

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

Studio della mappa del cielo prodotta dal telescopio di neutrini ANTARES

Presentata da:
Matteo Centanni

Relatore:
Prof.
Maurizio Spurio
Correlatori:
Dott.ssa
Giulia Illuminati
Dott.ssa
Ilaria Del Rosso

Anno accademico 2022-2023

Sommario

I neutrini sono particelle subatomiche osservate sperimentalmente per la prima volta nel 1956 e sono prodotti in numerosi processi comuni nel cosmo e, grazie alle loro proprietà risultano essere le sonde ideali per studiare sorgenti astrofisiche. I neutrini, infatti, durante la loro propagazione dalla sorgente a noi, non sono influenzati da campi elettromagnetici e non interagiscono con la materia circostante.

Al fine di rilevarli sono stati costruiti dei telescopi di neutrini, grandi rivelatori situati in profondità sott'acqua o sotto il ghiaccio. Questa particolare posizione ha lo scopo di ridurre al minimo il background atmosferico costituito da neutrini e muoni di origine non astrofisica. Tra questi rivelatori c'è ANTARES, costruito nel Mar Mediterraneo a largo delle coste di Tolone (Francia) a 2475 m di profondità. È stato per più di un decennio il più grande telescopio sottomarino esistente, il cui obiettivo principale era l'osservazione di neutrini astrofisici ad alta energia.

In questo elaborato viene studiata la significatività di un determinato evento in base alla sua direzione di provenienza nella volta celeste. A tale fine sono stati analizzati dati raccolti dal telescopio sottomarino per neutrini ANTARES.

Indice

1	Astrofisica dei Neutrini	3
1.1	Neutrini	3
1.1.1	Cenni storici	3
1.1.2	Neutrini nel Modello Standard	4
1.2	Tipi di interazioni	4
1.3	Sorgenti	5
1.3.1	Atmosfera	5
1.3.2	Sole	5
1.3.3	Supernovae	6
1.3.4	Stelle di neutroni	7
2	Telescopio ANTARES	8
2.1	Struttura del telescopio	8
2.2	Interazioni dei neutrini	11
2.3	Effetto Čerenkov	12
2.4	Background	13
2.4.1	Background Atmosferico	14
2.4.2	Background ottico	14
3	Studio della mappa del cielo di ANTARES	17
3.1	Metodo della verosimiglianza	17
3.2	Analisi della mappa	18
3.3	Conclusioni	26

1 Astrofisica dei Neutrini

Le osservazioni del cielo sono state portate avanti per molto tempo da un'astronomia basata sulla rivelazione dell'emissione elettromagnetica da parte di sorgenti cosmiche. Le limitazioni dei telescopi ottici sulla Terra, dovute all'assorbimento e alla diffusione della radiazione, sono state superate mediante l'utilizzo di telescopi spaziali oppure costruendoli ad alte quote. Seppur questo progresso ha permesso di migliorare l'efficacia delle osservazioni ci sono dei limiti intrinseci dovuti all'uso della radiazione elettromagnetica. Ad esempio non è possibile osservare direttamente la composizione interna dei corpi celesti, né i nuclei delle galassie che risultano opachi ai fotoni. È dalla necessità di superare questi limiti che si intraprese lo studio di raggi cosmici e, nello specifico, della loro "componente neutra", ovvero i neutrini. Questi hanno permesso di ottenere informazioni complementari rispetto a quelle portate dai fotoni, offrendo così uno sguardo più ampio sul cosmo.

1.1 Neutrini

Particelle fondamentali alla base del modello standard, i neutrini sono tra le particelle più difficili da individuare dato che sono prive di carica elettrica e con massa quasi nulla.

1.1.1 Cenni storici

L'esistenza del neutrino fu postulata da Wolfgang Pauli nel 1930 per spiegare la mancata conservazione dell'energia nel decadimento beta. Tale processo, partendo da un nucleo composto da Z protoni e N neutroni restituisce quanto segue:

$$(Z, N) \longrightarrow (Z + 1, N - 1) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1)$$

ovvero un nucleo con $Z+1$ protoni e $N-1$ neutroni, un elettrone e un antineutrino elettronico.

Oggi tale processo è meglio noto come:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2)$$

ma al tempo non si conosceva la presenza dell'anti-neutrino elettronico. La mancanza di tale particella portava infatti al violare la conservazione dell'energia, da sempre ritenuto il caposaldo dell'intera fisica. Per risolvere questo problema Pauli propose l'idea dell'esistenza di una particella priva di carica elettrica, quindi difficilmente rivelabile, che sarebbe stata emessa insieme all'elettrone, in modo che la somma delle energie delle due particelle fosse costante e uguale all'energia iniziale. Fu Enrico Fermi a introdurre tale particella nel Modello Standard con il nome di *neutrino*

nella costruzione della teoria sull'interazione debole. Nel 1956 Frederick Reines e Clyde Cowan riuscirono a rilevare i neutrini da frammenti di fissione osservando un processo di decadimento beta inverso di protoni. [1]

1.1.2 Neutrini nel Modello Standard

Nel Modello Standard ogni particella fondamentale fermionica è accompagnata da una corrispettiva anti-particella. Queste interagiscono attraverso tre tipi di interazioni: forte, debole ed elettromagnetica. Tra i fermioni è possibile distinguere i quark, che risentono dell'interazione forte, e i leptoni, che invece non ne risentono. L'elettrone, il muone e il tauone, insieme ai loro neutrini (e corrispettive anti-particelle) fanno parte della famiglia di questi ultimi. Sono riconosciuti nel Modello Standard il neutrino elettronico ν_e , il neutrino muonico ν_μ e il neutrino tauonico ν_τ .

Il loro nome deriva dal fatto che sono particelle neutre con massa molto piccola (rispetto alle altre particelle è come se fosse nulla). Essere un leptone con carica elettrica nulla rende i neutrini capaci di interagire con la materia solo attraverso la forza debole. Ciò li rende quindi delle particelle sfuggenti e sono immuni alla maggior parte dei processi fisici. Queste caratteristiche li rendono perfetti per raccogliere dati sul cosmo: i neutrini infatti viaggiano in linea retta puntando alla loro sorgente senza essere assorbiti o deflessi dai campi magnetici durante la loro propagazione.

1.2 Tipi di interazioni

I neutrini interagiscono solo debolmente con la materia ma tali processi possono essere suddivisi in processi di produzione da leptoni, da adroni o sia con leptoni che con adroni. Un esempio di processo puramente leptonic è il decadimento del muone:

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3)$$

Una schematizzazione di tale processo è riportata in Figura 1.

Il processo di produzione adronica di neutrini più comune è il decadimento del pione positivo e negativo descritto da:

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (4)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (5)$$

dove vengono prodotti rispettivamente un neutrino muonico e un anti-neutrino muonico. Un processo misto può essere considerato la cattura dell'elettrone:

$$p + e^- \longrightarrow n + \nu_e \quad (6)$$

che produce un neutrino elettronico.

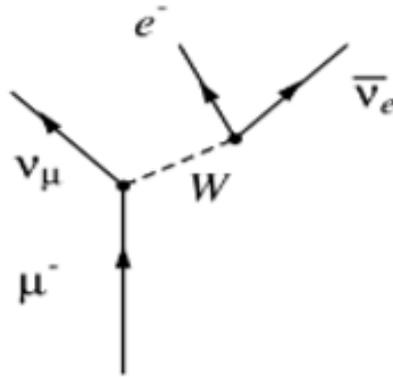


Figura 1: Diagramma di Feynman che schematizza il processo di decadimento del muone. In questo caso ipotizziamo che la freccia del tempo sia indirizzata dal basso verso l'alto. Da notare che in questo caso si producono due diversi tipi di neutrini: muonico e anti-elettronico. Figura presa da [1].

1.3 Sorgenti

Eventi di diverso tipo possono produrre l'energia che permette la "creazione" di nuove particelle. In base alla provenienza i neutrini possiedono energie diverse, e l'andamento del flusso in funzione dell'energia è visibile in Figura 2. I neutrini possiedono caratteristiche diverse in base alla provenienza.

1.3.1 Atmosfera

L'atmosfera terrestre è essa stessa sorgente di neutrini a causa delle interazione dei raggi cosmici di alta energia. Quando un raggio cosmico primario colpisce un nucleo in alta atmosfera può dare luogo ad uno sciame di particelle secondarie che via via decadono. La maggior parte di esse sono pioni, sia positivi che negativi, che più decadono come in Eq. (4) e (5). I muoni a loro volta decadono come in Eq. (3).

