



UNIVERSITÀ DEL SALENTO
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA
"ENNIO DE GIORGI"
Corso di Laurea in Fisica

TESI DI LAUREA

**Studio dell'influenza degli edifici sulla misura
dei raggi cosmici secondari con i telescopi del
Progetto EEE**

**Study of the influence of the buildings on
secondary cosmic rays measurements
performed with EEE Project telescopes**

Relatore:

Prof. Marco PANAREO

Co-relatore:

Dott.ssa Maria Paola PANETTA

Laureando:

Mara CAMPANA

Anno Accademico 2020/2021

Indice

Introduzione	III
1 Raggi cosmici	1
1.1 Storia	1
1.2 Caratteristiche della radiazione cosmica primaria	3
1.3 Sciami Atmosferici Estesi	5
1.3.1 La componente muonica	6
1.3.2 Variazioni del flusso al livello del mare	7
1.4 Rivelazione di sciami atmosferici estesi	8
1.4.1 I rivelatori scientifico/didattici	9
2 Il progetto EEE	11
2.1 Storia e organizzazione	11
2.2 Gli apparati di rivelazione	13
2.2.1 Gli MRPC del progetto EEE	13
2.2.2 Elettronica di lettura e ricostruzione delle tracce	16
2.2.3 Il sistema GPS	18
3 L'apparato di simulazione per l'esperimento EEE	19
3.1 Performance dei rivelatori	19
3.1.1 Risoluzione temporale	19
3.1.2 Risoluzione spaziale	20
3.1.3 Risoluzione spaziale longitudinale	21
3.1.4 Risoluzione spaziale trasversale	22
3.1.5 Efficienza	22
3.2 La simulazione	23
3.2.1 Il software	23
3.2.2 Risposta dei rivelatori	25
3.2.3 Validazione della simulazione	26
4 Studio delle stazioni LECC-01 e LECC-02	29
4.1 Primo confronto con i dati reali	31
4.2 Il telescopio LECC-01	38
4.2.1 Condizioni sperimentali reali	38
4.2.2 Geometria implementata	38
4.2.3 Discussione dei risultati	39
4.3 Il telescopio LECC-02	42
4.3.1 Condizioni sperimentali reali	42
4.3.2 Geometria implementata	43

4.3.3	Discussione dei risultati	44
Conclusioni		48
Bibliografia		48
Ringraziamenti		52

Introduzione

A poco più di un secolo dalla loro scoperta, numerose sono ancora le domande aperte che riguardano la fisica dei raggi cosmici. Gli studi finora condotti hanno permesso di ottenere informazioni sulle particelle costituenti, e di formulare ipotesi circa le loro sorgenti cosmiche. Le nostre conoscenze riguardo la componente altamente energetica dei raggi cosmici ($E > 10^{19}$ eV) sono ancora piuttosto carenti, in quanto non è possibile effettuare delle misure dirette ed il flusso che giunge a terra è estremamente ridotto. Lo studio della componente ad altissima energia è effettuata mediante la rivelazione degli Sciami Atmosferici Estesi, cascate di particelle che hanno origine dall'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera terrestre. Il basso flusso di tale componente richiede il dover distribuire le reti di rivelatori su superfici di diversi chilometri quadri per poter incrementare il numero di eventi osservati. Una rete sufficientemente estesa è in grado di rivelare un singolo sciame e di fornire informazioni sulla natura, l'energia e la direzione dei raggi cosmici primari; il sistema GPS garantisce che i rivelatori abbiano lo stesso riferimento temporale assoluto. In tale contesto si inserisce il progetto *Extreme Energy Events* (EEE), ideato da Antonino Zichichi, il cui scopo principale è quello di studiare la radiazione cosmica secondaria, in particolare la componente muonica, attraverso l'uso di rivelatori costituiti da tre MRPC (Multigap Resistive Plate Chambers) ciascuno. L'esperimento è costituito da una rete di rivelatori distribuiti in tutta Italia, dislocati all'interno di edifici scolastici, universitari e centri di ricerca. Per analizzare al meglio i dati acquisiti, è importante poter quantificare gli effetti dell'interazione della radiazione con questi edifici; a tal proposito, sono stati sviluppati degli strumenti per effettuare delle simulazioni adoperando il framework GEMC, basato su GEANT4. GEMC è equipaggiato con un generatore di eventi casuale che riproduce realisticamente la distribuzione dei muoni negli EAS (Extensive Air Showers) a livello del mare, e permette di fornire una descrizione dettagliata della geometria del rivelatore e dell'ambiente circostante, in modo da produrre dei dati il più possibile somiglianti a quelli sperimentali. In questa tesi si discute il confronto tra i dati ottenuti attraverso le simulazioni e quelli acquisiti dai telescopi LECC-01 e LECC-02 installati, rispettivamente, al Liceo Scientifico "G. Banzi Bazoli" ed al Liceo Classico e Musicale "G. Palmieri" della città di Lecce. Il primo capitolo si apre con una breve introduzione storica cui segue una descrizione della fisica alla base della

fenomenologia dei raggi cosmici. Nel secondo capitolo viene descritto il progetto EEE, illustrandone la storia, gli scopi scientifici, i rivelatori adoperati per studiare la radiazione cosmica ed il loro funzionamento. Il terzo capitolo fornisce una panoramica dei software usati per la simulazione ed nel quarto capitolo sono presentati i risultati degli studi condotti mettendo a confronto dati reali e dati simulati, focalizzando l'attenzione sulla risoluzione spaziale dei rivelatori e sulle variazioni delle distribuzioni angolari degli eventi in relazione all'ambiente che circonda i telescopi.

Capitolo 1

Raggi cosmici

I raggi cosmici sono costituiti da particelle cariche altamente energetiche, la cui origine è da ricercarsi in fenomeni che avvengono al di fuori dell'atmosfera. Tali particelle viaggiano attraverso il mezzo interstellare a velocità prossime a quella della luce e giungono sulla Terra da tutte le direzioni.

1.1 Storia

La scoperta dei raggi cosmici è attribuita allo scienziato austriaco Victor Hess, le cui ricerche ed esperimenti furono finalizzati al comprendere perchè un gas, tra cui l'aria, se racchiuso in un contenitore isolato, venga ionizzato ad opera di agenti esterni. Le prime osservazioni riguardo questo fenomeno furono compiute dal fisico francese Charles Augustine de Coulomb il quale, nel 1785, si accorse che un elettroscopio carico tende a scaricarsi spontaneamente. A seguito di queste osservazioni, Coulomb concluse che l'aria racchiusa nello strumento non funge da isolante per le foglioline metalliche. Quando, nel 1896, Becquerel scoprì il decadimento spontaneo degli elementi radioattivi, si ipotizzò che l'origine della ionizzazione dell'aria avvenisse ad opera della radiazione emessa dai minerali radioattivi distribuiti sulla superficie terrestre. Seguirono numerosi esperimenti volti a scoprire, ed eventualmente confermare, l'origine di tale ionizzazione. Colui che mise significativamente in dubbio la ionizzazione dell'aria ad opera dei minerali radioattivi della crosta terrestre fu il fisico italiano Domenico Pacini. A partire dal 1907, Pacini ideò ed eseguì degli esperimenti per misurare il tasso di ionizzazione, osservando delle variazioni tra le misure acquisite in montagna, sulla superficie del lago di Bracciano e sul mar Ligure. Sulla base dei risultati ottenuti, nel 1911 decise di immergere un elettroscopio nel mare, a circa 300 metri di distanza dalla costa di Livorno, e poi nel lago di Bracciano, misurando una significativa diminuzione della radioattività in profondità rispetto a quella rivelata in superficie e concluse per primo che l'origine della radiazione studiata non potesse essere la radioattività terrestre [1]. Nel 1912 Hess scoprì, a seguito di misure effettuate a bordo di palloni aerostatici inviati fino a 5 km di altezza nell'atmosfera, che la velocità di scarica di un elettroscopio si manteneva piuttosto bassa entro i primi 610 m in quota, per poi aumentare anche fino a quattro volte quella al livello del mare una volta giunti ad una quota di circa 5 km [2]. Hess concluse dunque che i risultati ottenuti potevano essere spiegati solo assumendo che una radiazione ad altissimo potere penetrante provenisse da una regione esterna all'atmosfera terrestre. Tale radiazione genera negli strati prossimi alla superficie del pianeta la ionizzazione osservata anche nei volumi di gas ritenuti isolati dall'ambiente esterno. I risultati di Hess furono confermati da W. Kolhorster nel 1929 [3], che eseguì misurazioni inviando palloni aerostatici

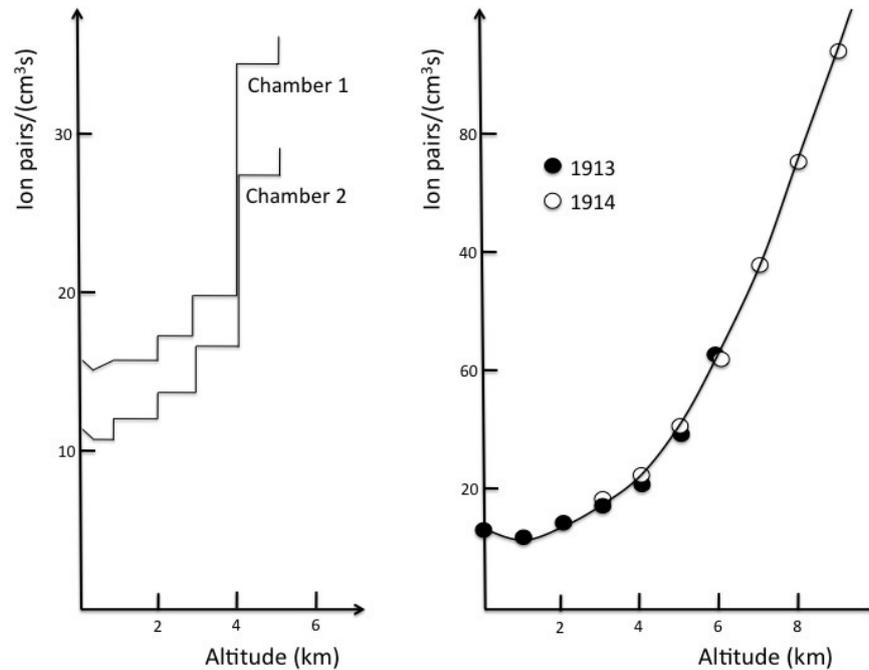


Figura 1.1: Incremento della ionizzazione all'aumentare dell'altitudine secondo le misurazioni di Hess nel 1912 (sinistra) e di Kolhorster nel 1913 e 1914 (destra).

fino a 9200 m di altitudine e vinse il Premio Nobel per la Fisica nel 1936 (Pacini era ormai morto) per la scoperta dei raggi cosmici.

Fu Robert Millikan [4], negli anni '20, ad attribuire alla radiazione il nome di "raggi cosmici" ed ipotizzare che i fasci primari di particelle fossero costituiti da raggi extraterrestri, già scoperti e noti per il loro potere penetrante. Arthur Compton propose, invece, che fossero costituiti da particelle cariche, e le sue ipotesi furono confermate da osservazioni sperimentali circa la variazione del flusso di raggi cosmici con la latitudine, indice del fatto che le loro traiettorie vengano deflesse dal campo magnetico terrestre [5].

Negli anni successivi, lo studio della radiazione portò a numerose scoperte nel campo della fisica particellare. Ricordiamo, fra queste, quella della particella e^+ (Anderson, 1932) [6], degli sciame (Rossi, 1933) [7], dei mesoni μ ed η (Anderson, 1937) [8], degli sciame estesi (Auger, 1938) [9], delle particelle Λ e K (1947) [10], della presenza nei raggi cosmici di nuclei più pesanti del nucleo d'idrogeno (1948) [11], del p^+ (1955) [12], dei lampi gamma (anni '70). Attualmente, la ricerca nel campo dei raggi cosmici è incentrata sullo scoprire quali fenomeni siano in grado di produrre e accelerare le particelle ad energie nell'intervallo $10^{15} \text{ eV} \leq E \leq 10^{20} \text{ eV}$, il cui flusso al livello del mare è troppo basso per poter effettuare delle misure dirette.

1.2 Caratteristiche della radiazione cosmica primaria

La composizione dei raggi cosmici varia con l'energia delle particelle considerate. Il suo studio permette di ricavare informazioni riguardo alle sorgenti e ad i possibili meccanismi di accelerazione alle diverse energie. L'intensità del flusso per energie fino a 10^{14} eV permette di effettuare misurazioni dirette inviando rivelatori in orbita su satelliti o su una stazione spaziale. Dagli spettrometri risulta che la componente particellare principale della radiazione cosmica primaria è costituita da adroni al 98%; fra questi, troviamo in prevalenza protoni ($\sim 87\%$) seguiti da nuclei di He ($\sim 12\%$) ed altri nuclei ($\sim 1\%$) [13]. La composizione rispecchia in parte l'abbondanza degli elementi nell'Universo, fatta eccezione per i nuclei di Li, Be, B, presenti in misura maggiore nei raggi cosmici rispetto a quanto si osserva riguardo alla composizione del mezzo interstellare. La sovrabbondanza di questi elementi suggerisce che essi vengano prodotti in processi di spallazione sui nuclei di carbonio presenti nel mezzo interstellare; lo stesso fenomeno, indotto dai raggi cosmici sui nuclei di Fe, spiegherebbe l'abbondanza degli elementi dal Ca al Fe. Cercare di comprendere tali differenze è uno degli scopi dello studio dei raggi cosmici.

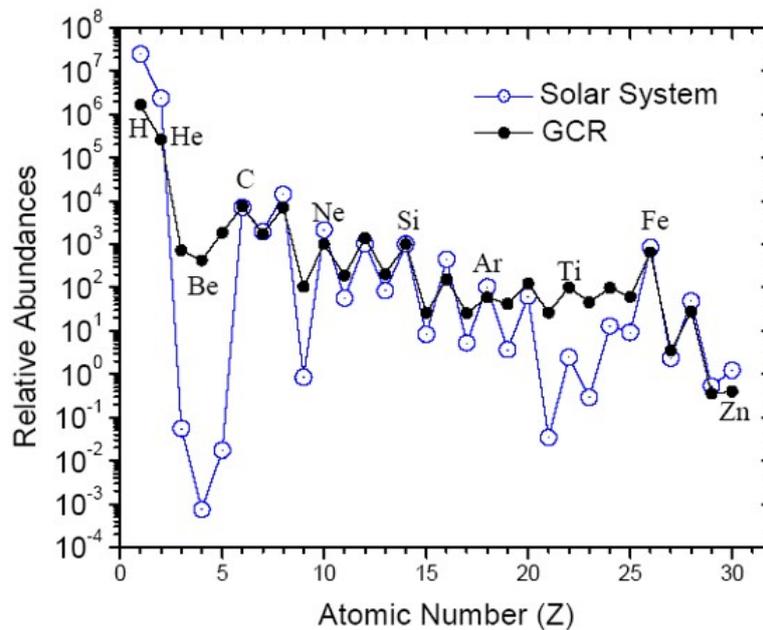


Figura 1.2: Composizione chimica dei raggi cosmici comparata a quella del mezzo interstellare. [14]

Lo spettro energetico dei raggi cosmici, definito come il numero di particelle che colpisce l'atmosfera terrestre in funzione della loro energia, varia per 11 ordini di grandezza in energia e circa 30 ordini di grandezza per quel che riguarda il flusso di particelle [15], ed è stato studiato attraverso numerosi esperimenti a partire dalle prime osservazioni. Lo spettro energetico, detto anche flusso differenziale $dN(E)/dE$ della radiazione cosmica, è descritto dalla legge:

$$\frac{dN(E)}{dE} = kE^{-\gamma}$$

In questa formula, γ è l'indice spettrale e varia nell'intervallo $2.5 \leq \gamma \leq 3.2$.

La figura 1.3 mostra le variazioni dell'andamento dello spettro al variare dell'energia E .

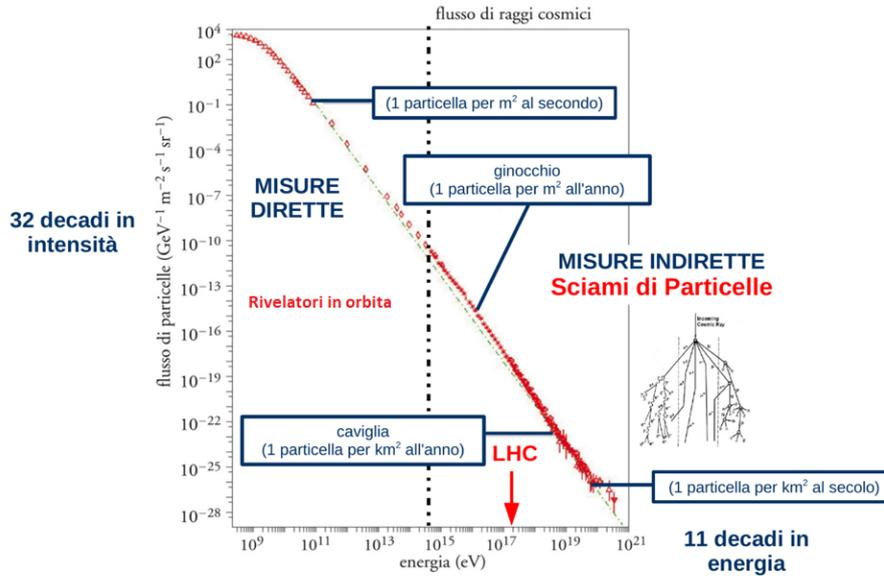


Figura 1.3: Spettro energetico dei raggi cosmici.

Possiamo individuare tre intervalli principali:

- Un primo intervallo fino ad $E \approx 10^{15} \text{eV}$ (detta *ginocchio*) con pendenza $\gamma \approx 2.7$. Si ipotizza che le sorgenti per particelle con energie in questo intervallo si trovino all'interno della nostra galassia, e che la variazione di γ in corrispondenza del ginocchio sia dovuta ad un cambiamento della composizione chimica dei raggi cosmici.
- Il secondo intervallo si ha per $10^{15} \text{eV} \leq E \leq 10^{19}$ (detta *caviglia*), con $\gamma \approx 3.1$. Il campo magnetico galattico risulta troppo poco intenso per confinare all'interno della Via Lattea le particelle con energie crescenti in questo intervallo; si ritiene che la *caviglia* rappresenti il confine tra la zona in cui predomina la componente di origine galattica dei raggi cosmici e quella in cui prevale la componente di origine extragalattica.
- Nel terzo intervallo si ha $E \geq 10^{19} \text{eV}$ con $\gamma \approx 2.7$.

La fonte di radiazione più vicina alla Terra è il Sole che, emettendo costantemente particelle attraverso il vento solare, fornisce un contributo ai raggi cosmici con energie fino a 10^{10}eV . Altre possibili sorgenti per raggi cosmici con energie al di sotto dei 10^{15}eV sono le esplosioni di supernovae, ipotesi validata da considerazioni circa la composizione chimica della radiazione osservata e di ciò che i modelli predicono venga emesso a seguito del collasso del nucleo di una stella. Per energie superiori, possibili candidati come sorgenti di raggi cosmici sono i *Gamma Ray Bursts* (GBRs) o gli *Active Galactic Nuclei* (AGN); questi ultimi sarebbero in grado di accelerare le particelle fino a $E_{max} \sim 10^{20} \text{eV}$, e rappresentano i candidati più probabili in quanto è stata riscontrata una correlazione fra la direzione di arrivo dei raggi cosmici altamente energetici e la posizione AGN nelle vicinanze. Lo studio dei raggi cosmici ad alta energia è di primario interesse, poiché tali particelle non subiscono significative deviazioni della loro traiettoria ad opera del debole campo magnetico che permea il mezzo interstellare. Ricostruire il percorso seguito dalle particelle per giungere sulla Terra, dunque, permetterebbe di individuare la posizione e la natura della sorgente; a tal fine, risulta importante considerare le caratteristiche del mezzo attraverso il quale la radiazione si propaga e comprendere i fenomeni che si verificano a seguito della reciproca interazione.

1.3 Sciame Atmosferici Estesi

I raggi cosmici primari non sono rilevabili, in maniera diretta, a livello del mare: quando interagiscono con l'atmosfera terrestre, generano una moltitudine di particelle secondarie a seguito delle collisioni con gli atomi di ossigeno ed azoto. Le cascate di particelle generate sono definite *Extensive Air Showers* (EAS) e sono tanto più estese quanto più è elevata l'energia della radiazione primaria che interagisce con gli atomi dell'alta atmosfera. Studiare la componente secondaria della radiazione rappresenta l'unico modo per ottenere informazioni sui raggi cosmici primari di elevatissima energia.

Nello studio degli EAS, particolare importanza rivestono l'analisi della distribuzione longitudinale e laterale dello sciame. La *distribuzione laterale* rappresenta la densità di particelle rilevate a terra in funzione della distanza dal vertice dello sciame. La *distribuzione longitudinale* rappresenta il numero totale N di particelle che compongono uno sciame ad una certa profondità atmosferica X . Tipicamente, l'andamento di questa variabile presenta un aumento fino ad un valore N_{max} ad una certa X_{max} .

Lo sviluppo di uno sciame è guidato principalmente da due meccanismi: la produzione di particelle tramite collisioni e i processi di decadimento. Questi ultimi diventano sempre più probabili ad ogni generazione poichè le particelle prodotte trasportano meno energia [16]. La radiazione primaria è costituita essenzialmente da protoni; a seguito dell'interazione con l'atmosfera, essi generano una cascata di mesoni π , carichi e neutri, mesoni K, neutroni, protoni e particelle Λ .

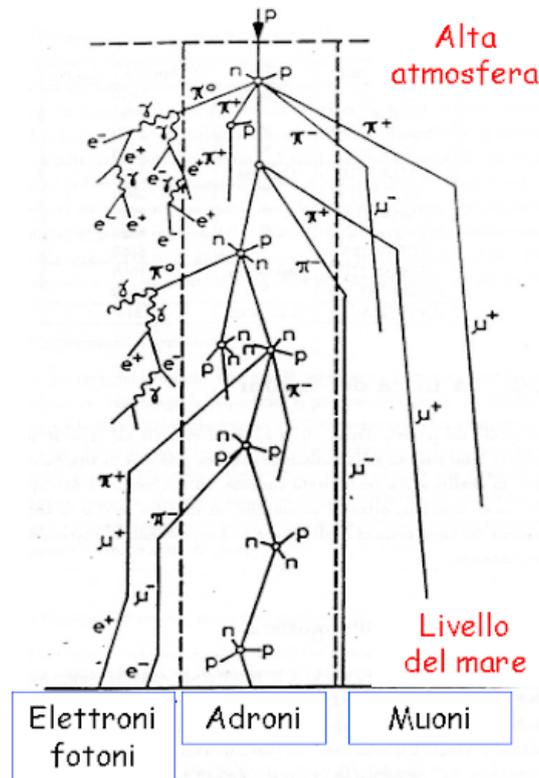


Figura 1.4: Schema dello sviluppo di uno sciame atmosferico esteso. Sono illustrate le componenti principali e la loro origine.

I mesoni π non sono particelle stabili e seguono questi tre principali canali di decadimento:

- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Circa il 90% dell'energia del primario è spesa nella produzione di "cascate elettromagnetiche", originate dal decadimento dei π^0 . La loro composizione è costituita essenzialmente da elettroni, positroni e fotoni che generano, a loro volta, altre cascate, facendo sì che il processo si autoalimenta e che le particelle elencate siano quelle presenti in maggior numero in uno sciame. La restante energia è trasportata dai muoni e neutrini derivanti dal decadimento dei pioni carichi.

