

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

**Studio dell'intensità del flusso  
di muoni atmosferici con il telescopio  
sottomarino KM3NeT**

**Relatore:**  
**Prof. Maurizio Spurio**

**Presentata da:**  
**Catalin Sajn**

**Correlatore:**  
**Dott. Francesco Filippini**

Anno Accademico 2023/2024

## Abstract

L'astronomia multimessaggera offre nuovi metodi per indagare ed avere un'immagine più dettagliata del cosmo. In questo contesto, la collaborazione KM3NeT sta costruendo una rete sottomarina di telescopi per neutrini di seconda generazione per analizzare ed individuare possibili sorgenti di neutrini astrofisici. I muoni atmosferici rappresentano, in questo tipo di rivelatori, la principale sorgente di fondo. Nonostante questo, possono essere sfruttati per verificare la correttezza dei dati acquisiti. In questa tesi viene studiata la relazione che intercorre tra l'intensità verticale dei muoni atmosferici rispetto alla quantità di materiale che hanno dovuto attraversare per giungere al rivelatore. Si è replicato in linguaggio Python un modello semi-analitico, seguendo quanto fatto in [1]. Le aspettative teoriche così derivate sono state poi comparate ai dati simulati con l'algoritmo di generazione degli eventi MUPAGE per verificare la correttezza delle parametrizzazioni adottate dalla collaborazione.

# Indice

<b>Indice</b>	<b>3</b>
<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>1 Muoni, neutrini e raggi cosmici</b>	<b>7</b>
1.1 Sorgenti di muoni: i raggi cosmici . . . . .	7
1.1.1 Raggi cosmici . . . . .	7
1.1.2 Spettro energetico dei raggi cosmici . . . . .	8
1.1.3 Modelli di Accelerazione e Origine dei Raggi Cosmici . . . . .	10
1.2 Interazione dei neutrini con la materia . . . . .	10
1.3 Fondamenti dei muoni . . . . .	11
1.3.1 Storia della loro scoperta . . . . .	11
1.3.2 Proprietà e caratteristiche dei muoni . . . . .	11
1.3.3 Perdita di energia del muone nella materia . . . . .	13
1.3.4 Produzione di muoni e neutrini . . . . .	14
1.3.5 Background atmosferico . . . . .	14
1.4 L'astronomia multimessaggera . . . . .	15
<b>2 Esperimento KM3NeT</b>	<b>19</b>
2.1 Apparato sperimentale . . . . .	20
2.1.1 Caratteristiche dei rivelatori ARCA e ORCA . . . . .	20
2.2 Rivelazione delle particelle . . . . .	22
2.2.1 Effetto Cherenkov . . . . .	22
2.2.2 Caratterizzazione degli eventi . . . . .	23
2.2.3 Fonti di background . . . . .	25
<b>3 Relazione intensità-profondità dei muoni atmosferici</b>	<b>27</b>
3.1 Fondamenti teorici . . . . .	27
3.1.1 Spettro di muoni atmosferici a livello del mare . . . . .	29
3.1.2 Spettro di muoni atmosferici in profondità . . . . .	31
3.2 Simulazioni Monte Carlo: MUPAGE . . . . .	32
3.3 Analisi preliminare dei dati . . . . .	33
3.4 Confronto con i dati simulati . . . . .	35
<b>1 Sviluppo polinomiale del coseno effettivo</b>	<b>39</b>
<b>2 Derivazione analitica del flusso dei muoni atmosferici in profondità</b>	<b>41</b>



# Introduzione

La fisica delle particelle ha avuto un notevole sviluppo durante tutto il XX-esimo secolo. Il Modello Standard (MS) delle particelle elementari è l'attuale impalcatura teorica che spiega le osservazioni e le misure compiute. Tuttavia, nonostante la sua lunghissima serie di successi, questo modello presenta varie limitazioni. Ad esempio i neutrini sono supposti privi di massa, ma la recente scoperta del fenomeno delle oscillazioni di sapore dei neutrini necessita che queste particelle debbano avere, seppur piccolissima, una massa non nulla.

Nel settore della fisica astroparticellare, i metodi dell'astronomia multimessaggera delineano una strategia rivoluzionaria per l'esplorazione dell'Universo e, in questo contesto, i telescopi progettati per la rivelazione dei neutrini di origine astrofisica offrono una prospettiva unica, che, unita ad altre tecniche di osservazione del cielo (astronomia radio, gamma, rivelazione di onde gravitazionali ecc.), produce una visione più dettagliata e completa di oggetti e fenomeni astrofisici. La collaborazione KM3NeT prende in eredità il lavoro svolto dagli esperimenti ANTARES e NEMO e sfrutta una serie di telescopi posti sul fondale del Mar Mediterraneo per studiare i neutrini astrofisici provenienti da fenomeni astronomici estremi quali supernove e Gamma Ray Burst (GRB) e i neutrini atmosferici. Inoltre, tale telescopio è coinvolto in numerosi studi interdisciplinari che utilizzano la strumentazione per analisi, ad esempio, di tipo geofisico e biomarino.

Oltre ai neutrini astrofisici, i due detector di KM3NeT, chiamati ARCA (Italia, 3500 metri sotto il livello del mare) e ORCA (Francia, 2500 metri sotto il livello del mare), sono in grado di rivelare e identificare anche altri tipi di particelle, fra cui muoni e neutrini atmosferici. Questi sono prodotti dall'interazione che avviene fra le particelle presenti nell'atmosfera terrestre e i raggi cosmici, ovvero protoni e nuclei atomici molto energetici generati in ambienti astrofisici estremi, come supernovae e stelle di neutroni.

L'obiettivo di questa tesi è di caratterizzare ed analizzare la dipendenza che l'intensità del flusso di tali muoni ha con la profondità. Questa relazione, confrontata con modelli teorici, è di notevole importanza, in quanto permette la precisa caratterizzazione del flusso dei muoni atmosferici alle profondità alle quali è situato l'esperimento KM3NeT. I muoni, nonostante rappresentino una fonte di rumore per la ricerca dei neutrini atmosferici e astrofisici, racchiudono importanti informazioni riguardo alla natura dei raggi cosmici primari che li hanno generati. Le capacità sperimentali di KM3NeT permettono infatti di accedere alle caratteristiche fisiche degli sciami di muoni prodotti in atmosfera, riuscendo a caratterizzare

anche lo spettro dei raggi cosmici primari.

Nella prima sezione, verranno trattati i fondamenti del muone e l'astronomia multimessaggera.

Nel secondo capitolo verrà descritto il progetto KM3NeT, il telescopio e il principio di rivelazione alla base del suo funzionamento.

Nella terza sezione si va a studiare la dipendenza che ha l'intensità del flusso dei muoni atmosferici con la profondità inclinata, ovvero con la distanza percorsa da tali muoni all'interno della materia. Tale dipendenza è confrontata infine con quella ricavata dai dati simulati con il generatore MUPAGE.

# Capitolo 1

## Muoni, neutrini e raggi cosmici

### 1.1 Sorgenti di muoni: i raggi cosmici

#### 1.1.1 Raggi cosmici

I raggi cosmici (*cosmic rays* in inglese, abbreviato CRs) sono particelle stabili e molto energetiche, principalmente protoni e nuclei di elio, e la restante parte nuclei più pesanti (fino al ferro) ed elettroni [2]. Tali particelle provengono da diversi ambienti astrofisici, a partire da quelli emessi dal sole (raggi cosmici solari, poco energetici) fino ad arrivare a quelli extragalattici, che possono arrivare ad energie elevatissime (dell'ordine di  $10^{20}eV$ ).

La loro scoperta viene attribuita a Victor Hess, fisico austriaco che, dal 1911 al 1913, mandò in quota con dei palloni aerostatici (fino a 5.2km) diversi strumenti in grado di misurare la radiazione ionizzante. I dati che ottenne [3], permisero di concludere che la fonte di tale radiazione non fosse la Terra, come si pensava in quel periodo, bensì che provvenisse dallo spazio. Nel 1925, la sua scoperta fu confermata da Robert Andrews Millikan, e chiamarono tale radiazione con il nome “raggi cosmici”. Questa scoperta valse a Victor Hess il Premio Nobel per la Fisica nel 1936, condiviso con Carl David Anderson.

Hess non fu l'unico ad ipotizzare che tale radiazione ionizzante e penetrante fosse di origine extraterrestre: tale risultato fu ottenuto anche da Domenico Pacini, fisico italiano che, negli anni 1907-1911, misurò l'intensità di tale radiazione alla superficie e in profondità del mare e del Lago di Bracciano, e scoprì che i raggi cosmici in profondità erano meno intensi rispetto a quelli sulla superficie, ipotizzando dunque che si trattasse di radiazione proveniente dallo spazio. Questo risultato fu pubblicato successivamente nel 1912 sulla rivista scientifica *Il nuovo Cimento* [4].

### 1.1.2 Spettro energetico dei raggi cosmici

Lo spettro energetico differenziale dei raggi cosmici è raffigurato in Fig. [1.1], ed è proposto in una rappresentazione doppio-logaritmica. Inoltre, lo si è moltiplicato per un fattore  $E^{2.6}$  per evidenziarne meglio le caratteristiche. Si possono distinguere 3 regioni alquanto lineari in tale grafico, e si può ipotizzare una legge di potenza fra lo spettro energetico e l'energia:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (1.1)$$

dove  $\alpha$  è detto *indice spettrale* e indica essenzialmente la pendenza della retta (nella rappresentazione doppio-log).

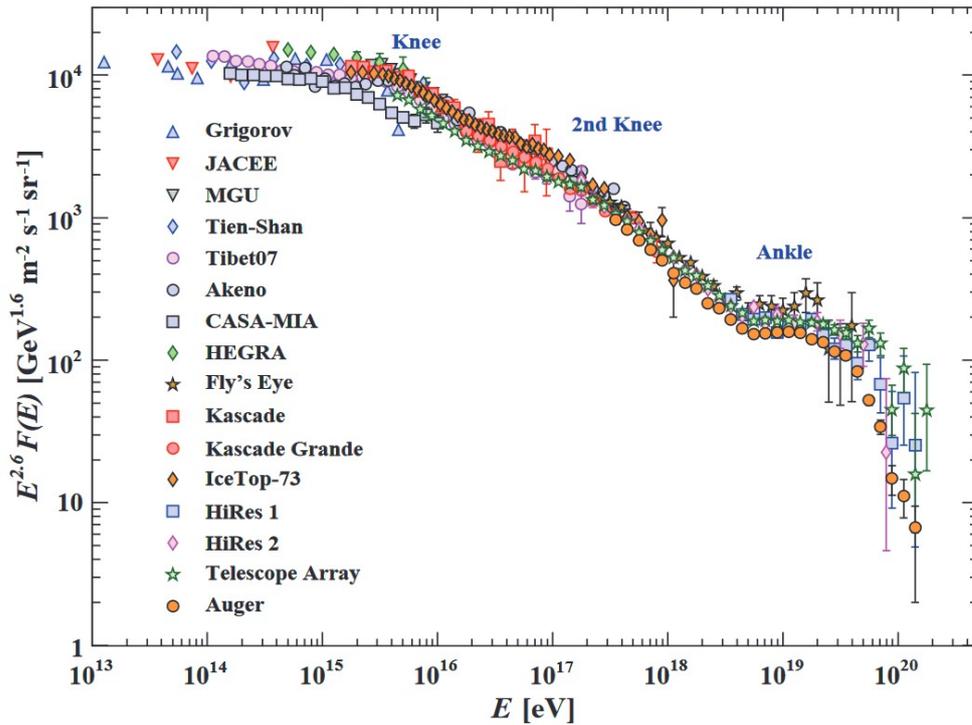
Il primo cambio di pendenza avviene a un'energia fra  $10^{15}eV$  e  $10^{16}eV$ , e prende il nome di *ginocchio*. Si è ipotizzato che esso sia dovuto all'impossibilità, in alcuni tipi di resti di supernovae in espansione, di accelerare protoni a energie maggiori di  $10^{15}eV$ . Nel *ginocchio*, si ha un cambiamento di indice spettrale da  $\sim 2.7$  (riguardante il range di energia  $E < E_{ginocchio}$ ) a  $\sim 3.1$ , valido fino al secondo punto critico, detto *secondo ginocchio*. Tale cambiamento di pendenza si trova a  $E \sim 4 \cdot 10^{17}eV$ , e si passa da un indice spettrale  $\alpha \sim 3.1$  ad  $\alpha \sim 3.3$ , ed è ancora fonte di dibattiti sulla sua origine. Sono stati proposti vari modelli, il più accreditato dei quali vede come origine di tale cambio di pendenza la fine dell'accelerazione dei nuclei di ferro provenienti da fonti dentro la Galassia. Infine, si ha un passaggio da  $\alpha \sim 3.3$  ad  $\alpha \sim 2.7$ , in un punto chiamato *caviglia*.

Dopo la caviglia, per energie  $E \gtrsim 10^{19}eV$ , si ha una caduta (dip) che può essere spiegata dal *GZK cutoff*: questo significa che il flusso di raggi cosmici con energie estremamente elevate è molto ridotto.