1.3.2 Sole

Il Sole, essendo la stella più vicina a noi, è un ottimo laboratorio di studio in quanto fornisce materiale per verificare le teorie di formazione ed evoluzione stellare. Il nucleo, ovvero dove avvengono le reazioni termonucleari, è molto più piccolo delle dimensioni solari. Le reazioni di fusione che vi avvengono sono sintetizzabili come:



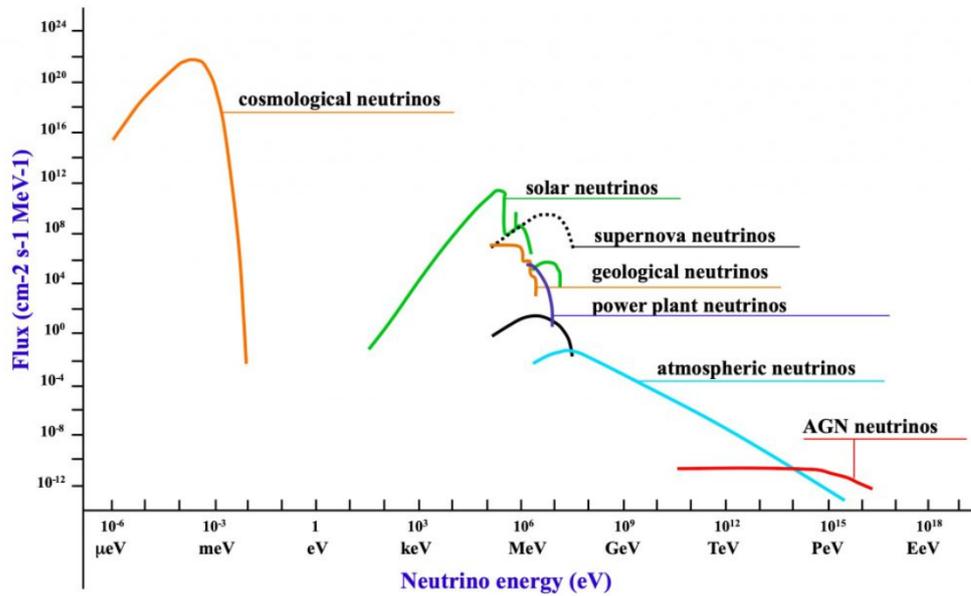


Figura 2: Spettro dei neutrini che raggiungono la superficie terrestre rilevati da IceCube. In orizzontale è presente l'energia mentre in verticale si ha il flusso di neutrini. Figura da [2].

ovvero 4 protoni si fondono per formare un nucleo di elio. Nel processo viene complessivamente emessa energia sotto forma di fotoni pari a $Q = 26.73$ MeV. Per ogni nucleo di elio formato, vengono emessi due positroni (che annichilano con due elettroni solari) e due neutrini elettronici, che invece fuggono immediatamente, a seguito della loro piccola probabilità d'interazione.

1.3.3 Supernovae

Una grande fonte di neutrini sono le supernovae, ovvero le esplosioni generate dalla morte di stelle molto massive. Gli astronomi stimano che dovrebbero avvenire al più tre esplosioni di supernova per secolo nella Via Lattea. Il fatto che l'occhio umano ne abbia viste molte meno è dovuto all'assorbimento della luce da parte del materiale interstellare. Questo fenomeno come già discusso non ferma i neutrini, la cui rivelazione dunque annuncerebbe la morte di una stella di grande massa nella Via Lattea. Infatti le misure di ogni forma di energia osservabile indicano una carenza di circa il 99% dell'energia a disposizione, dunque il 99% dell'energia rilasciata è emessa sottoforma di neutrini di energia di alcune decine di MeV.

1.3.4 Stelle di neutroni

L'evoluzione stellare fa sì che si formino elementi sempre più pesanti attraverso la fusione nucleare. Il processo continua con la fusione dell'elio in carbonio e ossigeno, e poi la fusione di elementi più pesanti come il carbonio e l'ossigeno in magnesio, neon, silicio e così via. Quando nel nucleo della stella si è formato il ferro, gli strati esterni continuano a "precipitare" verso il centro. A questo punto, il nucleo stellare compresso diventa così denso che i protoni nel ferro iniziano a catturare gli elettroni circostanti e si trasformano in neutroni come descritto in Eq.(6). Ciò porta una elevata produzione di neutrini. La materia in queste situazioni estreme inizia la formazione di quella che diventerà una stella di neutroni, formata da materiale degenere.

2 Telescopio ANTARES

ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss enviromental RE-Search) è stato il primo telescopio per neutrini costruito in mare, a circa 40 km a largo delle coste di Tolone, in Francia, ad una profondità di 2475 m nel Mar Mediterraneo. La sua posizione nell'emisfero nord permette di captare neutrini provenienti dal centro della Via Lattea.

Come è stato anticipato nel primo capitolo, i neutrini sono particelle estremamente elusive, che interagiscono solo tramite interazione debole. La loro rilevazione non è diretta, ma si basa sull'individuazione dei fotoni Čerenkov originati dalle particelle cariche prodotte dall'interazione dei neutrini con la materia circostante e interna al rivelatore. Tutto ciò richiede rivelatori di grandi dimensioni e molto massivi; perciò per ottimizzare la probabilità di rivelarli, si è sfruttata le grandi quantità di materiale trasparente del Mar Mediterraneo.

2.1 Struttura del telescopio

Il telescopio è costituito da una matrice di fotomoltiplicatori (PMTs), posizionate su 12 linee flessibili di 450 m di lunghezza, ancorate in configurazione ottagonale al fondo marino e mantenute in posizione verticale da boe. Ogni linea, detta stringa, ha 25 unità di rilevazione distanti 14.5 metri tra loro, come mostrato in Figura 3, ognuna delle quali contiene tre moduli ottici (OM) e un modulo di controllo per l'elettronica. La prima unità di rilevazione è a circa 100 m di altezza dal fondo sottomarino [4].

Il numero totale di OMs installati è di 885. L'OM costituisce l'unità di base del telescopio ed è schematizzato in Figura 4: esso consiste in un tubo fotomoltiplicatore, con vari sensori e l'elettronica associata, contenuti in una sfera di vetro di diametro 43 cm e resistente alla pressione, che arriva fino a 250 atm alla profondità massima. I PMTs sono schermati dal campo magnetico terrestre da una gabbia di metallo. Poichè le correnti marine possono spostare le boe, e quindi i PMTs, fino a 15 metri, diversi sensori per le procedure di calibrazione temporale e spaziale sono posizionati su ogni stringa e su una linea dedicata alla calibrazione.

Per minimizzare la forte componente di background atmosferico, che verrà descritto nella sezione 2.4.1, ANTARES è ottimizzato nella detection degli eventi *up-going* e si cerca di minimizzare il rumore prodotto dai neutrini e muoni atmosferici *downgoing*.

Queste ultime sono proprio quelle particelle generate all'interno dell'atmosfera sopra il rivelatore. Gli ampi strati di acqua marina, posta sopra al detector, servono a ridurre il flusso permettendo di arrivare, in linea di principio, ad avere un fondo costituito solo da quei pochi neutrini atmosferici che provengono anch'essi dal basso.