1.3.1 La componente muonica

Circa il 5% delle particelle di uno sciame sono muoni μ , particelle leptoniche con una vita media $\tau_\mu \approx 2,2 \times 10^{-6} s$; essi decadono in $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$. I muoni vengono prodotti nell'alta atmosfera ed emessi nella direzione di volo del mesone che li ha originati. Poichè non risentono dell'interazione forte, viaggiano attraversando l'atmosfera pressochè indisturbati (costituiscono una radiazione ad alto potere penetrante) e la loro traiettoria punta verso il punto in cui sono stati generati. I muoni si propagano a velocità prossima a quella della luce, e questo causa una dilatazione del tempo di vita medio grazie ad effetti relativistici di dilatazione temporale. Muoni di energie dell'ordine del GeV hanno, infatti, lunghezza di decadimento pari a 10 km (profondità dell'atmosfera). Un muone con energia di 3 GeV ha una lunghezza di decadimento pari a 20 km. I muoni possono, perciò, attraversare l'intera atmosfera senza decadere o essere riassorbiti e raggiungere il livello del mare, dove costituiscono la componente carica dominante della radiazione secondaria [17]. Si osserva che, una volta raggiunto N_{max} dello sciame, il numero di muoni rivelati decresce molto lentamente, come si può osservare in figura 1.5: gli effetti di dilatazione temporale impediscono loro di decadere, ed è poco probabile che essi interagiscano con altre particelle. Inoltre, il valore massimo della distribuzione longitudinale dipende principalmente dall'energia della particella primaria, pertanto il numero di muoni rivelati al livello del mare può essere usato per stimare l'energia della radiazione primaria [13] e sono in corso studi incrociati fra la distribuzione longitudinale e l'energia della radiazione primaria per determinarne la specie della particella che origina lo sciame.

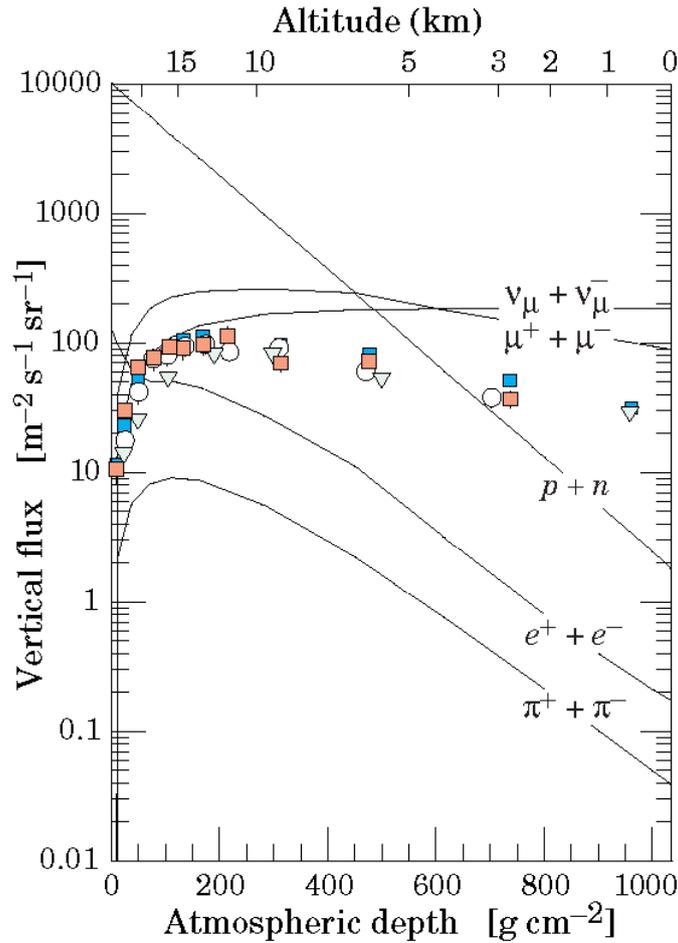


Figura 1.5: Flusso verticale in atmosfera di raggi cosmici con $E \geq 1$ GeV in funzione dell'altitudine. I punti indicati nel grafico rappresentano i dati reali, le linee continue relative a particelle differenti sono ottenute mediante simulazioni.

1.3.2 Variazioni del flusso al livello del mare

Il flusso dei muoni al suolo ha un andamento proporzionale a $\sin\theta$, dovuto alla sostanziale isotropia del flusso dei raggi cosmici, ed a $\cos^2\theta$, dovuto alla perdita di energia nell'atmosfera per ionizzazione, ove θ rappresenta l'angolo zenitale. Il flusso di particelle subisce, al livello del mare, variazioni periodiche ed aperiodiche ad opera di diversi fattori.

Modulazione solare

Nel 1937, Scott E. Forbush realizzò che all'aumentare dell'attività solare e delle espulsioni di massa coronali è associato un decremento intorno al 5% dell'intensità del flusso dei raggi cosmici con momento intorno ad 1 GeV/nucleone ed alle elevate altitudini. Il flusso è fortemente modulato dall'interazione delle particelle con il campo magnetico associato al vento solare in espansione. Il plasma magnetizzato in espansione generato dal Sole decelera ed impedisce parzialmente, alle particelle a bassa energia, di raggiungere le zone più interne del Sistema Solare. Pertanto, la componente del flusso di raggi cosmici a bassa energia che raggiunge la Terra è soggetta a variazioni considerevoli associate all'incremento o decremento dell'attività

solare. Tale fenomeno è noto come *modulazione solare*, ed influenza il flusso delle particelle con energie fino a circa 20 GeV.

Effetti geomagnetici

Le particelle cariche di origine cosmica con momento al di sotto del GeV sono guidate verso l'atmosfera dal campo magnetico terrestre. L'intensità della componente della radiazione cosmica a bassa energia dipende quindi dal luogo e dal tempo. Per alcune variazioni della configurazione del campo magnetico, esistono regioni dello spazio che non vengono raggiunte da particelle con energie al di sotto di una certa soglia. Le particelle a bassa energia vengono schermate dal campo, e non riescono a raggiungere l'atmosfera terrestre viaggiando attraverso la magnetosfera. Il campo magnetico terrestre esercita il suo effetto maggiore sui muoni che arrivano al livello del mare con energie fino a ~ 5 GeV. L'effetto aumenta con l'altitudine. I raggi cosmici primari con energie al di sotto dei 60 GeV subiscono l'effetto del campo magnetico terrestre, che induce anisotropie nel flusso osservato. Questo fenomeno è noto come *effetto di latitudine* [5]. Poiché i raggi cosmici primari sono prevalentemente costituiti da particelle cariche positivamente, il flusso di particelle provenienti da Est è, inoltre, molto più basso rispetto a quello delle particelle provenienti da Ovest. Questo fenomeno, osservato per la prima volta intorno al 1930, è noto come *effetto Est-Ovest* e fu fondamentale per inferire il segno della carica dei raggi cosmici primari.

Effetti meteorologici

Variazioni locali di temperatura e pressione sui siti dove sono installati i rivelatori, dal livello del mare fino alla quota dove sono prodotti pioni e kaoni, producono fluttuazioni dell'intensità del flusso che variano con l'energia delle particelle. L'effetto più importante per i muoni altamente energetici è la variazione stagionale del flusso. Alle basse energie, ad influenzare l'intensità del flusso concorrono anche fenomeni di assorbimento. L'intensità delle particelle può essere approssimata come una funzione esponenziale della pressione:

$$I = I_0 \exp[-\beta(P - P_0)]$$

Per piccole variazioni della pressione si può considerare la correzione al primo ordine $\Delta I = -\beta \Delta P$ [13].

1.4 Rivelazione di sciami atmosferici estesi

L'estensione spaziale degli sciami sulla superficie terrestre dipende fortemente dall'energia del primario che li ha prodotti: maggiore l'energia del primario, più risulta estesa l'impronta dello sciame generata dalle particelle che raggiungono il suolo. Per studiare gli eventi ad altissima energia è dunque necessario creare reti di rivelatori (*array*) disposti su superfici molto ampie che studino le correlazioni temporali e spaziali tra le particelle rivelate al suolo. Tali studi hanno un duplice obiettivo: ottenere informazioni sui meccanismi di produzione dei raggi cosmici e sulle dinamiche della propagazione della radiazione primaria attraverso il mezzo interstellare. L'esperimento più esteso che studia la componente ad altissima energia dei raggi cosmici è l'*Osservatorio Pierre Auger* [18]. Sito in Malargue (Argentina), AUGER copre un'area di 3000 km^2 ed è costituito da 1600 rivelatori Cherenkov, (taniche contenenti acqua ultrapura, ciascuna equipaggiata da tre fotomoltiplicatori) disposti secondo una griglia triangolare ad una distanza media 1,5 Km, supportati da 24 telescopi a fluorescenza. Poter osservare lo stesso

evento in due modi diversi permette di ridurre gli errori sistematici associati ai singoli rivelatori e ridurre le incertezze nella ricostruzione dell'energia. Quando una particella dello sciame secondario attraversa l'acqua nelle taniche genera luce per effetto Cherenkov, che viene rivelata dai fotomoltiplicatori. Ogni stazione è dotata di un modulo GPS che consente di calcolare con alta precisione il tempo di arrivo delle particelle. Confrontando il segnale ed il tempo di arrivo dello sciame in ogni stazione è possibile ricostruire la direzione di arrivo del raggio cosmico primario e la sua energia. I rivelatori di fluorescenza monitorano il cielo sovrastante l'osservatorio e osservano la debole luce ultravioletta che viene emessa dagli atomi dell'atmosfera quando vengono eccitati dalle particelle dello sciame. Essendo l'intensità della luce proporzionale al numero di particelle nello sciame è possibile studiarne il progredire nella discesa verso il suolo (il "profilo longitudinale"). Questo tipo di osservazione permette di determinare l'energia del primario ed il punto in cui viene raggiunto il numero massimo di particelle, parametro che permette di determinare la specie del raggio cosmico primario. Il sistema GPS consente di correlare temporalmente le informazioni dei singoli rivelatori, ed incrociando le informazioni acquisite dai due tipi di rivelatori è possibile dedurre le proprietà principali dello sciame e del raggio primario che lo ha generato. Un altro esempio è stato l'array AGASA [19], sito ad Akeno, in Giappone, costituito da rivelatori a scintillazione distribuiti su una superficie di circa 100 Km^2 . Tra gli osservatori che hanno rivelato gli eventi di maggior energia ($E \leq 10^{20} \text{ eV}$) [18] [19], oltre ad AUGER e ad AGASA vi è stato anche HiRes [20], un osservatorio composto da due siti installati nel US Army Dugway Proving Ground, situato nei pressi di Dugway in Utah (Usa), in funzione dal 1997 al 2006, gestito dall'Università dello Utah, con una partecipazione giapponese e australiana. HiRes e AUGER presentano dati più coerenti tra loro rispetto a quelli di AGASA (ma si ritiene che i dati acquisiti da quest'ultimo siano affetti da errori sistematici).

1.4.1 I rivelatori scientifico/didattici

La necessità di coprire vaste aree di territorio con i rivelatori è dovuta al flusso estremamente basso, al livello del mare, di raggi cosmici estremamente energetici. L'avvento del GPS ha permesso di risolvere il problema della sincronizzazione dei telescopi, permettendo ai singoli elementi di lavorare come un unico grande dispositivo. Aree densamente popolate rappresentano i luoghi ideali dove posizionare i rivelatori, poichè in queste zone sono teoricamente accessibili con facilità le infrastrutture necessarie al funzionamento dei telescopi ed una buona connessione ad internet. Gli istituti scolastici rappresentano degli ottimi candidati come siti per i rivelatori in quanto la distanza media fra gli edifici è quella ottimale per una rete di telescopi efficiente, pari a circa 1 Km. Alunni ed insegnanti possono, inoltre, essere facilmente coinvolti nei processi di installazione e manutenzione dei telescopi, consentendo di svolgere al contempo attività didattica, divulgazione scientifica ed attività di ricerca di buona qualità contenendo i costi. Nel mondo vi sono numerosi esempi di reti didattiche di rivelatori per lo studio dei raggi cosmici; la prima rete che coinvolse gli istituti scolastici fu ALTA (*Alberta Large-scale Time-coincidence Array*) [21], progetto presentato nel 1995, che installa nelle singole scuole gruppi di tre o più scintillatori plastici separati da una distanza di circa 10 m. Attualmente, ALTA fa parte di un consorzio di gruppi di ricerca che comprende altre reti didattiche distribuite fra il Canada e gli Stati Uniti; è interessante notare come alcune di queste reti utilizzino scintillatori e fotomoltiplicatori originariamente appartenenti all'esperimento CASA (*Chicago Air Shower Array*), oramai in disuso. Esperimenti per lo studio di raggi cosmici ad alta energia che coinvolgono gli istituti scolastici sono presenti anche in Europa. Il primo esperimento di questo tipo è Sky-View (Nord Reno-Vestfalia, Germania) [22]; nato nel 2001, prevede una rete di rivelatori con un'estensione di circa 5000 Km^2 costituita da gruppi di quattro scintillatori

e relativi fotomoltiplicatori installati su edifici pubblici ed istituti scolastici. Altri esempi sono il progetto SEASA (Stoccolma, 2002) [23], le cui stazioni di rivelazione sono costituite da tre scintillatori plastici piani posizionate su alcuni istituti scolastici e HiSPARC [24], esperimento composto da un centinaio di stazioni distribuite su tutto il territorio olandese, costituite da coppie di scintillatori plastici piani. Il progetto CZELTA (*CZech Large-area Time coincidence Array*) [25], sviluppato nel 2004, presenta analogie con il progetto ALTA [26] in quanto le stazioni di rivelazione sono costituite da tre scintillatori plastici piani $60 \times 60 \text{ cm}^2$ disposti ai vertici di un triangolo equilatero di lato 10 m. Obiettivo comune del progetto ALTA/CZELTA è quello di indentificare una correlazione fra i tempi di arrivo al suolo degli sciame atmosferici estesi su grandissime distanze.



Figura 1.6: Una delle stazioni ALTA in Canada; gli involucri bianchi contengono gli scintillatori.

In territorio asiatico è invece attivo l'esperimento LAAS (*Large Area Air Shower*), costituito da un insieme di array compatti, diffusi sul territorio Giapponese, installati sui tetti di edifici ed istituti universitari. Gli array sono tipicamente costituiti da otto scintillatori plastici di dimensioni $50 \times 50 \text{ cm}^2 \times 5 \text{ cm}$. Obiettivo di LAAS è lo studio della composizione dei raggi cosmici ultra energetici. L'analisi dei dati raccolti sugli EAS sincronizzando temporalmente gli array con il sistema GPS ha permesso di determinare lo spettro energetico integrale degli EAS e di individuare correlazioni temporali tra sciame originati in punti diversi dell'atmosfera [27]. Progetto ambizioso, che si propone di mettere in realazione i dati raccolti dai vari esperimenti attualmente attivi per lo studio dei raggi cosmici è il progetto CREDO (*Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory*) [28], dedicato all'osservazione ed allo studio dei raggi cosmici ed agli *ensemble* di raggi cosmici, ovvero gruppi di almeno due raggi cosmici che hanno in comune il vertice di interazione primario o la stessa particella genitore. La collaborazione si propone di testare le attuali conoscenze riguardo la fisica dei raggi cosmici, mettendole eventualmente in discussione attraverso nuove scoperte, e si prepara ad osservare eventi che possano mettere in evidenza processi fisici nuovi ed inaspettati, riguardanti soprattutto le questioni aperte circa l'origine dei raggi cosmici e la composizione della materia oscura [29].

Capitolo 2

Il progetto EEE

Il progetto Extreme Energy Events è un esperimento di Fisica astroparticellare che studia gli sciami atmosferici estesi attraverso l'osservazione della loro componente muonica a livello del mare. L'estensione degli sciami originati dall'interazione con l'atmosfera della radiazione primaria altamente energetica è tale da richiedere che i rivelatori siano disposti in modo da ricoprire una superficie più ampia possibile. Per questo l'esperimento è costituito da numerose stazioni, distribuite su tutto il territorio italiano più il CERN, a Ginevra. I rivelatori usati sono *telescopi* poichè in grado di ricostruire la direzione di arrivo delle particelle rivelate, per la maggior parte muoni. I telescopi del progetto EEE sono costituiti da tre rivelatori MRPC (*Multigap Resistive Plate Chambers*) che permettono una buona ricostruzione delle tracce dei muoni grazie alla risoluzione spaziale e temporale che li caratterizza.

2.1 Storia e organizzazione

Il progetto, ideato da Antonino Zichichi, è stato presentato nel 2004 al MIUR e, ad oggi, vede la collaborazione del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche "Enrico Fermi" [31][30] che ne coordina le attività, dell'INFN (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*) che si occupa della gestione e ricostruzione dei dati presso il CNAF (*Centro Nazionale Analisi Fotogrammi*) e del CERN (*European Council for Nuclear Research*), quest'ultimo con il compito di coordinare la costruzione delle camere.

L'intero array è costituito da più di 60 rivelatori dislocati fra gli istituti scolastici di tutta Italia, il CERN di Ginevra e le sedi dell'INFN. I telescopi sono distribuiti quindi su una superficie di circa $3 \times 10^5 \text{ Km}^2$ e formano una rete che si estende dalla città di Catania sino al CERN di Ginevra, come mostrato in figura 2.1 [32][33]. La rete è organizzata nel modo seguente: in alcuni casi si hanno "cluster" di telescopi nella stessa città, posti ad una distanza che varia da 15 m a qualche chilometro; le restanti stazioni sono collocate a centinaia di Km di distanza l'una dall'altra in modo da aumentare l'estensione dell'array. Questa distribuzione dei rivelatori permette ai telescopi di lavorare in modi differenti:

- come rivelatori indipendenti, i telescopi sono in grado di ricostruire con grande precisione le tracce dei muoni, la direzione d'arrivo, il flusso di particelle ed il modo in cui questo viene influenzato dai parametri ambientali;
- come gruppo locale limitatamente alla stessa area urbana, con l'obiettivo di studiare le proprietà dell'EAS di cui fanno parte i muoni rivelati;

- come array con l'obiettivo, reso possibile dall'uso del sistema GPS, di studiare le correlazioni temporali su larga scala fra EAS originati dallo stesso meccanismo.



Figura 2.1: Distribuzione dei rivelatori (punti evidenziati in rosso ed arancione) del progetto EEE. I siti evidenziati in blu individuano gli istituti scolastici non provvisti di telescopio che partecipano al progetto.

I dati raccolti da ciascun telescopio sono inviati al CNAF, dove vengono ricostruiti e resi disponibili per le analisi [34]. Dal 2004 al 2017, il progetto ha registrato un incremento notevole del numero di rivelatori collocati negli istituti scolastici e nelle sedi dell'INFN, diventando in questo modo la più grande e longeva rete di telescopi basata sulla tecnologia degli MRPC. Oltre ai 47 istituti attualmente equipaggiati con i rivelatori, altri 54 hanno aderito al progetto, e gli studenti delle varie scuole partecipano alla manutenzione dei telescopi, eseguono giornalmente controlli sulle tensioni di alimentazione, monitorano l'efficienza delle camere ed analizzano i dati disponibili. Studenti ed insegnanti ricevono la formazione necessaria attraverso la partecipazione a seminari, workshop e masterclass, grazie ai quali possono affacciarsi alla comunità scientifica e comprendere come funzionino realmente la progettazione, lo sviluppo e l'esecuzione di un esperimento scientifico. La distribuzione dei rivelatori in edifici permette di studiare sul campo la robustezza delle camere e l'andamento temporale delle performance. Dal 2014 al 2019, il progetto ha eseguito dei "Run" programmati, durante i quali sono stati rivelati circa 97×10^9 muoni [35][36][37].

Tabella 2.1: Statistiche relative ai Run programmati, da Pilot Run a Run 5.

	Telescopi attivi	Inizio	Fine	Durata	Tracce/giorno
Pilot Run	15	27/10/2014	14/11/2014	19 giorni	$\sim 27 \times 10^6$
Run 1	28	27/02/2015	30/04/2015	63 giorni	$\sim 53 \times 10^6$
Run 2	38	07/11/2015	20/05/2016	196 giorni	$\sim 69 \times 10^6$
Run 3	46	01/11/2016	31/05/2017	212 giorni	$\sim 85 \times 10^6$
Run 4	53	02/10/2017	30/05/2018	241 giorni	$\sim 76 \times 10^6$
Run 5	59	15/10/2018	31/05/2019	229 giorni	$\sim 94 \times 10^6$

2.2 Gli apparati di rivelazione

Lo studio degli EAS nell'ambito del progetto EEE richiede che la tecnologia di base dei rivelatori soddisfi determinate caratteristiche. Gli MRPC che costituiscono i telescopi sono infatti studiati specificatamente per combinare elementi che garantiscono semplicità in fase di assemblaggio, una buona risoluzione spaziale e temporale per una accurata ricostruzione delle tracce dei muoni, costi relativamente bassi di produzione e manutenzione al fine di produrre un gran numero di telescopi da far operare a lungo nel tempo, facile reperibilità e sicurezza dei materiali costituenti, per permettere agli studenti di contribuire al progetto in maniera attiva e senza rischi.

2.2.1 Gli MRPC del progetto EEE

Le camere MRPC nascono come evoluzione degli RPC (*Resistive Plate Chambers*), con lo scopo di migliorarne la precisione e l'efficienza, per soddisfare le richieste del sistema di tempo di volo (*Time of Flight*, "TOF") dell'esperimento ALICE all'LHC. Gli RPC sono costituiti da due elettrodi piani in bachelite grafitata paralleli fra loro, tenuti ad una distanza di pochi millimetri per mezzo di spaziatori in materiale isolante, ai quali viene applicata una tensione fra i 10 KV e i 12 KV. La regione intermedia è riempita con una opportuna miscela di gas, che viene ionizzato a seguito del passaggio attraverso il rivelatore di una particella carica. I dispositivi di lettura del segnale sono costituiti da una serie di strisce conduttive in rame, stese per tutta la lunghezza dei due piani. L'interazione gas-particella genera una ionizzazione a valanga che produce un impulso elettromagnetico rilevato dalle strisce, dove viene raccolto e trasmesso ad un sistema di lettura ed elaborazione. Lo svantaggio di questi dispositivi risiede nell'impossibilità di controllare opportunamente lo sviluppo della scarica nel gas, e questo è causa di elevata incertezza nella determinazione del punto in cui la radiazione primaria ha interagito col rivelatore. Gli MRPC superano questo problema poiché l'intero spessore della camera è suddiviso in 6 gap intermedi dello spessore di $300 \mu\text{m}$ da cinque vetri, la cui separazione è realizzata mediante del filo da pesca teso fra gli estremi della camera secondo una fitta trama per garantire una spaziatura omogenea.

