

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Fisica

**SIMULAZIONE MONTECARLO  
PER UN TELESCOPIO  
DI  $\nu$  SOTTOMARINO**

Relatore:  
Prof. Annarita Margiotta

Presentata da:  
Federico Versari

Correlatore:  
Dc. Luigi Antonio Fusco

Sessione II  
Anno Accademico 2013/2014



*"Ringrazio tutti quelli  
che sopportano me  
e la mia curiosità"*



# Indice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduzione</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1 Astronomia a neutrini</b>                                       | <b>7</b>  |
| 1.1 Raggi cosmici . . . . .  | 8         |
| 1.2 Sorgenti di neutrini . . . . .                                   | 10        |
| 1.2.1 Neutrini galattici . . . . .                                   | 10        |
| 1.2.2 Neutrini extra-galattici . . . . .                             | 10        |
| 1.3 Interazioni dei neutrini . . . . .                               | 11        |
| 1.4 I telescopi di $\nu$ . . . . .                                   | 12        |
| 1.4.1 Rivelazione dei neutrini . . . . .                             | 12        |
| 1.4.2 Eventi di background - Neutrini e muoni atmosferici . .        | 13        |
| 1.5 Evidenze di neutrini cosmici di altissima energia . . . . .      | 14        |
| <b>2 ANTARES</b>   | <b>15</b> |
| 2.1 Struttura di ANTARES . . . . .                                   | 16        |
| 2.2 Background ottico . . . . .                                      | 17        |
| 2.3 Proprietà ottiche dell'acqua . . . . .                           | 18        |
| 2.4 Risoluzione angolare del rivelatore . . . . .                    | 19        |
| <b>3 Simulazione Montecarlo</b>                                      | <b>21</b> |
| 3.1 Introduzione . . . . .   | 21        |
| 3.2 Struttura della simulazione . . . . .                            | 21        |
| 3.3 Eventi generati . . . . .  | 23        |
| <b>4 Analisi dati</b>  | <b>25</b> |
| 4.1 Ricostruzione delle tracce e parametri di selezione . . . . .    | 25        |
| 4.2 Confronto tra i dati reali ed i risultati della simulazione MC . | 26        |
| 4.3 Criteri di selezione e risultati . . . . .                       | 28        |
| 4.4 Conclusioni . . . . .  | 30        |



# Introduzione

L'astronomia a neutrini è al giorno d'oggi un campo di ricerca estremamente promettente e in rapido sviluppo. Esperimenti quali ANTARES, telescopio di neutrini sottomarino installato a circa 2500 m sotto il livello del mare al largo di Tolone (Francia), su cui è incentrata questa tesi, IceCube ed il futuro KM3NeT, telescopi di dimensione del  $\text{km}^3$  hanno come obiettivo finale la ricerca di sorgenti astrofisiche di neutrini di altissima energia, di diversi ordini di grandezza superiori a quelle raggiungibili con gli attuali acceleratori di particelle. Gli esperimenti sopra citati basano il loro sistema di rivelazione sulla radiazione Cherenkov emessa nel passaggio dei muoni, prodotti nelle interazioni a corrente carica (CC) dei neutrini, in un mezzo trasparente. Nel caso di ANTARES il mezzo attraversato dai muoni con conseguente emissione di radiazione è l'acqua del mare.

Il principale problema nella ricostruzione delle tracce dei muoni provenienti dal basso, i quali possono essere generati solo da neutrini provenienti dall'emisfero sud che interagiscono nei pressi del rivelatore, è rappresentato dai muoni atmosferici (in particolare dagli sciami muonici). La luce Cherenkov da essi prodotta può essere utilizzata per ricostruire erroneamente tracce dirette verso l'alto (upgoing). Lo scopo di questa tesi è la valutazione, tramite un metodo Montecarlo, della probabilità che i muoni atmosferici vengano ricostruiti come muoni diretti verso l'alto.

L'esposizione è organizzata in quattro capitoli: nei primi due vengono descritti la fisica dell'astronomia a neutrini e i principi di funzionamento di un telescopio di neutrini, con particolare attenzione al telescopio ANTARES. Nel terzo capitolo è riportata la descrizione del software utilizzato per simulare lo sciame di muoni atmosferici e la conseguente risposta del rivelatore. Infine, nel quarto capitolo, sono presentati i grafici eseguiti con ROOT che riassumono ed evidenziano i risultati della simulazione.



# Capitolo 1

## Astronomia a neutrini

I neutrini sono particelle subatomiche della categoria dei leptoni. Sono dotati di spin  $\frac{1}{2}$  e non possiedono né carica elettrica né carica di colore e interagiscono solo debolmente. Esistono tre tipi di neutrini, relativi ai tre tipi di leptoni carichi. Il Modello Standard (SM) non prevede massa per queste particelle, ma il fenomeno di oscillazione tra neutrini di sapore diverso, verificata sperimentalmente nel 1998 dall'esperimento Super-Kamiokande, implica che essi abbiano una massa diversa da zero. Le difficoltà sperimentali nello studio dei neutrini permettono al momento attuale solo una stima del limite superiore della loro massa:

$$\begin{aligned}m_{\nu_e} &< 2 \text{ eV} \\m_{\nu_\mu} &< 0.19 \text{ MeV} \\m_{\nu_\tau} &< 18 \text{ MeV}\end{aligned}$$

Queste proprietà li rendono degli ottimi vettori di informazione: possono attraversare il mezzo interstellare e giungere a noi senza essere deflessi dai campi magnetici degli oggetti astrofisici. Per queste ragioni c'è un interesse sempre crescente in direzione dell'astronomia a neutrini, che risulta essere complementare alla tradizionale astronomia basata sull'informazione trasportata dai fotoni in un ampio intervallo di lunghezze d'onda. L'esplorazione dell'universo attraverso i fotoni presenta alcune limitazioni. Se essi possiedono un'energia superiore a 100 TeV (raggi gamma) interagiscono con la radiazione cosmica di fondo creando coppie  $e^+/e^-$ . Risulta inoltre molto difficile studiare l'interno di oggetti astrofisici densi, dove la probabilità che un fotone generato internamente fuoriesca è bassa. Il vantaggio dell'utilizzo dei neutrini di alta energia risiede nella possibilità di ottenere informazioni su oggetti astrofisici lontani e densi e sui meccanismi che avvengono al loro

interno.

Se per questi aspetti i neutrini presentano grandi opportunità per la ricerca, bisogna tenere presente che la loro rivelazione comporta molti più ostacoli rispetto a quella degli adroni o degli stessi fotoni. Le piccole sezioni d'urto di interazione dei neutrini ed i piccoli flussi previsti dalle possibili sorgenti astrofisiche richiedono rivelatori enormi. Per questo, seguendo un'idea proposta negli anni '60 dal fisico russo Markov [1], sono stati costruiti, o sono in fase di costruzione, dei telescopi di  $\nu$  con dimensioni dell'ordine del  $\text{km}^3$  sfruttando grandi masse naturali di acqua o ghiaccio.

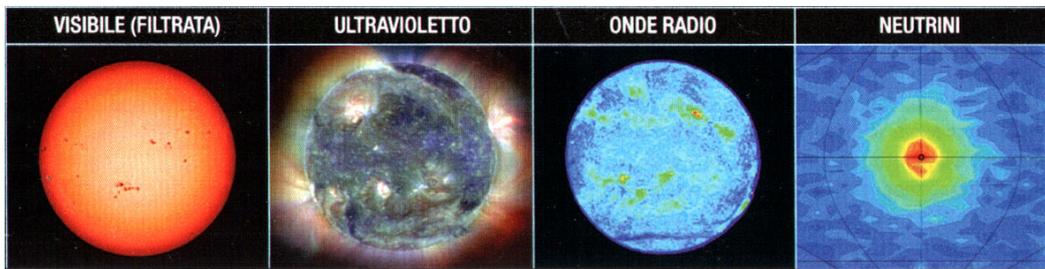


Figura 1.1: Immagine del sole analizzata tramite varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico e ottenuta utilizzando i neutrini che forniscono informazioni sul nucleo.