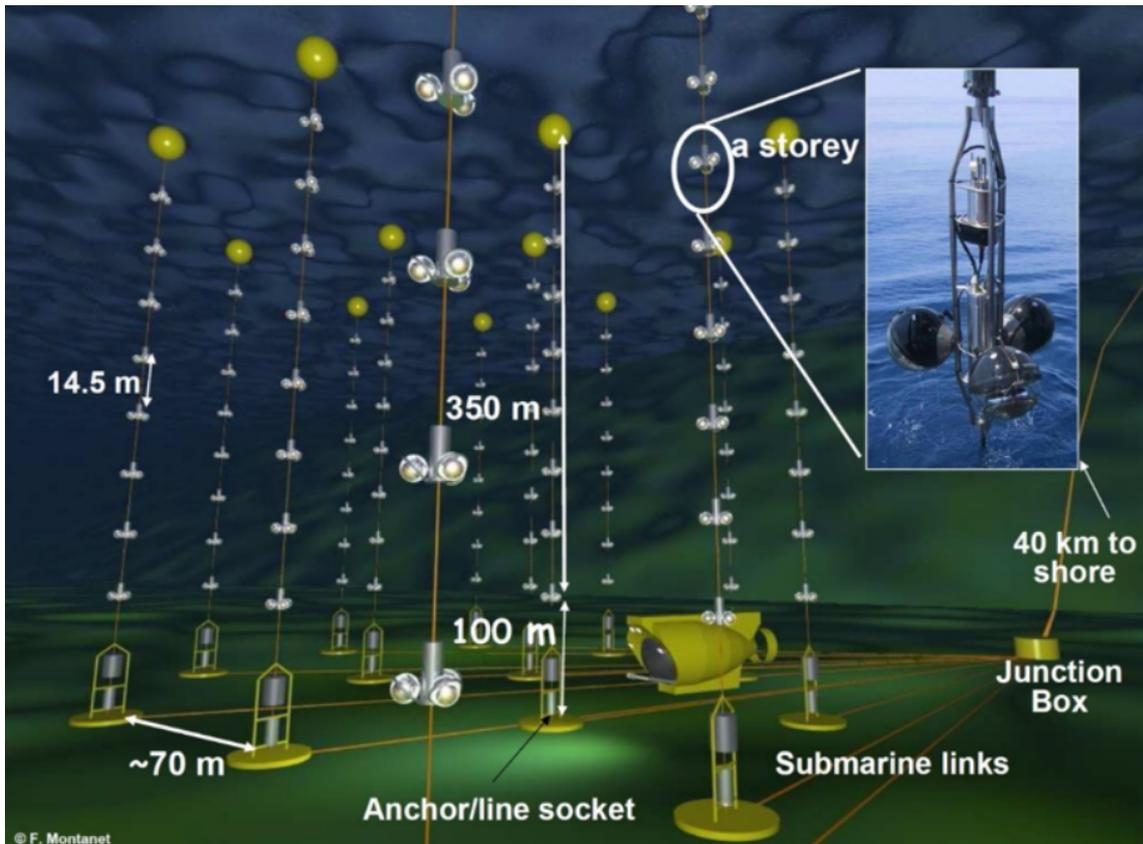


Figura 3: Schematizzazione del telescopio ANTARES ottenuta da [3].

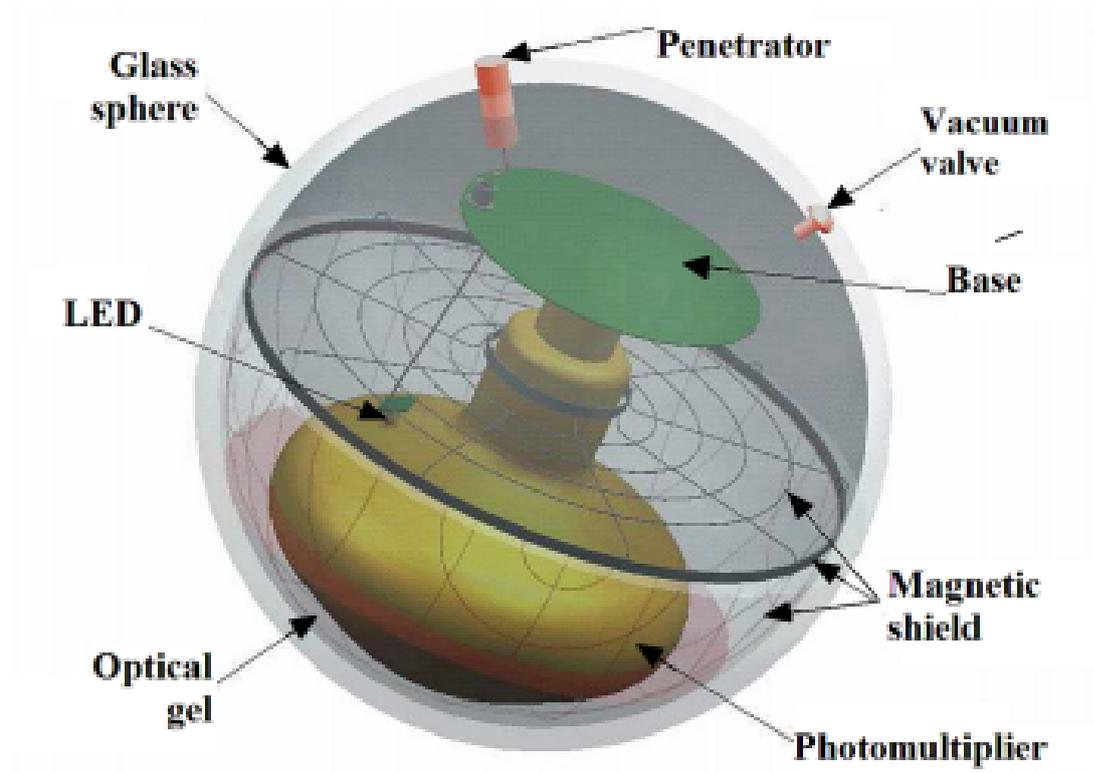


Figura 4: Rappresentazione schematica di un optical module di ANTARES. Figura da [4].

2.2 Interazioni dei neutrini

Un neutrino di un dato sapore ν_i interagisce con un nucleo N tramite due processi:

- processi a corrente carica (CC) mediati da un bosone W e descritti da:

$$\nu_l + N \longrightarrow l + X \quad (8)$$

- processi a corrente neutra (NC) mediati da un bosone Z_0 come descritto da:

$$\nu_l + N \longrightarrow \nu_l + X \quad (9)$$

Le interazioni di tipo CC sono più probabili di quelle CN. La lunghezza del cammino delle particelle cariche prodotte nell'interazione dipende dalla loro energia e dall'energia che perdono percorrendo il mezzo. Una schematizzazione delle interazioni appena descritte è riportata in Figura 5.

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

- Eventi di tipo **traccia**: eventi indotti da interazioni a corrente carica di ν_μ con il mezzo dentro o intorno il rivelatore. Quando hanno energie superiori ad 1 TeV, il libero cammino medio dei muoni generati dall'interazione è tale da consentire anche a muoni prodotti ad alcuni chilometri di distanza di attraversare tutto il rivelatore. L'angolo medio tra la direzione del neutrino e la direzione del muone è:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0,6^\circ}{\sqrt{E_\nu \text{TeV}}} \quad (10)$$

La buona risoluzione angolare con cui è possibile ricostruire la traiettoria dei muoni indotti da interazioni a corrente carica dei ν_μ li rende il canale di rilevazione principale dei telescopi di neutrini con l'obiettivo di studiare sorgenti astrofisiche puntiformi.

- Eventi di tipo **cascata**: eventi indotti dalle interazioni a corrente neutra di tutti e tre i tipi di neutrini e dalle interazioni a corrente carica dei ν_e e dei ν_τ . Per questi eventi l'emissione dei fotoni Čerenkov è approssimabile da una simmetria sferica. Le interazioni a corrente carica dei ν_e provocano una cascata elettromagnetica e una adronica, mentre le interazioni a corrente neutra dei neutrini di tutti i sapori provocano solo una cascata adronica.

La migliore risoluzione angolare è data dalle interazioni CC di ν_μ . In un processo a CC, in cui è coinvolto un ν_μ , si origina un muone la cui traccia, nell'acqua del mare, riesce a propagarsi anche per diversi km, al contrario della cascata adronica che si arresta in qualche decina di metri.

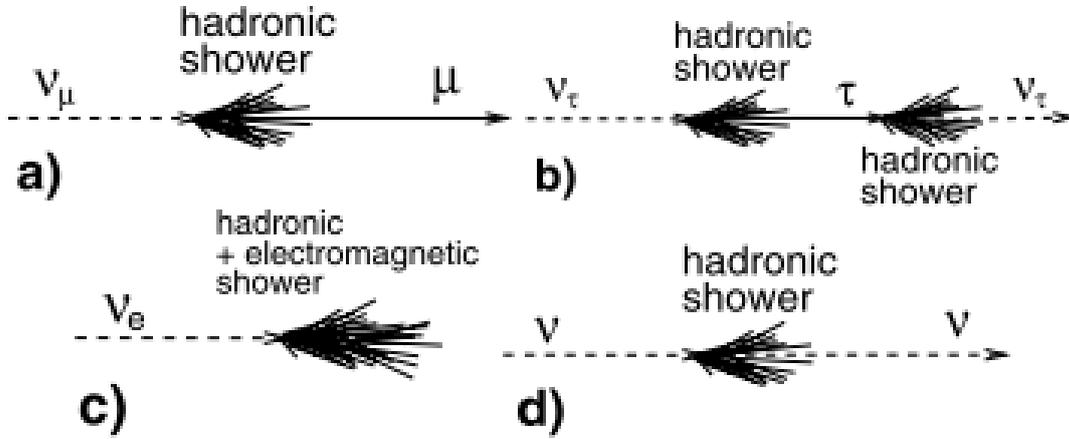


Figura 5: Interazioni di neutrini di diverso sapore: le prime tre riguardano processi a CC. L'ultimo mostra un tipico processo a corrente neutra (NC) [5].