La tensione è applicata a due pannelli di vetro esterni trattati con una opportuna vernice resistiva che permette di distribuire uniformemente il campo elettrico all'interno del volume sensibile di gas che essi racchiudono. Questi ultimi due piani in vetro costituiscono l'anodo e il catodo, e sono a contatto con un foglio di Mylar steso su un piano di vetronite di pari superficie, all'esterno del quale sono posizionate 24 strisce di rame ($180 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$ poste a distanza di 7 mm l'una dall'altra). Questo nucleo interno viene fissato a due piani rigidi di materiale con struttura a nido d'ape, che conferisce stabilità alla struttura, ed il tutto è racchiuso in una scatola di alluminio a tenuta stagna ($200 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ esterno, $192 \text{ cm} \times 92 \text{ cm}$ interno). Alle estermità dei lati lunghi sono posti i connettori delle alte tensioni e gli innesti dei tubi

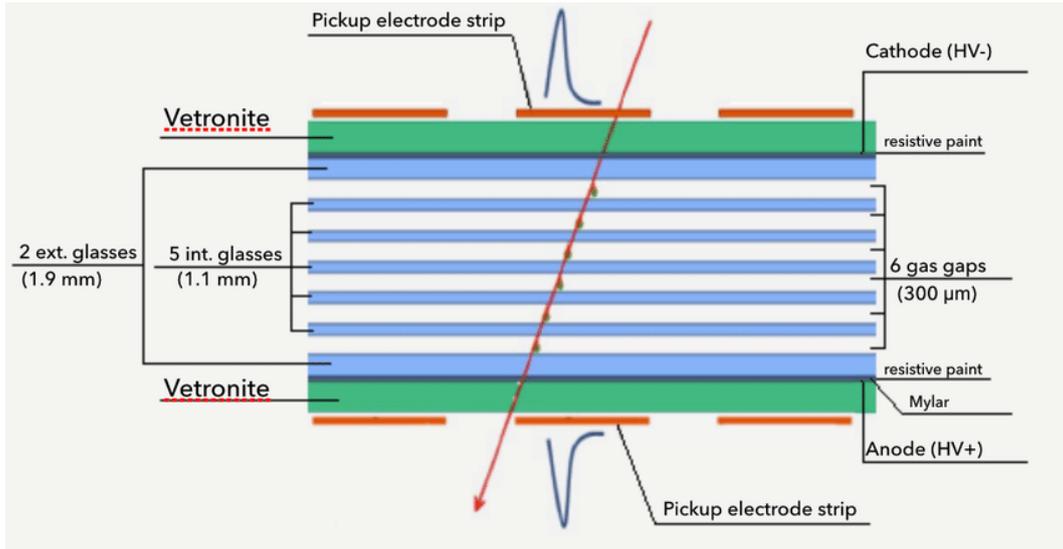


Figura 2.2: Struttura interna di un MRPC [35].

di ingresso e uscita del gas, mentre sui lati corti sono montate le schede di lettura dei segnali raccolti dalle strisce (FEA), come mostrato in figura 2.3. Le specifiche dimensioni dei vari strati di materiale sono riassunte nella tabella 2.2.

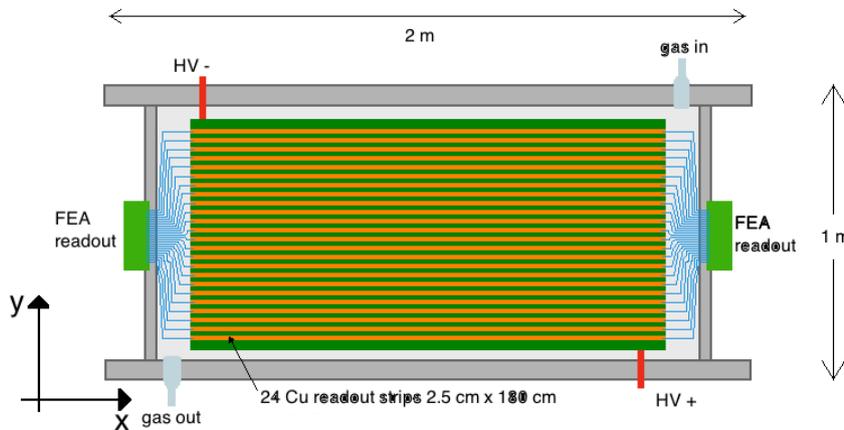


Figura 2.3: Vista superiore di un MRPC e relativi connettori [35].

I telescopi del progetto EEE sono costituiti da tre camere MRPC, disposte secondo una geometria a piani paralleli, fissate ad una opportuna struttura di supporto. Le camere dei telescopi LECC-01 e LECC-02 sono posizionate ad una distanza reciproca di 50 cm. Dati i parametri geometrici delle camere e la loro distanza reciproca, l'angolo solido visto dal telescopio è pari a 2.23 sr. Le tracce delle particelle si ricostruiscono determinando le coordinate orizzontali dei punti d'impatto sulle tre camere [35]:

- la coordinata y è individuata dalla striscia, o dalla coppia di strisce adiacenti, su cui il segnale viene indotto.
- La coordinata x è determinata misurando la differenza tra i tempi di arrivo del segnale ai capi di una singola striscia (ponendo l'origine delle misure nel centro della stessa),

Tabella 2.2: Specifiche dei piani degli MRPC [13][15].

Dimensioni dei piani degli MRPC				
Materiale	Numero piani	Lunghezza (cm)	Larghezza (cm)	Spessore (mm)
Vetronite	2	180	90	1.5
Mylar	2	180	90	0.16
Vetro Esterno	2	160	85	1.9
Vetro interno	5	158	82	1.1
Intercapedine gas	6	182	90	0.3
Nido d'ape	2	182	90	15
Spessore area attiva				14.42
Spessore tot. rivelatore				44.42

secondo la formula:

$$x_i = v_{drift} \frac{t_{left} - t_{right}}{2}$$

$v_{drift} \simeq 15.8$ cm/ns è la velocità di propagazione del segnale lungo le strisce.

Avere un punto di incidenza su ciascuno dei tre piani permette di ricostruire con precisione la traiettoria della particella. Il segnale, inviato tramite le strisce all'elettronica di lettura, è dato dalla somma dei singoli segnali generati in ogni gap all'interno delle tre camere. La suddivisione in gap permette di smorzare le scariche, migliorando la precisione con cui vengono determinati i punti d'impatto. Un ruolo fondamentale nello smorzamento è giocato dalla miscela di gas utilizzata, che deve garantire alti valori di densità di ionizzazione primaria per ottenere un buon guadagno di segnale al passaggio delle particelle, e deve inoltre garantire che non si generino scariche incontrollate che potrebbero danneggiare il rivelatore. La miscela ottimale contiene gas elettronegativi, capaci di catturare gli elettroni prima che raggiungano gli elettrodi, diminuendo in tal modo le dimensioni della scarica. Si è optato per una miscela di Freon ($C_2F_4H_2$) e SF_6 come gas elettronegativo, in percentuali rispettivamente del 98% e 2%, iniettati nelle camere ad una pressione pari a quella atmosferica.

2.2.2 Elettronica di lettura e ricostruzione delle tracce

La tensione necessaria per il funzionamento degli MRPC e dell'elettronica di acquisizione e lettura è fornita da coppie di alimentatori/convertitori DC-DC montati direttamente alle estremità dei lati lunghi delle camere. Entrambi ricevono in ingresso una tensione nell'intervallo $[0 \div 5]$ V e forniscono linearmente in uscita una tensione compresa tra $[0 \div 10]$ KV per l'alimentatore positivo e tra $[-10 \div 0]$ KV per quello negativo. Le coppie di schede FEA, disposte sui lati corti di ciascuna camera, ricevono in ingresso i segnali raccolti dalle 24 strisce che costituiscono gli elettrodi di lettura (anodici e catodici). Poichè ogni camera è provvista di 24 strisce sui piani esterni, in totale vengono raccolti 144 segnali.

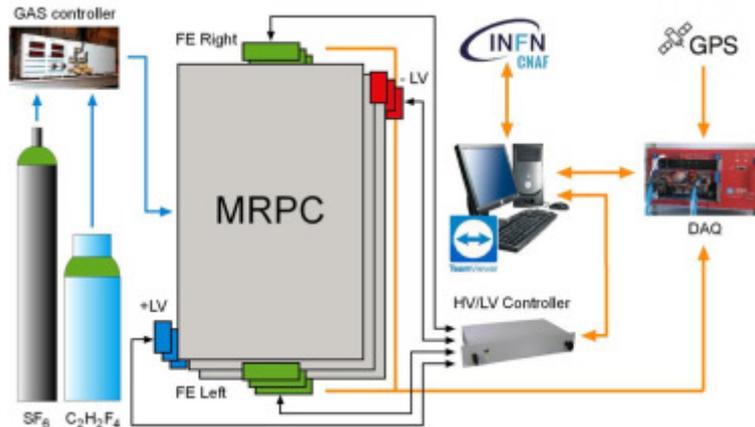
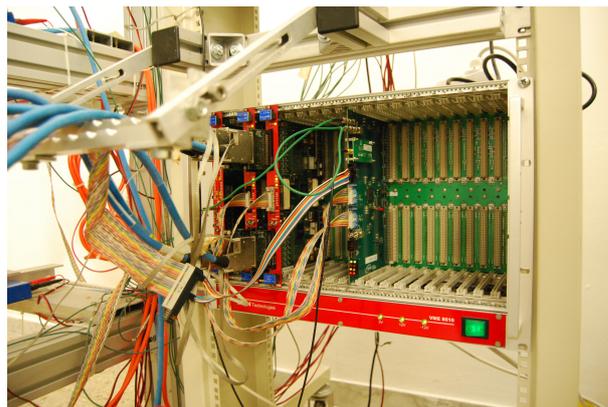


Figura 2.4: Schema del sistema di acquisizione di una stazione EEE [38].

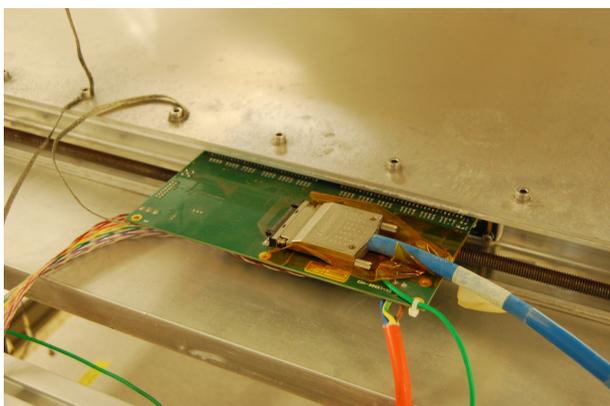
Le FEA producono in uscita 24 segnali, che vengono trasmessi ad un TDC (*Time to Digital Converter*) alloggiato in un *crate* VME e, in aggiunta, ciascuna delle schede genera l'OR tra i 24 canali e lo invia alla scheda di *trigger*; quest'ultima esegue preliminarmente l'AND fra gli OR provenienti dalla stessa camera (destra e sinistra), procede effettuando l'AND complessivo delle uscite delle tre camere, ed invia il segnale alla scheda di trigger. Nel caso di coincidenza tra i tre segnali (*tripla*), la scheda di trigger abilita la lettura dei 144 canali da parte del TDC. Nel *crate* è inserita anche un'unità GPS, che fornisce l'informazione temporale da associare a ciascun evento rilevato dal telescopio. Il segnale di trigger inviato al TDC è l'OR tra il segnale di tripla degli eventi delle camere ed il segnale temporale (1 PPS) proveniente dal GPS. Un ulteriore modulo, il VME *bridge*, gestisce tutte le operazioni che avvengono nel *crate* e consente la connessione del sistema di acquisizione col PC tramite porta USB [13][15][38].



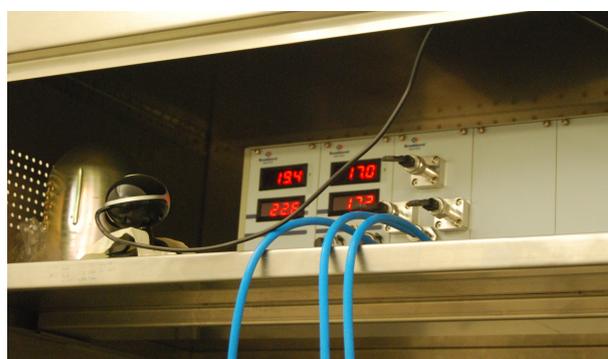
(a) Il telescopio LECC-01.



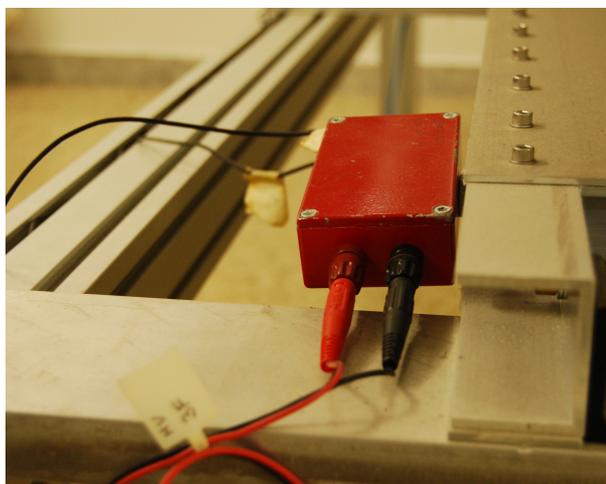
(b) Il crate VME.



(c) Una delle sei FEA.



(d) Il sistema per il controllo del flusso di gas nelle camere.



(e) Uno dei tre DC-DC HV+.

Figura 2.5: Alcuni dettagli del telescopio LECC-01.

2.2.3 Il sistema GPS

Come accennato nei paragrafi precedenti, uno degli obiettivi dei rivelatori del progetto EEE è quello di studiare le correlazioni temporali fra EAS originati dallo stesso evento. Sincronizzare i clock dei PC adoperati per la raccolta dati non permette di raggiungere la precisione necessaria per determinare i tempi relativi fra gli eventi occorsi nei rivelatori. Si è scelto dunque di associare ad ogni evento lo stesso riferimento temporale assoluto (UTC), fornito dalla stazione GPS locale. Il sistema GPS (*Global Positioning System*) è un sistema di navigazione introdotto e controllato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti. Sebbene nasca come un sistema militare, è ampiamente utilizzato per scopi civili, ed è costituito da tre *segmenti*:

- una costellazione di 24 satelliti, in moto attorno alla Terra ad un'altezza di circa 20000 Km, con un periodo orbitale di 12 ore. Le loro orbite sono circolari, disposte su 6 piani orbitali inclinati di 55° rispetto all'equatore. Il sistema è progettato in modo che da ogni punto della Terra siano visibili 5 satelliti. I satelliti trasportano orologi atomici, al Cesio o al Rubidio, che forniscono un riferimento temporale accurato per i segnali radio trasmessi verso il ricevitore a terra.
- Il secondo segmento è costituito da una rete di stazioni di controllo dislocate sulla superficie terrestre, con lo scopo di monitorare lo stato di funzionamento dei satelliti.
- Il terzo segmento è il ricevitore GPS dell'utente, in grado di seguire tutti i satelliti visibili contemporaneamente. Per questa ragione, l'antenna del ricevitore deve essere posizionata in un luogo aperto, lontano da ostacoli che possano limitare la visione della volta celeste.

Chiunque sia dotato di un ricevitore GPS può conoscere le coordinate della sua posizione geografica. Il ricevitore a terra misura il ritardo temporale fra l'istante t_1 , in cui il segnale è trasmesso dal satellite, e l'istante t_2 in cui è rilevato dall'antenna ricevente. La distanza fra ogni satellite e l'antenna ricevente è data dal prodotto tra la velocità con cui le onde radio si propagano in atmosfera e l'intervallo $t_1 - t_2$. Misurando i ritardi da almeno tre satelliti è possibile ottenere informazioni tridimensionali sulla propria posizione (altitudine, latitudine, longitudine). La misura della distanza da un quarto satellite permette di sincronizzare l'orologio del ricevitore con il tempo universale (tempo UTC del GPS). L'accuratezza con cui il GPS fornisce la localizzazione dipende da alcuni fattori come, ad esempio, l'incertezza nelle orbite reali o effetti della ionosfera e della troposfera, e può variare da alcuni centimetri fino a decine di metri. Nell'ambito del progetto EEE, il GPS fornisce informazioni sulla localizzazione dei telescopi e stabilisce un riferimento temporale unitario: ogni ricevitore produce, infatti, un segnale alla frequenza di 1 Hz, detto *one pulse per second* (1 PPS), al sistema di trigger. Tale segnale è utilizzato come sistema di riferimento temporale, in quanto esso è sincronizzato con il tempo UTC entro 100 ns. Il tempo assoluto di un singolo evento si ottiene sommando al tempo assoluto del PPS ricevuto dal satellite il tempo degli eventi misurato dal clock interno del TDC.

Capitolo 3

L'apparato di simulazione per l'esperimento EEE

I rivelatori del progetto EEE sono collocati in edifici con diverse geometrie, pertanto l'acquisizione dei dati da parte dei telescopi è influenzata dalle condizioni ambientali, diverse per ogni rivelatore. Nessuno dei telescopi della rete si trova all'aria aperta. Per riuscire a quantificare l'influenza, sui dati acquisiti, delle geometrie degli edifici e dei materiali di cui sono costituiti, è stato necessario sviluppare degli strumenti informatici grazie ai quali poter simulare la struttura dei telescopi e l'interazione dei raggi cosmici con i rivelatori e con i vari strati di materiale attraversati.

3.1 Performance dei rivelatori

Uno dei principali obiettivi del progetto EEE è lo studio degli Sciami Atmosferici Estesii. Le ricerche in questo campo richiedono alte performance dei rivelatori in termini di risoluzione temporale, spaziale, efficienza, capacità di ricostruzione delle tracce e stabilità a lungo termine. Lo studio di queste caratteristiche è fondamentale per la progettazione di un programma di simulazione che produca dei risultati paragonabili a quanto si osserva negli esperimenti. Nei prossimi tre paragrafi sono illustrate le strategie adoperate per determinare la risoluzione spaziale e temporale dei telescopi.

3.1.1 Risoluzione temporale

Per determinare la risoluzione temporale σ_t è stato usato un campione di 8×10^9 tracce delle oltre 31×10^9 acquisite durante i Run 2 e 3 dai telescopi TORI-03 (situato in Piemonte) e PISA-01 (situato in Toscana). I due telescopi sono stati equipaggiati con un modulo apposito in grado di fornire un clock comune ai TDC dei rivelatori, eliminando eventuali shift temporali derivanti dall'avere due clock distinti. Nel Run 3, lo stesso dispositivo è stato installato su tutti i telescopi del progetto EEE, permettendo di estrapolare la risoluzione temporale media della rete. La strategia adoperata per stabilire σ_t consiste nel misurare l'informazione temporale relativa alle collisioni sulle camere esterne e determinare il valore atteso dell'istante d'impatto delle particelle sulla camera centrale; il valore atteso è confrontato con quello effettivamente misurato sulla camera centrale del telescopio, e la larghezza della distribuzione così ottenuta risulta proporzionale alla risoluzione temporale del telescopio, data da:

$$\Delta t_{hit} = \frac{t_{top} - t_{bot}}{2} - t_{mid}$$

La distribuzione Δt_{hit} ricavata dai dati del Run 2, dopo un fit con una distribuzione gaussiana, ha fornito $\sigma_{\Delta t} = 243$ ps per TORI-03; assumendo che le tre camere abbiano le stesse performance temporali, la risoluzione temporale dell'intero telescopio è $\sigma_t = 210$ ps. La stessa analisi su PISA-01 ha fornito $\sigma_t = 270$ ps. Nel Run 3 sono state apportate delle correzioni alle distribuzioni che hanno migliorato di circa il 20% il valore ricavato nell'analisi effettuata nel Run 2 [35]. A seconda dei telescopi, σ_t varia tra i 140 ps e i 380 ps, differenza dovuta ad una mancata ottimizzazione del punto di lavoro degli MRPC e possibili disomogeneità nella costruzione. La distribuzione che si ottiene con i valori di σ_t calcolati per 33 telescopi è riportata in figura 3.1. Il fit con una distribuzione gaussiana fornisce, per l'intera rete di rivelatori, una risoluzione temporale media pari a $\sigma_t = 238 \pm 40$ ps.

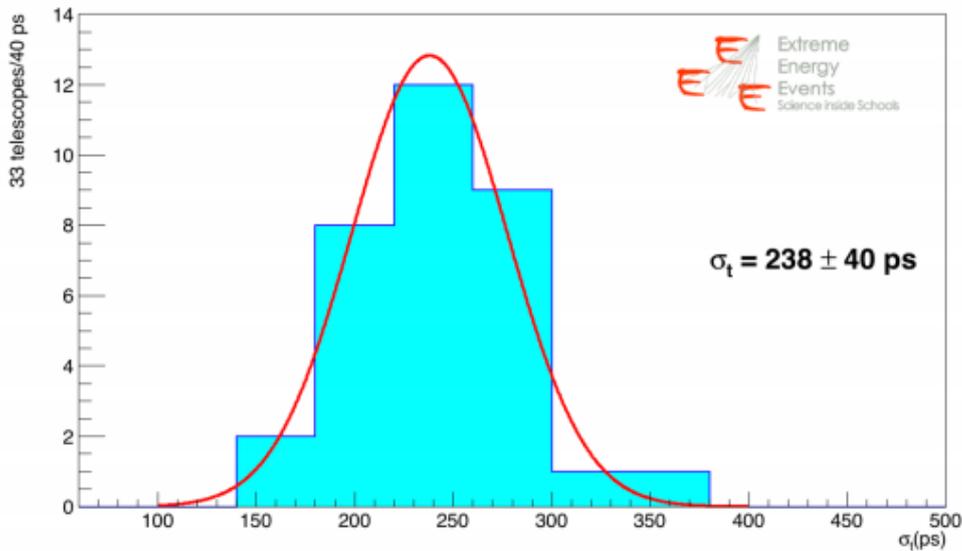


Figura 3.1: Risoluzione temporale dei telescopi del progetto EEE ricavata dall'analisi dei dati raccolti in Run 3 da 33 telescopi. [35].

3.1.2 Risoluzione spaziale

La risoluzione spaziale dei telescopi si ottiene studiando la distribuzione dei punti d'impatto sulle tre camere. I valori misurati sulla camera superiore ed inferiore vengono utilizzati per determinare il punto d'impatto sulla camera centrale nel piano xz ed yz (z è la coordinata ortogonale al piano delle camere) e il dato ottenuto si confronta con quello effettivamente misurato. In questi modo, i residui usati per la misura della risoluzione spaziale sono così definiti:

$$\Delta x, y = \frac{x, y_{top} + x, y_{bot}}{2} - x, y_{mid}$$

Assumendo la stessa risoluzione spaziale per tutte e tre le camere, la risoluzione longitudinale (lungo le strisce) della singola camera è data da $\sigma_x = \sigma_{\Delta x} / \sqrt{\frac{3}{2}}$. Analogamente, la risoluzione trasversa (lungo il lato corto del telescopio) è data da $\sigma_y = \sigma_{\Delta y} / \sqrt{\frac{3}{2}}$.

3.1.3 Risoluzione spaziale longitudinale

I tempi di arrivo del segnale agli estremi delle camere, t_{right} e t_{left} , sono legati alla coordinata x_i del punto d'impatto, alla lunghezza della camera e alla velocità v_{drift} del segnale lungo le strisce dalle relazioni:

$$t_{right} = \left(\frac{L}{2} - x_i\right) \frac{1}{v_{drift}} \quad \text{e} \quad t_{left} = \left(\frac{L}{2} + x_i\right) \frac{1}{v_{drift}}$$

La coordinata x viene ricavata dalla differenza delle due equazioni:

$$x_i = \frac{t_{left} - t_{right}}{2} v_{drift}$$

dove si pone $v_{drift} = 15.8$ cm/ns.

L'analisi di due campioni di dati acquisiti in un periodo di 30 giorni durante i Run 2 (2.7×10^9) e 3 (3.5×10^9) ha permesso di valutare la risoluzione spaziale longitudinale dell'intera rete di telescopi. Il confronto fra le distribuzioni σ_x ottenute dall'analisi dei dati dei due Run è illustrato in figura 3.2. Il fit gaussiano sui dati fornisce una risoluzione longitudinale media $\sigma_{x_{Run2}} = 1.4 \pm 0.1$ cm e $\sigma_{x_{Run3}} = 1.5 \pm 0.2$ cm. La compatibilità dei risultati fornisce una conferma della stabilità dei rivelatori.

