



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

Tesi di Laurea

# Valutazioni delle prestazioni di un rivelatore per fotoni di bassa energia a bordo di un CubeSat

Candidato  
**Gianmarco Aristei**

Relatore  
**Dott. Matteo Duranti**

Anno Accademico 2020-2021



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>v</b>
<b>1 Obiettivi scientifici</b>	<b>1</b>
1.1 Fondo gamma e ricerca di Materia Oscura . . . . .	1
1.2 Produzione di raggi cosmici . . . . .	2
1.3 Birifrangenza dello spazio-tempo in gravità quantistica a loop . . . . .	3
1.4 Asimmetria barionica . . . . .	4
1.5 Studio della polarizzazione dei raggi cosmici . . . . .	4
<b>2 Rilevazione dei raggi gamma</b>	<b>5</b>
2.1 Processi di interazione . . . . .	5
2.1.1 Effetto fotoelettrico . . . . .	6
2.1.2 Effetto Compton . . . . .	7
2.1.3 Produzione di coppia . . . . .	8
2.2 Tecnologie di rivelazione . . . . .	9
2.2.1 Rivelatori al silicio . . . . .	9
2.2.2 LGAD . . . . .	9
2.2.3 Scintillatore . . . . .	10
2.3 Misure di tempo . . . . .	10
2.4 Rivelatori di particelle . . . . .	11
2.4.1 Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT) . . . . .	11
2.4.2 e-ASTROGAM . . . . .	12
2.4.3 Advanced Energetic Pair Telescope (AdEPT) . . . . .	13
2.4.4 PAir-productioN Gamma-ray Unit (PANGU) . . . . .	14
<b>3 SLA (Space LGAD Astroparticle)</b>	<b>17</b>
3.1 Geometria . . . . .	17
3.2 Obiettivi . . . . .	17
3.3 Simulazione . . . . .	18
<b>4 Risultati</b>	<b>21</b>
4.1 Risultati simulazione . . . . .	21
4.2 Valutazione teorica numero di conversioni . . . . .	21
4.3 Analisi dati . . . . .	22



# Introduzione

L'astronomia a raggi gamma consente di analizzare un'estesa varietà di fenomeni ad alta energia irriducibili sulla Terra. La zona energetica dei raggi gamma è superiore ai 100 keV. In particolare, le rivelazioni che interessano il range di energie superiore ai 10 MeV si basano sulla conversione dei fotoni in una coppia elettrone-positrone. Gli apparati che si basano su questo principio devono essere in grado di indurre la conversione e, inoltre, è necessario che siano in grado di ricostruire il quadri-momento di elettrone e positrone in maniera tale da ricavare l'energia e la direzione del fotone. Nel range di energie compreso tra 10 MeV e 1 GeV, definito sub-GeV, è difficoltoso compiere misure poiché il multiple scattering coulombiano (MS) a cui sono sottoposte le particelle all'interno del rivelatore è talmente forte da ridurre la risoluzione in posizione e direzione delle particelle rendendo le risoluzioni angolari dei telescopi inadeguate. In maniera complementare alle misure di energie e di posizione è possibile anche introdurre una misura temporale. Attualmente però i sensori utilizzati godono di risoluzioni dell'ordine dei ns e quindi non risultano essere adatti a compiere misure temporali di particelle relativistiche.

Per poter ovviare alla scarsa risoluzione angolare dovuta al multiple scattering vengono ideati vari progetti di telescopi gamma come ad esempio PANGU, AdEPT o e-ASTROGAM. A tal proposito nasce il progetto SLA (Space LGAD for Astroparticle), un dimostratore con una duplice funzione: verificare l'efficacia delle soluzioni tecniche adottate da PANGU e utilizzare per la prima volta nello spazio dei dispositivi a semiconduttore chiamati Low Gain Avalanche Detectors (LGAD). Questi dispositivi consentono di ottenere sia misure precise del tempo, nell'ordine dei 100 ps, che misure precise della posizione, nell'ordine dei 10  $\mu\text{m}$ .

Questo lavoro di tesi costituisce la prima verifica, tramite simulazione, delle prestazioni del rivelatore proposto all'interno del progetto SLA. In particolare è stata implementata, nella simulazione, la possibile configurazione geometrica del rivelatore e sono stati analizzati i dati prodotti da una simulazione di fotoni a bassa energia.

Nel primo capitolo saranno illustrate le motivazioni scientifiche dietro la necessità di migliorare la risoluzione angolare dei rivelatori gamma nella regione sub-GeV.

Nel secondo capitolo verranno mostrati i processi di interazione dei fotoni gamma con la materia. Questi processi ne consentono la rivelazione, e una loro approfondita comprensione consente anche di capire come ottimizzare le prestazioni ottenibili con la tecnica di misura adottata. Si vedrà che, per misurare la direzione di arrivo di un fotone gamma, sarà necessario rivelare le particelle secondarie e saranno mostrate le principali tecnologie sfruttate per l'individuazione delle particelle cariche prodotte. Sarà inoltre discusso brevemente dei benefici apportati da una misura temporale.

Il terzo capitolo approfondirà i dettagli del progetto SLA e della sua geometria.

Nel capitolo finale, infine, saranno mostrati alcuni risultati ottenuti grazie a una simulazione MonteCarlo creata e sviluppata all'interno di questo lavoro di tesi.



# Capitolo 1

## Obiettivi scientifici

La radiazione gamma è prodotta da eventi quali stelle che esplodono, materia che cade all'interno di un buco nero e la collisione di corpi celesti. Attraverso la misura dei raggi gamma è possibile conoscere questi eventi e come si collocano nel nostro universo.

In questo ambito il telescopio spaziale Fermi [1], insieme ad altri strumenti tra cui AGILE [2] e INTEGRAL [3], consentono di descrivere la zona di energie gamma in un ampio spettro. Tuttavia esiste ancora un range di energie in cui nessuno strumento gode di prestazioni soddisfacenti: la zona del sub-GeV, compresa tra i 10 MeV e 1 GeV.

A tal proposito nasce il progetto PANGU (PAir-productioN Gamma-ray Unit) [9]. Dalle previsioni del gruppo che ha ideato questo rivelatore, si dovrebbe avere un miglioramento della Point Spread Function (PSF), ovvero la capacità di un telescopio di valutare piccoli angoli. La PSF esprime quindi l'incertezza nella misura che uno strumento ricava da una sorgente puntiforme (idealmente dovrebbe essere una delta di Dirac). Tale miglioramento dovrebbe consentire di raggiungere una risoluzione angolare dell'ordine di 1° a 100 MeV [9].

Questo progresso nella tecnologia consentirà di distinguere svariate sorgenti puntiformi (pulsar, blazar, gamma-ray burst) dalle sorgenti estese (resti di supernove), dal fondo di raggi gamma diffuso e ci renderà in grado di studiare nel dettaglio una vasta gamma di fenomeni.

Le misure raccolte da PANGU saranno complementari a quelle di altri rivelatori come ad esempio Fermi o DAMPE. Vediamo alcuni esempi di problemi di fisica fondamentale e astrofisica che PANGU si prefigge di studiare nella regione sub-GeV:

- approfondimento della conoscenza del piano galattico facendo distinzione tra sorgenti puntiformi ed estese dall'emissione diffusa;
- misura dello spettro di soft gamma-ray di sorgenti tra cui gamma-ray bursts (GRBS), microquasar, blazar e millisecond pulsars;
- ricerca di radiazione gamma prodotta dal decadimento o dall'annichilazione di materia oscura nei pressi della Via Lattea o in regioni extragalattiche;
- comprensione dei meccanismi di generazione e accelerazione dei raggi cosmici provenienti dalla Via Lattea ed extragalattici nei resti di supernove e nelle superbolle;
- studio della fisica dei buchi neri a differenti masse;
- osservazione di eventi nel sistema solare come i solar flare;
- comprensione di processi di fisica fondamentale come l'effetto di birifrangenza descritto dalla gravità quantistica e l'asimmetria barionica;
- monitoraggio di fenomeni transienti di soft gamma-ray repeater;
- rilevazione della polarizzazione della radiazione gamma da oggetti astronomici;

### 1.1 Fondo gamma e ricerca di Materia Oscura

L'identificazione delle fonti della radiazione gamma è importante per compiere una precisa misurazione del fondo gamma diffuso che risulta essere cruciale anche per la ricerca di indizi sul decadimento oppure

l'annichilazione di particelle di materia oscura. Recenti osservazioni di una presenza eccessiva di radiazione gamma dal centro della galassia è che questa sia dovuto all'annichilazione di un potenziale candidato di materia oscura. Alcuni modelli attribuiscono questo eccesso di radiazione a Weakly Interacting Massive Particle (WIMP), che tipicamente annichilano in coppie  $\tau^+\tau^-$  o  $b\bar{b}$ .