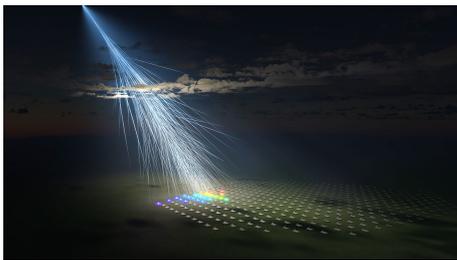
Al giorno d'oggi, esistono due metodi di misurazione dei raggi cosmici primari (quelli che impattano contro l'atmosfera, producendo raggi cosmici secondari).

Per quanto riguarda i raggi cosmici con  $E \lesssim 10^{14}eV$ , si usano delle misurazioni di tipo diretto, effettuate a bordo di satelliti e palloni aerostatici, misurandoli prima che essi interagiscano nell'atmosfera. Con queste tecniche, si riesce a misurare anche la loro composizione chimica, ovvero il loro numero atomico. Tuttavia, gli strumenti nello spazio sono limitati dal punto di vista delle dimensioni, dunque non si può instrumentare una grande area per poter rivelare raggi cosmici più energetici.

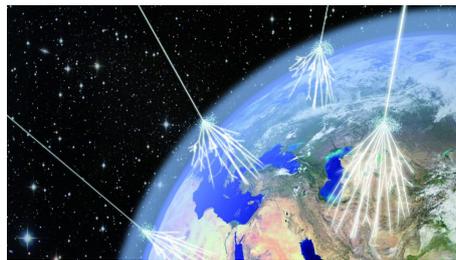
Invece, per i raggi cosmici con energia  $E \gtrsim 10^{14}eV$ , il flusso di particelle è talmente basso da rendere quasi completamente vano il tentativo di misurare tali raggi cosmici in maniera diretta: si passa dunque ad un approccio indiretto. I raggi cosmici, impattando contro i nuclei dell'atmosfera (solitamente ossigeno e azoto), creano una cascata di particelle dette raggi cosmici secondari (fenomeno dell'air shower, scoperto da B.Rossi [6], [7] e da P.Auger [8] indipendentemente). Questo sciame di particelle (si veda la Fig.[1.2]) viene poi misurato da rivelatori sulla superficie della Terra.



**Figura 1.1:** Spettro energetico differenziale dei raggi cosmici, moltiplicato per un fattore  $E^{2.6}$ . Inoltre, sono presenti in legenda i vari rivelatori che hanno contribuito con i loro dati a realizzare tale grafico. Sono ben visibili i 3 cambiamenti di pendenza: il primo e secondo ginocchio (Knee e 2nd Knee) e la caviglia (Ankle), come anche la caduta. Immagine presa da [5].



(a) Rappresentazione grafica di un CR il quale, impattando contro un nucleo dell'atmosfera, crea una cascata di particelle secondarie che poi vengono rivelate da un rivelatore superficiale.



(b) Raffigurazione grafica di molteplici raggi cosmici primari che interagiscono con l'atmosfera e creano diversi sciami di raggi cosmici secondari.

**Figura 1.2**

### 1.1.3 Modelli di Accelerazione e Origine dei Raggi Cosmici

Varie teorie sono state proposte per spiegare i meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici e individuare i relativi siti di accelerazione. Uno dei meccanismi più plausibili è il *meccanismo di Fermi*. Sviluppato intorno agli anni '50, prevedeva che i raggi cosmici venissero accelerati da un meccanismo iterativo, permettendo ad alcune particelle di arrivare ad energie estremamente elevate. Negli anni '70, tale modello fu applicato alla fluidodinamica e alle onde d'urto, e fu creato il modello di accelerazione per shock diffusivi, secondo la quale le particelle, confinate grazie alle disomogeneità del campo magnetico, vengono accelerate quando sono colpite ripetutamente da onde d'urto. Tale modello, in particolare, riesce a predire e a giustificare uno spettro energetico alla sorgente che segue un'andamento di potenza, con indice spettrale 2, ovvero:

$$\frac{d\Phi}{dE} = A \cdot E^{-2} \quad (1.2)$$

dove  $A$  è una costante di normalizzazione. Durante il loro percorso, i raggi cosmici interagiscono con campi magnetici e con il mezzo interstellare: quello che viene misurato dagli strumenti sulla Terra, dunque (vedi paragrafo 1.1.2) è il risultato della convoluzione del flusso alla sorgente con i vari effetti di propagazione lungo la loro traiettoria.

## 1.2 Interazione dei neutrini con la materia

Nel contesto del Modello Standard delle Particelle, i neutrini sono delle particelle subatomiche che fanno parte della famiglia dei leptoni. In particolare, ogni leptone carico sotto l'interazione debole ed EM (ovvero l'elettrone, il muone e il tauone) possiede un proprio neutrino, che quindi prendono i nomi di neutrino elettronico, muonico e tauonico. Insieme ai leptoni associati, formano dei doppietti di carica di isospin debole:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

Le interazioni di neutrini con la materia sono descritte dai seguenti processi deboli:

1. *Interazione a corrente carica (CC):*

$$\nu + N \xrightarrow{W^\pm} lep + X \quad (1.3)$$

2. *Interazione a corrente neutra (NC):*

$$\nu + N \xrightarrow{Z^0} \nu + X \quad (1.4)$$

dove  $N$  indica il nucleone interessato nella collisione del neutrino con la materia,  $X$  indica la cascata adronica dovuta all'elevata energia del neutrino e  $lep$  il leptone carico del sapore associato al neutrino. L'interazione a corrente carica viene mediata dai bosoni di gauge carichi  $W^\pm$  dell'interazione debole, mentre l'interazione a corrente neutra è mediata dal bosone di gauge neutro  $Z^0$ .

I neutrini sono delle particelle molto difficili da rilevare, per il fatto che interagiscono solo debolmente e per il tipo di andamento che ha la loro sezione d'urto. Nel caso di interazione CC, il neutrino presenta una sezione d'urto totale che cresce linearmente con l'energia del neutrino  $E_\nu$  fino a circa  $10^4$  GeV, proporzionalmente a  $10^{-38} \cdot (E_\nu/GeV)cm^{-2}$ .

## 1.3 Fondamenti dei muoni

### 1.3.1 Storia della loro scoperta

La scoperta dell'esistenza del muone risale al 1937, per mano di Carl Anderson e di Seth Neddermeyer [9], e fu ottenuta analizzando le tracce che tali particelle, prodotte dai raggi cosmici, lasciavano in un dispositivo di rivelazione detto camera a nebbia. Analizzando le caratteristiche delle particelle penetranti, osservarono un'anomalia rispetto alle predizioni delle teorie dell'epoca. Escludendo, grazie ad evidenze sperimentali, eventuali particelle ipotetiche di carica maggiore rispetto all'unità, proposero come soluzione l'esistenza di una nuova particella con la stessa carica elettrica dell'elettrone, ma con massa maggiore rispetto a quella dell'elettrone, e minore dei  $938MeV/c^2$  della massa del protone.

Nella Fig.[1.3], estratta da una pubblicazione di qualche mese dopo pubblicata da un gruppo di ricerca [10], si può vedere rispettivamente una traccia di un protone e una di un muone.

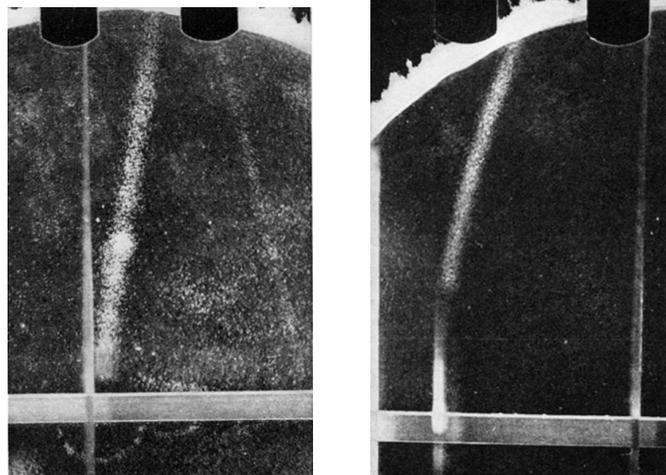
### 1.3.2 Proprietà e caratteristiche dei muoni

All'interno del Modello Standard delle particelle, il muone rientra innanzitutto nella famiglia dei leptoni, assieme agli elettroni, alle particelle  $\tau$  e ai loro corrispondenti neutrini. I leptoni sono fermioni di spin  $1/2$ . Non avendo carica di colore, non sono soggetti all'interazione nucleare forte. In particolare, i muoni interagiscono con le altre particelle attraverso l'interazione nucleare debole e quella elettromagnetica. Hanno una massa pari a circa 200 volte quella dell'elettrone [11]:

$$m_\mu = 105.6583745 \pm 0.0000024 \text{ MeV}/c^2 \quad (1.5)$$

Sono dei leptoni instabili, con una vita media misurata nel sistema di riferimento a riposo pari a [11]:

$$\tau_\mu = 2.1969811 \pm 0.0000022 \text{ } \mu s \quad (1.6)$$



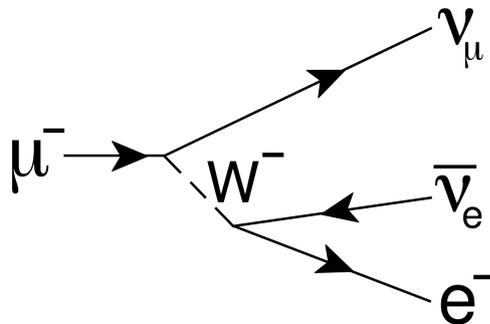
(a) Traccia lasciata nella camera a nebbia dopo il passaggio di un protone

(b) Traccia lasciata nella camera a nebbia dopo il passaggio di un muone

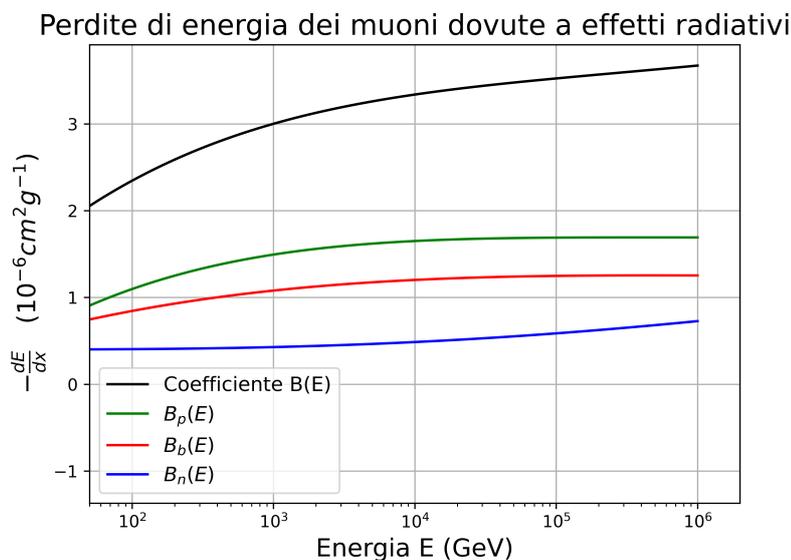
**Figura 1.3:** Le tracce di un protone (a sinistra) e di un muone (a destra), messe a confronto. Il muone crea una densità di ionizzazione più grande al suo passaggio rispetto a quella del protone. Immagini estratte da [10].

Il diagramma di Feynman del loro decadimento di natura debole è presente in Fig.[1.4]: il muone negativo  $\mu^-$  decade in un neutrino muonico  $\nu_\mu$  e nel bosone  $W^-$ , il quale a sua volta decade in un elettrone e un antineutrino elettronico  $\bar{\nu}_e$ .

I muoni rivestono un ruolo di particolare interesse in fisica, poiché attualmente esistono due canali di ricerca che li coinvolgono e che potrebbero indicare la presenza di fenomeni oltre il Modello Standard: il momento magnetico anomalo e la violazione di sapore.



**Figura 1.4:** Decadimento di un muone negativo  $\mu^-$  in un neutrino muonico, un antineutrino elettronico ed un elettrone, mediato dal bosone  $W^-$ , mediatore dell'interazione nucleare debole.



**Figura 1.5:** Andamento dei 3 contributi di perdita di energia per effetto radiativo: la linea verde rappresenta la perdita per creazione di coppie  $e^+e^-$ , la linea rossa rappresenta la perdita per bremsstrahlung, la linea blu la perdita per effetto fotonucleare. Il coefficiente  $b(E) = b_p(E) + b_b(E) + b_n(E)$  di perdita energetica del muone in acqua è rappresentato in figura con la curva nera.

### 1.3.3 Perdita di energia del muone nella materia

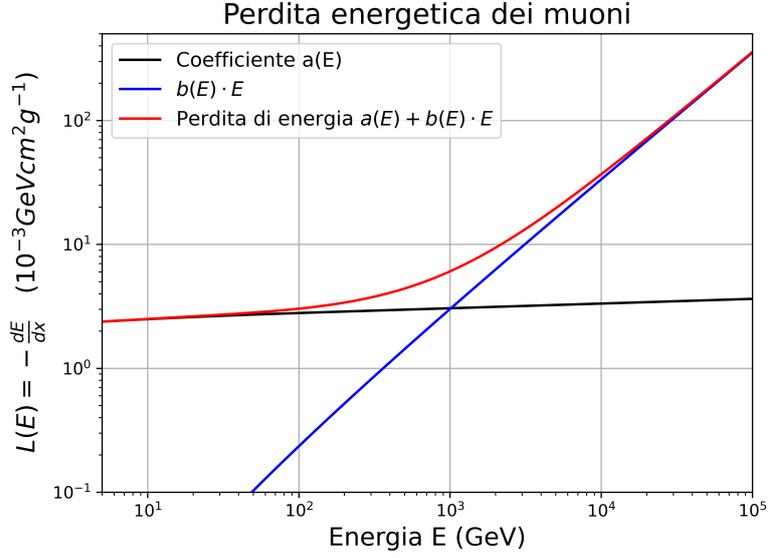
Il muone nella materia perde energia con un rate dato dalla seguente formula:

$$L(E) = -\frac{dE}{dx} = a(E) + b(E) \cdot E \quad (1.7)$$

A basse energie domina la ionizzazione, mentre ad alte energia dominano gli effetti radiativi, con la conseguente produzione di cascate elettromagnetiche. L'energia alla quale i due contributi sono uguali è detta energia critica, pari a  $\sim 500 GeV$ .