## 1.1 Raggi cosmici

Storicamente l'esistenza dei raggi cosmici (RC) venne osservata tramite la ionizzazione presente nell'aria. Il fenomeno ebbe una descrizione fisica grazie a Victor Hess, riconosciuto come il padre della fisica dei raggi cosmici che vinse il Nobel nel 1936.

Dall'inizio degli studi sulla fisica nucleare e subnucleare fino ai giorni nostri, i raggi cosmici hanno rivestito un ruolo fondamentale. Permettendo l'analisi di particelle ad energie non raggiungibili con gli apparati sperimentali disponibili.

La descrizione che possiamo dare attualmente dei raggi cosmici copre sia la loro composizione che la loro origine. Restano però aperti diversi interrogativi su entrambi questi aspetti. I raggi cosmici primari (quelli provenienti dallo spazio che interagiscono con l'atmosfera) sono costituiti da una componente carica il cui 91,1% è fatto da protoni (idrogeno), l'8,8% da elio e

lo 0,1% dai restanti nuclei conosciuti in natura e da una componente neutra costituita da fotoni e neutrini.

Lo spettro energetico dei raggi cosmici (figura 1.2) dimostra l'esistenza di protoni e nuclei che giungono a noi con energie fino a  $10^{20}$  eV. Solo le particelle cariche possono essere accelerate. Per via delle interazioni col mezzo che circonda le sorgenti astrofisiche responsabili dell'accelerazione di protoni e nuclei, si può ragionevolmente supporre che anche neutrini di alta energia siano associati alla produzione e accelerazione di raggi cosmici.

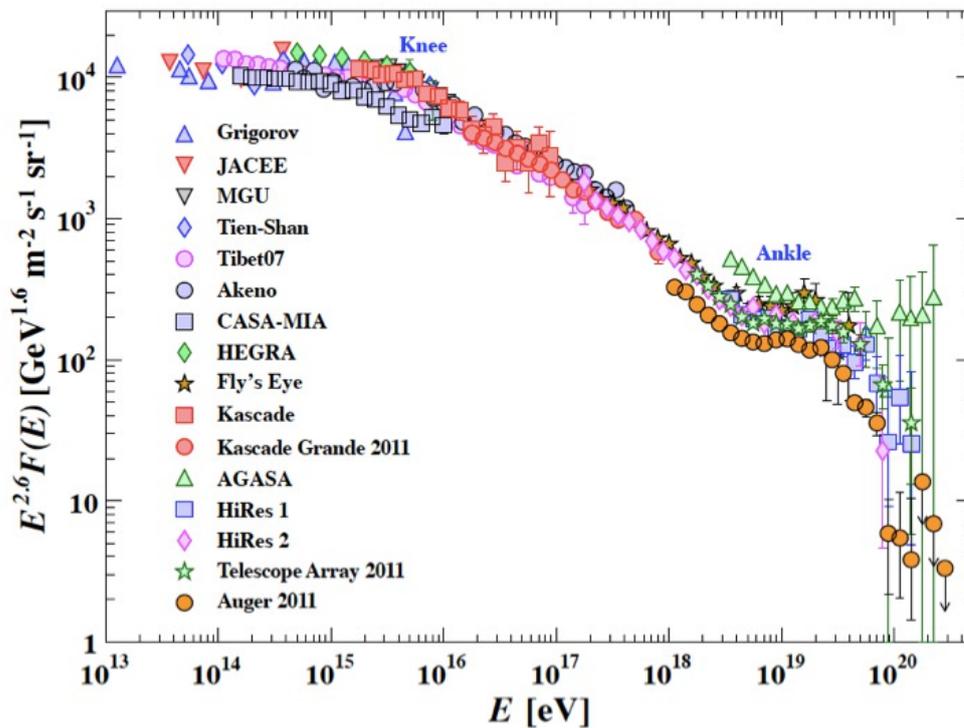


Figura 1.2: *Flusso dei raggi cosmici primari in funzione dell'energia.*

Lo spettro energetico dei raggi cosmici decresce con una legge di potenza nella quale si identificano diverse regioni in corrispondenza del cambio dell'indice spettrale:

- "knee" (ginocchio) per  $E \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ eV}$ . I RC con energie inferiori sono generalmente considerati di origine galattica e la loro accelerazione si può spiegare con il cosiddetto meccanismo di Fermi, che probabilmente avviene nei Resti di Supernovae (SNRs) presenti nella nostra galassia. I meccanismi attraverso i quali si raggiungono energie superiori non sono

ancora del tutto spiegati ma si suppone siano legati a oggetti astrofisici extragalattici.

- "ankle" (caviglia) per  $E \sim 10^{18} eV$ . Il cambio di pendenza in questa regione potrebbe indicare la presenza di altri meccanismi di produzione e accelerazione.

## 1.2 Sorgenti di neutrini

I candidati più promettenti per la produzione di neutrini di alta energia, suddivisi in galattici ed extra-galattici sono:

### 1.2.1 Neutrini galattici

- *Centro galattico (GC)*: Il centro della Via Lattea, visibile nel cielo australe, rappresenta un sito di grande interesse per un telescopio di neutrini posto nell'emisfero Nord proprio in virtù della schermatura che la Terra offre ai raggi cosmici. Sono state identificate alcune sorgenti di raggi  $\gamma$  situate in questa zona della nostra Galassia che potrebbero essere sorgenti di  $\nu$  di alta energia.
- *Resti di supernova (SNR)*: Le particelle possono essere accelerate in un SNR tramite il meccanismo di Fermi. Inoltre, se il prodotto finale della SN è una stella di neutroni, le particelle possono subire un'accelerazione ulteriore per via del fortissimo ed estremamente variabile campo magnetico presente.
- *Microquasar*: I microquasar sono sistemi binari che emettono raggi X e presentano getti nella banda radio. Strutturalmente sono simili ai nuclei galattici attivi (AGN) e per la presenza di getti vengono descritti come piccoli quasar. Per questi oggetti sono previsti meccanismi di accelerazione di particelle cariche fino a circa  $10^{16}$  eV.

### 1.2.2 Neutrini extra-galattici

- *Nuclei galattici attivi (AGN)*: Sono galassie nel cui centro è presente un buco nero super massiccio. Il buco nero attira la materia circostante e rilascia grandi quantità di energia sotto forma di energia elettromagnetica di diversa lunghezza d'onda e, secondo diversi modelli, anche sotto forma di neutrini. Particolari AGN chiamati Blazar, presentano i getti allineati con la linea di vista e hanno un'alta probabilità di essere individuati con un telescopio a neutrini.

