

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

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

Ricerca di neutrini dal piano galattico con il telescopio ANTARES

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Serena Di Pede

Correlatore:
Dott. Luigi Antonio Fusco

Anno Accademico 2015/2016
Sessione III

*Neutrino, they are very small.
They have no charge and have no mass
And do not interact at all.
The earth is just a silly ball
To them, through which they simply pass
Like dustmaids through a drafty hall
Or photons through a sheet of glass.
They snub the most exquisite gas,
Ignore the most substantial wall,
Cold-shoulder steel and sounding brass,
Insult the stallion in his stall,
And, scorning barriers of class,
Infiltrate you and me! Like tall
And painless guillotines, they fall
Down through our heads into the grass.
At night, they enter at Nepal
And pierce the lover and his lass
From underneath the bed-you call
It wonderful; I call it crass.*

John H. Updike (1932-2009), *Cosmic Gall*

Indice

Introduzione	ii
1 Astrofisica dei Neutrini	1
1.1 Importanza dell'astrofisica con neutrini	1
1.2 Raggi Cosmici	2
1.3 I neutrini	5
1.3.1 Scoperta del Neutrino	5
1.3.2 Modello Standard e Interazione debole	7
1.3.3 Le oscillazioni dei neutrini	7
1.4 Sorgenti di Neutrini	8
1.4.1 Neutrini cosmici	9
1.4.2 Neutrini atmosferici	10
1.4.3 Sorgenti cosmiche dei neutrini	10
2 Telescopi di Neutrini e ANTARES	14
2.1 Principio di rivelazione dei neutrini	14
2.1.1 Interazione dei neutrini nel mezzo	15
2.2 Il fondo di muoni atmosferici	18
2.3 Radiazione Cherenkov	19
2.4 Parametri dei telescopi	20
2.5 L'esperimento ANTARES	21
2.6 Ricostruzione delle tracce	23
3 Ricerca di Neutrini nel piano galattico con ANTARES	25
3.1 Neutrini dal Piano Galattico	25
3.1.1 La Via Lattea	25
3.2 Analisi dei dati	26
3.2.1 Distribuzione dell'angolo zenitale e distribuzione ener- getica	27
3.2.2 Coordinate galattiche ed equatoriali celesti	29

3.2.3	Metodo di simulazione dei dati di fondo con la tecnica di <i>scrambling</i>	31
3.2.4	Analisi con limiti sul parametro energetico	33
	Conclusioni	34
	Appendice	37
	A Sistemi di coordinate celesti	37
	Bibliografia	37
	Ringraziamenti	39

Introduzione

L'astrofisica delle particelle è il settore della scienza che indaga i problemi di natura astrofisica utilizzando apparati sperimentali tipici della fisica delle particelle. Questa disciplina studia i fenomeni cosmici per determinare le proprietà della materia celeste e quelli le cui condizioni non possono essere attuate nei laboratori. Essa si interessa principalmente dell'origine e della natura dei Raggi Cosmici (RC, scoperti nel 1912). Agli inizi del secolo scorso l'indagine, fino ad allora legata prettamente ai fotoni, si estese all'utilizzo dei Raggi Cosmici, portando innovazioni e scoperte sia nel campo della fisica delle particelle che nel campo dell'astrofisica. In particolare, negli ultimi anni l'astrofisica delle particelle si è focalizzata sullo studio dei neutrini.

La relazione è divisa in tre parti. Nel primo capitolo sono trattate le caratteristiche generali dei Raggi Cosmici e dei neutrini, dalla scoperta della particella fino ad un accenno al fenomeno dell'oscillazione del sapore. Sono analizzate quindi le sorgenti di neutrini, con particolare attenzione agli acceleratori di RC galattici ed extra-galattici. Nel secondo capitolo è descritto il funzionamento dei telescopi di neutrini, in particolare ANTARES, dal quale sono stati presi i dati utilizzati nell'analisi. Questo è il più grande telescopio di neutrini operativo nell'emisfero Nord. L'ultima parte si concentra sull'analisi vera e propria. Si è confrontato il numero di neutrini atmosferici ricostruiti in funzione delle coordinate galattiche con quelli risultati dallo *scrambling* delle coordinate galattiche stesse, sia nell'area di cielo totale che nella regione centrale della Galassia. Sono stati effettuati quindi tre tagli di selezione sul parametro che esprime la variazione energetica della particella, di modo che aumentando l'energia si registrassero un minor numero di eventi di fondo.

Capitolo 1

Astrofisica dei Neutrini

1.1 Importanza dell'astrofisica con neutrini

L'osservazione di neutrini solari e di neutrini dalla supernova 1987A ha dato inizio ad un nuovo campo d'osservazione. L'astrofisica con neutrini di alta energia è una disciplina giovane, nata dalla necessità di estendere l'astronomia classica oltre l'usuale radiazione elettromagnetica. La maggior parte delle informazioni che abbiamo del nostro Universo proviene dalle osservazioni dei raggi- γ . I fotoni, essendo particelle stabili ed elettricamente neutre, sono molto facili da rivelare in un ampio intervallo di energie, e dallo studio del loro spettro si possono dedurre informazioni sulle proprietà fisiche della sorgente. Il loro utilizzo, tuttavia, ha alcuni limiti. In primo luogo, se vogliamo studiare le regioni più dense e calde del cosmo (come i nuclei delle stelle), motori di molte sorgenti astrofisiche, queste risultano opache ai fotoni e quindi non indagabili direttamente. In secondo luogo, la trasmissione di raggi- γ di alta energia ($E_\gamma > 10\text{TeV}$) nell'Universo è alterata dall'interazione con la radiazione cosmica di fondo (CMB) e la radiazione infrarosso (IR). Questa può produrre coppie di elettrone-positrone (secondo il processo $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$), il che limita di fatto l'utilizzo dei raggi- γ .