Il coefficiente  $a(E)$  è riferito alla perdita di energia dovuta alla ionizzazione della materia da parte del muone lungo la sua traiettoria. Il contributo principale è dato dalla formula di Bethe-Bloch, ed esprime una perdita di energia media. Il coefficiente  $b(E)$  include tutte le perdite di energia del muone dovute a effetti radiativi, ed è somma di tre contributi principali: la creazione di coppie  $e^+e^-$  (coefficiente  $b_p$ ), bremsstrahlung ( $b_b$ ) ed effetto fotonucleare ( $b_n$ ).

Le dipendenze dei due coefficienti dall'energia sono state ottenute adottando il metodo descritto all'interno di Ref.[1], e sono presenti in Fig.[1.5] e Fig.[1.6]. Nella Fig.[1.5] è presente l'andamento dei tre componenti e del coefficiente  $b(E) = b_p(E) + b_b(E) + b_n(E)$  in funzione dell'energia, mentre in Fig.[1.6] è presente l'andamento della perdita totale di energia da parte del muone.



**Figura 1.6:** Andamento della perdita di energia del muone in acqua,  $L(E)$ , in funzione dell'energia del muone. La curva nera rappresenta il coefficiente  $a(E)$ , la curva blu rappresenta il prodotto  $b(E) \cdot E$  (in  $10^{-3} \text{GeV cm}^2 \text{g}^{-1}$ ).

### 1.3.4 Produzione di muoni e neutrini

Il flusso dei muoni e dei neutrini atmosferici viene principalmente prodotto dal decadimento del pione  $\pi$  attraverso i seguenti processi:

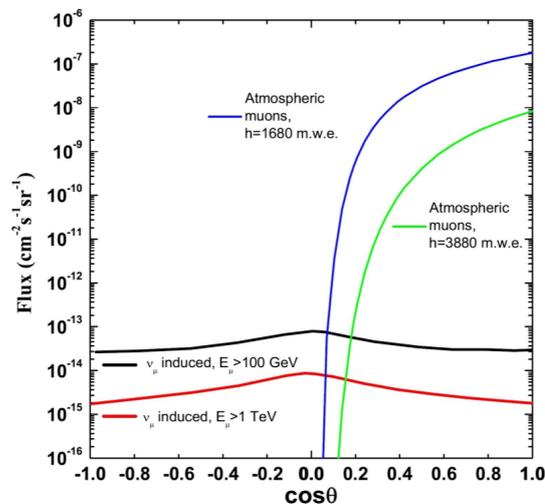
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.8)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.9)$$

La sorgente più comune e più rilevante di muoni sono i raggi cosmici (visti nella sezione 1.1.1), che collidono con i nuclei dell'atmosfera terrestre e creano sciami di particelle secondarie, fra le quali pioni, i quali successivamente decadono in muoni e (anti)neutrini. A questo punto, i muoni a bassa energia possono decadere a loro volta in elettroni,  $\nu_\mu$  e  $\nu_e$ , producendo un ratio di neutrini  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:2:0$ . Invece, per i muoni più energetici, il boost di Lorentz è sufficiente a farli vivere abbastanza a lungo da farli arrivare al rivelatore.

### 1.3.5 Background atmosferico

Quando i raggi cosmici interagiscono con gli strati esterni dell'atmosfera, generano degli sciami di particelle secondarie, fra le quali sono presenti anche neutrini atmosferici e muoni atmosferici. I muoni atmosferici decadono in gran parte nell'aria e nell'acqua che circonda il rivelatore, tuttavia una frazione di muoni riesce ad attraversare tutti gli spessori dei materiali e a produrre dei segnali in rivelatori posti sotto in profondità. Nella Fig.[1.7] è rappresentato il flusso dei muoni

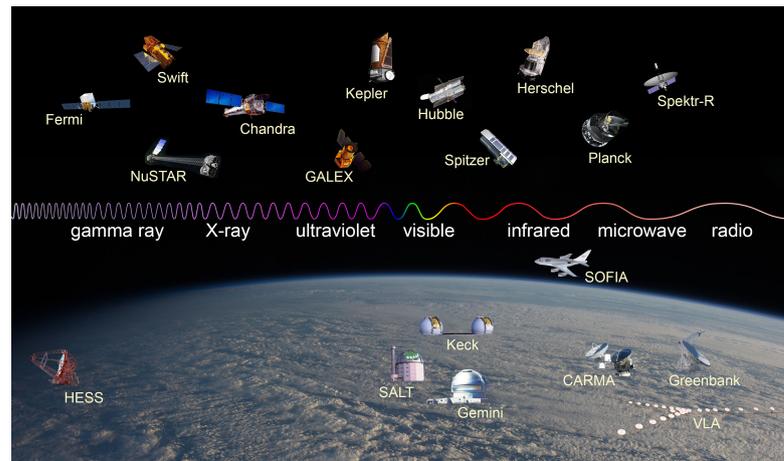


**Figura 1.7:** Flussi dei muoni atmosferici a due diverse profondità, rappresentati con la curva verde e blu, e flussi dei muoni indotti dai neutrini muonici atmosferici (canale CC) in due range energetici (linea rossa e nera), in funzione del coseno dell'angolo zenitale. Nella direzione avanti, il flusso dei muoni atmosferici è  $\sim 10^6$  volte maggiore di quello dei muoni indotti. Immagine presa da [2]

atmosferici (linea verde e blu, a due profondità diverse) e dei muoni prodotti dai neutrini atmosferici con la linea rossa e nera per distinguere le energie dei muoni. Si può individuare una diminuzione nel flusso dei muoni atmosferici in funzione del coseno dell'angolo zenitale. In particolare, il flusso è massimo quando il coseno di tale angolo è 1, in corrispondenza allo zenith, mentre diventa infinitesimo quando l'angolo è  $\pi/2$ , ovvero all'orizzonte, poiché i muoni devono attraversare uno spessore di materiale sempre maggiore. Inoltre, si può distinguere un picco nel flusso dei muoni indotti dai neutrini atmosferici quando il coseno dell'angolo zenitale è nullo, ovvero all'orizzonte: ciò è dovuto al fatto che queste particelle hanno attraversato più materiale con il quale interagire, producendo un muone risultante che può essere poi rivelato.

## 1.4 L'astronomia multimessaggera

Nel corso dell'ultimo secolo, l'astronomia ha avuto un progresso epocale grazie alla moltitudine di scoperte e di nuovi strumenti che sono stati realizzati. Uno dei primi passi fondamentali è stato lo studio dell'Universo non più attraverso la luce ottica, bensì in altri range dello spettro elettromagnetico. Tuttavia, l'atmosfera terrestre blocca gran parte delle radiazioni provenienti dallo spazio, lasciando solo due "finestre" di lunghezze d'onda che riescono a penetrarla e ad arrivare ai nostri occhi e ai telescopi: la regione nel visibile e quella nelle onde radio. Un ulteriore passo in avanti è stato fatto quando si è deciso di mandare dei telescopi nello spazio per andare ad osservare altre bande dello spettro elettromagnetico, come



**Figura 1.8:** Alcuni dei telescopi più importanti presenti nello spazio per ogni regione dello spettro elettromagnetico, insieme ad alcuni telescopi ottici, microonde e radio presenti sulla superficie terrestre, e SOFIA, un Boeing 747 della NASA, in volo nella stratosfera per l'osservazione nell'infrarosso. Nella figura manca EUCLID, telescopio dell'European Space Agency lanciato nel 2023 per osservare il visibile e infrarosso vicino. Figura della NASA.

per esempio la banda degli infrarossi, ultravioletti, dei raggi X e raggi gamma. Al giorno d'oggi, disponiamo di telescopi di ultima generazione per ogni regione dello spettro elettromagnetico (EM) (Fig.[1.8]).

L'*astronomia multimessaggera* ha come concetto fondamentale l'unione delle informazioni su una sorgente ottenute da vari tipi di strumenti e rivelatori, come per esempio dai vari telescopi citati sopra, rivelatori di neutrini e di onde gravitazionali.

L'esempio chiave [12] di una sorgente analizzata con queste modalità è avvenuto il 17 Agosto 2017, quando due stelle di neutroni di un sistema binario si sono fuse insieme (neutron star merger). Furono i due interferometri di LIGO e Virgo a rilevare tale evento: registrarono un segnale compatibile con un'onda gravitazionale, che indicarono con la sigla GW170817 [13].

Due secondi dopo, fu rivelato un Gamma Ray Burst (GRB) dai due satelliti FERMI e INTEGRAL. I due telescopi furono in grado di indicare un'area nella quale tale evento potesse aver avuto origine, con una localizzazione spaziale compatibile con la regione indicata dai due interferometri. Dopo circa 12 ore, diversi telescopi ottici rivelarono la presenza di un nuovo corpo celeste puntiforme, in accordo con la distanza stimata da LIGO e Virgo. Mettendo insieme i dati ottenuti sia da rivelatori di onde gravitazionali (LIGO, Virgo), sia da rivelatori di onde elettromagnetiche (telescopi spaziali su tutto lo spettro elettromagnetico), è stato possibile descrivere in maniera precisa il processo di merging subito dalle due stelle a neutroni, il quale ha prodotto onde gravitazionali, un GRB breve e una kilonova (emissione di radiazione EM legata a questo tipo di evento). Inoltre, ha prodotto altri risultati, risolvendo per esempio alcune problematiche riguardo l'origine di

elementi più pesanti del ferro all'interno dell'Universo.

I telescopi a neutrini in funzione all'epoca, IceCube e ANTARES, hanno cercato neutrini di alta energia in correlazione spaziale e temporale con l'evento di merging osservato. Sfortunatamente, nessun evento è stato misurato, e sono stati stimati i limiti superiori [14].



## Capitolo 2

# Esperimento KM3NeT

KM3NeT [15], acronimo di Cubic Kilometer Neutrino Telescope, è un'infrastruttura europea di ricerca che si concentra principalmente sullo studio dei neutrini, dando allo stesso tempo un notevole contributo ad altri ambiti di ricerca, come per esempio la biologia marina, la geofisica, l'oceanografia.

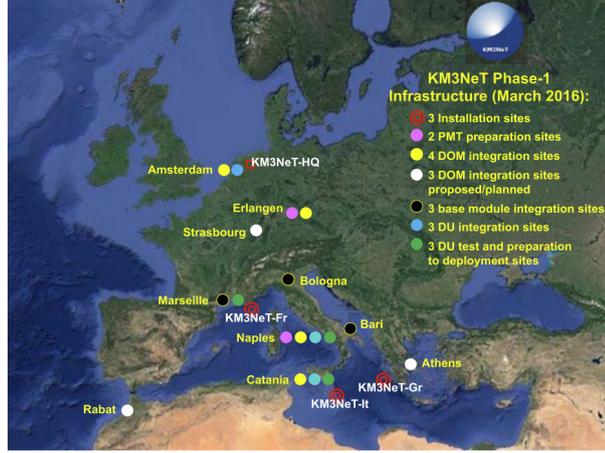
KM3NeT costituisce la seconda generazione di telescopi sottomarini nel Mar Mediterraneo. Eredita infatti l'esperienza e le competenze tecniche affinate con gli esperimenti ANTARES [16] (presa dati conclusa nel 2022) e NEMO [17] (pathfinder dell'attuale telescopio KM3NeT/ARCA).

Attualmente, sono in costruzione due rivelatori [18] (visibili in Fig.[2.1]):

1. Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss (acronimo KM3NeT/ARCA), nella postazione KM3NeT-It a circa 100 km al largo di Portopalo di Capo Passero, Sicilia, ad una profondità di 3500 metri sotto il livello del mare;
2. Oscillation research with Cosmics in the Abyss (acronimo KM3NeT/ORCA), nella postazione KM3NeT-Fr a 40 km al largo di Tolone, Francia, ad una profondità di 2500 metri sotto il livello del mare.

I nomi degli esperimenti ci danno un indizio sul loro scopo: l'obiettivo principale di KM3NeT/ARCA è la rivelazione e lo studio di neutrini ad alta energia di origine cosmica, mentre l'obiettivo di KM3NeT/ORCA è determinare la gerarchia di massa dei neutrini attraverso lo studio dei pattern di oscillazione di neutrini atmosferici.

Data la rarità di eventi dovuti all'interazione di neutrini astrofisici nei pressi del rivelatore, è necessario ridurre al minimo il fondo, che nel caso di KM3NeT è rappresentato principalmente dai muoni atmosferici prodotti dall'interazione di raggi cosmici primari con i nuclei in atmosfera (vedi sezione 1.3.4). Lo studio di tale fondo non è rilevante solamente nel campo della rivelazione dei neutrini astrofisici e nella ricerca sui raggi cosmici, bensì può essere utilizzato anche come sorgente di calibrazione dello strumento, dunque tale fondo può fungere da controllo della correttezza dei dati presi dal telescopio.