- *Gamma Ray Burst (GRB)*: I GRB sono emissioni di breve durata di fotoni gamma ad alta energia e attualmente vengono considerati i fenomeni più energetici che avvengono nell'universo all'interno di oggetti astrofisici non ancora identificati con certezza. La pressione di radiazione accelera la materia fino a velocità relativistiche: nell'urto tra la materia ed il mezzo circostante vengono prodotti pioni carichi e neutri. La rivelazione di questi fenomeni con un telescopio a neutrini è favorita dalla possibilità di ridurre il fondo cercando coincidenze spazio-temporali con l'arrivo dei raggi gamma associati al fenomeno.
- *Materia oscura (DM)*: L'esistenza di materia oscura nell'universo è supportata da prove cosmologiche e sperimentali. Un metodo indiretto per la rivelazione della materia oscura è la rivelazione dei neutrini provenienti dall'annichilazione o dal decadimento delle cosiddette WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Queste sono considerate candidati possibili per la DM e potrebbero essere intrappolate gravitazionalmente all'interno del Sole, della Terra o del Centro Galattico.

### 1.3 Interazioni dei neutrini

La forza debole, l'unica attraverso la quale i neutrini interagiscono con la materia, è una forza a corto raggio ( $10^{-18}$  m) ed è mediata da due bosoni carichi ( $W^\pm$ ) e da uno neutro ( $Z^0$ ).

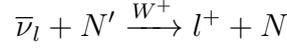
L'interazione tra neutrini e materia si distingue quindi in due tipologie a seconda della carica del mediatore che interviene nel processo :

- *Corrente Neutra (CN)*: il neutrino interagisce con la materia attraverso lo scambio di un bosone neutro, rimane immutato e non c'è produzione di leptoni carichi:

$$\nu_l + N' \xrightarrow{Z^0} \nu_l + N$$

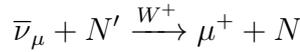
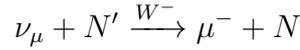
- *Corrente Carica (CC)*: il neutrino interagisce con la materia attraverso lo scambio di un bosone carico producendo un leptone della stessa famiglia. Il sapore del neutrino ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) determina il sapore del leptone prodotto dall'interazione ( $e, \mu, \tau$ ):

$$\nu_l + N' \xrightarrow{W^-} l^- + N$$



I telescopi a neutrini, per individuare possibili sorgenti di  $\nu$ , sfruttano prevalentemente i processi a corrente carica che coinvolgono i  $\nu_\mu$  grazie alla piccola differenza angolare tra il neutrino ed il muone che genera:

$$\Delta\theta_{\nu\mu} \simeq \frac{0.7^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}}$$



Le sezioni d'urto dipendono linearmente dall'energia del neutrini:

$$\sigma_{\nu_\mu N} = (0.667 \pm 0.014) \cdot 10^{-38} (\text{cm}^2 \text{GeV}^{-1}) \cdot E_\nu (\text{GeV})$$

$$\sigma_{\bar{\nu}_\mu N} = (0.334 \pm 0.008) \cdot 10^{-38} (\text{cm}^2 \text{GeV}^{-1}) \cdot E_{\bar{\nu}} (\text{GeV})$$

## 1.4 I telescopi di $\nu$

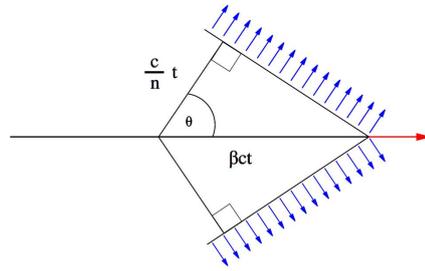
Un telescopio di  $\nu$  è un reticolo tridimensionale di sensori ottici, posti a grande profondità sotto il mare o sotto i ghiacci antartici.

### 1.4.1 Rivelazione dei neutrini

Un telescopio di  $\nu$  non rivela direttamente i neutrini. Attraverso sensori ottici viene raccolta la luce Cherenkov emessa lungo il percorso dei muoni relativistici, prodotti dall'interazione carica tra il neutrino muonico e la materia (vedi sec. 2.1)

L'effetto Cherenkov si verifica quando una particella carica viaggia in un mezzo ad una velocità superiore a quella della luce in quello stesso mezzo. La particella, in queste condizioni, perde energia sotto forma di radiazione luminosa (luce Cherenkov). Dal punto di vista quantitativo, se  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo e  $\beta = \frac{v}{c}$  dove  $v$  è la velocità della particella allora il cono di luce Cherenkov ha un'ampiezza angolare data da:

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

Figura 1.3: *Effetto Cherenkov.*

dove  $\theta$  è l'angolo del fotone rispetto alla linea di volo della particella. Per muoni ultrarelativistici ( $\beta \sim 1$ ), sapendo che l'indice di rifrazione dell'acqua di mare è  $n = 1.35$ , si ha un angolo di emissione  $\theta \sim 42^\circ$ .

### 1.4.2 Eventi di background - Neutrini e muoni atmosferici

I raggi cosmici che interagiscono con i nuclei dell'atmosfera, a circa 10 ÷ 20 km di altezza, producono mesoni e barioni che possono decadere con produzione di leptoni. La direzione e l'energia dei leptoni dipendono dal raggio cosmico che li genera. I muoni ed i neutrini appartenenti a questi sciame costituiscono un'importante sorgente di fondo per la ricerca di sorgenti extra-galattiche mediante telescopi a neutrini.

In figura 1.4 è rappresentato il flusso di muoni atmosferici e di muoni indotti da neutrini atmosferici in funzione dell'angolo di zenith e a diverse profondità ed energie. Dal grafico risulta evidente che il flusso dei muoni atmosferici diminuisce all'aumentare dello spessore di materiale, espresso in metri di acqua equivalente, che i muoni incontrano nel loro percorso. Per questa ragione i telescopi per neutrini devono essere collocati in profondità, in modo da avere una schermatura che riduca il numero di muoni atmosferici di background.

Sempre dal grafico 1.4 trova giustificazione la classificazione dei muoni in base alla loro direzione: dall'alto verso il basso ("downgoing") e dal basso verso l'alto ("upgoing"). I primi, a causa del grande valore del flusso del background di muoni atmosferici che sovrasta il flusso dei neutrini, non possono essere utilizzati per cercare sorgenti astrofisiche. Al contrario il flusso di muoni atmosferici "upgoing", residui degli sciame atmosferici, è nullo proprio in virtù della schermatura che offre la Terra. Per questo motivo vengono studiati i muoni provenienti dal basso. Essi infatti possono essere stati generati solo da  $\nu_\mu$  che hanno interagito tramite CC con la Terra. Resta però impos-

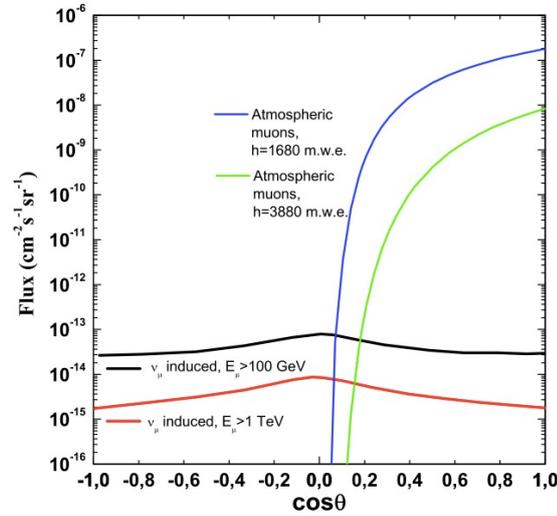


Figura 1.4: *Flusso di muoni atmosferici (linee blu e verde) e di muoni indotti da neutrini atmosferici (linee nera e rossa) a diverse profondità in funzione del coseno dello zenit.*

sibile avere un background nullo a causa dei neutrini atmosferici "upgoing". ANTARES è in grado di discriminare tra muoni "upgoing" e "downgoing" ricostruendo la traccia della particella che ha prodotto la luce Cherenkov tramite speciali algoritmi che utilizzano il tempo, la posizione e l'ampiezza dei segnali raccolti dai sensori ottici.

