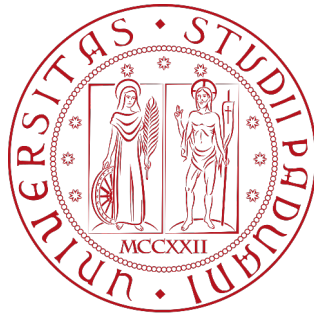




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”
Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Prestazioni di un rivelatore spaziale per particelle cariche tramite simulazioni Montecarlo

Relatore
Prof. Riccardo Rando

Laureando
Andrea Perozzo

Anno Accademico 2025/2026

Indice generale

Introduzione.....	3
1. Raggi cosmici e caratterizzazione delle particelle in orbita bassa.....	4
2. Nuses.....	6
3. Il rivelatore Zirè.....	6
4. Geant4.....	8
5. Implementazione e configurazione di Geant4.....	9
5.1 Obiettivi.....	9
5.2 Architettura modulare e componenti obbligatorie in Geant4.....	9
5.3 Realizzazione di esempi base.....	10
6. Implementazione di Zirè in Geant4.....	12
6.1 Setup della simulazione e metodologia per il calcolo dell'area efficace.....	12
6.2 Analisi dell'area efficace per gli elettroni.....	14
6.2.1 Area efficace – $\cos(\theta)$: analisi per intervalli energetici.....	14
6.2.2 Area efficace – Energia cinetica: analisi per intervalli angolari.....	15
6.3 Analisi dell'area efficace per i protoni.....	16
6.3.1 Area efficace – $\cos(\theta)$: analisi per intervalli energetici.....	16
6.3.2 Area efficace – Energia cinetica: analisi per intervalli angolari.....	17
6.4 Accettanza angolare geometrica di Zirè.....	18
6.5 Simulazione di flussi realistici in orbita bassa con LEOBackground.....	19
6.5.1 Motivazione e scenario ambientale.....	19
6.5.2 Il pacchetto software LEOBackground.....	20
6.5.3 Parametri utilizzati.....	20
6.5.4 Metodologia di analisi e rinormalizzazione.....	21
6.5.5. Discussione dei risultati.....	22
7. Conclusioni.....	26
8. Futuri sviluppi.....	27

Introduzione

L'impiego di telescopi con installazioni sul suolo o in orbita terrestre permette di ottenere informazioni sulla composizione e sull'energia delle particelle che li attraversano. Queste si suddividono in due categorie: raggi cosmici primari, prodotti da sorgenti galattiche ed extragalattiche, e raggi cosmici secondari prodotti localmente nell'atmosfera terrestre.

La missione NUSES (NeUtrino and Seismic Electromagnetic Signals) si propone di studiare i flussi di particelle in orbita bassa utilizzando tecnologie innovative e più efficienti, con miglioramenti in termini di costi e volumetria del rivelatore rispetto a progetti simili antecedenti [1][2][20].

Il satellite ospita due strumenti scientifici: Terzina e Zirè. Terzina ha come scopo quello di studiare il passaggio di neutrini, sfruttando l'effetto Cherenkov causato dal passaggio di sciame di raggi gamma, raggi cosmici e neutrini nell'atmosfera terrestre; Zirè si occupa invece di ottenere informazioni sul flusso di protoni ed elettroni in orbita bassa, investigando le relazioni tra le popolazioni di particelle e i segnali di tipo MILC (Magnetosphere - Ionosphere - Lithosphere Coupling).

Il lavoro in questa tesi si articola in due parti principali:

1. Sviluppo di semplici programmi e simulazioni con il software Geant4, verificando di aver ottenuto il corretto funzionamento dei moduli integrati quali ad esempio le liste dei processi fisici. L'obiettivo è quello di rendere disponibile del materiale a livello base per futuri studenti che debbano familiarizzare con Geant4.
2. Simulazione dell'operatività e delle prestazioni del rivelatore Zirè in Geant4, considerando solo i volumi sensibili senza gli elementi strutturali o di supporto. Si conclude con simulazioni di flussi realistici di raggi cosmici primari e secondari, con lo scopo di valutare l'efficienza geometrica e il numero di eventi rilevati in un giorno medio di osservazione.

Nel capitolo 1 si introduce l'argomento dei raggi cosmici in termini storici e descrivendone le proprietà principali, con particolare riguardo per i fenomeni in orbita bassa. Nei capitoli 2 e 3 si trattano più in dettaglio gli obiettivi della missione NUSES e la struttura interna del rivelatore Zirè. Nei capitoli 4 e 5 si descrive la struttura e il funzionamento interno di Geant4, vedendolo applicato a dei semplici programmi di esempio. Il capitolo 6 riguarda l'analisi delle prestazioni del rivelatore Zirè: si stimano le funzioni di merito, prima con flussi di protoni ed elettroni in condizioni isotrope, e infine con flussi realistici. Le conclusioni di questo lavoro e le proposte di sviluppi futuri sono contenute nei capitoli 7 e 8.

1. Raggi cosmici e caratterizzazione delle particelle in orbita bassa

Per trattamento dettagliato si vedano i testi in bibliografia: [3][4][5].

La scoperta dell'esistenza dei raggi cosmici inizia verso la fine del XIX secolo, con i fisici dell'epoca che si interrogano sul motivo per cui gli elettroscopi a foglia si scaricassero anche se messi in condizioni elettrostaticamente isolate.

La causa si scoprì essere dovuta al passaggio di particelle ionizzanti, che inizialmente si pensava originassero dall'ambiente terrestre circostante. In seguito, grazie a vari esperimenti, tra cui quelli condotti ad alta quota da Viktor Hess nel periodo 1912-1913, si scoprì che la ionizzazione atmosferica aumenta con l'altitudine, rivelando la presenza di una radiazione di origine extraterrestre molto energetica.

Negli anni seguenti seguirono esperimenti più raffinati, che videro l'utilizzo di strumenti come camere a nebbia, contatori geiger in coincidenza ed emulsioni fotografiche, che portarono a importanti scoperte come quella del positrone (Anderson, 1932), del muone (Anderson – Neddermeyer, 1936) e del pione (Powell, 1947).

Da questi e altri esperimenti si stabilisce che i raggi cosmici sono principalmente costituiti da protoni (~90%), nuclei leggeri (~9%) e in minima parte da elettroni e antimateria come positroni e antiprotoni, oltre che da neutrini e fotoni.

I raggi cosmici vengono originati da alcuni dei fenomeni astrofisici più potenti dell'universo, con energie di diversi ordini di grandezza superiori a quelle ottenibili nei laboratori terrestri. In base all'energia e alla provenienza, le sorgenti possono essere classificate come segue:

- **Sorgenti Solari (energie < 1 GeV):** Il sole contribuisce ai flussi di particelle principalmente tramite l'emissione continua di vento solare, con energie che arrivano al centinaio di MeV. Eventi molto più rari, di carattere impulsivo e legati a brillamenti solari ed espulsioni di massa coronale possono raggiungere energie fino a ~ 1 GeV.
- **Sorgenti Galattiche (energie < 1 PeV):** Le sorgenti galattiche, per energie inferiori a 1 PeV, si trovano oltre il sistema solare. In particolare, stelle con una massa circa 8 volte maggiore rispetto a quella del sole, al termine della loro vita e dopo l'esaurimento del combustibile nucleare, collassano in esplosioni di supernova. L'onda d'urto che si genera si espande nel mezzo interstellare (Resto di Supernova), accelerando le particelle che incontra tramite quello che viene definito "Meccanismo di accelerazione di Fermi" fino a energie del PeV. Oltre a questo vi può anche essere un residuo compatto, che spesso è una stella di neutroni rotante (Pulsar), che contribuisce all'accelerazione tramite i suoi intensi campi elettromagnetici.

- **Sorgenti Extragalattiche (energie $< \sim 10^{20}$ eV):** Ad energie ancora maggiori vi sono altri candidati, tra i quali i principali sono i nuclei galattici attivi (AGN) alimentati da buchi neri supermassicci. La materia sul disco di accrescimento, surriscaldata e soggetta a intensi campi magnetici, cade verso l'interno del buco nero e rilascia energia gravitazionale formando jets di particelle lunghi centinaia di migliaia di anni luce.

I raggi cosmici più energetici finora registrati raggiungono energie dell'ordine di $\sim 10^{20}$ eV. Tuttavia, il flusso viene fortemente soppresso oltre il limite GZK (Greisen – Zatsepin – Kuzmin, $\sim 5 \times 10^{19}$ eV) per via dell'interazione con la radiazione cosmica di fondo, ponendo vincoli sulla distanza delle sorgenti rilevabili sulla Terra.

Considerando lo spettro dei raggi cosmici nella sua interezza si nota che segue localmente un andamento di tipo power-law $\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$, dove γ è detto indice spettrale

e assume valori diversi a seconda della zona energetica considerata. Nella prima regione c'è un'elevata variabilità del flusso, che tende poi ad assestarsi per un ampio intervallo, con $\gamma \sim 2.7$, fino al cosiddetto “ginocchio” (a $\sim 4 \times 10^{15}$ eV). Da qui in poi l'indice aumenta fino alla zona della “caviglia” ($\sim 5 \times 10^{18}$ eV, $\gamma \sim 3$), oltre la quale torna a diminuire. In quest'ultimo intervallo vi è un indurimento dello spettro che riporta l'indice a un valore di ~ 2.7 , fino al raggiungimento del limite GZK.