**Figura 2.1:** Mappa nella quale sono presenti i vari siti utilizzati dalla collaborazione per la preparazione, integrazione ed installazione dei rivelatori, estratta dalla lettera degli intenti di KM3NeT, [18].

## 2.1 Apparato sperimentale

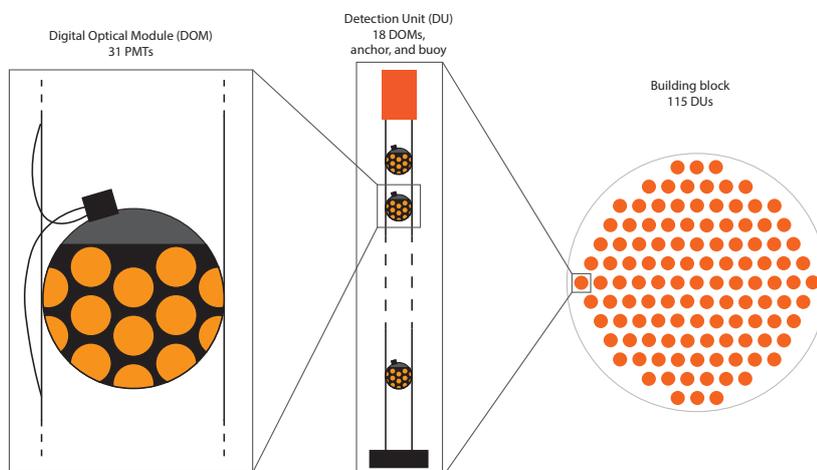
Entrambi i siti dell'esperimento KM3NeT condividono la stessa tecnologia di costruzione e gli stessi moduli di rivelazione. La principale differenza è la densità di questi moduli, ottimizzati per i diversi casi di fisica su cui si concentrano.

Lo strumento attivo di rivelazione è una sfera di 43 cm di diametro, detta DOM (acronimo di *digital optical modules*). Tali sfere sono posizionate su delle stringhe flessibili (denominate *detection units*, DUs) ancorate da un lato sul fondale marino e mantenute in posizione verticale da boe sommerse. Su ogni stringa sono disposti in maniera equispaziata fra loro 18 DOMs, come in Fig.[2.2], e un insieme di 115 stringhe è chiamato *building block*. Ogni DOM su questa stringa contiene 31 fotomoltiplicatori (come in Fig.[2.3]), detti PMT (*photomultiplier tubes*), disposti in maniera asimmetrica nel modulo ottico: 12 sono nell'emisfero superiore, mentre 19 sono nell'emisfero inferiore. La motivazione fisica di tale asimmetria è trattata nella sezione 2.2.3 sui segnali di background.

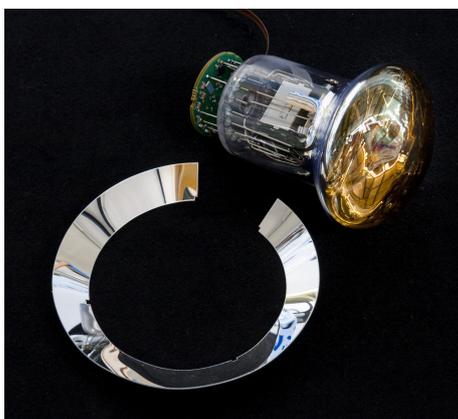
Il principio di rivelazione di questo esperimento si basa sulla rivelazione della luce Cherenkov prodotta dal passaggio di particelle secondarie prodotte dall'interazione di neutrini nei pressi del rivelatore. Attraverso la misura del tempo di arrivo della luce sui fotomoltiplicatori, e conoscendo la posizione dei DOM con una precisione di  $O(10)$  cm, è possibile ricostruire la direzione del neutrino incidente con una precisione inferiore alla frazione di grado.

### 2.1.1 Caratteristiche dei rivelatori ARCA e ORCA

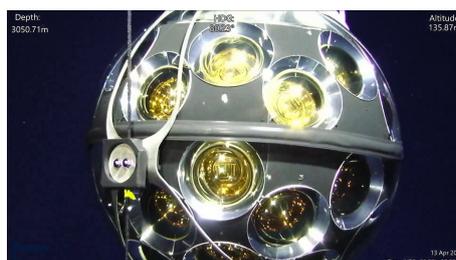
KM3NeT/ARCA, il cui obiettivo è la misurazione di neutrini astrofisici, ha una disposizione ottimizzata in modo da instrumentare il maggior volume di acqua possibile e misurare i neutrini nel range TeV-PeV. I DOM sono posizionati sulle stringhe a 36 metri l'uno dall'altro; le stringhe (*detection unit* DU), lunghe 700 me-



**Figura 2.2:** Struttura di un blocco di rivelazione di KM3NeT. A sinistra è raffigurato l'elemento attivo di rivelazione, il DOM; al centro è raffigurata una stringa, detta *Detection Unit*, composta da 18 DOM; a destra invece l'unione di 115 detection units, detta *building block*. Figura estratta da [19]



(a) PhotoMultiplier Tubes, PMT



(b) Digital Optical Module, DOM

**Figura 2.3:** A sinistra l'immagine di un PMT, ovvero di un fotomoltiplicatore, il cui compito è la rivelazione della luce generata dalle interazioni delle particelle. A destra, la struttura di un DOM, che contiene 31 PMTs e l'elettronica di acquisizione. Immagini prese dal sito web ufficiale della collaborazione, [www.km3net.org](http://www.km3net.org)

tri, sono ancorate sul fondale marino ad una profondità di 3500 metri sotto il livello del mare, e sono distanziate fra loro di 90 metri. Attualmente, KM3NeT/ARCA ha 28 stringhe attive, posizionate sul fondale marino, e, quando sarà completato (230 DU), ricoprirà un volume utile di  $1\text{km}^3$ .

KM3NeT/ORCA invece si occupa dello studio del fenomeno delle oscillazioni dei neutrini, ed è stato ottimizzato per la rivelazione di neutrini atmosferici a più bassa energia, nel range GeV-TeV. Il sito in Francia, per questa ragione, ricopre un volume più piccolo rispetto a KM3NET/ARCA, con i DOM distanziati fra di loro di 9 metri lungo le DU e le ultime distanziate a 20 metri l'una dall'altra. Inoltre, le DU sono ancorate a 2500 metri sotto il livello del mare. Attualmente, KM3NeT/ORCA è composta da 23 DUs su un totale di 1 building block da 115 DU, e, quanto sarà completata la fase di costruzione, ricoprirà un volume di  $4 \cdot 10^{-3}\text{km}^3$ .

## 2.2 Rivelazione delle particelle

### 2.2.1 Effetto Cherenkov

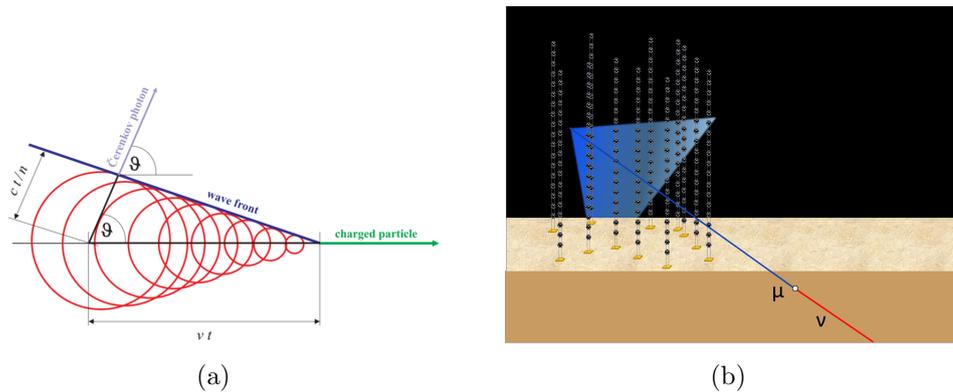
La produzione di luce Cherenkov avviene quando una particella relativistica carica si propaga in un mezzo dielettrico con una velocità più elevata della velocità della luce nel mezzo stesso. La particella relativistica carica passa vicino alle molecole del mezzo dielettrico, le polarizza e dunque induce la creazione di un momento di dipolo elettrico. Dopo il passaggio della particella, quando le molecole ritornano nella configurazione iniziale, emettono individualmente della radiazione EM coerente. Dal punto di riferimento del materiale, tali onde elettromagnetiche si sommano (interferenza costruttiva nel verso della particella), creando dei fronti d'onda distinti, visibili in Fig.[2.4]. I fronti d'onda sono disposti a forma di cono, e il fotone Cherenkov viaggia lungo una direzione normale a tale fronte d'onda, con verso uscente. In particolare, l'angolo  $\theta$  fra la traiettoria della particella e la direzione del fotone è dato da:

$$\cos(\theta) = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n}, \quad (2.1)$$

relazione intuibile dalla Fig.[2.4].  $\beta$  rappresenta la velocità della particella (espressa in unità di  $c$ ) e  $n$  è l'indice di rifrazione del materiale. Per esempio, il passaggio di una particella relativistica ( $\beta \simeq 1$ ) che attraversa l'acqua marina ( $n = 1.364$ ), genera una radiazione Cherenkov con un angolo caratteristico  $\theta \simeq 43^\circ$ , mentre per il ghiaccio ( $n = 1.31$ ) è di circa  $41^\circ$ .

Il numero di fotoni Cherenkov con lunghezza d'onda compresa fra  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ , emessi in un tratto tra  $x$  e  $x + dx$  della traiettoria di una particella carica, è descritto dalla seguente formula:

$$\frac{d^2 N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \quad (2.2)$$



**Figura 2.4:** A sinistra, schematizzazione di quello che avviene al passaggio di una particella carica nel mezzo dielettrico. Sono visibili le onde elettromagnetiche prodotte da ogni molecola e il fronte d'onda generato dalla somma di tali onde. L'angolo fra la traiettoria della particella e il fotone Cherenkov è  $\theta$ . A destra: esempio di cono di luce Cherenkov emessa dal muone generato da un neutrino muonico, il quale ha interagito con la materia al di fuori del volume di KM3NeT. La particella viaggia dal basso-destra verso alto-sinistra. Immagine presa dal sito [www.km3net.org](http://www.km3net.org)

dove  $Z$  è la carica della particella e  $\alpha \simeq \frac{1}{137}$  è la costante di struttura fine. Nel caso dell'acqua marina, vengono emessi  $\sim 3.5 \cdot 10^4$  fotoni Cherenkov per ogni metro d'acqua percorso dalla particella.

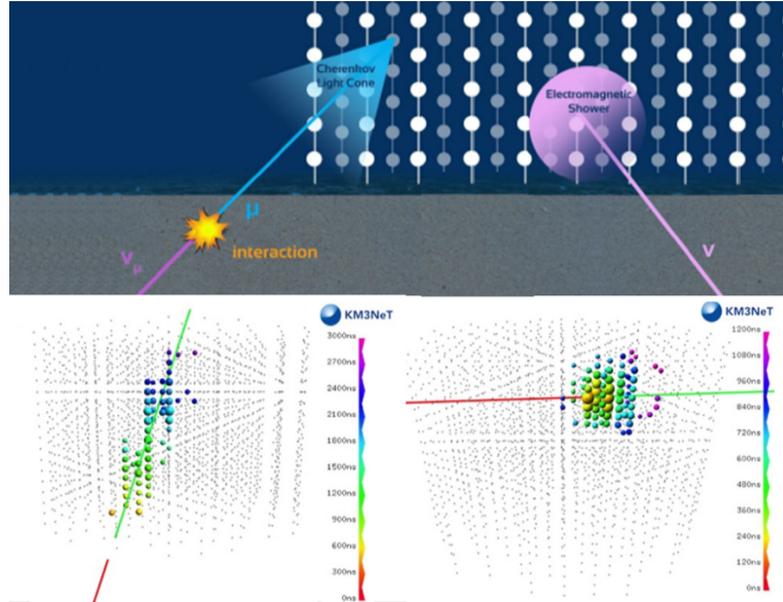
La radiazione prodotta si propaga poi nel mezzo del rivelatore, ed è soggetta principalmente a due fenomeni fisici: assorbimento e scattering. A circa 400nm, l'acqua marina mostra la massima trasparenza, con una lunghezza di assorbimento di circa 60 metri ed una lunghezza di scattering di circa 55 metri.

## 2.2.2 Caratterizzazione degli eventi

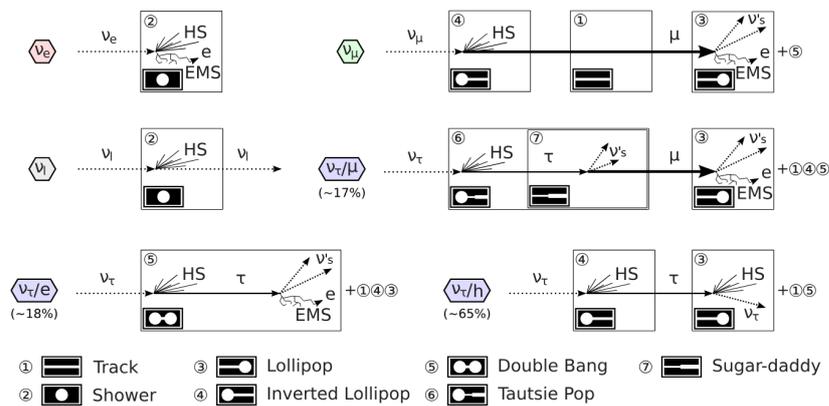
I neutrini, come visto precedentemente nelle equazioni Eq.[1.3] ed Eq.[1.4], hanno 2 canali di interazione con la materia.