Tuttavia la PSF di Fermi-LAT nel sub-GeV non consente di scartare le ipotesi che l'eccesso di radiazione gamma sia causato da millisecond pulsars. [10]

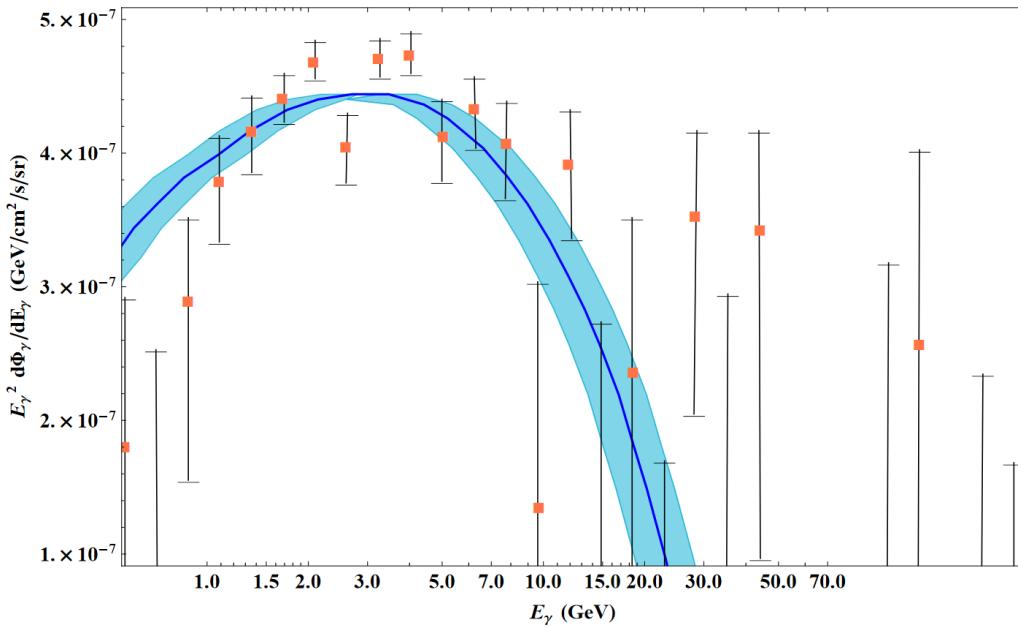


Figura 1.1: Il grafico mostra le misure eseguite da Fermi-LAT sulle Fermi bubbles. Lo spettro di emissione di raggi gamma è misurato ad una bassa latitudine galattica ( $|b|=10^\circ - 20^\circ$ ), avendo anche sottratto il contributo apportato dallo scattering Compton inverso previsto da WIMP di 50 GeV che annichilano in coppie  $b\bar{b}$  (linea blu). Si nota, inoltre, l'assenza di misure ad energie inferiori a 0.5 GeV.

## 1.2 Produzione di raggi cosmici

Le osservazioni compiute da Fermi e AGILE hanno confermato che i raggi cosmici provengano da resti di supernove [4]. Pur conoscendo con sicurezza le origini dei raggi cosmici, non vi è ancora certezza sui meccanismi dominanti attraverso cui avviene l'accelerazione relativistica delle particelle. Inoltre non è nemmeno nota la natura delle particelle che diffondono la maggior parte dell'energia, sia termica che cinetica, dell'esplosione. I modelli che descrivono lo sviluppo dell'onda d'urto ipotizzano che nel caso in cui i raggi cosmici siano prodotti direttamente dalle supernove, allora dal 3 fino al 30% dell'energia cinetica dell'esplosione dovrebbe essere trasferita ai protoni.

Lo studio dell'emissione dei raggi gamma nella zona del sub-GeV dei resti delle supernove ci consente di osservare la distribuzione di questa energia: quando un protone accelerato interagisce con una nube molecolare abbiamo la formazione di mesoni  $\pi^0$  negli urti  $p-p$ . I mesoni, la cui massa è pari a  $m_\pi = 134.9 \text{ MeV}/c^2$ , decadono in due fotoni con energia pari a  $E = m_\pi/2 = 67.5 \text{ MeV}$ . Ricercando picchi su questa energia possiamo stabilire l'accelerazione di protoni rispetto all'accelerazione degli elettroni e leptoni che emettono mediante bremsstrahlung o effetto Compton inverso [5].

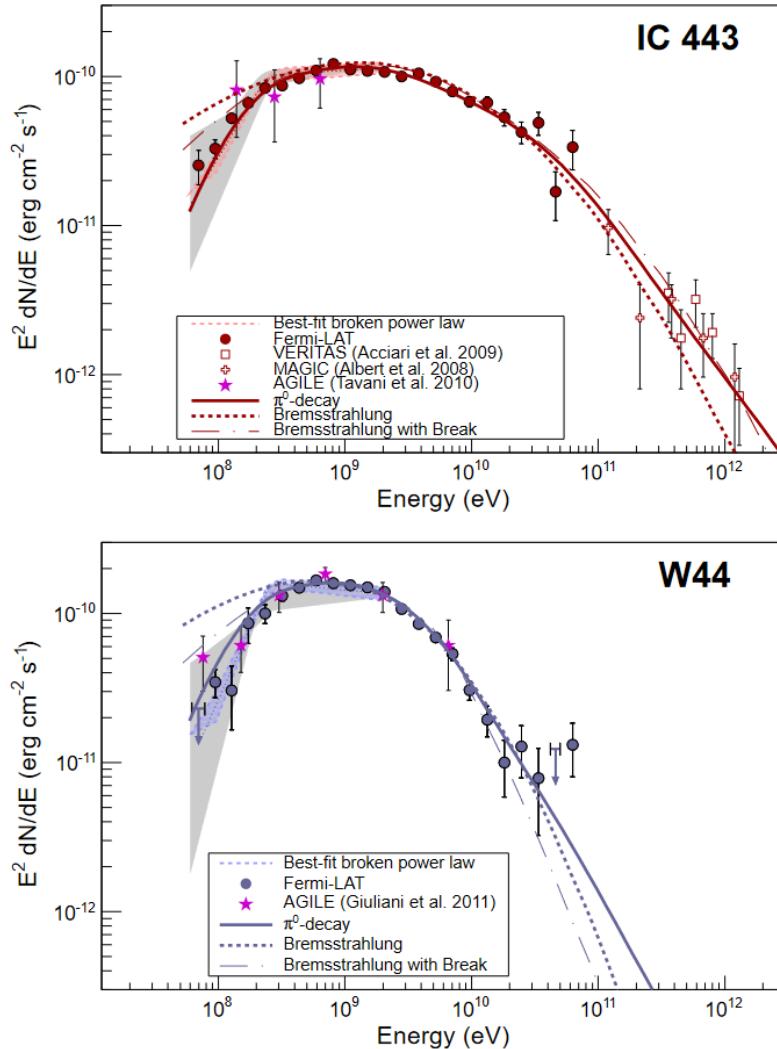


Figura 1.2: Grafici che mostrano il flusso di fotoni gamma a differenti energie dai resti delle supernove IC443 e W44. Il modello basato sui decadimenti dei pioni  $\pi^0$  sembra essere abbastanza buono, ma la mancanza di misure di radiazione gamma con energia minore di 100 MeV non rende possibile lo scarto dei modelli leptonici.

### 1.3 Birifrangenza dello spazio-tempo in gravità quantistica a loop

La birifrangenza consiste nella separazione di un fascio non polarizzato in due fasci polarizzati. I materiali in cui si osserva questo fenomeno sono la calcite e la moissanite. Questi due materiali godono di indici di rifrazione differenti nelle diverse direzioni di propagazione del fascio: questa proprietà fa sì che avvenga la birifrangenza.

Nella teoria della gravità quantistica a loop viene previsto un effetto analogo anche nel vuoto in presenza di campi gravitazionali: fotoni con differente polarizzazione dovrebbero viaggiare a velocità lievemente differenti nel vuoto. Questo effetto, usualmente trascurabile, può diventare misurabile se le sorgenti che vengono osservate si trovano a distanze molto elevate come quelle galattiche o extragalattiche, come ad esempio nel caso dei gamma-ray burst. La grande distanza fa sì che la divergenza venga accumulata e che un segnale che arriva sulla Terra che dovrebbe essere non polarizzato venga polarizzato nel suo percorso [11].

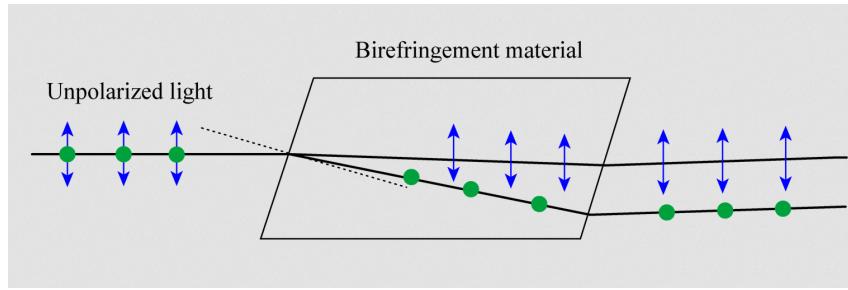


Figura 1.3: La discrepanza dell'indice di rifrazione di un materiale fa sì che un fascio di luce che incide su di esso sia rallentato e deviato dalla sua direzione. Analogamente uno spazio-tempo birifrangente porterà i fotoni da una stessa sorgente con diversa polarizzazione a una divergenza.

## 1.4 Asimmetria barionica

Lo studio dei raggi cosmici ci mostra come la materia sia molto più abbondante rispetto all'antimateria, vediamo infatti che  $\bar{n}/n \approx 10^{-4}$ . Questo fenomeno sembra suggerire che la Via Lattea e le galassie nelle vicinanze siano formate in gran parte da materia ordinaria. Non siamo ancora in grado di verificare l'esistenza di regioni dell'universo nel quale vi è un accumulo di antimateria volta a formare antagalassie o ammassi di antagalassie. Una possibilità simile rivelerebbe un universo simmetrico. Studiando il fondo gamma diffuso a basse energie si potrebbe fare luce anche su questa problematica di fisica fondamentale. Ammettendo l'esistenza di ammassi antimateria si potrebbe osservare delle anisotropie nel fondo gamma extragalattico, queste sarebbero causate all'annichilazione massiccia di barioni nelle zone di confine tra ammassi i quali nel corso della storia dell'universo si sono scontrati [6]

## 1.5 Studio della polarizzazione dei raggi cosmici

La polarizzazione gamma consente di differenziare processi di emissione (ad esempio la radiazione di sincrotron) da altri meccanismi di produzione. Osservazioni di questo tipo nella zona sub-GeV non sono mai state compiute e lo studio della polarizzazione in questo range energetico offrirebbe un ulteriore sviluppo alla ricerca sull'origine dei raggi cosmici extragalattici ad altissima energia. L'elevata polarizzazione rappresenta un segno dell'accelerazione adronica. Viceversa, l'emissione Compton inversa, di tipo leptonic, non risulta essere polarizzata. Si potrà osservare la polarizzazione nella zona sub-GeV dei blazar e, inoltre, le misure polarimetriche potranno essere utilizzabili per studiare la geometria delle regioni a emissione gamma come ad esempio nelle pulsar, nelle pulsar wind nebula e nei gamma-ray burst [12].