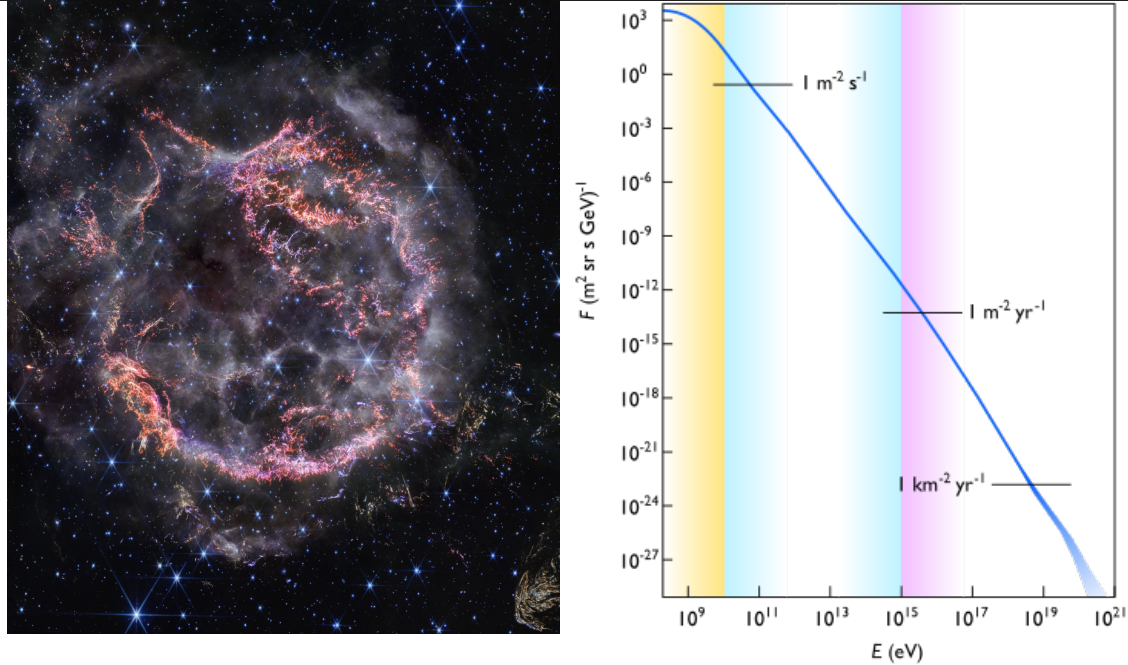


Figura 1: Cassiopeia A (SNR G111.7-02.1), resto di supernova osservato dal telescopio spaziale James Webb tramite strumentazione NIRCам. (NASA, ESA, CSA, JWST Team, [6])

Figura 2: Spettro energetico misurato dall'esperimento Pierre Auger Observatory. (Pierre Auger Collaboration, [7])

La zona di orbita bassa terrestre è particolarmente importante per via delle specifiche della missione NUSES. Le particelle in questa regione sono quelle che provengono dall'esterno e riescono a superare lo scudo geomagnetico della Terra, oppure vengono prodotte localmente. In aggiunta, esistono regioni dove vi sono particelle intrappolate: fasce di Van Allen, anomalia del Sud Atlantico, ecc. Ad alcune latitudini le fasce si abbassano a tal punto da trovarsi lungo l'orbita del satellite, esponendolo a un elevato flusso di particelle con saturazione del rivelatore e effetti di danneggiamento dell'elettronica.

2. Nuses

NUSES è una missione spaziale il cui obiettivo è quello di testare tecnologie innovative per la rilevazione di raggi cosmici e raggi gamma. Si cercano inoltre evidenze di legami tra fenomeni di carattere sismico con perturbazioni della magnetosfera, basandosi sulla teoria denominata Magnetospheric-Ionospheric-Lithospheric Coupling (MILC). [8]

Il satellite è il risultato di un progetto italiano realizzato da INFN (contributo ASI e università) con supporto industriale di Thales Alenia Spazio. Il lancio è previsto per il 2026, con fase operativa in regime di orbita bassa (LEO) a 535 km di altitudine con inclinazione di 97° rispetto all'equatore (orbita sincrona con il Sole).

A bordo ospiterà lo strumento Terzina, dotato di telescopio Cherenkov orbitale per rivelazione di raggi gamma, raggi cosmici e la ricerca di neutrini ultra energetici. Zirè, invece si occupa di rivelare il flusso di protoni, elettroni e nuclei leggeri con energie fino al centinaio di MeV.

3. Il rivelatore Zirè

Il rivelatore è composto da vari sottosistemi progettati per lavorare in modo coordinato, in modo tale da identificare le particelle che lo attraversano e garantire la misura degli osservabili fisici di interesse (Energia, posizione, ecc.) [9]. (Per una descrizione schematica vedi Fig 3.)

Il rivelatore si compone di:

- **Fiber Tracker (FTK):** Posizionato nella zona di apertura del rivelatore, è il primo dei sottosistemi incontrato dalle particelle ed è dedicato alla ricostruzione della loro traiettoria. E' strutturato in tre blocchi, ognuno organizzato in due piani ortogonali X-Y composti di 256 fibre plastiche scintillanti in polistirene (area $1 \times 1 \text{ mm}^2$, distanziate 1 mm, di lunghezza 12 cm). Il piccolo spessore permette di ridurre efficacemente il fenomeno di scattering multiplo, lasciando pressoché imperturbate le particelle che lo attraversano.

Le fibre sono lette da dei fotomoltiplicatori al silicio (SiPMs), ideali per un rivelatore spaziale: garantiscono peso ridotto, basso consumo energetico, compattezza e affidabilità. Inoltre, l'utilizzo di fibre plastiche rispetto ai classici tracciatori al silicio permette di abbassare i costi, mantenendo comunque ottime prestazioni in termini di ricostruzione della traiettoria, in accordo con gli obiettivi della missione NUSES.

- **Plastic Scintillator Tower (PST):** E' una pila a 32 strati, ognuno composto da tre blocchetti di scintillatori plastici disposti parallelamente tra loro e ortogonalmente rispetto allo strato precedente. I primi sei strati hanno blocchetti di dimensioni 12 cm x 12 cm x 1 cm, mentre i restanti più sottili con dimensioni 12 cm x 12 cm x 0.5 cm.
Questa struttura è posta dopo il FTK, con lo scopo principale di raccogliere l'energia depositata per identificare la particella, oltre che di aiutare nella ricostruzione della traiettoria.
- **Calorimetro (CALOG):** Posizionato dopo il PST, si tratta di una matrice di cristalli scintillanti a forma di cubo, disposti secondo uno schema 4x4x2. Ciascun cristallo ha dimensioni pari a $2,5 \times 2,5 \times 3 \text{ cm}^3$ ed è realizzato in LYSO (Lutetio Yttrio Ossidato drogato con Cerio) o GAGG (Gadolinium Aluminium Gallium Garnet): materiali noti per l'elevata resa luminosa e tempi di risposta rapidi. Il calorimetro è progettato per assorbire la gran parte dell'energia della particella o fotone incidente, restituendo un segnale proporzionale all'energia depositata.
- **Sistema di anticoincidenza (ACS):** Sistema progettato per ridurre il rumore di fondo e per eliminare eventi parzialmente contenuti. Ricopre esternamente il rivelatore su cinque lati, lasciandone uno libero in corrispondenza del FTK, così da permettere al rivelatore di funzionare come telescopio. Si compone di 9 piastre di materiale plastico scintillatore spesse 0,5 cm ciascuna.

Il rivelatore è dotato inoltre di un LEM (Low Energy Module, non incluso in figura), cioè un modulo specializzato che permette di estendere la sensibilità di Zirè nel rivelare elettroni con energie inferiori ai 7 MeV e protoni nel range 3-50 MeV, particolarmente utile nei fenomeni di accoppiamento magnetosfera-ionosfera-litosfera. Il LEM si compone di: un rivelatore al silicio, un calorimetro in plastica, sistemi di veto e un collimatore a scintillazione per la ricostruzione della direzione delle particelle. Per questa tesi tale strumento non viene considerato.

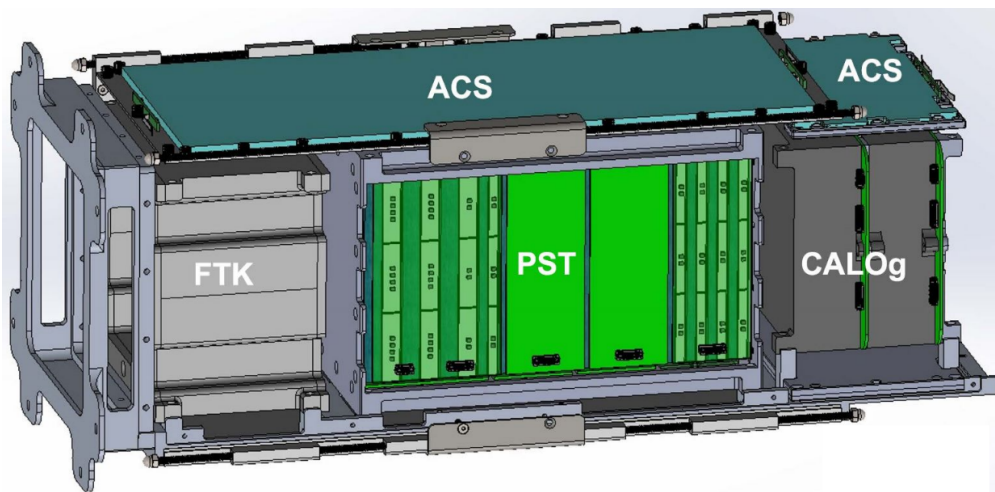


Figura 3: Rappresentazione schematica del rivelatore Zirè con le sue componenti (FTK, ACS, PST, CALOg).

4. Geant4

Per trattamento dettagliato si vedano i testi in bibliografia: [\[10\]](#)[\[11\]](#)[\[12\]](#)[\[13\]](#).

Geant4 è un software open-source sviluppato dal CERN negli anni novanta, mantenuto oggi dall'omonima organizzazione internazionale Geant4 Collaboration. L'obiettivo primario è di superare il precedente Geant3 (basato su FORTRAN e usato prevalentemente per la fisica delle alte energie), attraverso un approccio orientato agli oggetti basato sull'utilizzo del linguaggio C++ : questo garantisce maggiore flessibilità e capacità di gestire rivelatori complessi come LHC. Rispetto alla versione precedente si estende in modo più generico il campo di utilizzo, rendendolo utilizzabile ad ambiti quali: fisica delle alte energie, medicina (PET, adroterapia), fisica nucleare e applicazioni spaziali come la schermatura da radiazioni cosmiche.

Geant4 fornisce gli strumenti e un ambiente di simulazione con lo scopo di studiare e analizzare il passaggio di particelle attraverso la materia. Per fare ciò si sviluppa un programma in C++, sfruttando metodi e classi messi a disposizione dal pacchetto, con cui sarà possibile impostare materiali, forme geometriche e altri parametri fisici utili in base alla simulazione.

