

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Corso di Laurea in Fisica

Studio degli effetti della ricalibrazione
temporale del telescopio di neutrini
ANTARES
sulla ricostruzione degli eventi

Relatori:
Prof.
Maurizio Spurio
Dott.ssa
Giulia Illuminati

Presentata da:
Edoardo Barbi

Sessione Marzo 2023
Anno Accademico 2021/2022

Sommario

I neutrini sono particelle subatomiche proposte per la prima volta dal fisico Wolfgang Pauli nel 1930 per spiegare alcuni tipi di decadimenti radioattivi, successivamente osservati sperimentalmente nel 1956. I neutrini vengono prodotti in una varietà di processi naturali, tra cui reazioni nucleari nel sole e in altre stelle, supernovae e interazioni di raggi cosmici nell'atmosfera terrestre e risultano essere le sonde ideali per effettuare rilevazioni astrofisiche; sono infatti privi di carica elettrica e di colore, permettendogli di viaggiare per lunghe distanze senza essere deviati da campi elettromagnetici e senza interagire con la materia che li circonda. Un telescopio di neutrini è uno strumento utilizzato per rilevare e studiare i neutrini astrofisici. Questi telescopi sono solitamente grandi rivelatori situati in profondità sott'acqua o sotto il ghiaccio al fine di ridurre al minimo le interferenze da altre particelle. Il telescopio preso in esame in questa tesi è ANTARES, situato sott'acqua al largo di Tolone. Recentemente, la calibrazione temporale del telescopio ANTARES è stata rivista per un sottoinsieme di anni di presa dati (2013 e 2018). In questa Tesi viene quindi effettuato uno studio dei dati di ANTARES prima e dopo la ricalibrazione. L'obiettivo è quello di verificare che l'applicazione della nuova calibrazione produca una migliore ricostruzione degli eventi della precedente e che le due siano compatibili. Per farlo sono stati analizzati dati registrati da ANTARES principalmente tramite la produzione di grafici utilizzando il software "ROOT".

È emerso che la nuova calibrazione è appena migliore della vecchia e che c'è generalmente un buon accordo tra le due.

Indice

1	Fisica dei neutrini	2
1.1	Neutrini	2
1.1.1	Caratteristiche fisiche	2
1.2	Sorgenti di neutrini	4
1.2.1	Neutrini atmosferici	4
1.2.2	Neutrini cosmici	5
1.3	Perchè i neutrini	6
2	Telescopio ANTARES	8
2.1	Struttura del telescopio	8
2.2	Rilevazione di neutrini muonici	10
2.3	Radiazione di Cherenkov	12
2.4	Rumori di background	13
2.4.1	Rumore causato da neutrini e muoni atmosferici	13
2.4.2	Rumore ottico in acqua	14
2.5	Sistemi di calibrazione	15
3	Studio degli effetti della ricalibrazione temporale	16
3.1	Introduzione	16
3.2	Variabili analizzate	17
3.3	Analisi grafici	18

Capitolo 1

Fisica dei neutrini

1.1 Neutrini

I neutrini sono particelle subatomiche fondamentali per la comprensione dell' universo. Svolgono un ruolo di grandissima importanza in svariati processi naturali, tra cui le reazioni nucleari che alimentano il sole e altre stelle. In questo capitolo verranno presentate le proprietà fondamentali dei neutrini, alcune delle loro sorgenti e perchè sono così importanti da studiare.

1.1.1 Caratteristiche fisiche

Inizialmete ritenuti privi di massa, solo recentemente è stato dimostrato che i neutrini sono invece massivi [2]. Sono le particelle più elusive finora osservate perchè prive di carica elettrica e con una massa estremamente piccola; inoltre, appartenendo alla famiglia dei leptoni, non possono interagire fortemente. Ne consegue che l'unica interazione a loro disponibile è quella debole (e quella gravitazionale, trascurabile). I neutrini sono inoltre caratterizzati da una minuscola sezione d'urto (σ).

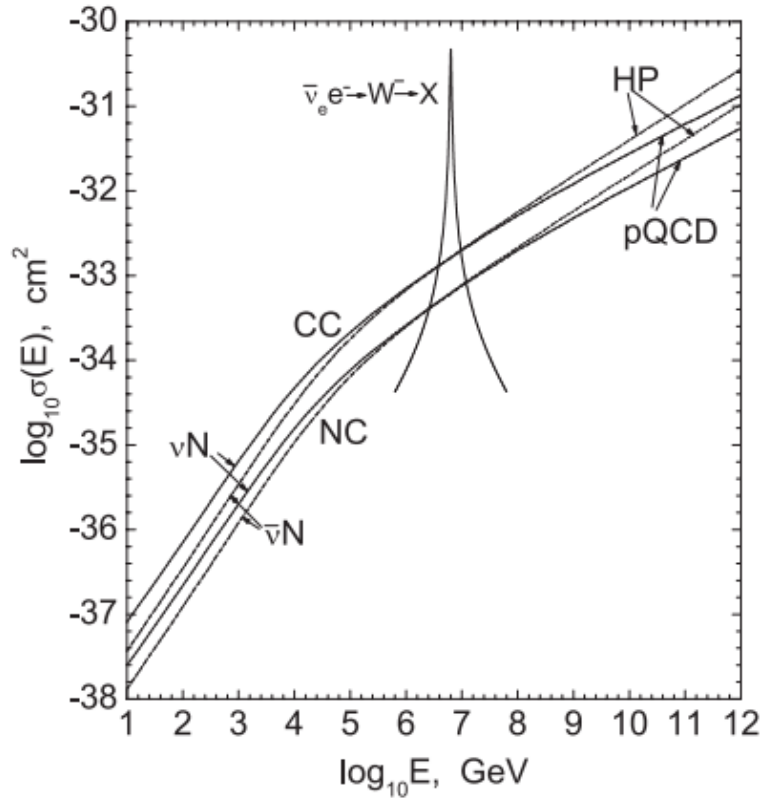


Figura 1.1: Sezione d'urto dei neutrini in funzione della loro energia; le linee tratteggiate indicano la sezione d'urto degli antineutrini mentre le linee continue quella dei neutrini. Vengono inoltre distinte le interazioni di tipo CC (corrente carica) e NC (corrente neutra). [1]

In Figura 1.1 si può infatti osservare un valore di σ che va da circa 10^{-37} cm² per energie intorno ai 10 GeV a circa 10^{-33} cm² per energie nell'ordine dei 10^7 GeV. Questo comporta un libero cammino medio molto grande per il neutrino. Per esempio, calcolando il libero cammino medio di un neutrino con un'energia di 1 MeV che si propaga nel ferro si ottiene:

$$L \simeq 3.74 \times 10^{17} \text{m} \quad (1.1)$$

Si può quindi affermare che si necessitano rilevatori molto grandi per poter osservare dei neutrini ma, al contempo, si nota la possibilità di poter osservare neutrini prodotti in zone remote dell'universo [3].

I neutrini possono essere di 3 diversi sapori; ogni autostato di questi sapori consiste di una superposizione di 3 autostati di massa, la quale porta all'oscillazione dei sapori. Le caratteristiche dell'oscillazione dipendono dai tre angoli di mescolamento $\theta_{13}, \theta_{12}, \theta_{23}$

1.2. SORGENTI DI NEUTRINI

e dalla differenza fra i quadrati delle masse dei 3 neutrini ($\nu_m = \nu_1, \nu_2, \nu_3$), indicate con $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{13}^2, \Delta m_{23}^2$ [4]. Gli autostati dei sapori ν_l sono combinazioni lineari degli autostati della massa ν_m attraverso gli elementi della matrice di mescolamento U_{lm} [5]:

$$\nu_l = \sum_{m=1}^3 U_{lm} \nu_m \quad (1.2)$$

Siccome i ν ad alta energia sono prodotti da sorgenti astrofisiche principalmente col decadimento diretto di π^\pm , le proporzioni di sapore alla sorgente sono:

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0. \quad (1.3)$$

Mentre i ν si propagano nell' universo, le oscillazioni di ν comporteranno variazioni di sapore, facendo sì che i ν astrofisici osservati sulla Terra siano nella proporzione:

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1. \quad (1.4)$$

1.2 Sorgenti di neutrini

Esistono diversi meccanismi naturali per la produzione di neutrini: neutrini solari emessi dal sole, neutrini atmosferici generati dall' interazione di raggi cosmici nell' atmosfera, neutrini cosmici prodotti da vari eventi nel cosmo, neutrini geologici derivati da decadimenti nucleari nel nucleo terrestre. Di seguito sono riportate le caratteristiche di alcuni di questi meccanismi di interesse per lo studio che si sta facendo in questa Tesi.

1.2.1 Neutrini atmosferici

Fasci di particelle dotate di carica elettrica (detti Raggi Cosmici) colpiscono l'atmosfera terrestre producendo cascate di particelle secondarie.

