ferro [7].

Tuttavia non è chiaro se le Supernovae di tipo II possano accelerare particelle oltre il range dei TeV, per questo si suppone che molti raggi cosmici che superano quelle energie (detti Ultra High Energy Cosmic Rays) siano di origine extragalattica, prodotti da oggetti come i nuclei galattici attivi (AGN), i gamma ray bursts (GRB) o da stelle di neutroni con campo magnetico molto intenso (magnetar).

2.3 Raggi cosmici e antimateria

Nei raggi cosmici secondari è presente antimateria, perchè nel decadimento dei pioni dopo l'interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'atmosfera vengono prodotti positroni, tuttavia è presente in minima parte anche nei raggi cosmici primari: questo si spiega considerando le collisioni tra protoni e mezzo interstellare, in cui possono essere prodotti positroni e antiprotoni, i quali al loro volta possono originare antideutoni o nuclei di antihelio.

Il fatto che questi siano prevalentemente costituiti di materia indica che lo è interamente anche la Via Lattea ma, dato che la teoria del Big Bang richiede che inizialmente fosse presente antimateria e materia in quantità uguali, non si può escludere che esistano altre galassie costituite di antimateria. A questo punto diventa di fondamentale importanza la ricerca di nuclei di antimateria più pesanti di quello d'idrogeno, poichè difficilmente potrebbero essere prodotti per scattering con il mezzo interstellare e verrebbero quindi ricondotti all'esistenza di oggetti di antimateria.

3 Rivelatori

L'osservazione dei raggi cosmici viene effettuata principalmente tramite rivelatori di particelle equipaggiati su satelliti, palloni aerostatici oppure a terra, studiando la cascata di raggi cosmici secondari.

In generale lo scopo di un rivelatore è quello di identificare le particelle, misurandone momento, carica ed energia: per farlo vengono utilizzati diversi sistemi in cui parte dell'energia della particella viene trasferita al rivelatore stesso, dove viene convertita in un segnale che può essere manipolato e trasformato per essere analizzato.

Il tipo di segnale dipende dalle caratteristiche del rivelatore, ma in generale può essere elettrico o luminoso (quest'ultimo viene in ogni caso convertito in segnale elettrico).

Un rivelatore di particelle possiede alcune caratteristiche che vanno a definirne le prestazioni e l'utilizzo che può esserne fatto:

Sensibilità: la sensibilità di un detector è il valore minimo di energia trasferita dalla particella che può essere misurato: la maggior parte dei rivelatori infatti sfrutta la ionizzazione del mezzo sensibile alla radiazione per produrre un segnale, quindi nel caso in cui l'energia che può essere trasferita dalla particella in arrivo sia inferiore all'energia di ionizzazione degli atomi che compongono il mezzo, il passaggio della particella non produce alcun segnale.

Questo parametro dipende dalla sezione d'urto della particella, dal volume sensibile alla radiazione, dal materiale che contiene il mezzo e dal rumore dovuto ad altre sorgenti di radiazione: infatti la probabilità che la particella trasferisca energia è proporzionale alla probabilità che essa subisca un urto nel mezzo, che si ottiene considerando i primi due fattori, mentre il materiale di rivestimento ed il suo spessore, così come il livello di rumore, impongono un limite inferiore all'energia delle particelle in entrata.

Risoluzione energetica: i valori ottenuti andando ad effettuare misure di energia, tenendo conto delle fluttuazioni statistiche che coinvolgono i processi d'interazione tra particelle, seguiranno una distribuzione con una certa ampiezza: per questo motivo si introduce la risoluzione energetica, una grandezza che determina la capacità di distinguere due differenti valori vicini tra loro nello spettro di energia. La distribuzione con cui si presentano le misure di energia, per un segnale monoeenergetico, è detta "funzione di risposta" e varia in base al tipo di particella, alla quantità di energia ceduta allo ione (e quindi al processo di scattering) e alla geometria del rivelatore.

La risoluzione energetica è definita dal rapporto tra la larghezza del segnale a metà ampiezza ed il valore massimo del segnale:

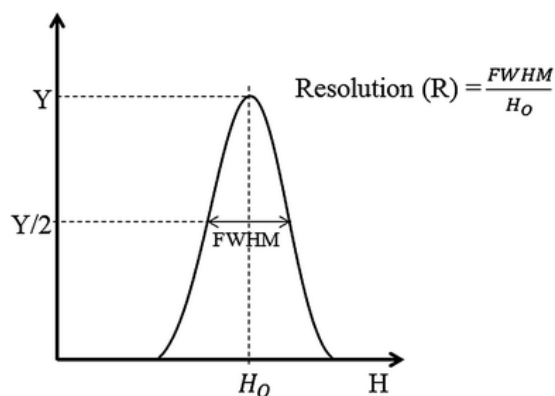


Figura 2: Risoluzione energetica di un segnale monocromatico

Risoluzione temporale: il tempo con cui viene prodotto un segnale al passaggio di una particella non è immediato e l'interazione stessa della particella ha una durata non nulla: dunque il segnale relativo al singolo evento è distorto ed ha in generale un andamento simile a quello della Fig.3.

Questo comporta dei problemi nel caso in cui la frequenza con cui si verificano gli eventi sia più alta dell'inverso dell'intervallo di tempo occupato dal singolo segnale, dato che potrebbe verificarsi una sovrapposizione di due o più segnali, causando una perdita di informazioni.

Un altro fattore rilevante è il "tempo morto", ovvero il tempo necessario a salvare il dato relativo al singolo segnale: se infatti si dovessero verificare due eventi consecutivi con un intervallo minore del tempo morto, questi verrebbero considerati come un unico segnale (pile-up, Fig.3).

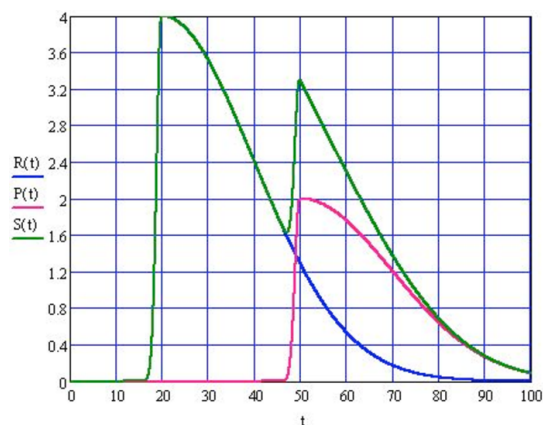


Figura 3: Risoluzione temporale e sovrapposizione di due segnali (fenomeno di pile-up): viene rappresentato in blu il primo segnale, in viola il secondo ed in verde la somma dei due

Efficienza: l'efficienza totale di un rivelatore è il rapporto tra il numero di eventi effettivamente rivelati e quelli generati dalla sorgente ed è il prodotto tra efficienza intrinseca ed accettazione: $\epsilon_{tot} = \epsilon_{int} \cdot A$

L'accettazione è la frazione di particelle che entrano nel rivelatore rispetto a quelle generate e dipende sia dalla geometria della sorgente (ad esempio una sorgente può essere puntiforme, oppure un piano da cui le particelle vengono generate in modo isotropo) che da quella del rivelatore, ovvero la parte di angolo solido utile coperto dal rivelatore.

L'efficienza intrinseca invece è la frazione di particelle effettivamente rivelate rispetto a quelle in entrata al rivelatore.

Di seguito vengono descritti alcuni esempi tra i diversi tipi di rivelatori, ponendo particolare attenzione ai tracciatori al silicio, su cui questo lavoro è principalmente orientato.

3.1 Camera a ionizzazione

Una camera a ionizzazione è un rivelatore costituito da un volume contenente un gas i cui atomi, al passaggio di particelle sufficientemente energetiche, vengono ionizzati e producono quindi delle coppie elettrone-ione positivo.

A questo dispositivo viene applicato un campo elettrico che permette agli ioni prodotti di migrare verso i poli di segno opposto, producendo così un impulso di corrente misurabile.