La struttura interna di un programma Geant4 è rigorosamente gerarchica. L'intera simulazione è gestita da un oggetto (il “*Run Manager*”) che svolge il ruolo di controllore e gestore del flusso di esecuzione (il “*run*”). L'utente ha a disposizione

alcune classi astratte generiche che devono essere opportunamente derivate e implementate per realizzare la situazione fisica desiderata. Tra queste ve ne sono alcune assolutamente necessarie da implementare al servizio del RunManager, senza le quali non sarebbe possibile eseguire una simulazione valida. Queste implementazioni riguardano: geometria, materiali, lista dei processi fisici (elettromagnetici, adronici, decadimenti, etc.) e generatore di particelle (tipo, energia, direzione, etc).

5. Implementazione e configurazione di Geant4

5.1 Obiettivi

Come già accennato, Geant4 è una libreria software dalla grande potenza e versatilità, che ben si adatta ai vari ambiti di ricerca. Queste grandi potenzialità però si riflettono anche in una complessità iniziale significativa al primo incontro con l'ambiente e i suoi componenti.

Si riportano qui brevi concetti del funzionamento di Geant4 e la descrizione di alcuni piccoli programmi realizzati con l'intenzione di apprenderne i meccanismi, con un grado di complessità sempre maggiore. L'intenzione è di lasciare questi programmi come guida per futuri studenti che avessero intenzione di affacciarsi a questo tipo di attività.

5.2 Architettura modulare e componenti obbligatorie in Geant4

Il Run Manager di Geant4 si occupa del corretto funzionamento del flusso del programma, ma richiede già dall'inizio alcune classi di inizializzazione, con le quali si deve:

- **Definire geometrie e materiali:** Costruzione dei volumi geometrici (tramite solidi come sfere, parallelepipedi, etc) e definizione dei materiali (densità e composizione chimica).
- **Definire i processi fisici:** Specifica il tipo di interazioni attive (elettromagnetiche, nucleari, ecc.). Qui è importante definire i parametri energetici di "taglio", che determinano la soglia di produzione di particelle secondarie.
- **Generare particelle primarie:** Impostazione della sorgente all'inizio di ogni evento simulato, definendone tipo di particella, energia, posizione e direzione.

Oltre a queste classi di inizializzazione vi sono altre classi, dette classi di azione, che vengono eseguite durante la fase di *run* e che sono però opzionali, nel senso che l'utente non ha l'obbligo di implementarle per poter far funzionare il programma, ma sono quelle che producono i dati per l'utente. Queste classi vengono utilizzate secondo la

struttura gerarchica del flusso del programma, composta da quattro livelli ordinati: *Run*, *Event*, *Track*, *Step*. Ognuno di essi controlla una parte specifica durante l'esecuzione del programma, da cui è possibile produrre output ed eseguire analisi sui dati. A titolo di esempio si può considerare la classe *SteppingAction*, che viene chiamata tra un'interazione discreta e la successiva, permettendo all'utente di esaminare in tempo reale dati come l'energia depositata, la posizione o l'energia cinetica della particella interagente.

5.3 Realizzazione di esempi base

Progetto 1 – Deposito energetico su lamina di silicio

Un elettrone da 1 MeV è generato con una sorgente a 1 metro da una lamina di silicio (5cm x 5cm x 0.5 mm), raccogliendo nello *step* l'energia depositata ad ogni interazione della particella con il materiale attraversato. Per evitare la ricompilazione del codice si utilizzano anche macro testuali per la configurazione dei parametri della particella (energia, posizione e direzione).

Progetto 2 – Transizione su lastra di piombo

Si sostituisce la lamina di silicio con una lastra di piombo (5 cm x 5 cm x 100 um), raccogliendo ad ogni *step* sia l'energia depositata che il tipo di processo fisico responsabile dell'interazione.

Progetto 3 – Misura dell'area efficace

Il passo successivo è estendere il progetto precedente introducendo il calcolo dell'efficienza e dell'area efficace. Per fare questo si generano un migliaio di elettroni di energia 50 KeV in posizioni casuali su una superficie quadrata di area 100 cm², inviandoli ortogonalmente contro un parallelepipedo massivo di piombo (5 cm x 5 cm x 1 m di spessore), ideale per l'assorbimento totale. Dato che l'area di generazione è più grande di quella di arrivo, non tutti gli elettroni colpiranno il blocco di piombo. Per questo motivo si definisce l'efficienza del rivelatore come:

$$\varepsilon = \frac{N_{rivelate}}{N_{generate}}$$

dove le particelle rilevate sono quelle che depositano un'energia non nulla nel volume. Per stimare la superficie equivalente del rivelatore si definisce l'area efficace:

$$A_{eff} = \varepsilon A$$

Questa quantità è definita come l'area di un rivelatore ideale con efficienza del 100%, che produrrebbe lo stesso numero di eventi rivelati del rivelatore reale in esame.

L'area A rappresenta la sezione geometrica del piano di generazione delle particelle, che in questi progetti corrisponde esattamente con l'area della superficie piana quadrata, mentre nel caso delle successive simulazioni che coinvolgono Zirè essa corrisponde con l'area proiettata della sfera, cioè il disco di raggio massimo R .

Si osserva che in corrispondenza dell'efficienza massima, quando tutte le particelle che intersecano la lamina danno segnale, si ottiene l'area della lamina.

L'utilità dell'area efficace è quella di permettere di confrontare l'efficienza di rivelatori diversi.

Progetti futuri

I programmi e i documenti stilati sono stati caricati sulla piattaforma web GitHub, rendendoli riproducibili e disponibili come punto di partenza per futuri studenti o progetti di tesi.

Possibili sviluppi e approfondimenti del materiale qui presentato possono essere i seguenti:

- Confrontare i risultati ottenuti con le tabelle NIST di potere di arresto per confrontare e validare i dati delle simulazioni.
- Verificare la transizione tra diversi fenomeni al variare dell'energia degli elettroni (ionizzazione, Bremsstrahlung, etc) e confrontare con le tabelle note in letteratura.

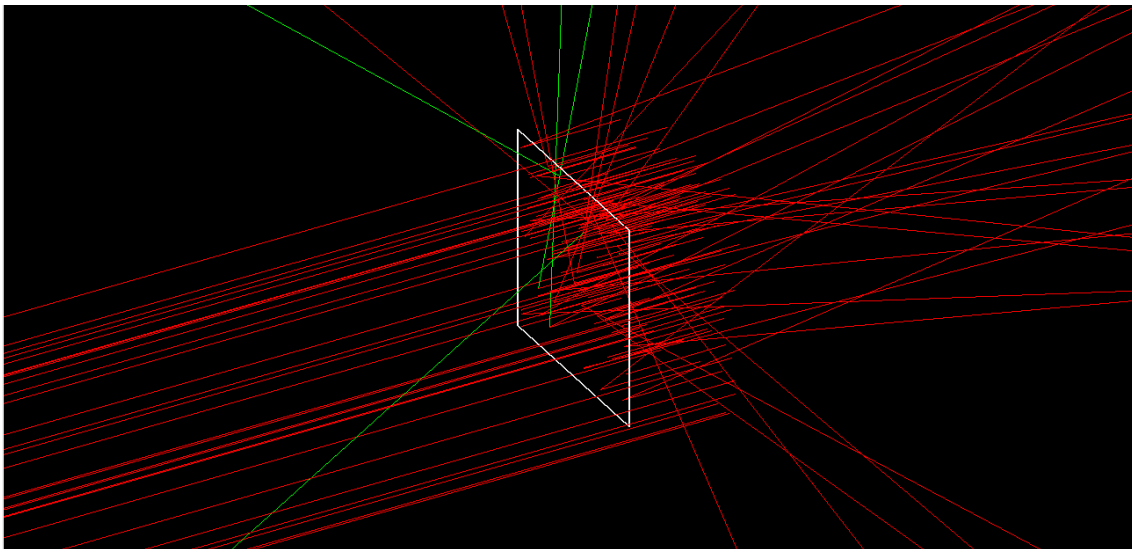


Figura 4: Immagine tratta dalle simulazioni di prova svolte. Gli elettroni, generati in punti casuali su una superficie piana, colpiscono una lastra di piombo di spessore $100\mu\text{m}$ (in bianco) dando luogo a fenomeni di scattering.

6. Implementazione di Zirè in Geant4

Il rivelatore Zirè è stato implementato dalla collaborazione NUSES in Geant4 tramite una serie di files in formato standardizzato STP (disegno 3D dei componenti del rivelatore), in aggiunta con altri documenti in formato XML che integrano informazioni fisiche e strutturali (materiali, gerarchia dell'assemblaggio, specifica dei volumi sensibili).

La geometria usata da noi contiene i volumi sensibili del rivelatore: le fibre ottiche del FTK, i blocchi di materiale plastico del PST, il sistema di anticoincidenza ACS e i cristalli cubici del calorimetro. Vengono invece esclusi il Low Energy Module (LEM), tutti gli elementi strutturali e la componentistica elettronica, permettendo di ridurre la complessità delle simulazioni.

L'intera simulazione è gestita tramite un software, messo a disposizione dal gruppo di ricerca, che automatizza la gestione dei file contenenti la geometria e permette il salvataggio dei dati in formato *ROOT* (id particella, direzione e posizione iniziale, energia depositata nei vari componenti, etc.). All'utente rimane la libertà di impostare alcuni parametri della simulazione con delle macro esterne: il numero e il tipo di particelle generate, forma e posizione della superficie da cui esse partono, intervallo e tipo di distribuzione energetica.

Il software fornito è in rapido avanzamento e sviluppo, ma per l'intero lavoro ci siamo limitati a una versione specifica, senza seguire gli aggiornamenti: questo limita le funzionalità ma permette di familiarizzare con una versione stabile del sistema. *Quindi i risultati riportati in questo lavoro non sono indicativi dello stato del progetto NUSES.*

6.1 Setup della simulazione e metodologia per il calcolo dell'area efficace

Per stimare l'area efficace di Zirè sono state predisposte due diverse simulazioni, separando il caso dei protoni da quello degli elettroni. In entrambi i casi si è proceduto ponendo il rivelatore al centro di una superficie sferica di raggio $R = 40\text{cm}$, grande a sufficienza da inglobare tutto il rivelatore e centrata nell'origine degli assi cartesiani dell'ambiente di simulazione.