## 1.5 Evidenze di neutrini cosmici di altissima energia

Recentemente la collaborazione IceCube ha identificato degli eventi dovuti a neutrini di altissima energia, in alcuni casi superiore a 1 PeV [2]. Attualmente, l'ipotesi più probabile è che si tratti di neutrini di origine cosmica. Tuttavia non è possibile al momento identificare una sorgente astrofisica definita. Ulteriori studi sono in corso.

## Capitolo 2

# ANTARES

ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) è un telescopio sottomarino per neutrini, costituito da una struttura tridimensionale di 885 moduli ottici (OM). Il progetto è nato nel 1996 con la collaborazione di vari istituti europei e la sua costruzione è terminata nel 2008. L'apparato sperimentale è ancorato alla profondità di 2475 m al largo delle coste di Tolone in Francia [3].

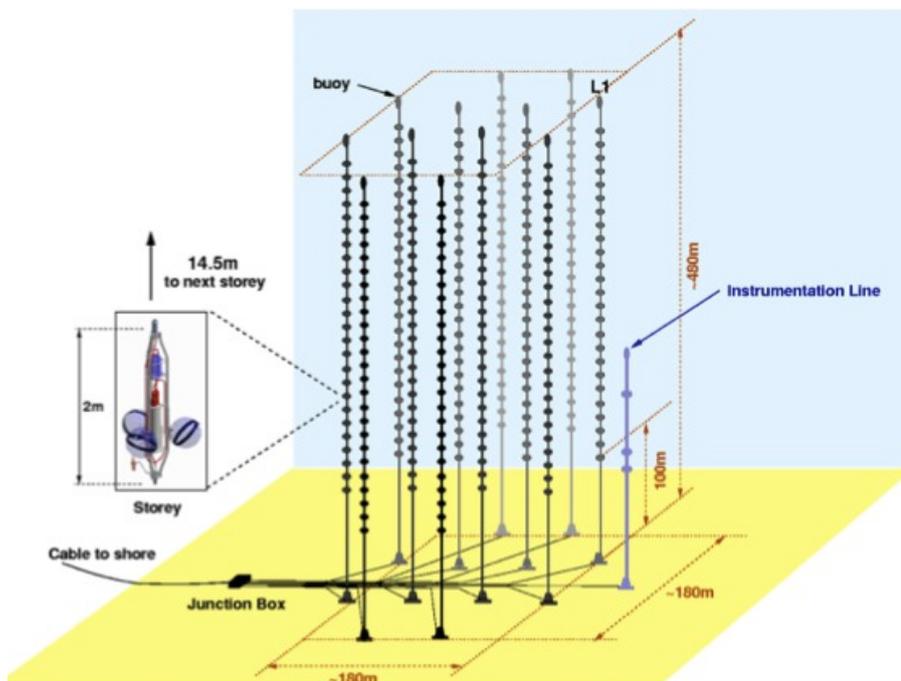


Figura 2.1: *ANTARES*.

## 2.1 Struttura di ANTARES

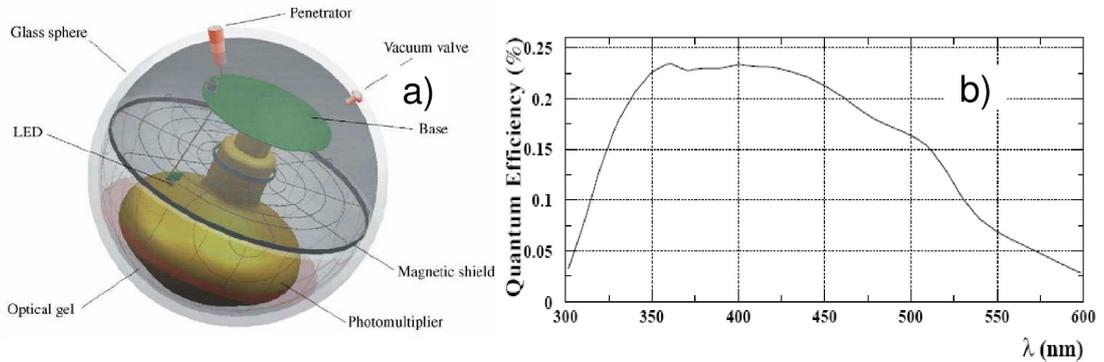


Figura 2.2: *A sinistra: Modulo ottico di ANTARES. A destra: Efficienza quantica del fotomoltiplicatore utilizzato.*

Il modulo ottico (OM) è alla base del funzionamento di ANTARES. Esso contiene, all'interno di una sfera di vetro progettata per resistere fino a 700 atm di pressione, un fotomoltiplicatore da 10" (PMT) (Hamamatsu R7081) che rivela la luce Cherenkov. Per ridurre l'influenza del campo magnetico della Terra, che potrebbe deviare gli elettroni prodotti all'interno del PMT, è stata inserita una griglia di  $\mu$ -metal all'interno della sfera di vetro. All'interno dell'OM è presente un led utilizzato per la calibrazione del PMT. I moduli ottici sono distribuiti su 12 linee (stringhe) lunghe 450 m, i cui primi 100 m dal basso non contengono OMs. Ciascuna linea ospita 25 piani (storey) distanziati tra loro di 14.5 m. Ogni "storey" è costituito da un gruppo di 3 OMs, disposti simmetricamente ed inclinati verso il basso di 45 gradi per aumentare l'efficienza di rivelazione dei muoni up-going, da un "Local Control Module" (LCM), un cilindro di titanio che ospita l'elettronica necessaria per il buon funzionamento dell'apparato, e da alcuni strumenti per la calibrazione temporale e spaziale. Alcuni piani sono equipaggiati con degli ulteriori apparati, quali un idrofono (5 per linea), che serve a conoscere la posizione dei OMs tramite un sistema di posizionamento acustico, ed un faro led (4 per linea), impiegato nella calibrazione temporale dell'apparato. Le linee sono ancorate al fondo e tenute in posizione verticale da una boa posta sulla loro sommità. Alla base di ciascuna stringa, un "Bottom String Socket" (BSS) ospita i dispositivi necessari per la distribuzione dei segnali da e per la stringa e per la sua corretta alimentazione. Il componente elettronico principale del sistema di acquisizione è l'Analogue Ring Sampler (ARS), che digitalizza i segnali provenienti dal modulo ottico. I dati così raccolti sono

trasmessi a terra e vengono elaborati da una "farm" di computer. Appositi algoritmi di trigger selezionano sequenze di segnali potenzialmente interessanti, creando una successione di "eventi" che vengono memorizzati su disco e inviati al centro di calcolo a Lione. Qui, speciali programmi provvedono alla calibrazione offline dei dati e alla ricostruzione della traccia. I dati così trattati e ricostruiti sono pronti ad essere analizzati.



Figura 2.3: *Storey*.

La connessione tra la stazione di controllo, situata all'istituto Michel Pacha a la Seyne-sur-Mer, ed il detector è realizzata mediante un cavo elettroottico lungo 42 Km. Esso è progettato per provvedere alla trasmissione dei segnali elettronici, della sincronizzazione temporale tra i moduli ottici (clock) e della potenza elettrica necessaria ad ANTARES. Il cavo arriva fino alla Junction Box (JB), un contenitore in titanio che ospita la strumentazione necessaria per distribuire la potenza alle 12 linee e provvedere allo scambio dei segnali tra la stazione a terra e il rivelatore, tramite cavi che raggiungono la base di ciascuna linea.