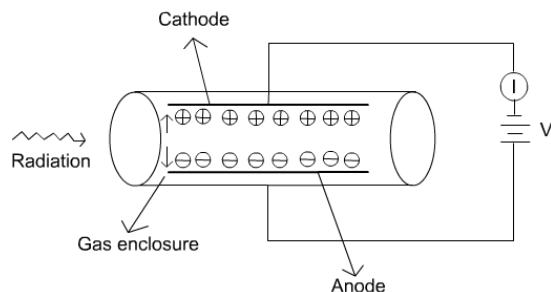


Figura 4: Schema di una camera di ionizzazione

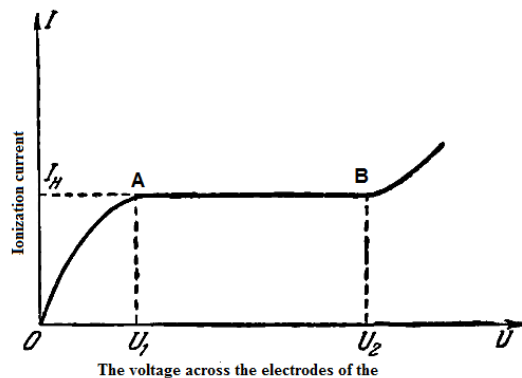


Figura 5: Corrente di ionizzazione vs tensione ai capi degli elettrodi della camera

Questo tipo di detector può essere utilizzato per rivelare particelle alfa o beta, oppure anche fotoni che interagiscono con gli atomi all'interno della camera per effetto fotoelettrico.

Poichè l'impulso elettrico generato da una singola coppia è molto piccolo e difficilmente misurabile, le camere a ionizzazione vengono progettate in modo che le particelle in entrata trasferiscano la massima energia possibile, producendo più coppie per ogni evento.

L'andamento della corrente generata per il singolo evento in funzione della tensione applicata agli elettrodi è riportato in Fig.5.

Nel tratto iniziale del grafico, la corrente è crescente perchè la tensione applicata è così bassa da permettere ad alcune coppie elettrone-ione di ricombinarsi, ma oltre ad un certo valore di tensione non si verifica più questo fenomeno e quindi l'andamento è costante.

In generale le camere a ionizzazione vengono utilizzate con una tensione compresa tra U_1 ed U_2 , ovvero voltaggi per cui la corrente è stabile, dato che per valori maggiori di U_1 anche le coppie generate per agitazione termica tendono a ionizzare, creando un effetto "valanga".

3.2 Contatore proporzionale

Aumentando la tensione oltre il livello a cui opera una camera a ionizzazione, si ottiene un dispositivo con una funzione differente: un contatore proporzionale.

Infatti, come si nota dal precedente grafico, l'andamento della corrente in funzione della tensione non rimane sempre costante dopo un certo valore, ma riprende a crescere; questo perchè, quando la tensione è sufficientemente alta, gli elettroni prodotti dalla prima ionizzazione possono ionizzare altri atomi, producendo un effetto

a cascata e aumentando la corrente risultante.

In questo modo è possibile rilevare anche la produzione di una singola coppia ione-elettrone dovuta all'interazione con la radiazione proveniente dalla sorgente, utilizzando lo strumento come un contatore, in cui i picchi di corrente sono proporzionali all'energia scambiata nell'urto.

3.3 Scintillatori

Gli scintillatori sono dei materiali in cui il passaggio di una particella ionizzante produce un numero di fotoni con energia complessivamente equivalente all'energia trasmessa.

Un detector che sfrutti gli scintillatori come sorgente di segnali utilizza dei fotomoltiplicatori per trasformare il segnale ottico in elettrico ed amplificarlo : il segnale elettrico così prodotto è a sua volta direttamente proporzionale alla luce generata. Gli scintillatori vengono suddivisi in organici ed inorganici, aventi un differente meccanismo di fotoproduzione.

Gli scintillatori organici sono costituiti da idrocarburi aromatici, in cui la produzione di fotoni è associata all'eccitazione degli elettroni appartenenti all'intera molecola dell'idrocarburo.

Questi elettroni occupano i livelli energetici molecolari, a ciascuno dei quali è associata una struttura fine corrispondente ai modi vibrazionali molecolari.

Il processo di ionizzazione causa la transizione degli elettroni dallo stato fondamentale a stati eccitati.

Gli scintillatori inorganici invece sono cristalli con struttura a bande elettroniche, in cui sono incluse delle impurità che hanno la funzione di attivatori, creando dei livelli energetici supplementari nel gap tra la banda di valenza e quella di conduzione.

L'attivatore permette alle coppie elettrone-lacuna prodotte nell'interazione di passare ai nuovi livelli intermedi creati dalle impurità e di ricomporsi emettendo un fotone di energia inferiore a quella assorbita dalla particella incidente.

In generale l'attivatore viene scelto in modo tale che il fotone emesso sia compatibile con il range di lunghezze d'onda per cui è operativo il fotomoltiplicatore.

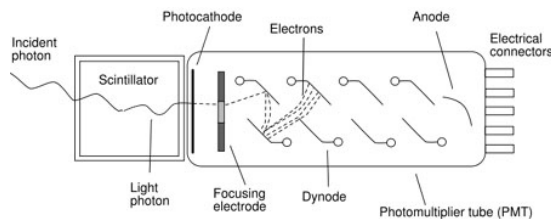


Figura 6: Schema di un detector a scintillazione con fotomoltiplicatore

3.4 Tracciatori a semiconduttore

I tracciatori a semiconduttore, generalmente costituiti in silicio o germanio, sfruttano lo stesso principio dei rivelatori a gas, trasformando l'energia trasferita agli atomi del tracciatore in segnale elettrico; in questo caso però il materiale sensibile è un solido semiconduttore con struttura cristallina, in cui l'interazione delle particelle con il reticolo produce una coppia elettrone-lacuna che generano una corrente una volta applicato un campo elettrico esterno.

Proprietà dei semiconduttori: nella struttura a bande di un metallo, la banda ad energia più alta occupata non è completamente riempita, perciò gli elettroni di valenza possono facilmente entrare in conduzione.

Negli isolanti l'ultima banda è riempita completamente ed il gap energetico tra la banda di valenza e quella di conduzione è troppo grande perchè gli elettroni possano migrare a livelli più alti (10 eV).

Per quanto riguarda i semiconduttori, pur essendo l'ultima banda completa, il gap è abbastanza piccolo da permettere agli elettroni che occupano gli ultimi stati della banda di valenza di passare alla banda successiva per agitazione termica (il gap nei semiconduttori è dell'ordine di 1 eV).

In un semiconduttore dunque si generano continuamente coppie elettrone lacuna, che però tendono a ricombinarsi, rendendo il reticolo complessivamente neutro.

Il reticolo di un semiconduttore è generalmente formato da atomi tetraivalenti, ovvero atomi che formano quattro legami covalenti con i primi vicini.

Giunzione $p - n$: nei tracker i semiconduttori vengono utilizzati come giunzioni $p - n$ polarizzate inversamente.

Una giunzione $p - n$ è composta da due zone di semiconduttore con differente drogaggio, ovvero con l'inclusione nel reticolo di atomi con un diverso numero di elettroni di valenza: il drogaggio p consiste nell'introduzione di atomi con un elettrone in meno, generando un eccesso di lacune, il drogaggio n invece introduce atomi con un elettrone in più.

Assemblando una giunzione $p - n$, che di per sè risulta essere elettricamente neutra, gli elettroni tendono a migrare dalla regione n alla regione p , generando intorno alla giunzione una regione di svuotamento e quindi un debole campo elettrico che tende a respingere le cariche rimanenti nelle due regioni (Fig.7)

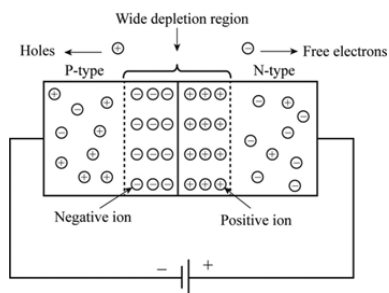


Figure 2

Figura 7: Giunzione $p - n$

In particolare una giunzione $p - n$ è polarizzata inversamente quando viene applicata una tensione elettrica con polo positivo collegato alla regione n (attirando gli elettroni liberi) e polo negativo alla regione p ("attirando" le lacune): questo fa aumentare la dimensione della zona di svuotamento.

Similmente ai rivelatori a gas, la zona di svuotamento reagisce all'interazione con particelle cariche producendo coppie ione-lacuna che vengono attratte verso i poli del campo elettrico producendo un segnale elettrico.

