



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

Tesi di Laurea

Simulazione (Geant4) e analisi dei dati simulati di un esperimento di pair production, PANGU, per raggi gamma di bassa energia (10-1000 MeV) nello spazio

Candidato

Francesco Pascolini

Relatore

Dott. Matteo Duranti

Anno Accademico 2019-2020

Indice

Introduzione	v
1 Possibilità future	1
1.1 Miglioramenti in risoluzione	1
1.2 Radiazione di fondo gamma	2
1.3 I raggi cosmici	2
1.4 Ricerca di Dark Matter studiando l'emissione gamma	3
1.5 Asimmetria barionica	3
1.6 Birifrangenza dello spazio-tempo in gravità quantistica	3
1.7 Utilizzo complementare di PANGU rispetto agli altri esperimenti	4
2 Tecnologie di rivelazione di raggi gamma	5
2.1 Aspetti teorici	5
2.1.1 Effetto Compton	6
2.1.2 Effetto fotoelettrico	7
2.1.3 Pair production	7
2.2 Rivelatori	9
2.2.1 Scintillatori	9
2.2.2 Time Projection Chambers	10
2.3 Tracker al Silicio	10
2.4 PANGU	11
3 Il progetto POX e il lavoro di Track reconstruction	15
3.1 POX	15
3.1.1 Prototipo e test beam	15
3.1.2 Simulazione	16
3.2 Algoritmo di ricostruzione tracce	17
3.2.1 Kalman Filter	17
3.2.2 GENFIT2	18
3.2.3 Applicazioni al progetto POX e risultati	19
3.3 Futuri miglioramenti	23

Introduzione

Negli ultimi anni l'astrofisica ha implementato nuovi mezzi usati per studiare un determinato fenomeno, questo approccio prende il nome di multi messenger astrophysics.

Il mezzo su cui ci si concentrerà in questa Tesi sono i fotoni gamma; fotoni ad alta energia, che sono una chiave per lo studio di fenomeni in condizioni estreme, altrimenti irriproducibili sulla Terra. L'ampio spettro di energia che caratterizza i fotoni gamma può essere studiato con metodi differenti, sia da Terra (osservandone i prodotti di decadimento) che su satelliti.

La rivelazione di raggi gamma, per fotoni oltre i 10 MeV, viene fatta studiando le tracce di elettrone e positrone che si osservano al seguito del verificarsi di un fenomeno di produzione di coppie, per far questo si può usare un tracciante al Silicio, come è attualmente fatto su *Fermi* LAT. Esistono tuttavia limiti cinematici sul fenomeno di multiple scattering coulombiano, che si presenta nell'interazione di elettrone e positrone con i layer del Silicon Tracker; in particolare questo fenomeno diventa rilevante a basse energie (raggi gamma sub-GeV, 10 MeV-1 GeV), infatti riduce di molto le risoluzioni angolari dei telescopi attuali.

Questo limite cinematico porta ad una difficoltà di costruzione di telescopi con una risoluzione elevata su tutto lo spettro energetico, ad esempio il telescopio *Fermi* LAT copre un range energetico molto vasto, dai ~ 20 MeV a più di 300 GeV, ma per energie sub-GeV non è molto preciso.

Sono state proposte alcune soluzioni a questo problema, in particolare con i progetti dei telescopi AdEPT, e-ASTROGAM e PANGU, con i quali si vuole avere un'alta risoluzione angolare per fotoni gamma sub-GeV (5 volte migliore rispetto a quella di *Fermi* LAT), cercando di ridurre il multiple scattering, come verrà descritto in seguito.

L'esperimento POX (PANGU Optimization and eXperimental verification) cerca di verificare l'efficacia del telescopio PANGU in due fasi: la prima, sviluppando un'accurata simulazione Monte Carlo della geometria del rivelatore (utilizzando il framework GEANT4, e il wrapper GGS (Generic Geant4 Simulation)) e la seconda costruendo un prototipo funzionante utilizzando nuovi tracker di Silicio combinati con componenti inutilizzati di AMS-02 e DAMPE.

Nel seguente lavoro di Tesi è stato implementato un algoritmo di ricostruzione tracce di particelle nel campo magnetico, sfruttando il Kalman filter integrato nel pacchetto GENFIT2.

Capitolo 1

Possibilità future

La radiazione gamma prodotta nel cosmo permette lo studio di fenomeni estremi, ad energie altrimenti irripetibili sulla Terra, in particolare con l'avvento di AGILE (Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero), che è stato lanciato in orbita nel 2007, e *Fermi* LAT (2008) è stato possibile raccogliere un gran numero di informazioni sulla distribuzione delle sorgenti gamma nel cielo.

Una maggiore risoluzione angolare a basse energie potrebbe permettere una mappatura delle sorgenti più accurata, necessaria per l'osservazione anche con altre lunghezze d'onda.

Un'alta risoluzione angolare è necessaria per distinguere sorgenti puntiformi da fenomeni caratterizzati da una più diffusa emissione, fornendo così informazioni sui meccanismi di emissione e propagazione di raggi cosmici.

Qui entra in gioco il progetto PANGU (PAir-productionN Gamma-ray Unit), che mira a costruire un telescopio gamma incentrato sull'osservazione della regione sub-GeV ($\gtrsim 10$ MeV - $\lesssim 1$ GeV) dello spettro elettromagnetico, con una risoluzione angolare ~ 5 volte maggiore di quella che si ha attualmente con *Fermi* nello stesso range energetico. Con le migliori apportate si potrebbero fare studi che interessano svariati campi della ricerca, sia in fisica fondamentale che in astronomia; infatti si potrebbe studiare:

- raggi cosmici galattici ed extra-galattici, ad esempio originati da resti di supernovae (SNRs) e superbolle;
- ricerca di emissione di raggi gamma nei processi di decadimento/annichilazione di Dark Matter nelle regioni esterne della Via Lattea;
- ricerca di sorgenti nello spettro soft gamma, compresi Gamma-ray burst (GRB), millisecond pulsar, blazar e microquasar;
- osservazione del centro galattico nella regione sub-GeV e separazione di sorgenti puntiformi dall'emissione diffusa di raggi gamma;
- la fisica dei buchi neri a differenti scale di energia;
- analizzare fenomeni molto energetici nel sistema solare, come l'accelerazione di raggi cosmici da parte dei venti solari;
- l'asimmetria barionica nell'universo primordiale e gli effetti di birifrangenza che si dovrebbero osservare secondo teorie di gravità quantistica.

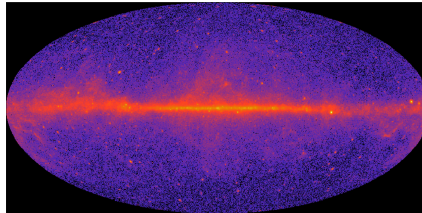
Inoltre un monitoraggio costante dei cambiamenti di emissione nello spettro soft gamma e un miglioramento nella localizzazione delle controparti per onde gravitazionali che potrebbero venir osservate da collaborazioni come Advanced LIGO/VIRGO.

1.1 Miglioramenti in risoluzione

PANGU porterà miglioramenti in risoluzione nel range sub-GeV con una riduzione del 68% della Point Spread Function (PSF) a ~ 100 MeV, che è circa 5 volte la precisione ottenuta da *Fermi* LAT, e solo 3 volte il limite cinematico dovuto al multiple scattering sui piani del Silicon Tracker (questo verrà poi approfondito nel cap. 2) [1].

1.2 Radiazione di fondo gamma

La radiazione gamma di fondo è ancora molto poco conosciuta nel range sub-GeV, in particolare nella regione tra pochi MeV e ~ 100 MeV. Si sospetta che le sorgenti che contribuiscono con queste energie sono: supernovae, Flat Spectrum Radio Quazars (FSRQ), blazars e ammassi di galassie. Non avendo ancora una conoscenza approfondita degli spettri di emissione in questa zona delle sorgenti non si hanno idee chiare, e un'osservazione con una risoluzione maggiore potrebbe aiutare a comprendere meglio l'origine di questo background.



1.3 I raggi cosmici

I raggi cosmici [2], come dice il nome, sono particelle energetiche provenienti dallo spazio; la loro origine è varia, e spesso è difficile stimarla con certezza, può essere galattica o extra-galattica. I raggi cosmici possono essere di varia natura (e.g. elettroni, protoni, nuclei pesanti, ecc).

Per osservarli, dato il range energetico molto ampio con cui possono presentarsi, ci sono varie tecniche, in particolare per energie medio alte ($\leq 10^{10}$ eV) c'è la necessità di detector situati nell'alta atmosfera (su palloni aerostatici o satelliti), nel caso di energie più alte UHE (Ultra High Energy $\geq 10^{14}$ eV) e EHE (Extremely High Energy $\geq 10^{18}$ eV) si usano detector sotterranei, che vista la loro posizione riescono a bloccare le particelle meno energetiche e i loro sciami di decadimento che si formano nell'attraversamento dell'atmosfera.

I principali meccanismi di formazione di raggi cosmici galattici, come confermato da *Fermi* [5] e *AGILE*[3], sono stati trovati nei resti di supernovae (SNRs).