## 2.2 Background ottico

La collocazione di ANTARES nell'acqua del mare è caratterizzata da un inevitabile fondo ottico. Questo background è caratterizzato da due com-

ponenti: una "baseline", che può mantenersi costante per lunghi periodi di tempo, dovuta al decadimento del  $K^{40}$ , un isotopo radioattivo, ed alla attività di batteri e microrganismi bioluminescenti. La seconda componente è caratterizzata da brevi lampi di luce intensi e di durata variabile (burst), fino a diversi secondi, attribuiti a organismi macroscopici che transitano nei pressi del rivelatore.

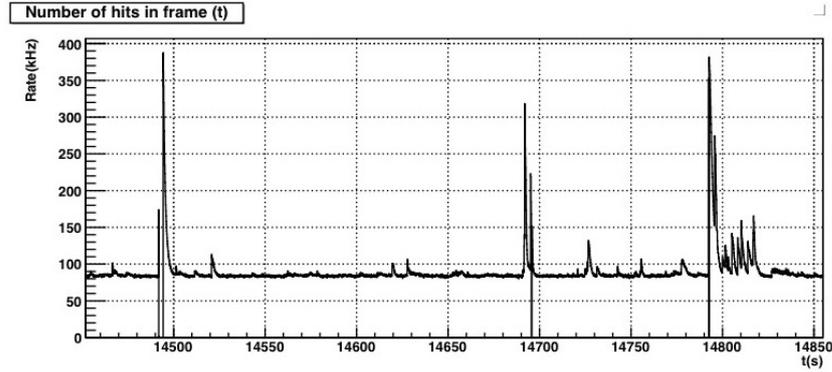


Figura 2.4: Esempio di conteggi di segnali ottici raccolti con uno dei moduli ottici di ANTARES.

## 2.3 Proprietà ottiche dell'acqua

ANTARES è immerso nell'acqua marina ed essa è un componente del rivelatore. Per questa ragione la conoscenza delle proprietà ottiche dell'acqua di mare nel sito di ANTARES è fondamentale al fine di ottimizzare il rivelatore e per poter costruire simulazioni Montecarlo accurate.

La trasmissione della luce nell'acqua è caratterizzata dai processi di assorbimento e di diffusione (scattering) dei fotoni. Entrambi riducono l'intensità del numero di fotoni che raggiungono il rivelatore e il loro effetto può essere descritto da una legge esponenziale del tipo:

$$I_{abs}(x, \lambda) = I_o(\lambda) \cdot e^{-\frac{x}{L_{abs}(\lambda)}}$$

$$I_{scat}(x, \lambda) = I_o(\lambda) \cdot e^{-\frac{x}{L_{scat}(\lambda)}}$$

dove  $I_o(\lambda)$  è l'intensità del fascio di fotoni alla sorgente,  $x$  è il cammino ottico nell'acqua,  $L_{abs}(\lambda)$  è la lunghezza di assorbimento e  $L_{scat}(\lambda)$  è la lunghezza di scattering, entrambe dipendenti dalla lunghezza d'onda della luce. Inoltre, la diffusione agisce in modo da degradare la precisione temporale e,

quindi, l'accuratezza angolare della ricostruzione delle tracce poiché il fotone può raggiungere il modulo ottico dopo uno o più eventi di diffusione e quindi giungere in ritardo rispetto ad un fotone non deflesso.

La combinazione della lunghezza di scattering e di quella di assorbimento consente di valutare la probabilità che un fotone emesso lungo la traccia di un muone possa dare un segnale rivelabile su un PMT. In acqua la trasmissione della luce è favorita nell'intervallo tra 350 e 500 nm, dove anche l'efficienza quantica dei PMT usati in ANTARES è massima (fig. 2.2).

La lunghezza di attenuazione nel sito di ANTARES è di circa 50-60 m e consente di considerare un volume attivo più esteso del volume in cui sono installati i PMTs. Nel caso di ANTARES, si considera come detector attivo un cilindro virtuale (la cosiddetta can) che contiene il rivelatore vero e proprio, che si estende verso l'alto e radialmente per circa 3 lunghezze di attenuazione, fig.2.5.

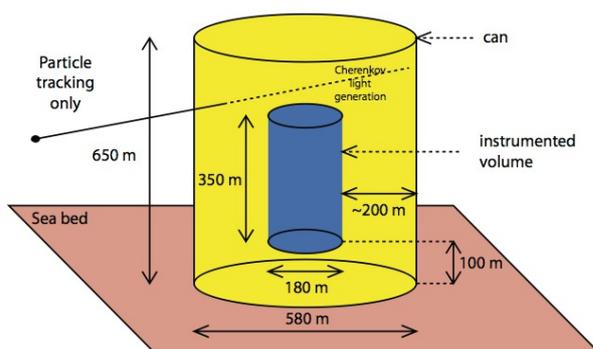


Figura 2.5: *Can*.

Un fotone emesso in prossimità della superficie della can ha una probabilità inferiore al 10% di raggiungere un PMT.

## 2.4 Risoluzione angolare del rivelatore

Uno dei parametri più importanti di un telescopio a neutrini è la risoluzione angolare. Per risolvere l'angolo di provenienza dei neutrini bisogna tenere conto dell'angolo tra la linea di volo del neutrino e quella del muone indotto nell'interazione con la materia. Ad alte energie, il neutrino ed il muone indotto sono sostanzialmente allineati. In questo caso l'errore sulla direzione del neutrino è prevalentemente dovuto all'errore nella ricostruzione della traccia.

Le ottime proprietà ottiche dell'acqua marina, in particolare la lunghezza di scattering, che circonda ANTARES permettono una risoluzione angolare inferiore ad un grado per neutrini con energia superiore a 10 TeV.

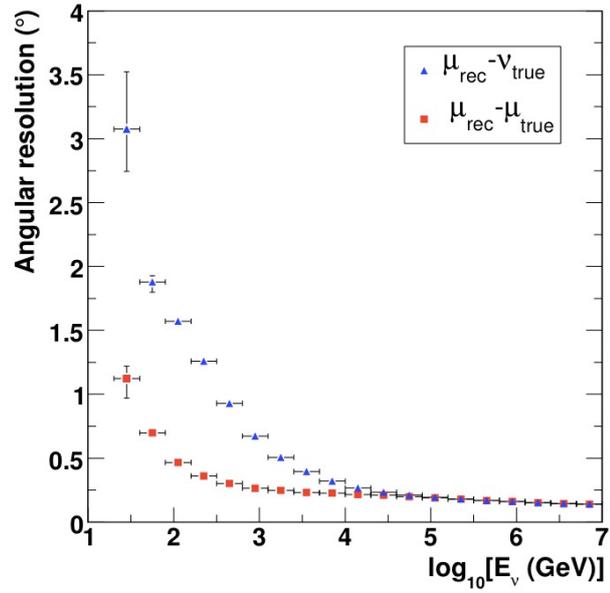


Figura 2.6: *Risoluzione angolare.*

# Capitolo 3

## Simulazione Montecarlo

### 3.1 Introduzione

Nei telescopi a neutrini come ANTARES i muoni dovuti all'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera giocano un ruolo fondamentale perchè, oltre a costituire gran parte degli eventi di fondo, rappresentano un interessante argomento di studio per se stessi e possono essere usati per monitorare l'efficienza del rivelatore e per la sua calibrazione. In questa tesi vengono considerati principalmente come un fondo da rimuovere.