I raggi cosmici primari sono in prevalenza costituiti da protoni ad alta energia ed altri nuclei più pesanti. Quando uno di questi attraversa la nostra atmosfera avviene il seguente processo:

$$p + N \rightarrow \pi^\pm + \text{altro}. \quad (1.5)$$

Prendendo in esame il caso in cui venga prodotto un π^+ , quest'ultimo decade in tempi brevi ($\sim 10^{-8}$ s) in:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu. \quad (1.6)$$

Successivamente il μ^+ decade debolmente in $\sim 10^{-6}$ s in:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e. \quad (1.7)$$

L'intervallo di energia dei neutrini atmosferici è compreso tra qualche centinaia di MeV e più di un TeV e costituiscono un fondo irriducibile per la rivelazione dei neutrini di origine cosmica.

1.2.2 Neutrini cosmici

L'insieme dei processi che comportano la produzione di neutrini astrofisici è chiamato scenario adronico dove protoni accelerati in sorgenti galattiche ed extra galattiche interagiscono con gas di fotoni producendo la cosiddetta "Risonanza Δ^+ ":

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 + p; \quad (1.8)$$

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n. \quad (1.9)$$

Un altro canale d'interazione a loro disposizione è il seguente:

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0; \quad (1.10)$$

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+, \quad (1.11)$$

processo che avviene quando i protoni accelerati interagiscono con la materia nei pressi della sorgente.

I pioni neutri portano alla produzione di fotoni:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma; \quad (1.12)$$

mentre i pioni carichi produrranno:

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+; \quad (1.13)$$

$$\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-. \quad (1.14)$$

Infine μ^+ e μ^- decadranno nel modo seguente:

$$\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+; \quad (1.15)$$

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-. \quad (1.16)$$

Mentre i γ -rays possono essere prodotti anche nel cosiddetto "scenario leptonic" tramite il processo Compton inverso, i neutrini possono essere prodotti esclusivamente in uno scenario adronico. Rilevare neutrini ad alta energia comporta quindi la certezza dell'esistenza di una sorgente astrofisica di raggi cosmici. Sorgenti galattiche di neutrini sono, fra le altre, Microquasar e Resti di Supernovae mentre tra le sorgenti extra-galattiche si possono citare γ -Ray Bursts e Nuclei Galattici Attivi.

1.3 Perché i neutrini

Come detto all' inizio del capitolo, i neutrini, avendo una carica elettrica pari a zero ed essendo privi di carica di colore, possono interagire solo debolmente e gravitazionalmente.

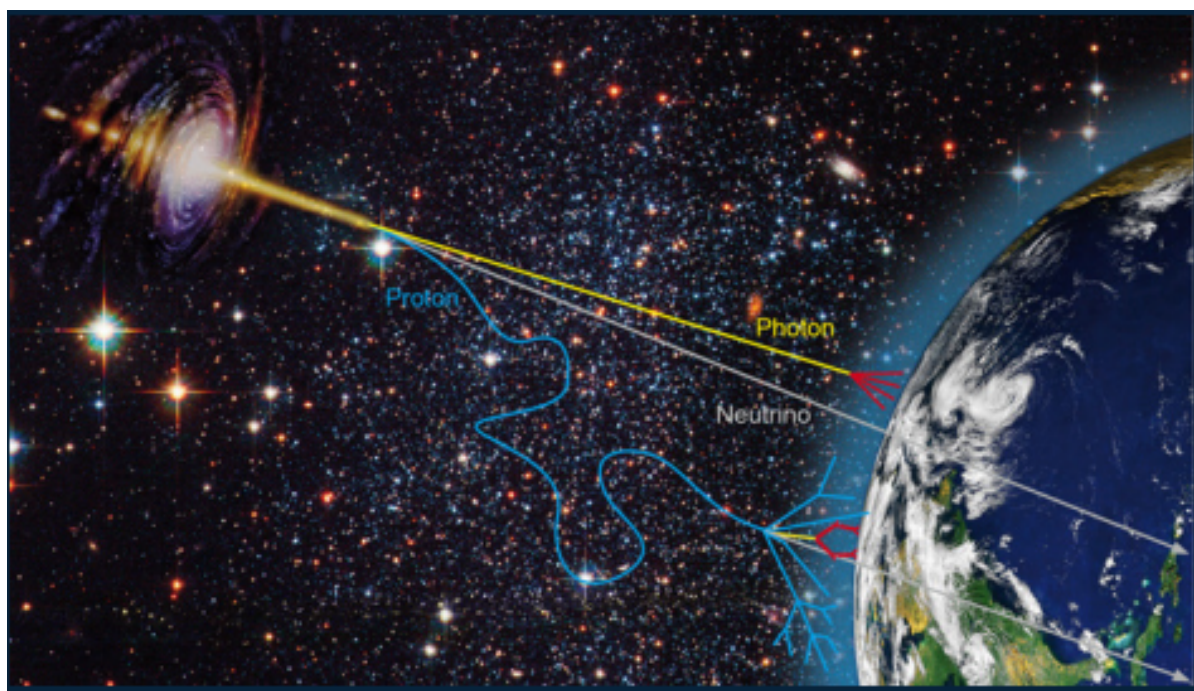


Figura 1.2: Illustrazione che mostra come i neutrini siano i candidati ideali per osservazioni astronomiche. [6]

La traiettoria dei neutrini non viene dunque deviata dai campi magnetici e si può quindi risalire direttamente alla loro sorgente: come si può vedere in Figura 1.2, un protone subisce svariate variazioni alla sua traiettoria, dovute alla presenza di campi magnetici coi quali esso, dato che possiede carica elettrica, interagisce.

1.3. PERCHÈ I NEUTRINI

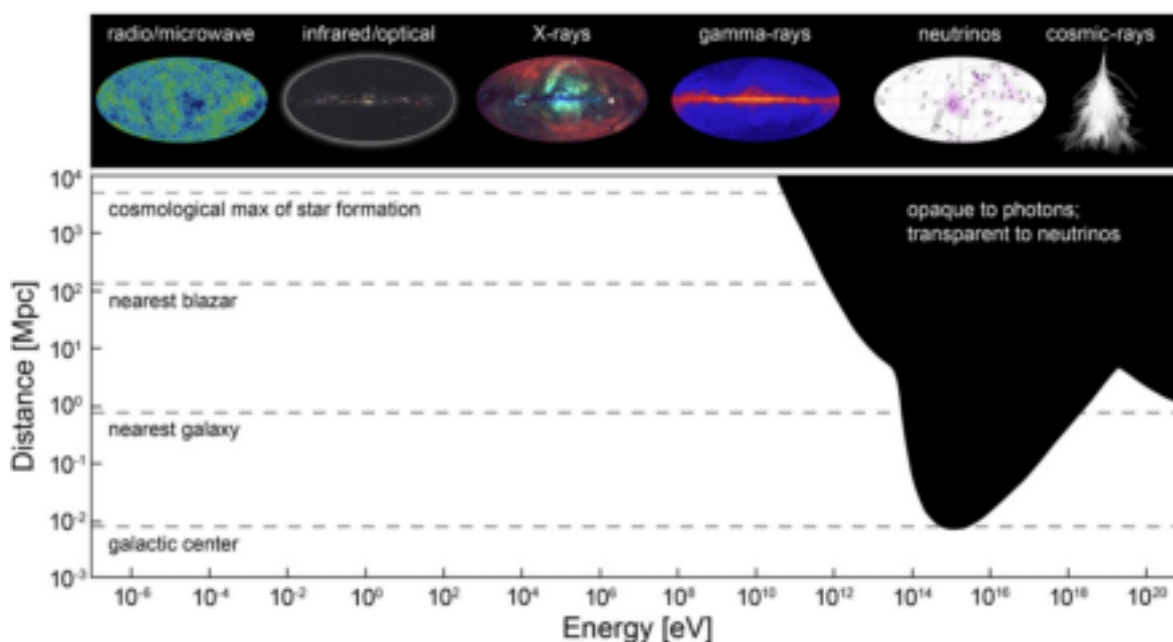


Figura 1.3: Grafico che mostra come regioni di spazio risultino essere opache per i fotoni ma trasparenti per i neutrini. [6]

Inoltre, dalla Figura 1.3, si nota come regioni molto calde e dense siano opache ai fotoni; per esempio i fotoni che ci arrivano dal sole provengono dalla sua fotosfera e non dal suo nucleo. L'universo è infatti opaco per i γ -rays quando il libero cammino medio dei fotoni è minore della distanza dalla sorgente. Il principale processo d'assorbimento per γ ad alta energia E prodotti da sorgenti astrofisiche è la creazione di coppie

$$\gamma_E + \gamma_\epsilon \rightarrow e^+ + e^- \quad (1.17)$$

interagendo con fotoni di background extragalattico a basse energie ϵ . Quest'ultimi sono stati prodotti nel corso del tempo da oggetti astrofisici come galassie e stelle con energie che vanno da quelle della radiazione cosmica di fondo all'ultravioletto [7]. Per osservare a fondo l'universo si necessita quindi di una sonda che sia elettricamente neutra, abbastanza stabile da arrivare fino a noi da luoghi remoti e debolmente interagente così da penetrare regioni opache ai fotoni. L'unico candidato ad oggi conosciuto è il neutrino [8].