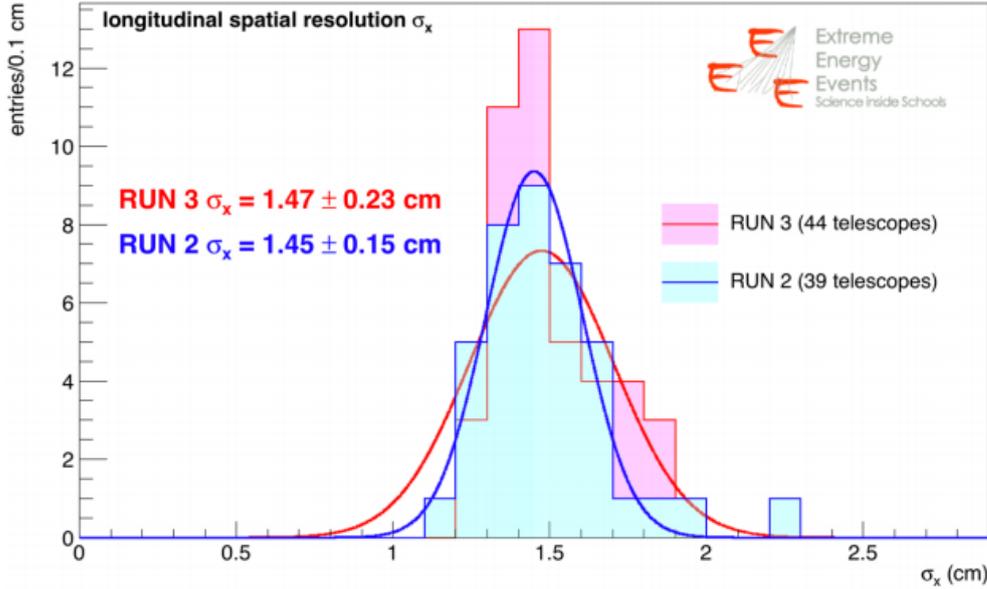


Figura 3.2: Risoluzione spaziale longitudinale ricavata dai dati acquisiti durante il Run 2 (Run 3) da $n = 39$ (44) telescopi del progetto EEE [35].

3.1.4 Risoluzione spaziale trasversale

La risoluzione spaziale trasversale attesa si ricava considerando la distanza fra i centri dei gap che separano le strisce adiacenti (pitch = 3.2 cm), secondo la formula $\sigma_{y_{exp}} \sim pitch/\sqrt{12} = 0.92$ cm. La risoluzione lungo la direzione y è stata misurata a partire dagli stessi campioni usati per la misura lungo la direzione x , seguendo la medesima procedura. Ricavata la distribuzione Δy per ogni telescopio, da qui si è calcolata la distribuzione σ_y . Le distribuzioni relative ai Run 2 e 3 sono illustrate in figura 3.3; il fit gaussiano fornisce una risoluzione media $\sigma_{y_{Run2}} = 0.92 \pm 0.02$ cm e $\sigma_{y_{Run3}} = 0.92 \pm 0.04$ cm, in ottimo accordo con il dato atteso calcolato $\sigma_{y_{exp}}$.

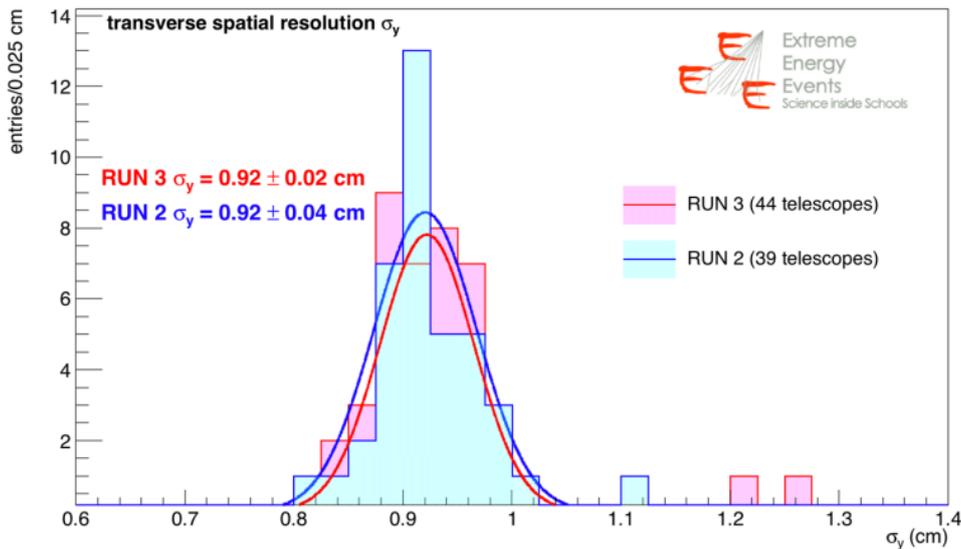


Figura 3.3: Risoluzione spaziale trasversale ricavata dai dati acquisiti durante Run 2 (Run 3) da $n = 39$ (44) telescopi del progetto EEE [35].

3.1.5 Efficienza

Il meccanismo con cui si propaga nel gas la ionizzazione indotta dall'attraversamento di una particella carica è piuttosto complesso e dipende fortemente dai parametri del gas (composizione, densità, flusso), dalla geometria delle camere, dalle tensioni di alimentazione. Lo sviluppo della valanga influenza la risoluzione dei rivelatori e la loro efficienza. Per poter effettuare un confronto tra i dati sperimentali ed i dati simulati è necessario ricavare una mappa dell'efficienza degli MRPC per correggere le misure sui dati acquisiti. Per effettuare le misure di efficienza si è scelto di sfruttare il telescopio TORI-03, in quanto risulta essere il più stabile della rete e per la sua collocazione subisce una schermatura trascurabile nei confronti della radiazione. Per eseguire la procedura, la camera superiore e quella inferiore sono state utilizzate come riferimento per ricavare una mappa dell'efficienza della camera centrale. Ogni camera è stata suddivisa in settori da $24 \times 20 \text{ cm}^2$ e per ognuna di esse sono state stimate l'efficienza di conteggio e di ricostruzione del punto d'impatto, assumendo che non ci fosse alcuna correlazione fra le due quantità. Entrambe le stime sono effettuate a partire dai dati sperimentali, e l'efficienza globale di ciascuna camera è ottenuta come il prodotto delle mappe relative all'efficienza di conteggio e di ricostruzione dei punti d'impatto [32].

3.2 La simulazione

3.2.1 Il software

La catena di simulazione usata per la modellizzazione dei telescopi del progetto EEE è basata sul framework GEMC [39].



Figura 3.4: Schematizzazione della catena di simulazione [40].

In figura 3.4 sono elencate le principali componenti della simulazione:

- GEMC (GEant4 Monte-Carlo) è un framework C++ che utilizza Geant4 per simulare il passaggio delle particelle attraverso la materia. Attraverso GEMC è possibile descrivere la geometria dei telescopi e degli edifici e l'interfaccia grafica del software (di cui è mostrato un esempio in figura 3.5) permette di costruire ed eseguire gli esperimenti.

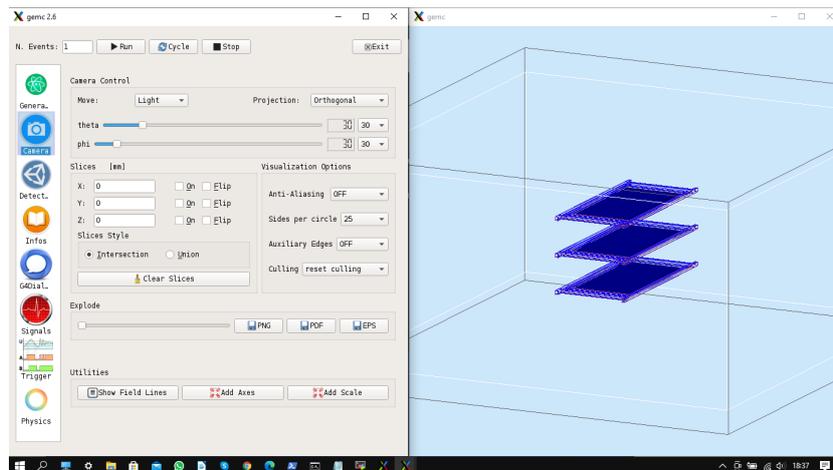


Figura 3.5: Interfaccia grafica di GEMC - dettaglio sui tre MRPC implementati, costituenti il telescopio.

GEMC provvede a collegare tra loro:

- il Generatore di eventi, un software che si occupa di generare eventi fisici e produrre una distribuzione di muoni realistica. Le particelle vengono generate su una semisfera centrata nel telescopio ed in grado di contenerlo, come mostrato in figura 3.6.

Ogni punto della calotta sferica è considerato come una sorgente puntiforme, secondo una distribuzione uniforme. La distribuzione angolare del flusso di muoni generati è considerata, nell'angolo azimutale ϕ_μ , uniforme, mentre la distribuzione nell'angolo polare θ_μ (angolo rispetto allo zenith) è data da una parametrizzazione di Gaisser migliorata che tiene conto della curvatura della Terra alle varie latitudini e dei muoni a bassa energia ($E_\mu < 100\text{Gev}/c$) [32]. Il flusso in funzione dell'energia dei muoni E_μ e di θ_μ è dato da:

$$\frac{dI_\mu}{dE_\mu} = 0.14 \left[\frac{E_\mu}{\text{GeV}} \left(1 + \frac{3.64 \text{ GeV}}{E_\mu (\cos(\theta^*))^{1.29}} \right) \right]^{-2.7} \left[\frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos\theta^*}{115 \text{ GeV}}} \right] + \left[\frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos\theta^*}{850 \text{ GeV}}} \right]$$

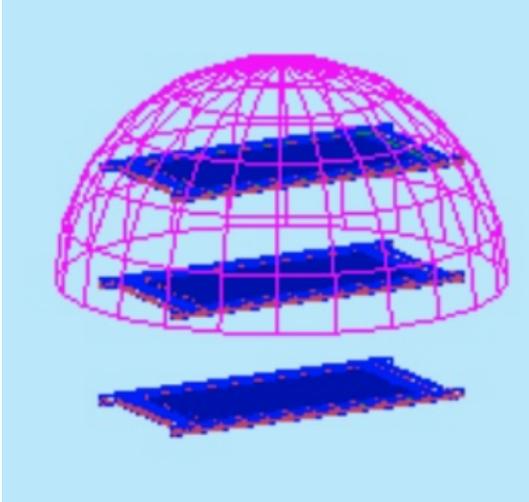
dove

$$\cos\theta^* = 0.14 \sqrt{\frac{(\cos\theta)^2 + P_1^2 + P_2(\cos\theta)^{P_3} + P_4(\cos\theta)^{P_5}}{1 + P_1^2 + P_2 + P_4}}$$

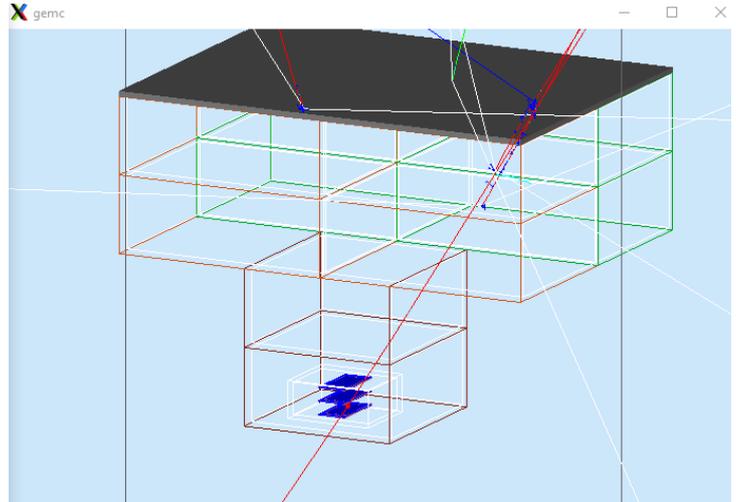
i parametri utilizzati sono riportati nella tabella 3.1.

Tabella 3.1: Valori dei parametri usati nell'equazione che descrive la distribuzione $\cos\theta^*$ [32].

P_1	0.102573
P_2	-0.068287
P_3	0.958633
P_4	0.0407253
P_5	0.817285



(a) La calotta sferica su cui vengono generati gli eventi [37].



(b) Visualizzazione dell'effetto dell'interazione delle tracce delle particelle con l'ambiente circostante.

Figura 3.6: Un esempio di elementi tipicamente implementati in GEMC per la simulazione dei rivelatori del progetto EEE.

Questa parametrizzazione del flusso riproduce abbastanza bene i dati reali [41]. Il vertice della traccia generata viene poi spostato in alto, lontano dal telescopio, per tenere conto di tutti i possibili strati di materiale che circondano il rivelatore (pareti in cemento, tetti, edifici vicini), implementati in Geant4. Generare le tracce su una calotta sferica prossima al rivelatore permette di massimizzare le probabilità che le particelle vadano ad impattare sugli MRPC, mantenendo tuttavia la normalizzazione del flusso dei muoni coerente con i valori realmente misurati.

Il valore usato nella simulazione per la normalizzazione del flusso è quello riportato nel PDG: $1.06 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ [42].

- La geometria è gestita da Geant4, un toolkit per la simulazione del passaggio delle particelle attraverso la materia. Geant4 fornisce la risposta fisica dei materiali implementati a seguito dell'interazione con la radiazione rappresentata, in questo caso, da muoni.

- Il Convertitore è una macro del framework ROOT che converte i dati in uscita da GEMC in un formato leggibile dall'apparato di ricostruzione, identico a quello che viene prodotto dal canale di acquisizione dei dati sperimentali. Questa procedura garantisce che la ricostruzione dei dati simulati produca lo stesso tipo di output generato a seguito della ricostruzione dei dati reali. In questo stadio, i dati sono convertiti da un formato *.root* ad un formato *.digit.root*, ottenendo quindi dei dati digitalizzati.
- Il Programma di ricostruzione produce dati simulati finali identici, nel formato e nel tipo di informazioni fornite, a quelli sperimentali, rendendone possibile l'analisi con gli stessi metodi consentendo un semplice confronto. L'analisi dei dati ottenuti avviene attraverso il framework ROOT [43].

3.2.2 Risposta dei rivelatori

In GEMC sono state implementate, in maniera dettagliata, descrizioni della geometria degli MRPC e dei materiali che li compongono. La risposta degli MRPC è stata parametrizzata basandosi sulle misure delle performance delle camere descritte nella sezione precedente.

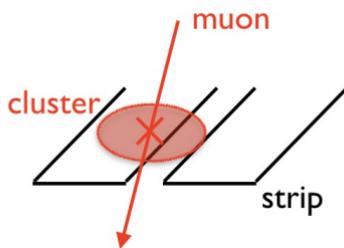


Figura 3.7: Rappresentazione grafica dell'algoritmo che riproduce la ionizzazione nel gas[35].

La propagazione della ionizzazione a valanga indotta nel gas dalla particella carica che attraversa le camere è stata descritta come un cono che ha come asse la traiettoria della particella incidente. Il vertice del cono, corrispondente al punto d'impatto, si trova sulla parte superiore della camera ed il cono si allarga verso il basso. Per riprodurre la risoluzione dei telescopi ricavata dalle misure, si assume che la velocità di propagazione del segnale lungo le strip sia di 15.8 cm/ns. L'area d'impatto viene quindi proiettata sull'area sensibile del rivelatore, ovvero il piano lungo il quale sono disposte le strip di rame.

La figura 3.7 fornisce una descrizione grafica dell'algoritmo che riproduce la ionizzazione nel gas. Ad ogni MRPC è associato lo stesso set di parametri, ma è possibile apportare delle modifiche per riprodurre al meglio la configurazione da simulare. La geometria standard prevede che il rivelatore sia costituito da tre MRPC da 90 cm × 160 cm impilati a distanza di 50 cm dalla camera centrale (50/50 cm, secondo la convenzione adottata per rappresentare la distanza fra le camere). La configurazione più semplice della simulazione prevede che il rivelatore sia inserito in una stanza dalle pareti di cemento spesse 30 cm, ma sono state implementate anche geometrie più complesse che riproducono verosimilmente le diverse condizioni ambientali caratteristiche di ciascun telescopio della rete. Le informazioni generate da GEMC, necessarie per la ricostruzione delle tracce dei muoni, sono:

- numero totale di collisioni su ciascuna camera;
- coordinate della striscia su cui viene generato il segnale;
- tempo che il segnale impiega ad arrivare dal punto d'impatto agli estremi della camera.

Sulla base di queste informazioni, il programma di simulazione produce file di output che possono essere processati ed analizzati dalla catena di ricostruzione usata per i dati reali acquisiti dai rivelatori del progetto EEE. L'efficienza di ricostruzione del codice è superiore al 99%. [37][32]

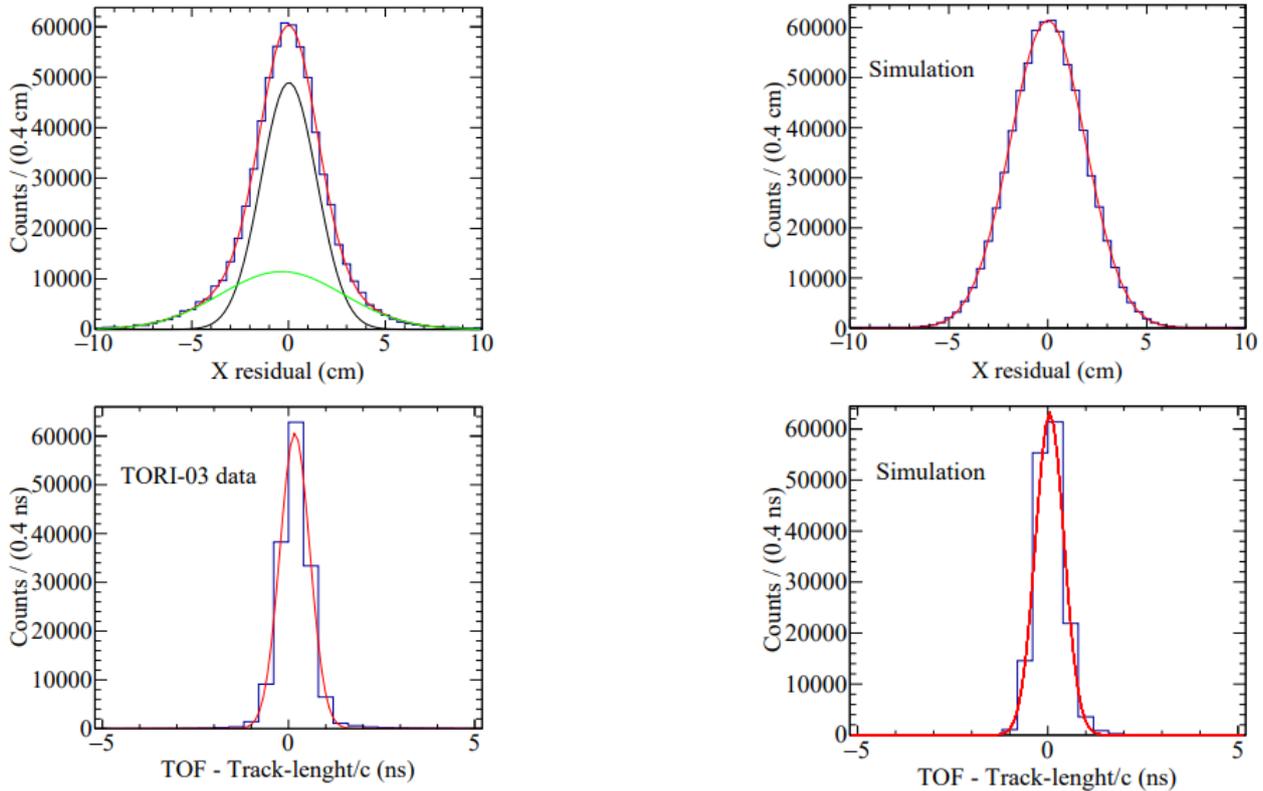
3.2.3 Validazione della simulazione

L'intero apparato di simulazione e la sua capacità di fornire previsioni affidabili e compatibili con i risultati sperimentali è stato testato mettendo a confronto i dati ottenuti attraverso le simulazioni Monte Carlo con quelli acquisiti dai telescopi del progetto EEE.

Una prima analisi è stata effettuata implementando il set-up del telescopio TORI-03 in GEMC, considerando:

- distanza fra le camere di 50/50 cm;
- telescopio posizionato in una stanza dalle pareti e dal tetto in cemento, spessi 30 cm;
- assenza di edifici od ostacoli esterni alla stanza.

Ai dati sperimentali sono state apportate correzioni sulla base delle misure di efficienza locali descritte nel paragrafo precedente. I dati simulati sono invece influenzati dal modello usato per generare i muoni cosmici e dalla parametrizzazione adottata per la risposta dei rivelatori.



(a) Sopra: plot della distribuzione dei residui relativi alla coordinata x del telescopio TORI-03. Il fit con una doppia gaussiana fornisce $\sigma_x = 1.44 \pm 0.3$ cm. Sotto: plot della quantità Tempo di volo - Lunghezza della traccia/ c . Il fit con una gaussiana di questo grafico fornisce come valor medio 0.16 ± 0.04 ns con una deviazione standard pari a 0.37 ± 0.03 ns.

(b) TORI-03: le stesse osservabili della figura a sinistra, ottenute mediante simulazione. I fit gaussiani forniscono $\sigma_x = 1.898 \pm 0.15$ cm, $\sigma_{TOF-T_{rL}} = 0.40 \pm 0.05$ ns, ed il valor medio della distribuzione dei tempi è 0.10 ± 0.03 ns.

Figura 3.8: Confronto tra le analisi dei dati reali e quelli ottenuti mediante la simulazione in GEMC.

La figura 3.8 mostra il confronto tra quantità derivate dai dati sperimentali (a) e mediante la simulazione (b). In figura 3.8(a), il grafico in alto illustra la distribuzione dei residui sulla coordinata x , rispetto ai fit sulla traiettoria delle particelle, per la camera centrale del telescopio; il grafico in basso mostra i residui sul Tempo di volo (ToF), calcolati come differenza tra il valore misurato (ricavato come differenza fra i tempi di arrivo delle particelle sulla camera superiore ed inferiore) e la lunghezza misurata della traccia divisa per la velocità della luce.