# Capitolo 2

## Rilevazione dei raggi gamma

In questo capitolo saranno approfonditi i processi fondamentali alla rilevazione dei raggi gamma e vedremo qualche rivelatore gamma. Discuteremo i fenomeni fisici elementari che consentono l'interazione della radiazione con gli strumenti di misura e andremo a poi a conoscere gli strumenti che ci consentono di osservare l'interazione e ricostruirla. Verranno confrontati i diversi fenomeni che ci consentono di registrare gli eventi e verranno valutati in maniera tale da individuare il più efficiente per il range di energie sub-GeV. Valuteremo i vantaggi offerti da una misura temporale e le varie tecnologie per migliorare la risoluzione. Infine si parlerà di FERMI-LAT, AdEPT, e-ASTROGAM e PANGU.

### 2.1 Processi di interazione

I fotoni gamma sono impossibili da rilevare in maniera diretta: sono particelle neutre e la loro lunghezza d'onda è troppo piccola ( $<1$  pm) per riuscire a provocare una corrente all'interno dei conduttori. Per poter rilevare la radiazione gamma i rivelatori moderni si basano su tre processi di interazione dei fotoni con la materia. I processi sono:

- effetto photoelettrico;
- effetto Compton;
- produzione di coppia.

Ogni processo gode di una sezione d'urto la cui efficienza è determinata dall'energia del fotone e dal tipo di materiale.

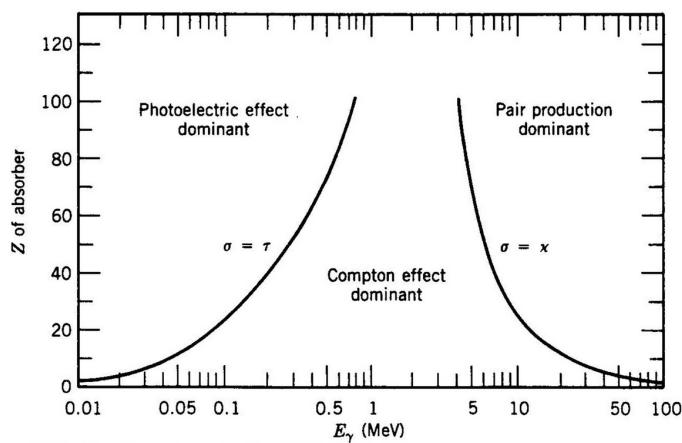


Figura 2.1: Valori dell'energia del fotone e del numero atomico tali per cui si ha la stessa sezione d'urto per effetto photoelettrico ed effetto Compton ( $\sigma = \tau$ ) e i valori per cui si ha la stessa sezione d'urto per effetto Compton e produzione di coppia ( $\sigma = \chi$ ).

In tutti e tre i processi vengono prodotte particelle cariche facilmente rilevabili; si vede quindi che la misura dei fotoni è possibile attraverso l'osservazione delle particelle secondarie prodotte. Grazie a questi tre processi fisici è possibile quindi ricostruire il fotone.

Tipicamente, per poter permettere l'interazione dei fotoni è necessario che i rilevatori abbiano degli elementi passivi, convertitori, con un grande numero atomico ( $Z$ ) per consentire l'interazione della radiazione e degli elementi attivi, tracker al silicio, Time Projection Chamber a gas e fibre scintillanti, che permettono l'osservazione delle particelle secondarie.

Tornando a parlare della sezione d'urto, questa rappresenta una quantità collegata a un processo e alla sua probabilità di avvenire; in questo caso si parla della probabilità di un fotone di interagire con la materia. Possiamo calcolare la probabilità che avvenga un processo definendo  $\sigma$  come la sezione d'urto,  $N_b$  il numero di particelle bersaglio in cui va incontro e  $S$  la superficie in cui sono distribuiti. La probabilità è data dal rapporto della superficie "efficace", cioè quella in cui sono presenti le particelle bersaglio e la superficie totale, cioè da:

$$p = \frac{N_b \sigma}{S} = \frac{\sigma \rho_b S d}{S} = \sigma \rho_b d$$

Si vede che la probabilità di interazione aumenta con la distanza percorsa all'interno del materiale ( $d$ ) e con la densità atomica dello stesso ( $\rho_t$ ).

I processi coinvolti sono tutti di tipo elettromagnetico è quindi naturale aspettarsi che le sezioni d'urto dipendano anche dal numero atomico del convertitore.

Possiamo valutare anche l'intensità del flusso di fotoni che attraversa un materiale: questa ha un andamento esponenziale decrescente

$$I = I_0 e^{-\sigma \rho_t d} = I_0 e^{-\mu d}$$

dove  $I_0$  rappresenta il flusso iniziale, mentre  $\mu$  è detto coefficiente di attenuazione e varia in base al contributo dei processi di interazione tra i fotoni e la materia come  $\mu = \mu_{ph} + \mu_C + \mu_{pp}$ , in cui  $\mu_{ph}$  è riferito all'effetto fotoelettrico,  $\mu_C$  è riferito all'effetto Compton e  $\mu_{pp}$  è riferito alla produzione di coppie. Ogni processo non dipende dagli altri e può essere osservato singolarmente.

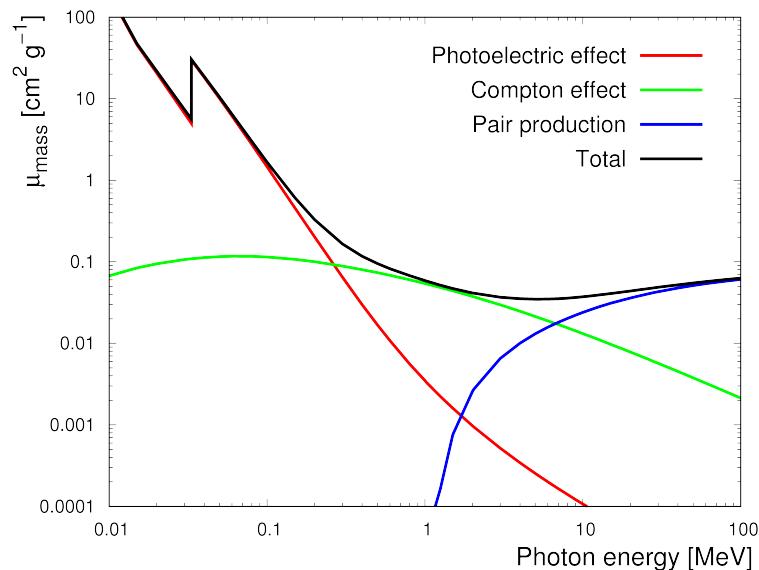


Figura 2.2: Andamenti delle sezioni d'urto dei processi di interazione. Notiamo che per diverse energie i processi dominanti sono ben definiti: per energie minori di 50 keV si ha l'effetto fotoelettrico, tra 100 keV e i 10 MeV è l'effetto Compton e infine per energie maggiori di 10 MeV è la produzione di coppia.

### 2.1.1 Effetto fotoelettrico

Per i fotoni con poca energia (<50 keV) il processo dominante è quello dell'effetto fotoelettrico, mentre diventa ampiamente trascurabile per fotoni con energie di qualche decina di keV. In questo processo il fotone viene assorbito dal materiale liberando un elettrone da un legame atomico. Possiamo valutare

l'energia cinetica definendo  $\nu$  come frequenza del fotone incidente e  $E_n$  l'energia di legame del n-esimo livello dove si trova l'elettrone, l'energia cinetica sarà data da:

$$K = h\nu - E_n$$

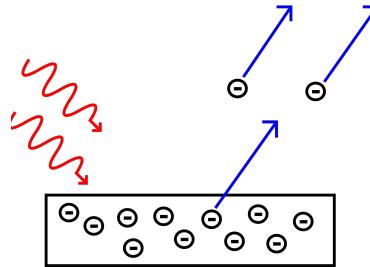


Figura 2.3: Illustrazione dell'effetto fotoelettrico. Il fotone incidendo sul materiale viene assorbito e un elettrone viene liberato.

Misurando l'energia dell'elettrone si può riconoscere il fotone. Con la rimozione dell'elettrone si crea una lacuna che può determinare transizioni elettroniche dai livelli superiori che andranno a emettere raggi X caratteristici del materiale, occasionalmente questi andranno a essere assorbiti liberando elettroni facenti parte del materiale, questo fenomeno viene chiamato effetto Auger.

Se l'energia del fotone gamma è poco più elevata di quella di legame, l'elettrone viene emesso in maniera ortogonale rispetto alla direzione di propagazione del fotone e, solitamente, nella direzione del campo elettrico. Per energie più elevate l'angolo di scattering diventa meno ampio, ma viene comunque mantenuta la distribuzione polarizzata lungo il campo elettrico, questa proprietà ci consente di compiere osservazioni polarimetriche riconoscendo fotoni sia polarizzati che non polarizzati.

Per l'effetto fotoelettrico abbiamo due casi in cui possiamo valutare la sezione d'urto: nel range  $I_0 < E < m_e c^2$  abbiamo l'andamento

$$\sigma_{ph} = \alpha \pi a_B Z^5 \left( \frac{I_0}{E_\gamma} \right)^{\frac{7}{2}}$$

per  $E > m_e c^2$  abbiamo

$$\sigma_{ph} = 2\pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 \frac{(mc)^2}{E_\gamma}$$

Si nota quindi come a basse energie l'interazione sia più elevata grazie al termine  $E^{-\frac{7}{2}}$  e in materiali con numero atomico alto grazie al termine  $Z^5$ .

### 2.1.2 Effetto Compton

Per le energie comprese tra i 100 keV e 10 MeV lo scattering Compton è il processo più efficiente: questo scattering prevede un urto elastico tra un fotone e un elettrone in cui il primo trasferisce parte della sua energia al secondo e viene deviato come un urto non relativistico.