Capitolo 2

Telescopio ANTARES

In questo capitolo viene descritto il funzionamento generale del telescopio di neutrini ANTARES, la sua struttura e in particolare i suoi sistemi di calibrazione. Viene inoltre spiegato come dalla rilevazione della radiazione di Cherenkov si riesce a risalire alle proprietà fondamentali del neutrino.

2.1 Struttura del telescopio

Come visto nel precedente capitolo, per rilevare neutrini è necessario un apparato di grandi dimensioni. ANTARES è infatti una matrice di rilevatori di luce immersa in acqua (vicino a Tolone), composto da 12 "linee" strumentali più una dedicata al monitoraggio di parametri ambientali; queste stringhe sono composte da cavi elettro-ottici ancorati al fondale e distanziati l'un l'altro da ~ 70 m. Ogni stringa ha 25 piani, ognuno dei quali contiene 3 moduli ottici (OM) e un modulo di controllo locale per l'elettronica; questi moduli sono posti in modo tale che i fotomoltiplicatori (PMT) (gli strumenti che rilevano i fotoni) siano inclinati di 45° rispetto all'orizzonte. I PMT rilevano la radiazione di Cherenkov, indotta dal passaggio di una particella carica in un mezzo con una velocità maggiore di quella che la luce avrebbe nello stesso mezzo. Il telescopio guarda quindi verso il basso e non verso il cielo: si cerca di minimizzare il rumore prodotto dai neutrini e muoni atmosferici "downgoing" (provenienti dall'alto) e si osservano quelli cosmici provenienti dall'altro emisfero, detti "upgoing".

2.1. STRUTTURA DEL TELESCOPIO

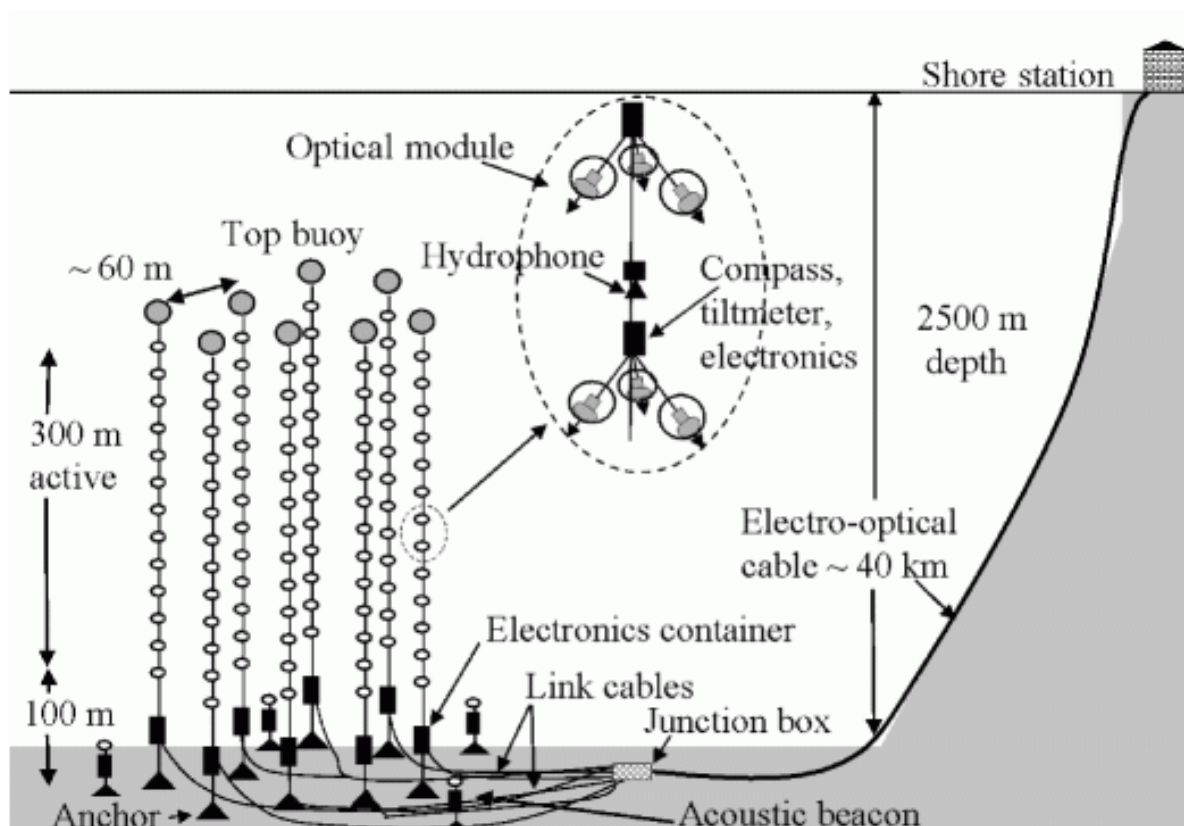


Figura 2.1: Schema della struttura del telescopio ANTARES. [10]

La Figura 2.1 mostra la struttura del telescopio, evidenziando inoltre come il primo piano delle stringhe sia posto a ~ 100 m dal fondale (e a ~ 2.4 km di profondità) e come l'ultimo piano sia ~ 300 m più in alto del primo.

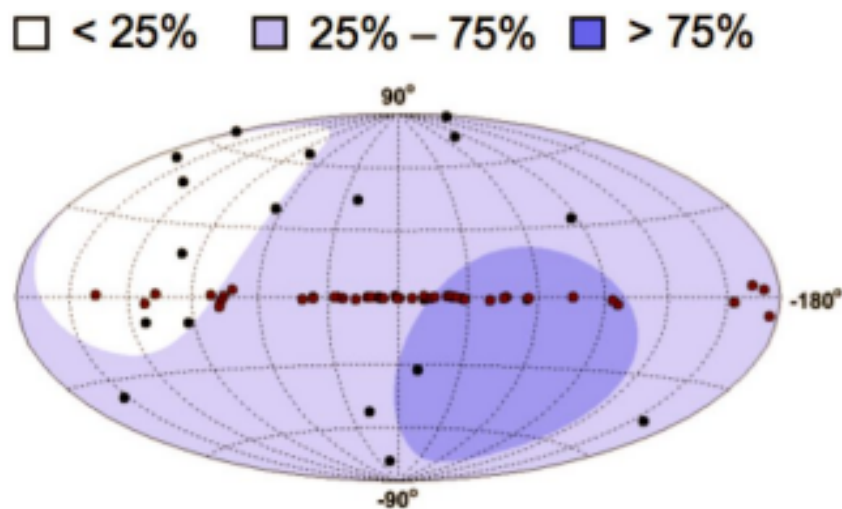


Figura 2.2: Immagine che mostra la porzione di cielo osservabile da ANTARES. [11]

Dalla figura 2.2 si vede la porzione di cielo che ANTARES riesce ad osservare: copre 3.5π sr di cielo e il centro della galassia è visibile per $\sim 67\%$ della giornata.

2.2 Rilevazione di neutrini muonici

In generale quando un leptone l prodotto dalle interazioni dei neutrini del corrispondente sapore attraversa un mezzo come l'acqua, induce la luce di Cherenkov dalla quale, sapendo il suo tempo di arrivo ai PMT, si determina la direzione del leptone.

In generale, ν ad alta energia interagiscono debolmente con un nucleone N in 2 modi:

- Interazione a corrente carica, mediata da un bosone W^\pm :

$$\nu_l + N \rightarrow l + X; \quad (2.1)$$

- Interazione a corrente neutra, mediata da un bosone Z^0 :

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X; \quad (2.2)$$

ν_l rappresenta un neutrino di un determinato sapore (e, μ, τ), l indica un leptone di opportuno sapore e i restanti X provocano una pioggia di adroni.

Nel rivelatore vengono prodotti diversi tipi di segnali dai vari tipi d'interazione dei neutrini con i nucleoni:

2.2. RILEVAZIONE DI NEUTRINI MUONICI

- Eventi di tipo traccia: indotti da ν_μ in interazioni a CC; quando questi possiedono un'energia superiore ad 1 TeV, vengono prodotti muoni relativistici, i quali possono percorrere lunghe distanze attraverso il mezzo (in questo caso acqua), costantemente inducendo luce di Cherenkov lungo il tragitto nel mezzo. Il lungo cammino nel mezzo del μ aumenta il volume effettivo del telescopio, permettendo di rilevare neutrini che hanno interagito a diversi km di distanza. Per energie > 1 TeV, quindi, le interazioni del ν_μ possono avvenire al di fuori del rivelatore e i muoni prodotti sono abbastanza energetici da attraversare completamente il telescopio, producendo così un chiaro segnale sperimentale che consente l'accurata ricostruzione della direzione del μ , strettamente correlata a quella del ν_μ .

