

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

**Caratterizzazione di neutrini atmosferici e
muoni atmosferici con il telescopio
ANTARES.**

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Ludovica De Gianni

Correlatore:
Dott.ssa Giulia Illuminati

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

Lo studio dei raggi cosmici è fondamentale per la conoscenza della fisica delle particelle e dell'astrofisica. I neutrini sono dei perfetti messaggeri astrofisici, poichè danno precise informazioni sulla posizione dei siti astrofisici di accelerazione dei raggi cosmici: essi infatti, a differenza delle altre particelle, non sono deviati dal campo magnetico galattico ed extra-galattico nè assorbiti dalla presenza di materiale, grazie alla loro neutralità di carica e alla loro scarsa tendenza a interagire.

Per la rivelazione dei neutrini sono stati costruiti telescopi in diverse zone del Mondo, tra cui: IceCube, sotto i ghiacci del Polo Sud, ANTARES e KM3NeT, nel Mar Mediterraneo. Tra questi, i primi due sono attivi in configurazione completa da più di un decennio, l'ultimo invece è in costruzione e sta prendendo dati in configurazione parziale. Questa tesi si concentra sul funzionamento del telescopio ANTARES, situato sul fondo sottomarino, al largo di Tolone (Francia), che ha come obiettivo la rivelazione di neutrini cosmici.

Le principali fonti di fondo per il telescopio sono rappresentate dai neutrini atmosferici e dai muoni atmosferici; è di fondamentale importanza per la ricerca astrofisica la distinzione dei neutrini cosmici dal fondo atmosferico.

E' inoltre necessario separare nella componente atmosferica i neutrini dai muoni, operazione che si effettua applicando dei criteri di selezione. Tra i criteri, il principale si basa sul fatto che le traiettorie dei muoni non possono essere dirette dal basso verso l'alto, mentre quelle dei secondari indotti dalle interazioni dei neutrini sì: questi ultimi, infatti, a differenza dei primi, grazie alla loro scarsa tendenza ad interagire, riescono ad attraversare tutto il diametro terrestre.

Il criterio appena citato, però, poichè il telescopio talvolta erroneamente può ricostruire come provenienti dal basso alcune traiettorie di muoni provenienti dall'alto, non è sufficiente.

Lo scopo di questa tesi è fornire una buona stima della probabilità che un evento atmosferico sia un muone: per farlo sono stati caratterizzati i muoni e i neutrini atmosferici utilizzando alcuni parametri forniti dall'algoritmo di ricostruzione degli eventi e successivamente sono stati applicati dei tagli negli eventi rivelati, per eliminare tra essi i muoni con traiettorie mal ricostruite.

Gli eventi analizzati sono stati prodotti da una simulazione Monte Carlo, descritta nella tesi.

Il lavoro è diviso in tre capitoli, il primo dei quali dedicato alla fisica dei raggi cosmici e dei neutrini, il secondo ai meccanismi di rivelazione dei neutrini, in cui è descritto anche il telescopio ANTARES, e il terzo alla caratterizzazione degli eventi atmosferici di ANTARES.

Indice

1	I neutrini e il loro ruolo in Astrofisica	2
1.1	I raggi cosmici	2
1.2	Lo studio del Cosmo con i raggi cosmici	4
1.3	Il neutrino	5
1.3.1	Il neutrino nel Modello Standard	5
1.3.2	Cenni storici	5
1.3.3	Le origini dei neutrini	7
1.3.4	L'origine dei neutrini di alte energie	9
1.3.5	Le sorgenti astrofisiche di neutrini	10
2	Rilevazione dei neutrini	14
2.1	Le interazioni dei neutrini	14
2.2	La radiazione Cherenkov	16
2.3	La propagazione della luce	16
2.4	Il fondo ottico	18
2.5	Il fondo fisico	18
2.6	Il telescopio ANTARES	18
2.6.1	Caratteristiche principali del rivelatore	18
2.6.2	Simulazioni Monte Carlo	19
3	Caratterizzazione dei muoni atmosferici e dei neutrini atmosferici	22
3.1	La ricostruzione degli eventi	22
3.2	Neutrini atmosferici e muoni atmosferici	23
3.2.1	Caratteristiche dei muoni atmosferici rilevati	23
3.2.2	Caratteristiche dei neutrini atmosferici rilevati	26
3.2.3	La selezione degli eventi	27

Capitolo 1

I neutrini e il loro ruolo in Astrofisica

1.1 I raggi cosmici

La superficie terrestre è continuamente raggiunta da particelle, chiamate nel loro insieme *raggi cosmici* (RC), prodotte da eventi galattici ed extra-galattici. I raggi cosmici che raggiungono la sommità dell'atmosfera terrestre sono detti "primari" e sono costituiti per il 79% da protoni, per il 15% da nuclei di He e per la restante parte da nuclei pesanti ed elettroni.

Tali particelle interagiscono con la materia che compone l'atmosfera, dando origine ad uno sciame di particelle secondarie, come schematizzato in Fig.1.1.

Si stima che ogni secondo $\frac{10^5}{m^2}$ particelle di raggi cosmici primari raggiungano l'atmosfera. I raggi cosmici primari hanno energie che vanno da 10^8 eV a 10^{20} eV e il loro flusso decresce con l'energia, secondo la legge:

$$\frac{dN}{dE} = K * E^{-\alpha} [m^{-2} sr^{-1} s^{-1} GeV^{-1}] \quad (1.1)$$

dove K è un coefficiente di proporzionalità e α è detto *indice spettrale*, non costante. I punti dello spettro in cui α subisce delle variazioni sono detti rispettivamente: ginocchio (*knee*), secondo ginocchio (*second knee*) e caviglia (*ankle*). Come si può vedere in Fig.1.2, il valore di α aumenta nei punti detti *ginocchio*, ($E \sim 3 \cdot 10^5 eV$), in cui passa da 2.7 a 3.1, e *secondo ginocchio* ($E \sim 4 \cdot 10^5 eV$), in cui arriva a 3.3, mentre nella *caviglia*, ($E \sim 10^{19} eV$), diminuisce fino a 2.7 circa. I nomi attribuiti a questi punti sono dovuti alla somiglianza del grafico alle rispettive parti di una gamba.

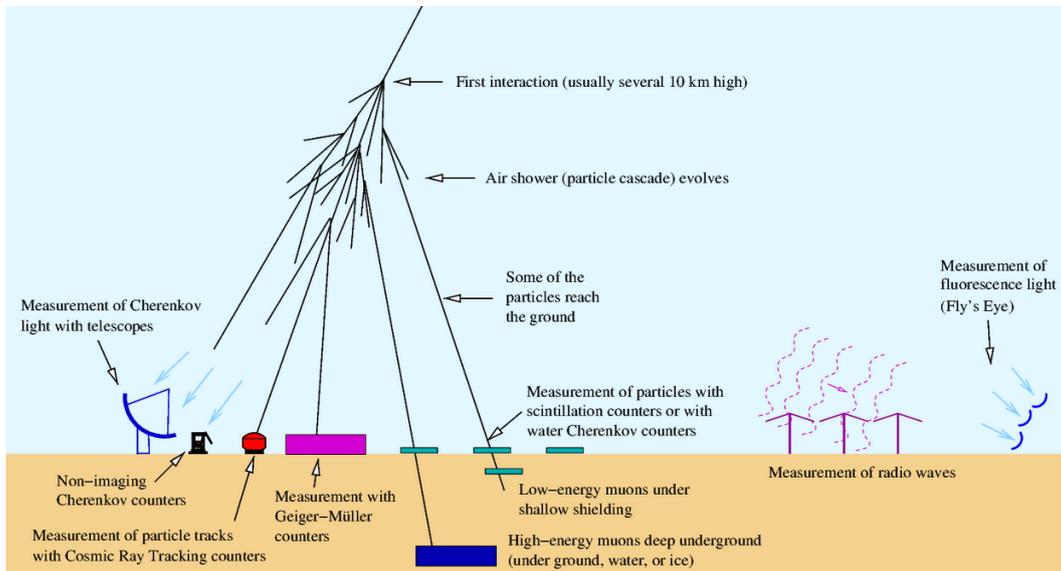


Figura 1.1: Schema della pioggia di particelle generate dai raggi cosmici. Figura da [1].

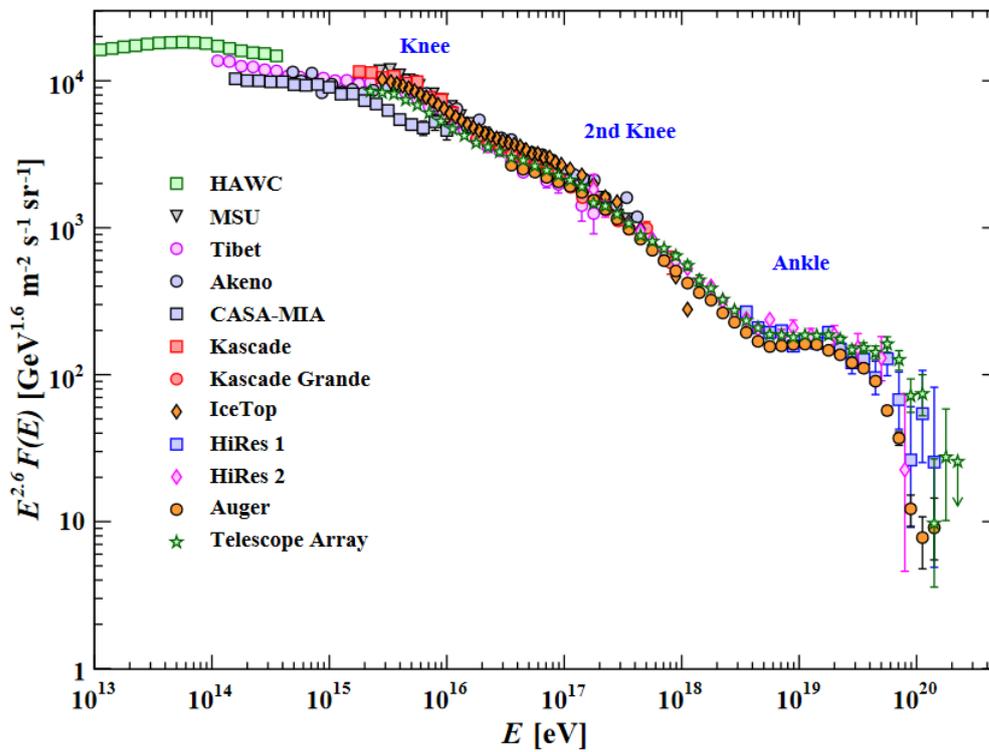


Figura 1.2: Spettro energetico completo dei raggi cosmici. Figura da [2].