2.3 Effetto Čerenkov

L'effetto Čerenkov consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un materiale le cui molecole sono polarizzate da una particella carica in moto che lo attraversa. L'effetto Čerenkov si manifesta solo quando la velocità della particella nel mezzo attraversato risulta superiore alla velocità di fase della luce nello stesso mezzo. solo in questa situazione si genera momento di dipolo.

Più in generale si parla di radiazione Čerenkov, quando il mezzo attraversato non è "trasparente" alla luce visibile.

Quando gli elettroni delle molecole polarizzate precedentemente ritornano alla posizione di equilibrio, essi emettono una radiazione coerente con simmetria conica in una direzione che forma un angolo caratteristico θ (detto angolo di Čerenkov) rispetto alla direzione della particella. Una rappresentazione del fenomeno appena descritto è riportata in Figura 6.

L'angolo di Čerenkov può essere calcolato mediante la seguente relazione:

$$\cos \phi = \frac{1}{n\beta} \quad (11)$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo, e β il rapporto tra la velocità della particella e la velocità della luce.

Si può subito notare che l'angolo massimo si ha quando la particella si muove all'incirca alla velocità c . In tal caso, la relazione diventa:

$$\cos \phi_{max} = \frac{1}{n} \quad (12)$$

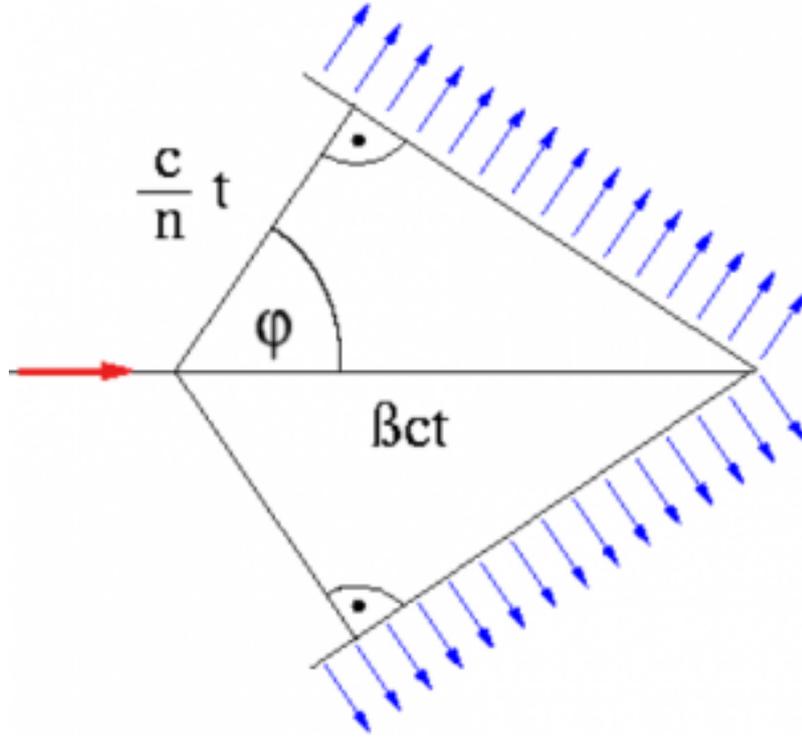


Figura 6: Rappresentazione dell'Effetto Čerenkov prodotto da una particella. Figura ottenuta da [6]

Per l'acqua marina, dove $n = 1.364$ e per particelle relativistiche ($\beta \sim 1$), l'angolo Čerenkov corrisponde a $\sim 43^\circ$.

Il numero di fotoni emessi per unità di lunghezza d'onda λ e di cammino percorso da una particella relativistica x è dato da:

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi}{137\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right) \quad (13)$$

2.4 Background

Tra i dati collezionati dal detector bisogna distinguere quelli provenienti da sorgenti astrofisiche da quelli di rumore che "sporca" le acquisizioni di dati. Ci sono vari fattori che generano rumori di background e di seguito parleremo brevemente dei principali.

2.4.1 Background Atmosferico

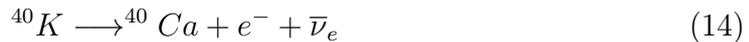
L'interazione dei raggi cosmici con gli strati più esterni dell'atmosfera produce uno sciame di particelle secondarie tra cui i neutrini atmosferici e i muoni atmosferici che creano il principale rumore di fondo. È di fondamentale importanza per la ricerca astrofisica la distinzione degli eventi di interesse dal fondo atmosferico dato che quest'ultimo non fornisce alcuna informazione utile.

Sulla superficie terrestre il flusso dei muoni atmosferici è circa 10^{11} volte maggiore del flusso di muoni indotti da neutrini atmosferici. Per questo il telescopio è stato collocato in profondità con i rivelatori puntati verso il basso per schermare al meglio i muoni atmosferici. Anche a questa profondità il flusso di muoni atmosferici è ancora 6 ordini di grandezza maggiore del flusso di muoni prodotti da neutrini atmosferici. Gli eventi provenienti da sopra il rivelatore, denominati downgoing, sono notevolmente contaminati dai muoni atmosferici, mentre gli eventi provenienti dal basso, chiamati upgoing, sono considerati di grande rilevanza perché non possono essere atmosferici. Per questo selezionare solo eventi upgoing aiuta a ridurre il background. La Figura 7 mostra il flusso di muoni atmosferici e il flusso di muoni prodotti nelle interazioni CC di ν_μ in funzione del coseno dell'angolo di zenith.

2.4.2 Background ottico

Aver costruito ANTARES in profondità non porta solo vantaggi nella schermatura.

Questa scelta comporta un costante rumore non riducibile dovuto al decadimento radioattivo del ^{40}K , un isotopo disciolto nell'acqua di mare. I decadimenti a cui è soggetto sono i seguenti:



La maggior parte degli elettroni prodotti nella prima relazione possono raggiungere un'energia massima di 1.33 MeV, sufficiente a indurre luce Čerenkov; il fotone prodotto nella seconda relazione possiede un'energia di 1.46 MeV e, tramite lo scattering di Compton, può generare elettroni in grado di indurre luce di Čerenkov.

L'intensità globale derivante dal decadimento del ^{40}K dipende dalla sua concentrazione, che nel Mar Mediterraneo è indipendente dal luogo in cui ci si trova.

Un altro fondo ottico è quello dovuto alla bioluminescenza di batteri, più o meno costante e con picchi di pochi secondi dovuti alla bioluminescenza di macroorganismi. Questi ultimi segnali, a differenza di quelli prodotti dal ^{40}K seguono variazioni stagionali o annuali, sono più intensi del decadimento ma diminuiscono 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