La relazione che lega la direzione del ν_μ a quella del μ , è:

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

La formula (2.3) definisce l'angolo medio tra la direzione del neutrino iniziale e quella del muone finale. Si nota inoltre che per energie superiori ai 10 TeV, l'angolo medio risulta essere inferiore a 0.2° .

- Eventi di tipo cascata: indotti dalle interazioni NC di tutti e tre i sapori di neutrini e dalle interazioni CC dei soli ν_e e ν_τ ; le interazioni CC dei ν_e sono le uniche a produrre una cascata elettromagnetica oltre ad una adronica. L'emissione dei fotoni di Cherenkov nelle cascate è approssimabile da una simmetria sferica.

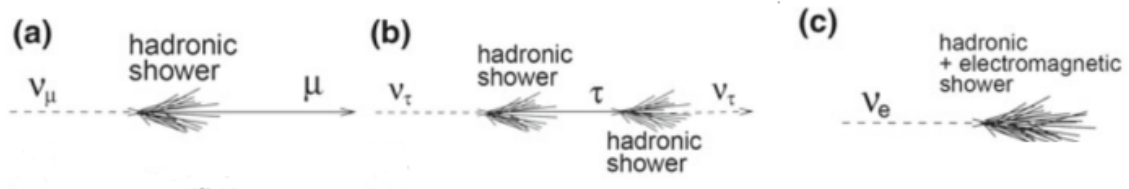


Figura 2.3: Schematizzazioni delle cascate adroniche generate dai 3 sapori di neutrini [12]

In Figura 2.3 sono riportati i 3 tipi di cascate adroniche che si producono dalle interazioni dei 3 sapori di neutrini; si osserva in particolare come il muone mantenga lo stesso verso e direzione di propagazione del ν_μ originale, rendendolo così il candidato ideale per uno studio preciso delle proprietà del neutrino.

Il neutrino muonico risulta quindi essere il sapore di neutrino più utile da rilevare: si misurano i muoni emessi nelle interazioni a CC di ν_μ i quali (se ad alta energia) contengono informazioni sulla direzione del neutrino incidente.

2.3 Radiazione di Cherenkov

La Radiazione di Cherenkov viene indotta in un dielettrico da particelle cariche che attraversano un mezzo isolante con una velocità (v_{mezzo}) maggiore di quella che la luce avrebbe nello stesso mezzo (c_{mezzo}).

Queste particelle polarizzano quindi le molecole lungo la loro traiettoria e, se $v_{mezzo} > c_{mezzo}$, si crea un momento di dipolo generale.

La luce di Cherenkov è invece emessa successivamente quando gli elettroni del mezzo si riportano all'equilibrio, emanando una radiazione entro un cono con angolo caratteristico θ_c dato da:

$$\theta_c = \arccos \frac{c/n}{\beta c} = \arccos \frac{1}{\beta n} \quad (2.4)$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo e β è la velocità della particella in unità di c . Per esempio una particella relativistica con $\beta \simeq 1$ che attraversa l'acqua ($n = 1.364$), ha un angolo caratteristico $\theta_c \simeq 43^\circ$ [5].

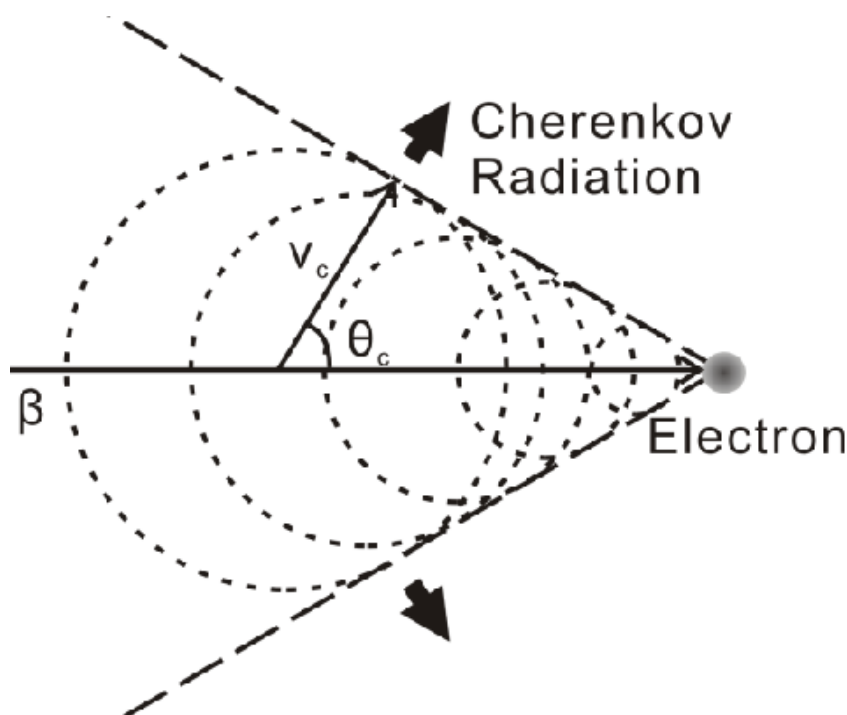


Figura 2.4: Illustrazione che mostra la Radiazione di Cherenkov per un elettrone.

Come si può vedere in Figura 2.4, la radiazione viene emessa in maniera simmetrica rispetto alla direzione della velocità della particella che la genera.

Si nota infine che i muoni (ma anche gli elettroni e i tauoni), prodotti nei processi

2.4. RUMORI DI BACKGROUND

deboli a Corrente Carica ad alte energie, possono generare la Radiazione di Cherenkov quando attraversano un mezzo trasparente come l'acqua marina.

2.4 Rumori di background

È di fondamentale importanza ridurre i rumori di background per poter avere delle misure chiare e precise; di seguito verranno descritti i tipi di rumore presenti quando ANTARES effettua rilevazioni e alcune possibili soluzioni per attenuarli.

2.4.1 Rumore causato da neutrini e muoni atmosferici

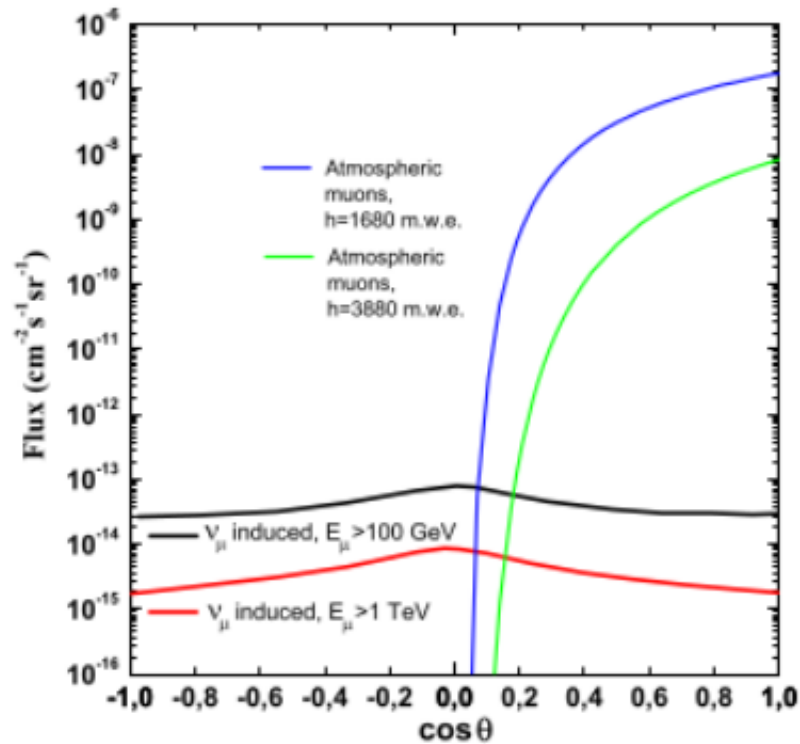


Figura 2.5: Flussi di neutrini e muoni atmosferici in funzione del $\cos(\text{Zenith})$: in blu e verde sono riportati i muoni e in rosso e in nero i neutrini. [13]

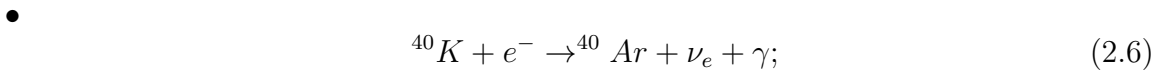
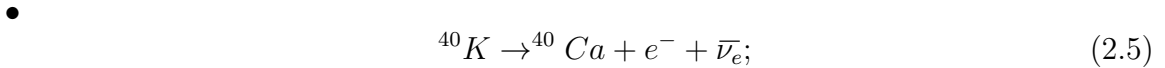
Quando i Raggi Cosmici interagiscono con la nostra atmosfera producono μ e ν_μ atmosferici; i muoni così prodotti possono penetrare l'atmosfera e, successivamente, diversi km d'acqua. Queste particelle ovviamente non contengono alcuna informazione di interesse per lo studio del cosmo e costituiscono il principale tipo di fondo. Il telescopio

va quindi posizionato molto in profondità, infatti, come visto prima, il primo livello di ANTARES è posto a circa 2.4 km sotto la superficie dell' acqua e gli strumenti sono rivolti verso il basso per cercare di schermare il più possibile questi muoni atmosferici. In Figura 2.5 si può vedere come i flussi delle particelle "downgoing" diminuiscano notevolmente con la profondità.