In alternativa, si possono utilizzare sonde diverse come i Raggi Cosmici (si veda il paragrafo successivo 1.2), particelle relativistiche di origine extra-solare con uno spettro molto ampio di energia. Essi sono costituiti da una componente carica e una neutra. La prima è formata principalmente da protoni i quali subiscono sia una deviazione della loro traiettoria a causa dell'influsso dei campi magnetici galattici ed extra-galattici che fa perdere l'informazione della sorgente originaria, sia l'interazione con la CMB (effetto Greisen-Zatsepin-Kuzmin, per $E > 10^{19}\text{eV}$) che restringe l'origine dei protoni di alta energia visti dalla Terra ad una piccola porzione dell'Universo, del-

l'ordine di $\sim 100\text{Mpc}$ [1]. La seconda è formata da fotoni e neutrini: questi ultimi hanno bassa probabilità di interagire con la materia interstellare e raggiungono la Terra quasi indisturbati. Tali caratteristiche li rendono sonde molto efficienti ma anche particolarmente difficili da rivelare.

1.2 Raggi Cosmici

Nel 1897 Henri Becquerel, studiando il fenomeno della fosforescenza nei sali di uranio, scoprì che questi emettevano una intensa radiazione anche in assenza di luce solare: era la prima evidenza sperimentale della radioattività, manifestazione dell'interazione debole. A seguito di questa scoperta, agli inizi del '900, iniziarono gli studi sulla radioattività naturale e si ipotizzò che la ionizzazione dell'aria fosse causata dalla radiazione emessa dalla crosta terrestre, ricca di minerali (elementi radioattivi)¹. Il livello di ionizzazione sarebbe dovuto diminuire con l'aumentare dell'altitudine: questa ipotesi fu smentita dagli esperimenti del fisico austriaco Victor Hess. Egli organizzò tra il 1910 e il 1913 una decina di spedizioni in pallone trovando che inizialmente la ionizzazione diminuiva con l'altitudine e poi aumentava rapidamente. L'esperimento decisivo fu effettuato nel 1912: il pallone, ad una quota $> 5\text{km}$ registrò una ionizzazione doppia rispetto ai valori misurati a terra. Hess fu quindi in grado di trarre la seguente conclusione: *"I risultati delle mie osservazioni si spiegano meglio assumendo che una radiazione di alto potere ionizzante entri dall'alto nella nostra atmosfera"*. Questa radiazione, che proveniva dallo spazio esterno, prese il nome di "Raggi Cosmici" (RC) da Robert Millikan nel 1925. [2]

La radiazione cosmica è interamente composta da nuclei pesanti e particelle elementari che si muovono a velocità relativistiche. Le particelle accelerate direttamente da sorgenti astrofisiche in arrivo sulla sommità dell'atmosfera sono definite *primarie* e sono circa 10^5 per m^2 e per secondo. Queste colpiscono costantemente i gusci più esterni dell'atmosfera terrestre interagendo con gli atomi e le molecole, dando origine a sciame di particelle dette *secondarie*. Le particelle secondarie in arrivo al livello del mare sono ridotte di un fattore circa 1000. Questo effetto ha un'importante conseguenza per la vita sulla Terra. Il passaggio dei RC secondari (principalmente elettroni e muoni) induce effetti biologici molto meno dannosi di quelli che produrrebbero i primari (protoni e nuclei pesanti): la radiazione provoca infatti (tramite il processo di ionizzazione) radicali liberi che portano all'invecchi-

¹L'ipotesi era stata suggerita dal seguente fenomeno, già osservato nel corso dell'Ottocento: gli elettroscopi, pur accuratamente isolati, continuavano a scaricarsi segnalando la presenza di cariche elettriche che ionizzavano l'aria all'interno degli schermi metallici.

amento della pelle o che, nei nuclei delle cellule, possono produrre malfunzionamenti delle stesse. I Raggi Cosmici primari sono costituiti per 90% da protoni ad alta energia, per il 9% da nuclei di elio (particelle α), mentre il restante 1% è costituito da nuclei più pesanti dell'elio (fotoni ed elettroni). Lo spettro energetico della radiazione va da $\sim 10^9$ eV a 10^{20} eV e al di sotto di qualche GeV il flusso risente di modulazioni dovute al vento solare. Lo spettro energetico dei raggi cosmici primari (vedi Figura 1.1) segue la seguente legge di potenza:

$$\left[\frac{dN}{dE}\right] = K \cdot E^{-\Gamma} (\text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{GeV}^{-1}) \quad (1.1)$$

dove il coefficiente Γ assume i seguenti valori:

- $\Gamma = 2.7$ fino a $E \sim 3 \cdot 10^{15}$ eV;
- $\Gamma = 3.1$ da $E \sim 3 \cdot 10^{15}$ eV a $E \sim 10^{19}$ eV, effetto che risulta nel cambiamento di pendenza della curva dello spettro (*ginocchio*);
- per $E > 10^{19}$ eV, la curva subisce un appiattimento (*caviglia*) e si assume che questi Raggi Cosmici siano di origine extragalattica.