Per poter ottenere una stima dell'efficienza del rivelatore in termini di area efficace, è stato utilizzato uno spettro energetico di tipo legge di potenza. L'indice spettrale è stato posto a -1 (uguale numero di particelle per decade di energia). Inoltre, il range energetico è stato scelto abbastanza ampio in modo da includere l'intera crescita e decrescita dell'efficienza in funzione dell'energia.

I flussi di particelle in orbita sono quasi isotropi, o comunque distribuiti in modo isotropo su mezza sfera. Le simulazioni sono state impostate per riprodurre questo comportamento: il rivelatore, che senza gli elementi strutturali è simmetrico sopra-sotto, viene colpito da tutte le direzioni. Il sistema di anticoincidenza rigetta gran parte di esse, selezionando solo quelle che entrano dall'unico lato dove non è presente lo scudo di anticoincidenza, e per fare questo sono stati imposti dei tagli sulle energie depositate nei volumi sensibili ($PST > 0.3 \text{ MeV}$, $ACS < 0.1 \text{ MeV}$, $FTK > 0.3 \text{ MeV}$). Si è scelto di non imporre un taglio sul calorimetro in quanto, a bassa energia le particelle sono assorbite dagli strati di fibre e plastica.

In mancanza di una simulazione degli effetti dell'elettronica (saturazione, soglia, rumore) abbiamo applicato un taglio di qualità, richiedendo che per accettare un evento l'energia depositata sia almeno il 90% del totale. Nella realtà questo verrà fatto con dei tagli appositi sulle energie depositate e sulla topologia dell'evento, tenendo conto di fenomeni come rumore elettronico, saturazione dei canali dei rivelatori, etc..

Una volta simulate queste due configurazioni con protoni ed elettroni, si è calcolata l'area efficace del rivelatore:

$$A_{eff} = \frac{N_{rilevati}}{N_{generati}} \pi R^2$$

Nel caso di particelle generate in modo isotropo da una sfera, per il calcolo di area efficace il fattore di conversione è l'area della sezione trasversale della sfera, ovvero l'area di un disco di pari raggio.

Per caratterizzare le prestazioni in funzione di energia e angolo di incidenza si sono selezionati un certo numero di sottointervalli del range energetico e angolare.

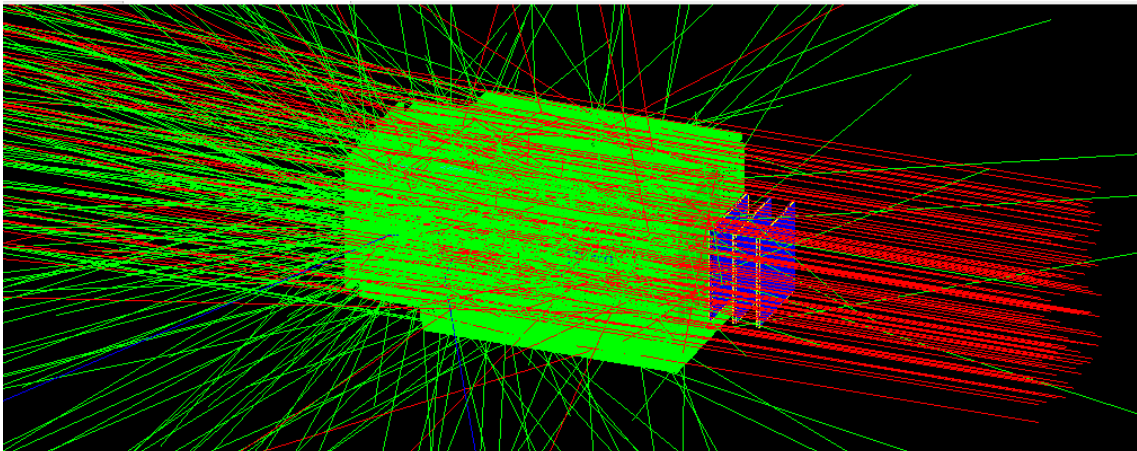
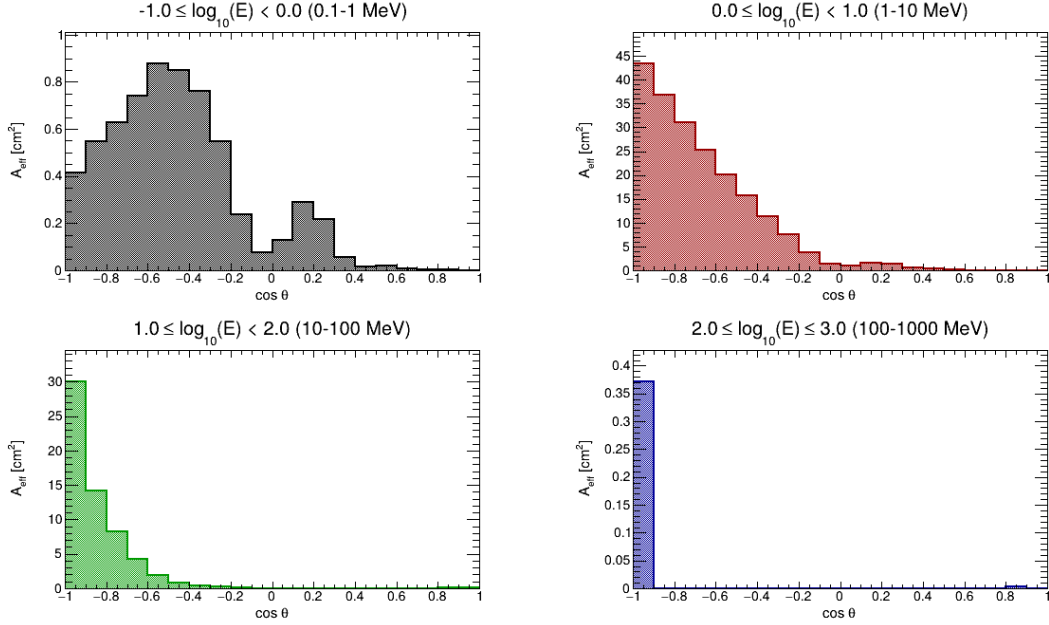


Figura 1: Immagine tratta dalle simulazioni Geant4 del detector Zirè. In questo caso le particelle sono generate in direzione ortogonale a una superficie piana parallela ai piani del Fiber Tracker.

6.2 Analisi dell'area efficace per gli elettroni

In questa sezione si riportano grafici e analisi dell'area efficace in funzione del $\cos(\theta)$ e dell'energia cinetica posseduta inizialmente dalle particelle generate.

6.2.1 Area efficace – $\cos(\theta)$: analisi per intervalli energetici

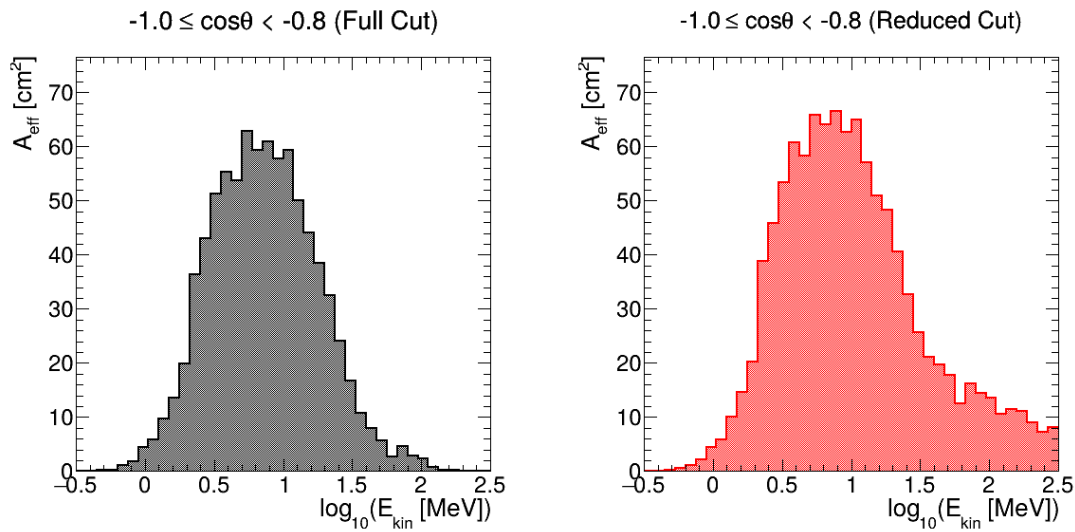


Si considera l'andamento dell'area efficace in funzione del $\cos(\theta)$ nei seguenti quattro intervalli energetici:

- **0.1 – 1 MeV:** L'area efficace ha un picco a $\sim 0.9 \text{ cm}^2$ presenta significative fluttuazioni statistiche. Le energie sono vicine ai tagli, gli elettroni possono subire effetti di multiscattering e non depositare sufficiente energia per essere selezionati. La decrescita verso $\cos(\theta) \sim -1$ (incidenza frontale) è dovuto all'allineamento tra le traiettorie delle particelle e le fenditure tra i rivelatori. Il punto di minimo a $\cos(\theta) \sim 0$ è dovuto al sistema di anticoincidenza; il massimo locale dopo di esso indica che una frazione di particelle filtra attraverso le fessure.
- **1 – 10 MeV:** Area efficace massima tra gli intervalli analizzati, con un picco di $\sim 44 \text{ cm}^2$ a $\cos(\theta) \sim -1$. Questo intervallo energetico è ideale per il rivelatore: gli elettroni riescono a superare i tagli, ma non subiscono assorbimento significativo o scattering.

- **10 – 100 MeV:** Area efficace con picco ridotto a $\sim 30 \text{ cm}^2$. Diventa frequente il caso in cui una parte significativa dell'energia del primario fuoriesce dal rivelatore, gli sciami non sono più completamente contenuti nel volume sensibile fallendo il taglio sulla percentuale di energia depositata. La forma del grafico presenta una decrescita più ripida, indicando una maggiore direzionalità del rivelatore.
- **100 – 1000 MeV:** Area efficace ridotta a $\sim 0.37 \text{ cm}^2$, circa un ordine di grandezza in meno dei due intervalli precedenti. Qui la perdita di energia è massima, i volumi attivi di FTK e PST non riescono a contenere lo sciame e a misurare con precisione l'energia depositata. Il profilo del grafico presenta una brusca decrescita iniziale indicando che si è raggiunto il valore minore di efficienza ad angoli non nulli, quando FTK e calorimetro non sono esattamente allineati.