Si ritiene che i raggi cosmici con energia fino al *ginocchio* siano di origine galattica e che vengano accelerati in resti di supernova, attraverso il *meccanismo di Fermi* [3]. In base a questo modello, l'accelerazione delle particelle è spiegabile da urti ripetuti con fronti di onde di shock provocate da oggetti galattici. Tali urti aumentano notevolmente l'energia delle particelle che, deflesse dai campi magnetici in prossimità della sorgente di accelerazione, ritornano sul fronte d'onda di shock e vengono nuovamente accelerate. Ogni particella può sfuggire all'onda di shock con una certa probabilità, che aumenta al crescere dell'energia della particella stessa; dunque il numero di particelle nell'unità di energia non è costante, ma segue la legge:

$$\frac{dN}{dE} \simeq \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-2}. \quad (1.2)$$

Non esiste al momento un modello di riferimento per l'accelerazione dei raggi cosmici con energie superiori al *ginocchio*. Si pensa che possano essere accelerati da una supernova, se questa al suo interno ha una stella di neutroni rotante [4]. Tale ipotesi può arrivare a spiegare l'origine di raggi cosmici con energie fino a 10^{19} eV, mentre i raggi cosmici con energie superiori, cioè oltre la *caviglia* dello spettro, sono di origine extra-galattica [4].

1.2 Lo studio del Cosmo con i raggi cosmici

La rilevazione delle particelle consente di studiare i fenomeni astrofisici che le hanno accelerate.

Poichè i raggi cosmici, in quanto carichi, vengono deflessi dai campi magnetici galattici ed inter-galattici, la loro rilevazione non dà indicazioni sulla direzione di origine. Particelle neutre invece, non subendo la deflessione del campo magnetico, sono buoni indicatori della direzione di origine del fenomeno astrofisico in esame: tali particelle sono i raggi γ e i neutrini originati dall'interazione, descritta nella Sezione 1.3.4, dei raggi cosmici primari con la materia e con la radiazione γ circostante la sorgente.

I raggi γ , a differenza dei neutrini, hanno alta probabilità di interagire con la materia interposta tra il loro punto di origine e il punto di rilevazione. I neutrini invece, risentendo solo dell'interazione debole, hanno una bassissima probabilità di interazione: sono le uniche particelle a riuscire ad attraversare enormi quantitativi di materiali. Ad esempio, neutrini di energia inferiore a 100 TeV attraversano tutto il diametro terrestre con piccola probabilità di essere assorbiti. E' questo il motivo per cui la rivelazione dei neutrini è così importante per lo studio del Cosmo: essi ci forniscono, grazie alla loro scarsa tendenza ad interagire, informazioni tanto dettagliate quanto nessun'altra particella può dare.

1.3 Il neutrino

1.3.1 Il neutrino nel Modello Standard

Il Modello Standard è l'insieme delle conoscenze finora note sulla fisica delle particelle e descrive la materia e le interazioni fondamentali, fatta eccezione per la gravitazione. Esso prevede l'esistenza di 12 fermioni (particelle di spin $\frac{1}{2}$), sei appartenenti alla famiglia dei *quark* e sei alla famiglia dei *leptoni*. Ciascuna delle tre interazioni fondamentali è descritta tramite lo scambio tra i fermioni di particelle portatrici di carica con spin 1, detti *bosoni di gauge*. Il fotone è il bosone mediatore dell'interazione elettromagnetica, mentre l'interazione forte è mediata da otto bosoni detti *gluoni*, non massivi come il fotone. L'interazione debole, invece, è mediata da tre diversi bosoni massivi, due con carica elettrica ($W^{+/-}$) e uno elettricamente neutro (Z^0). Inoltre il modello comprende l'esistenza del *bosone di Higgs*, di spin 0, responsabile del meccanismo che conferisce massa a tutte le particelle[5].

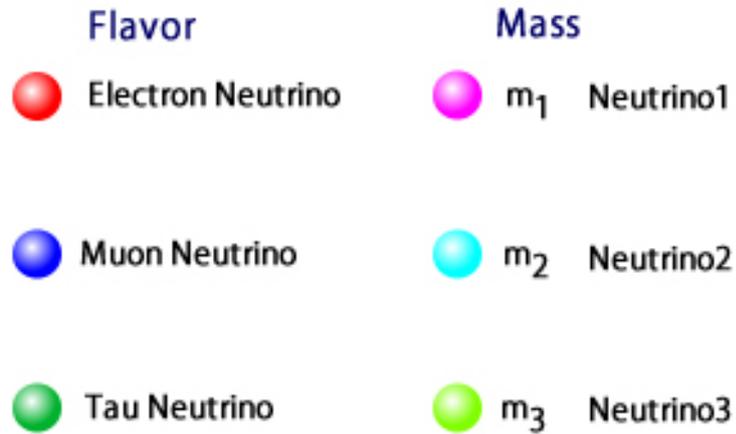
Il neutrino è una particella appartenente alla famiglia dei leptoni e, come tale, non risente dell'interazione forte. Essendo neutro di carica elettrica, il neutrino non risente neppure dell'interazione elettromagnetica, ma solo di quella debole: esso è dunque una particella scarsamente interagente con la materia. Questo fatto lo rende un oggetto molto utile per lo studio di fenomeni astrofisici: riuscendo a percorrere lunghissime distanze senza subire deviazioni dovute ai campi magnetici galattici ed extra-galattici e senza interagire con la materia cosmica e atmosferica, esso fornisce informazioni precise, all'atto della rivelazione, sulla direzione del punto del Cosmo in cui è stato prodotto. Allo stesso tempo però, proprio la sua scarsa predisposizione all'interazione lo rende difficile da rivelare.

E' oggi noto che esistono tre tipi di neutrini, uno per ognuna delle tre generazioni in cui sono organizzati i leptoni (elettronico, muonico e tauonico), come si vede in Fig.1.3.

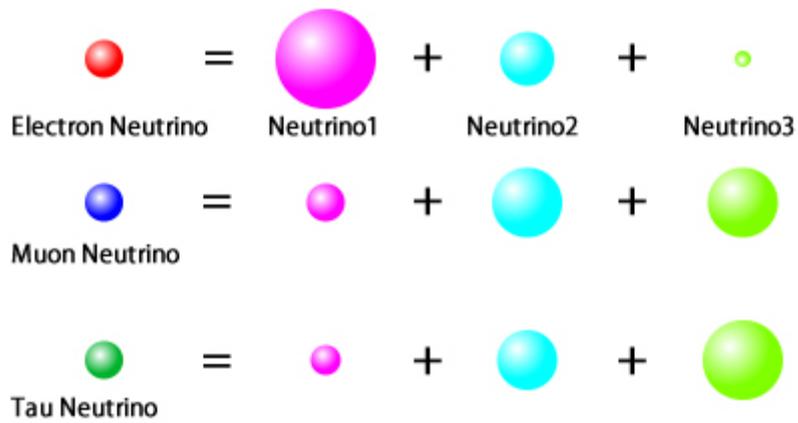
Sono inoltre possibili fenomeni di trasformazione di un neutrino di una generazione in neutrini di altri sapori: questo fenomeno è detto "oscillazione dei neutrini" e fu scoperto nell'esperimento Super-Kamiokande (Giappone) del 1998. Si tratta di un fenomeno quantomeccanico dovuto al fatto che il sapore di un neutrino è determinato da una sovrapposizione di autostati di massa (si veda Fig.1.3). La scoperta dell'oscillazione dei neutrini ha infatti dimostrato che il Modello Standard deve essere modificato per includere la loro massa che, pur essendo molto piccola, è non nulla: se le masse dei neutrini di almeno due tra i tre sapori non sono diverse da zero, il fenomeno dell'oscillazione non può avvenire da un punto di vista quantomeccanico [6].

1.3.2 Cenni storici

L'ipotesi di esistenza del neutrino fu formulata da W. Pauli nel 1930 per risolvere un problema emerso dallo studio del decadimento β . Il decadimento β è un processo che consiste nella tramutazione di un nucleo con Z protoni e N neutroni in un nucleo con



(a)



(b)

Figura 1.3: In alto, schema della classificazione dei neutrini in base al sapore e alla massa (a). In basso, rappresentazione del sapore dei neutrini come sovrapposizione di autostati di massa (b). Figura da [6].

Z+1 protoni e N-1 neutroni, con conseguente emissione di un elettrone. Il decadimento β è descritto dalla seguente reazione:



Tale processo inizialmente era noto come $n \rightarrow p + e^-$, ed era atteso che, per conservazione del quadrimpulso, l'energia emessa dall'elettrone in tale reazione (processo $1 \rightarrow 2$) avesse un valore ben definito. Si osservò invece che l'elettrone emetteva energia con uno spettro continuo: per salvare il principio di conservazione dell'energia, Pauli ipotizzò che nel decadimento β fosse prodotta una terza particella, di spin $\frac{1}{2}$ per conservazione del momento angolare, di massa piccolissima, neutra per conservazione della carica totale e scarsamente interagente (motivo per cui non sarebbe stata osservata prima). Nel 1934 Fermi battezzò tale particella con il nome di *neutrino* e propose la prima teoria quantitativa che spiegasse il decadimento β comprendendo anche i neutrini [7].

La prima osservazione dei neutrini elettronici si ebbe nel 1956 ad opera di due scienziati statunitensi C.Cowan e F.Reines, grazie alla rivelazione dei prodotti della reazione di cattura di un antineutrino elettronico da protoni:



Per la produzione degli antineutrini fu utilizzato un reattore nucleare di potenza di 150 MW. La rivelazione sia del positrone che neutrone confermò senza alcun dubbio l'ipotesi di esistenza del neutrino [8].

1.3.3 Le origini dei neutrini

I neutrini che raggiungono e attraversano la superficie terrestre possono avere origine atmosferica o astrofisica. Il loro spettro è riportato nella Fig.1.4, in cui sono evidenziati i differenti intervalli energetici dei neutrini di diversa provenienza.

I neutrini atmosferici

I neutrini atmosferici sono il risultato del decadimento delle cascate adroniche prodotte dall'interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'atmosfera. 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 (Sezione 1.3.4).

I neutrini atmosferici sono divisi in due classi: *convenzionali* e *prompt*. I neutrini convenzionali vengono dal decadimento di pioni e kaoni, e dei muoni provenienti da tale decadimento, mentre quelli del *prompt* sono originati dal decadimento di mesoni contenenti quark di massa maggiore. La maggior parte del flusso dei neutrini atmosferici è rappresentato da neutrini muonici convenzionali, e segue l'andamento $E^{-3.7}$ [10]. I neutrini cosmici invece seguono la legge E^{-2} : è dunque possibile separare i due contributi, e associare alla componente cosmica gli eventi di alta energia.