Le particelle così prodotte vengono poi accelerate prevalentemente dai resti delle supernovae stesse, per shock acceleration, secondo il modello di Fermi [6], ovvero vengono accelerati in seguito a collisioni con disuniformità del campo magnetico nelle galassie. Una frazione delle particelle accelerate interagendo con i SNRs può produrre dei fotoni gamma, come è stato osservato anche da *EGRET*, uno strumento sul Compton Gamma Ray Observatory, nel caso di segnali associati ai resti di supernovae come γ Cygni e IC 443.

Lo studio della distribuzione dell'emissione gamma sul piano galattico permetterebbe di capire la distribuzione dell'energia dell'esplosione della supernova nei modelli che di formazione di CRs nelle SNRs, infatti esistono due modelli principali: [4]

- leptónico: secondo il quale la maggior parte dell'energia sarebbe passata a elettroni, che a loro volta produrrebbero radiazione elettromagnetica sia nello spettro dei raggi X (sincrotrone) che dei gamma (scattering Compton inverso), sotto ai 100 MeV la bremsstrahlung diventa il contribuente principale all'emissione di fotoni gamma;
- adronico: che prevede l'emissione di raggi gamma a seguito del decadimento del mesone π^0 e dei raggi X dovuti a radiazione di sincrotrone in zone con un campo magnetico intenso e alta densità di gas.

Si pensa che nell'emissione diffusa sub-GeV sul piano galattico sia dovuta principalmente al decadimento del pione neutro nell'interazione adronica tra CRs e materia interstellare, un punto a favore di questa ipotesi è dato dalla distribuzione spaziale della materia interstellare.

Tuttavia effettuando misurazioni anche ad energie inferiori a 100 MeV si potrebbe individuare quale dei due modelli si è il più corretto, infatti per ora non si può scartare del tutto il modello leptónico, il tutto con l'aggiunta di misure polarimetriche, infatti mentre nel caso adronico si avrebbe un'alta polarizzazione dei fotoni emessi, con quelli emessi dall'effetto Compton inverso del caso leptónico non si dovrebbe avere una polarizzazione. Inoltre con una maggior risoluzione angolare si potrebbe osservare una granulosità nel mezzo interstellare.

1.4 Ricerca di Dark Matter studiando l'emissione gamma

La Dark Matter (DM) [7] è uno dei problemi ancora aperti della fisica attuale, essendo infatti composta da particelle molto debolmente interagenti, che dunque rendono molto difficile un'osservazione diretta, che viene fatta sfruttando facility sotterranee e acceleratori.

La ricerca di DM può però essere fatta, in modo complementare, sfruttando delle vie secondarie, infatti nei processi di decadimento/annichilazione di particelle dette WIMP (Weakly Interactive Massive Particle), vengono prodotti dei fotoni gamma, elettroni, positroni e antiprotoni.

Con la risoluzione angolare promessa dal progetto PANGU si potrebbero distinguere sorgenti puntiformi dal fondo gamma diffuso e segnali di millisecond pulsar.

1.5 Asimmetria barionica

Da osservazioni sperimentali si può dedurre una maggior presenza di materia rispetto all'antimateria, la letteratura è molto vasta in questo ambito, e una abbondanza locale di materia non viene esclusa, non si è tuttavia ancora in grado di verificare che nell'universo ci sia presente una zona composta prevalentemente da antimateria, così da avere una simmetria.

Per cercare questo ci sono esperimenti come AMS-02 [8], che cerca tra le altre cose particelle anti-alpha, infatti l'osservazione di anti-nuclei con numero atomico $Z \geq 2$ implicerebbe l'esistenza di stelle extragalattiche composte di antimateria.

L'annichilazione di anti-barioni nell'Universo primordiale produce principalmente pioni (π^0 , π^+ e π^-), che decadendo producono fotoni (caso del π^0) nello spettro gamma, elettroni e positroni (con la catena di decadimento $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$), e neutrini.

Tutti questi segnali sono rilevabili, infatti:

- per quanto riguarda e^- ed e^+ si ha che possono interagire direttamente con lo spettro del CBR (Cosmic Background Radiation) con lo scattering Compton e indirettamente, scaldando il mezzo interstellare;
- i fotoni invece saranno ancora presenti nell'Universo, anche se bisogna considerare la componente di redshift, portandoli così ad una energia compresa tra i 10 e i 100 MeV

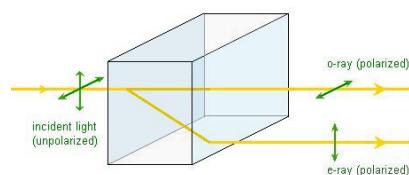
1.6 Birifrangenza dello spazio-tempo in gravità quantistica

La birifrangenza è una proprietà ottica di alcuni materiali che hanno un indice di rifrazione che dipende dalla polarizzazione del fascio luminoso incidente; ed è dovuta ai legami molecolari del materiale preso in esame e alla sua struttura cristallina.

La birifrangenza è responsabile del fenomeno della doppia rifrazione della luce in questi materiali particolari, in cui un raggio viene splittato in due raggi che percorrono differenti cammini ottici, ed hanno polarizzazioni ortogonali tra loro.

In alcune teorie di gravità quantistica (loop gravity) [9] [10] è stato predetto un effetto di birifrangenza del vuoto, questo significa che alcuni fotoni con differenti polarizzazioni attraversano il vuoto con velocità differenti, un fenomeno così per sorgenti lontane potrebbe cambiare la polarizzazione con cui erano stati prodotti i fotoni, facendoli arrivare alla Terra con una polarizzazione differente.

La possibilità di misurare la polarizzazione di fotoni provenienti da sorgenti distanti (e.g. GRB) fornirebbe una violazione a una di queste teorie.



1.7 Utilizzo complementare di PANGU rispetto agli altri esperimenti

L'esperimento PANGU potrebbe vedere un impiego affiancando i principali rivelatori gamma attualmente in uso per avere una visione d'insieme sullo spettro gamma anche in regioni sub-GeV nel cielo; gli osservatori a cui verrebbe affiancato sono: *Fermi*, DAMPE, HERD, CTA (Cherenkov Telescope Array), etc.

Notando che in generale PANGU sarebbe l'unico esperimento con una alta capacità di risoluzione ad energie più basse del GeV, assuendo così un ruolo significativo in studi multimessenger e su più lunghezze d'onda dell'ospetro elettromagnetico(radio, ottico, IR, X-ray e detector per neutrini).

Da non dimenticare sono anche le possibili identificazioni che potrebbero essere fatte nell'identificazione di controparti per eventi di onde gravitazionali (advanced LIGO/VIRGO).

Capitolo 2

Tecnologie di rivelazione di raggi gamma

I raggi gamma sono particelle neutre molto energetiche, questo le rende molto difficili da essere rilevate direttamente, bisogna dunque sfruttare le interazioni che hanno con la materia.[11][12] [15]

2.1 Aspetti teorici

Le principali interazioni dei fotoni con la materia dipendono dall'energia dei fotoni e dal numero atomico Z del materiale attraversato; infatti si possono notare tre comportamenti principali:

- effetto foto elettrico;
- scattering Compton;
- produzione di coppie e^+e^-

A causa delle interazioni con il mezzo l'intensità del fascio di fotoni decresce esponenzialmente:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

in cui $I(x)$ rappresenta il numero di fotoni ancora presenti alla profondità x , essendo I_0 il numero di fotoni iniziale e μ il coefficiente di attenuazione (probabilità di interazione per unità di percorso), ed ha come dimensioni l'inverso di una lunghezza. Si nota come i diversi tipi di interazioni permettono la rivelazione

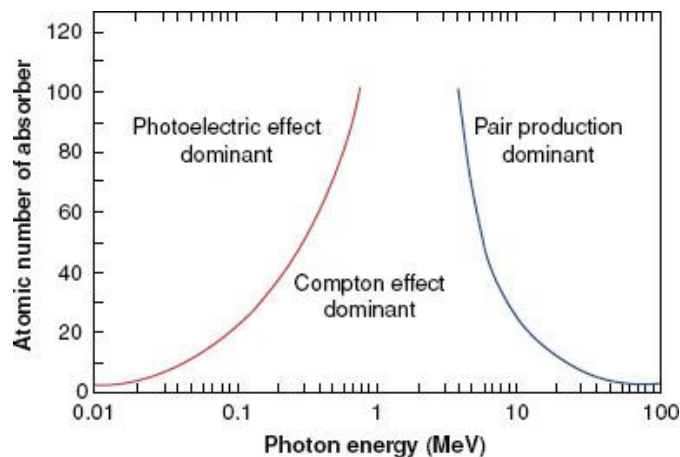


Figura 2.1: a diverse energie (considerando il numero atomico) prevalgono diversi comportamenti

del fotone a qualsiasi energia, infatti viene sempre coinvolta una particella carica (elettroni del detector), che possono trasferire energia.

Analizzando anche la sezione d'urto dei vari processi si ha una stima dell'efficienza del processo in funzione delle varie energie, infatti maggiore sarà il vantaggio rispetto ad un altro meccanismo maggiore sarà l'influenza e la probabilità di un meccanismo rispetto ad un altro, ad esempio per le energie per il quale è stato progettato PANGU si ha una maggior incidenza della pair production.