Imponendo la conservazione del quadrimpulso, e considerando la velocità iniziale dell'elettrone come nulla si ricava la legge dell'effetto Compton:

$$\frac{1}{E_f} - \frac{1}{E_i} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \iff \Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

Per ogni valore dell'angolo  $\theta$  si ha sempre  $\cos\theta \leq 1$  e quindi si ha sempre  $\Delta\lambda \geq 0$  ovvero il fotone cederà sempre parte della propria energia ma nel caso di elettroni relativistici la situazione è leggermente diversa. In questo caso si può avere un fenomeno chiamato effetto Compton Inverso: nel caso di elettroni con velocità relativistiche, comuni nei raggi cosmici, la legge citata non è più lecita e i fotoni possono assorbire energia dagli elettroni fino ad arrivare allo spettro energetico della radiazione gamma.

L'energia trasferita dipenderà dall'angolo di scattering, un caso particolare è rappresentato da  $\theta = 0^\circ$  in cui non viene fatto scattering e l'energia non varia, all'aumentare dell'angolo  $\theta$  aumenterà anche l'energia fino ad arrivare ad un massimo presso  $\theta = 180^\circ$ , in questo caso abbiamo

$$\Delta E_{max} = E_i \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{2E_i}{m_e c^2}} \right)$$

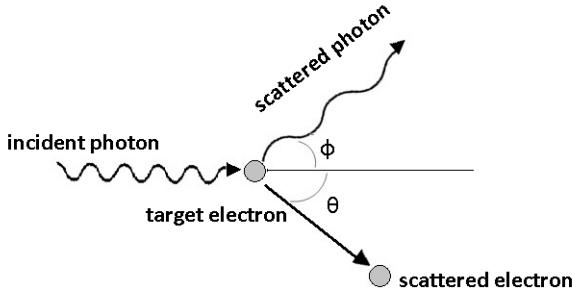


Figura 2.4: Illustrazione dell'effetto compton: il fotone urtando l'elettrone fa sì che quest'ultimo abbia assorbito parte dell'energia del fotone e che venga rilasciato con un angolo  $\theta$ . Invece il fotone perde parte della sua energia e viene deviato con un angolo  $\phi$

### 2.1.3 Produzione di coppia

Al di sopra dei 10 MeV il processo dominante risulta essere la produzione di coppia: il fotone interagendo con un nucleo può decadere generando una coppia elettrone-positrone ed essendo queste due particelle caricate possono essere facilmente osservate. Misurando energia e direzione possiamo conoscere il momento utilizzando la relazione di mass-shell

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} - m^2 c^2$$

Richiedendo la conservazione del momento si ricava l'energia e la direzione del fotone. Questo processo non può avvenire nel vuoto a causa del termine di massa che sparisce nel processo e quindi è impossibile per un fotone conservare correttamente il quadrimpulso. Parte del momento iniziale del fotone viene trasferito al nucleo rendendo possibile il decadimento, questo effetto di rinculo genera un limite cinematico non eliminabile all'accuratezza con cui si può ricostruire il momento iniziale del fotone. Possiamo valutare il momento

$$p_\gamma = p^+ + p^- + p_r$$

Nel quale  $p_r$  indica il momento trasferito dal fotone al nucleo che risulta essere non osservabile o prevedile. Occasionalmente la produzione di coppia avviene attraverso l'interazione del fotone con un elettrone che compone il materiale, in questo caso, visto che la massa dell'elettrone è molto più piccola della massa di un nucleo, il rinculo sarà molto più forte. In questo caso di parla di produzione di tripletto in quanto dopo l'urto si osservano tre particelle cariche prodotte.

La distinzione tra elettrone e positrone avviene grazie alla presenza di un campo magnetico: nel caso di positroni avremo che la particella seguirà una traiettoria antioraria mentre nel caso di elettroni la particella seguirà una traiettoria oraria.

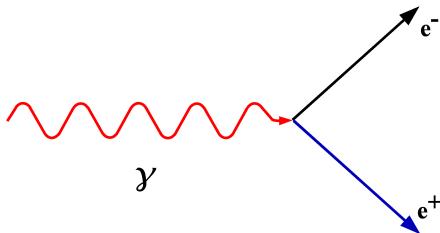


Figura 2.5: Illustrazione della produzione di coppia.

## 2.2 Tecnologie di rivelazione

### 2.2.1 Rivelatori al silicio

Il silicio è un materiale semiconduttore che gode di un dislivello energetico tra banda di valenza e banda di conduzione dell'ordine di 1.1 eV, una particella carica con una elevata energia che attraversa il materiale fa sì che una piccola parte della propria energia sia trasferita agli elettroni che dalla banda di valenza saranno promossi alla banda di conduzione lasciando una lacuna. In media sono sufficienti all'incirca 3.6 eV per formare una coppia elettrone-lacuna, se è presente una differenza di potenziale si genererà una corrente nel momento in cui viene prodotta una coppia. Sfortunatamente a temperatura ambiente il numero di elettroni che compiono un salto in maniera spontanea è molto elevato rendendo quindi impossibile distinguere il segnale dal rumore.

Per risolvere questo problema, e aumentare quindi l'efficienza della misura, è possibile drogare opportunamente il silicio in due modi:

- drogaggio  $n$ , è rappresentato dalla diffusione di atomi pentavalenti provenienti dal gruppo chimico seguente del silicio, tra i più utilizzati sono presenti fosforo, arsenico e antimonio, grazie a ciò si avrà un'eccedenza di elettroni rispetto alle lacune;
- drogaggio  $p$ , il silicio viene drogato con atomi trivalenti provenienti dal gruppo chimico antecedente al silicio ottenendo così un'eccedenza di lacune rispetto agli elettroni di conduzione, in questo caso gli elementi più utilizzati sono boro e alluminio.

L'unione dei silici drogati in maniera differente avrà come risultato una giunzione  $p - n$  la quale avrà di uno spostamento di elettroni verso la zona  $n$  e uno spostamento delle lacune nella zona  $p$ , creando così una zona centrale chiamata regione di svuotamento. La larghezza di questa zona è determinata dallo spostamento delle cariche che genera una differenza di potenziale, tuttavia la regione di svuotamento è estendibile applicando una differenza di potenziale esterna in modo da stimolare lo spostamento delle cariche e delle lacune. Con questa configurazione si ha che il passaggio di una particella con elevata energia nella regione di svuotamento genera una corrente molto più elevata del rumore termico. Le tecnologie moderne prevedono che oltre a rivelare il passaggio della particella venga anche definita la posizione del passaggio con un'alta precisione.

Queste proprietà del silicio si traducono in rivelatori a microstrip a faccia singola (Single Sided Silicon Strip Detector, SSSD) i quali sfruttano una struttura di silicio con drogaggio  $n$  la quale viene ricoperta da strisce di silicio con drogaggio  $p$ , alla base della superficie drogata  $n$  e su ogni striscia è presente una giuntura in alluminio e un amplificatore di corrente per consentire la valutazione del segnale. Se l'apparato viene mantenuto sotto polarizzazione inversa la particella che attraversa la regione di svuotamento indurrà un passaggio di corrente nelle strip vicine e consentirà di conoscere la posizione dove la particella è passata. Grazie all'accensione delle due strip e al fatto che l'intensità di corrente è direttamente proporzionale alla distanza della zona nella quale ha transitato la particella, è possibile definire un baricentro di carica: questo consente di ottenere risoluzioni dell'ordine dei  $\mu\text{m}$  anche con pitch dell'ordine di 100  $\mu\text{m}$ . Un sistema che consente di conoscere due coordinate spaziali della particella che ha colpito è offerto dai rivelatori a doppia faccia (Double Sided Silicon Strip Detector, DSSD) i quali godono di un'ulteriore faccia ricoperta da strip, con drogaggio  $n^+$  ortogonali alle strisce  $p$ . Un'altra tecnica che consente di evitare la complessità tecnologica di un DSSD, al prezzo di avere un rivelatore con il doppio del materiale, è quella di incollare due rivelatori SSSD in modo che le due strip  $p$  siano ortogonali fra loro.

### 2.2.2 LGAD

Passiamo ora alla tecnologia usata da SLA: i silici LGAD. Questa tecnologia consente di avere un buon rapporto segnale/rumore anche con strati abbastanza sottili di silicio: un layer LGAD da 150  $\mu\text{m}$  ha  $\sim 4$  volte il segnale di un sensore da 400  $\mu\text{m}$  utilizzato nel tracker di Fermi-LAT. Il gruppo di PANGU prevede che utilizzando dei silici con spessore pari a 150  $\mu\text{m}$  si dovrebbe avere un miglioramento della PSF di un fattore di 4 o 5 volte a basse energie. L'utilizzo della tecnologia LGAD potrebbe consentire di avere la PSF prevista per PANGU senza la perdita di segnale (con la conseguente diminuzione del rapporto Segnale/Rumore, S/N, nell'elettronica di *Front End*). La risoluzione spaziale che si punta ad ottenere dagli LGAD si aggira attorno a 15  $\mu\text{m}$  mentre per la risoluzione temporale si vorrebbe ottenere si trova attorno a 100 ps.

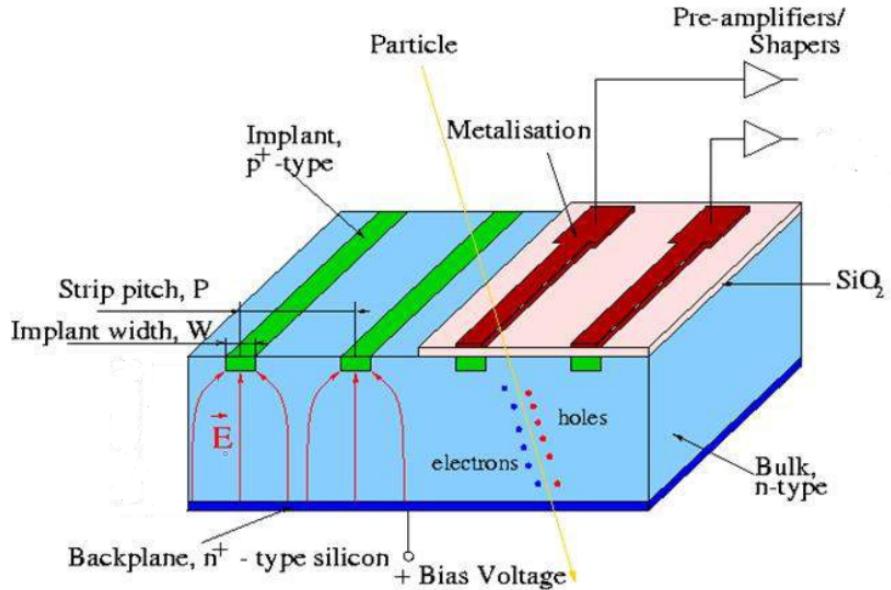


Figura 2.6: Schema di un SSSD

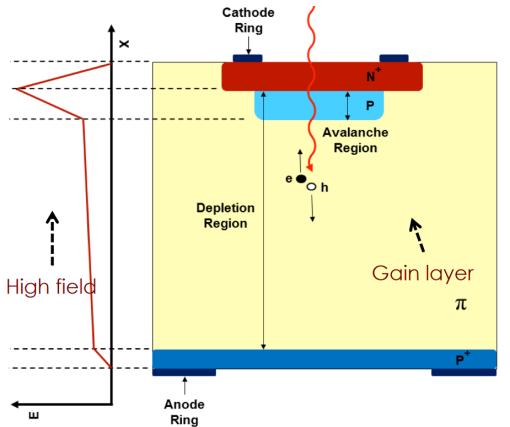


Figura 2.7: Schema di un LGAD.