Il problema principale è pertanto rappresentato dalle particelle "downgoing" che possono causare imprecisioni nelle misure o, addirittura, possono essere mal interpretati come eventi "upgoing" e generati da interazioni di ν ad alta energia; nelle analisi vengono quindi applicati tagli basandosi su dei fattori di qualità.

2.4.2 Rumore ottico in acqua

Come visto in precedenza ANTARES è posto ad una notevole profondità; oltre ai vantaggi elencati questo comporta anche svantaggi dovuti alle proprietà ottiche dell' acqua: un rumore irriducibile proviene dal decadimento radioattivo del ^{40}K . I decadimenti principali sono i seguenti:



ed entrambi contribuiscono al rumore ottico. La maggior parte degli elettroni prodotti nella (2.5) rientra nei limiti per la produzione della luce di Cherenkov; il fotone prodotto nella (2.6) possiede un' energia di 1.46 MeV e, tramite lo scattering di Compton, può generare elettroni in grado di indurre luce di Cherenkov. L'intensità dell' effetto Chrenkov causato dal decadimento del ^{40}K dipende dalla concentrazione di quest'ultimo nell'acqua e, nel Mar Mediterraneo, è indipendente dal luogo in cui ci si trova.

Il secondo rumore ottico presente nell'acqua è la bioluminescenza, dovuta alla presenza di batteri e macro-organismi e che decresce generalmente con la profondità. Il suo spettro tipico è centrato attorno ai 470-480 nm, range compreso nell'intervallo di lunghezze d'onda al quale i PMT dei telescopi di neutrini risultano essere particolarmente sensibili (300-600 nm).

In aggiunta, un muone che si muove nell'acqua è soggetto a diversi scattering e la deviazione che la sua direzione subisce da questo processo è:

$$\theta_{ms} = \frac{13.6MeV}{E_\mu} \sqrt{\frac{x}{x_0}} (1 + 0.0038 \ln \frac{x}{x_0}) \tag{2.7}$$

dove x è la distanza percorsa e x_0 è la lunghezza di radiazione del mezzo (37 cm per l'acqua) [14]. Ma, a distanze ed energie d'interesse per il telescopio, risulta che:

$$\theta_{ms} \ll \theta_\mu \tag{2.8}$$

e quindi si può considerare $\theta_{ms} \simeq 0$. La direzione del μ può pertanto essere misurata in acqua con una precisione di $\sim 0.2^\circ$.

2.5 Sistemi di calibrazione

Le stringhe di ANTARES si muovono con la tipica corrente marina di ~ 5 cm/s. Dato che la ricostruzione della traiettoria dei muoni è basata sulle differenze di istante di arrivo dei fotoni nei moduli ottici e che si vuole ottenere una risoluzione angolare $< 0.3^\circ$, per energie del neutrino superiori a 10 TeV è richiesta la conoscenza della posizione degli OM con una precisione di ~ 10 cm. Ciò è ottenuto attraverso la calibrazione della posizione degli OM, la quale viene misurata circa 10 volte ogni ora con un sistema di transponder acustici e ricevitori; la forma delle stringhe viene invece ricostruita tramite un fit globale basato su questi dati più la conoscenza delle correnti marine e della velocità del suono in acqua (misurate). Un' ulteriore calibrazione è quella temporale: la risoluzione temporale relativa fra OM è limitata dal tempo di trasmissione del segnale nel PMT (~ 1.3 ns), dallo scattering e dalla dispersione cromatica della luce nell' acqua marina (1.5 ns per una propagazione di 40 m); l'elettronica di ANTARES è progettata per contribuire meno di 0.5 ns alla risoluzione temporale totale.

Sono anche stati implementati sistemi complementari di calibrazione temporale per misurare intervalli di tempo relativi tra i componenti del rivelatore, tra cui:

- Calibrazione con muoni downgoing: tutte le migliaia di muoni downgoing rilevati ogni giorno vengono usate per stimare la differenza temporale di piani e linee;
- Calibrazione con ^{40}K : dato che sono presenti 3 OM per ogni piano delle stringhe, se un ^{40}K decade vicino ad un piano, la luce di Cherenkov da lui emessa può essere rilevata da 2 OM contemporaneamente e si può quindi calibrarli.

Recentemente sono stati ricalibrati temporalmente 2 anni di misure del telescopio oggetto di studio in questa tesi.

Capitolo 3

Studio degli effetti della ricalibrazione temporale

3.1 Introduzione

I dati delle rilevazioni del telescopio sono stati forniti tramite 2 file di testo (uno per i dati vecchi ed uno per i dati ricalibrati). Le singole variabili sono state poi isolate tramite un file Excel, utilizzando la funzione "Pivot Table", la quale permette di confrontare e selezionare le variabili. Il file con la vecchia calibrazione era composto da 1009 eventi mentre quello ricalibrato da 1017, tutti di tipo traccia. Come verrà trattato più avanti, ogni evento possedeva 2 valori identificativi (RUN e Event ID) i quali hanno permesso di risalire alle misurazioni ricalibrate e di scartare eventi che non avevano un corrispondente nell'altro file. È quindi emerso che, come si potrà osservare anche dai grafici nei prossimi capitoli, ci sono 914 eventi che compaiono sia nel primo che nel secondo file. Se un evento compare in un solo file le possibilità sono 2:

- È presente solo nel file vecchio ed è quindi stato scartato dopo la ricalibrazione, probabilmente perchè non rientrava più nei limiti dei tagli effettuati sui parametri che indicano la qualità delle misure;
- È presente solo nel nuovo file e perciò è un evento che non rientrava nei tagli sui parametri che rappresentano la qualità delle misure con la precedente calibrazione ma che è stato reso accettabile a seguito della ricalibrazione.

Una volta estratti tutti i dati necessari, i grafici sono stati prodotti tramite il programma open source del CERN "ROOT"; i valori sono stati inseriti tramite l'utilizzo di MACROS con il linguaggio c++ e si sono generati i seguenti plot:

- Istogrammi per la distribuzione di variabili;

3.2. VARIABILI ANALIZZATE

- Istogrammi cumulativi;
- Istogrammi prodotti con l'opzione "COLZ": quest'opzione permette di visualizzare la densità di punti in un dato bin tramite l'utilizzo di una scala di colori.

3.2 Variabili analizzate

Nei 2 file erano presenti diversi parametri:

- β : Rappresenta la stima dell'errore angolare sulla direzione ricostruita;
- λ : Variabile che indica la qualità del fit di ricostruzione della traccia. Fit migliori sono associati a valori più alti di λ ;
- $\cos(\text{zenith})$: coseno dell'angolo zenitale, ossia l'angolo tra la direzione della particella osservata e lo Zenith;
- Nhits: numero di segnali registrati dai PMT e usati per ricostruire la traccia;
- $\log_{10}(E)$: logaritmo dell'energia ricostruita della particella;
- Dec: rappresenta una delle coordinate equatoriali (Declinazione) (Figura 3.1).
- Ra: Ascensione retta (coordinata equatoriale) (Figura 3.1).

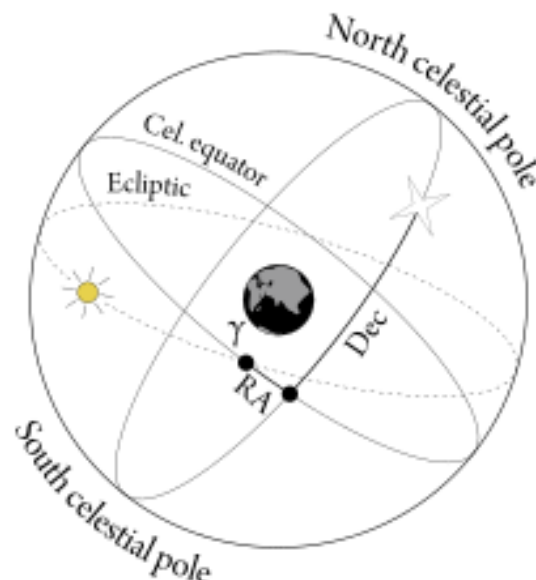


Figura 3.1: Illustrazione che mostra le coordinate equatoriali Dec e Ra.