Per quanto riguarda la misura dell'energia dei RC, essa può essere effettuata direttamente tramite satelliti o palloni stratosferici fino a $\sim 10^{14}$ eV. Grazie a queste misurazioni è stato possibile osservare l'esatta composizione della radiazione cosmica perché questi esperimenti sono sostanzialmente degli spettrometri di massa, in grado di misurare la carica, l'energia e la massa della particella. Per energie superiori a 10^{14} eV, a causa della diminuzione del flusso di Raggi Cosmici, diventa necessario procedere con misure indirette, utilizzando grandi esperimenti posti sulla superficie terrestre. Si osserva lo sciame di particelle secondarie generate dal raggio cosmico primario nell'atmosfera e si ricostruisce l'energia dello stesso osservando le particelle secondarie che giungono al rivelatore posto a terra.

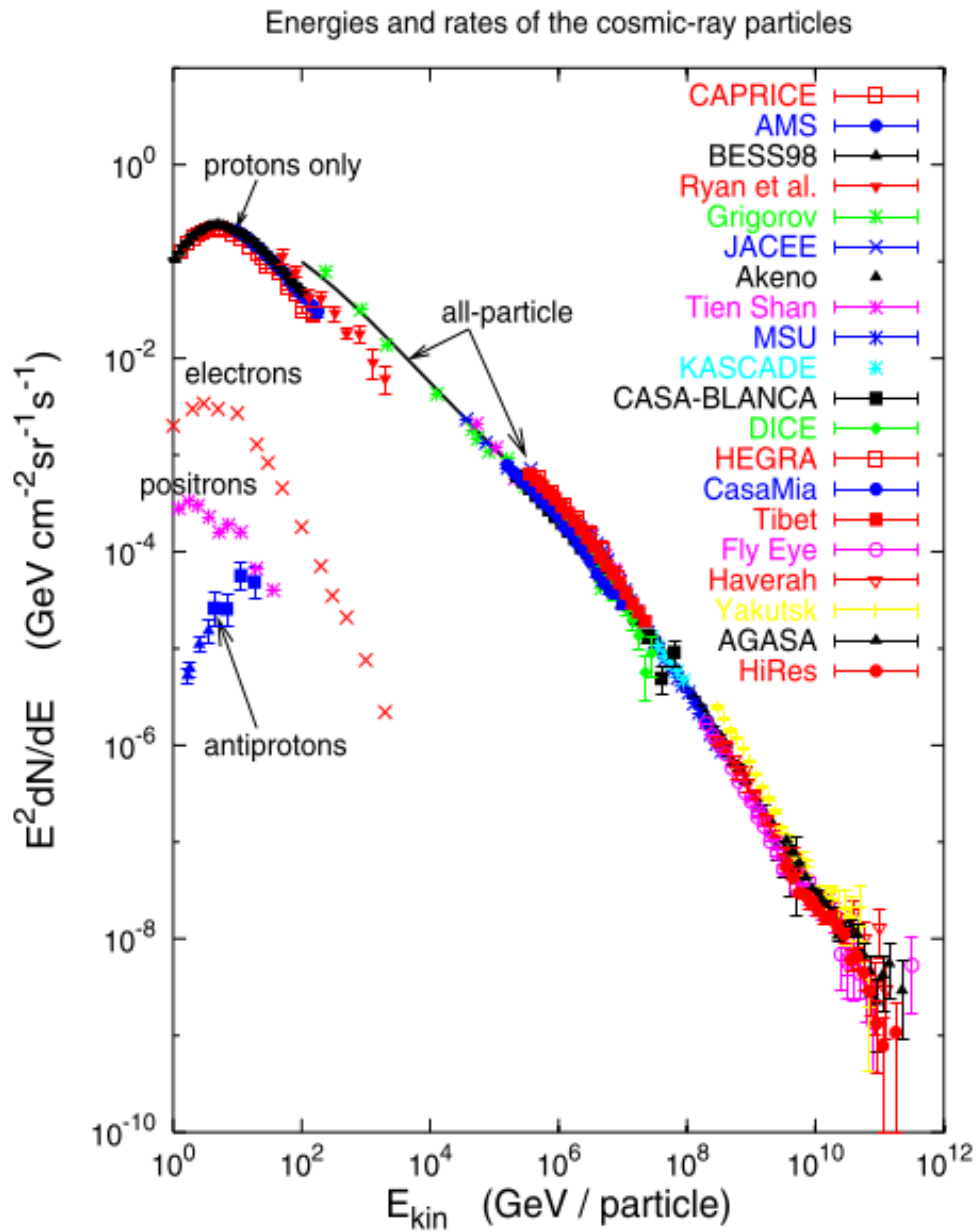


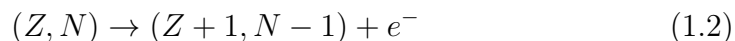
Figura 1.1: Spettro dei Raggi Cosmici ($10^9 \text{eV} < E < 10^{20} \text{eV}$) misurato sulla Terra da diversi esperimenti. Si può notare che l'asse verticale è stato moltiplicato per E^2 . Inoltre, nel dominio delle basse energie, è riportato anche il contributo di protoni, elettroni, positroni e antiprotoni, quando la misura è disponibile. [1]