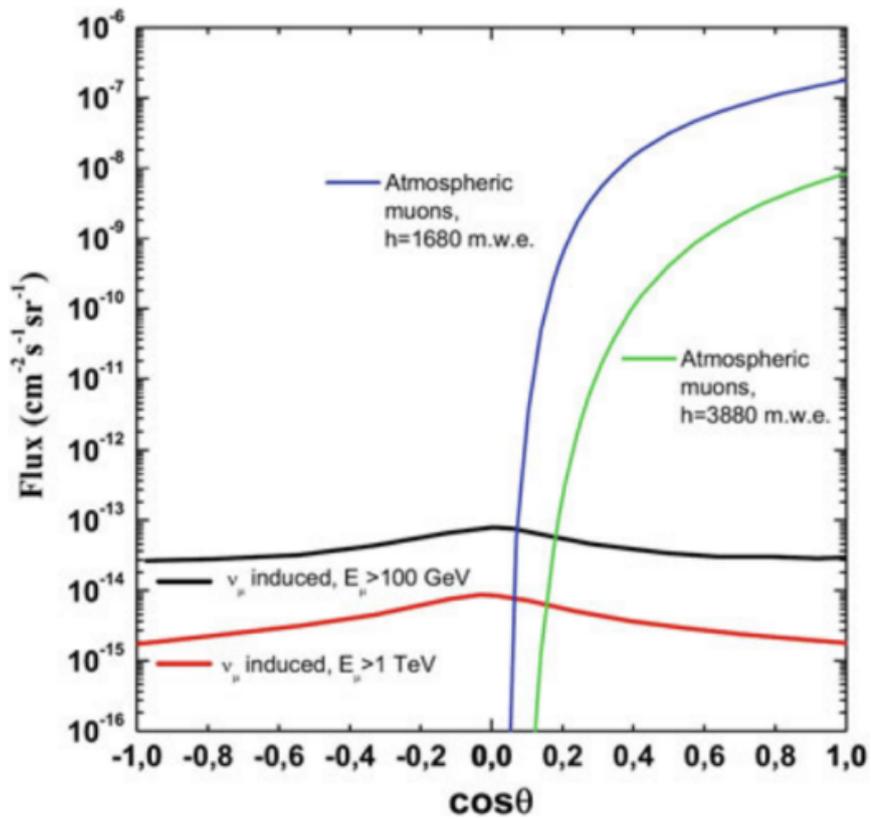


Figura 7: Flusso in funzione del coseno dell'angolo zenith per i muoni atmosferici e muoni indotti da interazioni CC di ν_μ . Figura presa da [7].

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

$$\theta_{ms} = \frac{13.6MeV}{E_\mu} \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left(1 + 0.0038 \ln \frac{x}{x_0}\right) \quad (16)$$

dove x è la distanza percorsa e x_0 è la lunghezza di radiazione del mezzo (37 cm per l'acqua). Ma, a distanze ed energie d'interesse per il telescopio si ha che $\theta_{ms} \ll \theta_\mu$ e quindi si può considerare $\theta_{ms} \simeq 0$. La direzione del μ può pertanto essere misurata in acqua con una precisione fino a $\sim 0.2^\circ$. Nel caso di ANTARES non si è riusciti ad arrivare a questa precisione, si è raggiunto un valore dell'ordine di 0.5° .

3 Studio della mappa del cielo di ANTARES

La sfida nell'astronomia dei neutrini ad alta energia è l'identificazione degli eccessi di eventi provenienti da singoli oggetti astrofisici al di sopra delle fluttuazioni casuali di fondo. Per individuare questi gruppi di eventi di segnale viene applicato un metodo di massima verosimiglianza (likelihood). La verosimiglianza descrive i dati in termini di funzioni densità di probabilità e si avvale di caratteristiche distintive che aiutano a separare il segnale dal fondo. Il metodo della likelihood viene usato per produrre una mappa del cielo in cui, ad ogni punto, si associa la probabilità che gli eventi da quella direzione siano di origine astrofisica. Lo studio di tale mappa è l'obiettivo di questa tesi. A tale scopo, si è fatto uso del framework ROOT (versione 6.22)¹.

3.1 Metodo della verosimiglianza

I dati raccolti dal telescopio di neutrini consistono in un set di eventi distribuiti nella volta celeste. Ci sono due possibilità per ogni zona di cielo:

- gli eventi in tale zona sono di fondo (ipotesi H_0),
- parte degli eventi in tale zona proviene da una sorgente astrofisica (ipotesi H_S).

Il metodo di massima verosimiglianza permette di discriminare tra le due ipotesi.

Dato un insieme di eventi osservati, il metodo della massima verosimiglianza consente di stimare il valore di un insieme di parametri del modello trovando quei parametri che massimizzano la probabilità di ottenere i dati osservati. Innanzitutto, è necessario definire la funzione di verosimiglianza. Se $x = \{x_1 \cdots x_N\}$ è l'insieme di N osservazioni indipendenti, $\theta = \{\theta_1 \cdots \theta_m\}$ l'insieme di m parametri sconosciuti, e $p(x; \theta)$ la densità di probabilità (PDF) per x , allora la probabilità di osservare x è data dal prodotto delle PDF su tutti gli eventi osservati:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^N p(x_i; \theta). \quad (17)$$

In particolare, la likelihood utilizzata in ANTARES è definita come:

$$\log L = \sum_{i=1}^N \log \left[\frac{n_s}{N} S_i + \left(1 - \frac{n_s}{N}\right) B_i \right]. \quad (18)$$

In questa equazione, n_s , il numero di eventi di segnale rilevati (intensità del segnale), è il parametro libero rispetto al quale la likelihood viene massimizzata, mentre S_i e B_i rappresentano rispettivamente le PDF del segnale e del fondo.

¹<https://root.cern/>

Il rapporto tra la likelihood di solo fondo, ottenuta ponendo $n_s = 0$, e quella massimizzata, fornisce il test statistico, TS. Valori più elevati di TS indicano dati meno compatibili con l'essere prodotti dal puro fondo.

Con il fine di calcolare con quale probabilità un insieme di eventi proviene da una sorgente astrofisica (significatività), si effettua un gran numero di cosiddetti pseudo-esperimenti, nei quali il metodo della verosimiglianza viene applicato su un set di pseudo-dati simulati. Tali dati sono randomizzati in ascensione retta per eliminare possibili clustering nello spazio e nel tempo dovuti a eventuali sorgenti. Questo metodo permette di ottenere distribuzioni di TS per l'ipotesi di solo fondo, $D(TS|n_s = 0)$.

Per testare la presenza di sorgenti di neutrini cosmici, il metodo likelihood è applicato su dati reali per ogni direzione sulla sfera celeste. Si calcola dunque il test statistico per quella direzione. Se un TS osservato è abbastanza grande da indicare una scoperta significativa dipende da quanto è probabile che il fondo da solo produca un valore uguale o maggiore di TS. Questo viene stimato confrontando il TS osservato, TS_{obs} , con la distribuzione di TS ottenuta in pseudo-esperimenti di solo fondo in cui viene testata la direzione data.

La significatività è data dal p-value calcolato come:

$$\text{p-value} = \int_{TS_{obs}}^{\infty} D(TS|n_s = 0)dTS. \quad (19)$$

Valori di p-value più bassi indicano minori possibilità che il fondo puro abbia prodotto il TS osservato. I valori del TS ottenuti in ogni punto del cielo vengono così tradotti in p-value. Una visualizzazione del variare del p-value nella volta celeste è presentato nella Figura 8. Tali valori sono stati ottenuti dalla Collaborazione ANTARES applicando il metodo della verosimiglianza su un set di pseudo-dati. Il primo compito del mio lavoro di tesi è consistito nel modificare uno script healpy (pacchetto Python per gestire dati pixelati sulla sfera)² esistente per ottenere la mappa celeste di tali p-value (Figura 8).

3.2 Analisi della mappa

Lo scatter plot di $-\log(\text{p-value})$ e TS ottenuto in 1000 pseudo-esperimenti è riportato in Figura 9. Si nota che la correlazione dei due valori è di tipo lineare. Come ci si aspettava, valori di TS più alti sono associati a valori più bassi del p-value e di conseguenza a valori più alti di significatività. Si notano tuttavia due distinte distribuzioni.

Come primo passo si è scelto di testare se tale distinzione fosse dipendente dalla declinazione (coordinata equatoriale). Tale scelta è giustificata dal fatto che la