### 2.2.3 Scintillatore

Gli scintillatori sono materiali la cui peculiarità è quella di emettere nello spettro ottico o dell'ultravioletto nel momento in cui sono penetrati da particelle con una certa energia, il passaggio della particella eccita gli elettroni che compongono lo scintillatore emettendo luce osservabile. Per via di questo funzionamento è necessario che lo scintillatore sia composto da un materiale trasparente alla lunghezza d'onda della radiazione emessa e che i tempi di dis-eccitazione siano estremamente limitati. I materiali con queste proprietà sono determinanti per i calorimetri elettromagnetici: all'interno di quest'ultimi le particelle creano uno sciame ed emissioni di bremsstrahlung causando un'elevata scintillazione. Misurando l'energia emessa da questo sciame è possibile risalire all'energia della particella accuratamente.

È possibile utilizzare i materiali scintillanti come fibra scintillante: utilizzando un materiale di questo tipo come base di una fibra ottica si ottiene un dispositivo in grado di segnalare il passaggio di una particella energetica. Grazie a questo è possibile arrangiare un sistema simile ai rivelatori al silicio.

## 2.3 Misure di tempo

Un silicon tracker reso in grado di compiere misure temporali godrebbe dei seguenti miglioramenti:

- valutazione delle ghost hits;
- identificazione delle particelle di backscattering del calorimetro;
- osservazione di elettroni e protoni;

Considerando due particelle che attraversano un layer  $X - Y$ , esiste la possibilità che entrambe attivino due strip distinte ciascuno: in totale si ha l'accensione di quattro strip. Nella situazione appena descritta abbiamo che le posizioni possibili sono date dall'intersezione delle strip accese, grazie ad una misura temporale è possibile distinguere univocamente le particelle effettivamente passate dalle ghost hits.

Grazie alla misura temporale è possibile distinguere le particelle di backsplash: le particelle secondarie prodotte dallo sciame hanno velocità molto minore da quelle primarie, impostando un adeguato scarto temporale è possibile distinguere le particelle secondarie dalle particelle primarie.

Infine una misura di tempo è utile a discriminare gli elettroni dai protoni: i prodotti secondari di queste due particelle godono di un'evoluzione temporale definita, studiando i prodotti è possibile risalire alle due particelle di partenza.

## 2.4 Rivelatori di particelle

### 2.4.1 Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT)

Fermi-LAT [1] è un rivelatore di radiazione gamma creato dalla NASA in collaborazione con le agenzie spaziali presenti in Francia, Italia, Giappone e Svezia, è formato da due componenti principali:

- il Gamma-Ray Burst Monitor (GBM), per l'osservazione di fenomeni transienti ad energie più basse che vanno da 8 keV fino a 40 MeV.
- il Large Area Telescope (LAT) è un telescopio sensibile alla radiazione gamma che si basa sul principio di produzione di coppia con energia compresa tra 20 MeV e 300 GeV;

IL GBM è costituito da dodici di rivelatori a ioduro di sodio sensibili alla radiazione gamma fino a 1 MeV e da due rivelatori al germanato di bismuto (BGO) in grado di osservare lampi gamma con un'energia attorno a 150 keV.

Il LAT è composto da un array 4x4 di moduli identici, ogni modulo ha un'area di 40x40 cm<sup>2</sup> comprendente un tracker e un calorimetro di ioduro di cesio (CsI). Tutta la struttura è rivestita da uno schermo anti-coincidenza che osserva particelle cariche provenienti dall'esterno, questo è necessario per escludere misurazioni che non derivano da decadimento di fotoni e che rappresenterebbero rumore di fondo per le misure effettuate.

All'interno del tracciatore abbiamo strati di tungsteno, inserito materiale passivo necessario a spingere i fotoni alla conversione, e layer composti da microstrip di silicio a doppia faccia, questo per rilevare in maniera accurata il passaggio delle coppie generate; questo ci consente di ricavare le traiettorie che segue la coppia e quindi risalire a quella del fotone.

Proseguendo nel loro moto le particelle il calorimetro elettromagnetico, all'interno di quest'ultimo le particelle inizieranno, per via di fenomeni come bremsstrahlung e produzione di coppie, a fare uno sciame che porteranno ad assorbire completamente l'energia delle particelle entrate. Osservando l'intensità della scintillazione è possibile ricavare l'energia iniziale del fotone; sommando vettorialmente l'impulso delle particelle in entrata si ricava la direzione di provenienza del fotone.

Nell'eventualità che il fotone non converta all'interno del tracciatore, questo potrà comunque essere assorbito dal calorimetro ma l'osservazione della direzione sarà imprecisa.

Le limitazioni di questo rivelatore risultano evidenti nel caso di fotoni a bassa energia: nel momento in cui questi entrano nel tracciatore si hanno fenomeni di scattering multiplo coulombiano all'interno del tungsteno e del silicio, questo fenomeno diventa particolarmente accentuato con particelle con un basso impulso. Pertanto l'accuratezza con cui viene individuata la direzione dei raggi incidenti, detta risoluzione angolare, risulta essere insoddisfacente.

Lo scattering multiplo può essere arginato considerando le osservazioni solamente dei primi due layer dalla conversione ma la presenza di tungsteno prevede che siano presenti zone dove lo scattering sia molto elevato rendendo di fatto le misure inaffidabili.

Fermi ha una risoluzione angolare intorno a 0.15° per energie maggiori di 10 GeV mentre risulta essere maggiore di 3.5° per energie minori di 100 MeV [1]. Vediamo dunque come Fermi sia limitato, in risoluzione angolare, nel sub-GeV.



Figura 2.8: Foto di Fermi-LAT

#### 2.4.2 e-ASTROGAM

Il rivelatore e-ASTROGAM [7] ha lo scopo di misurare la radiazione gamma per energie da 0.3 MeV a 3 GeV utilizzando un tracciatore in silicio in grado di registrare le interazioni Compton e la produzione di coppie indotte da raggi gamma, ed è formato da tre parti principali:

- tracker in silicio basato sulla tecnologia dei rivelatori a doppia faccia;
- calorimetro composto da 33856 barre di ioduro di cesio;
- sistema anticoincidenza che ricopre le due parti precedenti;

Il tracker, posto in cima, un rivelatore a doppia faccia come quello di Fermi, con la differenza che le parti passive, ovvero il tungsteno, sono rimosse per diminuire lo scattering multiplo ed ottenere valori più accurati della risoluzione angolare, ma perdendo in efficienza.

Posto sotto al tracker abbiamo un calorimetro la cui funzione è quella di valutare l'energia e la posizione delle particelle incidenti.

Sia il tracker che il calorimetro sono ricoperti da un sistema anticoincidenza il quale è composto da uno scintillatore e un Time of Flight per selezionare al meglio le particelle esterne.

Come avevamo visto precedentemente l'effetto Compton si ha quando un fotone urta un elettrone, l'elettrone viene deviato creando un segnale misurabile. Dopo lo scattering Compton il fotone viene assorbito dal calorimetro che ne misura l'energia  $E_2$  e ne osserva la direzione di scattering, se l'energia in entrata era minore di 1 MeV possiamo misurare l'energia depositata sul silicio ma non la direzione di scattering. Grazie alle osservazioni raccolte è possibile identificare una corona circolare da cui il fotone proviene

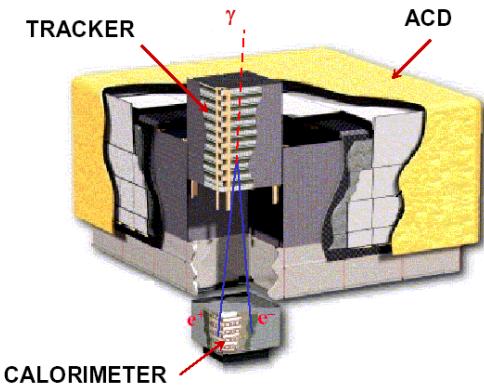


Figura 2.9: Spaccato del LAT che evidenzia i componenti essenziali.

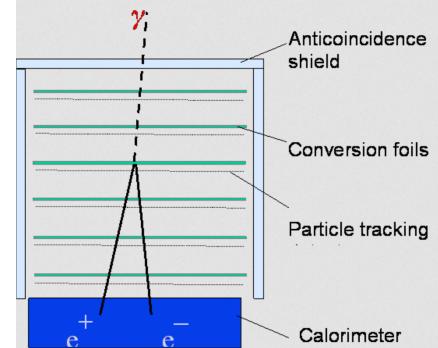


Figura 2.10: Schematizzazione del funzionamento del tracker.

grazie all'angolo  $\theta$  della legge dello scattering Compton:

$$\cos \theta = \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}$$

Se però l'elettrone ha energia più alta di 1 MeV è possibile individuare la direzione e identificare un arco anziché un cerchio con lunghezza e spessore dipendenti dall'incertezza sulla direzione dello scattering e dalla misura dell'energia.