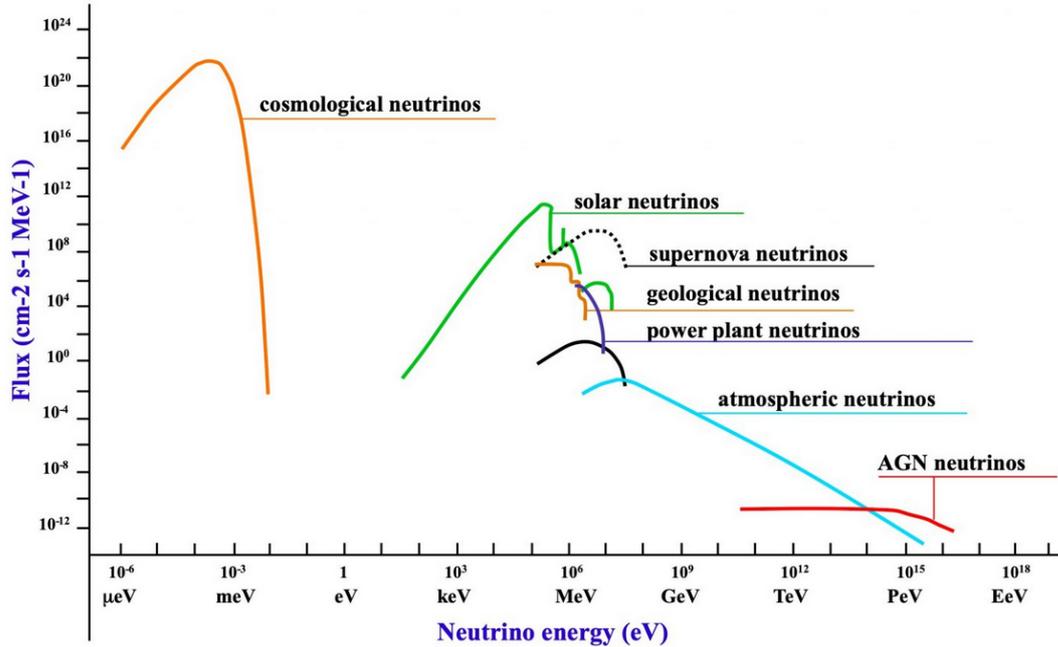
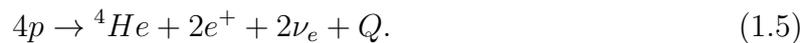


Figura 1.4: Spettro dei neutrini che raggiungono la superficie terrestre. Figura da [9].

I neutrini solari

I neutrini sono continuamente prodotti durante la vita di una Stella. Il Sole, essendo la Stella a noi più vicina, costituisce per la Terra la principale fonte di neutrini provenienti da Stelle in vita. I neutrini sono infatti prodotti nel "reattore term nucleare" interno al Sole, attraverso la seguente reazione:



La precedente reazione produce un nucleo di ${}^4\text{He}$ ogni 4 protoni, con rilascio di un'energia $Q=26,73$ MeV sotto forma di radiazione elettromagnetica (fotoni). Mentre i due positroni prodotti annichilano con gli elettroni solari, i due neutrini fuggono immediatamente.

La maggior parte dei neutrini prodotti dal Sole hanno energie minori di 0,42 MeV, mentre pochi neutrini di energia maggiore sono prodotti dal decadimento del ${}^8\text{B}$ (fino a 14,06 MeV)[11].

I neutrini da esplosioni di SuperNovae

Durante la maggior parte della loro vita, le stelle bruciano H nel nucleo producendo He. Quando l'H nel core scarseggia, le stelle iniziano a bruciare He. Solo le stelle con masse

superiori a otto masse solari, quando l'He finisce nel nucleo, continuano le reazioni di fusione di nuclei più pesanti, fino alla produzione del Fe. A questo punto, la fusione nucleare cessa, e i protoni del Fe iniziano la cattura elettronica, secondo la reazione:

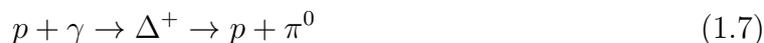


Si origina così un nucleo degenere di neutroni, che collassa fino ad esplodere violentemente, secondo il processo detto di *esplosione di supernova*, che provoca l'espulsione verso l'esterno dei neutrini formati nella reazione 1.6.

1.3.4 L'origine dei neutrini di alte energie

I neutrini e i raggi γ ad alta energia sono originati da alcuni processi di interazione dei protoni dei raggi cosmici con i campi elettrici e la materia circostante le sorgenti dei raggi cosmici stessi.

L'insieme dei processi di interazione, descritti in questo paragrafo, all'origine della produzione astrofisica di neutrini e raggi γ è detto *scenario adronico*. Nella Sezione 1.1 si è detto che i raggi cosmici primari sono costituiti da particelle cariche accelerate da oggetti astrofisici. Una frazione dei protoni accelerati interagiscono con i fotoni secondo le reazioni:



e con la materia circostante la sorgente (protoni, neutroni e nuclei),



I neutrini e i raggi γ sono prodotti infine dal decadimento dei pioni. E' noto infatti che i pioni neutri decadono via interazione elettromagnetica secondo:



mentre i pioni carichi decadono secondo:



μ^+ e μ^- a loro volta decadono secondo:

$$\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+ \quad (1.14)$$

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-. \quad (1.15)$$

Esiste una stretta relazione tra lo spettro energetico di neutrini e raggi γ e quello dei raggi cosmici che li generano: infatti, vicino alla sorgente l'indice spettrale dei ν e γ è circa uguale a quello dei raggi cosmici.

I raggi γ possono essere prodotti anche dall'accelerazione di elettroni, in uno scenario detto *leptonico*, tramite il processo *Compton inverso*, mentre i neutrini possono essere prodotti esclusivamente in scenari adronici: la rivelazione di neutrini ad alta energia è dunque un indicatore indubbio dell'esistenza di una sorgente astrofisica di raggi cosmici. Questo fatto, unito alla loro scarsa capacità di interazione con la materia, consente di ricavare dalla rivelazione dei neutrini di alta energia preziose informazioni sulle sorgenti astrofisiche.

1.3.5 Le sorgenti astrofisiche di neutrini

Sono molteplici gli oggetti astrofisici, alcuni appartenenti alla Via Lattea e altri extragalattici, candidati come responsabili dell'accelerazione dei raggi cosmici primari. Questi oggetti sono supposti essere sorgenti di neutrini, secondo il meccanismo descritto nel Paragrafo 1.3.4. Le sorgenti di accelerazione sono raccolte nel diagramma di Hillas, in Fig.1.5, che le classifica in base alla relazione tra le loro dimensioni e il loro campo magnetico. Le principali sorgenti astrofisiche candidate per l'accelerazione dei raggi cosmici sono descritte di seguito.

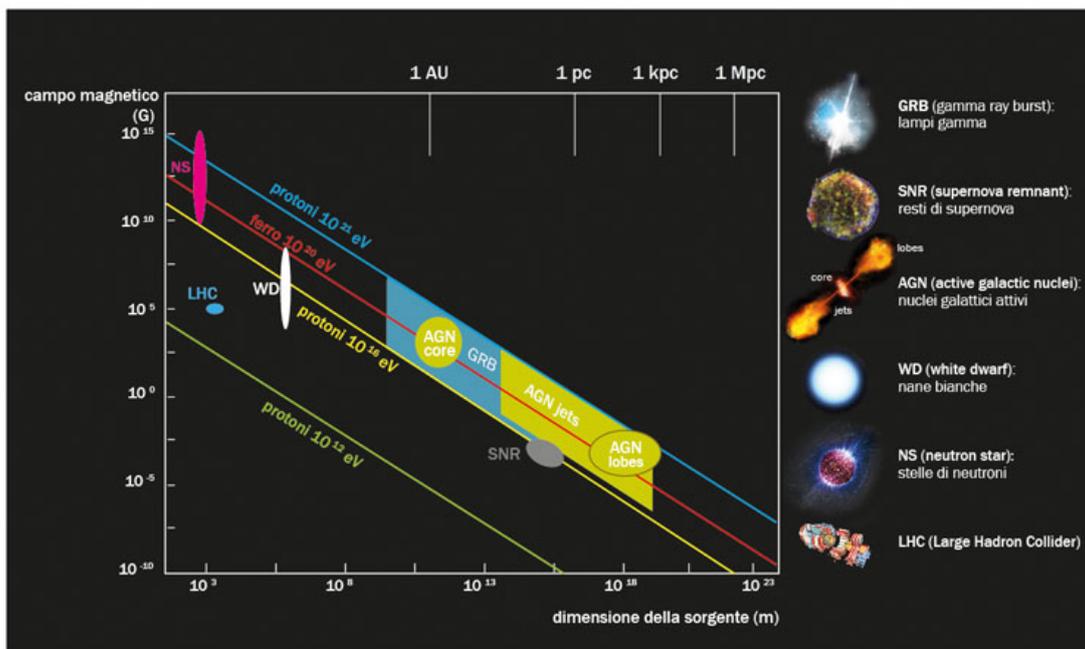


Figura 1.5: Diagramma di Hillas: la figura mostra il legame tra il campo magnetico (in Gauss) e le dimensioni di una sorgente di raggi cosmici di alta energia (in metri). Il diagramma rende possibile identificare le classi di sorgenti candidate per l'accelerazione dei raggi cosmici, grazie ad una relazione tra campo magnetico, dimensione della sorgente ed energia massima raggiungibile dai raggi cosmici prodotti in quell'ambiente astrofisico. Figura da [12].

Resti di supernovae

Tra i più importanti candidati come sito di accelerazione dei raggi cosmici ci sono i fronti d'onda di shock prodotti da esplosioni di supernovae di tipo 2, che rappresentano lo stadio finale della vita di stelle di masse maggiori di otto masse solari.

Come scritto nella Sezione 1.3.3, in stelle di tali masse, dopo la produzione del Fe, si forma un core degenere di neutroni sul quale collassa la materia degli strati più esterni, fino all'esplosione. Il 99 % dell'energia rilasciata nell'esplosione è emessa sottoforma di neutrini di energia di alcune decine di MeV, mentre l'1% è energia cinetica della materia espulsa dagli strati più esterni della supernova, che forma l'onda di shock sorgente di accelerazione delle particelle[11]. Di questa energia cinetica, circa l'1% è emessa come radiazione elettromagnetica.

Il fronte di shock si propaga a velocità di 10^5 m/s per 10^4 - 10^5 anni, espandendosi nel mezzo interstellare, dove raccoglie materia.

L'energia massima raggiungibile dai protoni accelerati da un resto di un'esplosione di supernova è dell'ordine di 10^{14} eV: per questo i resti di supernovae sono siti di accelerazione di raggi cosmici fino al *ginocchio* dello spettro. Una supernova particolarmente interessante come candidata per essere una sorgente di neutrini è RXJ1713.7-3946.

Pulsar Wind Nebulae

Le Pulsar Wind Nebulae (PWN) sono oggetti simili ai resti di supernovae, con la differenza che al centro hanno una pulsar, cioè una stella di neutroni rotante, che emette venti equatoriali e getti di materia. La maggior parte delle PWN sembra che producano raggi γ da processi leptonici; tuttavia non è escluso che in alcune di queste siano in azione anche meccanismi adronici [4].