1.3 I neutrini

Introdotta da Pauli nel corso degli anni '30 per spiegare la cinematica del decadimento beta nucleare, battezzato da Fermi, il neutrino è la particella più elusiva che conosciamo, e quando esso fu ipotizzato si dubitava che potesse essere mai rivelato. I neutrini sono continuamente prodotti da oggetti astrofisici, analogamente ai fotoni, per esempio dalle stelle durante il loro funzionamento, dalle esplosioni conseguenti il collasso gravitazionale, dalla radioattività presente nei sistemi planetari. Ma anche possono essere prodotti artificialmente dall'uomo tramite reattori nucleari e da acceleratori di particelle. Possono essere di energia molto bassa ed arrivare ad energie elevatissime: neutrini di energia $> 10^6$ volte quella corrispondente all'energia di massa del protone sono stati rivelati anche se con grandi difficoltà perché necessitano di enormi apparati sperimentali, generalmente posti underground per meglio essere schermati da altre particelle che penetrano l'atmosfera. [3]

1.3.1 Scoperta del Neutrino

L'esistenza di questa nuova particella venne proposta nel contesto del decadimento β per spiegare lo spettro non monocromatico degli elettroni prodotti. Il decadimento β è una trasmutazione di un elemento (Z, N) , ove Z è il numero di protoni e N quello di neutroni, verso un nucleo $(Z+1, N-1)$ (decadimento β negativo) oppure $(Z-1, N+1)$ (decadimento β positivo). Era noto sin dall'inizio del 1900 che nel caso di transizioni β negative un elettrone veniva emesso dal nucleo:



Per la conservazione dell'energia e dell'impulso il nucleo prodotto e l'elettrone dovrebbero rinculare nella stessa direzione e verso opposto. Tuttavia, poiché il nucleo ha massa almeno migliaia di volte maggiore di quella dell'elettrone², la sua velocità di rinculo è trascurabile e ci si aspetta che l'elettrone sia emesso con energia costante (vedi Figura 1.2) e coincidente in pratica con tutta l'energia rilasciata nel decadimento. Si scopre in realtà che l'elettrone possiede uno spettro continuo di energia, come se il decadimento β non rispetti la legge di conservazione dell'energia (e del momento angolare).

Questo portò a formulare l'ipotesi dell'esistenza di una particella (precisamente l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ nel decadimento β negativo), priva di carica elettrica che trasportava l'energia, la quantità di moto e il momento angolare che risultavano mancanti nelle osservazioni sperimentali. Nel 1934 venne battezzata

²Scriviamo le masse a riposo del protone, neutrone ed elettrone: $M_p = 938,27 \frac{MeV}{c^2}$, $M_n = 939,56 \frac{MeV}{c^2}$, $M_e = 0,511 \frac{MeV}{c^2}$.

neutrino da Enrico Fermi al quale è dovuta anche la teoria matematica che permette di descrivere il decadimento beta (teoria delle interazioni deboli). In questa teoria, Fermi suggeriva anche la possibilità di una reazione in cui i neutrini potevano interagire con la materia ³: la cattura di un antineutrino da parte di un nucleo, accompagnata dall'emissione di un elettrone.

L'esistenza dell' $\bar{\nu}_e$ venne affermata nel 1954 negli USA dai fisici C. Cowan e F. Reines che utilizzarono come sorgente dei neutrini un reattore nucleare della potenza di circa 150 MegaWatt. Pochi anni dopo questa scoperta venne identificato il neutrino della seconda famiglia, il neutrino muonico ν_μ , e nel 2000 (esperimento DONUT negli USA) venne rivelata la prima interazione con i neutrini tauonici ν_τ . [3]

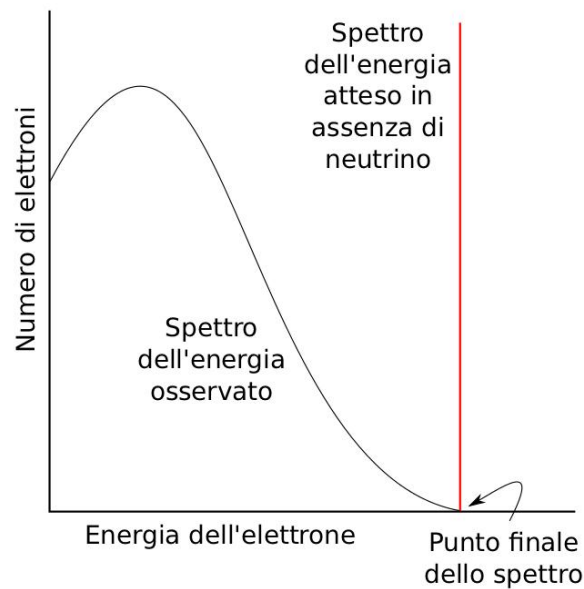


Figura 1.2: Forma della distribuzione dell'energia trasportata dall'elettrone nel decadimento β di un nucleo. [3]

³Per osservare un oggetto dobbiamo rivelare la luce riflessa dalla sua superficie, essendo la luce la componente della radiazione elettromagnetica visibile al nostro occhio. Le particelle però risultano di dimensione molto minore rispetto alle lunghezze d'onda della luce visibile ($400nm < \lambda < 700nm$) quindi non possono rifletterla. L'unica possibilità è rivelare la radiazione emessa quando le particelle interagiscono con la materia. Il neutrino presenta però un problema perché ha una probabilità d'interazione molto piccola al contrario dei raggi- γ .