6.2.2 Area efficace – Energia cinetica: analisi per intervalli angolari



L'analisi dell'area efficace in funzione dell'angolo di incidenza è stata limitata al solo intervallo $-1 \leq \cos(\theta) < -0.8$. Come si è visto nel paragrafo precedente, all'aumentare dell'energia il fenomeno del “leakage” non è trascurabile, e per evidenziarne il contributo si è diviso lo studio in due casi: nel primo si è usato il set completo di tagli di qualità ($\text{FTK} > 0.1 \text{ MeV}$, $\text{PST} > 0.3 \text{ MeV}$, $\text{ACS} < 0.3 \text{ MeV}$, $\frac{|E_{\text{depositata}} - E_{\text{kin}}|}{E_{\text{kin}}} < 0.1$),

rimuovendo il taglio sul contenimento energetico nel secondo caso.

Entrambi i grafici mostrano una prima fase di crescita fino a un picco di $\sim 65 \text{ cm}^2$ a $E_{\text{kin}} \sim 6.3 \text{ MeV}$. Segue poi una fase di decrescita che assume comportamenti diversi ad alte energie:

- Con il set completo di tagli: l'area efficace diminuisce diventando nulla per energie > 160 MeV
- Senza il taglio sul contenimento: l'area efficace decresce più lentamente rimanendo significativa anche a 300 MeV.

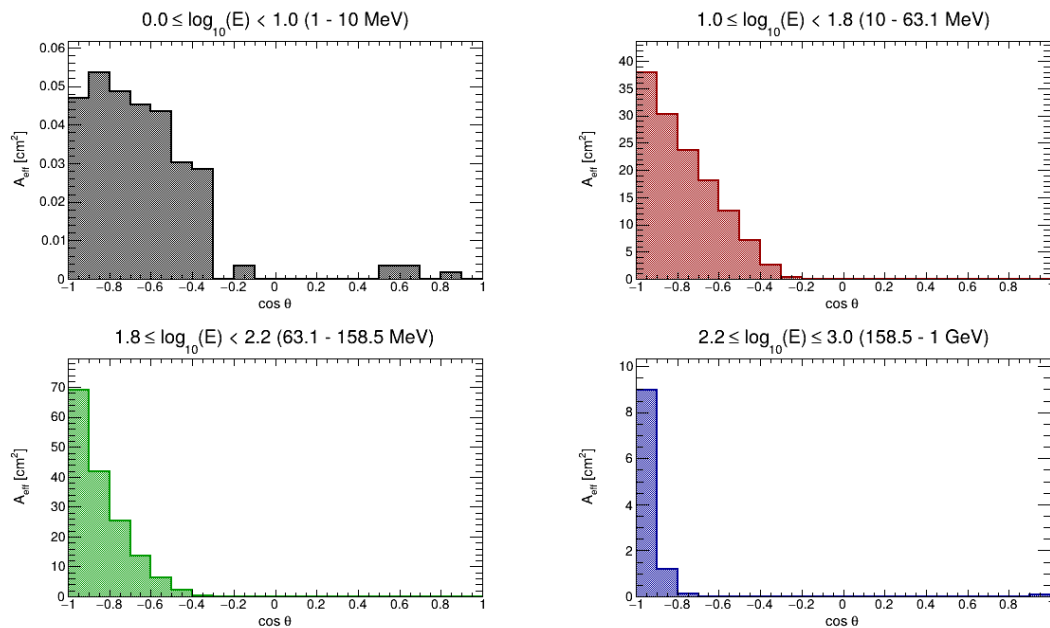
Questo confronto indica che il rivelatore non riesce più a contenere con efficacia elettroni con energie iniziali > 160 MeV. Il fatto che rimuovendo il taglio sul contenimento l'area efficace rimanga non nulla anche ad alte energie significa che vengono attivati correttamente tutti i volumi sensibili, ma si manifesta un marcato fenomeno di fuoriuscita.

In conclusione, considerando tutti i tagli ed escludendo la zona dove la curva flette marcatamente, si può stabilire che il limite operativo massimo del rivelatore per gli elettroni si attesta a ~ 30 MeV.

6.3 Analisi dell'area efficace per i protoni

In modo analogo a quanto fatto per gli elettroni in 6.2, si riportano in questa sezione i risultati nel caso dei protoni.

6.3.1 Area efficace – Cos(θ): analisi per intervalli energetici

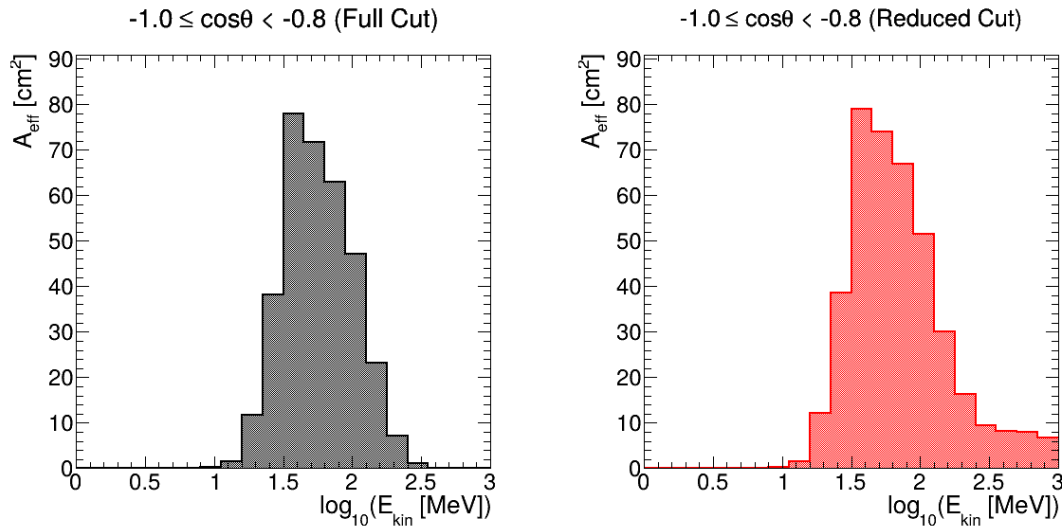


- **1 - 10 MeV:** A queste energie l'area efficace per i protoni è trascurabile, ma si vede un andamento simile a quello osservato per gli elettroni.

I protoni sono più massivi degli elettroni, questo fa sì che il deposito di energia per ionizzazione si concentri negli strati del primo materiale attraversato (Fiber tracciatore o ACS). Di conseguenza i tagli non sono soddisfatti e si scartano molti eventi.

- **10 - 63.1 MeV:** L'area efficace presenta un picco iniziale ($\sim 38 \text{ cm}^2$, $\cos(\theta) \sim -1$), decrescendo linearmente fino a diventare nulla per $\cos(\theta) > -0.2$. Rispetto a quanto visto per gli elettroni, per $\cos(\theta) > 0$ non segue nessun massimo locale. Le particelle che si introducono tra le fessure del sistema di anticoincidenza non attivano tutti i tagli e dunque non contribuiscono ad aumentare l'efficienza.
- Nei restanti due intervalli energetici l'andamento angolare mantiene la decrescita, ma si osserva una riduzione più drastica dell'area efficace rispetto al caso precedente, con i picchi massimi che si assestano in questi ultimi due casi rispettivamente a $\sim 70 \text{ cm}^2$ e $\sim 9 \text{ cm}^2$. Infatti, come discusso nel caso degli elettroni, all'aumentare dell'energia è sempre più frequente il fenomeno del leakage, per cui la particella che entra nel rivelatore fuoriesce da esso senza aver depositato una quantità sufficiente di energia per soddisfare i tagli di qualità.

6.3.2 Area efficace – Energia cinetica: analisi per intervalli angolari



La forma dei grafici presenta un andamento simile a quello visto nel caso degli elettroni nel paragrafo §6.2.2, con alcune differenze dovute alla diversa massa.

L'area efficace inizia ad essere significativa per $E_{\text{kin}} \sim 30 \text{ MeV}$, con il picco massimo a $\sim 45 \text{ MeV}$: entrambi questi valori sono superiori a quelli trovati nel caso degli elettroni,

mostrando che servono energie maggiori per poter poter attivare i tagli che selezionano gli eventi.

6.4 Accettanza angolare geometrica di Zirè

Come visto nei paragrafi precedenti, l'area efficace possiede una dipendenza angolare ed energetica. Tuttavia, dato che nello spazio i raggi cosmici arrivano da tutte le direzioni con un flusso isotropo, per calcolare quante particelle al secondo attraversano Zirè e vengono effettivamente conteggiate non è possibile utilizzare la sola area efficace in quanto servirebbe un calcolo adattato per ogni angolo.