Per quanto riguarda la produzione di coppia, il meccanismo è analogo a quello di Fermi.

La Point Spread Function di e-ASTROGAM è all'incirca quattro volte più precisa di quella di Fermi per l'osservazione di produzioni di coppia e, analogamente anche di quella di COMPTEL nel caso di osservazione tramite scattering Compton.

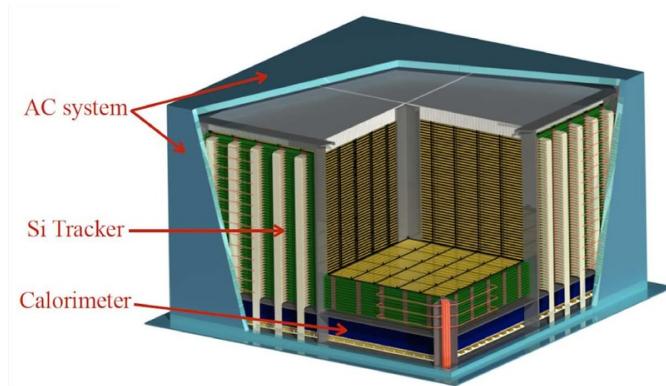


Figura 2.11: Spaccato del rivelatore che pone in evidenza i tre componenti essenziali.

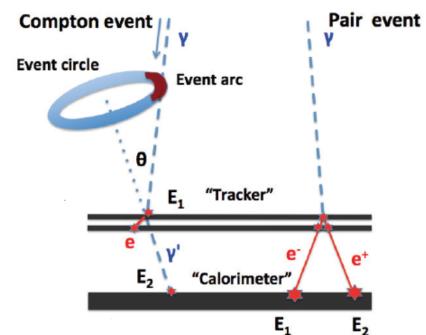


Figura 2.12: Schematizzazione di un evento Compton e di una produzione di coppia.

### 2.4.3 Advanced Energetic Pair Telescope (AdEPT)

AdEPT [8] è un rivelatore che ha l'obiettivo di espandere le misure nel sub-GeV, riducendo il multiple scattering utilizzando un rivelatore a gas che permetta anche di tracciare le traiettorie con buona accuratezza. Inoltre AdEPT rimuove le componenti passive ed estende i componenti attivi uniformemente sul volume del rivelatore.

AdEPT si basa su di una TPC a gas con una struttura composta a due dimensioni composta da micro pozzi (MWD) alla base, all'interno della TPC è presente un mix di gas nobili costretti a stare dentro

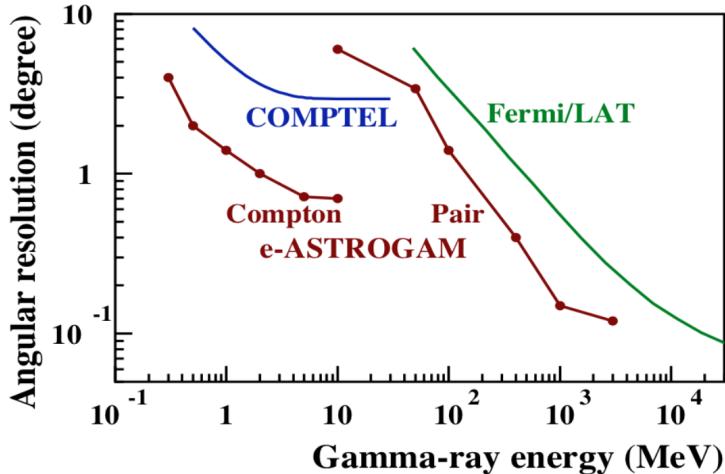


Figura 2.13: In figura sono mostrate le risoluzioni angolari di e-ASTROGAM per quanto riguardo lo scattering Compton e la produzioni di coppia. Sono presenti anche le sensibilità di COMPTEL e Fermi-LAT per confronto.

alla camera grazie ad un campo elettrico con orientamento rivolto alla base superiore della camera. Nel momento in cui un fotone gamma entra nella camera l'interazione con il gas farà sì che si creino elettrone e positrone ad alte energie, le particelle ionizzeranno gli atomi dei gas nel loro moto liberando elettroni che saranno indotti dal campo fino alla base dell'apparato e ai MWD.

I micro pozzi sono posti in maniera tale da creare un piano cartesiano ponendo due sequenze distinte di anodi e catodi posti in maniera perpendicolare tra di loro. I catodi hanno anche dei fori per in maniera tale da far entrare gli elettroni di ionizzazione nel micro pozzo, all'interno del foro il campo elettrico è così intenso da far avvenire una valanga Townsend nel momento in cui entra l'elettrone, questo farà sì che si creerà una corrente tra anodo e catodo consentendo di individuare la posizione sul piano cartesiano dell'evento. Valutando le letture di tutti i pozzi si può risalire alla proiezione bidimensionale della traiettoria che hanno seguito elettrone e protone. È possibile estrapolare anche la misura della posizione lungo  $z$  rendendo temporizzata la lettura dei segnali dal MWD: valutando come la velocità di drift degli elettroni ionizzati all'interno della camera a proiezione temporale varia con l'intensità del campo elettrico come  $v_d = \mu * E$  ( $\mu$  rappresenta la mobilità elettrica). A questo punto è possibile ricavare  $\delta z$  misurando la differenza temporale  $\delta t$  tra i segnali registrati:  $\delta z = v_d \delta t$ , così conosciamo la traiettoria di elettrone e protone in tutte le dimensioni.

Il pitch dei micro pozzi, quindi del piano  $x - y$ , è di  $400 \mu\text{m}$  nel concept attuale, pertanto la risoluzione spaziale sembra sia essere più scarsa di Fermi-LAT il cui pitch è di  $228 \mu\text{m}$ ; per quanto riguarda la risoluzione dell'asse  $z$  questa è determinata dalla frequenza con cui vengono campionati i segnali e anche dalla velocità di drift degli elettroni di ionizzazione. Per far sì che la risoluzione sull'asse sia confrontabile con quella dell'MWD occorre che la frequenza di campionamento si aggiri intorno ai  $225 \text{ kHz}$ .

L'esperimento sta ancora essendo sviluppato. Dalle simulazioni però ci si aspetta una risoluzione angolare di  $0.6^\circ$  a  $70 \text{ MeV}$  e si prevede che il tracciatore consenta di risalire all'energia delle particelle tramite lo scattering multiplo, con energie maggiori di  $1 \text{ MeV}$ , ma si prevede anche di avere errori più bassi del 15% solamente per energie maggiori di  $10 \text{ MeV}$ .

Alcuni problemi di questo esperimento sono rappresentati dalla necessità di creare una struttura di grandi dimensioni in grado di far sì che il gas sia costantemente sotto pressione nello spazio, questo senza nessuna perdita.

#### 2.4.4 PAir-productioN Gamma-ray Unit (PANGU)

PANGU [9] è un esperimento per l'osservazione della radiazione spaziale gamma nella fascia energetica compresa tra  $10 \text{ MeV}$  e  $1 \text{ GeV}$ . Nel caso di Fermi si aveva un set di componenti che si alternano tra componenti passive e attive, nel caso di PANGU vengono eliminate tutte le componenti passive e viene cercato di contenere il più possibile lo spessore delle componenti attive. L'eliminazione delle componenti passive porta ad una riduzione del fenomeno dello scattering multiplo, facendo sì che la conversione dei

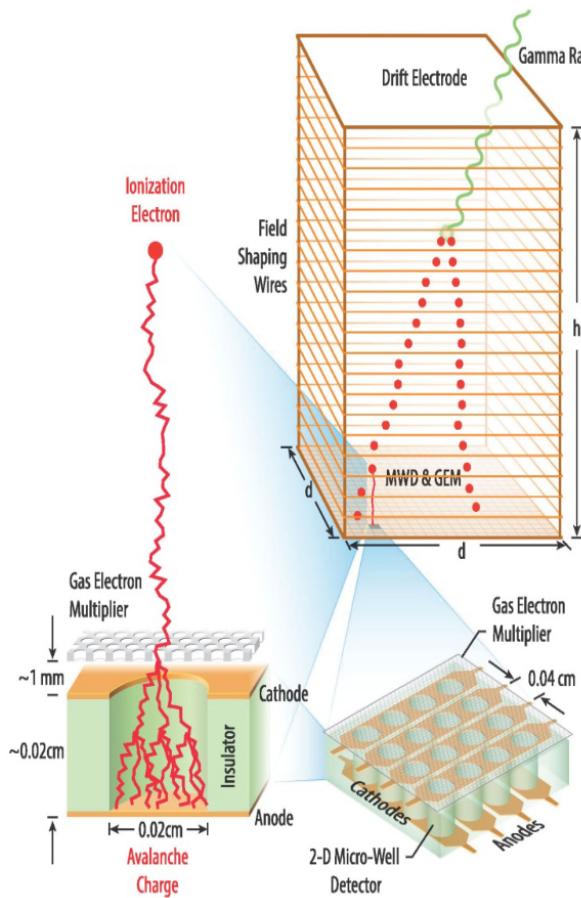


Figura 2.14: Struttura e meccanismo delle Time Projection Chamber dei micro pozzi di AdEPT.

fotoni possa avvenire solamente all'interno delle componenti attive. Inoltre, si desidera mantenere la massa dell'apparato minore di 100 Kg per far sì che il progetto sia il più versatile possibile.

Per la costruzione di tracciatore sono state avanzate due proposte:

- tracker a fibre scintillanti (FiT), sistema con un costo relativamente minore rispetto all'alternativa e potenzialmente pionieristico per missioni future;
- tracker a strip di silicio, sistema ampiamente utilizzato.

In questo caso la prima soluzione, detta PANGU-Fi sembra essere la migliore per via del costo minore, il peso contenuto e le buone prestazioni, la seconda soluzione sembra però essere quella più velocemente realizzabile.