Poiché i leptoni associati ai neutrini hanno delle caratteristiche fisiche molto diverse fra loro (massa, tempo di vita media per il muone e tauone ecc.), ciascun sapore di neutrino produrrà dei segnali differenti all'interno di un telescopio a neutrini. Questi segnali possono essere divisi in eventi di tipo traccia (track-like) e di tipo cascata (showers). I primi, contraddistinti da una struttura rettilinea, sono generati da muoni che viaggiano a velocità relativistiche. Gli eventi di tipo cascata (shower-like) sono generati dall'interazione CC dei neutrini elettronici e tauonici e dall'interazione NC di ogni sapore di neutrino, hanno una distribuzione approssimativamente sferica e si propagano per alcune decine di metri. Nella figura Fig.[2.5] è presente una raffigurazione delle due tipologie di eventi, insieme ad un render della quantità di luce che vedrebbero i DOM nei due casi.

Nella Fig.[2.6], sono rappresentati i possibili tipi di segnali che i neutrini possono generare. In particolare:



**Figura 2.5:** Nell’immagine sopra, i due tipi di segnali che KM3NeT rileva: a sinistra un evento track-like generato da un muone, indotto da un neutrino muonico, che emette radiazione Cherenkov mentre avanza nell’acqua. A destra un evento shower-like con la caratteristica forma ”lollipop”. Nell’immagine sotto, un render dei segnali che i singoli DOM registrerebbero nei due casi. Immagine estratta da [20]



**Figura 2.6:** Rappresentazione dei vari tipi di segnali che le particelle create dall’interazione dei neutrini con la materia creano. Utilizzando tali schemi, KM3NeT è in grado di caratterizzare le tracce ricostruite a partire dai dati dei DOM. In alto a sinistra: interazione CC neutrino elettronico, in alto a destra: interazione CC neutrino muonico, in mezzo a destra e le due figure in basso: interazioni CC neutrino tauonico, mentre in mezzo a sinistra: interazione a corrente neutra dei neutrini di ciascun sapore.

1. interazione CC, neutrini elettronici: sono gli unici che, interagendo con la materia, generano uno sciame adronico e uno sciame elettromagnetico. L'evento a cascata elettromagnetica è dovuto alla radiazione di frenamento (bremsstrahlung) emessa dall'elettrone molto energetico prodotto nell'interazione del neutrino con la materia. Raccogliendo la luce prodotta da tali particelle, è possibile ricostruire l'energia iniziale nel neutrino (a partire dalla quantità di luce che viene rivelata dai fotomoltiplicatori) e la direzione dell'elettrone prodotto dal neutrino. Tuttavia, per il fatto che tale evento shower-like produce una emissione di luce spazialmente ben localizzata in un punto, tale direzione ricostruita ha una precisione dell'ordine di qualche grado.
2. interazione CC, neutrini tauonici: nell'interazione con la materia viene prodotto un  $\tau$ , il quale, essendo una particella molto massiva e con un tempo di decadimento molto breve (dell'ordine dei  $10^{-13}s$ ), percorre qualche decina di metri prima di decadere in un leptone più leggero, creando un altro sciame adronico ed eventualmente, nel caso tale leptone sia un elettrone, anche uno sciame elettromagnetico;
3. interazione NC, neutrini di tutti i sapori: i neutrini interagiscono con la materia, dissipando la maggior parte della loro energia nella creazione di uno sciame adronico, e nell'emissione di un altro neutrino dello stesso sapore di quello incidente.
4. interazione CC, neutrini muonici: il muone prodotto dall'interazione del  $\nu_\mu$  con la materia, essendo molto massivo ed energetico, percorre distanze dell'ordine del km prima di decadere in un elettrone. La traiettoria del muone è approssimativamente rettilinea <sup>1</sup>, e durante il moto emette radiazione Cherenkov. Raccogliendo ed analizzando tale segnale track-like, si ricostruisce la sua direzione con una buona risoluzione angolare. Inoltre, vale la seguente relazione per l'angolo medio fra il neutrino muonico incidente e il muone uscente:

$$\langle \theta_{\nu\mu} \rangle \leq \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(TeV)}} \quad (2.3)$$

Per neutrini di energia superiore a  $10 TeV$ , tale angolo è  $< 0.2^\circ$ , dunque il muone ci restituisce una buona stima della direzione d'arrivo del neutrino, fornendo informazioni utili per la ricerca di sorgenti astrofisiche di neutrini.

### 2.2.3 Fonti di background

Per la rivelazione dei neutrini astrofisici, è necessario ridurre il più possibile il fondo, e per scartare i muoni atmosferici down-going si selezionano solamente

---

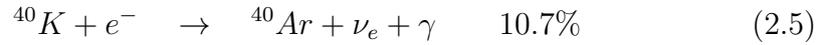
<sup>1</sup>La traiettoria del muone è considerabile rettilinea in prima approssimazione; in realtà, i muoni interagiscono numerose volte con le molecole dell'acqua, tuttavia la loro energia e le distanze che percorrono i muoni di interesse a KM3NeT sono abbastanza elevate da poter trascurare la deviazione angolare causata da questi scattering.

gli eventi che attraversano il rivelatore dal basso verso l'alto, in direzione up-going. Tuttavia, esiste una remota probabilità che un muone atmosferico down-going possa essere ricostruito erratamente come segnale up-going. Tali muoni vengono ulteriormente filtrati attraverso tecniche di selezione degli eventi. Per quanto riguarda invece i neutrini atmosferici, la selezione degli eventi up-going non è sufficiente per scartare tale fondo: i muoni prodotti da tali neutrini rappresentano un fondo non rimovibile dal punto di vista fisico. Tuttavia, ad alta energia è più probabile rivelare neutrini di natura astrofisica che neutrini atmosferici.

## Background ambientale

I rivelatori dei due siti di KM3NeT, situati sul fondale del Mar Mediterraneo, sono sensibili ad una moltitudine di fenomeni naturali, quali per esempio le variazioni di temperatura e salinità dell'acqua. Tuttavia sono due le principali cause di fondo derivante dall'ambiente circostante il rivelatore:

1. **Radiazione Cherenkov dovuta al  $^{40}K$ :** tale isotopo del potassio, presente in una percentuale ridotta (circa 0.04%) all'interno dell'acqua marina, è instabile e decade in uno stato stabile attraverso i seguenti decadimenti:



L'elettrone del primo canale di decadimento ha un'energia sufficiente per produrre luce Cherenkov, mentre il fotone del secondo canale ha un'energia pari a 1.46 MeV ed è in grado, tramite lo scattering Compton, di estrarre dal materiale un elettrone in grado di produrre luce Cherenkov. Tuttavia, è una fonte di rumore facilmente filtrabile, dato che crea dei segnali localizzati a livello di un singolo DOM, e temporalmente scorrelati fra DOMs diversi. L'intensità di tale radiazione Cherenkov rimane costante in tutto il volume del telescopio, poiché dipende dalla concentrazione di  $^{40}K$  nell'acqua.

2. **Bioluminescenza:** Gli organismi bioluminescenti, come per esempio i batteri e macro organismi, sono una fonte di luce ottica di background, con un picco dell'intensità presente intorno a 470-480 nm, lunghezze d'onda alle quali l'acqua è trasparente e alla quale i PMT sono maggiormente sensibili. Tale radiazione ha un andamento stagionale, con il massimo di intensità che si verifica in primavera, e varia in base alla profondità, posizione e correnti all'interno del mare. In particolare, la bioluminescenza decresce con la profondità.

# Capitolo 3

## Relazione intensità-profondità dei muoni atmosferici

La relazione che intercorre fra l'intensità del flusso verticale di muoni atmosferici con la profondità, o equivalentemente con la quantità di materiale attraversato, generalmente espressa in unità di metri equivalenti, verrà approfondita in questo capitolo, ed è comunemente indicata con il termine "relazione intensità-profondità" o in breve DIR (dall'inglese Depth Intensity Relation). In letteratura sono disponibili diversi approcci e risultati derivati principalmente da metodi Monte Carlo o con metodi semi-analitici. In questo capitolo, in accordo con quanto fatto in precedenti lavori della collaborazione KM3NeT, si è deciso di studiare e replicare l'approccio semi-analitico, sviluppato in [1]. Nella prima parte di questo capitolo, ho riprodotto in linguaggio Python i calcoli teorici e, per validarne la correttezza, parte dei grafici più significativi esposti in [1], riportando quando necessario in appendice dettagli e approssimazioni numeriche utilizzate. Nella seconda parte del capitolo ho poi confrontato le aspettative del modello teorico [1] con l'andamento ricavato da dati simulati dalla collaborazione KM3NeT.

### 3.1 Fondamenti teorici

Riportando quanto fatto in [1], per derivare un approccio analitico, capace di descrivere il flusso di muoni sott'acqua, è necessario considerare alcune approssimazioni e alcuni fattori correttivi, per tenere conto di molteplici effetti come, per esempio, la sfericità della Terra o la natura stocastica delle perdite di energia dei muoni. Il flusso di muoni, integrato sopra una specifica energia di soglia  $E_f$ , è dato dall'equazione:

$$I_{fl}(\geq E_f, R, \theta) = \int_0^\infty P(E_0, R, \geq E_f) D(E_0, \theta) dE_0 \quad (3.1)$$

dove  $R$  è detta profondità inclinata, ed è ricavabile attraverso la relazione  $R = \frac{h}{\cos\theta}$ , con  $h$  profondità e  $\theta$  angolo zenitale. La funzione  $D(E_0, \theta) = \frac{dN(E_0, \theta)}{dE_0}$  è lo spettro

dei muoni atmosferici al livello del mare.  $P(E_0, R, \geq E_f)$  rappresenta la probabilità che un muone con energia iniziale  $E_0$  sopravviva dopo aver attraversato una quantità di materiale pari a  $R$ , con energia finale maggiore di  $E_f$ .

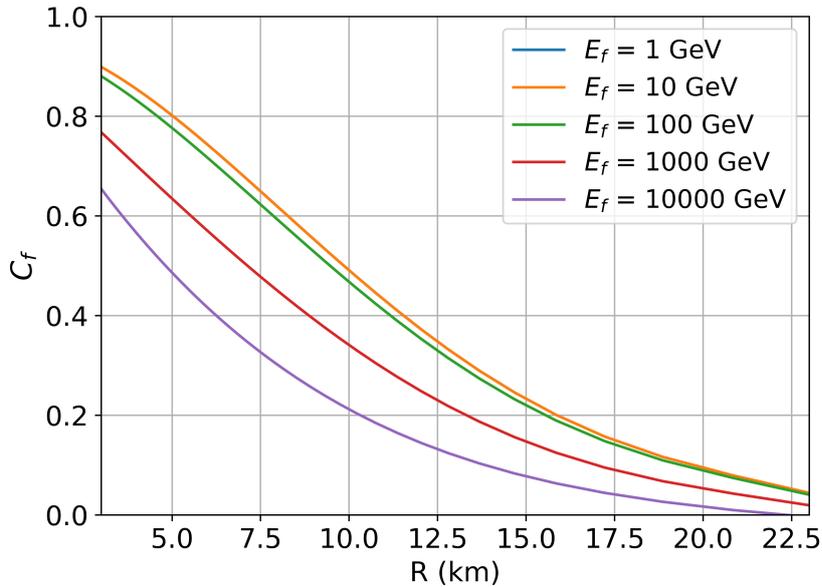
Le approssimazioni necessarie sono [1]:

1. perdita continua di energia del muone, con una dipendenza lineare dall'energia stessa del muone, data dall'espressione:  $L(E) = \alpha + \beta E$  (vedi paragrafo [1.3.3]);
2. spettro energetico dei muoni al livello del mare parametrizzato attraverso una dipendenza del tipo:

$$D(E_0) \propto \frac{E_0^{-\gamma}}{1 + \frac{E_0}{\epsilon_0}} \quad (3.2)$$

dove  $\epsilon_0$  è l'energia critica, chiamata anche costante di decadimento in [21].

3. coefficienti correttivi determinati attraverso metodi numerici in [1] per tenere conto delle perdite stocastiche di energia dei muoni. Maggiori dettagli sono riportati in Appendice [2]. A titolo d'esempio, in Fig.[3.1] ho riportato l'andamento dei coefficienti correttivi in funzione della quantità di materiale attraversato.



**Figura 3.1:** Dipendenza del fattore correttivo  $C_f$  dalla profondità  $R$  per una serie di energie di soglia. Le curve che rappresentano  $E_f = 1 \text{ GeV}$  ed  $E_f = 10 \text{ GeV}$  sono sovrapposte.