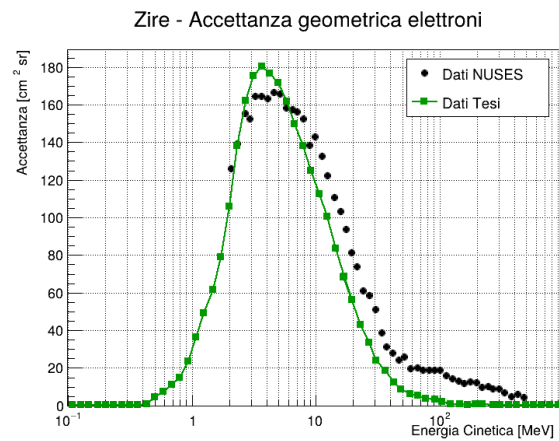
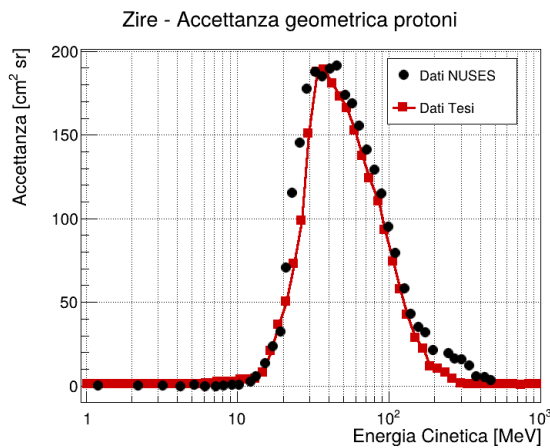
Per questo motivo si introduce il concetto di accettanza angolare geometrica del rivelatore, che si determina integrando l'area efficace $A_{eff}(\cos\theta)$ sull'angolo solido Ω

secondo la relazione:
$$G = \int_{\Omega} A_{eff}(\theta, \phi, E) d\Omega = 2\pi \int_{-1}^1 A_{eff}(\cos\theta, E) d(\cos\theta)$$

L'analisi è stata eseguita sui dati utilizzati e ottenuti nei casi precedenti: $2 \cdot 10^8$ particelle generate su una superficie sferica di raggio $R = 40$ cm isotropicamente verso l'interno. L'intervallo energetico è stato suddiviso in numerosi sottointervalli e per ognuno di essi si è calcolata l'accettanza come valore medio del bin. Prendendo come dati di riferimento quelli relativi ai punti di massimo delle curve si ottiene un'accettanza geometrica media $G \approx 189 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ nell'intervallo 35-40 MeV per i protoni, mentre nel caso degli elettroni $G \approx 175 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ nell'intervallo 3-6 MeV.

Questi valori sono in accordo con le stime preliminari della collaborazione NUSES [21], che mostrano un'accettanza puntuale $G(E)$ nel caso dei protoni con un profilo molto simile a quello ottenuto dalle simulazioni qui descritte; nel caso degli elettroni si nota invece una differenza più marcata tutto l'intervallo energetico.

Da notare che la versione del software di simulazione e i tagli applicati non sono esattamente identici, nella versione dei dati NUSES viene infatti usato anche un taglio sul calorimetro e manca il taglio sul 90% di energia depositata rispetto a quella iniziale. Sono due set di tagli diversi ma con lo stesso obiettivo relativo al contenimento.



6.5 Simulazione di flussi realistici in orbita bassa con LEOBackground

Conclusa la fase di calibrazione e risposta del rivelatore Zirè con spettri piatto (indice spettrale $\gamma = 1$), ci si concentra ora sulla generazione di flussi di particelle vicini allo scenario reale in orbita bassa.

6.5.1 Motivazione e scenario ambientale

Nei capitoli precedenti si è validata l'efficienza angolare ed energetica del rivelatore Zirè, generando protoni ed elettroni su una superficie sferica con distribuzione di test piatta per decade energetica ($dN/dE \propto E^{-\gamma}$, con $\gamma=1$). Queste condizioni però non rispecchiano le tipiche situazioni ambientali in orbita bassa terrestre.

Come già accennato nel capitolo 1, in orbita bassa, fuori dall'anomalia del Sud Atlantico e dalle fasce di Van Allen interne, la radiazione cosmica è dovuta principalmente ai raggi cosmici primari e secondari. Per i primari, in condizioni di orbita bassa bisogna considerare gli effetti dovuti alla modulazione solare e alla presenza del campo magnetico terrestre, per i secondari le sezioni d'urto di produzione eccetera.

Per le particelle intrappolate la situazione è complessa: la componente principale è costituita da protoni ed elettroni intrappolati nelle fasce di Van Allen, con un'alta variabilità spaziale e temporale per via dell'attività geomagnetica.

- **Fasce di Van Allen:** le particelle cariche che interagiscono con il campo magnetico terrestre possono venire intrappolate in esso, muovendosi poi da polo a polo lungo le linee di campo. Nelle fasce si trovano particelle con energie anche molto inferiori ai GCR, ma con flussi tali da poter saturare o danneggiare l'elettronica di bordo.
- **Anomalia del sud Atlantico (SAA):** Si tratta di una anomalia nel campo geomagnetico terrestre, localizzata principalmente nella zona del Sud Atlantico, che porta le fasce di Van Allen ad abbassarsi anche per centinaia di chilometri.

Una corretta simulazione che tenga conto anche di questi effetti è utile per il corretto dimensionamento dell'elettronica, verificando l'esposizione a fenomeni di saturazione o pile-up, ma è di poco interesse per il nostro caso.

Per questi e altri motivi l'analisi dei fenomeni in orbita non è semplice da realizzare con un semplice programma in linguaggio C++, ma si fa riferimento a pacchetti software già predisposti come LEOBackground nel nostro caso.

6.5.2 Il pacchetto software LEOBackground

Il pacchetto LEOBackground [15][16] fornisce una modellizzazione dei flussi di particelle in orbita bassa. Il modello è basato su dati sperimentali provenienti da più missioni spaziali: i flussi di raggi cosmici primari (protoni, elettroni, positroni e nuclei di elio) sono integrati dalle misure di AMS-02 [17], mentre la componente cosmica e galattica dei fotoni si basa sui dati e sui modelli di fondo sviluppati dalla collaborazione Fermi-LAT [18]. Le componenti secondarie (come protoni, elettroni, neutroni albedo) e i neutroni atmosferici sono invece modellizzate e validate su simulazioni e dati storici [19].

L'implementazione consiste in una serie di script in linguaggio Python che, ricevuti in ingresso una serie di parametri, tra cui quelli orbitali e di modulazione solare, restituiscono lo spettro differenziale per diversi tipi di particelle. Per gli scopi di questa tesi, l'analisi è stata effettuata limitandosi esclusivamente a protoni ed elettroni. I flussi differenziali sono espressi in unità di $\text{particelle}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{KeV} \cdot \text{sr})$; integrando tali spettri su uno specifico intervallo energetico e angolare è possibile ottenere il flusso totale di particelle.

In questo lavoro, il software viene utilizzato sfruttando i risultati delle simulazioni Geant4 descritte nei paragrafi precedenti: i dati ottenuti dalle simulazioni vengono rinormalizzati sulla base dei flussi realistici forniti da LEOBackground. Si ottiene così una stima della risposta operativa del rivelatore in orbita, espressa in termini del numero atteso di particelle conteggiate.

6.5.3 Parametri utilizzati

Per il corretto utilizzo di LEOBackground è necessario impostare una serie di parametri che definiscono le condizioni dell'ambiente spaziale in cui opera il rivelatore.

- **Altitudine e inclinazione:** Impostati rispettivamente a 550 km e 50° rispetto al piano equatoriale. Questa inclinazione tiene conto del passaggio del rivelatore attraverso zone con diversa rigidità magnetica, escludendo il transito attraverso le fasce di Van Allen ad alta latitudine. Inoltre, non è simulata l'anomalia del Sud Atlantico (SAA).
- **Modulazione solare:** Questo parametro serve per tenere conto in modo semplificato dell'attività solare e del suo influsso sui raggi cosmici diretti verso la terra. Viene espresso in Volt, in quanto agisce come una barriera di potenziale elettrico che le particelle cariche devono superare per giungere sulla terra. Nel nostro caso è stato impostato a un valore di 1100MV, valore tipico corrispondente ad attività solare intensa.

- **Tempo di osservazione:** è stato fissato a 24 ore. Questo intervallo consente di stimare il consumo di banda e l'occupazione di memoria relative a un giorno medio di osservazione.
- **Flussi:** Nel caso dei protoni primari, l'intervallo energetico considerato è immediatamente inferiore a quello permesso raccomandato da LEOBackground. Di fatto si chiede a LEOBackground di fare un'estrapolazione analitica dei flussi.

6.5.4 Metodologia di analisi e rinormalizzazione

Grazie alle simulazioni Geant4, integrate con LEOBackground, si ottengono le stime dei conteggi di particelle con il seguente procedimento:

1 Calcolo dell'area efficace:

La procedura è la stessa seguita nel paragrafo §6.3: vengono scelti per l'analisi solo alcuni dei volumi attivi, imponendo i soliti tagli ($FTK > 0.1$ MeV, $PST > 0.3$ MeV, $ACS < 0.3$ MeV, 90% di energia totale della particella depositata sui volumi attivi). Questo genera un istogramma dove per ogni bin si calcola l'area efficace in funzione dell'energia, pesando l'efficienza ottenuta per l'area della sezione trasversale della sfera dove sono generate le particelle ($A_{gen} \sim 5026 \text{ cm}^2$).

2 Integrazione logaritmica del flusso:

L'Intervallo energetico viene diviso in bin di uguale ampiezza in scala logaritmica, all'interno di ciascun bin il flusso può essere approssimato con uno spettro a legge di potenza $\phi(E) \propto E^\gamma$. Di conseguenza il codice implementato deve realizzare l'integrazione logaritmica del flusso, calcolando il termine gamma localmente con i valori di flusso ed energia tra i bordi di ogni singolo bin nel seguente modo:

$$\gamma = \frac{\ln(\phi_1/\phi_0)}{\ln(E_1/E_0)}$$

L'integrale del flusso si calcola con questo esponente per ogni singolo bin, garantendo una stima migliore rispetto al considerare il solo centroide del bin (soprattutto nelle zone dove lo spettro è più ripido).

Questo procedimento è equivalente al fare l'integrale numerico col metodo del parallelogramma in scala logaritmica.