3.3. ANALISI GRAFICI

In aggiunta è stata calcolata la Distanza Angolare (θ), una variabile che descrive la distanza che intercorre tra le nuove e le vecchie coordinate equatoriali ricostruite.

Ogni evento era inoltre univocamente identificato da 2 ulteriori parametri:

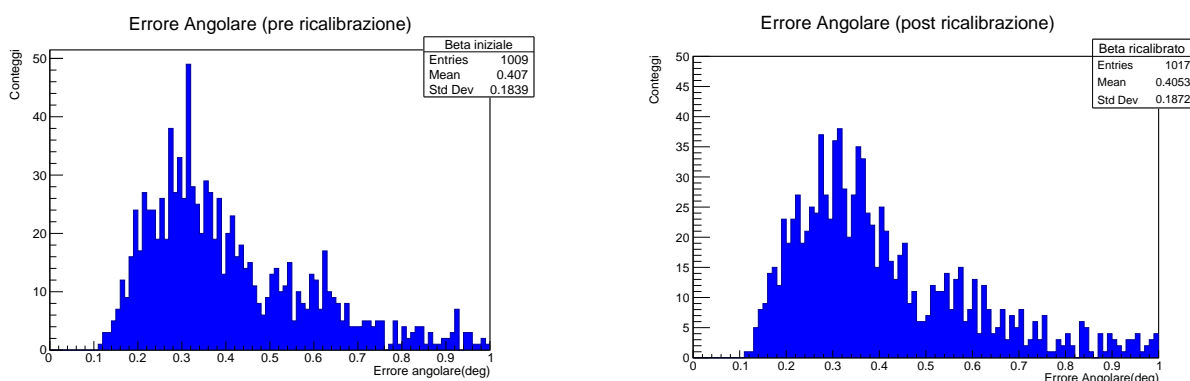
- RUN;
- Event ID;

Questi 2 valori hanno permesso di riconoscere e confrontare eventi ricostruiti con entrambe le calibrazioni.

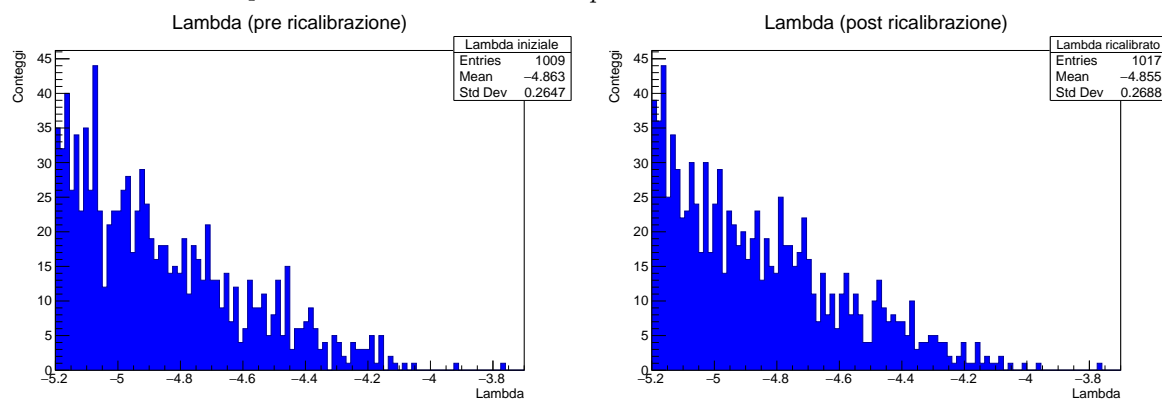
3.3 Analisi grafici

Un primo confronto può essere effettuato sulle distribuzioni di λ e β prima e dopo la ricalibrazione del telescopio ANTARES.

3.3. ANALISI GRAFICI



(a) Istogramma dell'Errore Angolare (β) effettuato con i dati ottenuti prima della ricalibrazione del telescopio. (b) Istogramma dell'Errore Angolare (β) effettuato con i dati ottenuti dopo la ricalibrazione del telescopio.



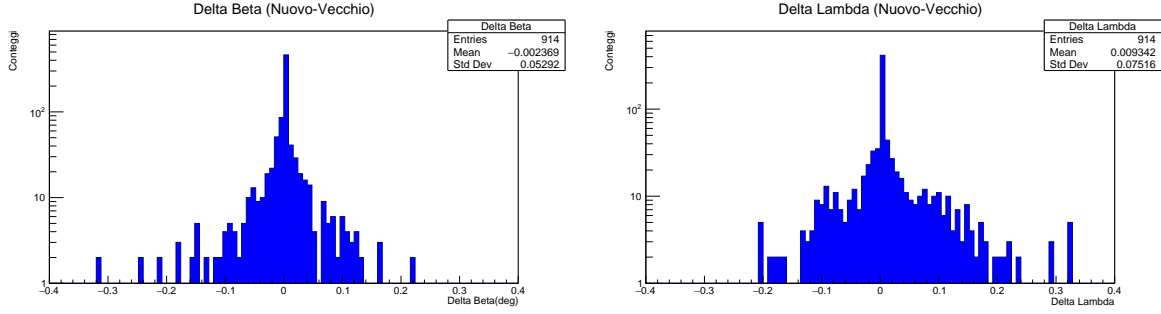
(c) Istogramma del valore Lambda (λ) effettuato con i dati ottenuti prima della ricalibrazione del telescopio. (d) Istogramma del valore Lambda (λ) effettuato con i dati ottenuti dopo la ricalibrazione del telescopio.

Figura 3.2: Distribuzioni di β e λ prima (sinistra) e dopo (destra) la ricalibrazione temporale.

Confrontando i grafici dell'Errore Angolare (β), 3.2a e 3.2b e quelli di lambda, 3.2c e 3.2d, si nota che dopo la ricalibrazione del telescopio la media di β diminuisce di 0.0016° e quella di λ aumenta di 0.008 confermando che, seppur di poco, la qualità delle misurazioni è generalmente migliorata.

Questo miglioramento generale delle misure viene anche confermato dai grafici ottenuti prendendo in esame solo le misure presenti in entrambi i file (identificate tramite i numeri di RUN ed EventID) e facendo la differenza fra i vecchi e i nuovi valori di β e λ :

3.3. ANALISI GRAFICI



(a) Istogramma ottenuto per la distribuzione della differenza di β post e pre ricalibrazione. (b) Istogramma ottenuto per la distribuzione della differenza di λ post e pre ricalibrazione.

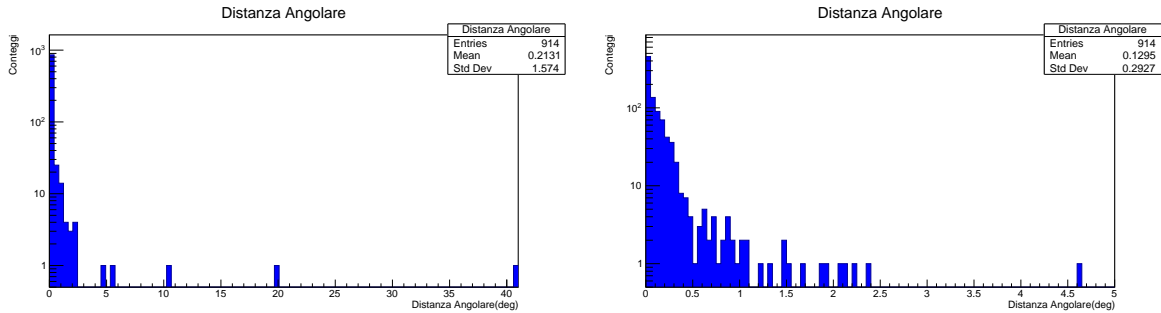
Figura 3.3: Distribuzioni delle differenze fra β e λ pre e post ricalibrazione.

difatti dal grafico 3.3a si evince che il valore di β (per gli eventi presenti in entrambi i file) si è mediamente abbassato di 0.0237 gradi; dalla Figura 3.3b si osserva invece che λ è mediamente aumentato di 0.093, confermando quindi quanto visto in precedenza.

Un' altra distribuzione rilevante è quella della Distanza Angolare (θ), calcolata con la seguente formula:

$$\theta = \cos^{-1}[\sin(\delta_1) \sin(\delta_2) + \cos(\delta_1) \cos(\delta_2) \cos(\alpha_1 - \alpha_2)], \quad (3.1)$$

dove δ_1 e δ_2 sono rispettivamente la declinazione post e pre ricalibrazione e α_1 e α_2 sono l'ascensione retta post e pre ricalibrazione del telescopio. Come visto in precedenza, questa variabile rappresenta di quanto si sposta sulla sfera celeste la posizione dopo la ricalibrazione del telescopio; ci si aspetta quindi un valore relativamente basso di θ per poter affermare che le misurazioni siano buone, dato che un gran valore di θ comporterebbe un disaccordo tra le calibrazioni.