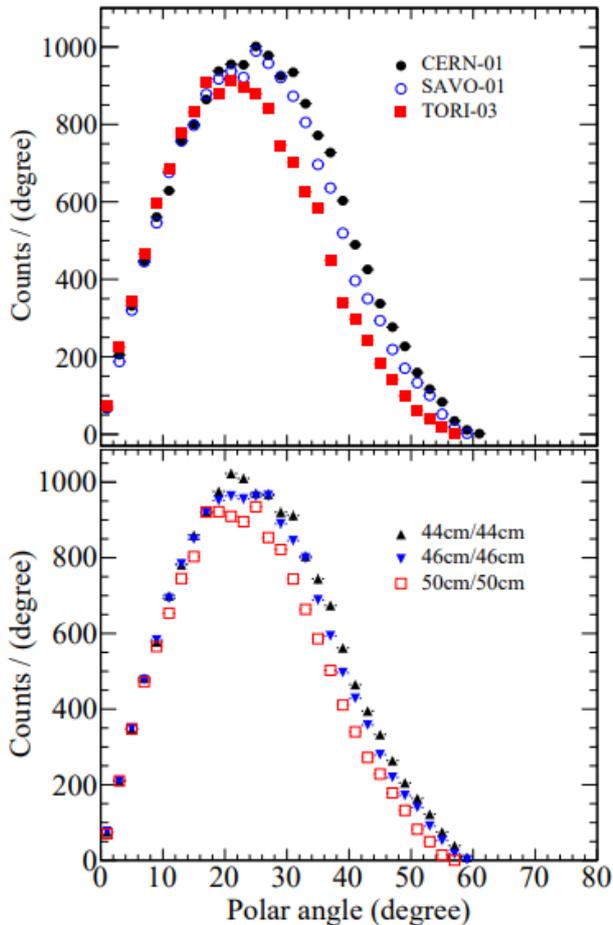


Figura 3.9: Distribuzione angolare dei muoni acquisiti da telescopi con configurazioni differenti. Sopra: dati acquisiti dai telescopi CERN-01 (punti in nero), SAVO-01 (cerchi blu) e TORI-03 (quadrati rossi). Sotto: risultati della simulazione ottenuti implementando le configurazioni corrispondenti (i colori sono in corrispondenza con i telescopi nel grafico superiore): 44/44 cm (triangoli neri), 46/46 cm (triangoli blu capovolti), 50/50 cm (quadrati rossi). Dati reali e dati simulati sono normalizzati rispetto allo stesso numero di eventi.

operanti in condizioni ambientali dissimili.

Le quantità rappresentate nei grafici forniscono, rispettivamente, una stima della risoluzione spaziale e temporale.

Risulta evidente come le distribuzioni ottenute dai dati sperimentali e dai dati simulati siano in buon accordo. Il confronto tra i dati mostra, inoltre, che il rapporto fra il rate di muoni rilevati misurato e il rate simulato, in funzione dell'angolo θ , è prossimo all'unità. Per ottenere ulteriori conferme, si è scelto di testare la simulazione implementando set-up diversi del telescopio in GEMC (ad esempio, una distanza tra le camere diversa) e di confrontare i risultati ottenuti con i dati acquisiti dai rivelatori con la configurazione simulata corrispondente.

In figura 3.9, il grafico in alto mostra la distribuzione angolare misurata dai telescopi TORI-03 (50/50 cm), CERN-01 (44/44 cm) e SAVO-01 (46/46 cm), mentre nel riquadro inferiore sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate. In questo caso, ai dati reali non sono state apportate correzioni in base alle misure di efficienza effettuate. I grafici confermano come, variando i parametri della simulazione, sia possibile riprodurre bene i dati sperimentali. La validazione definitiva alla simulazione viene dal confronto tra il rate di muoni misurato dai telescopi TORI-03 e CERN-01 e quello ottenuto tramite la simulazione. I dati sono illustrati nella tabella 3.2. I valori ottenuti sono in buon accordo, e questo conferma che l'apparato di simulazione ideato per l'esperimento EEE è in grado di riprodurre bene i dati sperimentali e può essere utilizzato per fare dei confronti tra telescopi assemblati secondo set-up differenti ed

3.2. La simulazione

Tabella 3.2: Rate dei muoni acquisiti dai due telescopi del progetto EEE e i corrispondenti valori ottenuti attraverso la simulazione. I dati sperimentali sono stati corretti per tener conto delle misure di efficienza locali descritte nei paragrafi precedenti. L'errore sul rate misurato comprende un errore sistematico dell' 8% che tiene conto di eventuali fluttuazioni dovute alle condizioni ambientali diverse in cui operano i rivelatori [32].

Telescopio EEE	Rate misurato (Hz)	Rate simulato (Hz)
TORI-03	54 ± 5	55 ± 5
CERN-01	57 ± 5	58 ± 5

Capitolo 4

Studio delle stazioni LECC-01 e LECC-02

La maggior parte delle stazioni per lo studio degli EAS del progetto EEE sono installate presso istituti scolastici o laboratori di fisica, in siti molto differenti tra loro. Lo studio qui presentato si prefigge lo scopo di comprendere quanto i diversi strati di materiali che circondano i rivelatori possono influenzare i dati osservati. La scelta di studiare i due telescopi LECC-01 e LECC-02 è stata fatta perché situati in ambienti estremamente differenti: nel laboratorio di Fisica presso il seminterrato di un istituto scolastico di tre piani, LECC-01, in un' aula all'ultimo piano di un altro istituto, LECC-02. Strati di cemento, tetti, pareti, schermano i rivelatori dai muoni che arrivano al suolo; attraversando strati di materia densa, come il cemento che compone gli edifici, i muoni che arrivano al livello del mare hanno una probabilità notevolmente maggiore di subire scattering e perdere energia per ionizzazione, sino a decadere. Sui rivelatori arrivano, contemporaneamente, muoni in un grande intervallo di energia, dalle centinaia di MeV ad oltre il TeV, da ogni direzione, parametrizzati come descritto nella sezione 3.2.1.

Per ottimizzare i tempi di calcolo, il Generatore di eventi in GEMC permette di generare particelle in tre intervalli di energia:

- Run 1: $0.2 \leq E \leq 2.0$ GeV
- Run 2: $2.0 \leq E \leq 10.0$ GeV
- Run 3: $10.0 \text{ GeV} \leq E \leq 100.0$ GeV.

Poter studiare separatamente i tre intervalli di energia permette di valutare con semplicità, attraverso lo studio delle distribuzioni angolari del flusso di particelle rivelate dai telescopi, come le differenti popolazioni di muoni interagiscono con gli ostacoli .

Ricostruzione degli angoli

In figura 4.1 è illustrato il sistema di coordinate sferiche nel quale sono definiti gli angoli di arrivo delle particelle θ (angolo polare) e ϕ (angolo azimutale), rispetto ai quali viene svolta l'analisi del flusso di muoni e le sue variazioni.

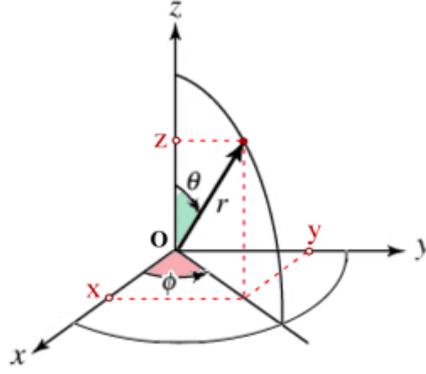


Figura 4.1: Il sistema di coordinate sferiche.

L'angolo zenitale, θ , è individuato a partire dalla normale passante per il centro della camera superiore, e varia tra 0° e 90° . L'angolo azimutale ϕ , individuato considerando come vertice dell'angolo il centro del piano delle camere, varia tra 0° e 360° . Nei dati grezzi, l'informazione che permette di ricostruire gli angoli di arrivo delle particelle è quella relativa ai coseni direttori che si ricavano elaborando le coordinate dei punti d'impatto delle particelle sulle camere attraverso il processo di ricostruzione, gestito dal CNAF. Indicando con X_{dir} , Y_{dir} e Z_{dir} i coseni direttori lungo le direzioni x , y e z , θ e ϕ sono calcolati attraverso le formule:

$$\theta = \arccos(Z_{dir}) \frac{180}{\pi}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{Y_{dir}}{X_{dir}}\right) \frac{180}{\pi}$$

Operazioni preliminari

Il set-up sperimentale base dei telescopi è stato implementato in GEMC considerando gli MRPC disposti ad una distanza reciproca di 50 cm. Un primo campione di dati rispetto al quale effettuare il confronto è stato simulato considerando il telescopio circondato unicamente da aria. In particolare, per ciascuno dei tre intervalli di energia disponibili sono stati simulati 10 milioni di eventi e sono stati prodotti i grafici delle distribuzioni angolari del flusso di particelle. Il grafico completo della distribuzione angolare del flusso nell'intervallo di energia 0.2 - 100.0 GeV è stato ottenuto sommando gli istogrammi ottenuti per ogni Run, ciascuno con il suo peso p_i , corrispondente alla frazione di ciascuna componente nello spettro totale, pari a [32]:

- $p_1 = 0.445$ per le particelle generate in Run 1
- $p_2 = 0.41$ per le particelle generate in Run 2
- $p_3 = 0.142$ per le particelle generate in Run 3

dove i valori di p_i sono stati ottenuti studiando il flusso dei muoni al livello del mare, per il quale si è osservato che il 44.5% delle particelle dello spettro ha energia nell'intervallo corrispondente a Run 1, il 41% ha energia nell'intervallo corrispondente a Run 2, il 14.2 % ha energia nell'intervallo corrispondente a Run 3, secondo la parametrizzazione descritta nel paragrafo 3.2.1.

Considerare il telescopio circondato unicamente da aria non corrisponde ad una condizione sperimentale realistica, ma permette di avere dei parametri di riferimento rispetto ai quali valutare la risoluzione spaziale dei rivelatori e come essa è influenzata dalla presenza di ostacoli.

Tabella 4.1: Numero di eventi analizzati e relativi periodi di acquisizione per i telescopi LECC-01 e LECC-02.

Telescopio	Inizio acquisizione	Fine acquisizione	n° eventi
LECC-01	28-03-2019	24-04-2019	29844640
LECC-02	28-12-2018	03-01-2019	6239296

4.1 Primo confronto con i dati reali

Gli studi illustrati di seguito sono stati condotti su campioni di dati acquisiti dai telescopi LECC-01 e LECC-02 nei periodi indicati in tabella 4.1. Si è scelto di studiare una quantità di dati maggiore per il telescopio LECC-01 in virtù della geometria complessa dell'edificio in cui il rivelatore è installato, che si traduce in una struttura più sofisticata della simulazione con cui fare il confronto.

Il primo confronto tra i dati simulati considerando il telescopio circondato da aria ed i dati reali è avvenuto tenendo conto delle distribuzioni angolari del flusso di muoni, degli istogrammi relativi al tempo di volo (*Time of Flight*, ToF) delle particelle e dei parametri:

$$\beta = \frac{\text{Lunghezza traccia}}{\text{ToF} \times c}$$

e $1/\beta$ dove c è la velocità della luce, stimata intorno a 29.979 cm/ns. Per l'analisi effettuata si è scelto di selezionare solo gli eventi che rispondessero ai seguenti criteri:

- $0.8 \leq 1/\beta \leq 1.3$
- $\chi^2 \leq 5$

dove la variabile χ^2 è lo scarto quadratico medio della traccia della particella ricostruita nel rivelatore, definito da:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{r_i^2}{3}$$

in cui r_i è la distanza, per ogni MRPC, tra il punto d'impatto sulla camera e la traccia ottenuta come risultato del fit. Il taglio sul χ^2 opera una selezione sulle tracce dei muoni, permettendo di studiare quelle ricostruite in maniera più accurata. Il taglio sul parametro $1/\beta$ opera una selezione sui dati affinché corrispondano ad eventi fisici reali. In figura 4.2 è illustrato il confronto fra gli istogrammi del tempo di volo prima e dopo la selezione dei dati.

In figura 4.2(a) si nota un'ampia coda di eventi nella regione $\text{ToF} \leq 2$, nella quale sono presenti eventi con tempo di volo dal valore non compatibile con eventi fisici, come le tracce di particelle provenienti dal basso osservate come decadimento del muone. Questa distribuzione di eventi può essere attribuita ad una molteplicità di fattori, verosimilmente rumore nelle camere a causa di una non uniforme distribuzione del flusso del gas. Attraverso il taglio si è visto che tali tracce sono localizzate particolarmente in un angolo della camera superiore. La figura 4.2(b) mostra come questi eventi vengano esclusi dall'analisi a seguito del taglio su $1/\beta$.

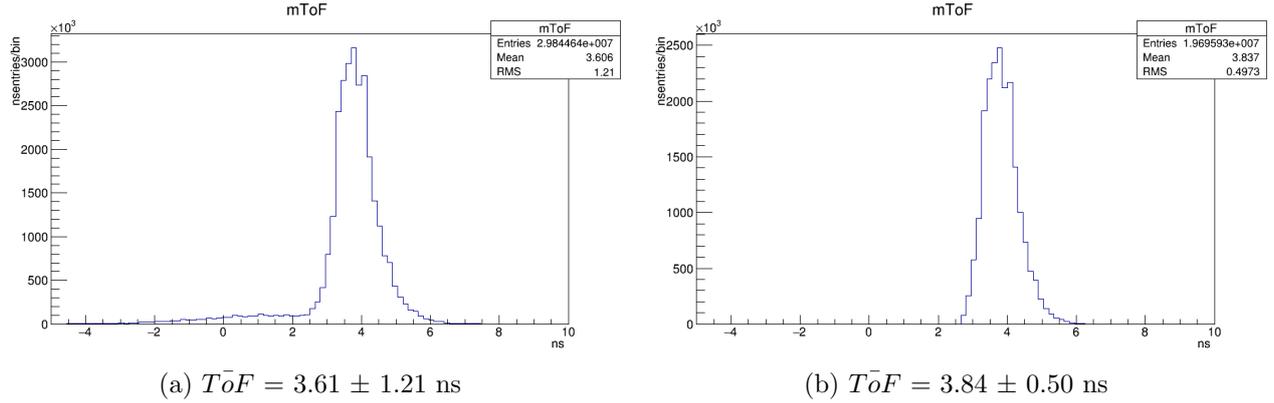


Figura 4.2: Plot del ToF da dati reali del telescopio LECC-01 prima (a) e dopo (b) la selezione dei dati.

Il parametro β dipende dal tempo di volo, calcolato dalle informazioni sui tempi di arrivo delle particelle sugli MRPC, sulla cui determinazione si commette un errore piuttosto grande. Di conseguenza, il calcolo di β svolto eseguendo il rapporto tra la lunghezza delle tracce ed il tempo di volo, fornisce valori di questo parametro spesso superiori all'unità, indice della presenza di muoni ed altre particelle con velocità superiori a quella della luce, il che non corrisponde ad una situazione fisica. Sebbene l'errore commesso sui tempi di arrivo porti comunque ad una buona risoluzione spaziale, attorno ad 1.5 cm (come mostrato nel paragrafo 3.1.3), esso è tale da generare tracce con un basso valore del χ^2 , ma valori di $\beta \geq 1$. Come mostrato nel paragrafo 4.2, tali tracce si osservano anche nella ricostruzione dei dati simulati, per i quali GEMC usa il valore di risoluzione temporale sul tempo di arrivo del segnale associato alle strisce di rame. Una possibile strategia che consente di ottenere valori realistici di β è quella di eseguire un fit lineare dell'istogramma bidimensionale lunghezza traccia/c in funzione del tempo di volo. La figura 4.3 mostra il risultato del fit lineare sui dati ottenuti simulando il telescopio circondato da aria. Il valore di β si ottiene mediante la formula:

$$\beta = \frac{1}{p_0 c}$$

dove p_0 è il coefficiente del termine di grado zero della retta con la quale si esegue il fit. Questa procedura fornisce $\beta = 0.988 \pm 0.001$ per il telescopio simulato in aria. In figura 4.4 sono illustrate le componenti di β nei tre Run relativamente al telescopio simulato in aria, ed i rispettivi fit gaussiani. Nel primo riquadro è rappresentata la curva per $0.2 \leq E \leq 100$ GeV ottenuta sommando gli istogrammi ottenuti per i tre Run come è stato fatto per ottenere le distribuzioni angolari simulate. Dal fit gaussiano dell'istogramma della distribuzione si ottiene $\beta_{0.2-100 \text{ GeV}} = 0.996 \pm 0.087$. Le due metodologie forniscono quindi risultati tra loro compatibili.

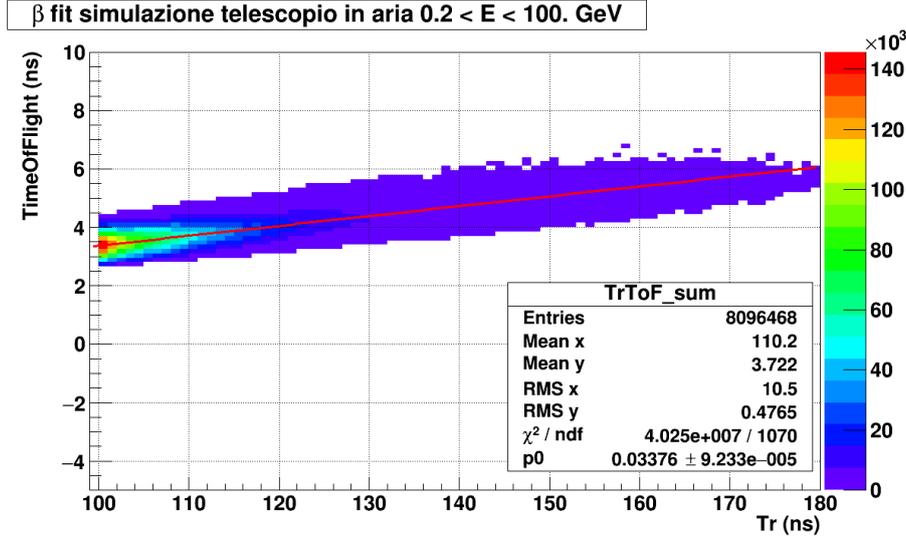


Figura 4.3: Fit lineare dell'istogramma bidimensionale ottenuto disponendo in ascissa i valori di lunghezza della traccia/c ed il ToF in ordinata. Applicando la formula $\beta = \frac{1}{p_0 c}$ si ottiene $\beta = 0.988 \pm 0.001$.

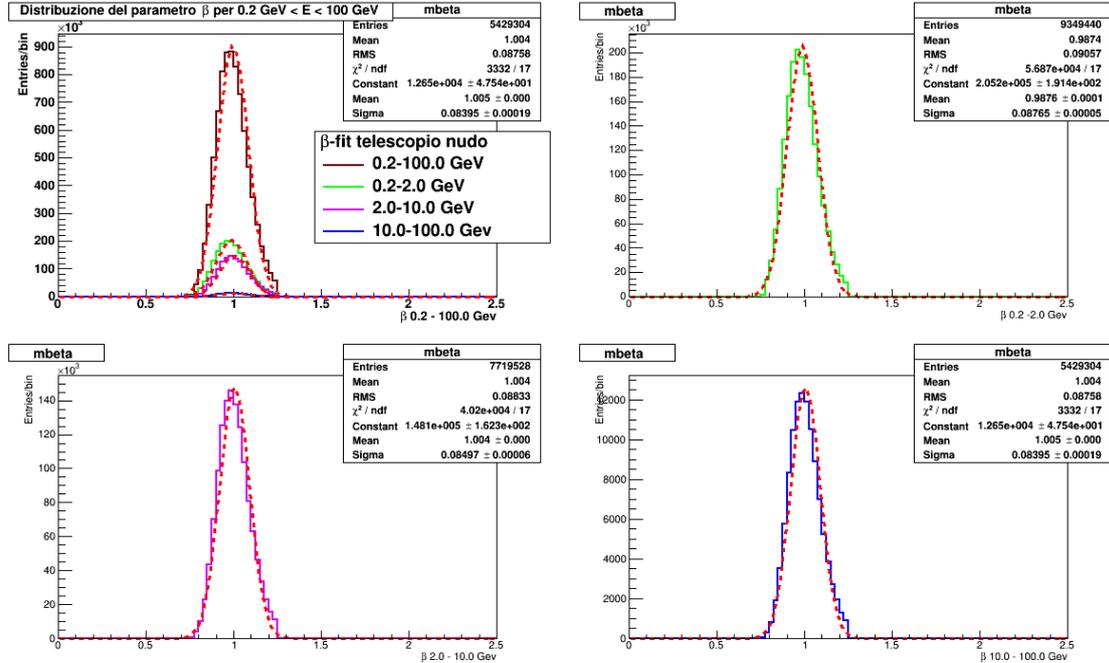


Figura 4.4: Fit gaussiani degli istogrammi della distribuzione di β per il telescopio simulato in aria negli intervalli di energia consentiti dalla simulazione. Marrone: $\beta_{0.2-100/GeV} = 0.996 \pm 0.087$. Verde: $\beta_{0.2-2.0/GeV} = 0.988 \pm 0.088$. Viola: $\beta_{2.0-10.0/GeV} = 1.004 \pm 0.085$. Blu: $\beta_{10.0-100.0/GeV} = 1.005 \pm 0.084$.

Distribuzioni angolari

I grafici degli istogrammi relativi alla distribuzione angolare θ e ϕ sono illustrati in figura 4.5. Gli istogrammi sono normalizzati per permettere il confronto tra le curve poichè relativi ad un numero di eventi differente. Dall'analisi del grafico di ϕ si nota, in corrispondenza dei picchi della distribuzione, l'effetto di assorbimento delle particelle da parte degli edifici che circondano i telescopi: maggiore lo spessore di materiali che circondano il rivelatore, minore l'altezza dei picchi, che ci rivela anche in quale direzione i telescopi vengono maggiormente schermati.

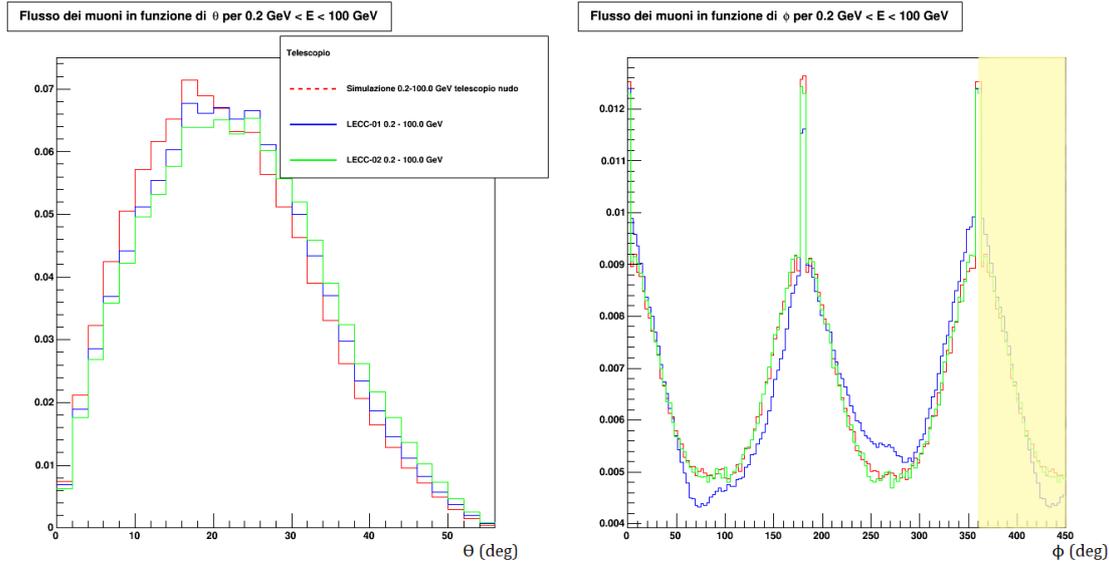


Figura 4.5: Distribuzioni in θ e ϕ del flusso dei muoni. Le aree degli istogrammi sono normalizzate ad 1. In blu: dati reali LECC-01. Verde: dati reali LECC-02. Rosso: simulazione con il telescopio circondato da aria.