Il centro della Galassia

Il centro della Via Lattea è probabilmente la più interessante area galattica di produzione di neutrini, specialmente per un telescopio nel Mar Mediterraneo: quest'ultimo infatti è un sito privilegiato per la rilevazione di particelle provenienti dal centro della Galassia. Il centro della Galassia non soltanto è caratterizzata da un'alta densità di oggetti astrofisici, come il buco nero super-massivo Sagittarius A*, ma è anche l'unico acceleratore galattico di protoni con energia dell'ordine del PeV [13] sinora identificato.

Microquasars

I Microquasars sono sistemi binari formati da un buco nero di piccola massa e una stella, che emettono getti di plasma osservabili in banda radio. Il loro nome deriva dal fatto di essere simili ai *quasars*, (abbreviazione di *quasi stellar radio source*), oggetti extra-galattici estremamente luminosi, che appaiono come puntiformi dal punto di vista osservativo. Nonostante i primi quasars furono osservati in banda radio, da cui il nome, solo una piccola frazione degli oggetti classificati otticamente come quasars ha una forte emissione radio [14]. I Microquasars somigliano ai quasar sia morfologicamente che per i processi di formazione del disco di accrescimento e di emissione dei getti.

Si ipotizza che siano sorgenti di accelerazione di raggi cosmici con energie fino a 10^{16} eV.

AGN

Gli AGN sono i nuclei delle Galassie che ospitano un buco nero supermassivo (tra 10^6 e 10^8 masse solari) con un disco di accrescimento in rotazione. Perpendicolarmente al disco di accrescimento sono emessi due getti di plasma relativistico, le cui particelle sono accelerate da fronti d'onda di shock intorno al disco stesso. Gli AGN sono ritenuti possibili responsabili dell'accelerazione dei raggi cosmici di alta energia, fino alle massime energie raggiungibili ($\sim 10^{20}$ eV).

Gli AGN vengono suddivisi in classi, in base all'orientazione dei getti rispetto alla Terra, alla loro attività e alla luminosità dell'emissione in banda ottica e radio. I *blazars*, AGN con uno dei due getti allineato con la linea di vista dell'osservatore, sono gli AGN con maggiore probabilità di essere individuati come sorgenti di neutrini, grazie ad un significativo aumento del flusso dei getti dovuto a allargamento Doppler [4].

Gamma Ray Bursts

I Gamma Ray Burst (GRB) sono dei lampi di raggi γ , con una durata variabile da pochi millisecondi a qualche decina di secondi: sono il fenomeno astrofisico più luminoso, con emissione di raggi γ di energia dell'ordine del MeV. L'ipotesi più accreditata è che i GRBs con durata di qualche secondo si originino dal collasso gravitazionale di una stella di grande massa in un buco nero, mentre quelli più brevi dalla fusione di due stelle di neutroni.

Al lampo iniziale segue emissione di raggi in banda X, ottica e radio: tale fenomeno è detto *afterglow*.

La produzione di raggi γ di alta energia è spiegato da un modello detto *fireball* [4]: il lampo di raggi γ di alta energia si origina dall'espansione dell'onda di shock (prodotta dal collasso della materia) attraverso il plasma rilasciato tramite getti relativistici, mentre l'*afterglow* è provocato dall'interazione ritardata dei getti con il mezzo circostante.

La produzione di neutrini avviene grazie all'accelerazione dei protoni nell'ambiente astrofisico appena descritto.

Capitolo 2

Rilevazione dei neutrini

I neutrini interagiscono solo tramite interazione debole e per questo non sono facili da rilevare. La loro rilevazione non è diretta, ma si basa sull'individuazione dei fotoni Cherenkov originati dalle particelle cariche prodotte dall'interazione dei neutrini con la materia circostante e interna al rivelatore. Quest'ultimo consiste in un array tridimensionale di tubi fotomoltiplicatori (PMTs) inseriti in un mezzo trasparente.

2.1 Le interazioni dei neutrini

I neutrini interagiscono con nuclei N tramite processi a corrente carica (CC), mediate da un bosone $W^{(+/ -)}$:

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

e a corrente neutra (CN), mediate da un bosone Z_0 :

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

dove l indica un leptone (e, ν, τ) e X indica la cascata adronica prodotta.

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. Neutrini di tipo diverso producono all'interno dei rivelatori segnali di tipo diverso, rappresentati schematicamente in Fig.2.1, e di seguito descritti.

- Eventi di tipo *traccia*: eventi indotti da ν_μ in interazioni a corrente carica 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. Questo consente una buona ricostruzione della direzione del muone, da

cui è possibile ricavare la direzione di provenienza del neutrino.
L'angolo medio tra la direzione del neutrino e la direzione del muone è:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0,6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}} \quad (2.3)$$

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 Cherenkov 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. Pur essendo differenti, questi due tipi di segnali non sono distinguibili dai telescopi come ANTARES.

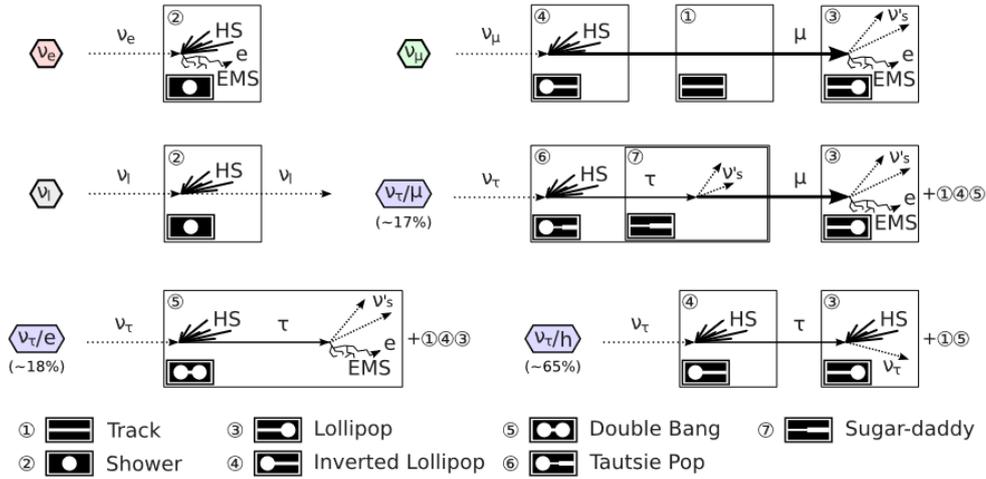


Figura 2.1: Rappresentazione schematica completa di tutte le possibili topologie di eventi rivelabili da un telescopio di neutrini. A sinistra di ogni riquadro è riportato il sapore di neutrino che lo ha generato. HS indica una cascata adronica, EMS una cascata elettromagnetica. Figura da [15].

2.2 La radiazione Cherenkov

Il funzionamento dei telescopi di neutrini operanti nel range dei TeV-PeV si basa sulla rivelazione dei fotoni ottici dovuti all'effetto Cherenkov di particelle cariche relativistiche.

Le informazioni sul numero di fotoni e sui loro tempi di arrivo fornite dai PMTs consentono di ricavare il sapore dei neutrini, la loro energia e direzione.

L'effetto Cherenkov si ha quando una particella carica relativistica attraversa un mezzo con velocità maggiore della velocità della luce nel mezzo stesso. Infatti quando una particella carica attraversa un mezzo, polarizza le molecole lungo la sua traiettoria: solo quando la particella ha velocità maggiore della velocità della luce nel mezzo stesso, si crea un momento di dipolo. Quando gli elettroni delle molecole polarizzate precedentemente ritornano alla posizione di equilibrio, essi emettono una radiazione coerente con simmetria conica. Il coseno dell'angolo caratteristico θ (si veda Fig.2.2) è dato da:

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

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo e β è la velocità della particella in unità di c . Per le particelle relativistiche ($\beta=1$), in acqua marina ($n=1.364$), θ_c è di circa 43° , mentre in ghiaccio ($n=1.42$), θ è di circa 41° .

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

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi}{137\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right). \quad (2.4)$$

I telescopi di neutrini utilizzano soprattutto PMTs sensibili a lunghezze d'onda comprese tra 300 e 600 nm, in cui il ghiaccio e l'acqua sono maggiormente trasparenti alla radiazione.

2.3 La propagazione della luce

La luce Cherenkov è sottoposta a fenomeni di scattering e assorbimento da parte del mezzo che influenzano la capacità di ricostruzione delle traiettorie del telescopio. L'assorbimento riduce la quantità di fotoni che raggiungono i PMTs e lo scattering ne modifica la direzione, peggiorando la misura della direzione dei neutrini.

Per descrivere quantitativamente questi fenomeni si usano tre coefficienti, $a(\lambda)$, di assorbimento, $b(\lambda)$, di scattering, e $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$, di attenuazione. In alternativa, sono usati i coefficienti $L_a(\lambda) = a(\lambda)^{-1}$, $L_b(\lambda) = b(\lambda)^{-1}$ e $L_c(\lambda) = c(\lambda)^{-1}$, detti rispettivamente lunghezza di assorbimento, di scattering e di attenuazione. Questi parametri

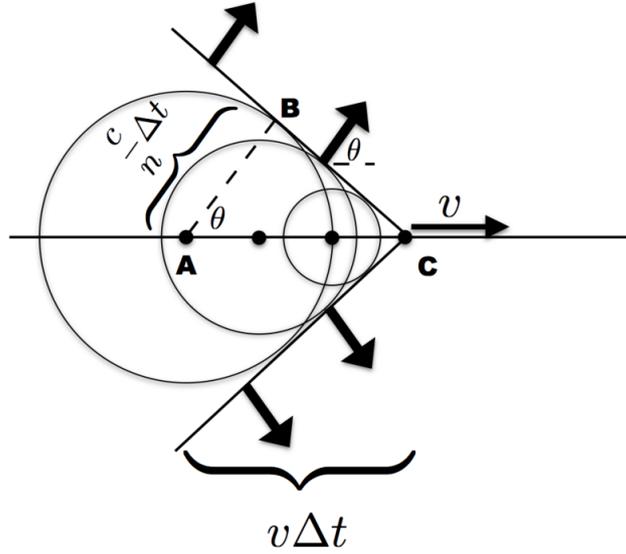


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del meccanismo di propagazione della luce Cherenkov. Figura da [16].

indicano il cammino dopo il quale l'intensità iniziale I_0 di un fascio di fotoni è ridotta di un fattore $\frac{1}{e}$, secondo la seguente formula:

$$I_i(x, \lambda) = I_0(\lambda) e^{-\frac{x}{L_i(\lambda)}}, i = a, b, c \quad (2.5)$$

dove x è il cammino ottico della luce.