²<https://healpy.readthedocs.io/en/latest/#>

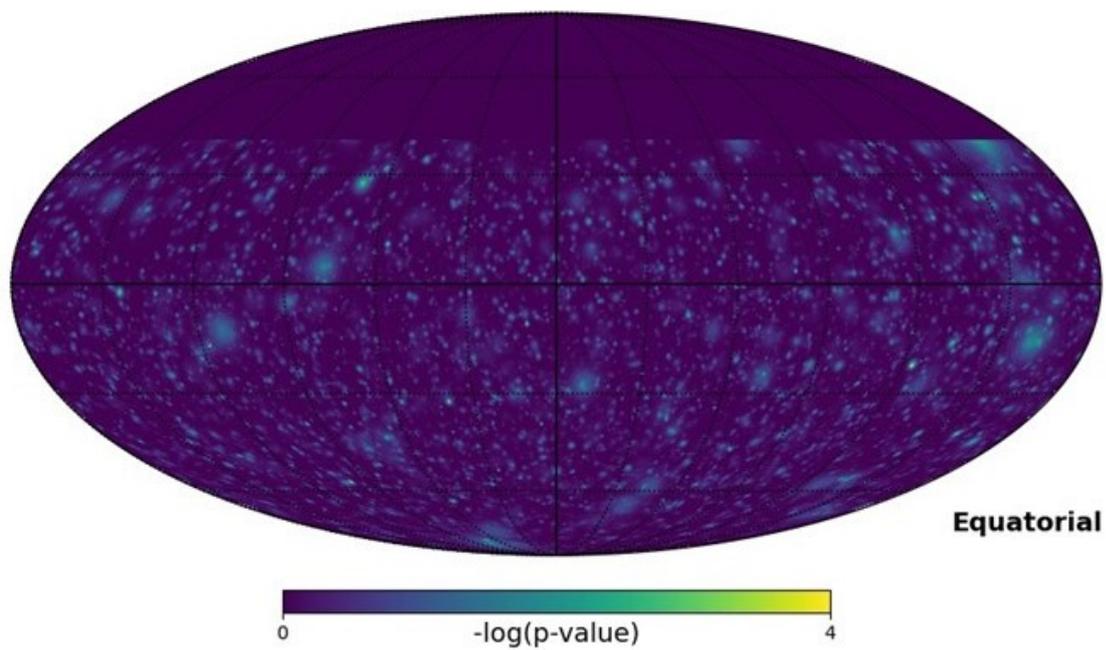


Figura 8: Mappa del cielo in coordinate equatoriali risultante dall'analisi della verosimiglianza applicata su eventi simulati. Per ogni pixel analizzato viene riportato il p-value. I valori sono assenti oltre 50 gradi di declinazione per le ragioni già spiegate nella sezione 2.4.

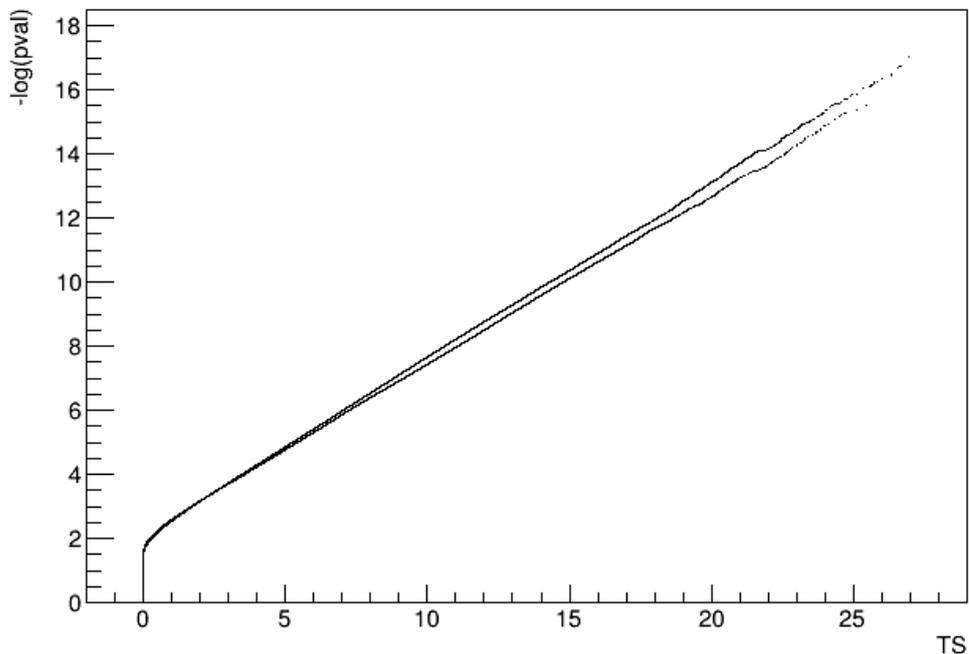


Figura 9: Grafico che mostra la relazione tra $-\log(\text{p-value})$ e TS.

quantità di fondo atmosferico varia in base alla declinazione. Lo stesso scatter plot di Figura 9 è stato rappresentato in Figura 10 ma usando colori diversi per diversi intervalli di declinazione: rosso per declinazioni positive, nero per quelle negative. Il risultato è una buona separazione dei due casi.

Viene perciò indagato se tale separazione è visibile anche per altre osservabili. Si è deciso di controllare il numero degli eventi di segnale (n_s) in funzione del test statistico. Dalle Figura 11 e 12 non emerge chiaramente un comportamento analogo a quello del p-value. Si nota però una tendenza ad associare TS più alti a parità di numero di eventi di segnale nell'emisfero nord (declinazioni positive).

I grafici riportati nella Figura 13 e nella Figura 14 mostrano che al cambio del segno della declinazione è presente una lieve differenza sulle occorrenze registrate. In particolare a declinazioni positive si tende a registrare più spesso un numero di eventi nullo, a discapito di n_s maggiori. Ciò è dovuto al fatto che, con le selezioni applicate dalla Collaborazione ANTARES, l'emisfero sud del cielo (declinazioni negative) è più popolato. È quindi più probabile che in questa regione di cielo gli eventi di fondo vengano scambiati per eventi di segnale. Questo è un bias che il metodo del p-value permette di correggere. Come mostra la Figura 14, la differenza nelle distribuzioni di significatività tra emisfero nord e sud è visibilmente inferiore rispetto a quella che si nota nella distribuzione di n_s .

L'analisi in seguito si è concentrata sulla separazione in Figura 10. La Figura 15

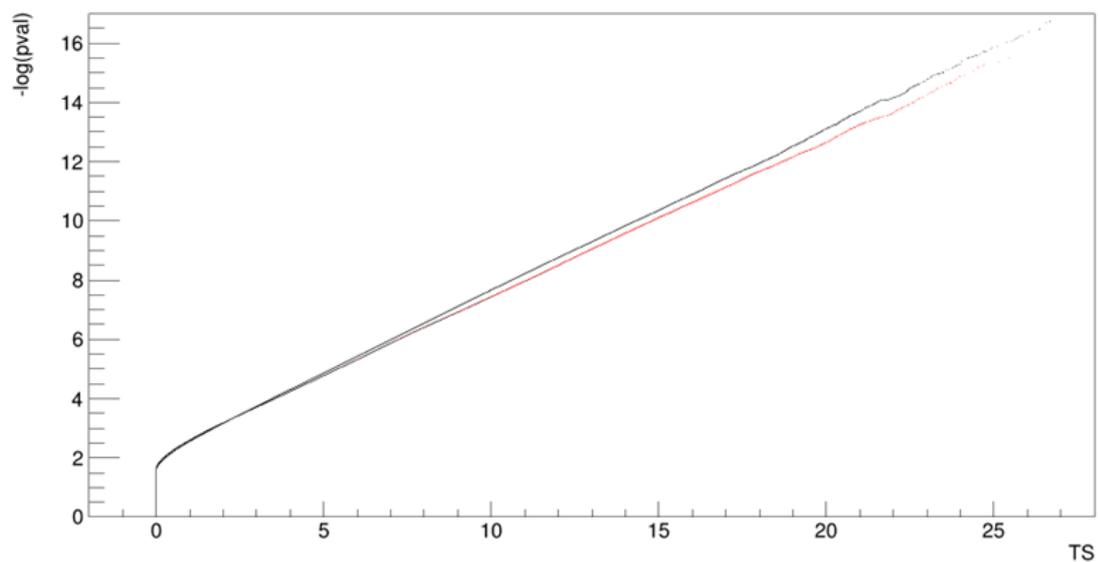


Figura 10: Relazione tra $-\log(\text{p-value})$ e TS con distinzione delle declinazioni. In rosso sono riportate le occorrenze per declinazioni positive e in nero quelle negative.