Come si può notare dalla figura 2.2 che la pair production in materiali con numero atomico più elevato

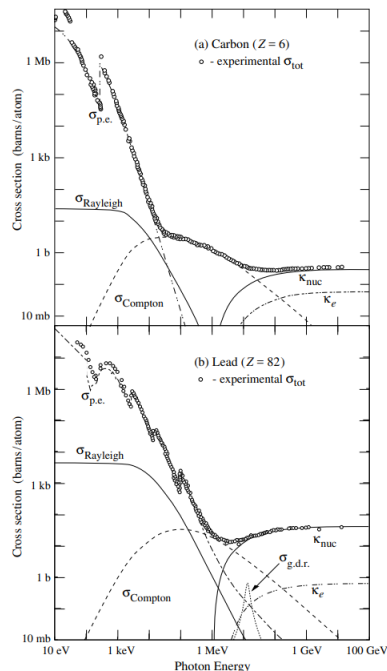
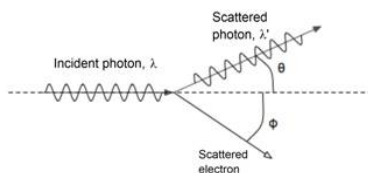


Figura 2.2: si vede in figura un grafico con gli andamenti delle varie sezioni d'urto in funzione di energia del fotone iniziale e numero atomico del materiale attraversato

sia più probabile, e che inizia a presentarsi solo da una certa soglia di energia in poi, questi comportamenti verranno spiegati poi nel paragrafo 2.1.3.

2.1.1 Effetto Compton

Nel processo di scattering Compton si ha che un raggio incidente, con energia iniziale $E_\gamma = h\nu$ ne rilascia una parte, durante un collisione con un elettrone di un atomo, la nuova energia del fotone sarà chiaramente la differenza tra l'energia iniziale e quella scambiata con l'elettrone. Considerando



l'elettrone come libero, in quanto l'energia $E_\gamma \gg E_{e^-}$ ed essendo la velocità del fotone $v_\gamma = c$ si deve usare la cinematica relativistica. Iniziando dalla conservazione del quadri-impulso:

$$p_\gamma^\mu + p_e^\mu = p_\gamma'^\mu + p_e'^\mu$$

si può facilmente ricavare:

$$\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta))$$

moltiplicando tutto per hc si ha:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))$$

sapendo a questo punto che gli elettroni legati non sono relativistici si può considerare che l'angolo di scattering sarà tale da avere sempre una perdita di energia da parte del fotone.

L'effetto prima citato, effetto Compton inverso, si presenta nel caso in cui l'elettrone sia relativistico, e saranno così i fotoni a ricevere energia dagli elettroni.

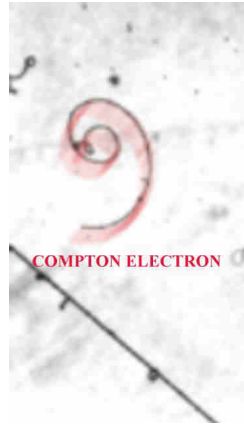
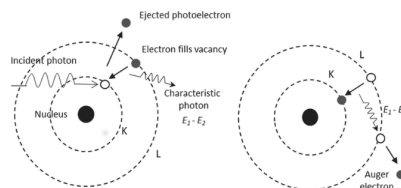


Figura 2.3: In figura si vede un elettrone Compton in un Bubble Chamber

2.1.2 Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico[12][13] è quel fenomeno che si presenta facendo incidere una radiazione su un materiale, in particolare si ha che viene rilasciato un elettrone dal suo stato atomico legato, affinché questo avvenga il fotone deve avere un'energia superiore a quella di legame, può succedere che l'elettrone liberato non fosse di una shell esterna, dunque si ha un fenomeno di rilassamento dell'atomo, in cui gli elettroni riempiono la lacuna creata, riemettendo a loro volta raggi X, che può a sua volta fare effetto fotoelettrico su un atomo adiacente, questo effetto prende il nome di effetto Auger.

L'effetto Auger risulta dominante per elementi leggeri, infatti con basse energie di legame si ha una probabilità di decadimenti maggiore a seguito di emissione di un elettrone e conseguente ionizzazione.[14]

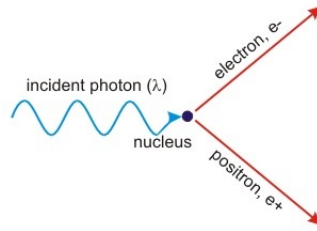


2.1.3 Pair production

Ad energie maggiori del fotone ($\gtrsim 10$ MeV), come visto precedentemente con la sezione d'urto (figura), la probabilità che si effettui una produzione di coppie è molto maggiore rispetto agli altri processi di interazione, in particolare, la soglia di energia minima che deve avere il fotone è di 1.022 MeV, che è l'energia corrispondente alla sola energia a riposo di elettrone e positrone (mc^2).

La pair production è il fenomeno dominante in sciami elettromagnetici, infatti gli elettroni ad alta energia la abbassano con la bremsstrahlung, in cui altri fotoni vengono prodotti.

Analizzando nei dettagli la pair production, si ha che facendo considerazioni sul quadrimomento si possono ottenere informazioni interessanti, partendo dal fatto che l'angolo con il quale vengono emessi elettrone



e positrone è uguale, infatti:

considerando il momento nella direzione ortogonale a quella di propagazione del fotone si ha:

$$p_{\gamma\perp}^0 = 0 \implies p_{e^+\perp} + p_{e^-\perp} = 0$$

da cui si ha che l'angolo deve essere uguale, anche se più in generale, maggiore è l'energia più si avrà una consiguazione delle particelle emesse ortogonali tra loro. Per quanto riguarda la conservazione del quadrimpulso si può procedere, per comodità, separando la parte spaziale da quella temporale:

$$\begin{cases} E_{\gamma} = h\nu = E_{e^+} + E_{e^-} = m_{e^+}c^2 + m_{e^-}c^2 = 2\gamma m_0 c^2 & (1) \\ p_{\gamma} = \frac{h\nu}{c} = p_{e^+} + p_{e^-} = 2p \cos(\theta) = 2\gamma m_0 c^2 \frac{v}{c} \cos(\theta) & (2) \end{cases}$$

N.B. m_0 (come anticipato prima) è la massa a riposo di elettrone e positrone, ed è: $m_0 \simeq 0.51 MeV$. Tuttavia riflettendo sulle quantità che si hanno nella relazione (2) si ha che: $\frac{v}{c} < 1$ e $\cos(\theta) \leq 1$, dunque in definitiva si ha:

$$(2) \implies h\nu < 2\gamma m_0 c^2$$

che confrontata con la relazione (1), in cui si ha l'uguaglianza, fornisce una contraddizione, dunque non essendo rispettata la conservazione del quadrimpulso il fenomeno così considerato non è da considerarsi possibile, infatti la pair production non può avvenire nel vuoto, a differenza del processo inverso, la pair annihilation, che può avvenire ovunque. Questo si può spiegare facilmente considerando il fatto che affinché la conservazione del quadrimomento sia rispettata si necessita di un nucleo che riassorba parte dell'energia iniziale del fotone.

In situazioni in cui si hanno intensi campi fotonici si può verificare una produzione di coppie a seguito di una collisione di due fotoni energetici, e questo prende il nome di effetto Nikischow, o photon-photon pair production.

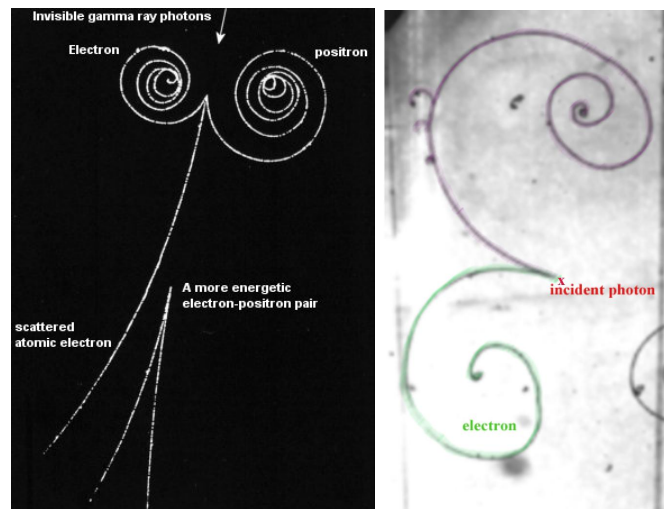


Figura 2.4: in figura si possono vedere degli eventi di pair production, osservati tramite una Bubble Chamber, si riconoscono elettrone e positrone, infatti in campo magnetico avendo carica opposta curvano in maniera differente, in particolare una particella con carica negativa (elettrone) curva in senso orario, e viceversa per cariche positive (positroni).

2.2 Rivelatori

[PDG] Per rilevare fotoni gamma possono essere usati differenti tipi di Detector, infatti, si può passare da quelli che ne rilevano lo sciame di decadimento a terra (per esempio i telescopi Cherenkov), oppure quelli su satelliti; di cui ne esistono vari tipi principali:

- tracciatori al Silicio;
- Time Projection Chambers (TPC);
- Scintillatori.