Sebbene ϕ vari fra 0° e 360° , si è scelto di disegnare un grafico da 0° a 450° , riproducendo da 360° a 450° l'intervallo da 0° a 90° , evidenziato in giallo, per rendere immediatamente leggibili la forma dei picchi della distribuzione e la loro altezza. Il grafico di ϕ del telescopio LECC-01, disegnato in blu, presenta delle asimmetrie sia nei massimi sia nei minimi della distribuzione, indice che la radiazione subisce una schermatura più incisiva ad opera dell'edificio in cui il rivelatore è installato, rispetto a quanto accade per LECC-02. Lo shift della distribuzione rispetto all'angolo θ è anch'esso indice degli effetti di assorbimento da parte degli edifici. La figura 4.6 mostra un confronto tra la distribuzione del flusso in θ per il telescopio simulato circondato da sola aria, LECC-01 ed i residui calcolati come rapporto fra i due istogrammi. In figura 4.7 è illustrato il confronto tra la distribuzione del flusso in ϕ per il telescopio simulato circondato da sola aria, LECC-01 ed i residui calcolati come rapporto fra i due istogrammi. La figura 4.8 mostra un confronto tra la distribuzione del flusso in θ per il telescopio simulato circondato da sola aria, LECC-02 ed i residui calcolati come rapporto fra i due istogrammi e, in ultimo, la figura 4.9 mostra il confronto tra la distribuzione del flusso in ϕ per il telescopio simulato circondato da sola aria, LECC-02 ed i residui calcolati come rapporto fra i due istogrammi. I grafici sono normalizzati ad 1 per essere confrontati.

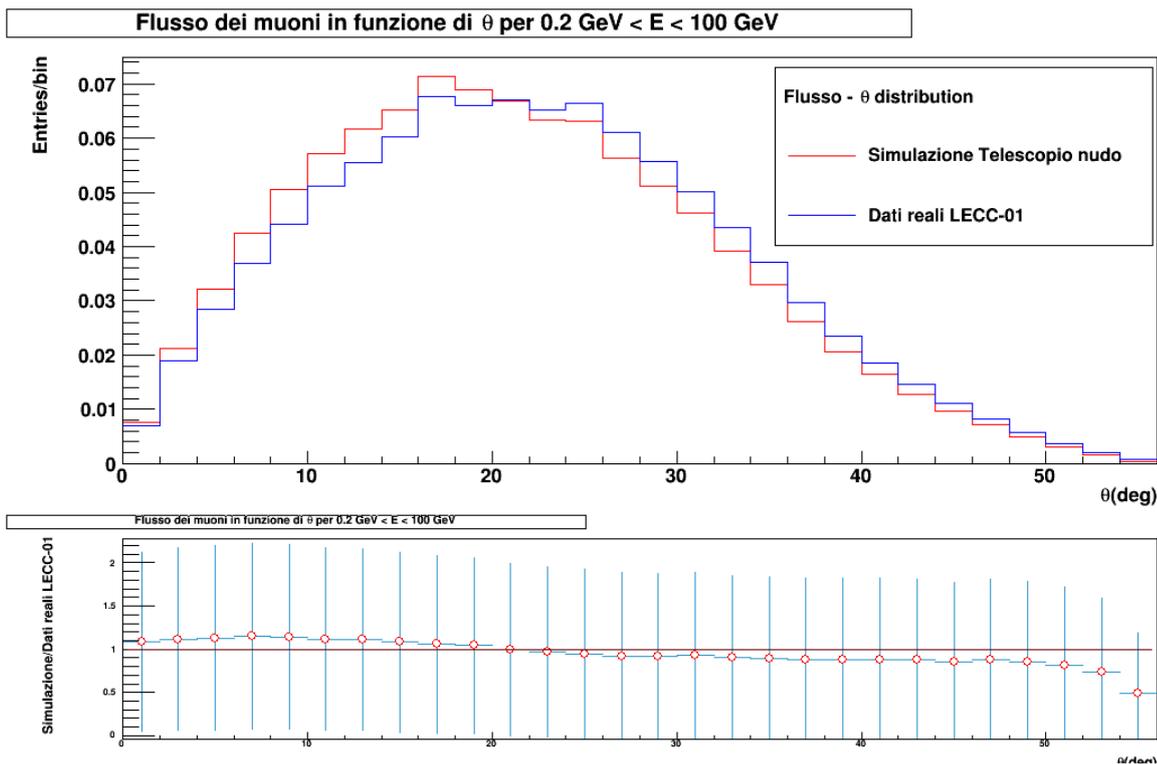


Figura 4.6: In alto: distribuzione θ per LECC-01 in blu, del telescopio simulato circondato da sola aria in rosso. In basso sono mostrati i residui calcolati come rapporto fra la distribuzione del flusso in θ del telescopio simulato in aria e i dati reali di LECC-01. Il grafico dei residui mostra un accordo entro il 20%.

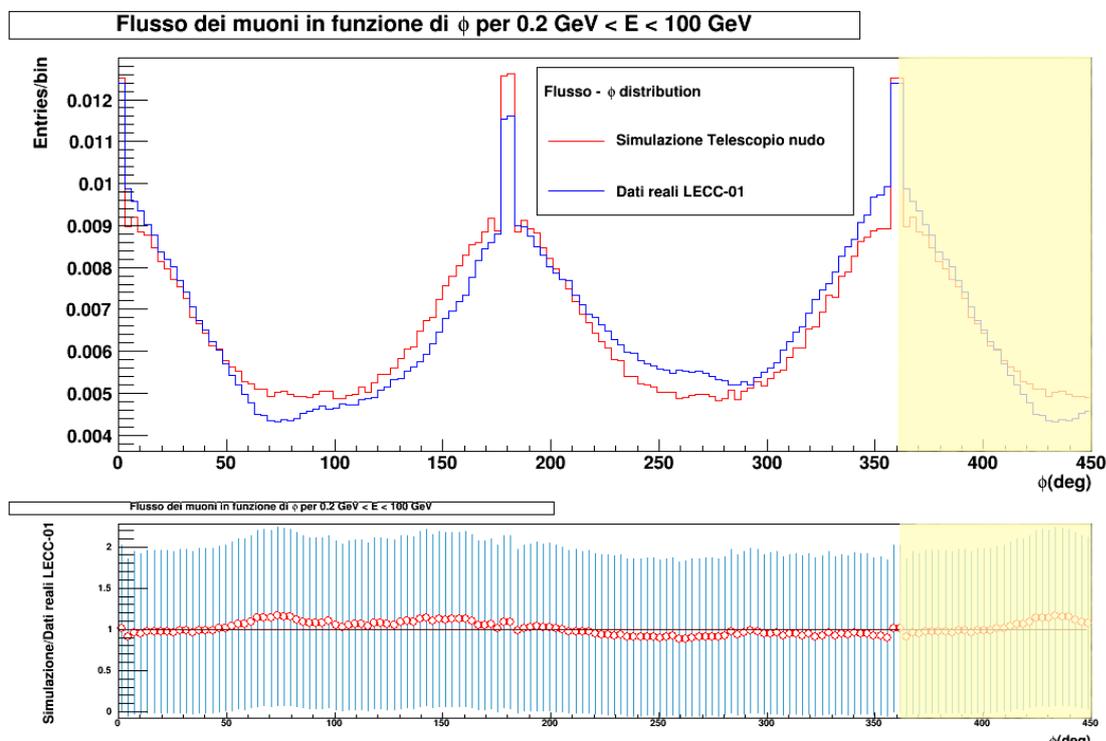


Figura 4.7: In alto: distribuzione ϕ per LECC-01 in blu, del telescopio simulato circondato da sola aria in rosso. In basso sono mostrati i residui calcolati come rapporto fra la distribuzione del flusso in ϕ del telescopio simulato in aria e i dati reali di LECC-01. Il grafico dei residui mostra un accordo entro il 20% .

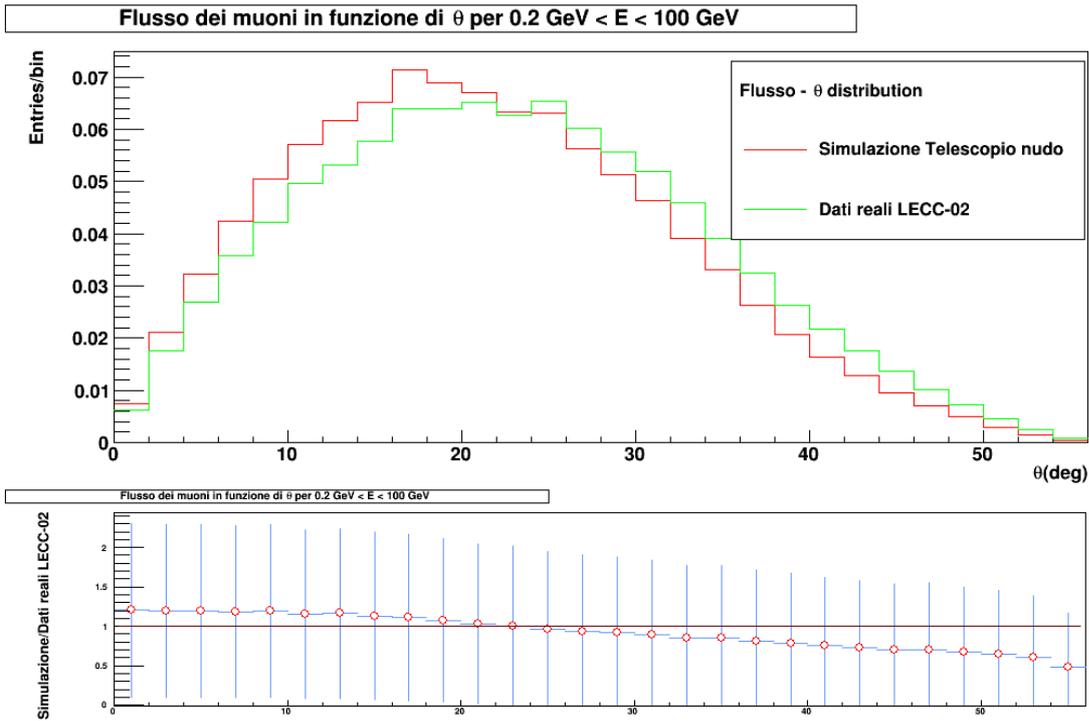


Figura 4.8: In alto: distribuzione θ per LECC-02 in verde, del telescopio simulato circondato da sola aria in rosso. In basso sono mostrati i residui calcolati come rapporto fra la distribuzione del flusso in θ del telescopio simulato in aria e i dati reali di LECC-02. Il grafico dei residui mostra un accordo entro il 15%.

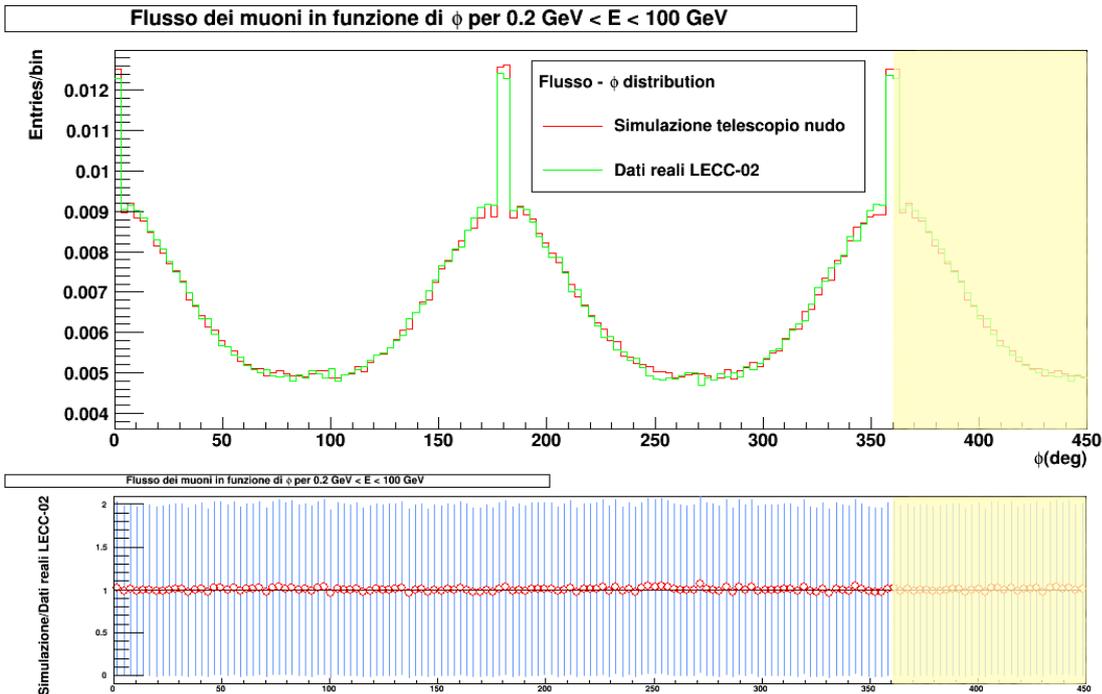


Figura 4.9: In alto: distribuzione ϕ per LECC-02 in verde, del telescopio simulato circondato da sola aria in rosso. In basso sono mostrati i residui calcolati come rapporto fra la distribuzione del flusso in ϕ del telescopio simulato in aria e i dati reali di LECC-02. Il grafico dei residui mostra un accordo entro il 20%

Risoluzione spaziale

In figura 4.10 è riportato l'istogramma con le risoluzioni spaziali longitudinali dei tre telescopi fin qui considerati, con le curve sovrapposte per un immediato confronto.

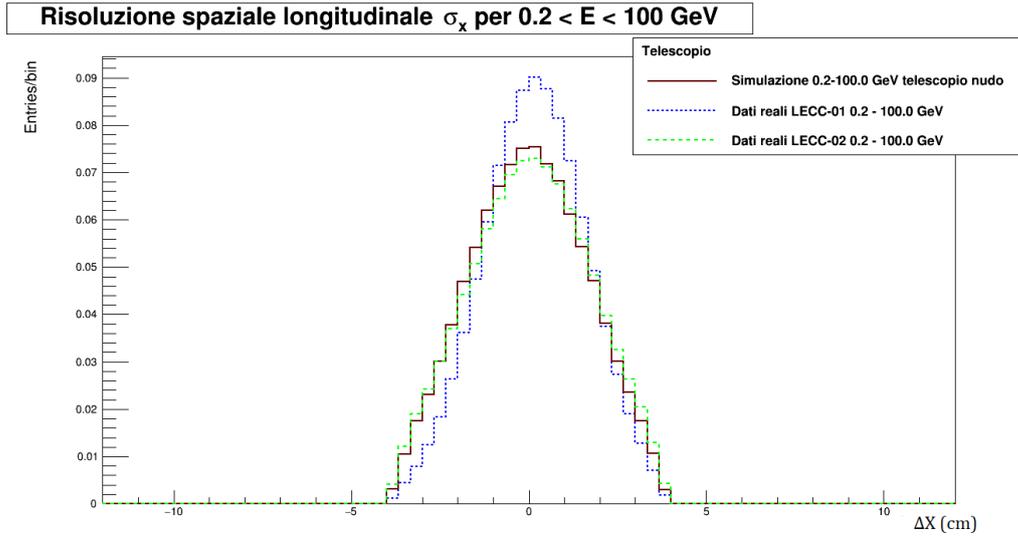


Figura 4.10: Risoluzione spaziale longitudinale: confronto tra i dati reali di LECC-01 (blu), LECC-02 (verde) ed il telescopio simulato circondato da sola aria (marrone). I valori delle risoluzioni sono mostrati in tabella 4.2.

La risoluzione spaziale e temporale sono in generale caratteristiche per ciascun rivelatore, ed inoltre dipendono dalle condizioni ambientali in cui il telescopio opera. Le risoluzioni spaziali σ_x e σ_y sono determinate a partire dalle distribuzioni $\sigma_{\Delta x}$ e $\sigma_{\Delta y}$ per ciascun telescopio mediante un fit gaussiano delle curve nei grafici, secondo le formule illustrate nel paragrafo 3.1.2. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 4.2: Confronto tra le risoluzioni spaziali calcolate dai dati reali acquisiti da LECC-01 e LECC-02 e dai dati ottenuti simulando il telescopio circondato da aria.

Telescopio	$\sigma_x(cm)$	$\sigma_y(cm)$
Simulazione in aria	2.0 ± 0.1	1.4 ± 0.3
LECC-01	1.204 ± 0.039	0.91 ± 0.19
LECC-02	1.45 ± 0.41	0.89 ± 0.33

4.2 Il telescopio LECC-01

4.2.1 Condizioni sperimentali reali

Il rivelatore LECC-01 è installato in una stanza situata al piano seminterrato del Liceo Scientifico "G. Banzi Bazoli" della città di Lecce. L'edificio si compone, in totale, di quattro piani. Il telescopio si trova in una posizione decentrata all'interno della stanza, con uno dei due lati corti ad una distanza di 45 cm dalla parete che separa gli ambienti interni all'edificio dall'esterno. Questa parete, tra quelle che circondano il telescopio, risulta essere la più spessa, e sulla sua sommità sono disposte delle finestre che tuttavia non rientrano nell'angolo solido visto dal rivelatore. L'MRPC inferiore è disposto ad un'altezza di 50 cm dal pavimento ed uno dei lati lunghi del rivelatore dista 195 cm dalla parete laterale della stanza. Queste distanze sono state rispettate nel disegnare la stanza in GEMC.

4.2.2 Geometria implementata

Per effettuare la simulazione si è scelto di ricostruire in GEMC la porzione di edificio racchiusa nel riquadro rosso mostrato in figura 4.11a. Con gli MRPC disposti ad una distanza reciproca di 50 cm, l'angolo solido visto dal rivelatore corrisponde a 2.23 sr [32]. Sulla base di questo valore, si è stimata una superficie, per il rettangolo delimitato in rosso, pari a $16 \text{ m} \times 12 \text{ m}$. Le misure degli spessori delle mura delle stanze interne e dei solai sono state effettuate utilizzando un metro laser. Nel valutare gli spessori delle pareti e dei solai da ricostruire in GEMC si è dovuto stimare lo spessore di materiale "attivo" considerando che solai e pareti, oltre a strati di intonaco e cemento, sono costituiti anche da mattoni forati che racchiudono, al loro interno, unicamente aria. Lo spessore delle stanze ricostruite nella simulazione, sulla base di queste valutazioni, è dunque inferiore a quello reale, perchè le mura implementate in GEMC sono "piene" e sono costituite da cemento. In tabella 4.3 sono riportati i valori degli spessori effettivamente misurati e quelli che si è stabilito di implementare in GEMC. L'intero edificio è stato ricostruito considerandolo composto dalla stanza in cui è installato il rivelatore, una stanza al primo piano di uguali dimensioni, un secondo ed un terzo piano costituiti entrambi da quattro stanze di uguali dimensioni disposte come illustrato in figura 4.11. Sul terzo piano poggia un tetto in cemento che rende l'ultimo solaio il più spesso dell'edificio. Le dimensioni della stanza in cui è installato il telescopio sono $560 \times 560 \text{ cm}^2 \times 270 \text{ cm}$ e sono state implementate in GEMC senza variazioni.

Tabella 4.3: Spessori delle pareti e dei solai dell'edificio in cui è installato LECC-01 nel caso reale e come sono stati implementati in GEMC.

Spessori pareti e solai (cm)				
Telescopio	Parete esterna	Pareti interne	Solai (cm)	Solaio esterno
LECC-01	57	20	40	50
LECC-01 GEMC	40	10	20	30

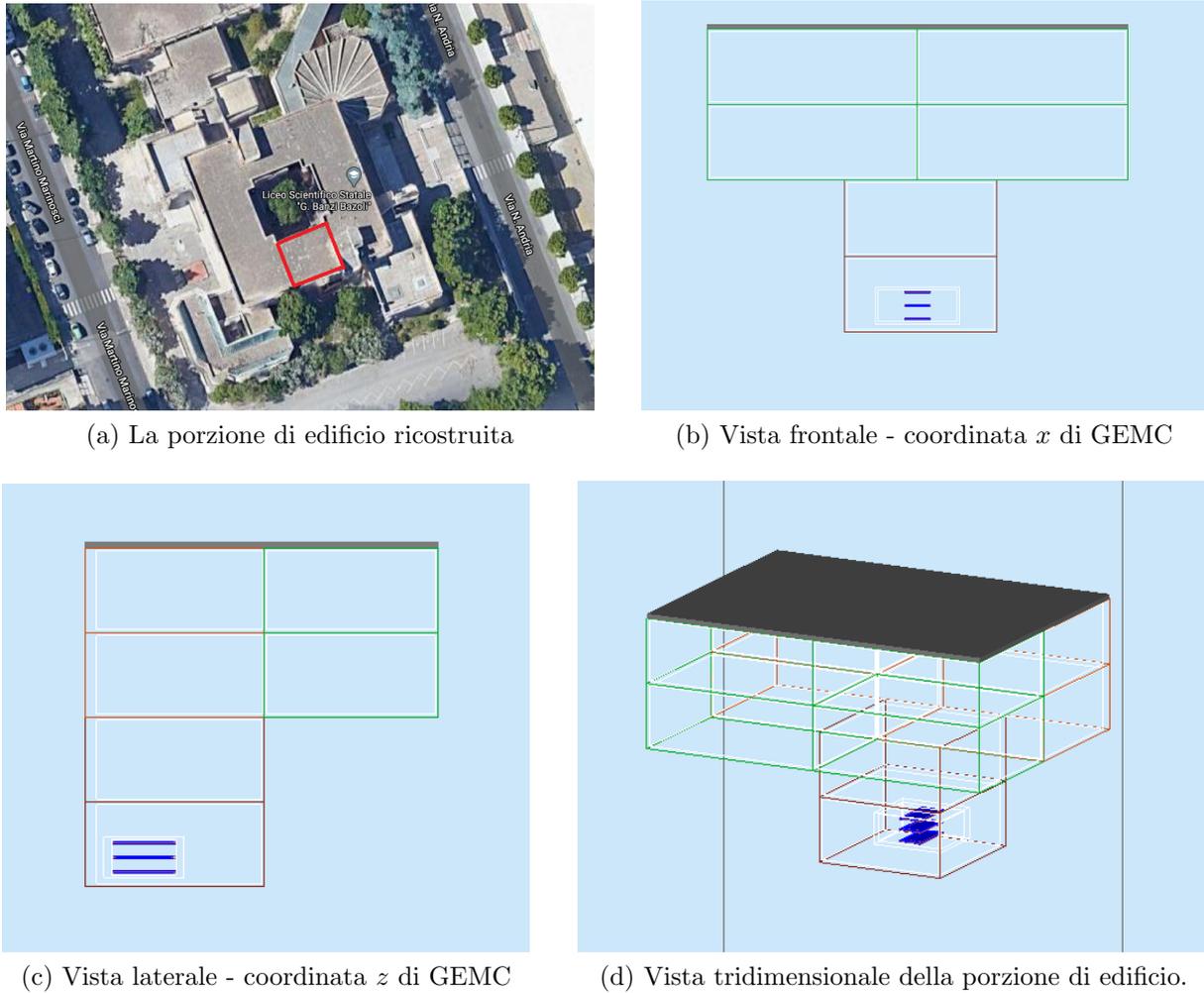


Figura 4.11: Dettagli della geometria della porzione di edificio simulata.