Per quanto riguarda la misura di energia, tipicamente vengono utilizzati calorimetri elettromagnetici ma in questo caso il peso è un fattore determinante per l'esperimento e quindi non sembra essere una soluzione ideale. Per ovviare a questa problematica è stato proposto l'utilizzo di uno spettrometro magnetico che però ha la problematica di avere una risoluzione energetica che risulta essere esigua: intorno al 30% con un'energia pari a 100 MeV. Sfortunatamente anche utilizzando un calorimetro di massa minore si avrebbero comunque perdite sulla risoluzione energetica, un esempio viene rappresentato dall'esperimento AGILE il quale ha un calorimetro da 30 Kg che ha risoluzione che si aggira intorno al 70% per fotoni con energia pari a 100 MeV.

Infine si ha un sistema anti coincidenza che ricopre la struttura, viene aggiunto per filtrare eventuale rumore esterno.

Le simulazioni sono state realizzate valutando 50 strati di fibre nel piano  $x - y$  posti a 6 mm di distanza ottenendo un tracker con dimensioni  $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$ , lo spettrometro magnetico è stato valutato con un diametro di 25 cm, una profondità di 5 cm e un campo magnetico con intensità pari a 0.1 T e vengono

infine posti due layer traccianti. Con queste specifiche si è ottenuta una risoluzione angolare inferiore a  $1^\circ$  con un'energia pari a 100 MeV. Per quanto riguarda la risoluzione energetica, risulta essere  $\leq 30\%$ .

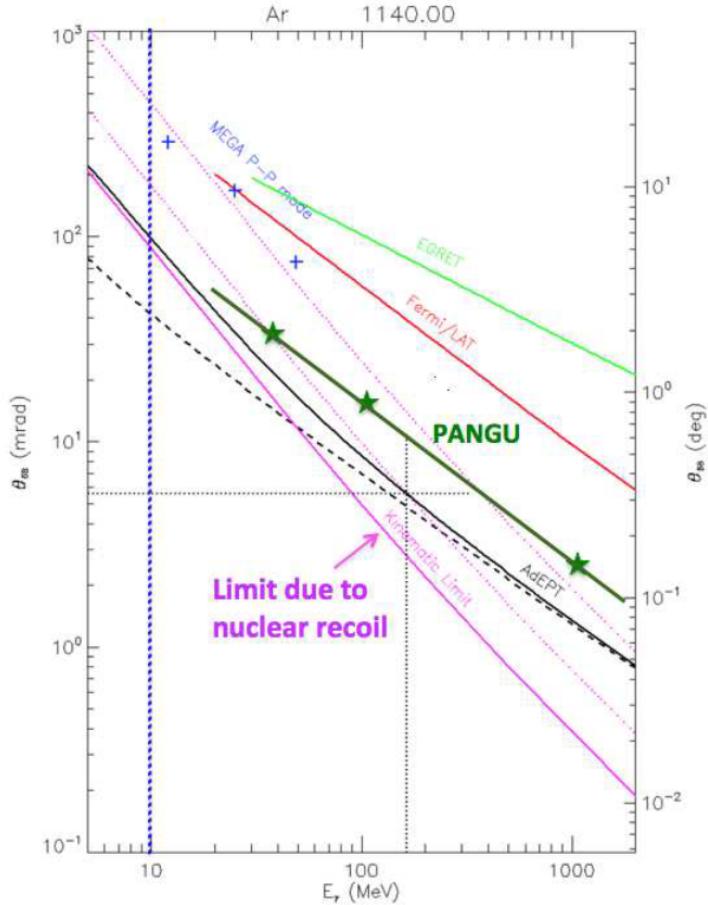


Figura 2.15: Risoluzione angolare in funzione dell'energia per PANGU, in verde scuro, Fermi-LAT, in rosso e AdEPT, in nero. La linea magenta continua delimita il limite cinematico per via del rinculo nucleare, le linee tratteggiate rappresentano il suo doppio e quintuplo.

# Capitolo 3

## SLA (Space LGAD Astroparticle)

In questo capitolo vedremo i dettagli del progetto SLA, discuteremo della geometria, degli obiettivi che si propone il progetto e dei risultati ottenuti dalla simulazione MonteCarlo interamente sviluppata all'interno di questo lavoro di tesi.

### 3.1 Geometria

Il progetto dello strumento è basato sulla necessità di dover essere a bordo di un CubeSat, quindi con limiti sul peso, sul volume e sul power budget a disposizione. SLA è inserito in un CubeSat 3U ( $30 \times 10 \times 10$  cm $^3$ ) nel quale vengono occupate due unità dallo strumento e un'unità dall'elettronica.

Il design di SLA prevede che a monte della struttura siano presenti 40 layer spessi  $150\ \mu\text{m}$  di LGAD SiMS (Si-Microstrip) con un readout pitch di  $150\ \mu\text{m}$  e un implant pitch di  $50\ \mu\text{m}$ . I 40 layer sono disposti in una lunghezza di 6.5 cm.

Posto a valle a 10 cm di distanza dal tracker abbiamo un calorimetro composto da un array di cubi  $3 \times 3 \times 3$  cm $^3$ . Il materiale del calorimetro è il LYSO (ortosilicato di lutezio-ittrio). L'intero detector è poi ricoperto da un materiale scintillatore che funge vetro/ToF spesso 0.5 cm. Un ulteriore strato di scintillatore è posto di fronte al calorimetro. LYSO e scintillatore plastico sono letti con dei Silicon PhotoMultiplier, SiPM.

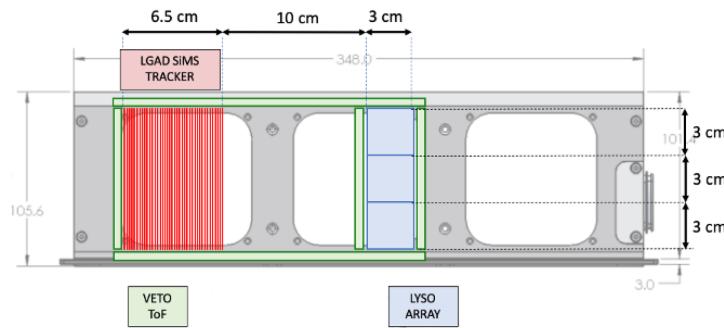


Figura 3.1: Vista dall'alto di SLA. Uno strato di scintillatore plastico dovrebbe coprire i rivelatori al silicio e i cubi di LYSO del calorimetro ma è stato tolto per chiarezza. Il disegno del rivelatore è sovrapposto ad un disegno tecnico di una struttura meccanica di un CubeSat 3U.

### 3.2 Obiettivi

Come già accennato, gli obiettivi sono dimostrare l'efficienza di PANGU ma soprattutto quello di dimostrare l'utilità dei sensori LGAD SiMS nell'ambiente spaziale. Verrà anche mostrato che le performance degli LGAD saranno adatte per la prossima generazione di esperimenti astro-particellari ottenendo dati su:

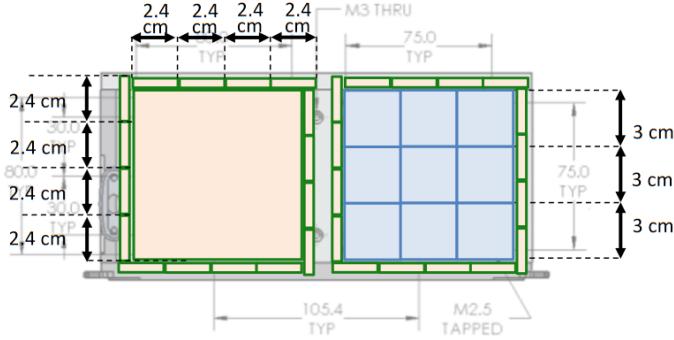


Figura 3.2: Vista da davanti (sinistra) e da dietro (destra) di SLA. Uno strato di scintillatore plastico dovrebbe coprire i cubi di LYSO del calorimetro nella vista da dietro, ma è stato tolto per chiarezza. Il disegno del rivelatore è sovrapposto ad un disegno tecnico di una struttura meccanica di un CubeSat 3U.

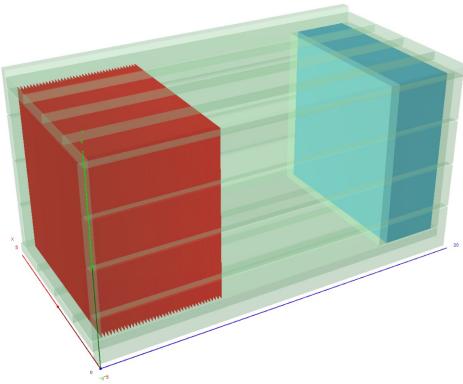


Figura 3.3: Visione tridimensionale della geometria Geant4 del rivelatore SLA.

- misure con fotoni che convertono a energie maggiori di 20 MeV nel tracker con la ricostruzione dell'angolo dato dalla coppia elettrone-positrone nel tracker con una migliorata ricostruzione del punto di interazione grazie all'identificazione delle hit di backsplash;
- osservazione dei fotoni con energia maggiore di 20 MeV dalla Nebulosa del Granchio per poter verificare mediante i dati della bontà della PSF del detector. Le osservazioni compiute nel range di energia compreso tra 20 e 50 MeV forniranno nuove informazioni in questo range energetico poiché non sono mai state compiute misure a queste energie provenienti dalla Nebulosa del Granchio. Queste misure consentiranno anche di confrontare osservazioni compiute da esperimenti scorsi come CGRO o EGRET;
- studio dei raggi cosmici usando il tracking 5D (posizione, deposito di energia e tempo) per caratterizzare, attraverso i dati, il ToF, l'efficacia del tracker e per monitorare i raggi cosmici di bassa energia (utile per misure di *Space Weather*).

### 3.3 Simulazione

Una valutazione quantitativa delle prestazioni del rivelatore è possibile solo considerando la sua geometria reale e andando a simulare tutti i processi fisici possibilmente coinvolti nel passaggio della particella attraverso i materiali dell'apparato e quelli coinvolti nei rivelatori utilizzati. Per fare questo è stato impiegato GGS (Generic Geant4 Simulation, [13]), un framework di simulazione basato su Geant4. L'utilizzo di Geant4 rappresenta lo standard, *de facto*, nella simulazione di apparati e rivelatori per la fisica delle particelle. Questo strumento software è in grado di riprodurre tutte le interazioni delle particelle con i materiali, in maniera realistica.