Spesso al posto di $L_b(\lambda)$, si usa il parametro

$$L_b(\lambda)^{eff} = L_b(\lambda) \sum_{i=0}^n \langle \cos \theta \rangle^i \simeq \frac{L_b(\lambda)}{1 - \langle \cos \theta \rangle} \quad (2.6)$$

dove $\langle \cos \theta \rangle$ è il coseno medio dell'angolo θ di scattering. Questa grandezza è detta *lunghezza di scattering efficace* e, dando informazioni sulla distribuzione angolare dello scattering, fornisce una descrizione più dettagliata del fenomeno rispetto a $L_b(\lambda)$.

Mentre il valore di $L_a(\lambda)$ dell'acqua è minore rispetto al ghiaccio, per $L_b(\lambda)^{eff}$ è vero il contrario. Di conseguenza, lo stesso volume strumentale nel ghiaccio corrisponde ad un maggiore volume efficace rispetto a quello in acqua: i fotoni Cherenkov possono percorrere in ghiaccio distanze più lunghe senza essere assorbiti. Dall'altra parte, però, la risoluzione angolare dei muoni indotti dai neutrini è peggiore in ghiaccio che in acqua.

2.4 Il fondo ottico

Per i telescopi in acqua è inoltre presente un fondo dovuto al decadimento radioattivo di ^{40}K e alla bio-luminescenza, fenomeno dovuto al bagliore continuo dei batteri e ai lampi prodotti dagli animali.

La bio-luminescenza provoca un fondo più intenso di quello dovuto al decadimento radiattivo del ^{40}K ed è in generale decrescente con la profondità. Anche per questo motivo, oltre che per diminuire le incrostazioni e i sedimenti che si depositano sui moduli ottici, i telescopi di neutrini si costruiscono a grandi profondità.

2.5 Il fondo fisico

Un altro importante motivo per cui i telescopi di neutrini sono costruiti a grande profondità è quello di avere una schermatura dai muoni atmosferici, che rappresentano la maggioranza degli eventi rivelati da un telescopio di neutrini.

Grazie a strati di acqua e ghiaccio è possibile ridurre il flusso di muoni atmosferici in arrivo sui rivelatori, ma non è possibile eliminarlo totalmente. Nel Capitolo 3 sono descritti i metodi principali per distinguere i muoni indotti da interazioni a corrente carica di ν_μ e dai muoni atmosferici.

2.6 Il telescopio ANTARES

Il telescopio ANTARES si trova a 40 km a largo delle coste di Tolone, a 2475 km di profondità, è stato completato il 29 maggio 2008 ed è stato il primo telescopio a lavorare in acque profonde.

L'obiettivo principale dell'esperimento è l'osservazione di neutrini di alte energie, usati come mezzo per lo studio di meccanismi di accelerazione in oggetti astrofisici [17]. La posizione geografica del telescopio è di privilegio, poichè punta ad aree dell'Universo, come il centro della nostra Galassia, ricche di possibili sorgenti di neutrini.

2.6.1 Caratteristiche principali del rivelatore

Il telescopio ANTARES è ottimizzato per la rilevazione della luce Cherenkov originata da neutrini muonici provenienti dal basso. Pur se con una peggiore risoluzione angolare e una ridotta efficienza, il telescopio rileva anche neutrini di diversi sapori.

Il telescopio è costituito da una matrice di PMTs in Fig.2.3, posizionate su 12 linee flessibili di 450 m di lunghezza, ancorate in configurazione ottagonale al fondo marino e

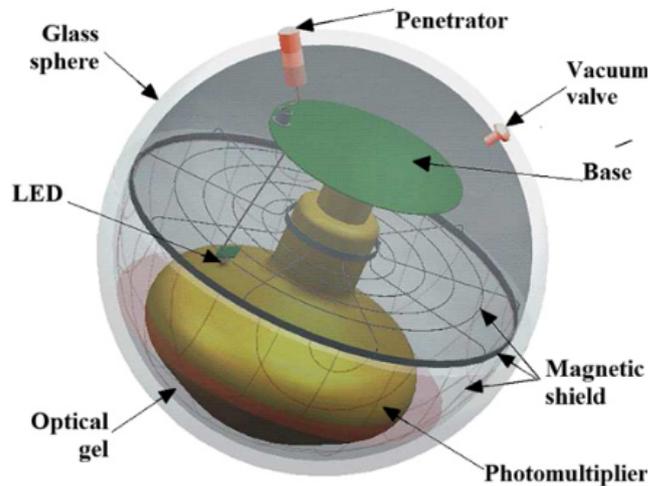


Figura 2.3: Rappresentazione schematica di un optical module di ANTARES. Figura da [18].

mantenute in posizione verticale da boe. Ogni linea, detta stringa, ha 25 unità di rilevazione distanti 14,5 metri tra loro, come mostrato in Fig.2.4, ognuna delle quali contiene tre moduli ottici e un modulo di controllo per l'elettronica. La prima unità di rilevazione è a circa 100 m di altezza dal fondo sottomarino. Il numero totale di OMs installati è di 885.

L'OM costituisce l'unità di base del telescopio: esso consiste in un tubo fotomoltiplicatore, con vari sensori e l'elettronica associata, contenuti in una sfera di vetro 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. E' inoltre fondamentale per ANTARES tenere in conto gli effetti dovuti ai decadimenti radioattivi di ^{40}K e alla bioluminescenza: i due fenomeni producono nei conteggi degli eventi una baseline circa costante, con dei picchi dovuti agli effetti stagionali della bioluminescenza.

2.6.2 Simulazioni Monte Carlo

Molte operazioni nell'esperimento sono effettuate utilizzando le simulazioni Monte Carlo, tra cui lo studio delle performances del telescopio, la verifica del corretto funzionamento dell'apparato, l'ottimizzazione dei tagli di selezione per il rigetto del fondo e la costru-

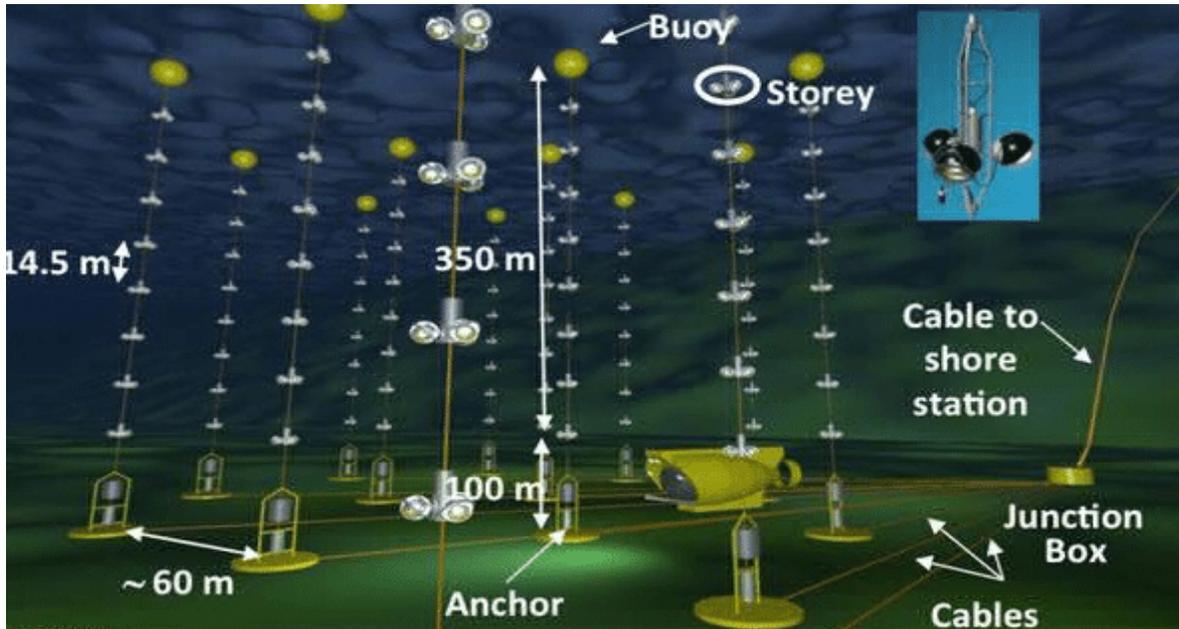


Figura 2.4: Rappresentazione schematica del telescopio ANTARES. Figura da [19]

zione delle distribuzioni di probabilità dei parametri rilevanti.

L'output delle simulazioni Monte Carlo è usato come input degli algoritmi di ricostruzione degli eventi, che ricostruiscono l'energia e la direzione dei neutrini usando l'informazione della luce osservata a diverse posizioni e tempi nel telescopio.

Le simulazioni Monte Carlo sono costituite da tre passaggi principali. Prima sono generate tutte le particelle che possono indurre un segnale osservabile nel telescopio. Nella generazione di questi eventi, il rivelatore è trattato come un cilindro contenente tutti i PMTs, circondato da un cilindro più grande detto *can*, mostrato in Fig.2.5. Nella *can* è fatta una simulazione completa, inclusa la generazione della luce Cherenkov.

I neutrini sono generati isotropicamente in ogni direzione e con uno spettro energetico che segue la legge $E^{-1.4}$ in un intervallo che va da 10 a 10^8 GeV. Essi sono infine opportunamente pesati a seconda che siano neutrini atmosferici o cosmici e considerando, oltre ad altri parametri, la probabilità che un neutrino proveniente dal basso percorra tutto il diametro terrestre e raggiunga il rivelatore.

Il secondo step consiste nella simulazione delle interazioni delle particelle generate inizialmente con il mezzo e nella propagazione fino al rivelatore delle particelle risultanti e della luce Cherenkov. Infine è determinata la risposta del rivelatore.

Sono inoltre implementate delle simulazioni Monte Carlo per la generazione e la propagazione fino al livello del mare dei muoni atmosferici. Queste ultime sono basate su formule parametriche che descrivono il flusso, la distribuzione angolare e lo spettro energetico dei flussi di muoni.

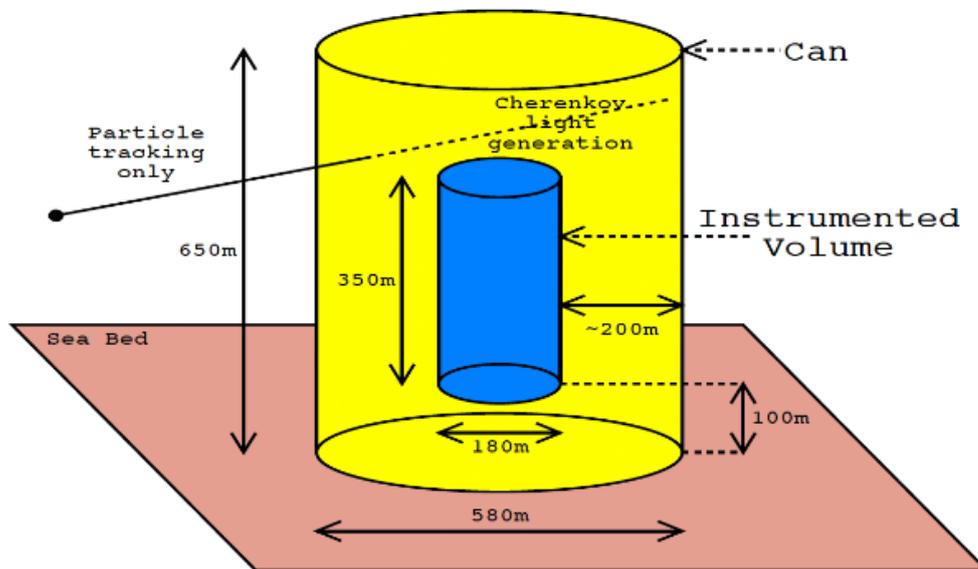


Figura 2.5: Schema della geometria del rivelatore utilizzata nelle simulazioni Monte Carlo per ANTARES. Figura da [20].