### 3.1.1 Spettro di muoni atmosferici a livello del mare

Una forma conveniente ed ampiamente diffusa per rappresentare lo spettro dei muoni atmosferici a livello del mare è data dalla relazione:

$$\frac{dN(E_0, \theta)}{dE_0} = D(E_0, \theta) = A_0 \left( \frac{1}{1 + E_0/E_{0\pi}^{cr}(\theta)} + \frac{B_0}{1 + E_0/E_{0K}^{cr}(\theta)} \right) E_0^{-\gamma} \quad (3.3)$$

dove sono presenti 5 parametri:  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $E_{0\pi}^{cr}(\theta)$ ,  $E_{0K}^{cr}(\theta)$ ,  $\gamma$ . Le energie critiche espresse in funzione di  $\theta$  hanno la seguente dipendenza:  $E_{0i}^{cr}(\theta) = \frac{E_{0i}^{cr}(0^\circ)}{\cos(\theta)^*}$  con  $i = \pi, K$  e rappresentano il valore di energia oltre il quale i pioni e i kaoni hanno una probabilità più alta di interagire con la materia piuttosto che decadere.

In Tab.[3.1] sono riportati i valori dei 5 parametri della Eq.[3.3, adottati in [1], basati sui risultati [22] dell'esperimento LVD dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

$A_0$ ( $cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}GeV^{-1}$ )	$B_0$	$E_{0\pi}^{cr}(0^\circ)$ (GeV)	$E_{0K}^{cr}(0^\circ)$ (GeV)	$\gamma$
0.175	0.037	103	810	2.72

**Tabella 3.1:** Parametri presenti in Eq.[3.3].

Per tenere in considerazione la curvatura dell'atmosfera terrestre, gli autori in [1] hanno introdotto il coseno "effettivo"  $\cos(\theta)^*$ , approssimabile attraverso uno sviluppo polinomiale nella forma:

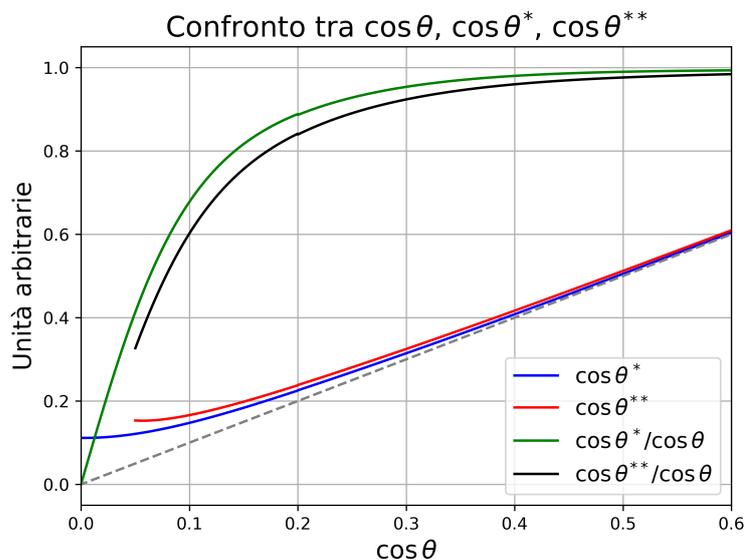
$$\cos \theta^* = \sum_{i=0}^4 c_i \cos^i \theta \quad (3.4)$$

dove i coefficienti  $c_i$  sono riportati in Appendice [1]. Per angoli zenitali prossimi a  $90^\circ$ , dove lo spessore di atmosfera terrestre attraversato aumenta, è necessario introdurre un'ulteriore modifica all'Eq.[3.4], introducendo il coseno effettivo modificato:

$$\cos \theta^{**} = S(\theta) \cdot \cos \theta^* \quad \text{dove } S(\theta) = 0.986 + 0.014 \cdot \sec \theta \quad (3.5)$$

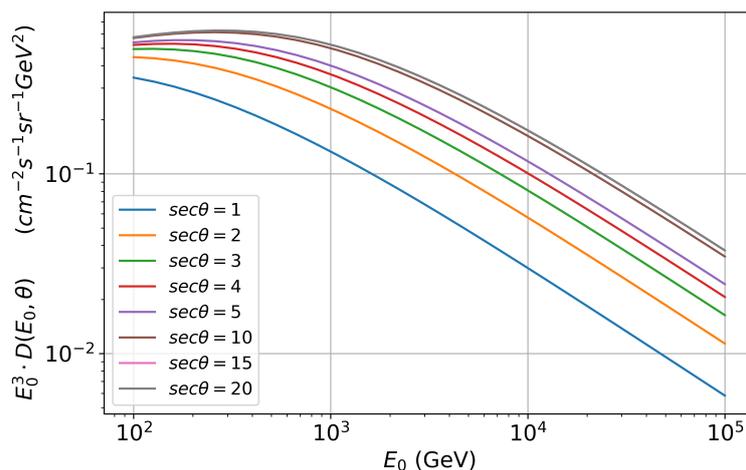
Nella Fig. [3.2] ho riprodotto, come in [1], un confronto fra i due coseni effettivi e il coseno geometrico.

Nella Fig.[3.3] ho riportato invece l'andamento dello spettro dei muoni atmosferici a livello del mare  $D(E_0, \theta)$  in funzione di  $E_0$ , con varie curve associate ad angoli zenitali differenti.



**Figura 3.2:** La linea blu e la linea rossa rappresentano rispettivamente l'andamento del coseno effettivo  $\cos \theta^*$  e del coseno effettivo modificato  $\cos \theta^{**}$  in funzione del coseno geometrico  $\cos \theta$ .

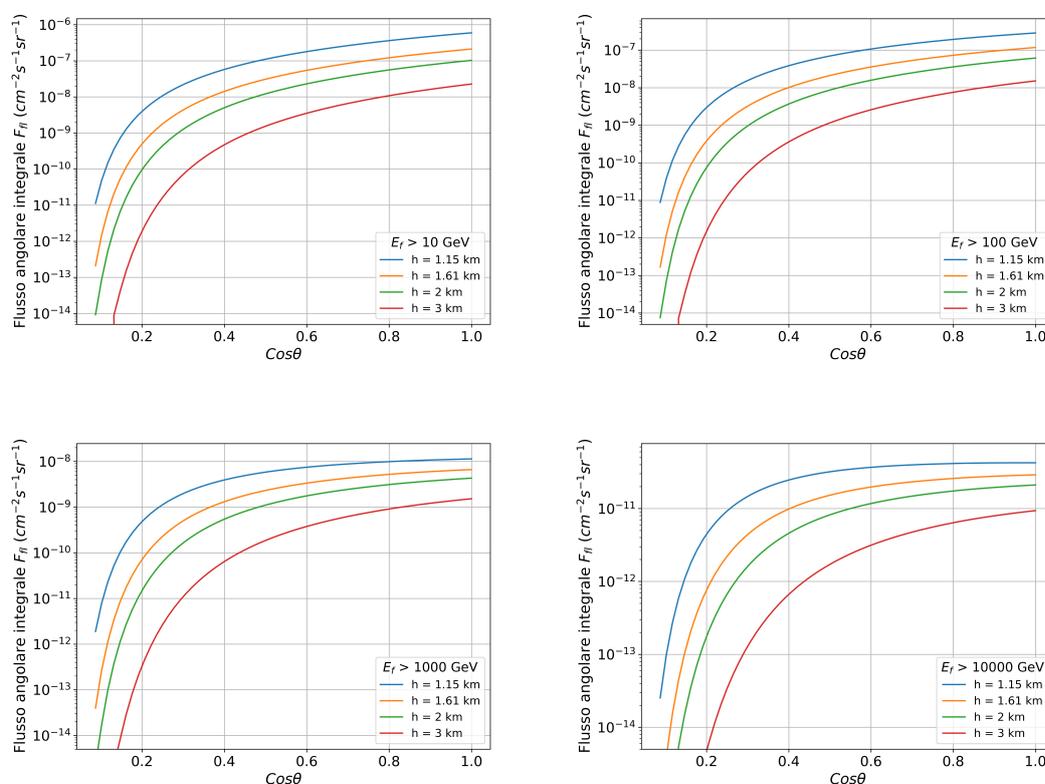
La linea verde e la linea nera rappresentano rispettivamente l'andamento del rapporto  $\frac{\cos \theta^*}{\cos \theta}$  e del rapporto  $\frac{\cos \theta^{**}}{\cos \theta}$  in funzione di  $\cos \theta$ .



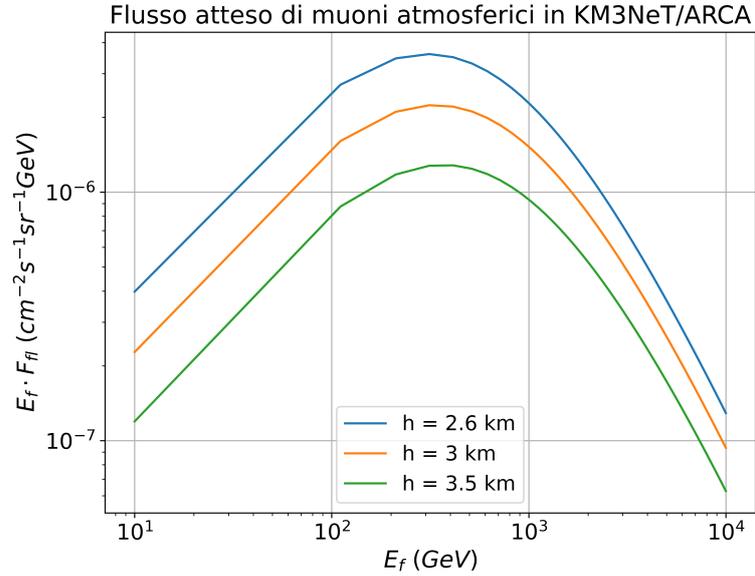
**Figura 3.3:** Spettro angolare differenziale dei muoni atmosferici, al livello del mare, in funzione dell'energia  $E_0$  del muone. Le varie curve sono riferite ad angoli diversi: andando dal basso verso l'alto, si ha  $\sec \theta = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20$  (rispettivamente,  $\theta = 0^\circ, 60^\circ, \simeq 70.5^\circ, \simeq 75.5^\circ, \simeq 78.5^\circ, \simeq 84.3^\circ, \simeq 86.2^\circ, \simeq 87.1^\circ$ ). L'asse delle ordinate è stato moltiplicato per un fattore  $E_0^3$  per evidenziare l'andamento delle curve.

### 3.1.2 Spettro di muoni atmosferici in profondità

In Appendice [2] è riportata l'implementazione del flusso dei muoni atmosferici in profondità  $F_{fl}$ , utilizzando le tre approssimazioni citate nella sezione [3.1] e così come calcolato in [1]. In Fig.[3.4] ho riprodotto l'andamento del flusso integrale  $F_{fl}$  a diverse profondità in funzione del coseno dell'angolo zenitale, seguendo sempre quanto fatto in [1], in modo da verificare la correttezza dei calcoli. Invece in Fig.[3.5] è mostrato l'andamento del flusso integrale  $F_{fl}$  in funzione dell'energia finale del muone, una volta attraversate determinate quantità di materiale. Nello specifico ho calcolato il flusso dei muoni atmosferici in un range di profondità paragonabili a quelle alle quali il rivelatore KM3NeT/ARCA è posto.

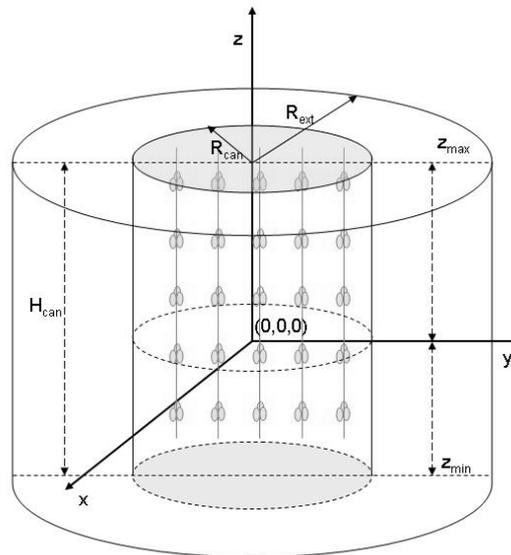


**Figura 3.4:** Flusso integrale  $F_{fl}$  dei muoni atmosferici. Dalla figura in alto a sinistra fino alla figura in basso a destra, si presenta tale andamento per l'energia  $E_f$  pari a 10 GeV, 100 GeV, 1000 GeV e 10 TeV. In ogni figura, sono presentati gli andamenti alle seguenti altezze del rivelatore, dall'alto verso il basso: 1.15km, 1.61km, 2km, 3km.



**Figura 3.5:** Flusso integrale  $F_{fi}$  dei muoni atmosferici in funzione dell'energia di soglia,  $E_f$ , per tre profondità  $h$  diverse. L'asse delle ordinate è stato riscalo moltiplicando per  $E_f$  in modo da evidenziare l'andamento di tali curve.

## 3.2 Simulazioni Monte Carlo: MUPAGE



**Figura 3.6:** Rappresentazione grafica della *can* del rivelatore, le cui dimensioni sono descritte dai parametri  $R_{can}$ ,  $H_{can}$ , e della *extended can*. Il sistema di riferimento delle coordinate utilizzato da MUPAGE e il sistema di riferimento del detector hanno le origini posizionate sull'asse verticale del cilindro, tuttavia non coincidono necessariamente con il suo centro.