L'utilizzo dei vari tipi si sceglie in base alle caratteristiche del rivelatore che si vuole costruire, nel caso di PANGU si vuole ridurre il multiple scattering per fotoni di bassa energia presente nei rivelatori di *Fermi*, nei paragrafi successivi verranno descritti i principali accorgimenti effettuati. Tutte le tipologie di rivelatori si basano sul deposito di una parte dell'energia del fotone per ionizzazione, quindi dalla carica dell'elettrone o di elettrone e positrone nel caso della pair production.

2.2.1 Scintillatori

I Rivelatori a scintillazione sono uno dei più vecchi tipi di apparati sperimentali, prima di essi veniva usato l'occhio nudo, infatti si osservavano i lampi di luce emessi quando le particelle colpivano uno schermo di Solfato di Zinco ($ZnSO_4$). Si definisce scintillatore una qualsiasi sostanza (organica e non) che emette un impulso di luce dopo il passaggio di una particella carica, ed ha una duplice funzione: emettere luce e trasmetterla ad un rivelatore di fotone, ad esempio un photomultiplier (PM).

Quando una particella carica attraversa lo scintillatore eccita gli atomi e le molecole di quest'ultimo, che di conseguenza emettono luce (quando tornano allo stato fondamentale), la quale viene poi trasmessa al PM, che la converte in una debole corrente, amplificata poi dai dinodi del PM stesso.

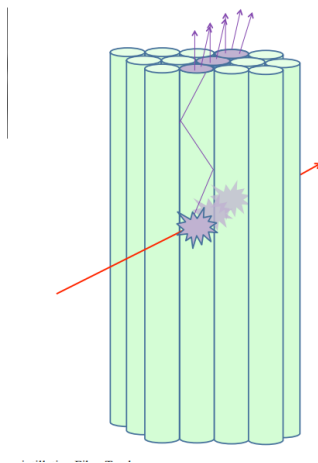
Il tipo (organico e inorganico) e il materiale dello scintillatore viene scelto in base alle caratteristiche cercate:

- organici: poca luce prodotta, ma alta velocità, inoltre sono caratterizzati da un basso numero atomico, infatti non sono adatti alla rivelazione di fotoni
- inorganici: molta luce, ma più lenti

Generalmente la luce di uno scintillatore viene letta con un fototubo, bisogna dunque adattare la luce di scintillazione allo spettro e alle dimensioni del PM.

Uno degli usi principali della tecnologia a scintillatori è nei calorimetri elettromagnetici, in cui si effettua una misura distruttiva della particella, infatti viene misurata l'energia della particella originaria sfruttando uno scintillatore.

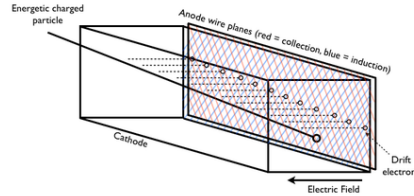
E' in corso di sviluppo una tipologia di detector a fibre scintillanti, le fibre agiscono come scintillatori e trasportano la luce al silicon photomultiplier (SiPM).



2.2.2 Time Projection Chambers

Un detector a Time Projection Chamber è un rivelatore composto da un volume riempito di gas, immerso in un campo elettrico, con un sistema di riconoscimento della posizione di elettroni.

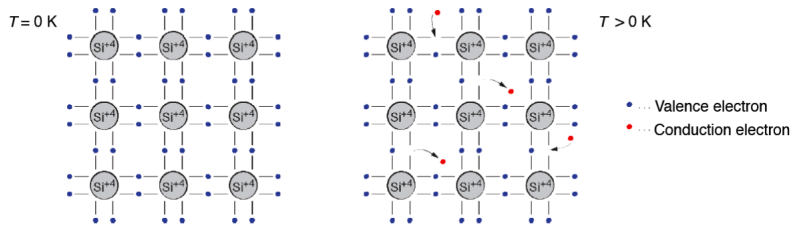
Funziona in quanto quando una particella attraversa il volume pieno di gas produce una ionizzazione lungo la traccia del suo passaggio che viene così ottenuta nelle sue coordinate x e y , per quanto riguarda la z si ottiene misurando il tempo di deriva nel campo elettrico.



2.3 Tracker al Silicio

I tracciatori al Silicio sono un tipo di rivelatori a stato solido (solid-state photodetectors) molto utilizzati in fisica delle alte energie. Sono basati sul fatto che il Silicio è un semiconduttore, dunque ha una gap energetica tra la banda di conduzione e quella di valenza non eccessivamente larga (~ 1.14 eV (302 K)), dunque il passaggio di una particella carica sufficientemente energetica riesce a far promuovere un elettrone alla banda di conduzione, lasciando dunque una lacuna nella banda di valenza. L'energia media necessaria per la creazione di una coppia elettrone-lacuna è di 3.6 eV (di cui 1.1 eV servono per la ionizzazione, mentre i restanti 2/3 vengono dispersi in oscillazioni del reticolo cristallino, dunque in fononi), che comparandola con l'energia necessaria per ionizzare il gas in un gas filled detector è molto minore (*sim*30 eV), dunque la sensibilità è elevata.

Tuttavia a temperatura ambiente si ha un gran numero di elettroni che vengono saltano nella banda di conduzione per energia termica ($k_b T$) dunque il rumore termico è elevato, per ovviare a questo problema



i detector sono formati da giunzioni p-n.

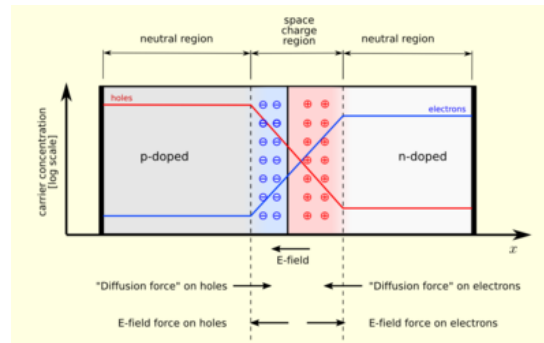
Viene chiamato Silicio "n-type" un Silicio in cui una piccola percentuale di atomi nel cristallo sono stati sostituiti con atomi del gruppo successivo a quello del Silicio (drogaggio di tipo n); in modo tale da avere un cristallo elettricamente neutro, ma in cui alcuni atomi (quelli droganti) hanno un elettrone debolmente legato, che può venir liberato da una piccola perturbazione.

Similmente, il Silicio "p-type" (drogaggio di tipo p) prevede una sostituzione con atomi del gruppo precedente, in questo modo si ha una lacuna dove si ha il legame con l'atomo dopante.

A questo punto per ottenere la giunzione p-n si interfacciano i due tipi di Silicio, in questo modo si creerà un lieve potenziale (built-in potential) dovuto alla migrazione di elettroni da n a p fino all'equilibrio termico, questo limita la zona di svuotamento (in cui il rapporto elettroni/lacuna è pari a 1).

A questo punto applicando un potenziale esterno, con il polo negativo al lato p e il positivo al lato n (reverse bias) si ha un accrescimento della zona di svuotamento. Quando una particella attraversa la zona di svuotamento si ha un segnale molto maggiore del rumore termico.

Possono essere costruiti due tipi di rivelatori al Silicio: i SSSD (Single-sided Silicon Strip Detector) e DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector), i primi presentano un corpo in Silicio drogato n e delle strip in Silicio drogato p, con un contatto in Alluminio con un amplificatore di corrente, per la lettura del segnale. Al passaggio di una particella nella zona di svuotamento si ha una corrente nelle due strip



adiacenti, permettendo il rilevamento della posizione.

Il fatto che il segnale sia nelle due strip più vicine permette la stima del baricentro di carica (la strip più vicina avrà una corrente maggiore), garantendo una risoluzione maggiore del pitch del detector (risoluzione di $\sim \mu\text{m}$ con pitch di $\sim 100\mu\text{m}$).

Per quanto riguarda i DSSD si ha una seconda serie di strip disposte perpendicolarmente alle altre e con un drogaggio n molto elevato (n^+); in questo modo con questi detector è possibile individuare entrambe le coordinate x e y del punto di incidenza.

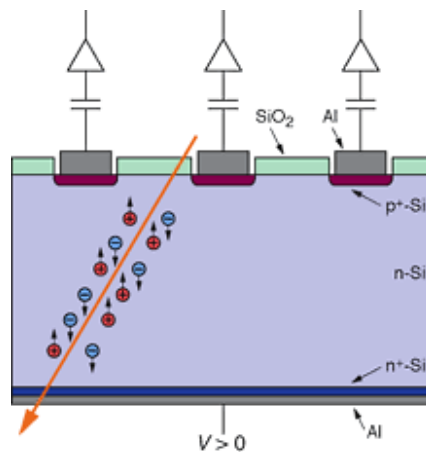


Figura 2.5: rappresentazione di un tracker DSSD

2.4 PANGU

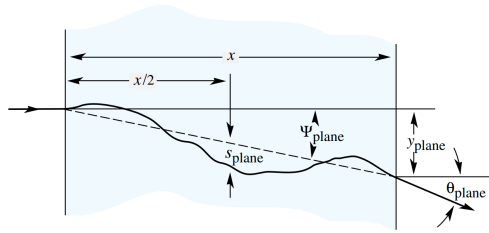
PANGU (PAir-production Gamma-ray Unit) [1] è uno dei progetti di telescopio spaziale gamma che cerca di raggiungere una risoluzione angolare alta in regione sub-GeV (10 MeV-1 GeV).