### 3.2 Struttura della simulazione

La simulazione Montecarlo (MC) per un telescopio di neutrini può essere suddivisa in tre fasi, di seguito elencate con i programmi utilizzati nello sviluppo di questa tesi, descritti nella sezione successiva:

1. Generazione degli eventi fisici: (MUPAGE e GENHEN)
2. Emissione e propagazione della luce Cherenkov: (KM3)
3. Risposta del rivelatore: (strategia RUN-BY-RUN (RBR))

Ciascuna di queste fasi richiede, oltre ad un programma dedicato, delle informazioni addizionali quali le caratteristiche del rivelatore, le proprietà del mezzo e le condizioni ed i parametri di acquisizione[4].

## 1. Generazione degli eventi fisici: MUPAGE e GENHEN

La generazione degli eventi fisici viene sviluppata attraverso due distinti programmi, uno dedicato ai muoni ed uno ai neutrini.

MUPAGE [5], è un programma di simulazione Montecarlo che genera sciami di muoni atmosferici a diverse profondità nell'acqua. In particolare essi vengono calcolati sulla "can" (fig. 2.5) del rivelatore. Il codice consente di generare sciami di muoni tenendo conto della distribuzione in molteplicità dei muoni appartenenti allo stesso sciame, del loro spettro energetico, e della loro distribuzione spaziale in relazione all'asse principale dello sciame. Il vantaggio principale dell'utilizzo di MUPAGE rispetto a simulazioni complete che generano gli sciami a partire dai RC primari, risiede nella limitata cpu che richiede il programma per la sua esecuzione. Per ottenere questo risparmio nelle risorse di calcolo MUPAGE fa uso di formule parametriche, i cui relativi parametri sono stati estrapolati da simulazioni complete fatte in precedenza.

GENHEN [6], il programma di simulazione dedicato ai neutrini utilizza il codice GEANT3 [7]. È stato realizzato per simulare neutrini in un intervallo di energia compreso tra 5 GeV e 100 PeV. Per la generazione si ricorre ad uno spettro energetico che segue una legge di potenza caratterizzata da un indice spettrale che può essere scelto dall'utente.

Dati i bassi flussi di neutrini previsti si rende necessaria una strategia che permetta di avere una simulazione con rilevanza statistica. Si procede quindi a simulare un numero elevato di eventi. Al momento dell'analisi gli eventi così ottenuti sono pesati tenendo conto del tempo di osservazione, il livetime (LT), considerato e di un modello fisico che descrive il flusso di neutrini atmosferici. In questo caso è stato usato il modello di Bartol [8].

## 2. Emissione e propagazione della luce Cherenkov: KM3

KM3 [9] è un codice sviluppato nell'ambito di ANTARES che genera i fotoni prodotti dal passaggio dei muoni nell'acqua marina. Viene fornito in input al programma un modello di assorbimento ed uno di scattering per simulare l'interazione della luce col mezzo. I singoli fotoni, una volta generati, vengono propagati finchè non sono assorbiti oppure escono dalla "can" del rivelatore secondo il modello fornito in input. La propagazione dei fotoni avviene salvandone la posizione, la direzione ed il tempo ogni volta che essi attraversano sfere concentriche attorno al punto di origine della traccia del muone. Questo campo di fotoni è convoluto con i possibili orientamenti degli OMs in queste sfere. Al termine di questo processo, vengono riempite delle tabelle contenenti la probabilità che un fotone emesso lungo il percorso del

muone raggiunga il PMT, in funzione della distanza relativa e dell'angolo tra la direzione del fotone e il modulo ottico. Attraverso quaste tabelle si individuano i PMT coinvolti nell'evento in esame e si definiscono i tempo di arrivo e le ampiezze del conseguente segnale ("hit").

### **3. Risposta del rivelatore: strategia RUN-BY-RUN (RBR)**

Poichè le condizioni ambientali in ANTARES possono cambiare nel tempo a causa della variazione del fondo ottico naturale, è stata elaborata una strategia detta "RUN-BY-RUN simulation" (RBR). L'idea alla base della strategia RBR è di avere una simulazione MC associata ad ogni run acquisito. A questo scopo il numero di "hits" di background da aggiungere al passaggio del muone viene estratto direttamente dal run con cui il file di MC dovrà essere confrontato. In altre parole si produce un run simulato per ogni run reale, cercando di ricreare fedelmente le condizioni ambientali e di efficienza del detector. I dati delle simulazioni sono sottoposti agli stessi algoritmi di trigger usati per i dati reali. Da questo momento la ricostruzione delle tracce e l'analisi fisica seguono le stesse procedure sia per i dati simulati che per quelli reali.

## **3.3 Eventi generati**

Per questa tesi sono state fatte simulazioni, tramite i programmi MC precedentemente descritti, in relazione a 50 run reali che corrispondono ad un tempo totale di acquisizione di circa 150 ore.



# Capitolo 4

## Analisi dati

Come descritto nella sezione 1.4.2 il fondo principale per l'analisi di neutrini è costituito dai muoni atmosferici "downgoing" che possono essere ricostruiti come muoni "upgoing". La semplice condizione che un evento venga ricostruito con un angolo di zenith maggiore di  $90^\circ$ , che lo identifica come provenienti dal basso, è necessaria ma non sufficiente per identificare i muoni indotti da neutrini. Per l'analisi presentata di seguito sono stati considerati 50 runs corrispondenti ad un totale di circa 150 ore di presa dati. Il numero totale di eventi ricostruiti è 2742229.

### 4.1 Ricostruzione delle tracce e parametri di selezione

Dal punto di vista quantitativo la frazione di muoni atmosferici che possono essere mal ricostruiti è rilevante. Il loro numero può superare di diversi ordini di grandezza quello dei muoni indotti da neutrini atmosferici (fig. 1.4). Per ridurre la contaminazione si applicano dei criteri di selezione delle tracce secondo parametri di qualità della ricostruzione. Questi tagli devono essere eseguiti con l'obiettivo di massimizzare il numero di neutrini rivelati e di ottenere un campione puro. La ricostruzione è il risultato di una successione di fit. I dettagli della strategia sono descritti in questo articolo [10].

I parametri utilizzati per effettuare i tagli sono:

- Il parametro " $\Lambda$ ", che è un indice della bontà del fit ed è definito dalla seguente formula:

$$\Lambda = \frac{\log(L)}{N_{DOF}} + 0.1(N_{comp} - 1)$$

dove  $L$  è il parametro di verosimiglianza della traccia ricostruita,  $N_{DOF}$  il numero di gradi di libertà del fit ed  $N_{comp}$  è il numero di soluzioni compatibili con l'evento, trovate dal programma di ricostruzione. Fissato un "livello di contaminazione" di muoni atmosferici mal ricostruiti:

$$C = \frac{\#\mu}{\#\nu + \#\mu}$$

è possibile, grazie a simulazioni Montecarlo, fissare un valore di  $\Lambda_C$  tale per cui, negli eventi ricostruiti con  $\Lambda > \Lambda_C$ , risulta essere presente una frazione di muoni inferiore a  $C$ .

- Il parametro " $\beta$ " che è l'errore angolare associato alla direzione di provenienza dei muoni. Esso è di fondamentale importanza quando si studiano i muoni indotti da neutrini con lo scopo di risalire a sorgenti puntiformi ed è definito come:

$$\beta_\mu = \sqrt{\text{sen}^2(\theta)(\sigma_\phi)^2 + (\sigma_\theta)^2}$$

con  $\theta$  angolo di zenith,  $\phi$  angolo di azimuth e  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_\phi$  i relativi errori.