1.3.2 Modello Standard e Interazione debole

Nel Modello Standard il neutrino ν è classificato tra le particelle elementari, in particolare tra i Leptoni, i quali sono suddivisi in sei famiglie: tre doppietti leptone-neutrino e tre antileptone-antineutrino $\begin{pmatrix} \nu_l \\ l \end{pmatrix}$ dove $l = e, \mu, \tau$ è il sapore del leptone. I neutrini hanno carica elettrica e di colore nulla e risentono quindi soltanto dell'interazione debole, che agisce sul sapore. Hanno spin $s = \frac{1}{2}$ quindi sono fermioni, cioè ubbidiscono alla statistica di Fermi-Dirac. Il Modello Standard prevede che essi abbiano massa nulla, mentre i risultati sperimentali affermano che, anche se piccola, ne sono dotati. Questo è dovuto al fenomeno detto "oscillazione del sapore" (si veda il paragrafo successivo 1.3.3). Dal momento che l'interazione debole ha un corto raggio d'azione, la sezione d'urto d'interazione neutrino-materia è molto bassa. Ne consegue che la lunghezza d'interazione dei neutrini è molto grande, perciò i rivelatori devono avere volumi grandi oppure elevata densità di materia.

L'interazione debole ha tre mediatori (bosoni): due carichi, W^+ e W^- , e uno neutro, Z^0 . In base alla carica del bosone coinvolto si distinguono due processi:

- processi a Corrente Neutra (CN) se le interazioni avvengono attraverso lo scambio del bosone Z^0 ;
- processi a Corrente Carica (CC) quando è scambiato il bosone W^+ oppure il bosone W^- .

1.3.3 Le oscillazioni dei neutrini

Lo studio dei neutrini di origine naturale ha contribuito, tra il 1998 e il 2002, alla scoperta delle *oscillazioni dei neutrini*, un fenomeno quantomeccanico per il quale i neutrini possono cambiare il loro sapore "in volo". La scoperta è stata confermata anche con esperimenti che utilizzano neutrini originati da acceleratori di particelle (CERN in Europa, FermiLab negli USA, KEK in Giappone).

Nel Modello Standard del microcosmo i tre neutrini ν_e, ν_μ, ν_τ hanno massa nulla e ciascuno conserva il proprio sapore. Negli anni '60, da un'idea di Bruno Pontecorvo, si iniziò ad ipotizzare la possibilità dell'oscillazione di un neutrino di un certo sapore in un neutrino di sapore differente. Questo fenomeno è possibile nella teoria solo se i neutrini hanno massa non nulla e differente tra i sapori. Se il neutrino nasce (ad esempio) come ν_e , possiamo ipotizzare che quando si propaga lo fa come una miscela di tre diversi stati in cui domina un certo autostato. Possiamo definire gli autostati di massa

ν_1, ν_2, ν_3 e quelli di interazione ν_e, ν_μ, ν_τ , ed esprimere questi ultimi come combinazione lineare di quelli di massa attraverso certi elementi di matrice U_{lm} :

$$\nu_l = \sum_{m=1}^3 U_{lm} \nu_m. \quad (1.3)$$

La parola oscillazione si riferisce proprio al fatto che il sapore osservato (autostato d'interazione) cambia con legge oscillatoria mentre il neutrino si allontana dalla sorgente. Questo perché le tre componenti si propagano con velocità diverse a causa della diversa massa e quindi in un punto lontano, ad un certo istante di tempo, la particella si presenta diversa da come era stata prodotta nel punto di partenza. [3]

1.4 Sorgenti di Neutrini

Le sorgenti di Neutrini sono molteplici [4]. Muovendoci dalle sorgenti più vicine a quelle più lontane abbiamo:

Neutrini terrestri Prodotti dal decadimento di elementi radioattivi (come l'Uranio) presenti nei minerali presenti nell'interno della Terra. I nuclei decadono emettendo energia sotto forma di calore e antineutrini elettronici. La loro rivelazione è importante per comprendere l'importanza della radioattività naturale per mantenere gli equilibri del nostro pianeta.

Neutrini atmosferici Derivano dall'interazione tra Raggi Cosmici e atmosfera terrestre: la collisione dei protoni dei RC con i nuclei degli atomi porta alla produzione di particelle secondarie che decadendo originano neutrini e antineutrini (in prevalenza elettronici e muonici). I neutrini atmosferici hanno permesso di evidenziare il fenomeno delle oscillazioni di sapore.

Neutrini solari Emessi durante le reazioni di fusione termonucleare, dallo studio del numero di neutrini emessi dal Sole e dall'energia solare si possono ottenere importanti informazioni per la comprensione dei processi fisici alla base del funzionamento del Sole. Anche gli esperimenti condotti sui neutrini solari hanno evidenziato la presenza del fenomeno delle oscillazioni di sapore.

Neutrini cosmici Derivano dal decadimento di pioni o kaoni carichi prodotti dall'interazione dei Raggi Cosmici di alta energia con la materia (o

con il campo di radiazione) in prossimità della sorgente. La loro energia è proporzionale a quella dei protoni di alta energia da cui derivano. Possono essere rivelati solo sulla Terra tramite rivelatori di grandi dimensioni sotterranei, attraverso la produzione di leptoni secondari e sciami adronici quando interagiscono con il materiale del rivelatore.

Neutrini fossili Prodotti pochi istanti dopo il Big-Bang, questi neutrini e antineutrini di ogni sapore sono sopravvissuti fino ad oggi diminuendo man mano la loro energia a causa dell'espansione dell'Universo stesso. Si propagano in maniera isotropa nell'Universo e hanno un'energia estremamente bassa. Attualmente sembra praticamente impossibile catturare questi neutrini.