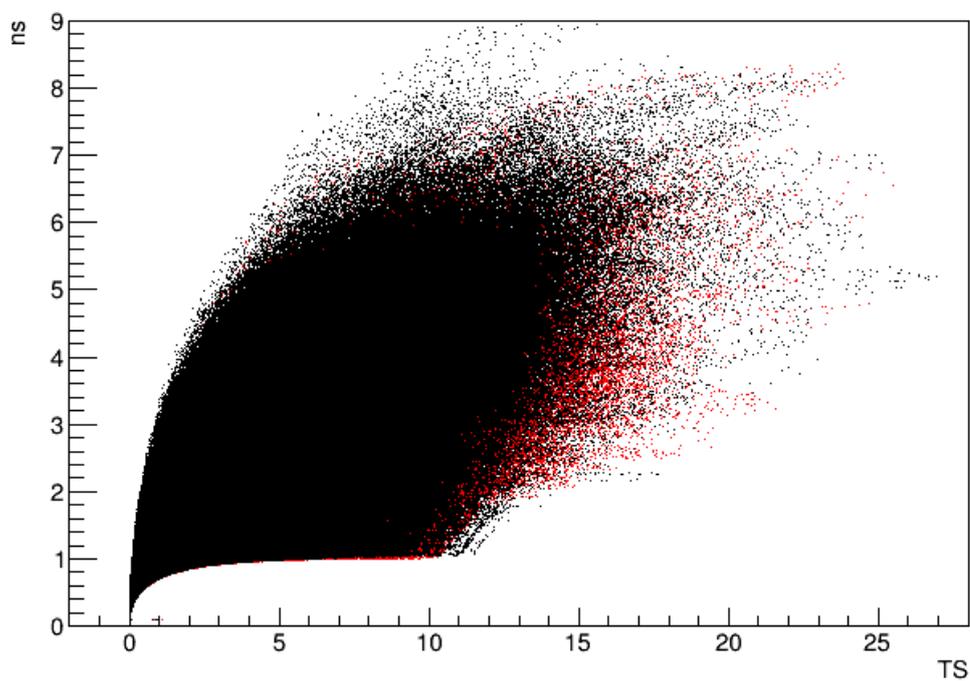


Figura 11: Relazione tra il numero degli eventi di segnale e TS con distinzione delle declinazioni. In rosso sono riportate le occorrenze per declinazioni positive e in nero quelle negative.

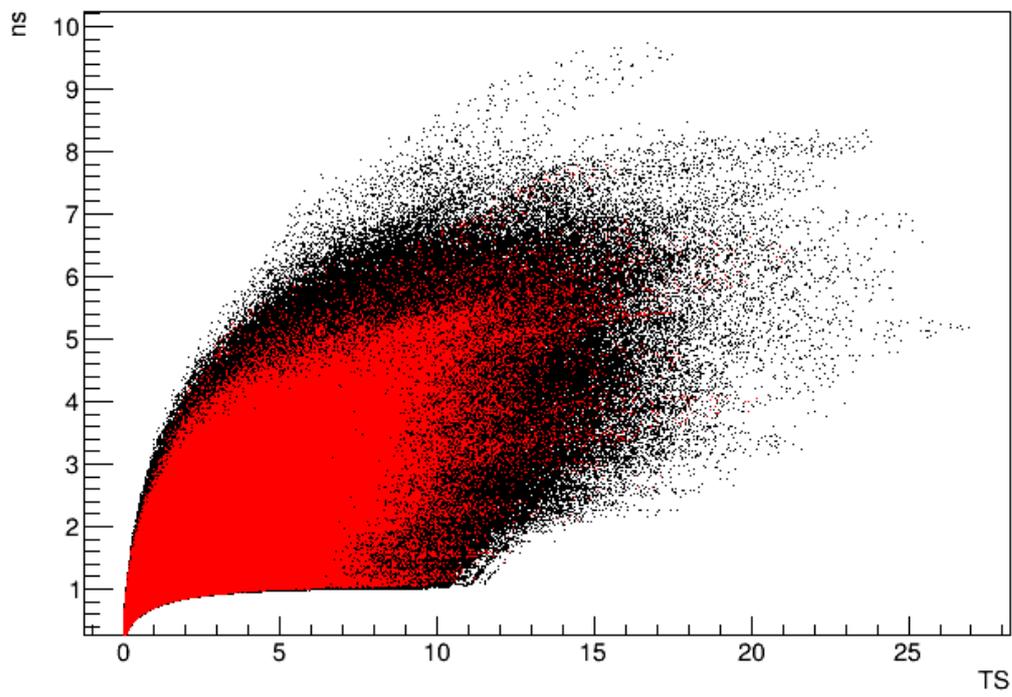


Figura 12: Relazione tra il numero degli eventi di segnale e TS con distinzione delle declinazioni. In rosso sono riportate le occorrenze per declinazioni positive e in nero quelle negative.

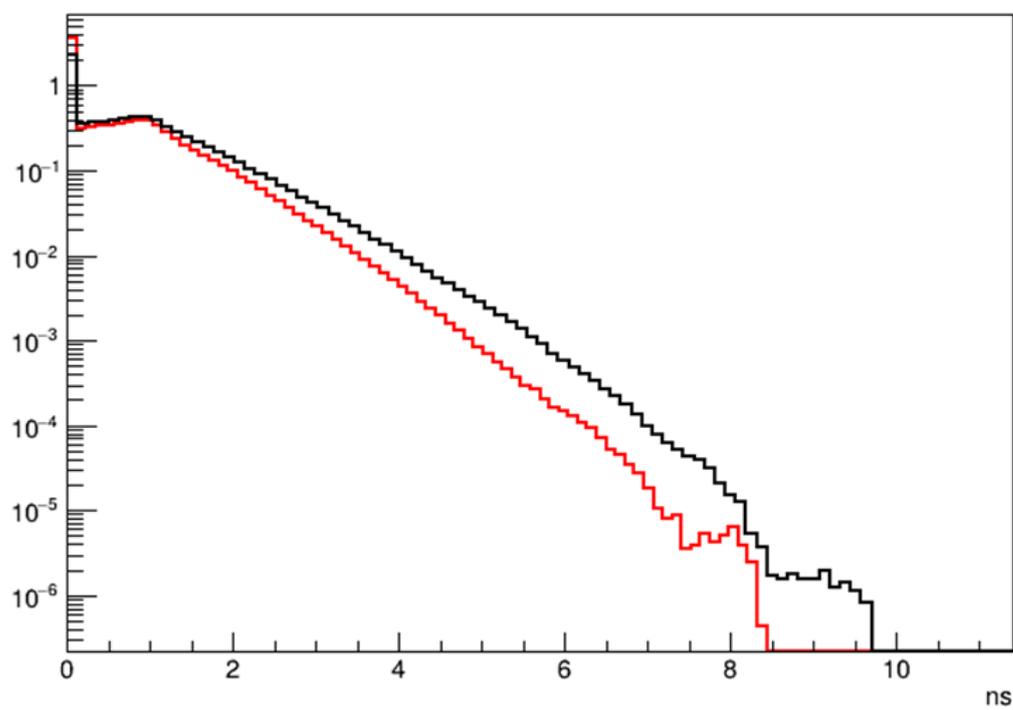


Figura 13: Distribuzione del numero degli eventi di segnale normalizzata con distinzione delle declinazioni. In rosso sono riportate le occorrenze per declinazioni positive e in nero quelle negative.

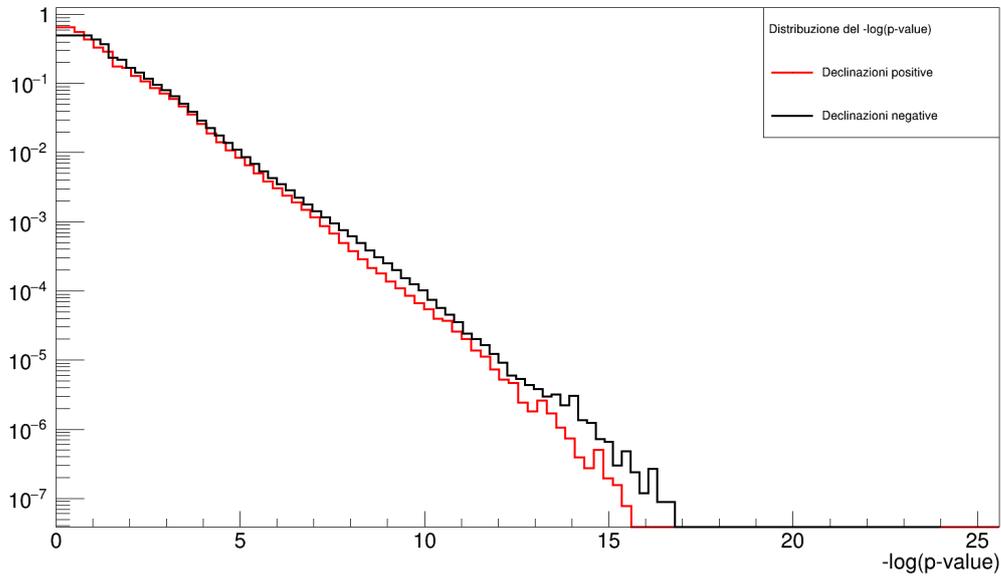


Figura 14: Distribuzione del $-\log(\text{p-value})$ con distinzione delle declinazioni. In rosso sono riportate le occorrenze per declinazioni positive e in nero quelle negative.