Capitolo 3

Caratterizzazione dei muoni atmosferici e dei neutrini atmosferici

I muoni atmosferici e i neutrini atmosferici costituiscono le due principali fonti di fondo per un telescopio di neutrini. Questo lavoro ha lo scopo di caratterizzare i neutrini atmosferici rispetto ai muoni atmosferici. Questi ultimi sono gli eventi di fondo predominanti in numero, essendo il loro flusso di cinque ordini di grandezza superiore al flusso di neutrini con direzione verso il basso.

Per effettuare questa analisi sono stati utilizzati eventi (muoni e neutrini atmosferici) generati tramite simulazioni Monte Carlo. Le simulazioni sono relative al periodo di presa dati del telescopio che va dal 29 gennaio 2007 al 31 dicembre 2017, per un totale di 3125.4 giorni.

L'accesso ai dati della collaborazione ANTARES (che si trovano nel centro di calcolo del progetto a Lione) è stato effettuato attraverso un server remoto dell'in2p3. I dati sono stati copiati in locale e analizzati con l'uso del framework ROOT (versione 6.14).

3.1 La ricostruzione degli eventi

La caratterizzazione dei muoni atmosferici e dei neutrini atmosferici è stata effettuata utilizzando tre diversi parametri forniti dagli algoritmi di ricostruzione degli eventi del telescopio ANTARES.

Tali algoritmi di ricostruzione hanno l'obiettivo di stimare l'energia e la direzione delle particelle in arrivo, partendo dalle informazioni spaziali e temporali della luce Cherenkov rivelata dai fotomoltiplicatori del telescopio. In ANTARES, gli eventi sono ricostruiti utilizzando prevalentemente due algoritmi: AAFit e TANTRA [13].

Il primo fornisce la migliore risoluzione angolare per gli eventi di tipo traccia, il secondo per quelli di tipo cascata. L'analisi effettuata in questo lavoro utilizza i parametri forniti dall'algoritmo AAFit.

L'algoritmo AAFit ricostruisce la traiettoria attraverso quattro fits, di cui i primi tre sono effettuati per avere una buona approssimazione dei parametri da ricostruire, utilizzata come input dal fit finale di massima verosimiglianza. I quattro fit utilizzano le informazioni di tempo di arrivo e di ampiezza del segnale rivelato dagli OMs.

I tre parametri utilizzati per la caratterizzazione dei muoni e dei neutrini atmosferici sono:

- Λ : parametro di qualità della ricostruzione della traccia;
- β : stima dell'errore angolare della traccia:

$$\beta = \sqrt{\beta_\theta^2 + \sin^2 \theta \beta_\phi^2} \quad (3.1)$$

dove β_θ è una stima dell'errore sull'angolo di zenith e β_ϕ è una stima dell'errore sull'angolo di azimuth della traiettoria della particella rivelata;

- $\cos \theta$: coseno dell'angolo di zenith della traiettoria della particella rivelata.

Si può notare dalla 3.1 che β e $\cos \theta$ sono due parametri correlati.

3.2 Neutrini atmosferici e muoni atmosferici

Sia i neutrini che i muoni atmosferici sono originati dal decadimento di pioni e di kaoni carichi generati nelle cascate adroniche prodotte dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera.

3.2.1 Caratteristiche dei muoni atmosferici rilevati

I muoni atmosferici costituiscono la maggioranza degli eventi rivelati dai telescopi di neutrini. Per ridurre il flusso in arrivo sui rivelatori, questi ultimi vengono posti a grandi profondità in modo da essere protetti dalla schermatura naturale offerta dall'acqua e dal ghiaccio sovrastanti. I muoni atmosferici però riescono a penetrare per molti chilometri attraverso tutti i tipi di materiali (compresi acqua e ghiaccio): il fondo a loro dovuto non si riesce totalmente ad eliminare.

I neutrini, che siano cosmici o atmosferici, grazie alla loro scarsa interazione con la materia, percorrono il diametro terrestre da una parte all'altra, mentre i muoni atmosferici non riescono ad attraversarlo tutto. I muoni atmosferici rivelati da ANTARES, dunque, sono degli eventi con direzione dall'alto verso il basso. I neutrini, invece, provengono sia dal basso che dall'alto.

Un primo criterio per eliminare il fondo dovuto ai muoni atmosferici è dunque quello di selezionare solo gli eventi provenienti dal basso. Per questo motivo, contrariamente ai telescopi ottici, i telescopi di neutrini sono "rivolti verso il basso".

In Fig.3.1 sono confrontati il flusso di muoni atmosferici e il flusso di muoni indotti da neutrini atmosferici: il primo è molto più intenso del secondo e si annulla per $\cos\theta < 0$. Il flusso di muoni inoltre diminuisce con la profondità del rivelatore. Il flusso di muoni indotti da neutrini presenta un picco per $\cos\theta \sim 0$, a causa del fatto che la densità dell'aria diminuisce con l'altitudine, permettendo ai pioni carichi di percorrere un tratto più lungo e aumentando la loro probabilità di decadimento in neutrini.

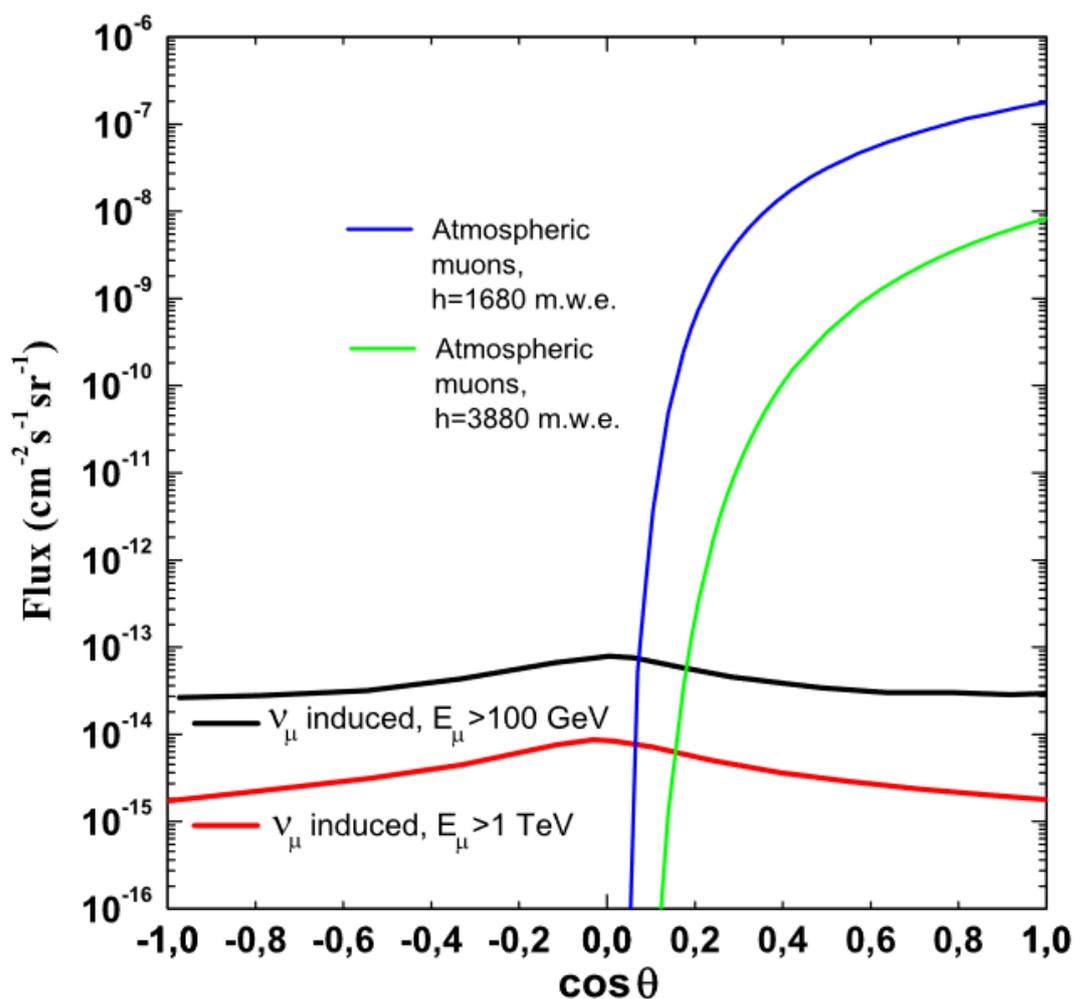


Figura 3.1: Flussi in funzione del coseno dell'angolo di zenith di (i) muoni atmosferici a due differenti profondità e (ii) muoni indotti da neutrini atmosferici a due differenti energie. Figura da [1].

Nonostante i muoni siano eventi esclusivamente con direzione verso il basso, l'algoritmo di ricostruzione restituisce erroneamente un certo numero di muoni come eventi

provenienti dal basso. Ciò si può vedere in Fig. 3.2, che mostra la direzione di zenith dei muoni e dei neutrini atmosferici rivelati dal telescopio ANTARES.

La ragione dell'errore di ricostruzione degli algoritmi risiede nel fatto che in un fascio di muoni, quelli a più alta energia sono anche più vicini all'asse della cascata: la maggioranza dei muoni possiede una distanza radiale rispetto all'asse della cascata più piccola di dieci metri, cioè più piccola della dimensione della griglia del rivelatore. Per questo motivo spesso viene ricostruita dal telescopio come *traccia* la somma di segnali prodotti da muoni parte di una cascata.

Tali eventi mal ricostruiti possono essere scambiati per muoni originati da neutrini muonici di alta energia e quindi devono essere riconosciuti ed eliminati.

A causa dell'effetto appena descritto, per distinguere i muoni atmosferici da quelli indotti dai neutrini muonici, occorre effettuare dei tagli aggiuntivi su alcuni dei parametri restituiti dagli algoritmi di ricostruzione degli eventi.