(a) Grafico per la distribuzione della Distanza Angolare considerando tutti gli eventi. (b) Grafico per la distribuzione della Distanza Angolare escludendo eventi con $\theta \geq 5$ gradi.

Figura 3.4: Distribuzione della Distanza Angolare con e senza zoom a 5 gradi.

3.3. ANALISI GRAFICI

In particolare dagli istogrammi in Figura 3.4a e 3.4b si notano 5 eventi con $\theta \geq 5$ gradi e quindi considerabili come mal ricostruiti; risultano comunque essere un numero ininfluyente dati i più di 900 eventi con i quali si sta lavorando.

I valori di Declinazione (dec), Ascensione Retta (RA) e Distanza Angolare (θ) degli eventi anomali sono i seguenti (tutte i valori sono espressi in gradi (deg)):

Dec iniziale	Dec post ricalibrazione	RA iniziale	RA post ricalibrazione	θ
-21.29	-57.42	39.79	66.17	40.94
-24.48	-31.06	50.79	29.51	19.91
-47.80	-53.64	152.15	166.14	10.58
-4.17	-2.92	37.22	31.89	5.46

Tabella 3.1: Coordinate equatoriali e Distanza Angolare degli eventi anomali

Va sottolineato quindi che risulta esserci compatibilità tra le rilevazioni effettuate prima e dopo la ricalibrazione.

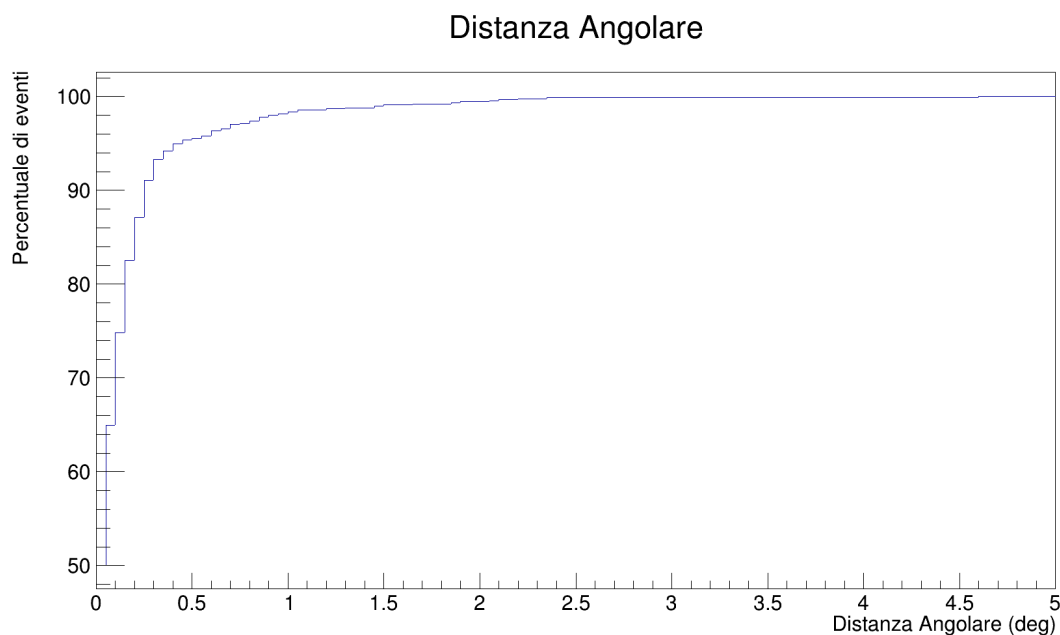


Figura 3.5: Istogramma cumulativo della distribuzione di θ considerando solo $\theta \leq 5^\circ$.

Dall'istogramma cumulativo in Figura 3.5 si può affermare che circa il 95% delle Distanze Angolari siano $\leq 0.5^\circ$, evidenziando così grande accordo tra le due calibrazioni.

Una possibile causa del grande valore di θ per le misurazioni anomale può essere osservata nel grafico della distanza angolare in funzione del coseno dello Zenith.

3.3. ANALISI GRAFICI

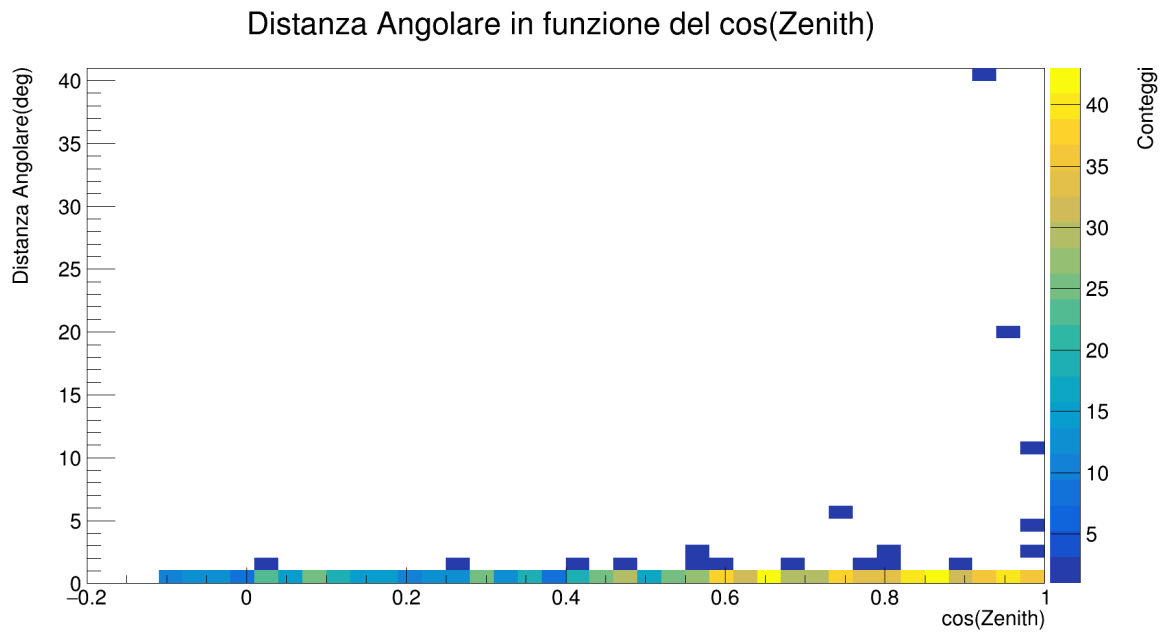


Figura 3.6: Grafico della Distanza Angolare (θ) in funzione del coseno dello Zenith; l'Istogramma è stato prodotto utilizzando la funzione "COLZ" di ROOT che permette di evidenziare la densità di punti presenti in ogni bin.

Dalla Figura 3.6 si vede infatti come tutti questi eventi anomali tendano ad avere un $\cos(\text{Zenith})$ prossimo ad 1; ciò indica la "verticalità" degli eventi e, dato che i fotoni indotti da eventi verticali vengono rilevati da un minor numero di linee, si può affermare che la direzione ricostruita di questi eventi è più influenzata da variazioni nella calibrazione temporale dei singoli PMT.

3.3. ANALISI GRAFICI

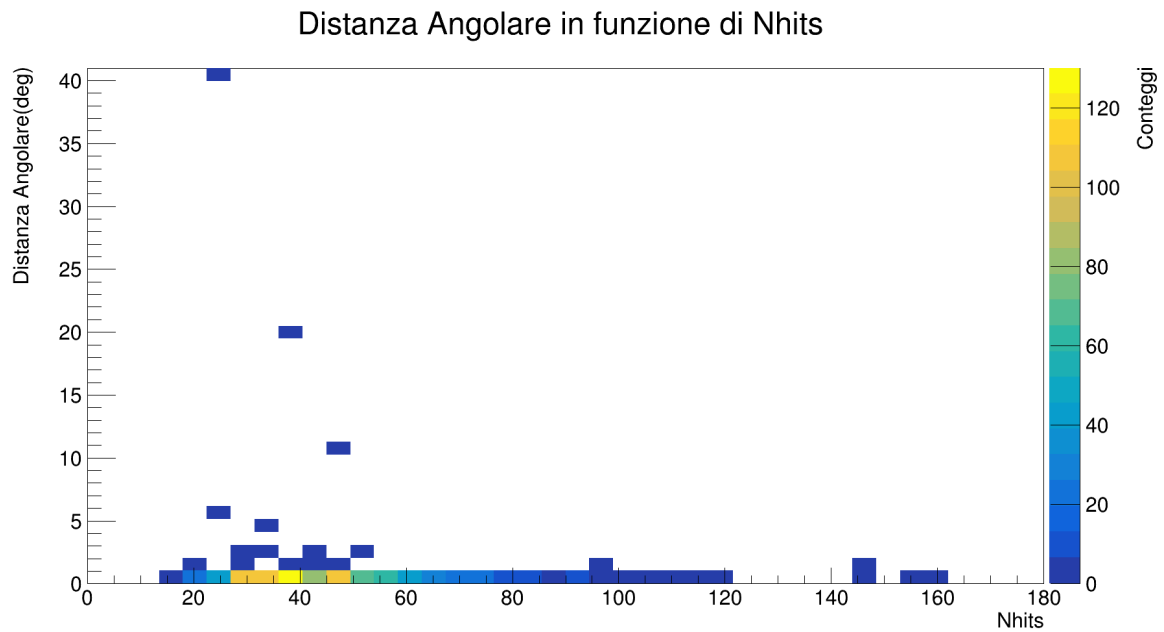


Figura 3.7: Grafico (generato con l'opzione "COLZ") di θ in funzione del numero di Hits registrate.