Per la simulazione Monte Carlo di muoni atmosferici, la collaborazione KM3NeT utilizza un generatore di eventi, implementato in C++, denominato MUPAGE (MUons from PARAMetric formulas: a fast GENERator for neutrino telescopes) [23]. Questo software è basato su formule parametriche [24] che permettono di calcolare il flusso e la distribuzione angolare dei bundle di muoni sott'acqua, tenendo conto della molteplicità e dello spettro energetico dei muoni. Tali formule parametriche sono valide per altezze verticali da 1.5 a 5 km, e sono state ottenute a partire da simulazioni Monte Carlo dell'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera e la loro successiva propagazione. Il vantaggio rispetto a simulazioni dello sviluppo di uno sciame in atmosfera, come per esempio CORSIKA, è il ridotto tempo di calcolo per la generazione di eventi.

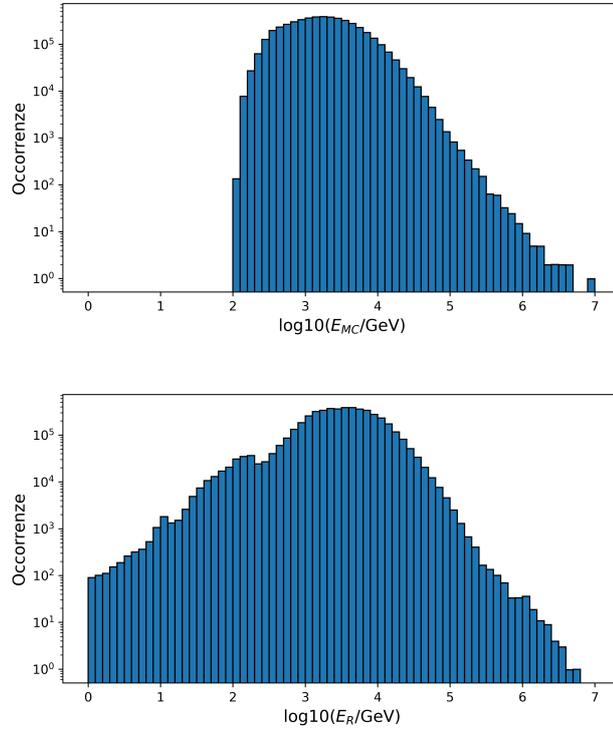
Il generatore MUPAGE restituisce, per ogni evento in output, i parametri che rappresentano la sua cinematica (energia, coordinate) e un parametro  $m_c$  che descrive la molteplicità dell'evento (evento = bundle di muoni atmosferici). Nel bundle, si assume che i muoni atmosferici viaggino parallelamente alla direzione del bundle stesso, e che arrivino allo stesso istante sul piano perpendicolare all'asse dell'evento. I bundle a 2 km di profondità del mare possono arrivare ad una molteplicità massima di qualche centinaia di muoni, con una distanza laterale dall'asse del bundle fino a centinaia di metri e prodotti fino ad angoli zenitali di  $85^\circ$ .

Il volume strumentato del rivelatore viene racchiuso in un cilindro, chiamato *can*, con altezza pari alla lunghezza di una detection unit e per diametro l'estensione orizzontale delle stringhe. Per tenere conto degli eventi più energetici e con più muoni atmosferici nello stesso bundle, tale volume viene esteso e viene denominato *Enlarged CAN*, di raggio  $R = R_{can} + R_{ecr}$ .  $R_{ecr}$  è l'aumento del raggio dovuto a questa estensione, e viene preso tipicamente come  $R_{ecr} \simeq 4\lambda_{abs}$ , dove  $\lambda_{abs}$  è la lunghezza di assorbimento dell'acqua ( $\sim 55m$ ). Gli eventi vengono generati da MUPAGE sulla superficie di questo cilindro allargato *Enlarged CAN*, uno sketch del quale è presente in Fig.[3.6].

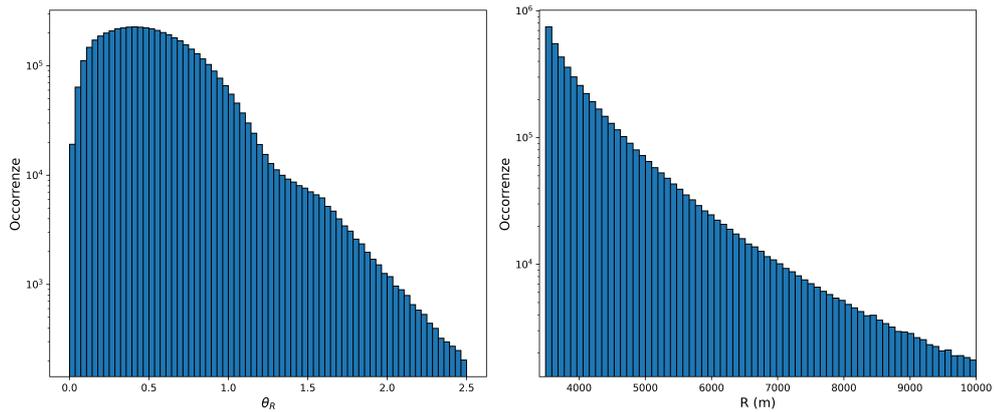
### 3.3 Analisi preliminare dei dati

Ho riportato a titolo di esempio gli istogrammi di alcune variabili, riferite ad un file simulato con circa  $5 \times 10^6$  eventi generati con l'algoritmo MUPAGE, selezionando solamente eventi per cui l'algoritmo di ricostruzione delle tracce è andato a buon fine. In Fig.[3.7], è riportato il confronto fra le energie generate e le energie ricostruite. In particolare, si può notare nel pannello superiore di Fig.[3.7] un limite inferiore (100 GeV) al range di energie simulate. A causa dell'attuale risoluzione energetica, alcuni eventi sono ricostruiti con un'energia inferiore a questo limite, così come mostrato nel pannello inferiore di Fig.[3.7]. Nella Fig.[3.8] invece è riportato l'angolo zenitale ricostruito. Anche in questo caso, si può notare come una frazione dei muoni atmosferici generati vengano mal ricostruiti con angoli zenitali  $> \pi/2$ . Come già anticipato precedentemente, per rigettare tale classe di eventi, ulteriori tagli sono stati messi in campo dalla collaborazione. Attraverso l'angolo zenitale è possibile avere una prima stima della quantità di materiale che un

muone atmosferico ha dovuto attraversare per giungere alle profondità alle quali il rivelatore KM3NeT/ARCA è situato (vedi pannello destro in Fig.[3.8]).



**Figura 3.7:** In alto, l'istogramma delle energie generate con l'algoritmo MUPAGE; in basso l'istogramma delle energie ricostruite.



**Figura 3.8:** A sinistra, istogramma degli angoli zenitali ricostruiti degli eventi. A destra, istogramma della distanza  $R = \frac{h}{\cos\theta_R}$  che i muoni hanno percorso all'interno della materia.

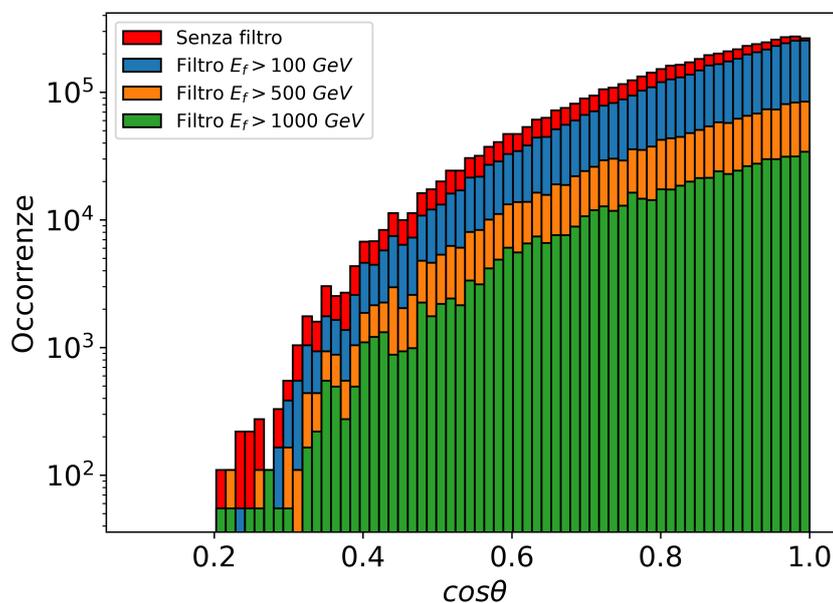
### 3.4 Confronto con i dati simulati

La dipendenza dell'intensità del flusso dei muoni atmosferici dalla profondità inclinata può essere ottenuta da un insieme di dati sperimentali acquisiti da un rivelatore, o, come in questo caso, da un dataset simulato con il generatore MUPAGE. Questa misura rappresenta un importante controllo per verificare la correttezza delle parametrizzazioni usate per la simulazione, e per verificare la correttezza dei dati acquisiti. L'intensità verticale del flusso di muoni in profondità è descritto dalla seguente formula:

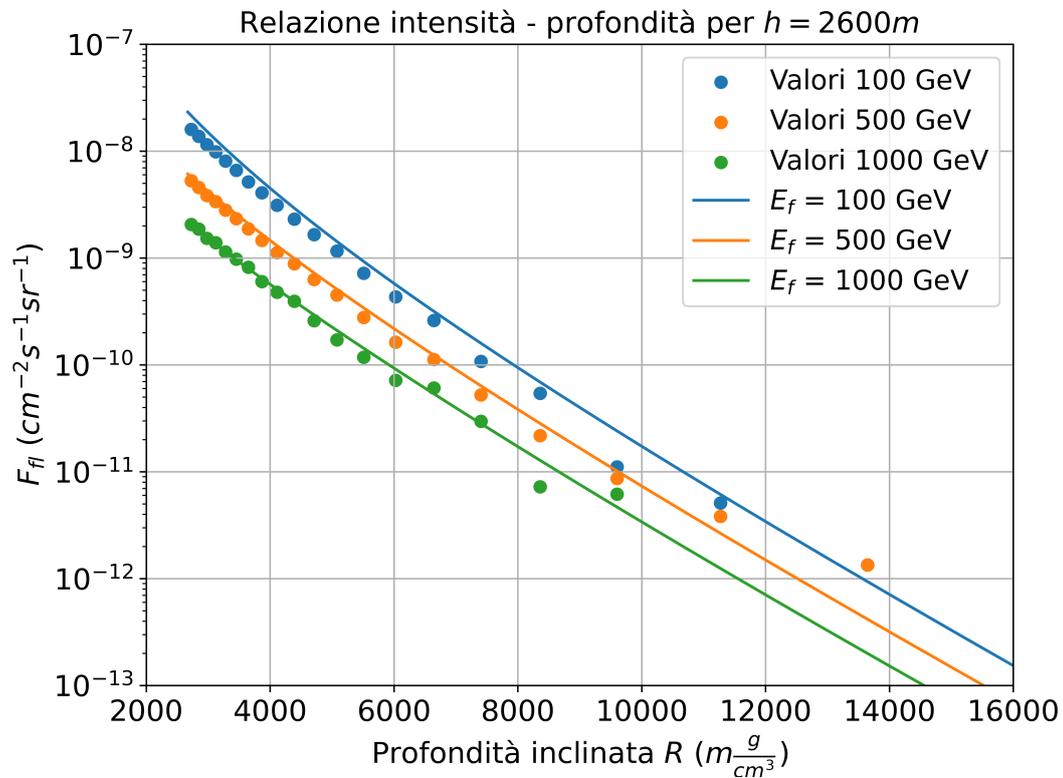
$$I(\theta = 0, h) = I(\theta) \cdot \cos\theta^* = \frac{N_\mu(\theta)}{A(\theta) \cdot \Omega(\theta) \cdot T} \cdot \cos\theta^* \quad (3.6)$$

dove  $N_\mu(\theta)$  rappresenta il numero di muoni generati che arrivano dalla direzione  $\theta$ , come mostrato in Fig.[3.9].  $A(\theta)$  rappresenta l'area della proiezione della *can* del detector sul piano perpendicolare alla traiettoria del muone (le proiezioni hanno forma ellittica),  $\Omega(\theta)$  è l'angolo solido sotteso da  $\theta$  e  $T$  è il tempo di acquisizione (simulazione in caso di MUPAGE).

Preso il campione di dati simulati introdotto nella sezione [3.3], è stato applicato un ulteriore taglio variabile sull'energia simulata degli eventi. Nella Fig.[3.9] sono presenti gli istogrammi di  $N_\mu(\theta)$  prima e dopo i tagli sull'energia.



**Figura 3.9:** Istogramma del coseno dell'angolo zenitale,  $\cos\theta$ . In rosso, l'istogramma prima del taglio effettuato sulle energie simulate, mentre in blu, arancione e verde gli istogrammi dopo aver effettuato il taglio rispettivamente a 100 GeV, 500 GeV e 1000 GeV.



**Figura 3.10:** Intensità del flusso dei muoni atmosferici in funzione della profondità inclinata  $R$ : relazione ricavata dai dati simulati rappresentata dai cerchi pieni, mentre il flusso  $F_{fl}$  teorico mostrato con linee continue. Entrambe le funzioni sono state riportate per 3 energie di soglia diverse: 100 GeV in blu, 500 GeV in arancione, 1000 GeV in verde.