Sotto i ~ 10 MeV in particolare lo scattering Compton domina tra le interazioni fotoni-nucleo, e l'individuazione dei raggi gamma si basa su di esso, ma quando le energie iniziano a salire ($\gtrsim 10$ MeV) la pair production per materiali con una Z bassa supera lo scattering Compton. La sezione d'urto della produzione di coppie rimane ancora piccola per Z piccoli, dunque si dovrebbero usare materiali con una radiation length (distanza media dopo la quale il fotone decade) maggiore, ma si avrebbe così un multiple scattering importante.

Ci sono così due effetti concorrenti da soddisfare:

- è richiesto più materiale per produrre la coppia
- una volta prodotta la coppia si necessita di meno materiale possibile per avere una ricostruzione della traccia migliore

PANGU prende in considerazione queste problematiche e propone delle alternative per la costruzione del tracciatore e il sistema di misurazione dell'energia



- SiTCal, silicon tracker e un calorimetro elettromagnetico, questo approccio è troppo pesante per il limite imposto dal progetto;
- FiTCal, fiber tracker e un calorimetro elettromagnetico, anch'esso troppo pesante;
- SiTMag (PANGU-Fi), detector a fibre scintillanti in combinazione con uno spettrometro magnetico, i detector non sarebbero disponibili in tempi brevi, in quanto sono una tecnologia ancora in via di sviluppo
- FiTMag (PANGU-Si), detector al Silicio accoppiati con uno spettrometro magnetico, sono più costosi

com detector ci sarebbero anche le TPC, che però richiederebbero dei grandi recipienti ad alta pressione, dunque vanno scartate. Lo spettrometro magnetico offre una risoluzione energetica minore ($\sim 30\%$ con un campo magnetico di 0.1 T) rispetto ad un calorimetro comunemente utilizzato, ad esempio il mini-calorimetro di ~ 30 kg [16] ha una risoluzione in energia del $\sim 70\%$. Ai precedenti componenti di PANGU va associato un Anti-Coincidence System, su 5 dei 6 lati, che permette di eliminare segnali esterni. La struttura è divisa dunque in 3 parti principali, come si può vedere in figura.

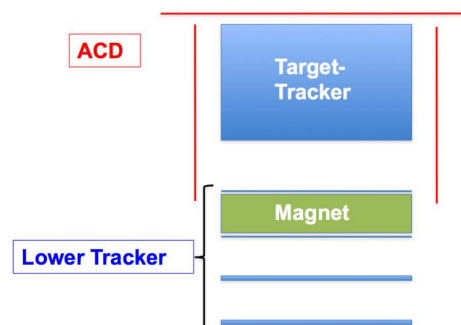


Figura 2.6: rappresentazione della struttura di PANGU

La risoluzione angolare attesa di PANGU è stata stimata facendo una simulazione Geant4 con 50 layer double-sided di Silicio disposti a 6mm di distanza l'uno dall'altro, per ottenere delle dimensioni del tracker di $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$, per lo spettrometro è stato simulato un magnete cilindrico cavo di raggi interno di 25 cm, spessore 5 cm e campo di 0.1 T. Prima e dopo il magnete sono stati disposti due layer di Silicio.

In questo modo è stata ottenuta una risoluzione a 100 MeV minore di 1° e un'incertezza sull'energia minore del 30%, come si può vedere in figura 2.7 si ha un netto miglioramento rispetto a quella ottenuta da *Fermi* LAT e gli altri attuali telescopi.

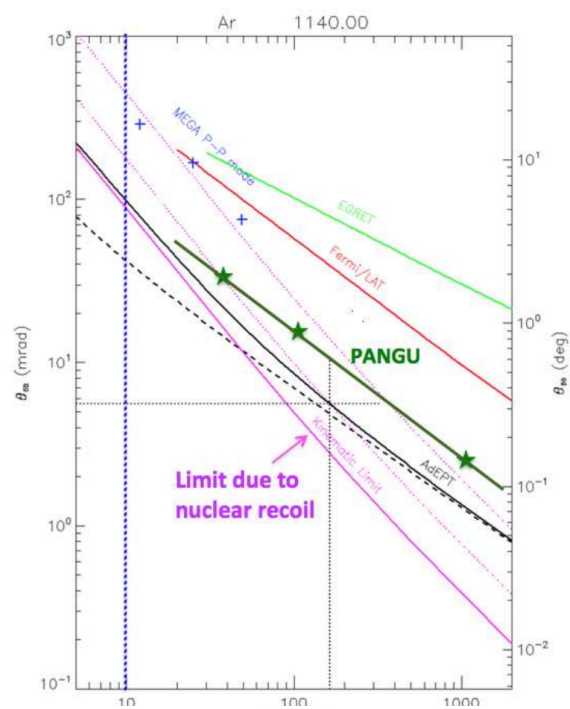


Figura 2.7: nel grafico si hanno le risoluzioni angolari in funzione dell'energia dei fotoni, la linea magenta rappresenta il limite cinematico dovuto al multiple scattering

Capitolo 3

Il progetto POX e il lavoro di Track reconstruction

3.1 POX

L'esperimento POX (Pangu Optimization and eXperimental verification) è un progetto finanziato da ASI e INFN, che prevede la realizzazione e il test di un telescopio gamma a produzione di coppie per energie sub-GeV, basato sulle proposte del progetto PANGU [1]. POX è diviso in due parti: una prima simulazione Monte Carlo e una seconda con l'effettiva costruzione di un prototipo da testare su fascio (test beam). Per la costruzione del prototipo si è scelto di utilizzare sia dei componenti inutilizzati di DAMPE e AMS-02 che dei nuovi layer in Silicio prodotti appositamente per POX, meno spessi degli altri, e un magnete cilindrico che genera un campo magnetico uniforme di 0.05 T.

3.1.1 Prototipo e test beam

Per la costruzione del prototipo si utilizzeranno dei rivelatori SSD già a disposizione, inutilizzati negli esperimenti AMS-02 e DAMPE. I primi sono double-sided spessi $300\ \mu\text{m}$ con un pitch di $110\ \mu\text{m}$ sul lato giunzione e $208\ \mu\text{m}$ sul lato ohmico, essi possono raggiungere una risoluzione spaziale di $10\ \mu\text{m}$ (lato giunzione) e $30\ \mu\text{m}$ (lato ohmico). Per quanto riguarda i secondi sono single-sided spessi $320\ \mu\text{m}$, caratterizzati da un pitch di $121\ \mu\text{m}$ e una risoluzione spaziale di $30\ \mu\text{m}$.

Per la misurazione di energia si è stato proposto in PANGU di utilizzare uno spettrometro magnetico per avere una stima del momento di elettrone e positrone, e la somma dei due deve dare l'energia del fotone iniziale, il magnete di cui si ha disposizione per il prototipo è un magnete a cilindro cavo in grado di generare un campo uniforme di 0.05 T, che pur essendo un valore basso è sufficiente per lavorare nel range energetico per cui PANGU è stato progettato; ottenendo comunque una risoluzione in momento del 50 % a 1 GeV.

La scelta naturale per il beam test ricade su BTF (Beam Test Facility) @INFN-Frascati, che, ad esempio, è stata utilizzata in precedenza per AGILE.

BTF offre un fascio di fotoni nel range di 30-750 MeV, prodotti tramite Bremsstrahlung da un fascio di elettroni, come in figura. Tuttavia c'è una facility simile a BTF a Mainz (Mikrotron) in Germania, che può essere utilizzata in alternativa a BTF, in entrambe la struttura che si utilizzerebbe è la seguente: Nella configurazione sono presenti degli scintillatori che faranno rispettivamente da trigger per l'acquisizione e filtro per elettroni sfuggiti al campo magnetico.

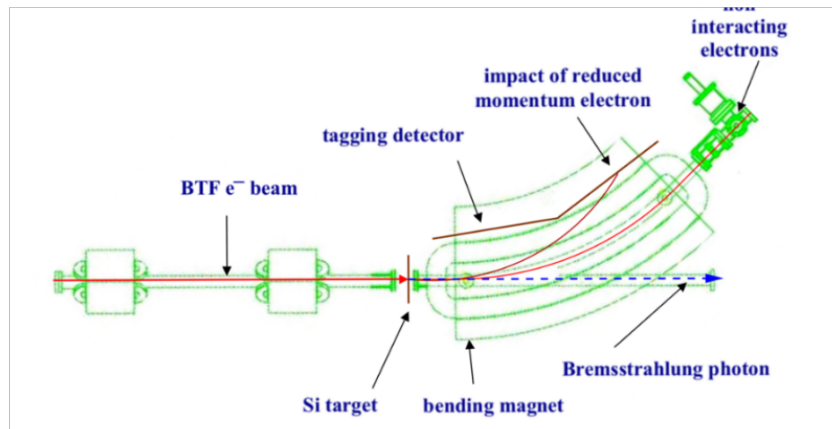


Figura 3.1: meccanismo di produzione fascio di fotoni a BTF.