4.2.3 Discussione dei risultati

Analogamente a quanto fatto per il telescopio simulato in aria, per LECC-01 sono stati simulati 10 milioni di eventi per Run e successivamente ricostruite le tracce grazie al programma di ricostruzione. Il numero di tracce ricostruite è significativamente inferiore rispetto al caso della simulazione in cui il telescopio non ha ostacoli attorno a sè, segno che le particelle subiscono scattering, decadono o vengono deviate nell'interazione con l'edificio. La figura 4.12 mostra il confronto fra le distribuzioni angolari del flusso relative ai dati reali acquisiti da LECC-01, il telescopio simulato in aria e la simulazione implementata per LECC-01. L'analisi di questo grafico è utile per concludere che si è sovrastimato lo spessore dei materiali che circondano il telescopio reale. Nel grafico della distribuzione del flusso in ϕ questo risulta particolarmente evidente grazie all'altezza del picco della curva viola in corrispondenza di $\phi = 180^\circ$, dove sembra che le particelle simulate incidenti sull'edificio vengano completamente schermate nella direzione in cui esse attraversano lo spessore di materiale maggiore. Sebbene le due curve non coincidano, esse risultano tuttavia in accordo circa la direzione in cui le particelle incidenti subiscono la schermatura maggiore, come mostrato dall'abbassamento dei picchi della curva blu e della curva viola in corrispondenza di $\phi = 180^\circ$.

Il picco della distribuzione in θ del flusso simulato è traslato rispetto ai dati reali a causa dei fenomeni cui sono soggette le particelle a bassa energia. La frazione di particelle a bassa energia

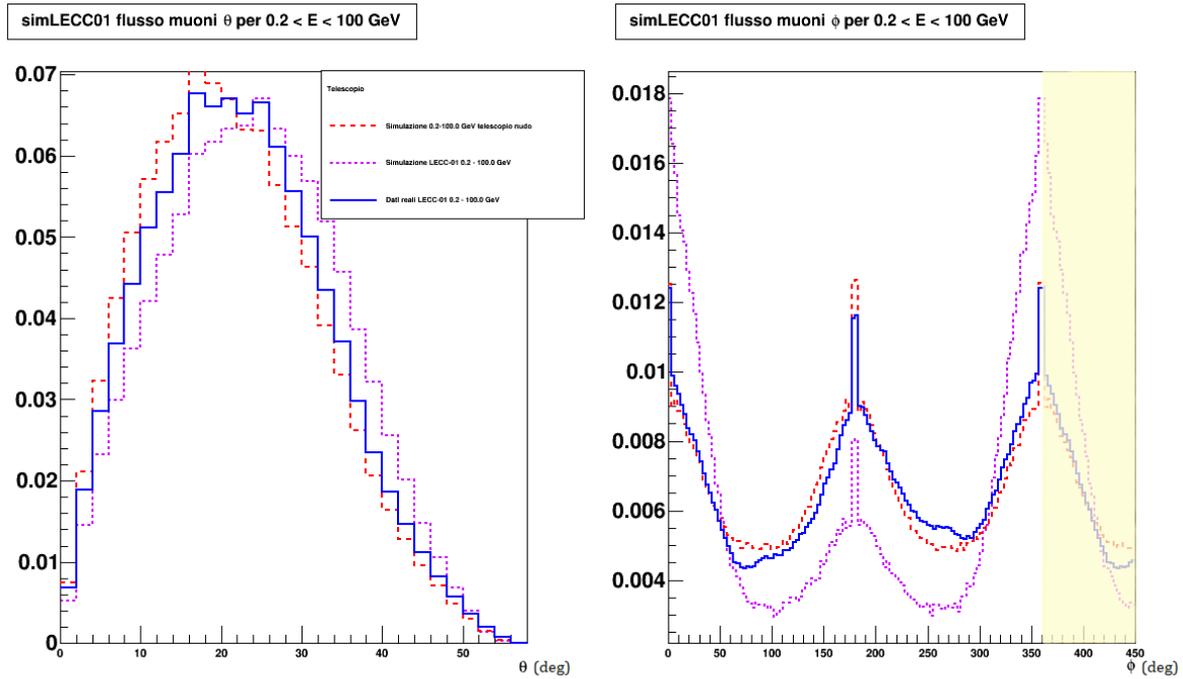


Figura 4.12: Distribuzioni in θ e ϕ del flusso dei muoni. In blu: dati reali LECC-01. Viola: simulazione LECC-01. Rosso: simulazione con il telescopio circondato da aria. Gli istogrammi sono normalizzati ad 1.

è quella in quantità preponderante nello spettro, per cui l'influenza di questa componente sull'andamento delle curve simulate è maggiore. L'effetto descritto è ben visibile in figura 4.13: la curva disegnata in verde è quella relativa alla distribuzione in θ e ϕ del flusso di particelle con energia compresa tra 0.2 - 2.0 GeV, ed il picco della distribuzione in θ è fortemente traslato verso destra a causa dei fenomeni descritti in precedenza. Nel grafico della distribuzione del flusso in ϕ , la curva verde va a zero in corrispondenza degli intervalli angolari in cui le particelle subiscono una schermatura totale. Poichè la geometria dell'edificio è piuttosto complessa, per implementarla correttamente in GEMC sarebbe utile studiare le planimetrie ed i materiali adoperati per edificare i diversi piani, in modo da fare delle stime più accurate sullo spessore attivo di materiale effettivamente attraversato dalle particelle.

In figura 4.14 sono illustrati gli istogrammi, sovrapposti per un confronto immediato, delle risoluzioni spaziali longitudinali per i telescopi LECC-01 reale, LECC-01 simulato ed il telescopio simulato in aria. In tabella 4.4 sono riportati i valori di σ_x e σ_y ottenuti dall'analisi dati. L'aumento della risoluzione in x sembra indicare la selezione della componente a maggior energia, che genera tracce più lineari ed induce segnale su più strisce.

Tabella 4.4: Risoluzione spaziale calcolata dai dati reali e dai dati simulati per il telescopio LECC-01

Telescopio	$\sigma_x(cm)$	$\sigma_y(cm)$
LECC-01 reale	1.204 ± 0.039	0.91 ± 0.19
LECC-01 GEMC	0.953 ± 0.041	0.89 ± 0.62

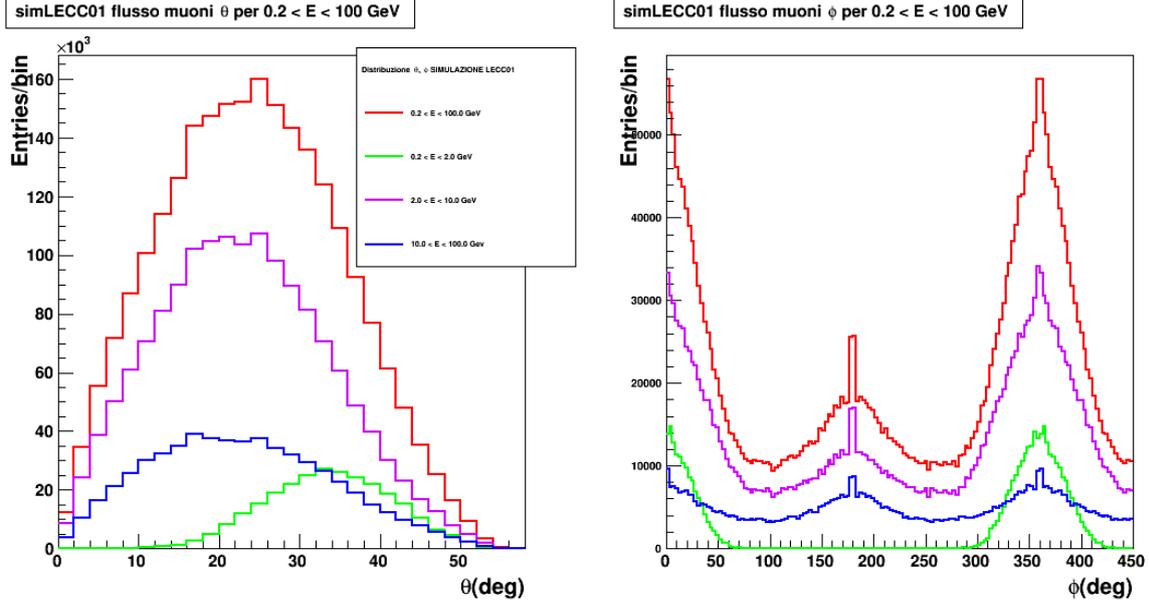


Figura 4.13: Distribuzioni in θ e ϕ del flusso dei muoni nei diversi intervalli di energia per la simulazione di LECC-01. In verde: flusso per $0.2 \leq E \leq 2.0$ GeV. Blu: flusso per $2.0 \leq E \leq 10.0$ GeV. Viola: flusso per $10.0 \leq E \leq 100.0$ GeV. Rosso: somma dei tre contributi, ciascuno con il suo peso. Gli istogrammi sono normalizzati ad 1.

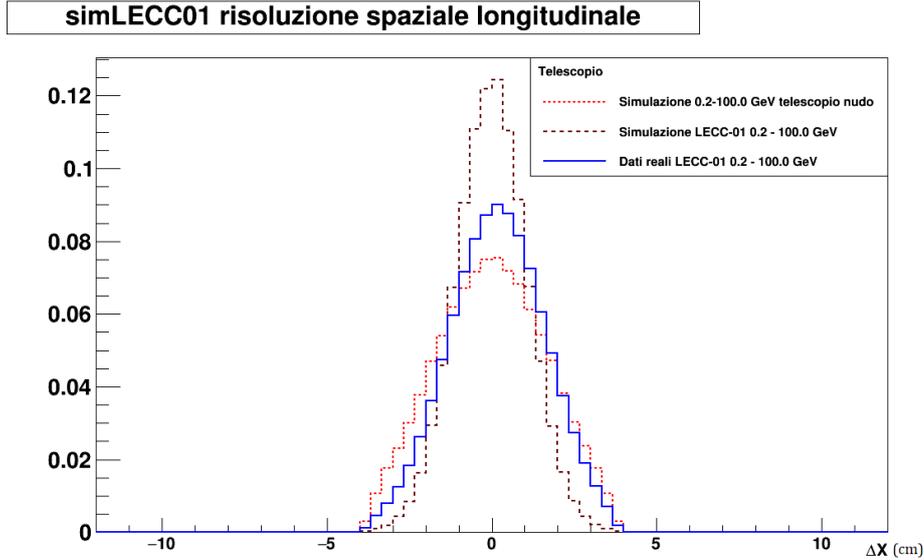


Figura 4.14: Risoluzione spaziale longitudinale. In blu: dati reali LECC-01. Marrone: simulazione LECC-01. Rosso: simulazione con il telescopio circondato da aria. Le curve ottenute dalla simulazione in GEMC sono il risultato della somma pesata delle componenti nei tre possibili intervalli di energia. I valori delle risoluzioni sono mostrati in tabella 4.4.

Le figure 4.15 e 4.16 mostrano il fit lineare eseguito per ricavare β nel caso reale e simulato per LECC-01 .

L'analisi dati fornisce $\beta_{LECC-01}^{reale} = 0.945 \pm 0.001$ e $\beta_{LECC-01}^{sim} = 0.977 \pm 0.001$. Eseguendo un fit gaussiano dell'istogramma della distribuzione di β si ottiene $\beta_{LECC-01}^{reale} = 0.961 \pm 0.086$ e $\beta_{LECC-01}^{sim} = 0.994 \pm 0.033$. Il valore di β ricavato dai dati simulati è superiore a quello ottenuto elaborando i dati reali e ciò dovrebbe corrispondere alla selezione delle particelle ad energia maggiore, data la sovrastima degli spessori.

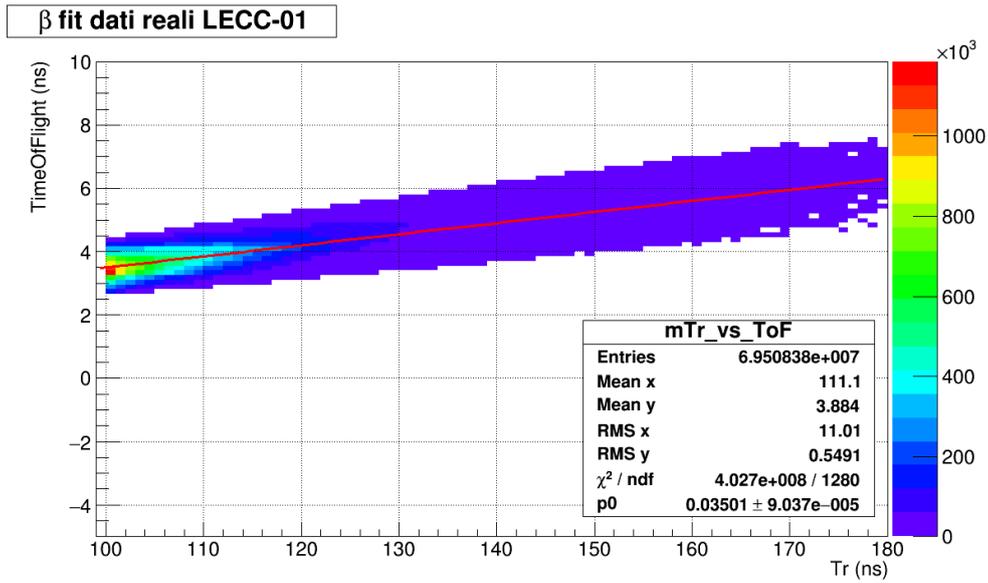


Figura 4.15: Fit lineare eseguito per ricavare β dai dati reali del telescopio LECC-01. Applicando la formula $\beta = \frac{1}{p_0 c}$ si ottiene $\beta = 0.945 \pm 0.001$.

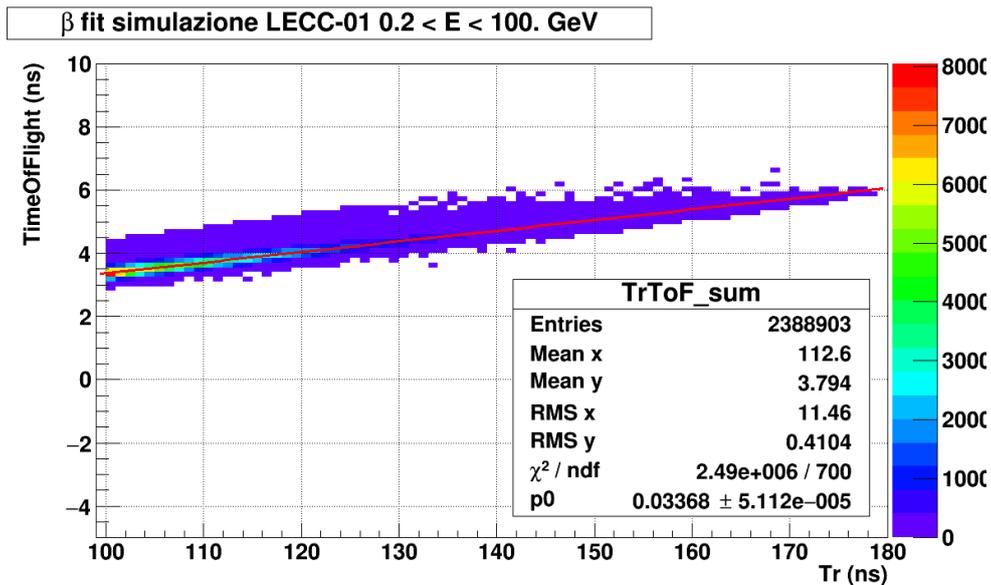


Figura 4.16: Fit lineare eseguito per ricavare β dai dati simulati del telescopio LECC-01. Applicando la formula $\beta = \frac{1}{p_0 c}$ si ottiene $\beta = 0.977 \pm 0.001$.

4.3 Il telescopio LECC-02

4.3.1 Condizioni sperimentali reali

Il telescopio LECC-02 è installato in una stanza situata all'ultimo piano del Liceo Classico Musicale "G. Palmieri" della città di Lecce, pertanto il flusso di particelle incidenti sul rivelatore è influenzato da un unico solaio sovrastante il telescopio ed unicamente dalle pareti che delimitano la stanza. Il rivelatore ha uno dei lati corti distante 130 cm dalla parete rivolta verso l'esterno dell'edificio, ed un lato lungo posto a 50 cm da una delle pareti laterali. L' MRPC inferiore è posto ad un'altezza stimata di 50 cm rispetto al pavimento. Queste distanze sono state riprodotte senza alterazioni nella geometria implementata in GEMC.

4.3.2 Geometria implementata

Per effettuare la simulazione è stato sufficiente implementare in GEMC la geometria della stanza in cui è installato il telescopio, ma non è stato possibile acquisire sul campo dettagli approfonditi sulla geometria dell'edificio ed i dati a disposizione sono stati limitati alle dimensioni della stanza del telescopio. Per stimare lo spessore delle pareti e del solaio da implementare in GEMC si è scelto di fare una media tra gli spessori considerati per la simulazione di LECC-01 ed i dati a disposizione circa le simulazioni di telescopi che operano in condizioni ambientali simili come, ad esempio, il rivelatore TORI-03 in quanto edifici scolastici, non storici, costruiti presumibilmente con le stesse tecniche. In tabella 4.5 sono illustrate le dimensioni della stanza in cui è installato LECC-02 così come sono state implementate nella simulazione.

Tabella 4.5: Caratteristiche geometriche della stanza in cui è installato LECC-02.

Dimensioni della stanza (cm)			
Telescopio	Altezza	Lunghezza	Larghezza
LECC-02	350	600	340
Spessori pareti e solaio			
	Pareti interne	Parete esterna	Solaio
LECC-02	10	20	30

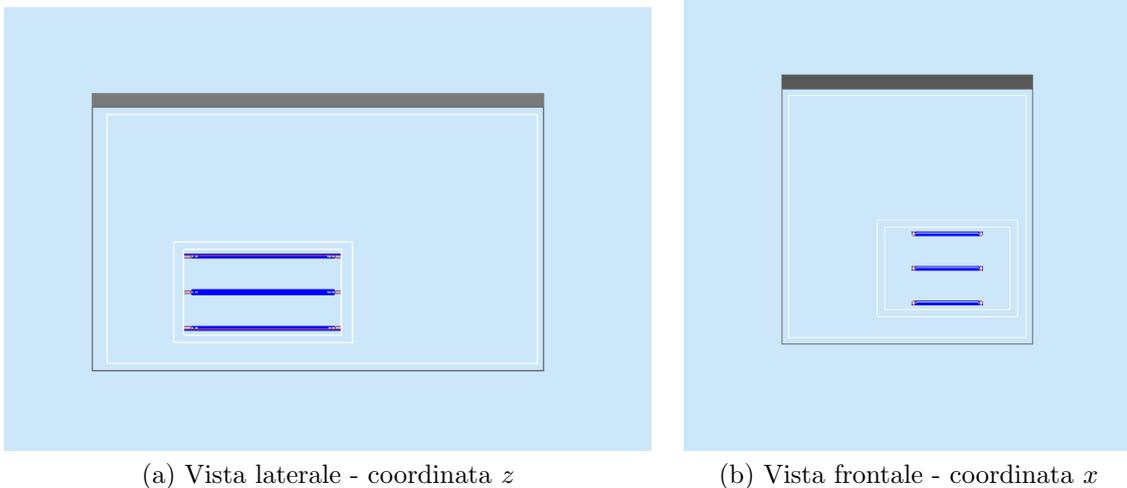


Figura 4.17: Dettagli della geometria della stanza simulata per LECC-02.

4.3.3 Discussione dei risultati

La figura 4.18 mostra il confronto tra le distribuzioni angolari estrapolate dai dati reali acquisiti da LECC-02 e quelle ottenute dopo aver ricostruito le tracce ottenute simulando 10 milioni di eventi in ogni Run.

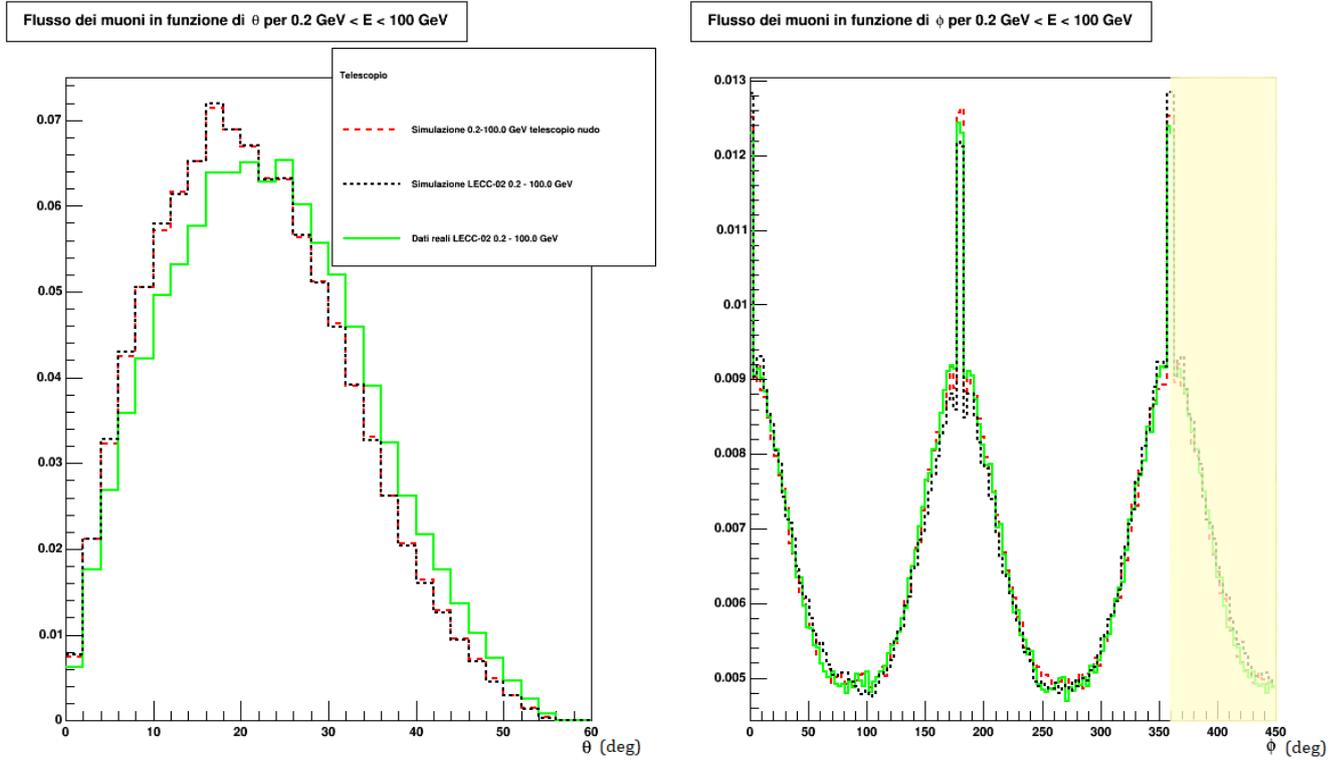


Figura 4.18: Distribuzioni in θ e ϕ del flusso dei muoni. In verde: dati reali LECC-02. In rosso: simulazione telescopio in aria. Marrone scuro: dati simulati LECC-02. Gli istogrammi sono normalizzati ad 1.

L'accordo fra le curve fornisce una prima conferma della validità della simulazione e delle stime fatte per implementare gli strati di materiale che circondano il telescopio. In corrispondenza di $\phi = 180^\circ$, l'abbassamento del picco della curva relativa ai dati simulati suggerisce che le particelle simulate subiscano in maniera più incisiva i fenomeni di perdita di muoni descritti in GEMC nell'attraversare strati di materiale di spessore progressivamente maggiore. Le figure 4.19 e 4.20 mostrano i residui calcolati come rapporto fra le distribuzioni in θ e ϕ estrapolate dai dati simulati per LECC-02 e quelle ricavate dai dati reali.