3 Stima dei conteggi:

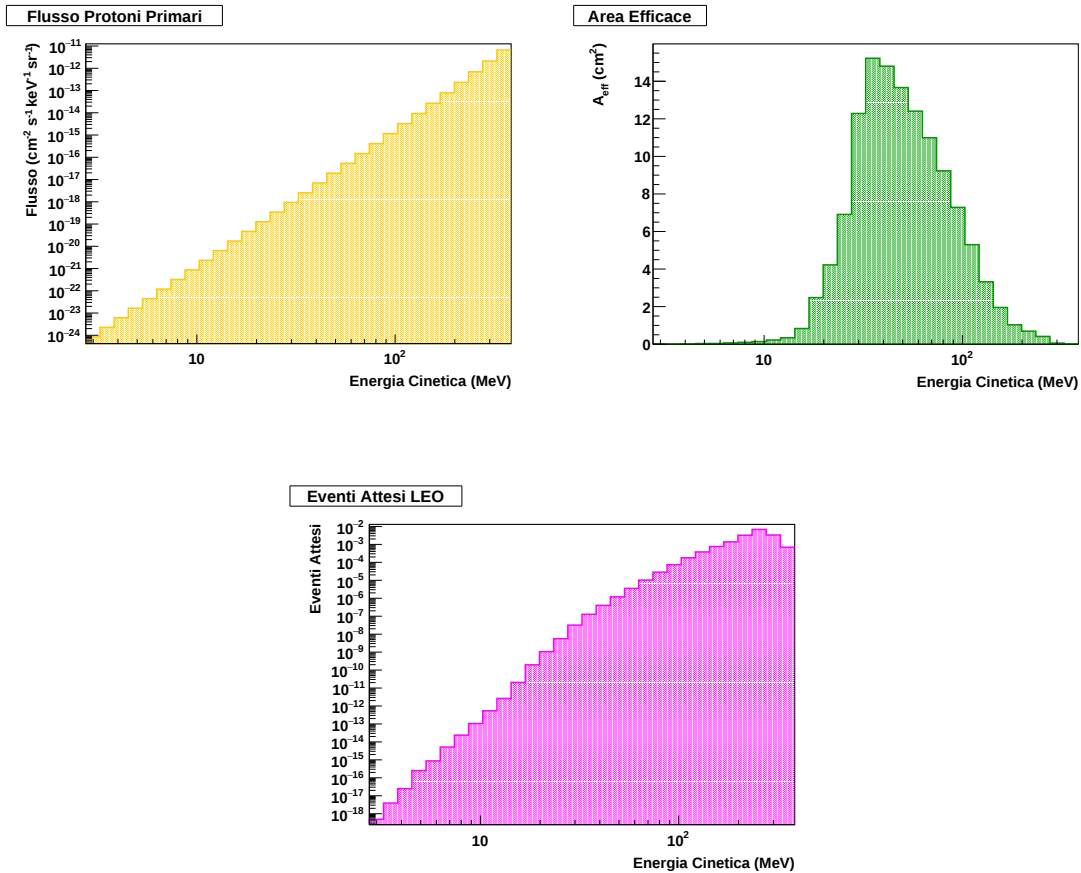
Per ottenere tassi di conteggio realistici si utilizza quanto appena descritto realizzando una convoluzione di flusso $\phi(E)$ e area efficace. Il risultato, per ogni istogramma, restituisce il numero di eventi rivelati.

6.5.5. Discussione dei risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati ottenuti dall'analisi combinata delle simulazioni Geant4 e dei flussi forniti dal pacchetto LEOBackground.

Lo studio è stato svolto distinguendo separatamente i flussi dei protoni e degli elettroni, considerandone il contributo sia come primari che come secondari.

Protoni Primari



1. Flusso

Il flusso di protoni primari mostra un andamento a legge di potenza E^γ , fortemente crescente nel range energetico simulato (circa 15 ordini di grandezza). L'effetto del cut-off geomagnetico e della modulazione sono estremamente importanti.

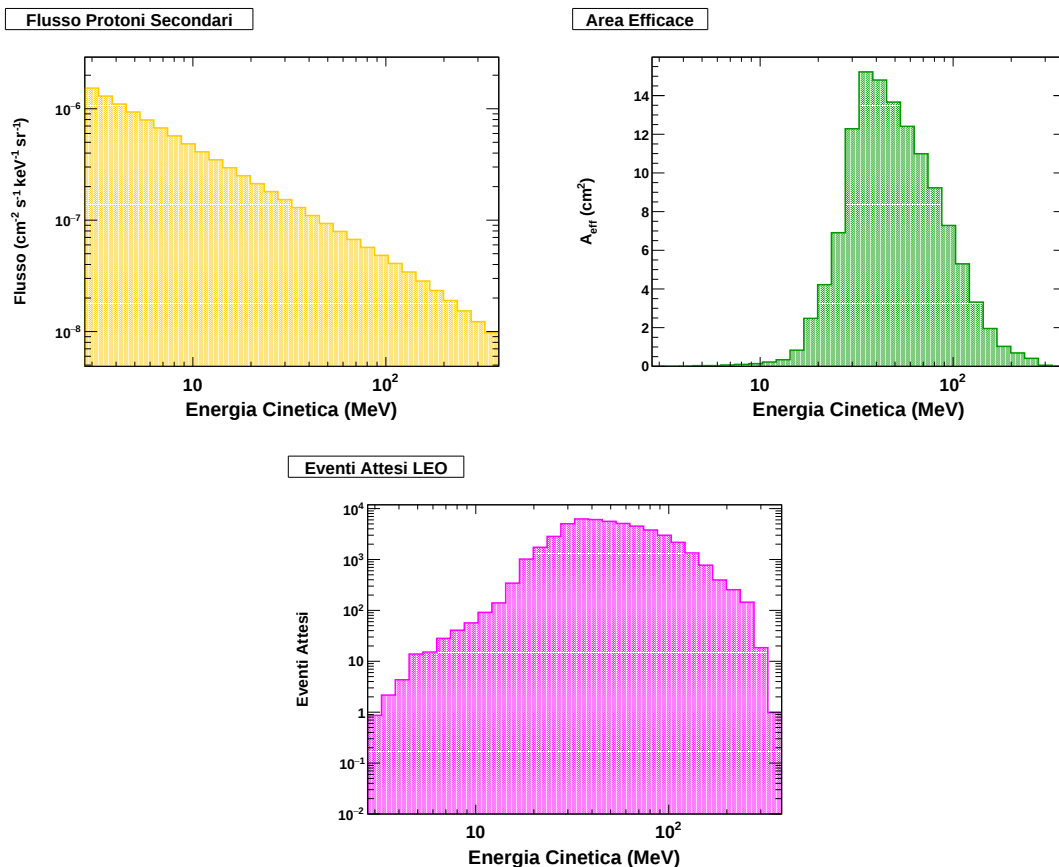
2. Area efficace media

In questa e nelle successive analisi si valuta l'area efficace media: per stimarla si considera l'intero angolo solido 4π , a differenza delle discussioni precedenti dove se ne considerava la variazione angolare. Per questo motivo il valore dell'area efficace risulta inferiore a quanto visto nei capitoli precedenti, ma presenta comunque un picco a $\sim 35\text{MeV}$, in accordo con i risultati già discussi sulle prestazioni del telescopio.

3. Eventi attesi

Il numero di eventi attesi è inferiore a 1 evento per giorno di osservazione. Confrontando i grafici si osserva che il massimo degli eventi attesi si trova a $\sim 255\text{MeV}$, valore diverso da quello dell'area efficace a $\sim 35\text{MeV}$: l'abbassarsi dell'efficienza del rivelatore ad alte energie viene compensato dalla crescita esponenziale del flusso.

Protoni Secondari



1. Flusso

Rispetto al caso dei primari il flusso presenta una minore variabilità e un andamento decrescente, con lo spettro che è ora dominato da particelle a bassa energia.

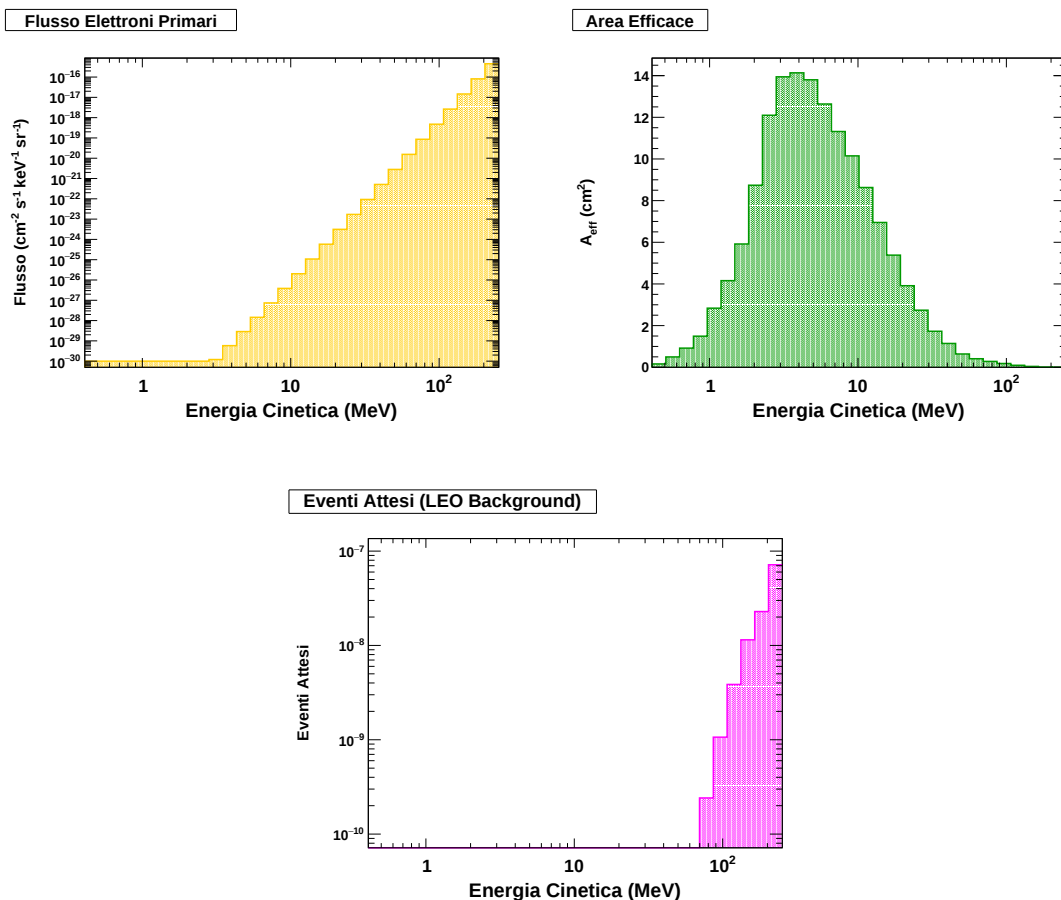
2. Area efficace media

Come nel caso precedente il picco si trova a ~ 35 MeV, ma questo è adesso in una zona dove il flusso è elevato. Si rilevano quindi più eventi e si ha un miglior contenimento e ricostruzione dei segnali.