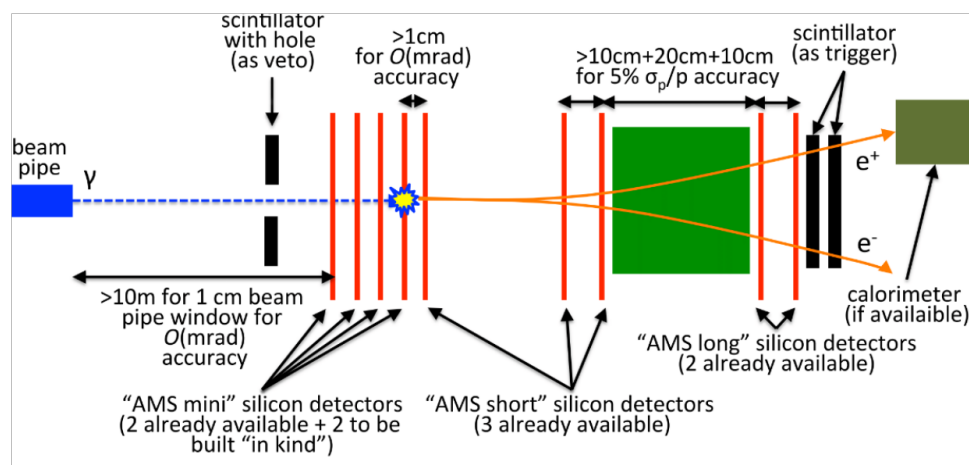


Figura 3.2: configurazione che sarà utilizzata per i beam test.

3.1.2 Simulazione

La simulazione è stata fatta sfruttando il framework Geant4 [22], che permette di riprodurre in modo accurato tutti i fenomeni che si possono verificare nell'interazioni dei fotoni con la materia. Il modello di POX usato nella simulazione è composto da 19 layer in Silicio, di cui 15 per il tracciatore e 4 posizionati agli estremi del magnete, per lo spettrometro magnetico. Di questi i primi 5 layer hanno uno spessore di $150 \mu\text{m}$ mentre i restanti di $300 \mu\text{m}$. Al momento sono stati trascurati i supporti e le elettroniche di lettura che si dovrebbero avere in un esperimento reale.

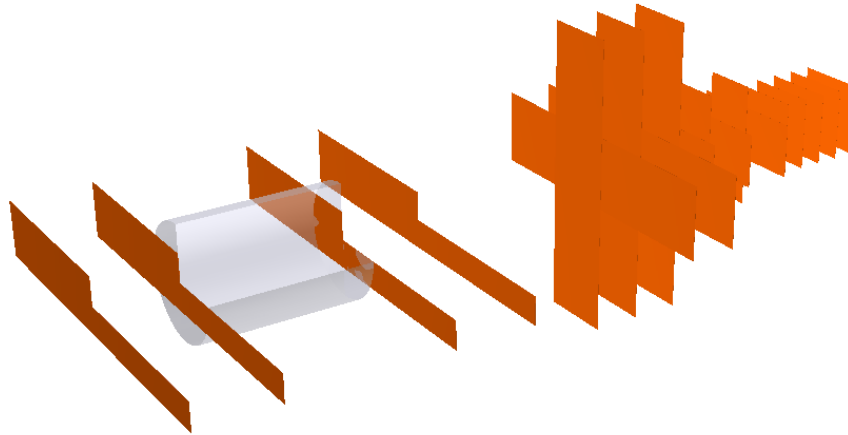


Figura 3.3: rappresentazione della geometria di POX, in cui si riconoscono: i nuovi rivelatori da $150 \mu m$ (i primi 5 da destra) e proseguendo verso sinistra: quelli di AMS-02 (da $300 \mu m$), quelli di DAMPE (da $320 \mu m$) e infine gli ultimi 4 di AMS-02 (da $300 \mu m$) per lo spettrometro

3.2 Algoritmo di ricostruzione tracce

Una particella carica in un campo magnetico uniforme avrà una traiettoria elicoidale, dunque considerando il campo in un magnete reale come localmente uniforme è possibile trovare una traccia elicoidale che meglio approssimerà la traiettoria reale.

Il modo più semplice per estrarre i parametri legati alla traccia di una particella in moto in un campo magnetico è quello di fare un fit minimizzando il χ^2 , non considerando il multiple scattering e la perdita di energia che si ha nel passaggio nella materia.

Per avere un miglior risultato è chiaramente possibile sfruttare algoritmi più potenti, ad esempio una formulazione ricorsiva del metodo dei minimi quadrati, come il Kalman filter.

3.2.1 Kalman Filter

Un filtro Kalman [17][18] è un efficiente algoritmo ricorsivo che permette di trovare una stima ottimale per un'osservabile, deve il suo nome a Rudolf E. Kalman, ingegnere e matematico statunitense.

Il Kalman Filter viene spesso utilizzato nei sistemi di navigazione o in algoritmi di processamento di dati, una delle applicazioni più degne di nota è quella nel progetto Apollo [19], come soluzione al problema della stima delle traiettorie.

Date le sue caratteristiche è ottimo per sistemi con rumori e disturbi gaussiani a media nulla.

La formulazione originaria di Kalman, che è chiamata *filtro Kalman semplice*, ed è usato per stimare stati su sistemi dinamici lineari; il modello del processo descrive l'evoluzione dello stato da un tempo $k-1$ ad un tempo k , come:

$$x_k = Fx_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$$

in cui: F è la matrice che descrive la transizione (applicata allo stato $k-1$), B è la matrice di controllo dell'input (applicata al vettore di controllo v_{k-1}) e w_{k-1} è l'errore di processo, che è assunto essere gaussiano con media nulla (covarianza Q).

Il modello del processo si accoppia con il modello di misurazione, che descrive la relazione tra lo stato e la misurazione effettuata ad un determinato tempo k come:

$$z_k = Hx_k + v_k$$

in cui: z_k è il vettore di misurazioni, H è la matrice di misurazione (applicata su x_k) per quanto riguarda v_k è il vettore con l'errore sulla misurazione, anch'esso supposto gaussiano con media nulla (covarianza R).

Il ruolo del Kalman Filter è quello di procurare una stima di x_k dato:

- uno stato iniziale x_0 ;
- la serie di misurazioni z_i

- le informazioni sul sistema contenute nelle matrici F , B , H , Q ed R .

L'algoritmo del Kalman è strutturato in due passaggi principali, prediction step e update step; tuttavia verranno descritti con maggior accuratezza nel paragrafo successivo.

Esistono versioni più complicate applicabili ad altri tipi di sistemi, ad esempio l' "Extended Kalman Filter", per sistemi non lineari, in cui non si è in grado di definire modelli e matrici di transizione come nel caso precedente.

3.2.2 GENFIT2

In questo lavoro di tesi è stato sfruttato l'algoritmo di Kalman Filter integrato nel framework di track-fitting GENFIT2 [21], che offre la possibilità di applicare toolkit, indipendenti dalla geometria dell'esperimento, per ottenere parametri di tracce e matrici di covarianza, con un Kalman Filter.

La rappresentazione della traccia è basata su una rappresentazione Runge-Kutta (**RKTrackRep**), adattato da quello già presente in Geant3 (ora è stato aggiornato a Geant4 [22]), in cui viene parametrizzato lo stato p con 5 coordinate, in un sistema di coordinate planari (come si vede in figura 3.1), la posizione nel sistema cartesiano \vec{x} e la direzione \vec{a} . Durante il processo di fitting vengono calcolate alcune proprietà

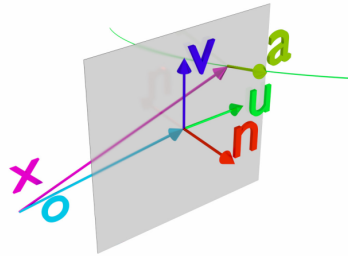


Figura 3.4: sistema di coordinate utilizzato in **RKTrackRep**

legate al passaggio della particella nella materia:

- la perdita di energia (per particelle cariche si usa la formula di Bethe-Bloch [11]);
- il multiple scattering (usando la formula di Highland-Lynch-Dahl [11])

sfruttando elementi compresi in Geant3.

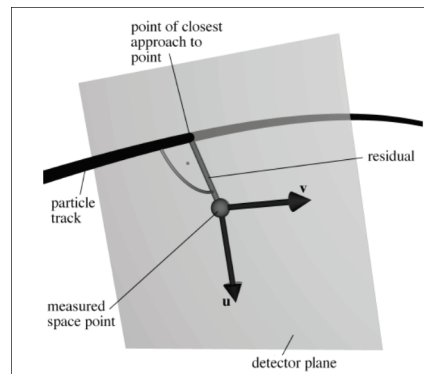
Nell'utilizzo di estrapolazioni Runge-Kutta si deve scegliere uno step di integrazione abbastanza largo da non aumentare troppo il costo computazionale, ma non troppo da aumentare anche l'errore, la classe **RKTrackRep** adotta uno step-size adattivo, che tiene anche conto della non omogeneità del campo magnetico.

La rappresentazione della traccia combina la parametrizzazione e l'estrapolazione dei dati, e viene utilizzata nel processo di fitting insieme al set di misurazioni per calcolare i risultati.