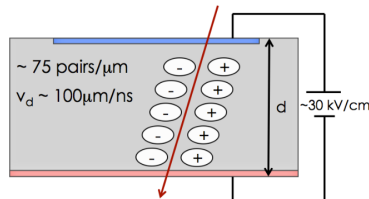


Figura 8: Passaggio di una particella carica in una giunzione $p - n$: la ionizzazione causata dal passaggio della particella crea delle coppie elettrone-laguna che, sotto l'effetto del campo elettrico applicato alle due facce del dispositivo, migrano verso gli elettrodi, dai quali vengono raccolti.

Rivelatori a strip di silicio una semplice giunzione $p-n$ rivelerebbe il passaggio di una particella, ma non darebbe alcuna informazione sulla sua posizione, quindi si utilizza una struttura differente.

Un detector a strip è formato da una serie di impianti a forma di striscia in silicio drogato p , con la funzione di elettrodi raccoglitori di cariche (in questo caso lacune). Piazzati sulla superficie di un wafer di silicio drogato n e completamente svuotato e completati da un'altra serie di strip sull'altro lato drogate $n+$ (con più inclusioni rispetto al drogaggio n), questi impianti formano un array monodimensionale di giunzioni $p-n$.

Similmente può essere realizzato un impianto con strip di silicio n su un wafer drogato p e altre strip drogate $p+$. Le strip vengono metallizzate e collegate ciascuna ad un amplificatore di segnale sensibile alle rispettive cariche (elettroni o lacune).

Aggiungendo sull'altro lato il secondo array di strip drogate dell'altro tipo, poste ortogonalmente alle prime, si ottiene un sensore in grado di effettuare misure bidimensionali della posizione delle particelle in arrivo.

Lo spessore del wafer di silicio determina la quantità di carica raccolta nelle strip, tuttavia con l'aumentare dello spessore si verificano alcuni problemi: infatti le cariche all'interno del wafer non seguono traiettorie rettilinee e quindi attraversando molto materiale possono attivare diverse strip, anche lontane fra loro, riducendo la precisione della misura di posizione.

Inoltre nel caso di uno spessore elevato le cariche impiegano più tempo ad arrivare agli elettrodi e quindi si ha un segnale più ampio.

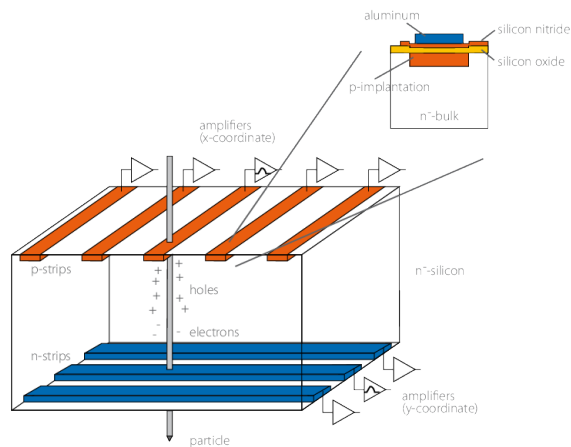


Figura 9: Rivelatore a strip di semiconduttore: sono rappresentate in arancione le strip di tipo p , il volume centrale è drogato n , mentre le strip blu sono drogate $n+$

3.5 Calorimetri

Un calorimetro è un dispositivo utilizzato principalmente per misurare l'energia di una particella: le particelle che decadono nel calorimetro producono uno sciame di particelle secondarie, il quale viene a sua volta assorbito dal dispositivo producendo un segnale proporzionale all'energia.

Tuttavia questa non è l'unica funzione di un calorimetro, in quanto lo sciame prodotto in esso ha una forma che dipende dalla particella decaduta e questo costituisce un metodo ulteriore per identificare le particelle.

Un calorimetro a “sampling” (ad esempio quello di AMS [2]) è costituito da strati alternati di materiale attivo, cioè in grado di trasformare l'energia depositata in segnale elettrico, e materiale più denso con lo scopo di far decadere le particelle; mentre un calorimetro omogeneo è costituito da un materiale scintillatore, denso e trasparente (Fermi [1], Dampe [3]).

I calorimetri si distinguono in elettromagnetici ed adronici, a seconda di come vengono ottimizzati per misurare l'energia delle particelle che decadono in essi: anche un calorimetro misura entrambe, nel primo tipo in particolare viene rilevata l'energia di fotoni ed elettroni, che interagiscono tramite interazione elettromagnetica, nel secondo tutte le altre particelle che interagiscono tramite interazione forte.

In genere i calorimetri vengono posti subito dopo il tracciatore a semiconduttore e questo può portare alcune particelle a ritornare nel tracciatore, rimbalzando sul calorimetro (backsplash).

3.6 Esperimenti con tracciatori al silicio

Un esperimento che coinvolga lo studio di raggi cosmici, non sarà mai composto da un solo elemento tra quelli sopra elencati, ma sarà una combinazione di essi a seconda dello scopo del rivelatore.

Per esempio negli esperimenti che coinvolgono la rivelazione di raggi cosmici saranno quasi sempre presenti certi dispositivi:

- uno scintillatore con funzione di Time of Flight, ovvero un cronometro che misura il tempo di volo all'interno del detector di ciascuna particella;
- un tracker a semiconduttore (silicio) che permette di ricavare la traccia di una particella e discernere particelle da antiparticelle, nel caso in cui il tracker si trovi all'interno di un campo magnetico opportuno;
- un calorimetro elettromagnetico per misurare l'energia delle particelle ed identificarle tramite la traccia dello sciame.

Un esempio di questo tipo di rivelatori è AMS-02, uno spettrometro magnetico a bordo dell'ISS [4].

In questo esperimento sono presenti, oltre ai dispositivi sopra descritti, anche un Transition Radiation Detector, che distingue le particelle leggere da quelle pesanti, e un detector che misura la velocità dei raggi cosmici sfruttando il cono di luce Cherenkov emesso dalle particelle.

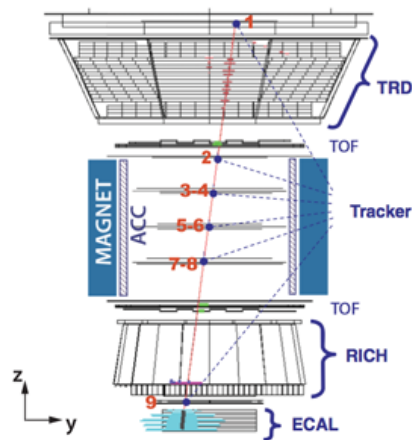


Figura 10: Schema di AMS-02

Un altro esempio è DAMPE, un telescopio spaziale con l'obiettivo di studiare i raggi cosmici con l'obiettivo di individuare eventuali tracce di materia oscura. Il modello del tracciatore di questo esperimento è stato ripreso nella simulazione di questo lavoro per quanto riguarda la geometria e la disposizione dei sensori.

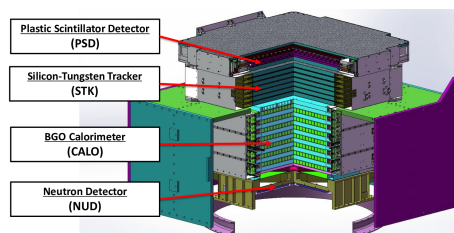


Figura 11: Schema di DAMPE

3.7 Tracciamento temporale

Una sfida che coinvolge gli attuali rivelatori al silicio è quella di implementare la possibilità di salvare informazioni sul tempo di passaggio delle particelle all'interno di un sensore [8].

Lo studio di queste informazioni è rivolto a risolvere alcuni problemi che si presentano in analisi dati.