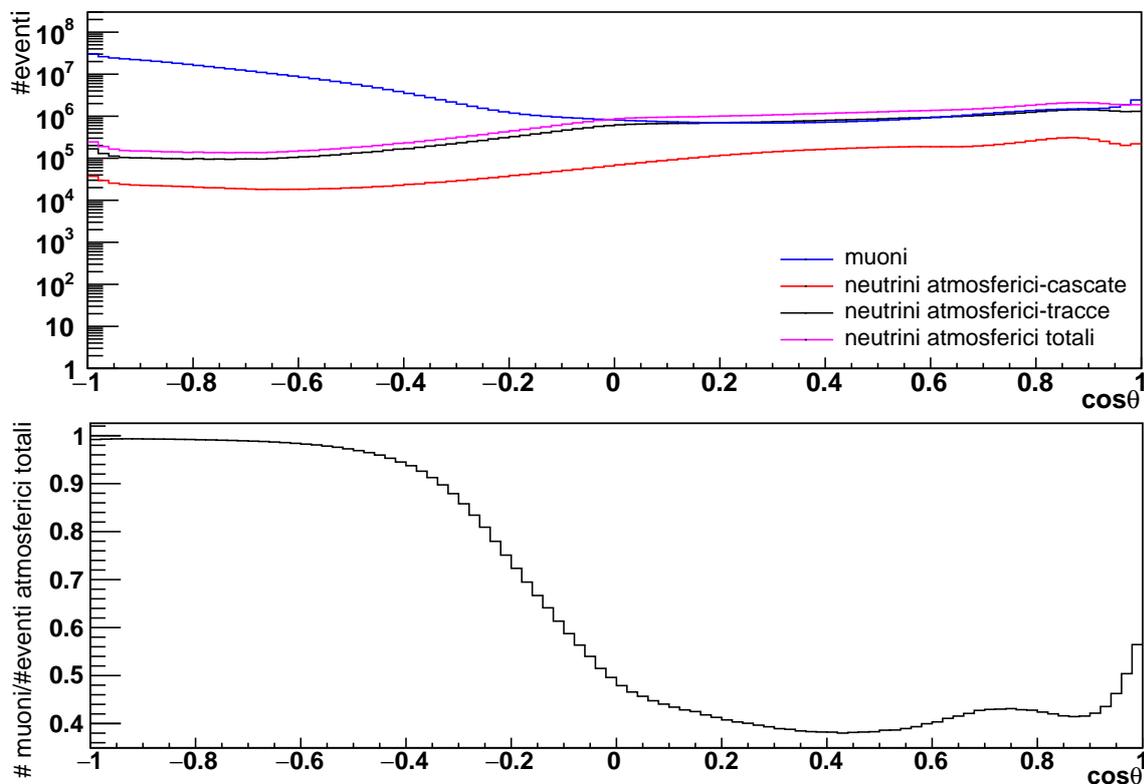


Figura 3.2: In alto, distribuzioni del coseno dell'angolo di zenith dei muoni atmosferici (*blu*), dei neutrini atmosferici ricostruiti come tracce (*nero*) e dei neutrini atmosferici ricostruiti come cascate (*rosso*). In *rosa* la distribuzione cumulativa dei neutrini atmosferici.

Gli eventi diretti verso l'alto (il basso) hanno il $\cos \theta > 0 (< 0)$.

In basso, rapporto tra il numero di muoni atmosferici e il numero totale di eventi atmosferici, in funzione del coseno dell'angolo di zenith.

3.2.2 Caratteristiche dei neutrini atmosferici rilevati

I neutrini atmosferici generati dall'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera, poichè riescono ad attraversare tutto il diametro terrestre, costituiscono un fondo ineliminabile per i telescopi che vogliono rivelare neutrini cosmici.

Sono state sviluppate diverse tecniche per distinguere tra neutrini atmosferici e cosmici diretti verso l'alto. Ad esempio, in presenza di una fonte cosmica puntiforme, ci si aspetta che i neutrini cosmici siano addensati in prossimità della direzione della sorgente, mentre i neutrini atmosferici sono distribuiti uniformemente nel cielo. Altre tecniche si basano sul differente spettro energetico dei neutrini cosmici e di quelli atmosferici.

3.2.3 La selezione degli eventi

Per ridurre gli eventi con direzione verso il basso mal ricostruiti come eventi verso l'alto, si effettua una selezione applicando un taglio sul parametro di qualità del fit di ricostruzione, Λ .

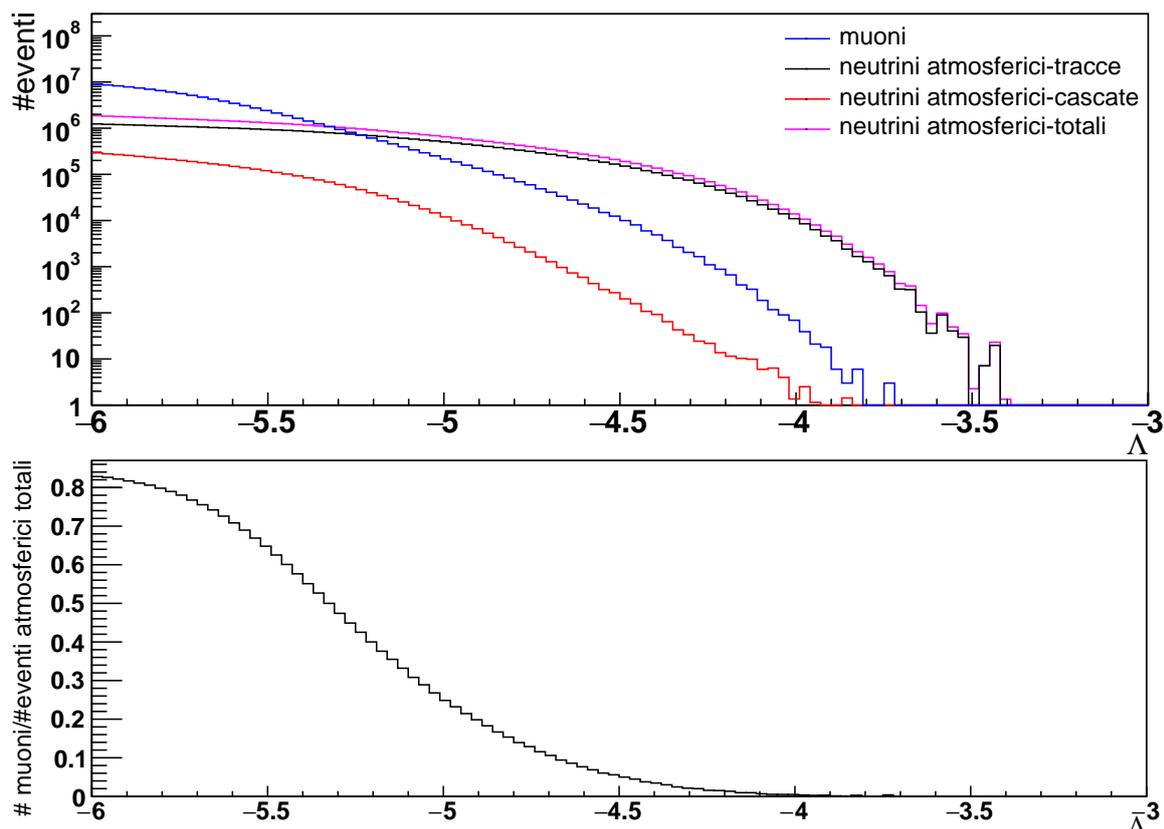


Figura 3.3: In alto, distribuzioni di λ dei muoni atmosferici (*blu*), dei neutrini atmosferici ricostruiti come tracce (*nero*) e dei neutrini atmosferici ricostruiti come cascate (*rosso*). In *rosa* la distribuzione cumulativa dei neutrini atmosferici. In basso, rapporto tra il numero di muoni atmosferici e il numero totale di eventi atmosferici, in funzione di Λ .

La distribuzione del parametro Λ per le componenti atmosferiche si può osservare in Fig.3.3. Le particelle le cui tracce sono state meglio ricostruite dall'algorithm AAFit hanno valori di Λ con valore assoluto piccolo. Essendo l'algorithm AAFit ottimizzato per la ricostruzione delle traiettorie degli eventi di tipo *traccia*, i muoni atmosferici e gli eventi di tipo cascata hanno valori "peggiori" di Λ , cioè con valore assoluto maggiore. Ci si aspetta inoltre che i muoni atmosferici con direzione mal ricostruita abbiano valori di Λ prossimi a -6. Per ridurre il numero di eventi muonici con traccia mal ricostruita,

si sceglie dunque di imporre un taglio degli eventi a $\Lambda > -5.2$.

La scelta del valore -5.2 è dovuta al fatto che, come mostrato in Fig.3.3, il numero di muoni atmosferici con Λ compreso tra -6 e -5.2 è maggiore del numero totale di neutrini atmosferici, mentre per $\Lambda > -5.2$ è vero il contrario.

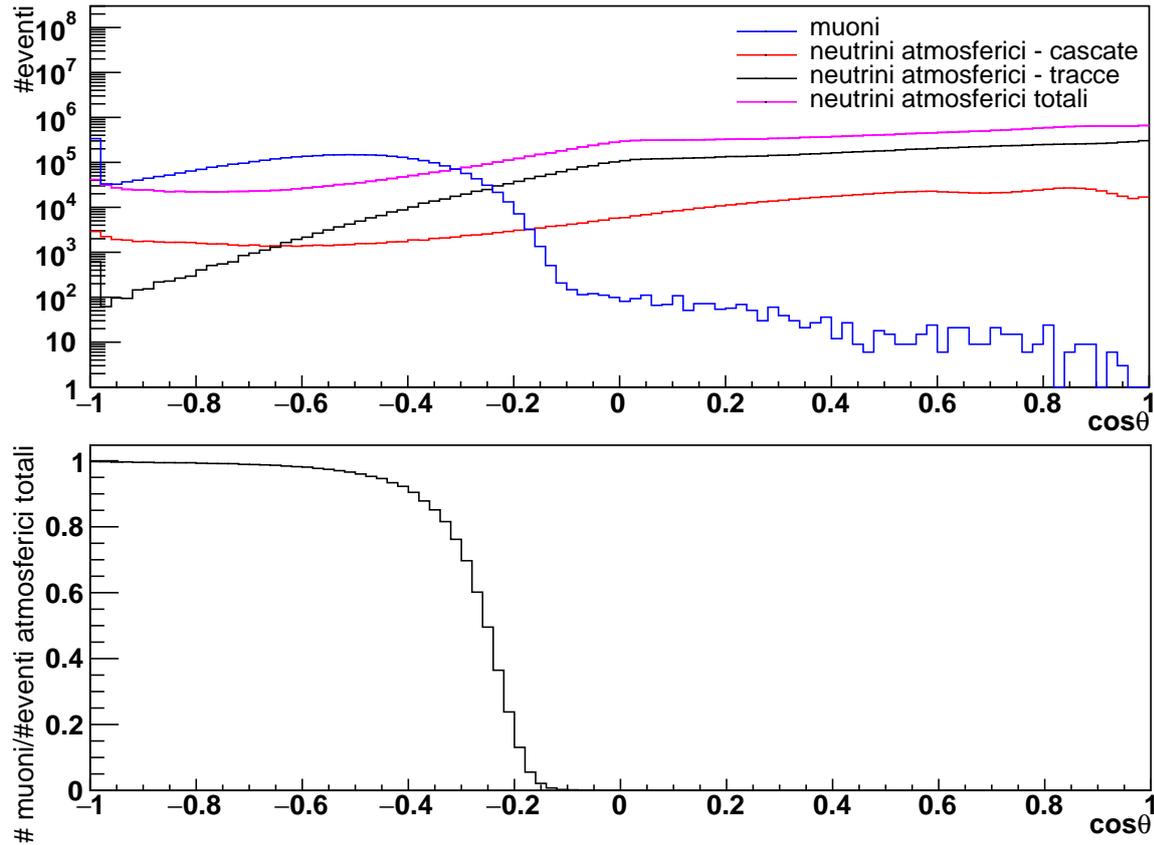


Figura 3.4: In alto, distribuzioni del coseno dell'angolo di zenith dei muoni atmosferici (*blu*), dei neutrini atmosferici ricostruiti come tracce (*nero*) e dei neutrini atmosferici ricostruiti come cascate (*rosso*). In *rosa* la distribuzione cumulativa dei neutrini atmosferici. In basso, rapporto tra il numero di muoni atmosferici e il numero totale di eventi atmosferici.