Il Kalman Filter è uno degli algoritmi implementati in GENFIT2, in particolare viene eseguito per avere un risultato finale più "smooth", infatti prevede una previsione media tra un fit "forward" e "backward" (eseguendo fasi di update salvando i dati nelle due direzioni).

Le operazioni che vengono fatte dal Kalman [20] sono una serie di fit (chiamati "updates"), seguendo la serie di hit identificate dal Track Finder. Partendo dalla fase di "prediction", che produce una stima degli stati e le incertezze (matrici di covarianza), si ha poi la fase di update, in cui le stime prodotte vengono aggiornate mediante una media pesata tra la previsione e la misurazione effettiva. Il peso viene fornito dall'incertezza sulle misure e dalla minimizzazione del χ^2 dei due dati.

La differenza principale con il semplice fitting del χ^2 è che con il Kalman vengono fatti gli update, con cui i punti fittati vengono cambiati per avere precisioni migliori. In seguito il risultato della prima iterazione viene usato come valore di partenza per l'iterazione con le hit nella direzione opposta ("forward" e "backward"). Per evitare bias sul secondo fit viene modificata la matrice di covarianza (moltiplicandola per un fattore grande). Viene poi fatta l'operazione di "smoothing" ovvero la media delle predizioni dei due fit.



3.2.3 Applicazioni al progetto POX e risultati

L'algoritmo scritto per il progetto POX importa la geometria e i dati prodotti con Geant4/GGS, e a questi applica un kalman filter, che permette di ottenere dati quali momento e incertezza su quest'ultimo con una certa precisione rispetto alla verità Monte Carlo.

Sono stati effettuate simulazioni con muoni a diverse energie.

Come si può vedere in figura la traccia fittata è compatibile con quella delle verità Monte Carlo (in figura è stato impostato un campo magnetico di 1 T per rendere più marcata la curvatura).

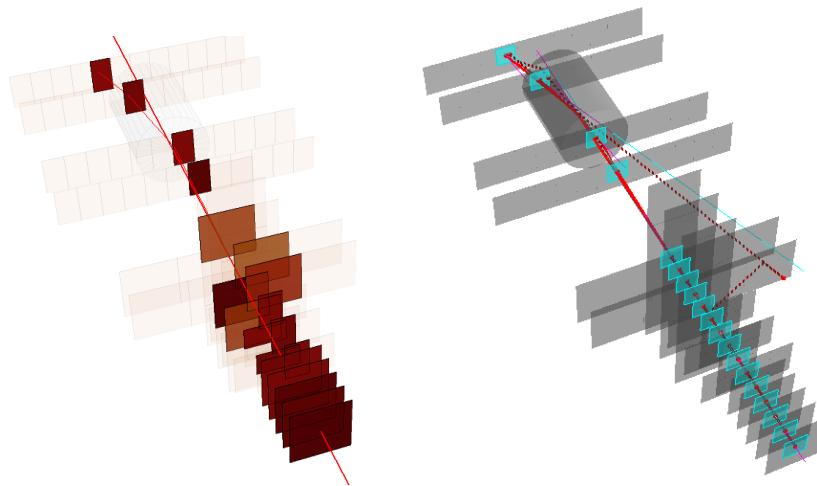


Figura 3.5: nella figura di destra si può vedere la traccia della Monte Carlo Truth di muoni con 100 MeV in 1 T, mentre a sinistra la traccia ricostruita con il Kalman Filter, in cui si possono riconoscere i passaggi per ogni punto aggiunto nei forward fit (linee tratteggiate rosse), backward fit (linee tratteggiate blu) e traccia finale fittata (linea solida rossa)

Per ottenere una dato sulla precisione dell'algoritmo di ricostruzione si può sfruttare la rigidità, una quantità che descrive il moto nel campo elettromagnetico di una qualsiasi particella carica, descrivendo la resistenza che quest'ultima oppone alla deflessione, ad esempio nel caso di un campo magnetico uniforme si ha che il raggio di girazione (o gyroradius, o raggio di Larmor) è:

$$\rho = \frac{p}{qB}$$

definendo dunque la rigidità [11] come:

$$R = \frac{pc}{Ze} = B\rho$$

la rigidità ha le dimensioni del Volt (momento*c).

Oltre ad un certo valore di energia essendo trascurabile l'effetto del multiple scattering si ha che la rigidità inizia a crescere linearmente con il momento.

Dunque notando come il momento sia proporzionale alla rigidità si può ottenere un valore proporzionale

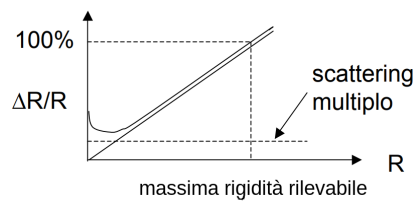


Figura 3.6: andamento teorico della risoluzione in funzione della rigidità (momento)

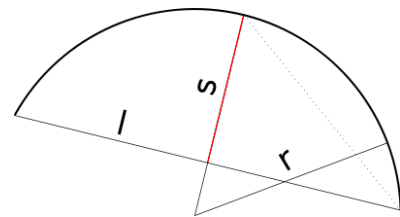
alla sagitta. La sagitta s è il valore generalmente misurato

$$s = \rho - h$$

in cui

$$h = r - \frac{L^2}{8\rho} \implies s = \frac{BL^2}{8\rho}$$

(L è la lunghezza del cammino nel campo magnetico)



↓

$$p = \frac{qBL^2}{8s} \implies \left| \frac{dp}{ds} \right| = \frac{p}{s} \implies \frac{\sigma_p}{p} = \frac{\sigma_s}{s}$$

da quest'ultima uguaglianza si può calcolare la risoluzione in momento sfruttando la sagitta, in particolare si ha che l'inverso del momento deve seguire la stessa distribuzione della sagitta, quindi una Gaussiana, e la deviazione standard trovata con il fit dei dati è la risoluzione in momento cercata.

La risoluzione in momento può essere calcolata sfruttando la seguente relazione:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\frac{1}{p_{MCtruth}} - \frac{1}{p_{fitted}}}{\frac{1}{p_{MCtruth}}} = 1 - \frac{p_{MCtruth}}{p_{fitted}}$$

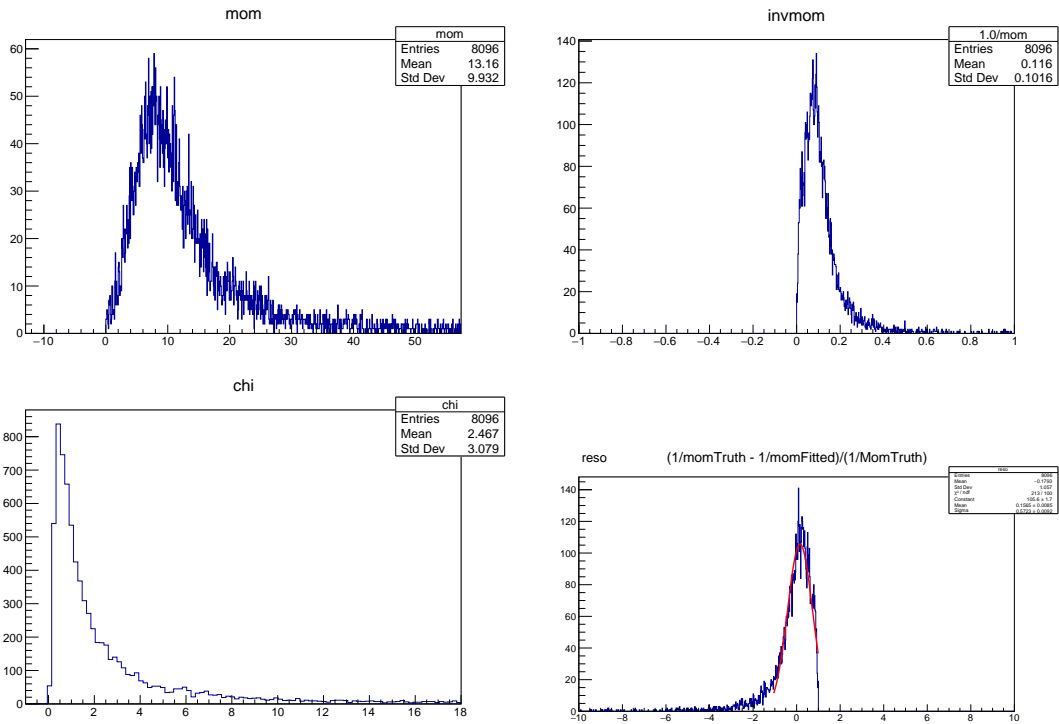


Figura 3.7: Nel primo istogramma si può vedere la distribuzione del momento ricostruito (il momento vero 10 GeV), nel secondo l'inverso del momento, nel terzo il χ^2 , il quarto la risoluzione