- Come detto in precedenza, un rivelatore completo viene costruito assemblando in successione diverse componenti e può verificarsi che alcune particelle, in uscita da un sistema tracciante, subiscano un urto con la componente successiva e rientrino all'interno del dispositivo, generando ulteriori segnali (in particolar modo per esperimenti nello spazio, in cui i volumi sono limitati): dunque la possibilità di conoscere il tempo in cui si verifica l'interazione di queste particelle con i sensori porterebbe a scartare tutti i segnali non interessanti (backspalsh);
- un altro problema che è possibile risolvere con questa funzione è quello della sovrapposizione di due eventi (ghost), in cui due particelle colpiscono lo stesso sensore in tempi ravvicinati e, poichè per ogni particella passata si attivano due strip del sensore, si genera una coppia di falsi eventi in corrispondenza degli incroci di strip opposti a quelli in cui sono effettivamente passate le particelle; misurando i tempi in cui si sono attivate le due coppie di strip si noterebbe che questi sono separati.
- nei rivelatori attuali, l'identificazione delle particelle viene effettuata a partire da una misura della velocità delle particelle che attraversano il rivelatore, utilizzando degli scintillatori posti all'ingresso e all'uscita che permettono di misurare il tempo di volo della particella (Time of Flight system), combinata con una misura di energia (ricavando la massa); un tracciatore temporale permetterebbe di sostituire questi scintillatori o comunque di effettuare una misura ulteriore.

Distorsione del segnale: tipicamente il tempo di passaggio della particella viene registrato quando il relativo segnale supera un certo valore di soglia, per questo motivo effetti come time walk e jitter del segnale diventano problematici.

Time walk: segnali di differente ampiezza raggiungono il valore di soglia in diversi momenti, come si vede in Fig.13, a sinistra.

Jitter: il segnale di rumore si somma a quello della particella e causa un'oscillazione in ampiezza (Fig.13, destra).

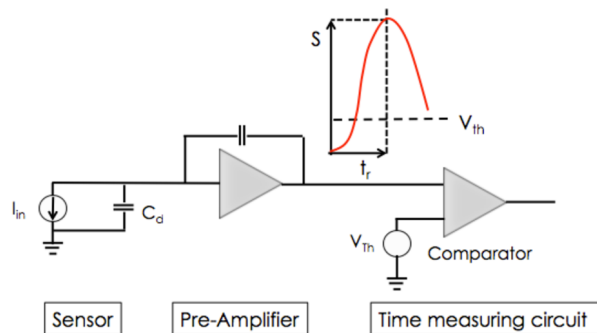


Figura 12: Schema di un sensore al silicio

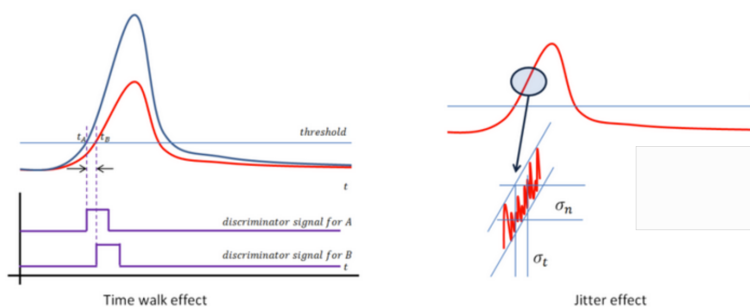


Figura 13: A sinistra, i segnali blu e rosso hanno diversa ampiezza e producono due impulsi ad onda quadra sfasati; a destra invece è rappresentato il rumore che va a sommarsi al segnale della particella

Risoluzione temporale: con la tecnologia disponibile per gli apparati in corso di presa dati (DAMPE, Fermi, AMS, etc...) non si riuscivano ad avere dei sistemi traccianti con risoluzioni temporali sufficienti (qualche decina di ps) da risolvere alcune delle problematiche o ad aggiungere alcune delle possibilità sopraelencate. La limitazione è duplice: da una parte la tecnologia "standard" dei sistemi traccianti non permette intrinsecamente di scendere sotto il centinaio di ps, e dall'altra non era possibile avere dei sistemi di "front-end" sufficientemente veloci ma con consumi compatibili con i vincoli di una missione spaziale (ordine del mW per singolo canale di lettura). La miniaturizzazione dei processi produttivi delle elettroniche a stato solido, però, sta riducendo considerabilmente la potenza assorbita dai dispositivi elettronici e attualmente iniziano ad essere disponibili dei chip di lettura in grado di permettere risoluzioni di qualche decina di ps. Questi chip, se accoppiati con dei

rivelatori abbastanza veloci (rivelatori a microstrip al silicio, ad esempio) potrebbe consentire risoluzioni temporali di 100 ps, già sufficienti per alcuni degli scopi descritti in precedenza. Nuovi sviluppi tecnologici dei sensori, invece, potrebbero invece permettere di arrivare ai 10 ps (sensori LGAD [5]).

Fino ad ora è sempre stato considerato il silicio come semiconduttore utilizzato, questo perchè è preferibile per rivelare particelle cariche, che sono state simulate in questo lavoro.

Infatti il silicio ha di base un'eccellente risoluzione spaziale, può essere lavorato in strati sottili ed è amagnetico; inoltre è leggero e resistente alla radiazione, considerazioni rilevanti in caso di esperimenti nello spazio.

Per ovviare al problema della risoluzione è necessario che i segnali in uscita dai sensori siano brevi e molto "piccati", ma soprattutto uniformi al passaggio di diverse particelle (Fig.14).

Come detto in precedenza, la larghezza del segnale dipende dallo spessore del sensore, inoltre, anche se un sensore più spesso genera più cariche, queste vengono recepite dai sensori in momenti diversi e quindi la corrente iniziale rimane invariata, dato che le cariche generate al centro del sensore arrivano alle strip più tardi e "spalmano" la distribuzione in funzione del tempo (in Fig.15 l'integrale della corrente in funzione del tempo è la carica accumulata nelle strip).

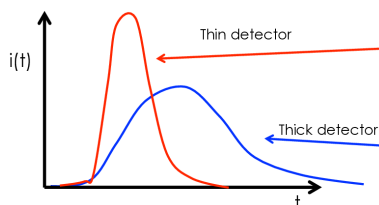


Figura 14: Confronto tra un segnale proveniente da un sensore sottile ed uno più spesso

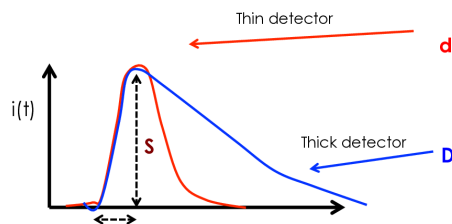


Figura 15: Lo spessore del sensore influenza in minima parte l'ampiezza del segnale

4 Simulazione del tracker di silicio

Per studiare le prestazioni dei sensori con tracciamento temporale è stato necessario innanzitutto creare un modello tridimensionale della geometria del rivelatore: per farlo è stato utilizzato il software di simulazione Geant4, che permette di assemblare i componenti di un rivelatore a partire da volumi e materiali ed è basato sul linguaggio di programmazione C++ .

Il modello di rivelatore scelto è molto semplice ed è composto da 10 layer di silicio $50 \times 50 \times 0.03 \text{ cm}^3$ posti parallelamente a coppie ad una distanza di 0.2 cm, mentre ciascuna coppia dista dall'altra 2 cm, e da un calorimetro in BGO (Germanato di Bismuto) $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$.

La geometria simulata è mostrata in Fig.16 e Fig.17; la geometria del singolo layer è ripresa da quella realizzata per il Tracciatore al Silicio dell'esperimento DAMPE. Ogni layer contiene a sua volta 5 ladder composti da 5 sensori, per un totale di 25 sensori per piano.