I neutrini possono anche essere prodotti artificialmente dall'uomo; tra le sorgenti artificiali di neutrini citiamo:

Neutrini da acceleratori di particelle Gli acceleratori di particelle sono in grado di produrre e accelerare particelle cariche (tipicamente protoni, elettroni o nuclei atomici). Facendo collidere i protoni accelerati con uno strato compatto di materiale si riescono a produrre particelle che decadendo originano neutrini e/o antineutrini di diversi sapori.

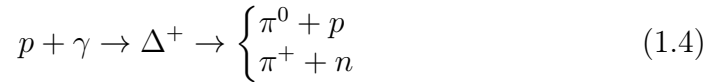
Neutrini da reattori nucleari Durante le reazioni di fissione nucleare che avvengono all'interno di un reattore nucleare vengono prodotti, oltre a neutroni e altri prodotti di fissione, anche antineutrini elettronici.

I neutrini di nostro interesse sono quelli di alta energia, prodotti dall'interazione di protoni e nuclei fortemente accelerati da sorgenti galattiche ed extragalattiche (RC) con altri nuclei o gas di fotoni. Dal momento che i meccanismi che producono RC possono produrre anche neutrini e fotoni di alta energia, le sorgenti candidate ad essere acceleratori di RC sono le stesse per la produzioni di neutrini e raggi- γ di alta energia.[1] Si analizza quindi, più nel dettaglio, la sezione dei neutrini cosmici e quella dei neutrini atmosferici, che costituiscono il segnale di fondo principale.

1.4.1 Neutrini cosmici

Il primo neutrino di alta energia (denominato "Ernie") è stato rivelato il 3 gennaio 2012 da IceCube, il più grande rivelatore di neutrini al mondo, posto in Antartide. *“Questa è la prima indicazione di neutrini ad altissima energia provenienti dall'esterno del nostro Sistema Solare, con energie superiori a un milione di volte rispetto a quelli osservati nel 1987 in connessione con la supernova vista nella Grande Nube di Magellano”.* [5]

I neutrini cosmici sono degli oggetti estremamente importanti perché forniscono informazioni preziose sui fenomeni più energetici nell'Universo. Sono generati attraverso *processi adronici* che consistono nell'interazione di protoni accelerati nei pressi degli emettitori di RC per mezzo della risonanza Δ^+ :



Il decadimento dei pioni neutri π^0 porta all'emissione di raggi- γ con energia dell'ordine del TeV ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$); il decadimento dei pioni carichi π^\pm produce neutrini. Questo è chiamato *modello adronico astrofisico*.

1.4.2 Neutrini atmosferici

Quando i Raggi Cosmici incidono sugli strati superiori dell'atmosfera (altezza 10 ÷ 20 km) producono un certo numero di particelle instabili (sciame di particelle secondarie). Per $E_\mu > 100$ GeV, i Kaoni (K^0, K^\pm) sono la fonte dominante per la produzione di neutrini. Per $E_\mu \sim \text{GeV}$, il decadimento dei pioni carichi π^\pm produce muoni e neutrini muonici:



A loro volta i muoni possono decadere nel modo seguente:



Il flusso di neutrini atteso da questi decadimenti è $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$, ma a causa dell'oscillazione del sapore dei neutrini viene misurato un flusso pari $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$ [1].

1.4.3 Sorgenti cosmiche dei neutrini

Cercare le sorgenti cosmiche dei neutrini vuol dire trovare le sorgenti di accelerazioni dei RC. In base all'intervallo di energia considerato, i RC possono essere accelerati da diverse sorgenti. In prima approssimazione, la classificazione può essere fatta in base a dove avviene la produzione di neutrini, quindi alla distanza dalla Terra: sorgenti *locali*, *galattiche* e *extra-galattiche*.

Ci sono diverse ipotesi sui processi di accelerazione dei RC. Fino ad $E \sim 10^{14}$ eV, si può affermare che il meccanismo di Fermi è responsabile dell'accelerazione di particelle: questo meccanismo comprende processi iterativi di *scattering* con fronti d'onda piani, come le onde d'urto generate in seguito

ad eventi esplosivi (ad esempio, collassi gravitazionali). In ciascun processo di scattering, ogni particella con energia E guadagna circa $\Delta E \sim \beta E$, con $\beta \sim 10^{-2}$. La produzione attraverso *processi adronici* consiste nell'interazione di protoni accelerati nei pressi degli emettitori di RC per mezzo della risonanza Δ^+ (vedi equazione (1.4)).

SORGENTI GALATTICHE

Supernova remnants (SNR) I resti di supernovae sono i siti più accreditati per l'accelerazione di neutrini. Le particelle sono accelerate tramite il meccanismo di Fermi. Le stelle molto massive esplodono per collasso gravitazionale: la pressione interna, generata dalle reazioni termonucleari, non è più in grado di sostenere il peso degli strati esterni che collassano. Lo scontro tra gli strati esterni ed il nucleo produce un'onda d'urto che libera $\sim 90\%$ dell'energia sotto forma di neutrini, che arrivano sulla terra in tempi molto brevi ed in grande numero. A parità di intensità emessa sotto forma di neutrini, il flusso osservabile sarà tanto maggiore quanto più essa è vicina. Dopo l'esplosione spesso si forma una nebulosa con al centro una stella di neutroni o una pulsar. Questi oggetti sono SNR particolari poiché soffiano dei venti equatoriali e, in alcuni casi, getti di materiale molto veloce dentro la nebulosa. Si pensa che in queste nebulose, dette *Pulsar Wind Nebulae (PWNe)*, i RC vengano accelerati attraverso processi adronici.