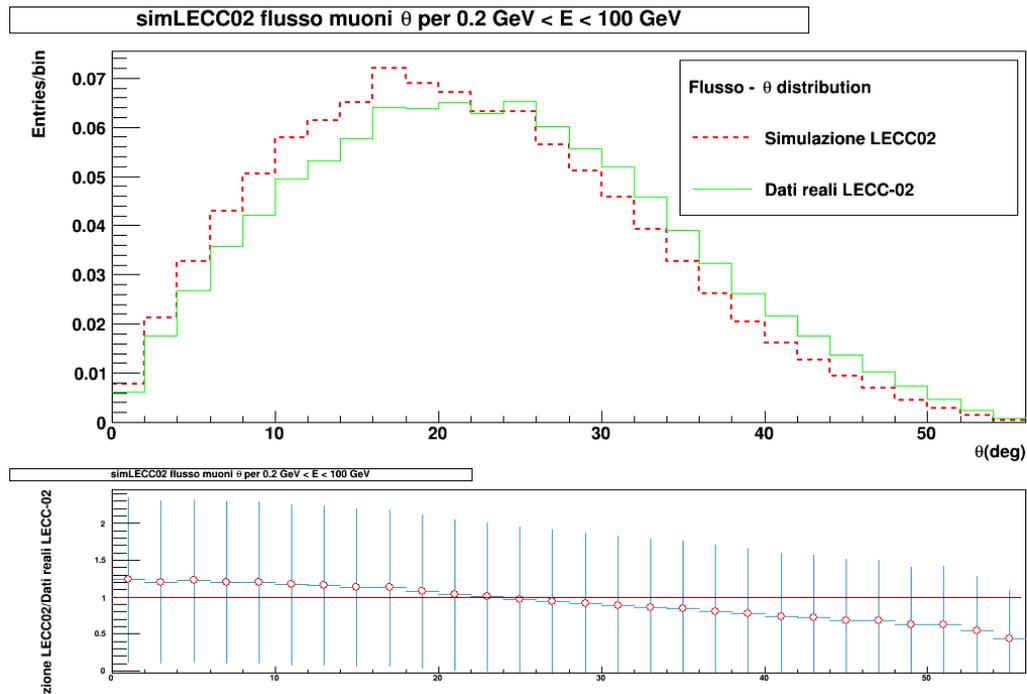


Figura 4.19: In alto: distribuzione θ per LECC-02 (verde) e per LECC-02 simulato (linea rossa tratteggiata). In basso sono mostrati i residui calcolati come rapporto fra la distribuzione del flusso in θ del telescopio simulato e i dati reali di LECC-02. Il grafico dei residui mostra un accordo entro il 10%

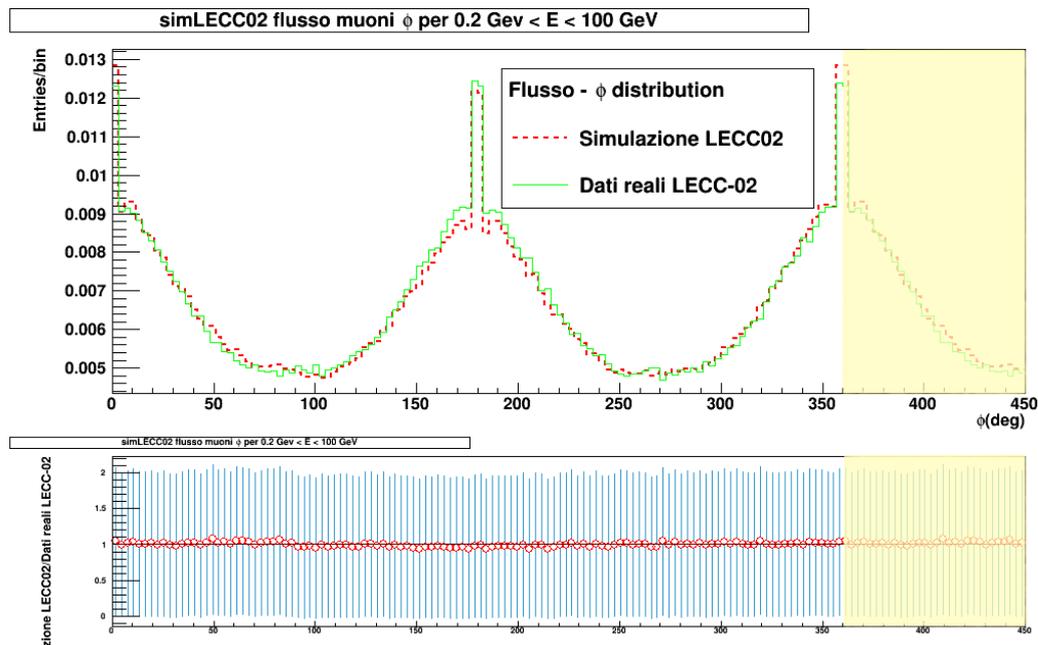


Figura 4.20: In alto: distribuzione ϕ per LECC-02 (verde) e per LECC-02 simulato (linea rossa tratteggiata). In basso sono mostrati i residui calcolati come rapporto fra la distribuzione del flusso in ϕ del telescopio simulato e i dati reali di LECC-02. Il grafico dei residui mostra un accordo entro il 20%

In figura 4.21 sono raffigurati gli istogrammi sovrapposti delle risoluzioni parziali longitudinali dei telescopi LECC-02 simulato, LECC-02 reale e simulato in aria. L'analisi dei dati e le procedure descritte nei paragrafi precedenti per il calcolo di σ_x e σ_y forniscono i risultati riassunti in tabella 4.6.

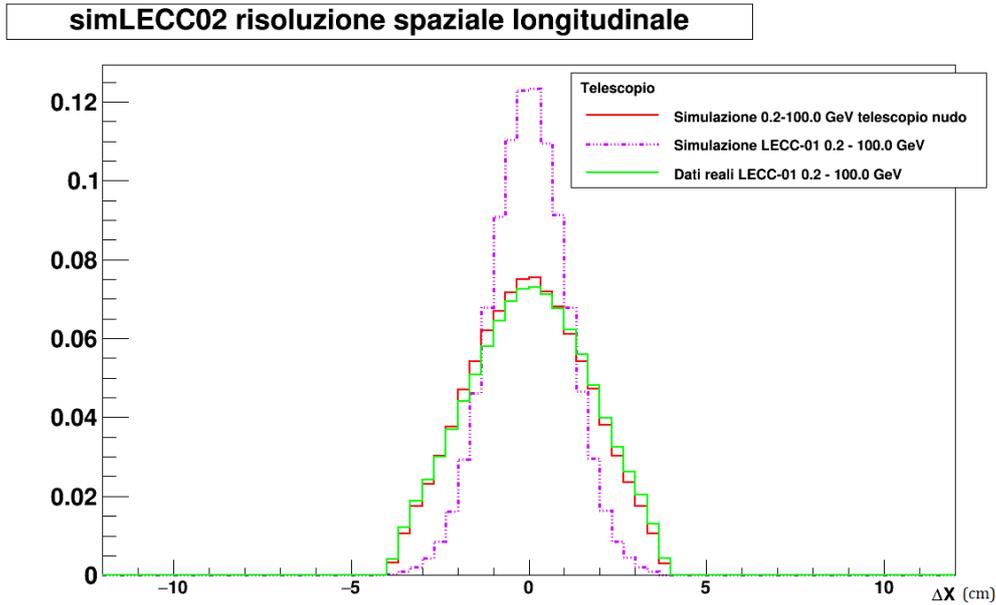


Figura 4.21: Risoluzione spaziale longitudinale. In verde: dati reali LECC-02. Viola: dati simulati LECC-02. Rosso: dati simulati con telescopio in aria. Le curve ottenute dalla simulazione in GEMC sono il risultato della somma pesata delle componenti nei tre possibili intervalli di energia. I valori delle risoluzioni sono mostrati in tabella 4.6.

Tabella 4.6: Risoluzione spaziale calcolata dai dati reali e dai dati simulati per il telescopio LECC-02

Telescopio	$\sigma_x(cm)$	$\sigma_y(cm)$
LECC-02 reale	1.45 ± 0.41	0.89 ± 0.33
LECC-02 GEMC	1.016 ± 0.025	0.84 ± 0.29

In figura 4.22 è rappresentato il fit lineare attraverso il quale è possibile ricavare β dai dati simulati per il telescopio LECC-02. La figura 4.23 mostra il fit lineare eseguito per ricavare β dai dati reali acquisiti dal telescopio LECC-02. I risultati di ciascun fit sono riportati in tabella 4.7, confrontati con i valori ottenuti attraverso dei fit gaussiani. I valori di β sono in accordo per entrambe le procedure di fit e ciò fornisce una ulteriore conferma della validità delle stime effettuate nell'implementare la geometria per la simulazione di LECC-02.

Tabella 4.7: Valori di β ricavati tramite fit lineare e fit gaussiano sui dati reali e sui dati simulati per il telescopio LECC-02.

Telescopio	β da fit lineare	β da fit gaussiano
LECC-02 reale	0.982 ± 0.001	1.002 ± 0.095
LECC-02 GEMC	0.980 ± 0.001	0.986 ± 0.054

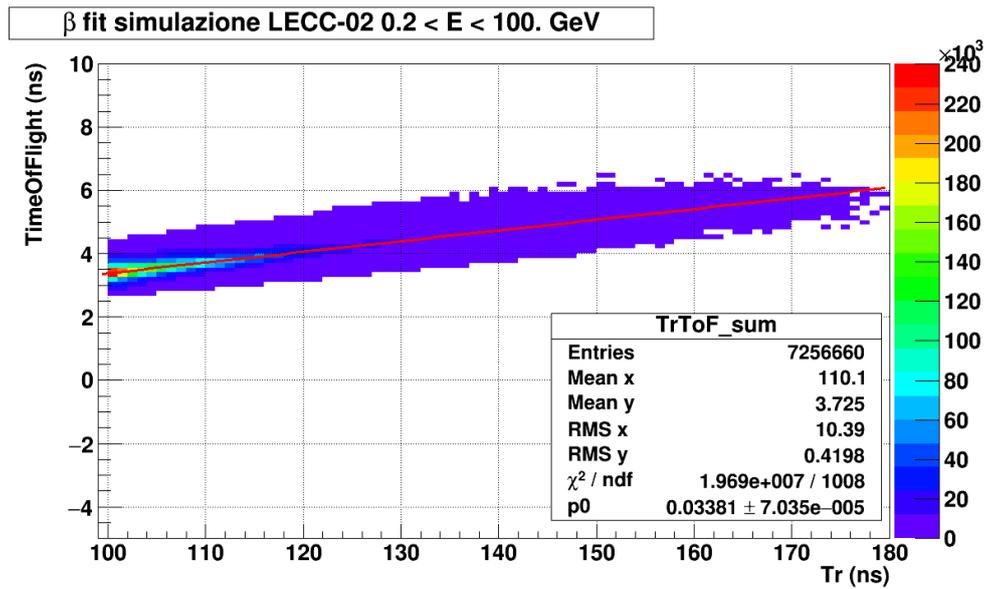


Figura 4.22: Fit lineare eseguito per ricavare β dai dati simulati per il telescopio LECC-02. Applicando la formula $\beta = \frac{1}{p_0 c}$ si ottiene $\beta = 0.980 \pm 0.001$.

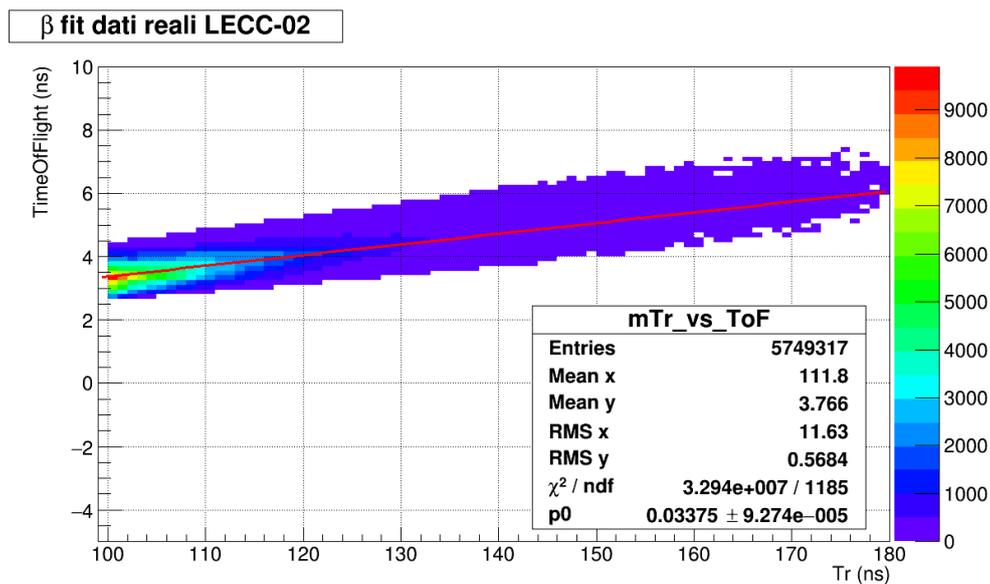


Figura 4.23: Fit lineare eseguito per ricavare β dai dati reali acquisiti dal telescopio LECC-02. Applicando la formula $\beta = \frac{1}{p_0 c}$ si ottiene $\beta = 0.982 \pm 0.001$.

Conclusioni

In questa tesi è stata riprodotta per la prima volta la geometria complessa di edifici che ospitano i telescopi del progetto EEE. La geometria è stata implementata grazie a GEMC e sono stati generati 10^7 eventi nei tre intervalli di energia possibili. I dati ottenuti sono stati pesati secondo la composizione del flusso di muoni a livello del mare. L'accordo con i dati sperimentali è discreto ma comunque perfettibile per LECC-02. Sebbene i risultati ottenuti riproducano qualitativamente i casi reali, mostrano come la strada intrapresa non sia lontana da risultati anche quantitativamente validi: la simulazione è riuscita a riprodurre le asimmetrie delle distribuzioni angolari per ciascun telescopio e simulare come varino le risoluzioni spaziali ed il valore di beta a seconda dei materiali e dello spessore degli ostacoli che circondano i rivelatori. Lo studio mette bene in evidenza l'importanza di una più corretta valutazione degli spessori e la parametrizzazione dei materiali: attualmente si considerano nella simulazione edifici costituiti da cemento, ma potrebbe essere necessario implementare materiali edilizi meno densi, come la pietra calcarea, o aggiungere strati di materiale ceramico per riprodurre in maniera realistica l'interazione della radiazione con le costruzioni. E' tuttavia possibile ottenere risultati che si avvicinino maggiormente al caso reale raffinando la simulazione attraverso una stima migliore degli spessori dei solai e delle pareti in cemento degli edifici e della loro disposizione attorno ai rivelatori. Tale lavoro di tesi apre inoltre la strada alla valutazione di nuovi studi dell'utilizzo dei rivelatori del progetto EEE: gli edifici in cui i rivelatori sono installati, grazie alla diversa struttura, consentono una selezione in funzione dell'energia delle popolazioni di particelle rivelate, ed i telescopi possono essere inoltre utilizzati come tomografi per la caratterizzazione degli edifici che li ospitano.

Bibliografia

- [1] Pacini D., *La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque*, Il Nuovo Cimento, 3 (1912) 93.
- [2] Hess V., *Penetrating Radiation in seven free balloon flight*, Phys.Zeit 13(1912), 1084.
- [3] Bothe, W., Kolhörster, W., *Das Wesen der Höhenstrahlung*, Z. Physik 56, 751–777 (1929).
- [4] Millikan, R. A., *High Frequency Rays of Cosmic Origin*, Proc. of the National Academy of Sciences U.S.A. 12, no. 1, pages 48-55 (1926).
- [5] Rossi B., *Cosmic Rays*, George Allen and Unwin LTD., London 1964.
- [6] C. Anderson, *The Positive Electron*, Phys. Rev. 43 (1933), 492.
- [7] P. M. S. Blackett, G. P. S. Occhialini, *Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation*, Proc. R. Soc. London 139A (1933), 699-726.
- [8] S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, *Note on the nature of Cosmic-Ray Particles*, Phys. Rev. 51 (1937), 884.
- [9] P.Auger and R.Maze. *Les grandes gerbes cosmiques de l'atmosphère* C.R. A cad.Sci.Ser. B 207 (1938), 228.
- [10] G.D. Rochester, C.C. Butler, *Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles*, Nature 160 (1947), 855.
- [11] P.S. Freier et al., *Evidence for heavy nuclei in the primary cosmic radiation*, Phys. Rev. 74 (1948), 213.
- [12] O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand, T. Ypsilantis, *Observation of Antiprotons*, Phys. Rev. 100 (1955), 947.
- [13] M. P. Panetta, *Study of Cosmic Ray Large Scale Anisotropy below the knee with the telescopes of the EEE Project*, Tesi di Dottorato di ricerca in Fisica, Università del Salento (2017).
- [14] Bleeker J.A., *The Century of Space Science*, Springer, 2001.
- [15] S. Grazi, *Messa a punto e caratterizzazione di un telescopio di MRPC*, Tesi di laurea Magistrale in Fisica, Università di Genova (A.A. 2011/2012).
- [16] S. Aiola, *Identificazione di sciami atmosferici estesi mediante misure di correlazione temporale nell'ambito del progetto EEE*, Tesi di Laurea Triennale in Fisica, Università degli Studi di Catania (A.A. 2009/2010).

- [17] K. Nakamura et al.(PDG), JP G 37,075021 (2010 & 2011 partial Update).
- [18] The Pierre Auger Observatory:
<https://www.auger.org/index.php/news/latest-news>
- [19] AGASA:
<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/results.html#highest>
- [20] HiRes:
<http://www.physics.adelaide.edu.au/astrophysics/hires/index.html>
- [21] Il progetto ALTA:
<http://csr.phys.ualberta.ca/alta/>
- [22] Il progetto SkyView:
<http://skyview.uni-wuppertal.de>
- [23] Il progetto SEASA:
<http://www.particle.kth.se/SEASA>
- [24] Il progetto HiSPARC
<http://www.hisparc.nl>
- [25] Il progetto CZELTA
<http://www.utef.cvut.cz/en/research/czelta.html>
- [26] *ALTA/CZELTA-a sparse very large air shower array: overview of the experiment and first results*, K. Smolek, F. Blaschke et al, (2009).
- [27] A. Iyono et al. (LAAS Collaboration), *Cosmic ray composition studies through the Gerasimova-Zatsepin effects of heavy nuclei at LAAS*, *Astrophys. Space Sci. Trans.* 7, 327 (2011).
- [28] Il progetto CREDO:
<https://credo.science/about-the-credo-project/>
- [29] Piotr Homola et al., *Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory*, arXiv:2010.08351
- [30] Centro Fermi:
<https://www.cref.it/progetto-extreme-energy-events/>
- [31] Extreme Energy Events (EEE) - La scienza nelle scuole:
<https://eee.centrofermi.it/>
- [32] M. Abbrescia et al. (EEE Collaboration) , *The cosmic-muon and detector simulation framework of the Extreme Energy Events (EEE) experiment*, arXiv:2104.06012v1 [physics.ins-det], 13 Apr 2021
- [33] Cicalò C. et al. (EEE Collaboration), *The Extreme Energy Events experiment*, *PoS (ICRC 2019) 389*.
- [34] CNAF web site: <https://www.cnaf.infn.it/en/>.
- [35] M. Abbrescia et al. (EEE Collaboration), *The Extreme Energy Events experiment: an overview of the telescopes performance*, 2018 JINST 13 P08026.

- [36] F. Coccetti, *Some Statistic about the EEE Runs*
https://agenda.centrofermi.it/event/140/contributions/1148/attachments/573/866/statistics_EEE_Runs_jun2019.pptx
- [37] G. Mandaglio et al. (EEE Collaboration), *A simulation tool for MRPC telescopes of the EEE project*, 2020 JINST 15 C10021.
- [38] Panetta M.P. et al. (EEE Collaboration), *The new trigger/GPS module for the EEE project*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 936, p. 376-377 (2019).
- [39] GEMC web site:
<https://gemc.jlab.org/gemc/html/index.html>
- [40] A. S. Triolo, *Tomografia muonica attraverso l'utilizzo dei telescopi EEE*, Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, Università degli Studi di Messina, (A.A. 2020/2021).
- [41] M. Guan, M.-C. Chu, J. Cao, K.-B. Luk and C. Yang, *A parametrization of the cosmic-ray muon flux at sea-level*, arXiv:1509.06176.
- [42] Particle Data Group collaboration, Review of Particle Physics, Phys. Rev. D 98 (2018) 030001.
- [43] Root:
<https://root.cern.ch/>
- [44] C++:
<http://www.cplusplus.com/>

Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, ritengo doveroso ringraziare tutte quelle persone che ne hanno resa possibile la realizzazione, ognuno dando un contributo diverso, molto spesso in maniera inconsapevole.

Un doveroso ringraziamento va al mio relatore, il Prof. M. Panareo, per la disponibilità e la cura dedicata alla revisione di questo elaborato e per aver ridestato il mio interesse nei confronti della Fisica, grazie ai suoi metodi didattici, in un momento in cui ero ad un passo dall'abbandonare gli studi. Ringrazio la Dott.ssa M. P. Panetta per essere stata una preziosa guida, paziente, disponibile e piena di risorse: grazie a lei ho imparato ad usare tutti gli strumenti necessari per portare avanti questo studio senza sentire il peso del dover imparare tutto partendo da zero.

Ringrazio tutti gli amici che hanno creduto in me fino in fondo, in particolare quelli della mia "famiglia trentina" ormai sparsa fra l'Europa ed il Nord America: la persona che sono adesso è il frutto di tutto ciò che abbiamo vissuto insieme.

Ringrazio Adolfo, Federica, Marco, Laura, Dario per ogni momento di studio serio ed ogni momento esilarante vissuto al Fiorini, dalle "gare di gentilezza" all'oroscopo al caffè mattutino, dalle bizzarre teorie sull'origine dell'Universo alle passeggiate al parchetto di Ingegneria: ricordare ognuno di questi momenti mi fa sempre ridere fino a perdere il fiato.

Un ringraziamento a Simone per la fiducia che ha riposto in me nel rivolgermi tutti i suoi dubbi accademici: è solo cercando di dare una risposta ad ognuno dei suoi quesiti che ho finalmente compreso di aver fatto miei molti dei concetti studiati.

Ringrazio il gruppo dei Dottorandi del Dipartimento di Fisica Federica, Isabella, Francesco, Antonio, Fabio, Margherita e ad Enrico: sebbene i nostri percorsi si siano incrociati "dal vivo" per un brevissimo periodo, con il vostro esempio siete stati per me fondamentali per capire verso quale campo della Fisica rivolgere il mio interesse per proseguire gli studi.

Un grazie al canottaggio, ai miei compagni di equipaggio, ai miei allenatori, perchè in certi momenti solo vogando ho potuto dare nuovo slancio alla mia determinazione.

Un grazie immenso alla mia famiglia per il sostegno datomi in tutti questi anni, non sempre costellati di successi, senza il quale non avrei mai ritrovato la giusta serenità per concludere questo percorso: la determinazione che mi ha portata a non abbandonare gli studi è principalmente frutto di questa incondizionata fiducia.

Ringrazio Paolo che negli ultimi mesi, con spirito da coach, mi ha scritto ogni fine settimana per incitarmi a "darmi una mossa" ed al mio gruppo musicale che non ha mai storto il naso per tutte le volte in cui non ho potuto partecipare alle prove per studiare.

In ultimo, un grazie speciale al mio professore di Fisica del Liceo, L. Cota: se ho deciso di intraprendere questo meraviglioso e turbolento viaggio nel mondo della scienza, è solo "colpa" sua.