Nella Fig.[3.10], è rappresentata l'intensità verticale del flusso dei muoni, ricavata dal dataset simulato utilizzando un'altezza di  $\sim 2600$  metri<sup>1</sup>, sovrapposta al grafico dell'intensità ottenuta dal modello proposto dall'articolo [1]. L'andamento dell'intensità ricavata dalle simulazioni segue la dipendenza del modello teorico.

<sup>1</sup>Il valore di altezza di  $\sim 2600$  metri è stato calcolato considerando la posizione verticale dei moduli ottici superiori per il rivelatore KM3NeT/ARCA.

# Conclusioni

I muoni atmosferici sono un segnale di fondo costante per i telescopi sottomarini per neutrini, dunque una loro precisa e dettagliata analisi è fondamentale per la corretta interpretazione dei dati rivelati. In questo contesto, la relazione intensità-profondità (DIR) dei muoni atmosferici assume un'importanza considerevole in rivelatori come quello della collaborazione KM3NeT: permette infatti di ottenere, attraverso un dettagliato confronto con i modelli teorici, la validità delle parametrizzazioni del flusso di muoni atmosferici simulato, e la correttezza e consistenza dei dati acquisiti.

In questo lavoro, si è studiato ed analizzato in dettaglio un modello semi-analitico per la descrizione del flusso integrale dei muoni atmosferici.

Proprio a questo fine, è stato considerato un insieme di eventi simulati con il software di generazione MUPAGE, dai quali è stato possibile derivare la relazione intensità-profondità dei muoni atmosferici.

Confrontando il risultato teorico con la DIR estrapolata dalle simulazioni, si può concludere che i dati simulati sono compatibili e validi fino ad elevate quantità di materiale attraversato.



# Appendice 1

## Sviluppo polinomiale del coseno effettivo

Si riporta nella Tab. [1.1] i coefficienti dell'approssimazione polinomiale del coseno effettivo, in base al valore di  $\cos\theta$ , utilizzati nell'Eq.[3.4] e graficati in Fig.[3.2].

$\cos\theta$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$0 \div 0.002$	0.11137	0	0	0	0
$0.002 \div 0.2$	0.11148	-0.03427	5.2053	-14.197	16.138
$0.2 \div 0.8$	0.06714	0.71578	0.42377	-0.19634	-0.021145
$0.8 \div 1$	0	1	0	0	0

**Tabella 1.1:** Valori dei coefficienti  $c_i$  dello sviluppo polinomiale del coseno effettivo, in funzione di  $\cos\theta$ . Nel range  $0.8 - 1$  del  $\cos\theta$ , ovvero ad angoli zenitali minori di circa  $30^\circ$ , l'atmosfera può essere considerata piatta.



## Appendice 2

# Derivazione analitica del flusso dei muoni atmosferici in profondità

Per poter derivare il flusso di muoni in profondità, attraverso un approccio analitico, riporto per completezza le formule del flusso di muoni così come calcolate in [1], assumendo una perdita continua di energia (come trattato in sezione 1.3.3).

$$F_{cl}(\geq E_f, R, \theta) = \begin{cases} F_{cl}(\geq E_f, R, \theta; \alpha_1, \beta_1) & \text{per } R \leq R_{12}, \\ F_{cl}(\geq E_{12}, (R - R_{12}), \theta; \alpha_2, \beta_2) & \text{per } R > R_{12}. \end{cases} \quad (2.1)$$

dove  $R$  è la profondità inclinata,  $R_{12} = \frac{1}{\beta_1} \cdot \ln\left(\frac{\alpha_1 + E_{12} \cdot \beta_1}{\alpha_1 + E_f \cdot \beta_1}\right)$ ,  $E_{12}$  è una costante pari a 35300 GeV. Nella precedente formula, le due casistiche derivano dall'assunzione che la perdita energetica del muone, il cui grafico è proposto in Fig.[1.6], possa essere approssimato a due regioni lineari, rispettivamente con  $\alpha_1 = 2.67$ ,  $\beta_1 = 3.40$  validi per  $E_f < E_{12}$  e  $\alpha_2 = -6.5$ ,  $\beta_2 = 3.66$  per  $E_f > E_{12}$ .

La dipendenza analitica di  $F_{cl}$  dai parametri  $\alpha, \beta$  è data dalla seguente equazione [1]:

$$F_{cl}(\geq E_f, R, \theta; \alpha, \beta) = \frac{e^{-\beta R \gamma}}{\gamma} \sum_{i=\pi, K} D_{0i} E_0^{cr}(\theta) (E_f + y_i)^{-\gamma} (1 - z_i)^{1-\gamma} S(z_i, \gamma) \quad (2.2)$$

dove il pedice  $i$  indica i termini riferiti al pione ( $i = \pi$ ) e kaone ( $i = K$ ), e:

$$y_i = \frac{\alpha}{\beta} (1 - e^{-\beta R}) + E_0^{cr}(\theta) e^{-\beta R}, \quad z_i = \frac{E_0^{cr}(\theta) e^{-\beta R}}{E_f + y_i}, \quad E_0^{cr}(\theta) = \frac{E_0^{cr}(0^\circ)}{\cos \theta^*},$$

$$S(z, \gamma) = 1 + \frac{z}{\gamma + 1} + \frac{2z^2}{(\gamma + 1)(\gamma + 2)} + \frac{6z^3}{(\gamma + 1)(\gamma + 2)(\gamma + 3)} + \dots$$

I cinque parametri presenti in questo modello, ovvero  $D_{0\pi}(= A_0)$ ,  $D_{0K}(= A_0 \cdot B_0)$ ,  $E_{0\pi}^{cr}(0^\circ)$ ,  $E_{0K}^{cr}(0^\circ)$ ,  $\gamma$  sono riportati in Tab.[3.1]. I fattori correttivi

sono espressi attraverso il rapporto dell'intensità del flusso di muoni in profondità, calcolati numericamente in [1] tenendo conto di perdite stocastiche, rispetto all'approssimazione di perdite continue di energia, come in:

$$C_f(\geq E_f, R, \theta) = \frac{I_{cl}(\geq E_f, R, \theta)}{I_{fl}(\geq E_f, R, \theta)} \quad (2.3)$$

Il flusso di muoni in profondità, qui di seguito indicato come  $F_{fl}$  (per distinguerlo dallo stesso flusso calcolato numericamente,  $I_{fl}$ ) può quindi essere espresso come:

$$F_{fl}(\geq E_f, R, \theta) = \frac{F_{cl}(\geq E_f, R, \theta)}{C_f(\geq E_f, R, \theta)} \quad (2.4)$$

Nell'articolo [1] i fattori correttivi vengono espressi con il seguente sviluppo:

$$C_f(\geq E_f, R, \theta) = \sum_{i=0}^4 \left( \sum_{j=0}^4 c_{ij} \log_{10}^j E_f \right) R^i \quad (2.5)$$

dove l'energia di soglia è espressa in GeV e la profondità inclinata in km. I coefficienti  $c_{ij}$  sono riportati in Tab.[2.1].

Pedice $i$	$c_{i0}$	$c_{i1}$	$c_{i2}$	$c_{i3}$	$c_{i4}$
0	$6.3045 \times 10^{-1}$	$6.6658 \times 10^{-1}$	$-4.5138 \times 10^{-1}$	$1.2441 \times 10^{-1}$	$-1.1904 \times 10^{-2}$
1	$2.0152 \times 10^{-1}$	$-4.2990 \times 10^{-1}$	$3.2532 \times 10^{-1}$	$-1.0265 \times 10^{-1}$	$1.0751 \times 10^{-2}$
2	$-3.3419 \times 10^{-2}$	$5.1833 \times 10^{-2}$	$-3.9229 \times 10^{-2}$	$1.2360 \times 10^{-2}$	$-1.2911 \times 10^{-3}$
3	$1.6365 \times 10^{-3}$	$-2.3645 \times 10^{-3}$	$1.7775 \times 10^{-3}$	$-5.5495 \times 10^{-4}$	$5.7557 \times 10^{-5}$
4	$-2.6630 \times 10^{-5}$	$3.7770 \times 10^{-5}$	$-2.8207 \times 10^{-5}$	$8.7275 \times 10^{-6}$	$-8.9919 \times 10^{-7}$

**Tabella 2.1:** Coefficienti  $c_{ij}$  presenti in Eq.[2.5].

# Bibliografia

- [1] S. I. Klimushin, E. V. Bugaev e I. A. Sokalski. «Parametrization of atmospheric muon angular flux underwater». In: *Physical Review D* 64.1 (mag. 2001). ISSN: 1089-4918. DOI: 10.1103/PhysRevD.64.014016. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.64.014016>.
- [2] Maurizio Spurio. *Particles and Astrophysics. A Multi-Messenger Approach*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer, 2015. ISBN: 978-3-319-34539-0, 978-3-319-08051-2. DOI: 10.1007/978-3-319-08051-2.
- [3] Victor F. Hess. «Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten». In: *Phys. Z.* 13 (1912), pp. 1084–1091.
- [4] Domenico Pacini. *Penetrating Radiation at the Surface of and in Water*. 2017. arXiv: 1002.1810 [physics.hist-ph]. URL: <https://arxiv.org/abs/1002.1810>.
- [5] M Tanabashi et al. «Review of Particle Physics: Particle Data Group». In: *Physical Review D* 98 (ago. 2018).
- [6] Bruno Rossi. «On the Magnetic Deflection of Cosmic Rays». In: *Phys. Rev.* 36 (3 ago. 1930), pp. 606–606. DOI: 10.1103/PhysRev.36.606. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.36.606>.
- [7] Bruno Rossi. «Über die Eigenschaften der durchdringenden Korpuskularstrahlung im Meeresniveau». In: *Zeitschrift für Physik* 82.3-4 (mar. 1933), pp. 151–178. DOI: 10.1007/BF01341486.
- [8] Pierre Auger et al. «Extensive Cosmic-Ray Showers». In: *Rev. Mod. Phys.* 11 (3-4 lug. 1939), pp. 288–291. DOI: 10.1103/RevModPhys.11.288. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.11.288>.
- [9] Seth H. Neddermeyer e Carl D. Anderson. «Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles». In: *Phys. Rev.* 51 (10 mag. 1937), pp. 884–886. DOI: 10.1103/PhysRev.51.884. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.51.884>.
- [10] J. C. Street e E. C. Stevenson. «New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron». In: *Phys. Rev.* 52 (9 nov. 1937), pp. 1003–1004. DOI: 10.1103/PhysRev.52.1003. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.52.1003>.

- 
- [11] Particle Data Group et al. «Review of Particle Physics». In: *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2020.8 (ago. 2020), p. 083C01. ISSN: 2050-3911. DOI: 10.1093/ptep/ptaa104. eprint: <https://academic.oup.com/ptep/article-pdf/2020/8/083C01/34673722/ptaa104.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>.
- [12] Maurizio Spurio. *Probes of Multimessenger Astrophysics. Charged cosmic rays, neutrinos,  $\gamma$ -rays and gravitational waves*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer, 2018. ISBN: 978-3-319-96853-7, 978-3-319-96854-4. DOI: 10.1007/978-3-319-96854-4.
- [13] B. P. Abbott et al. «GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral». In: *Phys. Rev. Lett.* 119 (16 ott. 2017), p. 161101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.161101. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.161101>.
- [14] S. Aiello et al. «Searches for neutrino counterparts of gravitational waves from the LIGO/Virgo third observing run with KM3NeT». In: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2024.04 (apr. 2024), p. 026. DOI: 10.1088/1475-7516/2024/04/026. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2024/04/026>.
- [15] KM3NeT Collaboration. *KM3NeT: A large-scale neutrino telescope in the Mediterranean Sea*. 2024. URL: <https://www.km3net.org>.
- [16] ANTARES Collaboration. *ANTARES: Astroparticle Neutrino Telescope and Astronomy*. 2024. URL: <https://antares.in2p3.fr>.
- [17] NEMO Collaboration. *NEMO: Neutrino Mediterranean Observatory*. 2024. URL: <http://nemoweb.lns.infn.it>.
- [18] S Adrián-Martínez et al. «Letter of intent for KM3NeT 2.0». In: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.8 (giu. 2016), p. 084001. DOI: 10.1088/0954-3899/43/8/084001. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>.
- [19] S. Aiello et al. *Astronomy potential of KM3NeT/ARCA*. 2024. arXiv: 2402.08363 [astro-ph.HE]. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.08363>.
- [20] Andrea Palladino, Maurizio Spurio e Francesco Vissani. «Neutrino Telescopes and High-Energy Cosmic Neutrinos». In: *Universe* 6.2 (feb. 2020), p. 30. ISSN: 2218-1997. DOI: 10.3390/universe6020030. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/universe6020030>.
- [21] T. K. Gaisser. *Cosmic rays and particle physics*. 1990. ISBN: 978-0-521-33931-5.
- [22] M. Aglietta et al. «Upper limit on the prompt muon flux derived from the LVD underground experiment». In: *Phys. Rev. D* 60 (11 nov. 1999), p. 112001. DOI: 10.1103/PhysRevD.60.112001. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.60.112001>.

- [23] G. Carminati et al. «Atmospheric MUons from PArametric formulas: a fast GEnerator for neutrino telescopes (MUPAGE)». In: *Computer Physics Communications* 179.12 (2008), pp. 915–923. ISSN: 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.07.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001046550800266X>.
- [24] Y. Becherini et al. «A parameterisation of single and multiple muons in the deep water or ice». In: *Astroparticle Physics* 25 (2005), pp. 1–13. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:6243274>.