Microquasar Sistemi di stelle binarie che emettono in X ed in cui sono presenti jet radio relativistici. Generalmente sono costituiti da un oggetto massivo, come un buco nero o una stella di neutroni, ed una stella che fornisce massa al primo oggetto, generando jet. Simili ai Nuclei Galattici Attivi, sia morfologicamente per la presenza dei jets, sia fisicamente per i processi di formazione del disco di accrescimento e dell'espulsione di materia, le Microquasar sono state ipotizzate come i siti di accelerazione galattica per particelle cariche con $E \sim 10^{16} \text{eV}$.

SORGENTI EXTRA-GALATTICHE

L'ipotesi di sorgenti extra-galattiche di neutrini di alta energia è una conseguenza diretta dell'osservazione dei Raggi Cosmici ultra-energetici ($E \geq 10^{19} \text{eV}$). Come per questi ultimi, i principali candidati di sorgenti di neutrini sono i Nuclei Galattici Attivi (AGN). Altri potenziali acceleratori sono i GRB, *γ -Ray Burst*.

Active Galactic Nuclei (AGN) Sono galassie al cui centro è presente un buco nero supermassivo ($M \sim 10^6 \div 10^9 M_{\odot}$). Sono tra gli oggetti più energetici dell'Universo poiché emettono l'energia di una intera galassia ma sono estremamente compatti. Il buco nero attrae una grande quantità di materia, che va a formare il *disco di accrescimento*, di forma toroidale, rilasciando così una grande quantità di energia gravitazionale, da cui consegue l'estrema luminosità del centro galattico rispetto al resto della galassia ($L > 10^{47} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$). Gli AGN emettono fotoni di tutte le frequenze, dalle onde radio ai raggi γ con energie dell'ordine del TeV e una singola emissione può continuare per giorni. Esistono due differenti modelli per la generazione dei neutrini negli AGN, che differiscono sostanzialmente per il luogo di produzione dei neutrini:

- Modello Core: i neutrini sono prodotti nell'interazione dei protoni, accelerati con il meccanismo di Fermi, con la materia del disco di accrescimento;
- Modello a Jet: parte della materia che cade nel buco nero viene riemessa in jet relativistici, posti sull'asse di rotazione del buco nero e ortogonalmente al piano di accrescimento. I protoni sono accelerati nei jet sempre con il meccanismo di Fermi. I bersagli dei protoni di alta energia sono i fotoni ultravioletti termici o i fotoni prodotti per radiazione di sincrotrone dagli elettroni. I prodotti dell'interazione sono dei pioni che successivamente decadono in fotoni e neutrini.

Interessanti AGN sono i *blazar*, in cui uno dei due jet è allineato con l'osservatore. Grazie all'elevato flusso del getto, sono individuabili come sorgenti puntiformi.

Gamma Ray Bursts (GRB) I GRB sono lampi di raggi- γ , seguiti spesso da un'emissione negli spettri radio, ottico ed X. Estremamente intensi, capaci di emettere un'energia simile alla massa del Sole in frazioni di secondo o pochi secondi. Le possibili cause di una emissione così intensa non sono ancora ben note, si ritiene che tali energie possano essere prodotte dal collasso di stelle massive o dalla fusione di stelle di neutroni con dei buchi neri. L'energia totale rilasciata dal fenomeno è dell'ordine di $10^{51} \div 10^{54}$ erg. Poiché i GRB emettono fotoni di altissima energia (superiore al MeV) sono degli ottimi candidati per l'emissione di neutrini di alta energia rivelabili da telescopi molto estesi. Il modello attuale per i GRB è detto *fireball model*. Esso prevede che il collasso

di una stella generi una fireball in espansione relativistica (con fattore di Lorentz $\Gamma \sim 10^{2.5}$). Il fronte d'onda della fireball interagisce con la materia circostante producendo pioni il cui decadimento produce fotoni e neutrini di alta energia. Una caratteristica molto importante per la rivelazione di tali sorgenti è che essi hanno un fondo pressoché nullo. Si è osservato che l'energia rilasciata dai GRB è all'incirca la stessa necessaria a produrre i Raggi Cosmici di maggiore energia mai osservata.

Capitolo 2

Telescopi di Neutrini e ANTARES

2.1 Principio di rivelazione dei neutrini

Un rivelatore di neutrini di alta energia agisce da telescopio quando la direzione dei neutrini rivelati è ricostruita con una precisione dell'ordine di $\sim 1^\circ$ o anche più piccola [1]. L'idea del telescopio di neutrini (M. A. Markov, 1960) si basa sulla possibilità di misurare la luce Cherenkov emessa da particelle cariche (leptoni) altamente energetiche prodotte dalle interazioni dei neutrini all'interno o vicino il volume del rivelatore stesso, posto in elevate profondità. La sezione d'urto e i flussi attesi per i neutrini astrofisici sono estremamente bassi, ecco perché si utilizzano rivelatori di enormi dimensioni. Occorre quindi costruire una matrice di un gran numero di rivelatori all'interno di un mezzo trasparente, come l'acqua di mare (esperimento ANTARES e in futuro KM3NeT) o il ghiaccio antartico (esperimento IceCube). Si ha così un bersaglio di grandi dimensioni, che rappresenta uno scudo contro l'arrivo di particelle secondarie prodotte dai Raggi Cosmici, ed è il mezzo trasparente dove si propaga la luce Cherenkov. Dalla misura del tempo di arrivo e dal numero dei fotoni Cherenkov può essere determinato il sapore, l'energia e la direzione del neutrino.