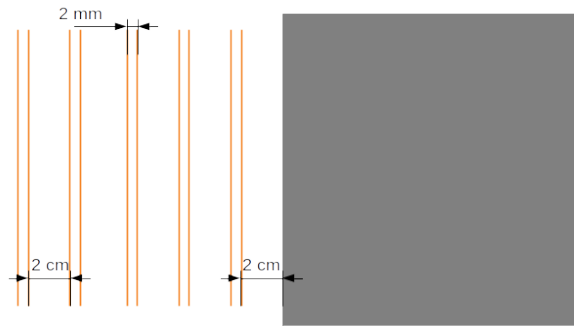


Figura 16: Schema del detector simulato in sezione longitudinale: le linee in arancione rappresentano i layer di silicio, mentre il quadrato rappresenta il calorimetro

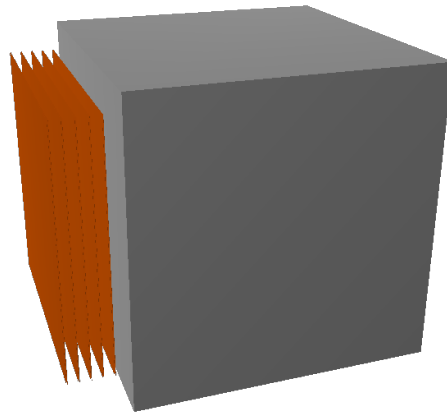


Figura 17: Modello 3D del rivelatore simulato: si notano i pannelli di silicio in arancione ed il calorimetro in grigio

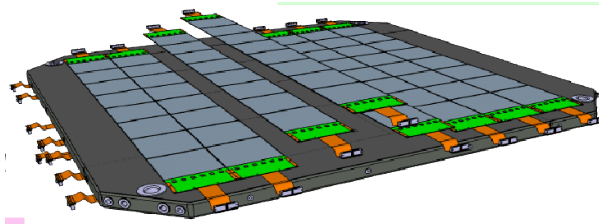


Figura 18: Esempio di layer contenente strisce di sensori (modello dei layer di DAMPE). E' fatto da 16 "ladder" da 1x4 sensori da $9.5 \cdot 9.5 \text{ mm}^2$. Sull'altra faccia del piano ci sono altri 16 sensori disposti esattamente nello stesso modo ma in direzione ortogonale, come chiaramente visibile dai connettori dei sensori, in color arancio, che escono dal piano. Questo consente di avere un piano, composto da 32 sensori, in grado di misurare la posizione (X-Y) di passaggio delle particelle.

I layer di silicio sono posti a coppie poichè nella realtà uno di essi viene collocato con le strip orientate ortogonalmente rispetto all'altro, in modo tale che si possa avere una misura bidimensionale della posizione di passaggio della particella. Anche le informazioni temporali relative alle hit con tutti i layer vengono salvate nella simulazione.

4.1 Descrizione della simulazione

Di fatto la simulazione è stata effettuata utilizzando Generic Geant Simulation, GGS [9], un framework costruito su Geant4 che prevede la descrizione della geometria relativa al detector in un file sorgente e la generazione delle particelle che andranno ad interagire con tale geometria.

La geometria del detector consiste in un certo numero di volumi logici e fisici. Tutto ciò che accade nella simulazione avviene all'interno di un volume madre che in genere viene chiamato "World", il quale contiene a sua volta tutti gli altri volumi con un certo margine all'interno dei suoi limiti.

Innanzitutto, per creare un oggetto della simulazione, è necessario creare un solido con la forma e le dimensioni desiderate, ad esempio per creare un piano di dimensioni (x, y, z) chiamato "Layer" è necessario partire da un parallelepipedo (G4Box):

```
G4Box* Layer = new G4Box("Layer", 0.5*x, 0.5*y, 0.5*z);
```

Successivamente si creano i volumi "logici" degli elementi che verranno posizionati all'interno della simulazione, ovvero gli oggetti di riferimento che verranno copiati e disposti all'interno del volume madre.

A ciascun volume logico vengono assegnati diversi attributi che riguardano la sua forma (specificando il solido) e il materiale, così come altre proprietà opzionali definite dall'utente.

```
G4LogicalVolume* LayerLogic =  
new G4LogicalVolume(Layer, silicon, "Layer");
```

Una volta creato il volume logico, è possibile posizionarne una copia fisica inserendo le coordinate rispetto al volume di riferimento (ciascun volume può contenere altri volumi).

```
new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0, 0, z),siLayerLogic,  
"siLayer", padLogic, false, 2*i, fCheckOverlaps);
```

4.2 Particelle

Una volta costruita la geometria sono state simulate le collisioni delle particelle (protoni ed elettroni in due simulazioni differenti) con i volumi sensibili.

In entrambi i casi le particelle sono state generate a partire da un punto posto a 50 cm dal primo piano di silicio lungo l'asse centrale, con un angolo zenithale compreso tra 0° e 10° e angolo azimuthale tra 0° e 360° .

In totale sono stati generati 10^4 protoni a 100 GeV ed altrettanti elettroni della stessa energia.

5 Analisi Dati

Una volta effettuata la simulazione, sono state salvate, per ciascun segnale di interazione con i piani (hit), varie informazioni, tra cui posizione all'interno del piano di silicio e numero del piano, tempo d'interazione, energia depositata e identità della particella.

Nell'analizzare i dati sono state scartate le hit con energia depositata inferiore a 10 KeV, limite inferiore imposto dalla risoluzione energetica.

Innanzitutto è stato calcolato il tempo medio con cui una particella attraversa il tracciatore di silicio e si è osservato come il tempo d'interazione di una particella primaria si distribuisca rispetto a quel valore: questa informazione fornisce una stima della distanza temporale fra le coppie di piani di silicio.

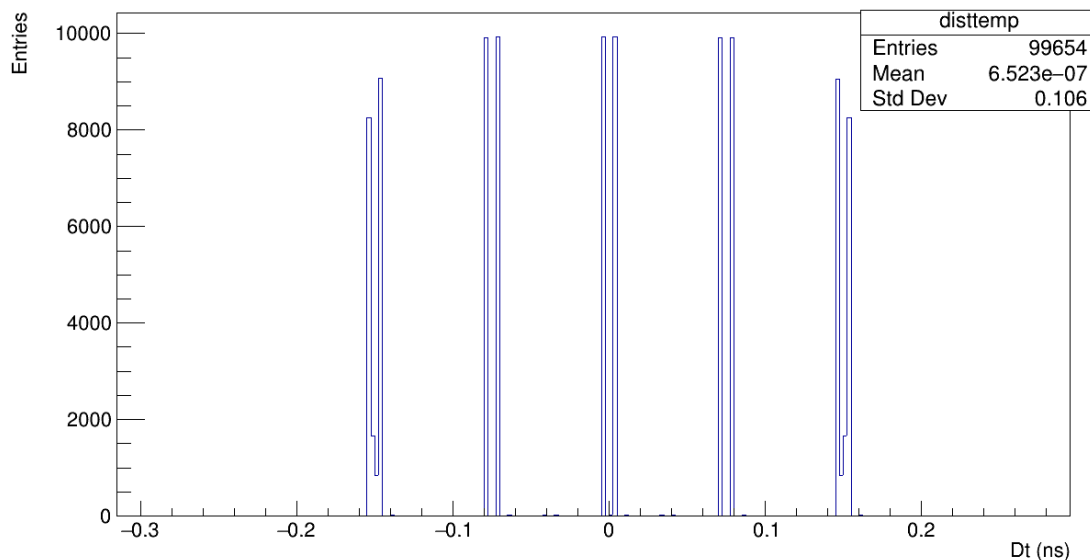


Figura 19: Tempo di arrivo delle particelle su ciascun piano, rispetto al tempo medio con cui una particella attraversa l'intero tracker: questo mostra il tempo che intercorre tra una coppia di piani e la successiva. Approssimativamente ciascuna coppia di piani dista dall'altra 65 ps, che corrisponde ai 2 cm stabiliti inizialmente (considerando particelle relativistiche: $65ps \cdot c \approx 2cm$)

5.1 Protoni

Il primo obiettivo della simulazione è quello di capire se effettivamente è possibile eliminare i segnali di backslash individuando un limite temporale oltre al quale non si verificano più collisioni di particelle primarie nei sensori, per questo motivo è stato costruito un istogramma (Fig.20) relativo alla distribuzione temporale dei segnali di ciascun evento (t_{int}), ovvero ciascuna particella simulata, rispetto al tempo della prima interazione (t_0):

$$Dt = t_{int} - t_0$$

Ciascun istogramma relativo alla distribuzione temporale dei segnali ha, come scala delle ascisse, $\log_{10}(\frac{Dt+1}{ns})$, per enfatizzare la parte a bassi Dt ma aumentare il range dinamico della distribuzione.

Si nota immediatamente che il detector registra segnali fino ad un secondo dopo l'inizio dell'acquisizione (10^9 ns): questo può rivelarsi problematico in un esperimento reale, in cui la frequenza a cui si acquisiscono eventi è dell'ordine di qualche KHz. Nell'intervallo tra 0 e 0.4 ns sono visibili distintamente i massimi corrispondenti alle coppie di piani di silicio, seguiti da un un altro massimo a circa 0.8 ns e da un plateau che tende a crescere fino a 4.5 (ovvero circa 30 μ s); infine a partire da 5.5 (300 μ s) fino a 9 (1 s) si evidenzia un'altra zona con poche decine di conteggi.