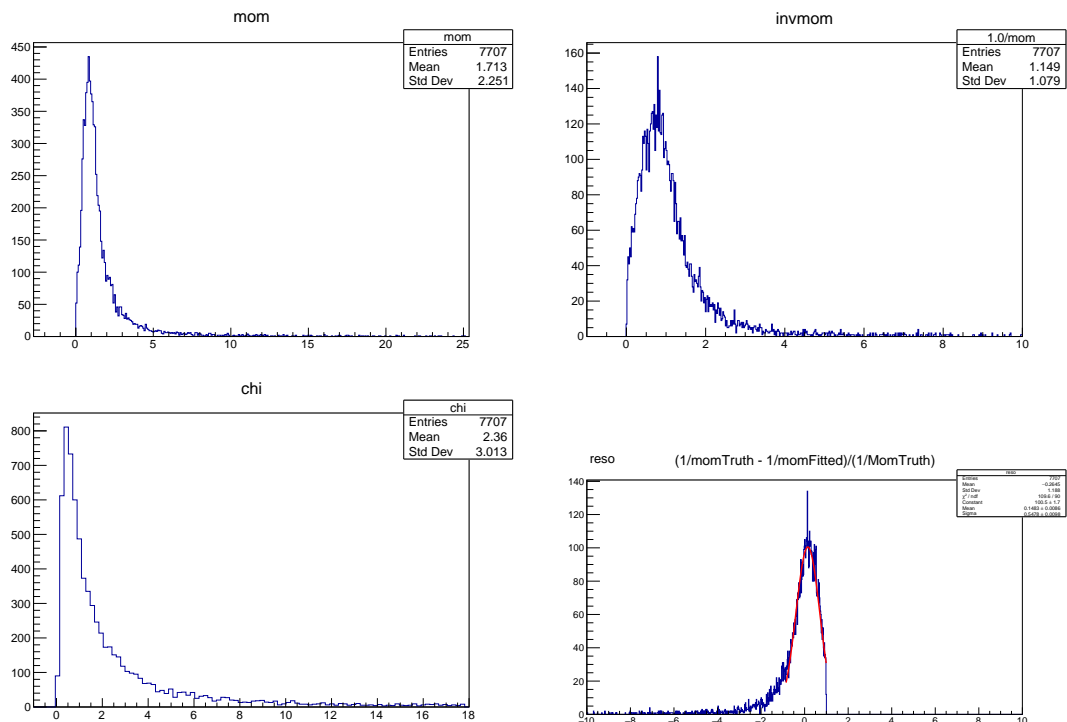


Figura 3.8: Nel primo istogramma si può vedere la distribuzione del momento ricostruito (il momento vero 1 GeV), nel secondo l'inverso del momento, nel terzo il χ^2 , il quarto la risoluzione

E' interessante analizzare il χ^2 sul fit della traccia ricostruita con GenFit, e si può vedere (fig.3.7 e 3.8) come il picco sia molto vicino all'unità, questo significa che il modello ricostruito è in accordo con la

verità Monte Carlo.

E' possibile a questo punto osservare in un grafico l'andamento della risoluzione in momento in funzione dell'energia cinetica della particella iniziale, che deve seguire l'andamento mostrato in figura 3.6, infatti dalla figura 3.9 si può notare che viene rispettato, tuttavia i valori rimangono troppo bassi, infatti la risoluzione deve essere proporzionale a:

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \frac{1}{BIL}$$

in cui B è il modulo del campo magnetico, I la lunghezza della zona attraversata con il campo magnetico e L la lunghezza del tracciatore; dunque per le energie con cui è stato testato l'algoritmo (fino a 1 TeV) si dovrebbe avere una risoluzione maggiore del 70%, per questo motivo si dovranno fare studi supplementari.

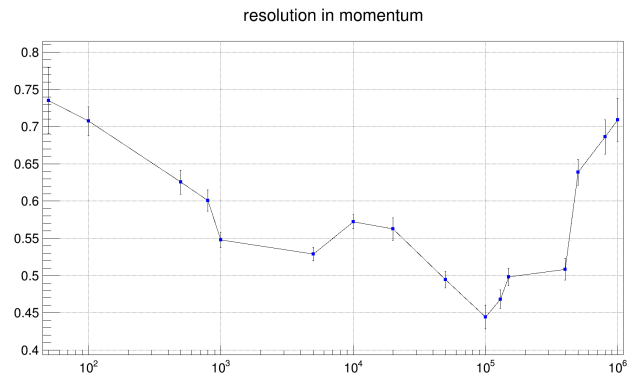


Figura 3.9: andamento della risoluzione in funzione dell'energia cinetica

3.3 Futuri miglioramenti

I prossimi passi possibili sono:

- integrazione algoritmo di Vertex Finding;
- inserimento di simulazioni di rumore nell'elettronica di lettura.

Nell'attuale algoritmo di ricostruzione tracce è possibile inserire un algoritmo di Vertex Finding, che è in grado di riconoscere le due tracce di elettrone e positrone dopo la produzione di coppie da parte del fotone, in modo tale da poter effettuare una simulazione completa di POX. Per far questo è possibile sfruttare sia quello integrato in GENFIT2 (RAVE), che quello già presente nel progetto POX, che tiene conto del problema delle ghost hit nei tracker al Silicio.

Per migliorare ulteriormente la verosimiglianza della simulazione si può fare un passo successivo, introducendo una simulazione del rumore dell'elettronica di lettura; dovuto per esempio all'autoinduzione che si verifica nei diodi delle strip di Silicio, dunque una parte di segnale migra nelle strip adiacenti a quella che ha subito la hit.

Bibliografia

- [1] Xin Wu *et al*, "PANGU: A High Resolution Gamma-ray Space Telescope", Ed. Tadayuki Takahashi, Jan-Willem A. den Herder, and Mark Bautz. Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet, 2014 to Gamma Ray, 2014
- [2] Adrian Sabin Popescu, "Cosmic Ray Origin and Propagation Model", arXiv:0704.2718, 2007
- [3] A. Giuliani *et al*, "Neutral Pion Emission From Accelerated Protons In The Ssupernova Remnant W44", The Astrophysical Journal 742.2, 2011
- [4] Stefano Gabici, "Gamma Ray Astronomy and the Origin of Galactic Cosmic Rays", arXiv:0811.0836, 2008
- [5] M. Ackermann *et al*, "Detection of the Characteristic Pion-decay Signature in Supernova Remnants", arXiv:1302.3307, 2013
- [6] E. Fermi, "On the Origin of the Cosmic Radiation", Physical Reiew, volume 75, number 8 , 1949
- [7] A. Morselli, "The search for dark matter with Gamma-rays: A review.", Acta Polytechnica. 53., DOI 10.14311/AP.2013.53.0545. , 2013
- [8] A.G. Cohen *et al*, "A MATTER–ANTIMATTER UNIVERSE?", The Astrophysical Journal, Volume 495, Number 2, 1998
- [9] Yi-Zhong Fan *et al*, " γ -ray burst ultraviolet/optical afterglow polarimetry as a probe of quantum gravity", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 376, Issue 4, Pages 1857–1860, April 2007
- [10] R. Gambini *et al*, "Nonstandard optics from quantum spacetime", Physical Review D, American Physical Society (APS), 1999
- [11] M. Tanabashi *et al*, "Review of Particle Physics", Phys. Rev. D 98, 030001, 2018
- [12] A. Lechner, "Particle interactions with matter", CERN Yellow Rep. School Proc., volume 5, DOI 10.23730/CYRSP-2018-005.47, 2018
- [13] S. Fong *et al*, "On the Conceptual Understanding of the Photoelectric Effect", AIP Conference Proceedings., volume 1263., DOI 10.1063/1.3479845. , 2010
- [14] Burhop Eric Henry Stonely, "The Auger effect", Proc. R. Soc. Lond. A148272–284, 1935
- [15] D. Roland, "The Universe in Gamma Rays", Schönfelder, Volker, Springer Berlin Heidelber , pages 9-25, 2001
- [16] C. Labanti *et al*, "The Mini-Calorimeter detector for the AGILE mission", Nuclear Physics B Proceedings Supplements 150, Jan. 2006
- [17] K. Youngjoo and B. Hyochoong, "Introduction to Kalman Filter and Its Applications", ISBN 978-1-83880-536-4, DOI 10.5772/intechopen.80600, 2018
- [18] Yan Pei *et al*, "An Elementary Introduction to Kalman Filtering", arXiv:1710.04055, 2019
- [19] M. Grewal and A. Andrews, "Applications of Kalman Filtering in Aerospace 1960 to the Present [Historical Perspectives]", Control Systems, IEEE, volume 30, DOI 10.1109/MCS.2010.936465, 2010

- [20] R. Frühwirth and A. Strandlie, "Track fitting with ambiguities and noise: A study of elastic tracking and nonlinear filters", *Computer Physics Communications*, volume 120, issn 0010-4655, DOI [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(99\)00231-3](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(99)00231-3), 1999
- [21] T. Bilka, "Implementation of GENFIT2 as an experiment independent track-fitting framework", arXiv:1902.04405, 2019
- [22] Le principali pubblicazioni su Geant4 sono:
"Geant4—a simulation toolkit", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, volume 506, ISSN 0168-9002, DOI [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8), 2003
J. Allison *et al*, "Geant4 developments and application", *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, volume 53, DOI 10.1109/TNS.2006.869826, 2006
"Recent developments in Geant4", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, volume 835, ISSN 0168-9002, DOI <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>, 2016