3. Eventi attesi

Il picco di eventi è a ~ 35 MeV, allineato con la zona di massima efficienza, nettamente spostato rispetto a quello dei protoni primari. Si nota che lo spettro energetico è molto meno ripido del caso precedente, quindi la convoluzione fornisce un massimo vicino al picco di area efficace. Gli eventi attesi per 24 ore di osservazione sono ~ 50000 , superando i conteggi dei primari di diversi ordini di grandezza.

Elettroni Primari



1. Flusso

Aldilà dei numeri, lo spettro presenta un andamento estremamente ripido simile a quello dei protoni primari. Anche in questo caso sono molto rilevanti gli effetti di cut-off geomagnetico e solare.

2. Area efficace media

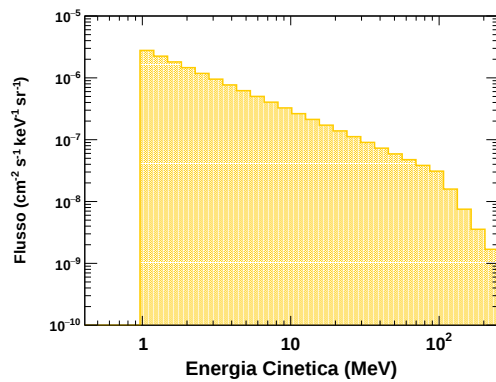
La zona di massima efficienza si trova a ~ 4 MeV, quindi spostato rispetto al caso dei protoni. Gli elettroni danno luogo a fenomeni di Bremsstrahlung generando sciame di fotoni e coppie e^-e^+ che possono fuoriuscire lateralmente o dal fondo, soddisfacendo meno frequentemente il taglio relativo al deposito di energia ($E_{dep} \geq 90\%$).

3. Eventi attesi

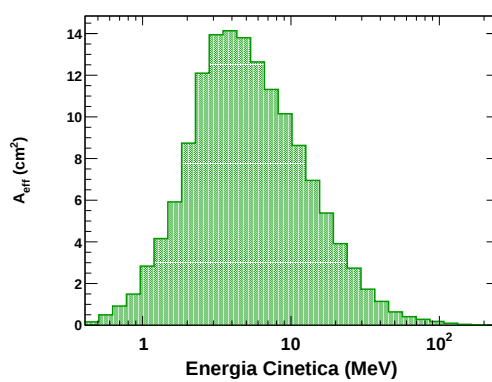
Dalla simulazione si ottiene una stima < 1 evento/giorno. La popolazione di elettroni primari è quindi trascurabile per il rivelatore Zirè, con un contributo quasi nullo.

Elettroni Secondari

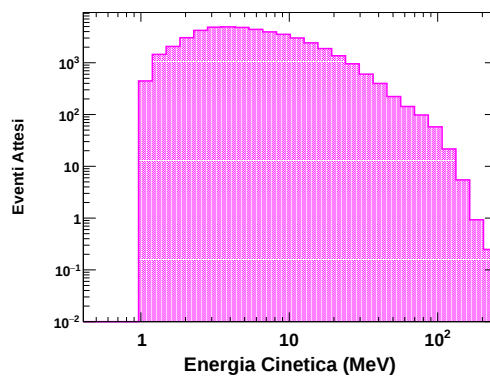
Flusso Elettroni Secondari



Area Efficace



Eventi Attesi (LEO Background)



1. Flusso

Presenta un andamento decrescente simile come nel caso dei protoni secondari, con valori significativi per energie > 1 MeV. Come nel caso dei protoni, il flusso dei secondari risulta dominante rispetto a quello dei primari.

2. Area efficace media

L'andamento è quasi identico a quello degli elettroni primari con un picco a ~ 4 MeV.

3. Eventi attesi

Gli eventi attesi per giorno sono ~ 49000 . Come nel caso dei protoni, le particelle secondarie attese risultano dominanti rispetto alle particelle primarie.

7. Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è investigato sulla performance del rivelatore Zirè attraverso simulazioni Montecarlo realizzate con Geant4, applicandola poi al caso di elettroni e protoni primari e secondari attesi in un ambiente orbitale realistico. Nel corso di un giorno medio nelle regioni senza particelle intrappolate si è ottenuto che:

- I raggi cosmici primari (sia protoni che elettroni) contribuiscono poco al numero di eventi, con meno di un evento al giorno atteso. Questo risultato è dovuto a una combinazione di flusso basso a queste energie e di un'area efficace limitata.
- Le particelle secondarie (albedo atmosferico) dominano completamente i conteggi attesi per giorno di osservazione. Si stimano circa 50000 eventi/giorno per i protoni secondari e 49000 eventi/giorno per gli elettroni secondari.
- Per i protoni secondari, si osserva che il picco di eventi attesi (~ 35 MeV) coincide con picco di area efficace del rivelatore, indicando che Zirè è ottimizzato per catturare questa componente. Per gli elettroni secondari si ha invece un picco a ~ 4 MeV, evidenziando la massima sensibilità del rivelatore a bassa energia.

In sintesi, il rivelatore Zirè è ottimizzato per lo studio di popolazioni di particelle secondarie in orbita bassa, cruciale per la comprensione dei fenomeni di accoppiamento Megnetosfera-Ionosfera-Litosfera. Sulla base di quanto fatto non è possibile discriminare tra primari e secondari, capacità che richiederà un'accurata analisi degli eventi e una corretta modellizzazione dell'elettronica di lettura, non inclusa in questo lavoro.

8. Futuri sviluppi

Nelle simulazioni realizzate si sono considerati solo i volumi sensibili attivi. L'analisi può essere approfondita integrando la risposta dell'elettronica di lettura (SiPM per il FTK, fotomoltiplicatori per il PST). Questo include: modellizzazione della saturazione dei sensori, introduzione del rumore elettronico e soglie di rilevazione realistiche. Possono inoltre essere aggiunti tutti quegli elementi strutturali che fanno parte dei volumi non sensibili (strutture meccaniche come telai e viti, cavi, connettori ed eventuali strati di materiale protettivo delle componenti elettroniche), che contribuiscono a fenomeni di scattering e assorbimento delle particelle incidenti prima del loro ingresso nei volumi sensibili. Questi elementi portano a una riduzione dell'efficienza del rivelatore, oltre che alla generazione di un fondo interno dovuto a processi secondari (es. backscattering).

In questa tesi è stato escluso il modulo LEM per semplicità computazionale. Una sua integrazione è cruciale per estendere la sensibilità di Zirè agli elettroni con energie < 7 MeV e per i protoni nella banda 3-50 MeV. L'inclusione del LEM nelle simulazioni permetterà inoltre di migliorare la stima dell'area efficace a basse energie, dove si sono viste le maggiori incertezze statistiche o limiti dovuti ai tagli, e di valutare meglio la capacità di separazione tra elettroni e protoni.

Le simulazioni qui realizzate utilizzano parametri di inclinazione orbitale e modulazione solare di comodo, escludendo il contributo delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen e l'Anomalia del Sud Atlantico (SAA). Una estensione importante di questo lavoro sarà quella di simulare il passaggio del satellite attraverso la SAA. Questo non serve tanto per la fisica MILC (i dati vengono solitamente scartati in quelle zone a causa dell'alto contributo di fondo), ma quanto per stimare effetti come i danni da radiazione cumulativa sui sensori (degradazione dei SiPM e degli scintillatori).

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Di Giovanni, M. Di Santo 2022 *PoS ICHEP2022* 354
- [2] O. Adriani et al (2014). *The PAMELA Mission: heralding a new era in precision cosmic ray physics*. Physics Reports Volume 544, 30 November 2014, pages 323-370. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.06.003>
- [3] M. Bertolotti (2013). *Celestial Messengers: Cosmic rays, the story of a scientific adventure*. Springer
- [4] A. De Angelis (2012). *L'enigma dei raggi cosmici*. Springer-Verlag Italia. ISBN 978-88-470-2046-7
- [5] M.S. Longair (2011). *High energy astrophysics* (3rd ed.). Cambridge University Press
- [6] <https://science.nasa.gov/asset/webb/cassiopeia-a-nircam-image/>
- [7] <https://opendata.auger.org/outreach.php>
- [8] M. Piersanti et al. 2020 Remote Sensing 12 3299.
- [9] P. Savina, A. Smirnov (2025). *The Ziré experiment on board of the NUSES mission*. EPJ Web of Conferences 319, 12009 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202531912009>
- [10] J. Allison et al. (2016). *Recent Developments in Geant4*. Nucl. Instrum. Meth. A 835 186-225
- [11] J. Allison et al. (2006). *Geant4 Developments and Applications*. IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 270-278
- [12] S. Agostinelli et al. (2003). *Geant4 – A Simulation Toolkit*. Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303
- [13] Geant4 Collaboration (2025). *Geant4 a simulation toolkit – Book For Application Developers*.
<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>
- [14] Di Giovanni et al., PoS ICHEP2024, 662

- [15] LEOBackground GitHub reference: <https://github.com/pcumani/LEOBackground>
- [16] P. Cumani, M. Hernanz, J. Kiener, V. Tatischeff, and A. Zoglauer. "Background for a gamma-ray satellite on a low-Earth orbit". Feb 2019. arXiv:1902.06944, doi:10.1007/s10686-019-09624-0
- [17] M. Aguilar et al. (AMS Collaboration) (2015). *Precision Measurement of the Proton Flux in Primary Cosmic Rays from Rigidity 1 GV to 1.8 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*. *Phys. Rev. Lett.* 114, 171103. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.171103>
- [18] M. Ackermann et al. (Fermi-LAT Collaboration) (2015). *The Spectrum of Isotropic diffuse Gamma-Ray Emission between 100 MeV and 820 GeV*. *ApJ* 799, 86. DOI:10.1088/0004-637X/799/1/86
- [19] T. Mizuno et al (2004). *Cosmic-Ray Background Flux Model Based on a Gamma-Ray Large Area Space Telescope Balloon Flight Engineering Model*. *ApJ* **614** 1113. DOI:10.1086/423801
- [20] Amoroso S. et al (2026). *Measurement of the re-entrant all-electron spectrum by the High-Energy Particle Detector on board the China Seismo-Electromagnetic Satellite*. *Astroparticle Physics*, volume 175, id.103170. [10.1016/j.astropartphys.2025.103170](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2025.103170)
- [21] M.F.Alonso et al., PoS(ICRC2023)139