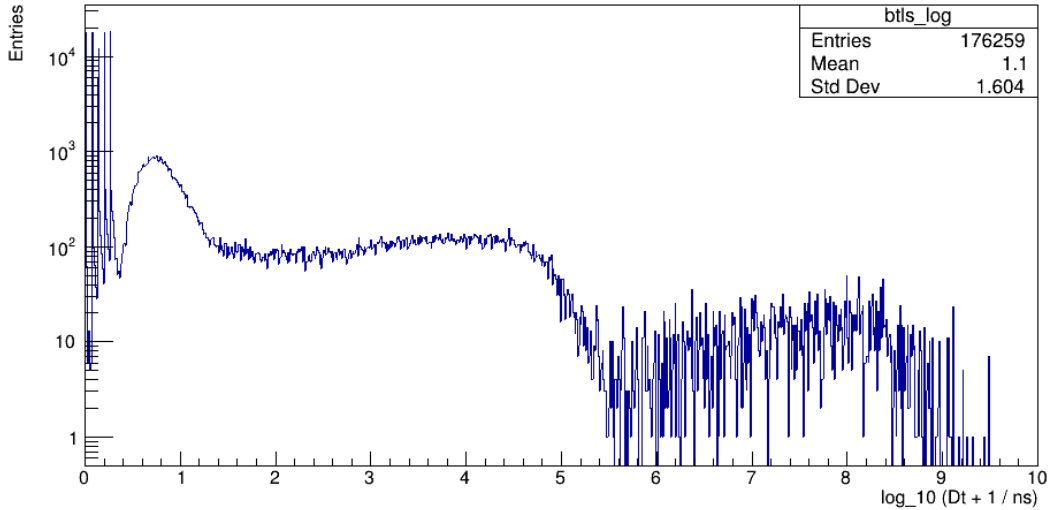


Figura 20: Distribuzione temporale dei segnali relativi alle interazioni di protoni a 100 GeV (10^4 eventi)

Per comprendere meglio i particolari dello spettro temporale sopra descritto, si è deciso di mettere in evidenza le distribuzioni relative a ciascun tipo di particella prodotta dallo scattering di protoni nei piani di silicio (Fig.21).

Questo istogramma conferma che i primi cinque massimi sono effettivamente dovuti alle collisioni delle particelle primarie (ovvero i protoni simulati), ma agli stessi tempi sono presenti anche delle hit dovute a elettroni (raggi δ) e a protoni secondari (spallazione degli atomi dei rivelatori al silicio).

La distribuzione presenta un secondo massimo composto da protoni secondari, pioni e, per la maggior parte, da elettroni e positroni. Questo è dovuto a tutte le particelle, ultrarelativistiche, che compongono il backsplash dal calorimetro. Il tempo medio di inizio di questo massimo, infatti è compatibile con un cammino di andata e ritorno con il calorimetro. Il plateau è popolato da neutroni ed elettroni, mentre la zona finale è costituita solamente da pochi elettroni.

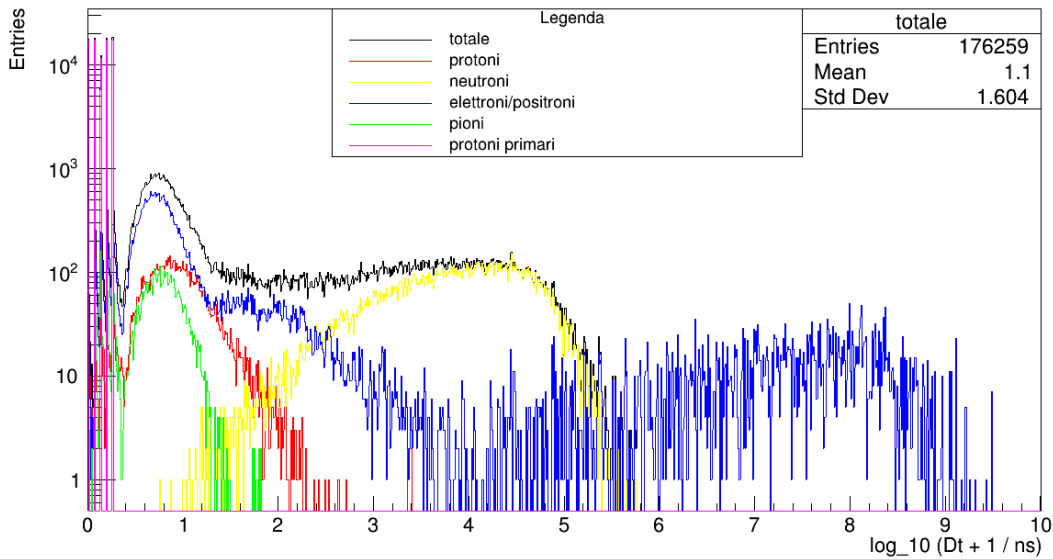


Figura 21: Distribuzione temporale dei segnali relativi alle interazioni di protoni a 100 GeV (10^4 eventi), appartenenti a ciascuna specie

In Fig.22 è mostrato un istogramma in dettaglio della zona di transizione tra le hit primarie e quelle di backplash, con lo scopo di capire se si possa individuare una zona in cui effettuare un taglio per eliminare le hit di backplash.

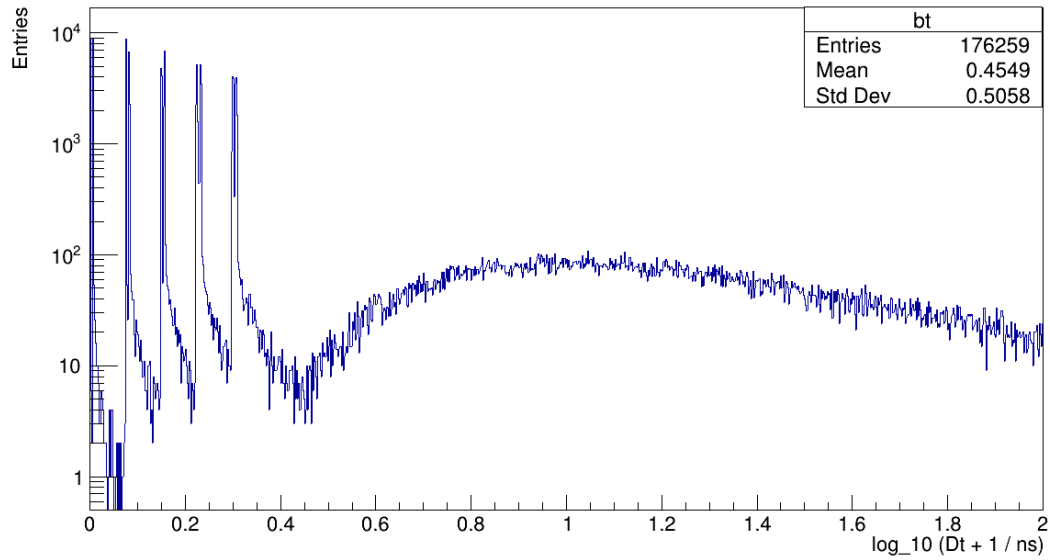


Figura 22: Istogramma della distribuzione dei tempi d'interazione nell' intervallo tra 0 e 10⁴ ns

5.2 Elettroni

Tutto ciò che è stato fatto fin'ora è stato ripetuto simulando 10^4 elettroni con energia pari a 100 GeV, ottenendo i seguenti risultati:

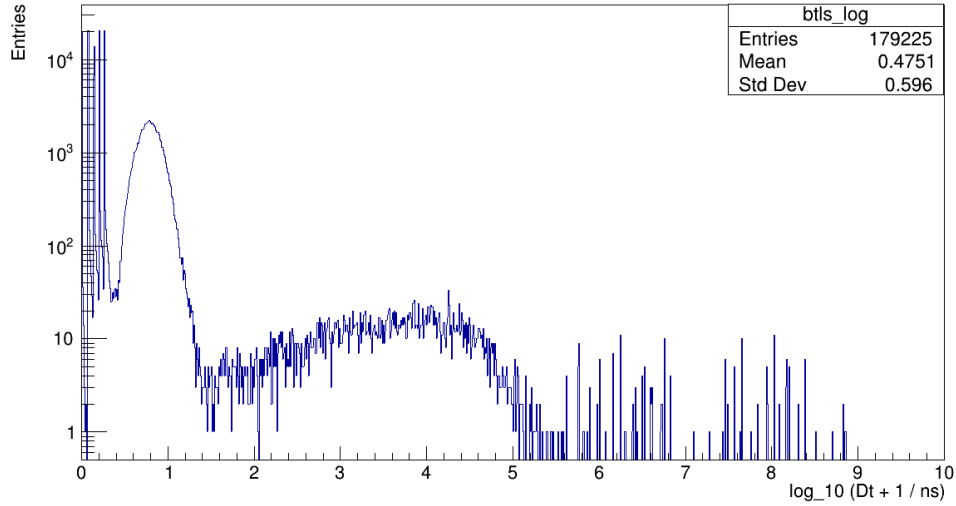


Figura 23: Distribuzione temporale dei segnali relativi alle interazioni di elettroni a 100 GeV (10^4 eventi)

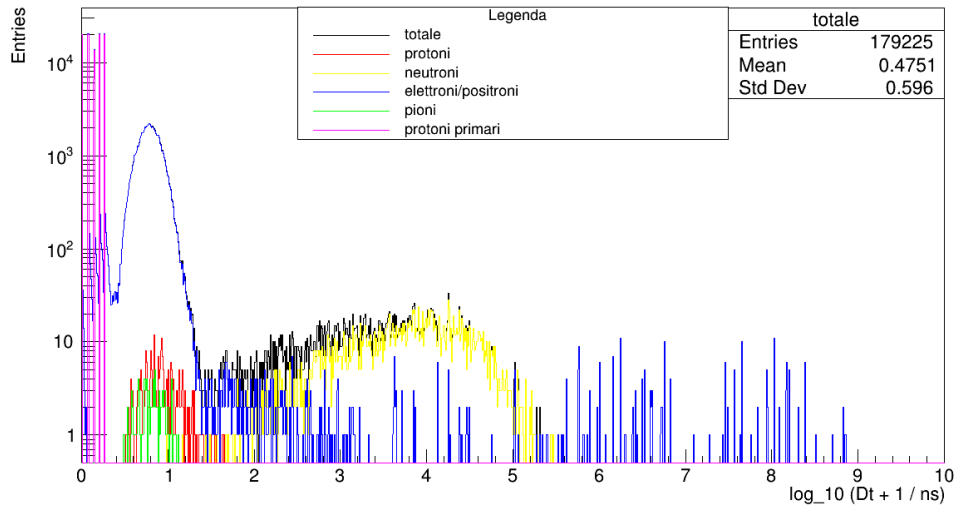


Figura 24: Distribuzione temporale dei segnali relativi alle interazioni di elettroni a 100 GeV (10^4 eventi), divisi per specie

Le particelle secondarie prodotte dall'interazione degli elettroni con il tracker possono essere soltanto altri elettroni, positroni o fotoni, ecco perchè i segnali di backslash sono costituiti prevalentemente da tali specie.

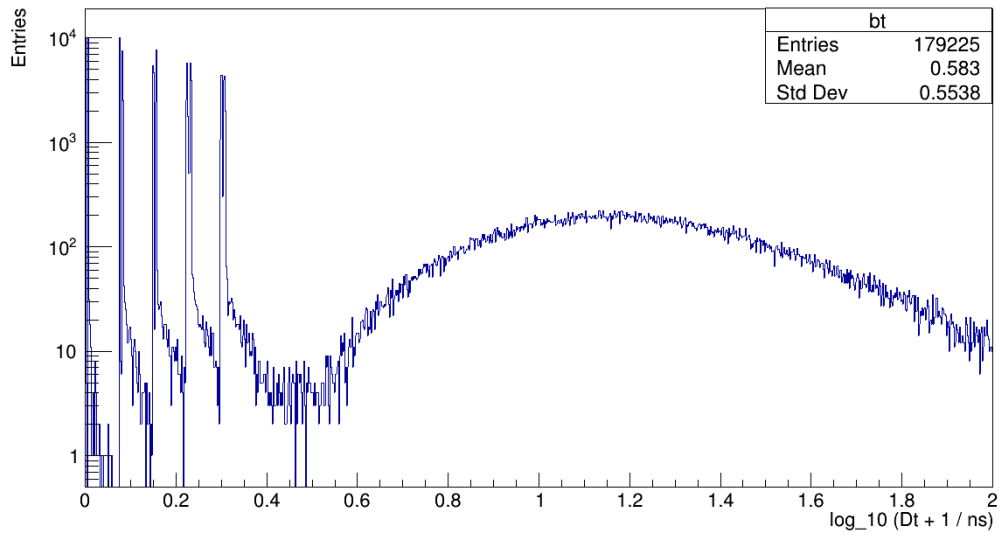


Figura 25: Distribuzione temporale dei segnali relativi alle interazioni di elettroni a 100 GeV (10⁴ eventi), nell'intervallo [0,10] ns

5.3 Istogrammi con risoluzione temporale

Poichè gli istogrammi precedenti non tengono conto della risoluzione temporale, ne è stato costruito un terzo in cui si utilizzano gli stessi dati, ma a ciascun valore del tempo d'interazione è stato aggiunto uno spostamento dt generato casualmente a partire da una distribuzione normale centrata in 0 e con $\sigma = 100$ ps, per simulare l'errore dovuto alla risoluzione temporale.

Si osserva che i massimi relativi alle hit delle particelle primarie non sono più distinguibili, tuttavia si individua comunque una zona di separazione tra gli ultimi segnali primari e quelli di backsplash a circa $0.45 - 0.5$ ns, permettendo anche nel caso in cui si consideri la risoluzione temporale di effettuare un taglio in quell'intervallo.

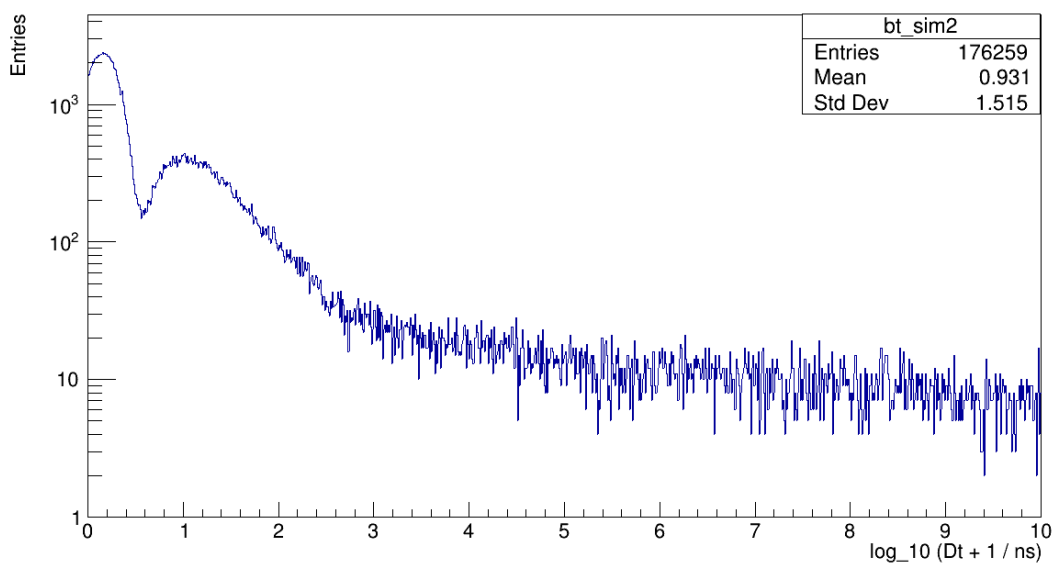


Figura 26: Distribuzione dei tempi d'interazione con risoluzione temporale di 100 ps