A differenza della Fig.3.2, è stato imposto il taglio $\Lambda > -5.2$.

La nuova distribuzione del coseno dell'angolo di zenith dei muoni atmosferici e dei neutrini atmosferici ottenuta dopo il taglio in $\Lambda > -5.2$ è mostrata in Fig.3.4. Senza il taglio in $\Lambda > -5.2$, la probabilità che un evento diretto verso l'alto sia un muone atmosferico mal ricostruito è compresa tra il 30% e il 53% (si veda il rapporto tra i muoni

atmosferici e gli eventi atmosferici totali con $\cos\theta > 0$ nell'istogramma in basso della Fig.3.2). Applicando il taglio in $\Lambda > -5.2$, invece, la probabilità che un evento diretto verso l'alto sia un muone atmosferico è ridotta a meno del 5% (si veda il rapporto tra i muoni atmosferici e gli eventi atmosferici totali con $\cos\theta > 0$ nell'istogramma in basso della Fig.3.4).

Il risultato del taglio dunque è una notevole diminuzione della contaminazione di muoni atmosferici mal ricostruiti. La Fig.3.5 mostra la distribuzione bidimensionale della probabilità che un evento atmosferico sia un muone, in funzione dei parametri $\cos\theta$ e β . La probabilità calcolata risulta essere molto vicina a 1 per gli eventi provenienti dall'alto ($\cos\theta < 0$), essendo il flusso dei muoni atmosferici con tale direzione maggiore di molti ordini di grandezza rispetto a quello dei muoni indotti dalle interazioni di neutrini atmosferici. D'altra parte, la probabilità risulta quasi nulla per eventi provenienti dal basso ($\cos\theta > 0$), essendo i muoni non capaci di attraversare tutto il diametro terrestre.

Grazie al taglio effettuato in Λ , che ha eliminato la maggior parte dei muoni con traiettorie mal ricostruite come provenienti dal basso, il risultato ottenuto corrisponde ad una stima affidabile della probabilità che un evento atmosferico sia un muone.

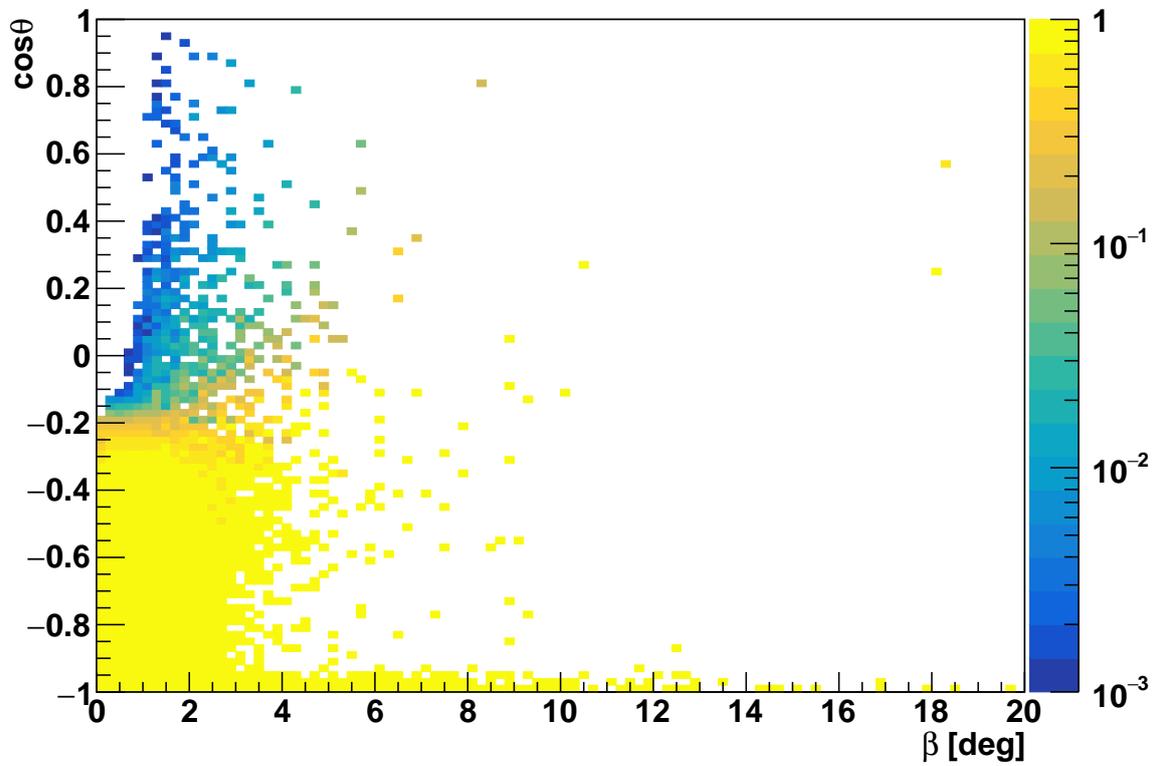


Figura 3.5: distribuzione bidimensionale del rapporto tra muoni atmosferici e eventi atmosferici totali in funzione di β e del coseno dell'angolo di zenith. L'asse z è in scala logaritmica.

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era lo studio della componente atmosferica rivelata da ANTARES, attraverso la caratterizzazione dei muoni e dei neutrini atmosferici, con il fine ultimo di ottenere una buona stima della probabilità che un evento atmosferico sia un muone. Sono stati utilizzati eventi generati da una simulazione Monte Carlo.

Per raggiungere lo scopo, sono state studiate le distribuzioni degli eventi rispetto a tre parametri restituiti dall'algoritmo di ricostruzione delle tracce (λ , β , e $\cos\theta$) e sono stati effettuati dei tagli per eliminare i muoni con traiettoria mal ricostruita.

La stima della probabilità che un evento atmosferico sia un muone è stata effettuata rispetto ai parametri $\cos\theta$ e β , e riportata in un grafico bidimensionale.

Dopo aver effettuato i dovuti tagli sugli eventi, la stima della probabilità è risultata consistente con quanto atteso: la probabilità che un evento con direzione dal basso verso l'alto sia un muone è pressochè nulla. Ciò dimostra l'efficacia dei tagli effettuati: grazie all'eliminazione dei muoni mal ricostruiti, è possibile distinguere i neutrini atmosferici dai muoni grazie alla loro differente direzione di provenienza (muoni dall'alto verso il basso e neutrini dal basso verso l'alto).

Bibliografia

- [1] *Atmospheric Neutrinos*. URL: <https://neutrino-history.in2p3.fr/atmospheric-neutrinos/>.
- [2] P.Zaky *et al* Particle Data Group. «The Review of Particle Physics». In: *Prog. Theor. Exp.Phys.* 083C01 (2020).
- [3] Enrico Fermi. «On the Origin of the Cosmic Radiation». In: *Physical Review* 75.8 (1949), pp. 1169–1174.
- [4] M. Spurio e T.Chiarusi. «High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes». In: *Eur. Phy.J. C*.65 (2010), pp. 649–701.
- [5] Mark Thomson. *Modern Particle Physics*. Cambridge University Press, 2013.
- [6] *Neutrinos and Neutrino Oscillation*. URL: <http://www.hyper-k.org/en/neutrino.html>.
- [7] E.Fermi. «Tentativo di una teoria dei raggi *beta*». In: *Il nuovo cimento* ANNO XI (1934).
- [8] C.L.Cowan *et al*. «Detection of the Free Neutrino: A Confirmation». In: *Science* 124 (1956), p. 130.
- [9] *Introduction to Neutrino Sources*. URL: <https://neutrino-history.in2p3.fr/introduction-to-neutrino-sources/>.
- [10] Thomas K. Gaisser e Spencer R. Klein. «A new contribution to the conventional atmospheric neutrino flux». In: *Astroparticle Physics* 64 (April 2015), pp. 13–17.
- [11] Maurizio Spurio. «Neutrini in profondità: Vita, morte e miracoli dei neutrini rivelati sotto terra, sotto i ghiacci o in fondo al mare». In: *Giornale di Fisica* LVII.3 (2016), pp. 169–205.
- [12] Pasquale Blasi. «Una pioggia energetica, l’origine dei raggi cosmici». In: *Asimmetrie* 24 (2018).
- [13] Giulia Illuminati. «Searches for cosmic neutrino sources with ANTARES, KM3NeT and IceCube and time calibration of ANTARES». In: *PhD thesis, Universitat de València, Valencia, Spain* (2020).

- [14] H. Karttunen et al. *Fundamental Astronomy*. Springer, 2007.
- [15] A. Sánchez-Losa. «Search for high energy cosmic muon neutrinos from variable gamma-ray sources and time calibration of the optical modules of the ANTARES telescope». In: *PhD thesis, Universitat de València, Valencia, Spain* (2012).
- [16] *Cherenkov Radiation*. URL: https://casper.astro.berkeley.edu/astrobaki/index.php/Cherenkov_Radiation.
- [17] *ANTARES: Overview*. URL: <https://antares.in2p3.fr/Overview/index.html>.
- [18] J. A. Aguilar et al. ANTARES Collaboration. «The data acquisition system for the ANTARES Neutrino Telescope». In: *Nucl. Instrum. Meth.* A570 (2006), pp. 107–116.
- [19] ANTARES Collaboration et al. «The ANTARES Collaboration: Contributions to ICRC 2017 Part III: Searches for dark matter and exotics, neutrino oscillations and detector calibration». In: (nov. 2017).
- [20] D. Bailey. «Monte Carlo tools and analysis methods for understanding the ANTARES experiment and predicting its sensitivity to Dark Matter». In: *PhD thesis, Wolfson College, Oxford* (2002).