## 4.2 Confronto tra i dati reali ed i risultati della simulazione MC

In questa sezione vengono presentati i grafici più significativi ed i risultati derivanti dalla loro analisi. In figura 4.1 e 4.2 sono rappresentati i parametri  $\Lambda$  e  $\beta$  conseguenti alla ricostruzioni degli eventi simulati e dei dati reali. In particolare nel grafico 4.2 sono stati rappresentati solo per gli eventi "upgoing" e nell'intervallo contenente i tagli successivamente effettuati.

In figura 4.3 è mostrato il confronto tra la distribuzione angolare delle tracce ricostruite per i dati e per il MC. Le differenze tra le due distribuzioni sono dell'ordine del 20-30 %, esse sono dovute alle incertezze sui modelli teorici adottati per valutare i flussi di muoni e sui parametri ambientali, in particolare sulla lunghezza di assorbimento della luce nell'acqua. Vengono inoltre evidenziate le distribuzioni degli eventi prodotti da GENHEN e MUPAGE prima che vengano loro applicati gli algoritmi di ricostruzioni.

#### 4.2. CONFRONTO TRA I DATI REALI ED I RISULTATI DELLA SIMULAZIONE MC27

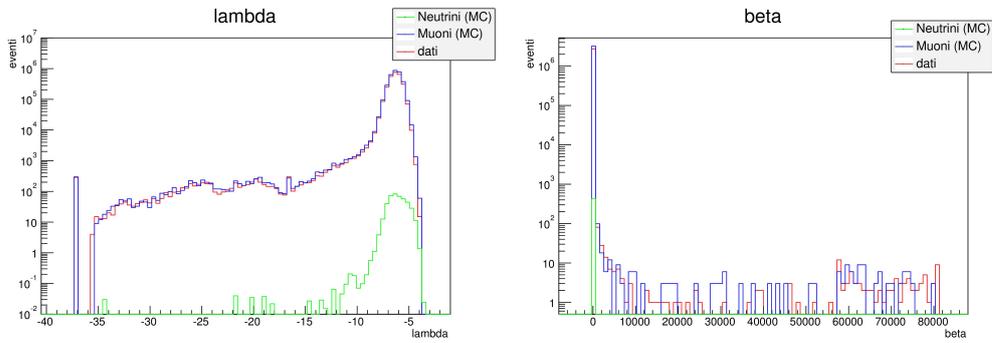


Figura 4.1: A sinistra la distribuzione degli eventi al parametro  $\Lambda$ , a destra la distribuzione degli eventi a  $\beta$ .

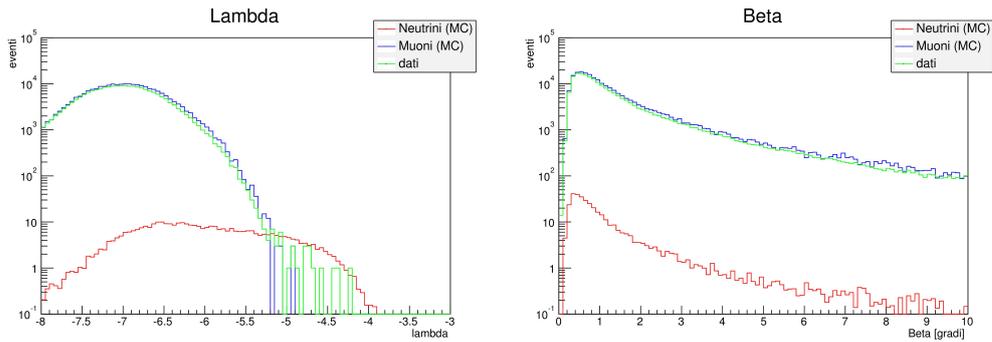


Figura 4.2: A sinistra la distribuzione degli eventi "upgoing" rispetto al parametro  $\Lambda$ , a destra la distribuzione degli eventi "upgoing" rispetto a  $\beta$ .

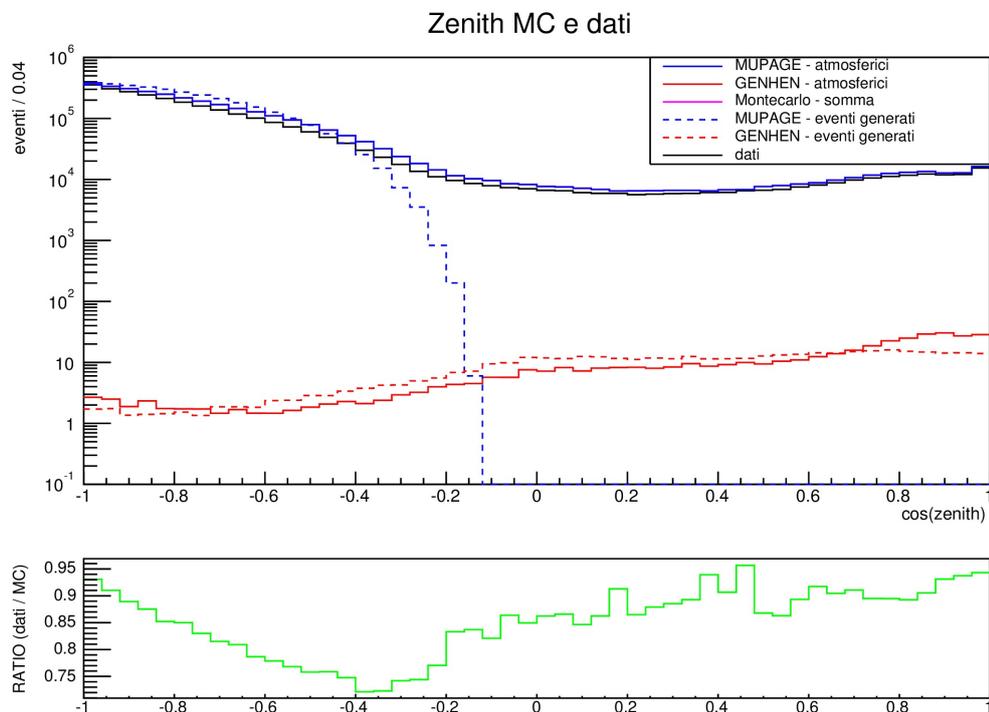


Figura 4.3: *Sopra: distribuzione, rispetto al  $\cos(\text{zenith})$ , degli eventi ricostruiti. La linea rossa si riferisce ai neutrini generati da GENHEN, quella blu ai muoni generati da MUPAGE, quella viola la somma di entrambi e la nera ai dati reali. Le linee tratteggiate si riferiscono alla distribuzione degli eventi generati. Sotto è riportato, nella medesima distribuzione in  $\cos(\text{zenith})$ , il rapporto tra i dati reali e la somma degli eventi MC. La differenza, inferiore al 30%, è dovuta a incertezze nei modelli teorici e nei valori dei parametri geometrici e ambientali.*

### 4.3 Criteri di selezione e risultati

I tagli per la rimozione degli eventi mal ricostruiti devono soddisfare due criteri: da una parte devono ridurre la contaminazione dei muoni atmosferici ricostruiti come upgoing, dall'altra devono mantenere un numero statisticamente significativo di eventi dovuti a neutrini. Per queste ragioni sono state effettuate tre scelte corrispondenti a tre valori di ciascuno dei due parametri descritti in 4.1 (figura 4.2). Ciascuno di questi valori è stato scelto in prossimità dei picchi di  $\Lambda$  e  $\beta$  proprio per mantenere alto il numero di eventi accettati. Nella seguente tabella sono elencati i valori dei tagli scelti, ordinati dall'alto verso il basso rispetto alla restrittività del criterio. Sono

indicati anche il numero di eventi, sia per le simulazioni MC che per i dati, e la percentuale di contaminazione del campione definita come il rapporto tra il numero di eventi dovuti a muoni atmosferici mal ricostruiti e il numero totale di tracce ricostruite come upgoing (muoni atmosferici + muoni indotti da neutrini atmosferici).