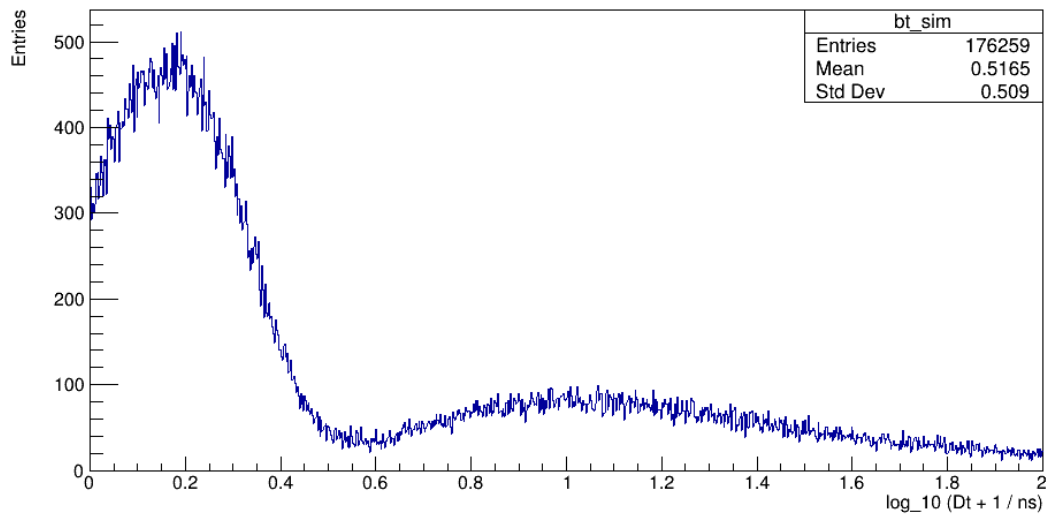


Figura 27: Dettaglio dell'istogramma precedente nell'intervallo [0,10] ns

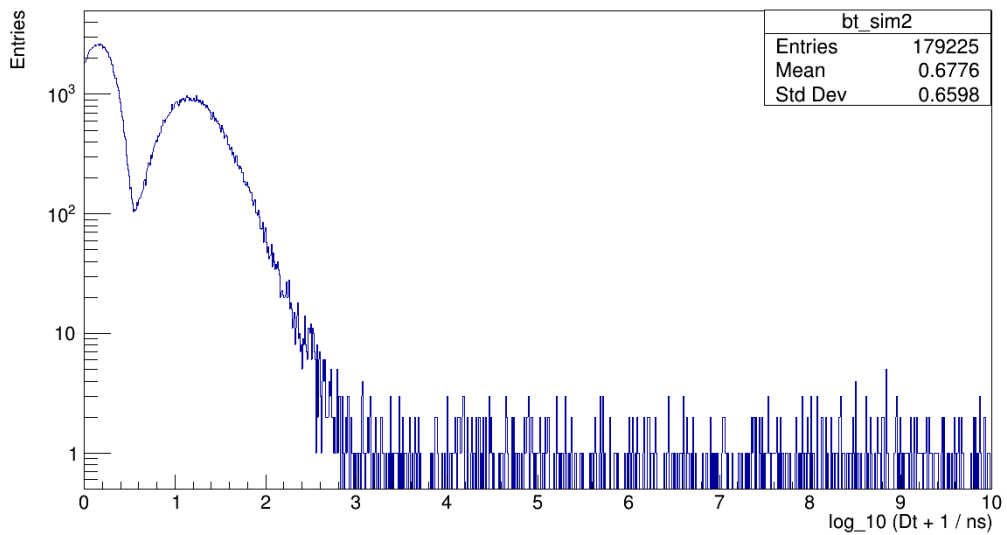


Figura 28: Distribuzione dei tempi d'interazione (elettroni) con risoluzione temporale di 100 ps

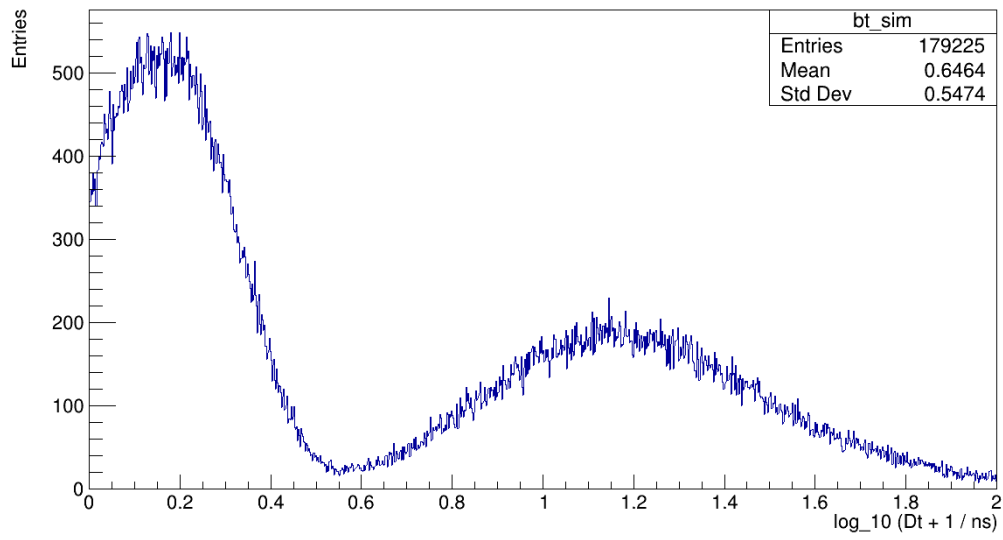


Figura 29: Dettaglio dell'istogramma precedente nell'intervallo $[0,10]$ ns

6 Conclusioni

In questo lavoro è stata simulato un rivelatore composto da un tracciatore al silicio e da un calorimetro posto a poca distanza dall'uscita del tracker: la geometria di questo rivelatore è stata realizzata ispirandosi a quelle dei rivelatori reali, dunque i risultati ottenuti si avvicinano verosimilmente a quelli che si otterrebbero in tali rivelatori.

La simulazione è in grado di studiare l'effetto dell'inserimento della misura di tempo in un tracciatore per un esperimento di raggi cosmici ed è stata utilizzata per valutare il problema delle particelle di backplash, ovvero particelle che rimbalzano sul calorimetro e rientrano nel tracciatore.

Analizzando i dati relativi alla simulazione del rivelatore a tracciamento temporale e considerando una risoluzione temporale di 100 ps, è possibile distinguere chiaramente i depositi d'energia dovuti all'interazione di particelle primarie nel tracker da quelli di backplash: per questo motivo si può affermare che l'attuale tecnologia dei sensori al silicio, combinata con elettronica di ultima generazione, è sufficiente per isolare i depositi di energia nel tracciatore (hit) provenienti da particelle di backplash e rigettarli, in modo da facilitare la ricostruzione di traccia del rivelatore.

Utilizzando questo accorgimento si eliminano circa il 42% degli eventi rivelati, in quanto riconducibili a tale fenomeno.

Eliminando i le tracce dovute al backplash, si risolve anche il problema delle coincidenze (ghost) tra una particella in entrata ed un'altra che ritorna indietro attraversando lo stesso sensore nello stesso istante.

Altre sorgenti di ghosts sono dovute a coincidenze di pile-up (due particelle che passano nello stesso sensore a tempi ravvicinati), coincidenze dovute a raggi delta, frammentazione del nucleo incidente o spallazione dei nuclei dei materiali del rivelatore; le prime in particolare, poichè avvengono comunque in tempi leggermente diversi, potrebbero comunque essere risolte con la funzione di tracciamento temporale e sarà un possibile sviluppo di questo lavoro.

Riferimenti bibliografici

- [1] The Fermi Gamma-ray Space Telescope
<https://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [2] Alpha Magnetic Spectrometer
<http://www.ams02.org/it/>
- [3] DArk Matter Particle Explorer
<http://dpnc.unige.ch/dampe/>
- [4] International Space Station
<https://www.nasa.gov/missionpages/station/main/index.html>
- [5] Low Gain Avalanche Detector
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021830994X>
- [6] T K Gaisser
The Cosmic-ray Spectrum: from the knee to the ankle.
- [7] Vincent Tatischeff, Stefano Gabici
Particle acceleration by supernova shocks and spallogenic nucleosynthesis of light elements
- [8] Massimiliano Fiorini
Silicon pixel tracking detector with ultra-precise time resolution
- [9] ANNALS OF GEOPHYSICS, 60, 1, 2017, S0108; doi:10.4401/ag-7383
A Geant4 framework for generic simulations of atmospheric muon detection experiments.