Dal grafico in Figura 3.7 è chiaro come questi eventi con un gran valore di θ non abbiano generato un numero elevato di segnali negli strumenti del rivelatore; Nhits rappresenta infatti il numero di segnali registrati dai PMT e usati per ricostruire la traccia. Data la struttura di ANTARES (Figura 2.1) è evidente come una particella che si propaga parallelamente alle stringhe contenenti i PMT attraversi meno rilevatori e restituisca quindi valori meno accurati.

3.3. ANALISI GRAFICI

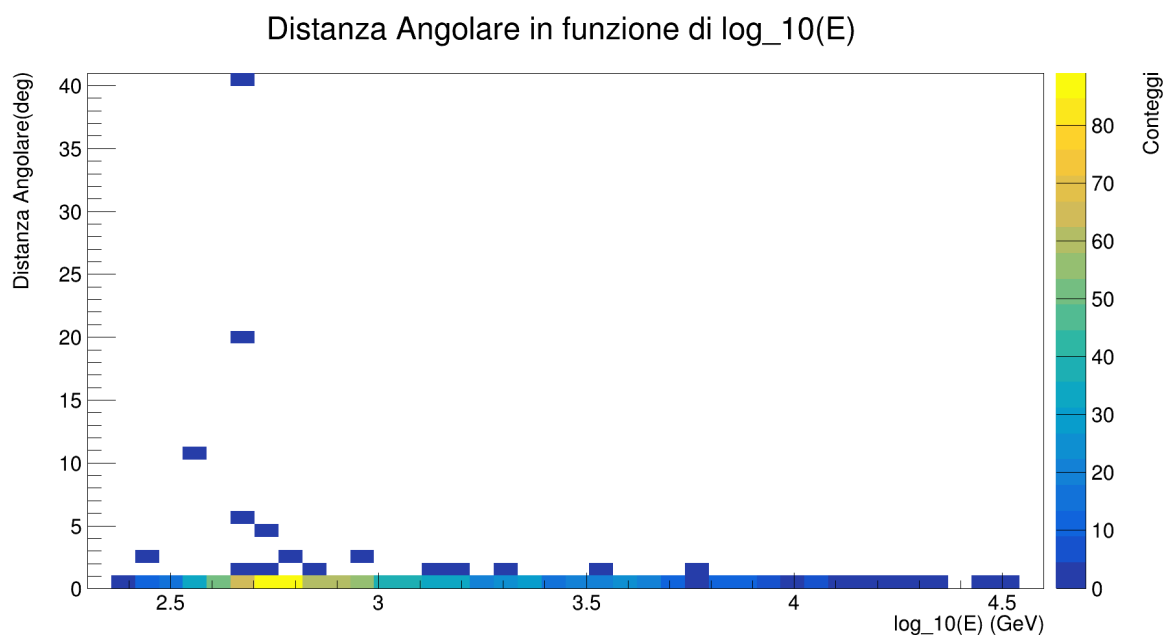
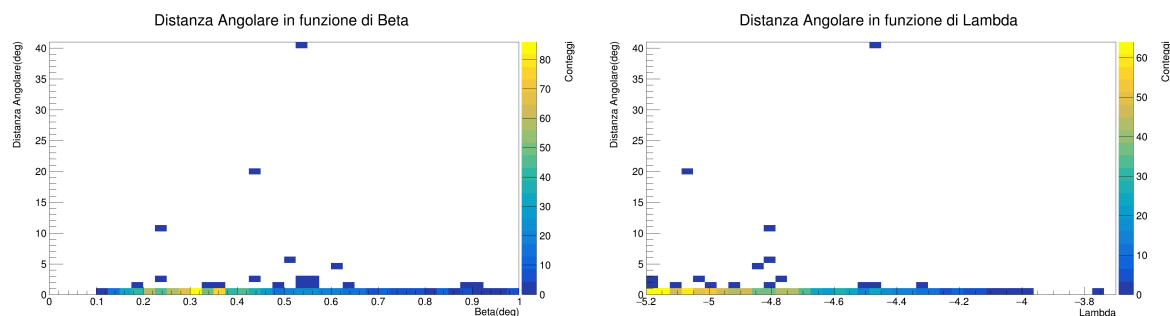


Figura 3.8: Grafico della distanza angolare in funzione del logaritmo dell'energia del neutrino.

Dalla Figura 3.8 si può dedurre una relazione tra i valori anomali di θ e l'energia ricostruita del neutrino: hanno tutti un $\log_{10}(E)$ relativamente basso. Neutrini a basse energie produrranno un numero di Hits sicuramente minore di quelli ad alte energie perchè produrranno un muone caratterizzato da una traccia più corta.

Potrebbe quindi essere utile escludere eventi nettamente verticali dalle analisi: guardando i grafici finali di β e λ , non sembrerebbe che applicare una selezione più stringente sui parametri di qualità per gli eventi verticali sia d'aiuto visto che non si nota un'evidente correlazione.



(a) Grafico della distanza angolare in funzione di β . **(b)** Grafico della Distanza Angolare in funzione di λ .

Figura 3.9: Grafici di θ in funzione di β e λ prodotti con l'opzione "COLZ" di ROOT.

3.3. ANALISI GRAFICI

Infatti, analizzando i grafici delle Figure 3.9a e 3.9b, non emerge invece nessuna particolare relazione fra θ e le 2 variabili che determinano la qualità delle misurazioni β e λ .

Infine si nota che tutte le misure analizzate sono state precedentemente selezionate con il criterio $\beta \leq 1^\circ$ e $\lambda \geq -5.2$, effettuando quindi una prima selezione che garantisca una certa qualità di rilevazione; non dovrebbe quindi risultare un grande numero di eventi anomali (infatti se ne osservano solamente 5 con $\theta \geq 5^\circ$).

Conclusioni

L'obiettivo di questa Tesi era quello di analizzare gli effetti della ricalibrazione temporale di ANTARES confrontando i nuovi valori degli eventi ricostruiti con quelli precedenti. Sono stati quindi analizzati vari parametri per poter affermare che i nuovi dati fossero compatibili con i vecchi. Dai circa 1000 eventi studiati si può affermare che, a parte 5 misure anomale, la nuova calibrazione è accettabile e consistente con la precedente: la variabile Distanza Angolare (θ) presenta infatti dei buoni valori che confermano l'accordo fra nuova e vecchia calibrazione.

Dall'analisi dei parametri λ e β che rappresentano la qualità delle misure è emerso che le rilevazioni sono generalmente migliorate (seppur di poco), provando quindi che l'attuale calibrazione è migliore della precedente.

Bibliografia

- [1] A. Gazizov and M. P. Kowalski, “ANIS: High energy neutrino generator for neutrino telescopes,” *Comput. Phys. Commun.* 172 (2005) 203–213.
- [2] Camilleri L, Lisi E and Wilkerson J 2008 Neutrino Masses and Mixings: Status and Prospects *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 58 343;
- [3] G. Cò, - Neutrini ed interazione debole, Ithaca N.VI (2015);
- [4] Camilleri, L. (2020). Neutrino Detectors. In: Fabjan, C., Schopper, H. (eds) *Particle Physics Reference Library*;
- [5] High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes T. Chiarusi, M. Spurio;
- [6] <https://indico.cern.ch/event/1034990/contributions/4663420/attachments/2370969/4049325/EpipANTARES.pdf>;
- [7] Spurio, Maurizio. “Probes of Multimessenger Astrophysics: Charged cosmic rays, neutrinos, γ -rays and gravitational waves.” (2018);
- [8] <https://antares.in2p3.fr/Overview/why.html>
- [9] K. Sakaue, M. Brameld, R. Kuroda, M. Nishida, Y. Taira, T. Toida, et al., “Investigation of the Coherent Cherenkov Radiation Using Tilted Electron Bunch”, in *Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’17)*, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper MOPVA024, pp. 905–907, , 2017.
- [10] <http://antares.in2p3.fr>.
- [11] ANTARES Collaboration
- [12] B. Hartmann. Reconstruction of neutrino-induced hadronic and electromagnetic showers with the ANTARES experiment, PhD thesis, University of Erlangen-Nurnberg,2006;
- [13] Y. Becherini et al, *Astrop. Phys.* 25: 1-13, 2006
- [14] https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/contents_sports.html.