La simulazione di SLA ne definisce la sua geometria e i materiali utilizzati. In questa fase si sono andati a inserire, nella geometria, solamente i materiali principali che costituiscono i rivelatori. Sono stati trascurati i materiali che costituirebbero la struttura meccanica del CubeSat, eventuali elementi strutturali come viti, colle, nastri adesivi, etc... nonché le schede di elettronica e i cavi che necessariamente costituiranno il rivelatore reale.

Dopo aver creato la geometria è stato possibile simulare il comportamento del rivelatore se colpito da un flusso di particelle, in questo caso fotoni. Si è optato per 100mila fotoni gamma, “sparati” da 50 cm a monte del rivelatore, da una sorgente puntiforme con una divergenza di  $10^\circ$ . I fotoni generati avevano un’energia, monocromatica, pari a 0.5 GeV. In questa fase è stato simulato solamente il comportamento dei materiali del rivelatore senza alcuna simulazione dell’elettronica necessaria per estrarre un segnale elettrico dall’energia depositata dalle particelle, primarie e secondarie, nei volumi sensibili del rivelatore. L’unico rivelatore per il quale si è proceduto a similare, in maniera rozza ma quantitativamente ragionevole, è stato il tracciatore al silicio. Sono stati considerati “hit”, nel tracker, solo i depositi energetici nel silicio maggiori di 10 keV, valore noto dall’utilizzo di rivelatori al silicio analoghi in precedenti apparati. Nel prossimo capitolo verranno mostrati alcuni dei risultati ottenuti con la simulazione MonteCarlo.



# Capitolo 4

## Risultati

### 4.1 Risultati simulazione

Per la simulazione si è optato per un fascio di fotoni gamma da centomila fotoni. I sensori di silicio sono stati impostati in maniera tale da avere una soglia pari a 10 keV. Infine si è tenuto solamente conto della verità MonteCarlo senza simulare l'apparato reale.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti:

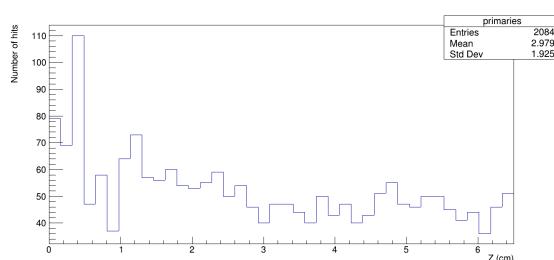


Figura 4.1: Distribuzione delle particelle primarie.

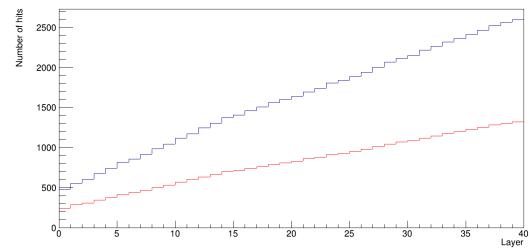


Figura 4.2: Distribuzione delle hit di elettronni e positroni.

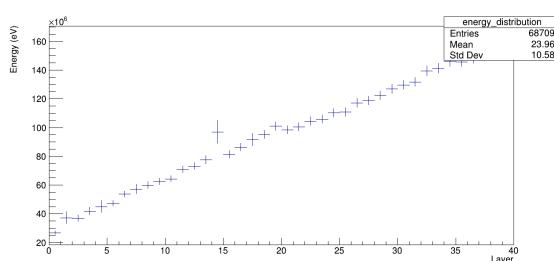


Figura 4.3: Distribuzione dell'energia.

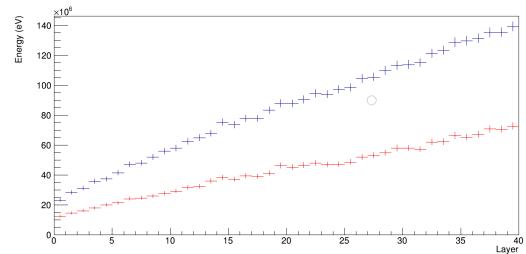


Figura 4.4: Distribuzione dell'energia di elettronni e positroni.

### 4.2 Valutazione teorica numero di conversioni

L'efficienza di conversione che avviene in un singolo layer segue la formula:

$$\varepsilon_{SL} = N_{int}/N_0 \sim 7/9 \rho \Delta x / X_0$$

in cui  $X_0$  rappresenta la lunghezza di radiazione, nel nostro caso vale  $21.82 \text{ g cm}^{-2}$  poiché il materiale che si sta utilizzando è il silicio,  $\rho$  rappresenta la densità, nel nostro caso vale  $21.82 \text{ g cm}^{-3}$  e  $\Delta x$  rappresenta lo spessore del layer, nel nostro caso vale  $150 \mu\text{m}$ .

Considerando un centomila fotoni gamma che hittano il tracker si trova che il numero di interazioni in un singolo layer ammonta a 125.

### 4.3 Analisi dati

Quanto emerge dal calcolo effettuato non trova riscontro nella simulazione in quanto sembra che in media nei layer ci siano la metà dei fotoni rispetto al risultato ottenuto. Quindi sembra che il conto teorico sovrastimi il numero di effettive conversioni che avvengono nel layer, questo è imputabile ad un'errata scelta della lunghezza di radiazione utilizzata: al variare dell'energia si avrà una conseguente variazione della sezione d'urto, questo comporterà una variazione nella lunghezza di radiazione.

Per quanto riguarda gli elettroni e i positroni sembra che il numero delle hit degli elettroni sia eccessivo e di conseguenza anche l'energia depositata.

Entrambi i casi andrebbero studiati per poter essere compresi e risolti.

# Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato possibile osservare le peculiarità dei fotoni gamma, i metodi e i processi che ne consentono la misura, gli strumenti atti a compiere rilevazioni sulla radiazione gamma già in uso e le varie possibilità per compiere osservazioni in zone energetiche non ancora esplorate essenziali per espandere la nostra conoscenza sull'astrofisica e sulla fisica di base.

Grazie a questo lavoro si è potuta realizzare la geometria Geant4 del rivelatore proposto all'interno del progetto SLA. Quindi si è proceduti a realizzare una simulazione MonteCarlo Geant4 in cui tutti i processi fisici di interazione delle particelle con la materia vengono considerati per una valutazione quantitativa delle prestazioni aspettate in fase di disegno del rivelatore.

Nonostante i risultati, da verificare con un'analisi dati che esulava dal tema e dalla tempistica di questo lavoro di tesi, e ottenuti senza aver realizzato anche un algoritmo realistico che simulasse anche l'elettronica di acquisizione vera e propria a bordo di SLA, la simulazione è un ottimo punto di partenza per il progetto. La simulazione sviluppata sarà utilizzata per affinare e migliorare la geometria del rivelatore e i primi risultati ottenuti per rendere ancora più realistica la simulazione stessa, verificando l'effettiva bontà dell'apparato SLA. Un miglioramento della simulazione renderà in grado di valutare una situazione vera e propria, come ad esempio la rilevazione di fotoni gamma con energia compresa tra 20 MeV e 50 MeV provenienti dalla Nebulosa del Granchio.

Se le simulazioni andranno a confermare una buona risoluzione di SLA, questo avrà due importanti risultati:

- si avrà l'ennesima conferma della bontà dell'approccio proposto nell'ambito del progetto PANGU. Una successiva conferma sperimentale, direttamente nell'ambiente spaziale come previsto nel progetto SLA, sarebbe di fortissimo stimolo per il finanziamento e la realizzazione di un progetto come PANGU.
- sarà di ulteriore stimolo verso l'utilizzo della tecnologia LGAD nell'ambiente spaziale. Una conferma, diretta nello spazio, delle prestazioni simulate e note dall'utilizzo agli acceleratori di particelle, oltre ad essere l'obiettivo principale del progetto SLA, sarà la conferma finale verso l'idea che questa tecnologia sia adatta per la prossima generazione degli esperimenti astro-particellari.



# Bibliografia

- [1] W. B. Atwood et al, The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-ray Space Telescope Mission, *The Astrophysical Journal* 697: 1071-1102, 2009
- [2] M. Tavani, et al, The AGILE Mission, *Astronomy & Astrophys* 502: 995-1013, 2009
- [3] C. Winkler et al, The INTEGRAL mission, *Astronomy & Astrophys* 411: L1-L6 (2003)
- [4] P. Blasi, The Origin of Galactic Cosmic Rays, *International Journal of Modern Physics D*, 23 (2014) 1430013
- [5] M. Ackermann, Detection of the Characteristic Pion-Decay Signature in Supernova Remnants, *Science Magazine*, 339.6121: 807-811, 2013
- [6] Gao, Yi-Tian et al, Large-Scale Anisotropy in the Extragalactic Gamma-Ray Background as a Probe for Cosmological Antimatter , *The Astrophysical Journal* 361 10.1086/185821, 1990
- [7] A. De Angelis et al, The e-ASTROGAM mission (exploring the extreme Universe with gamma rays in the MeV-GeV range), *Experimental Astronomy* 44 (2017) 25-82
- [8] S. D. Hunter et al, A Pair Production Telescope for Medium-Energy Gamma-Ray Polarimetry, *Astroparticle Physics* 59 (2014) 18-28
- [9] X. Wu et al, PANGU: A High Resolution Gamma-ray Space Telescope, arXiv:1407.0710, 2014
- [10] I. Cholis et al, Challenges in Explaining the Galactic Center Gamma-Ray Excess with Millisecond Pulsars, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 1506 (2015) 06, 043
- [11] R. Gambini, J. Pullin, Nonstandard optics from quantum spacetime, arXiv:gr-qc/9809038, 1999
- [12] H. Zhang, M. Boettcher, X-Ray and Gamma-Ray Polarization in Leptonic and Hadronic Jet Models of Blazars, arXiv:1307.4187 , 2013
- [13] N. Mori, A Generic Geant4 Simulation package for small- and medium-sized particle detection experiments, *Nuclear Instruments and Methods in Physics*, Volume 1002, 2021, 165298