|                                   | $\#\mu$ (MC) | $\#\nu$ (MC) | $\#$ dati (MC) | contaminazione % |
|-----------------------------------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| no tagli                          | 246558       | 370          | 246928         | 99 %             |
| $\lambda > -5.8, \beta < 2^\circ$ | 1356         | 129          | 1485           | 91 %             |
| $\lambda > -5.8, \beta < 1^\circ$ | 633          | 113          | 746            | 84 %             |
| $\lambda > -5.5, \beta < 2^\circ$ | 138          | 94           | 232            | 59 %             |
| $\lambda > -5.5, \beta < 1^\circ$ | 78           | 86           | 164            | 48 %             |
| $\lambda > -5.2, \beta < 2^\circ$ | 9            | 62           | 71             | 12 %             |
| $\lambda > -5.2, \beta < 1^\circ$ | 3            | 60           | 63             | 5%               |

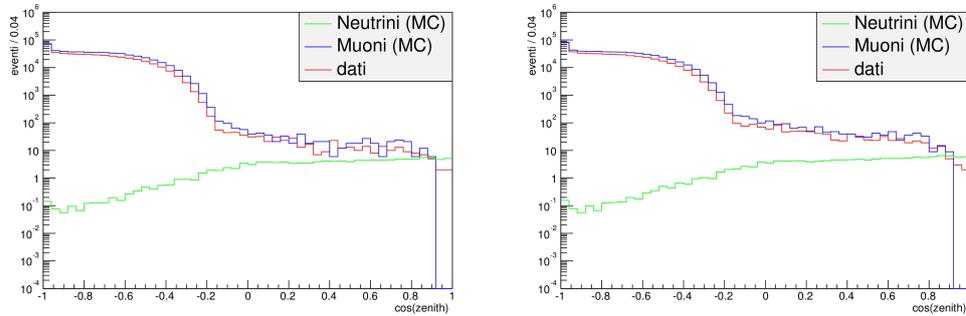


Figura 4.4: In entrambe le figure, sono selezionati eventi con  $\Lambda > -5.8$ . Nella figura di sinistra è richiesto, in aggiunta, un errore angolare sulla direzione della traccia,  $\beta$ , inferiore a  $1^\circ$ . A destra,  $\beta < 2^\circ$ .

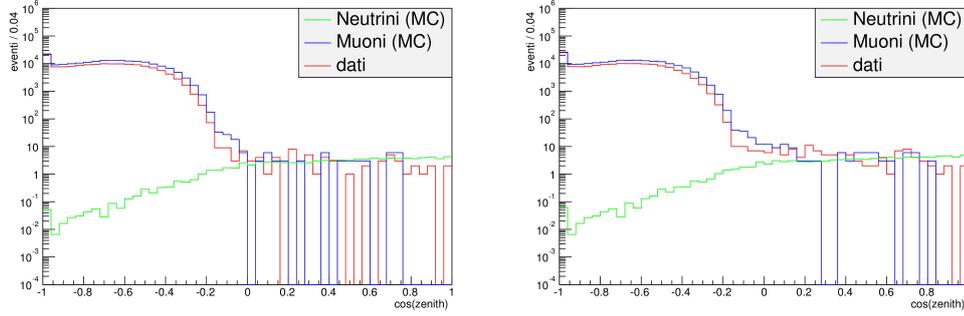


Figura 4.5: In entrambe le figure, sono selezionati eventi con  $\Lambda > -5.5$ . Nella figura di sinistra è richiesto, in aggiunta, un errore angolare sulla direzione della traccia,  $\beta$ , inferiore a  $1^\circ$ . A destra,  $\beta < 2^\circ$ .

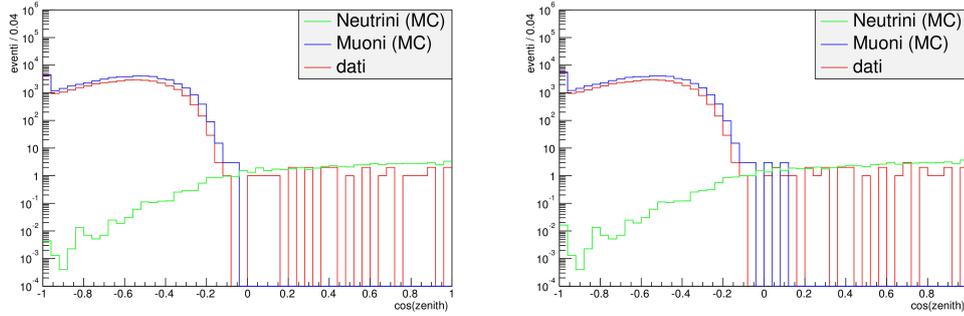


Figura 4.6: In entrambe le figure, sono selezionati eventi con  $\Lambda > -5.2$ . Nella figura di sinistra è richiesto, in aggiunta, un errore angolare sulla direzione della traccia,  $\beta$ , inferiore a  $1^\circ$ . A destra,  $\beta < 2^\circ$ .

## 4.4 Conclusioni

In questa tesi è stato descritto il metodo che consente di identificare alcuni criteri di selezione per l'eliminazione delle tracce mal ricostruite in un campione di eventi raccolti da un telescopio di neutrini sottomarino come ANTARES.

Il metodo prevede una simulazione Montecarlo che riproduca fedelmente le caratteristiche ambientali e di efficienza del detector. La selezione tiene conto di alcuni indicatori della qualità del fit utilizzato per ricostruire le tracce, uno legato al parametro di massima verosimiglianza, l'altro all'errore sulla direzione della traccia. La scelta dei valori da applicare dipende dal livello di contaminazione accettabile nell'ambito dell'analisi che si intende fare. Si può dire che per ottenere un livello di contaminazione inferiore al 50% è

sufficiente selezionare eventi con  $\Lambda > -5.5$  e  $\beta < 1^\circ$ . Un'ulteriore riduzione della contaminazione comporta, come conseguenza negativa, una riduzione statistica del campione.



# Bibliografia

- [1] M.A. Markov, Proceedings Int. Conf. on High Energy Physics, p. 183, Univ. of Rochester (1960).
- [2] M. G. Aartsen et al., ApJ 779 (2013) 132; M. G. Aartsen et al., Phys. Rev. Letters, 113 (2013) 10110.
- [3] M. Ageron et al., Nucl. Instrum. Meth. A 656 (2011) 11; <http://antares.in2p3.fr/> .
- [4] A. Margiotta, Nucl. Instrum. Meth. A 725 (2013) 98.
- [5] G. Carminati, A. Margiotta & M. Spurio, Nucl. Instrum. Meth. A 602(2009) 95.
- [6] D.J.L. Bailey, GENHEN v5r1: Software Documentation, ANTARES-SOFT/2002-04, ANTARES Internal Note, 2002.
- [7] GEANT program manual, Cern program library long writeup, W5013 (1993).
- [8] T.K. Gaisser & M. Honda, Ann. Rev. Nucl. and Part. Sci. 52 (2002) 153.
- [9] S. Navas & L. Thompson, KM3: User guide and reference manual, ANTARES-SOFT/1999-011, ANTARES Internal Note, 1999.
- [10] S. Adrian-Martinez et al., ApJ. 760 (2012)53.