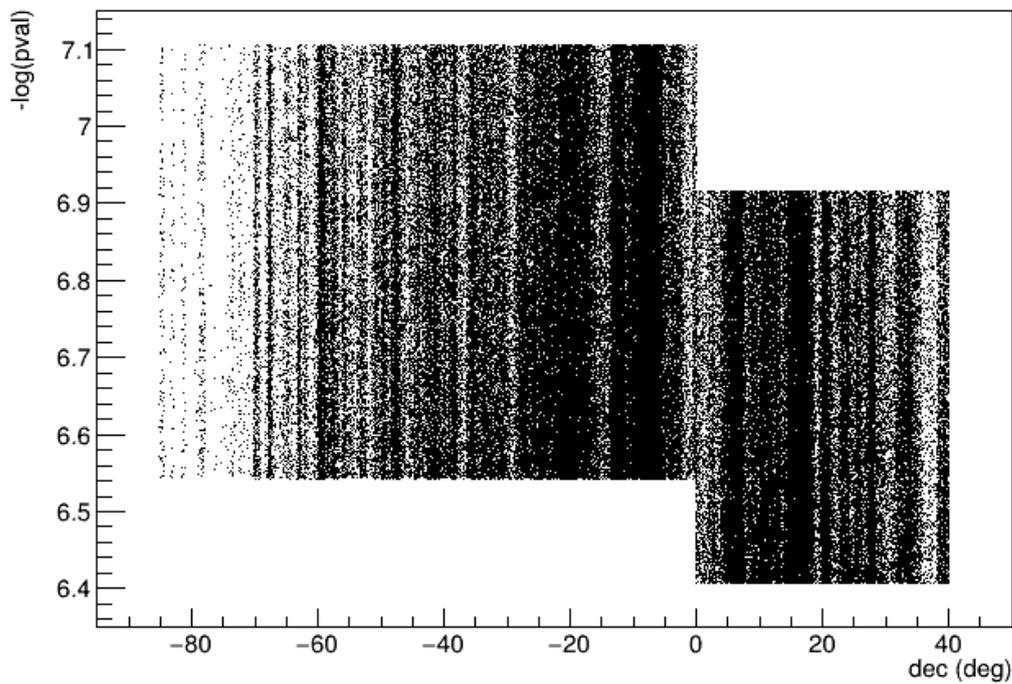


Figura 15: Scatter plot del p-value e declinazione. Le occorrenze sono state selezionate per valori di TS compresi tra 8 e 9.

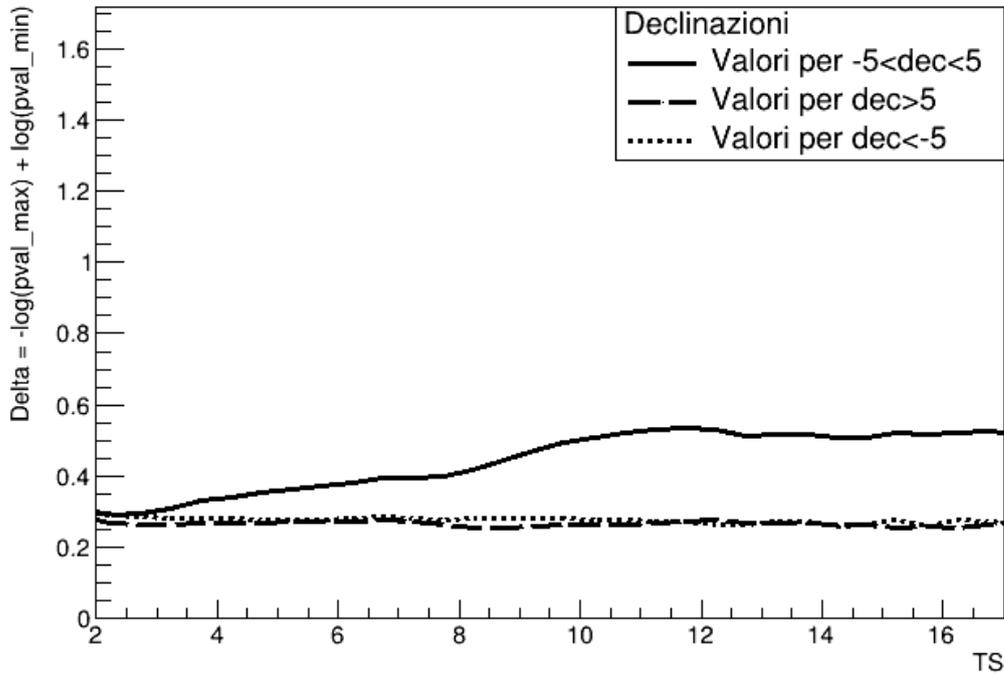


Figura 16: Relazione del delta del $-\log(\text{p-value})$ con il TS. Le occorrenze sono state separate per declinazioni vicino allo 0 (linea continua) e lontano da 0 (linee tratteggiate).

mostra lo scatter plot di p-value e declinazione per un dato valore del TS. Si nota un'evidente differenza nei valori massimo e minimo che il p-value assume quando si passa da declinazioni negative a positive. Ciò comporta il fatto che per uno stesso TS il dato ha maggiore probabilità di essere fondo se ha una declinazione positiva rispetto ad una negativa. Tale effetto è voluto per i motivi appena spiegati.

Con lo scopo di quantificare la differenza di salto tra p-value minimo e massimo associato a uno stesso TS per diversi intervalli di declinazione, è stata ottenuta la Figura 16. Nel grafico si può notare che all'aumentare di TS il delta tra valore massimo e minimo non cambia per declinazioni lontane da 0, mentre cresce se i valori sono vicino al valore $\text{dec}=0$. Ciò indica che pixel vicini allo 0 in declinazione caratterizzati da uno stesso valore di TS possono essere associati a p-value anche molto diversi tra loro. Sarebbe invece auspicabile che, nel passaggio da declinazioni positive e negative, la differenza tra p-value associati a uno stesso TS avvenisse in modo più armonioso.

3.3 Conclusioni

Dall'analisi della mappa celeste prodotta da ANTARES è stata rilevata la presenza di caratteristiche diverse su dati provenienti da emisferi diversi. In particolare per un dato test statistico il range dei valori del p-value associati è diverso, per la precisione si associano valori più alti nell'emisfero nord, il che comporta una più alta possibilità che il fondo abbia prodotto il TS ottenuto nelle declinazioni positive. A conferma di ciò a declinazioni negative si tende a registrare un maggiore numero di eventi di segnale rispetto a declinazioni positive. Questo fenomeno è spiegato dalle selezioni effettuate dalla Collaborazione ANTARES, che portano a una maggiore densità di eventi nell'emisfero sud del cielo. Di conseguenza, è più probabile che in questa regione ci siano scambi erronei tra eventi di fondo e eventi di segnale. Questo bias viene corretto convertendo il test statistico in p-value. Il fatto di aver due distribuzioni del p-value distinte separate allo 0 in declinazione induce salti nel valore del p-value in punti prossimi ad esso.

Si conclude che sarebbe preferibile che, durante il passaggio tra declinazioni positive e negative, la differenza nei valori di p-value associati allo stesso TS avvenisse in modo più uniforme ed equilibrato.

Riferimenti bibliografici

- [1] Ithaca: Viaggio nella Scienza Numero, VI Anno, 2015, Dipartimento di Matematica e Fisica “Ennio De Giorgi” dell’Università del Salento
- [2] Introduction to Neutrino Sources. <https://neutrino-history.in2p3.fr/introduction-to-neutrino-sources/>.
- [3] Chiarusi, T., Spurio, M. High-energy astrophysics with neutrino telescopes. *Eur. Phys. J. C* 65, 649–701 (2010). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-009-1230-9>
- [4] Ageron, M. e altri. ANTARES: the first undersea neutrino telescope. *Nucl.Instrum.Meth.A*, 2011
- [5] B. Hartmann. Reconstruction of neutrino-induced hadronic and electromagnetic showers with the ANTARES experiment, PhD thesis, University of Erlangen-Nurnberg, 2006;
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation
- [7] Maurizio Spurio. *Particles and astrophysics*. Springer, 2014.