Uno dei problemi nella rivelazione di neutrini astrofisici è quello dell'attenuazione, se non eliminazione, delle *sorgenti di fondo*, costituite in prevalenza da *muoni atmosferici* e *neutrini atmosferici*, prodotti dall'interazione dei Raggi Cosmici con l'atmosfera terrestre. Scendendo ad elevate profondità marine, il flusso dei μ atmosferici risulta ridotto di circa un milione di volte rispetto a quello al livello della superficie terrestre, a causa della perdita di energia che i muoni subiscono nell'attraversare l'acqua [3].

I muoni che arrivano al rivelatore sono divisi in due tipologie in base al verso di propagazione: muoni dal basso verso l'alto, e viceversa.

2.1.1 Interazione dei neutrini nel mezzo

Come già detto nella sezione 1.3.2 (pag 7), esistono due tipi di interazione di neutrini di alta energia con un nucleone N :

- Interazione a corrente carica (CC): $\nu_l + N \rightarrow l + X$, dove nello stato finale viene riprodotto il leptone carico ($l = e, \mu, \tau$) corrispondente al neutrino interagente, che trasporta in media oltre il 50% dell'energia del neutrino incidente, mentre la rimanente energia è usata per creare particelle adroniche (X).¹
- Interazione a corrente neutra (NC): $\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X$, dove parte dell'elevata energia del neutrino è usata per creare molte particelle adroniche, instabili, che decadono in altre particelle producendo *cascate adroniche*.

I tre leptoni carichi producono segnali differenti in un telescopio (vedi Figura 2.1) [3]:

Rivelazione del neutrino elettronico ν_e . L'elettrone prodotto dal ν_e è una particella leggera ed estremamente energetica che immediatamente produce raggi- γ per radiazione di frenamento, i quali producono coppie e^+e^- . Si viene a creare una cascata di fotoni, elettroni e positroni, chiamata *cascata elettromagnetica*. Le particelle nella cascata crescono di numero, arrivano ad una numerosità massima e poi cominciano a decrescere, e il loro numero è proporzionale all'energia del neutrino incidente. Tutto questo in una regione di spazio che si estende in acqua per una decina di metri. Le particelle cariche nella cascata elettromagnetica producono luce Cherenkov in gran parte del loro percorso, una frazione della quale viene raccolta dai PMT. Questi segnali raccolti da tutti i PMT nell'evento vengono poi utilizzati per ricostruire l'energia del neutrino (proporzionale alla quantità di luce raccolta) e la sua direzione di provenienza. Questa topologia di eventi permette una stima accurata dell'energia del neutrino; la direzione è stimata con una precisione di 3°-4°.

Rivelazione del neutrino muonico ν_μ . Il muone ha proprietà analoghe a quelle dell'elettrone ma massa circa 200 volte maggiore. Non emette quindi radiazione di frenamento e può propagarsi praticamente lungo una linea retta per distanze anche dell'ordine di parecchi chilometri (at-

¹Nella regione interna di questi giganteschi esperimenti non è possibile distinguere le interazioni di neutrini da quelle degli antineutrini.

traversando tutto il rivelatore) prima di decadere.² I neutrini muonici sono di particolare interesse nella ricerca di sorgenti cosmiche puntiformi di neutrini con energia maggiore di $\sim 1\text{TeV}$ [1]. Sperimentalmente, una volta raggiunte alte energie e selezionati i neutrini muonici, si riesce ad ottenere un segnale tale da avere un'accurata ricostruzione della direzione del muone, strettamente correlata a quella di provenienza del neutrino. In generale, per un telescopio di neutrini è fondamentale conoscere la relazione tra la direzione iniziale del neutrino e quella del muone in uscita. Questa forte correlazione è dovuta al fatto che i neutrini non sono deflessi dai campi magnetici galattici o extra-galattici, quindi la direzione del neutrino coincide essenzialmente con quella della sorgente. L'angolo medio tra la direzione del neutrino incidente e quella del muone in uscita può essere approssimata da:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}} \quad (2.1)$$

dove E_ν è l'energia del neutrino.

La perdita di energia del muone può essere dovuta a diversi processi come la ionizzazione, la produzione di coppie o il bremsstrahlung. La perdita di energia totale per unità di lunghezza può essere parametrizzata dalla formula:

$$\frac{dE_\mu}{dx} = \alpha(E_\mu) + \beta(E_\mu) \cdot E_\mu \quad (2.2)$$

dove $\alpha(E_\mu)$ è un termine quasi costante dovuto alla ionizzazione, mentre $\beta(E_\mu)$ è dovuto alle perdite radiative. La ricostruzione della direzione del muone rispetto a quella del neutrino iniziale è 0.2° in acqua, 1° nel ghiaccio, e ciò permette quindi di risalire alla sorgente. L'energia del neutrino, invece, viene stimata con precisione molto inferiore rispetto al caso della cascata elettromagnetica.

Rivelazione del neutrino tauonico ν_τ . Il τ prodotto dal ν_τ ha una situazione ibrida tra i due casi precedenti: in talune situazioni può essere visto tramite la cascata elettromagnetica; in talaltre, avendo un comportamento simile al muone, può essere visto come una traccia.

²Il cammino medio percorso dalla particella dipende dall'energia rilasciata nel mezzo. Se tale lunghezza è maggiore della risoluzione spaziale del rivelatore, la traiettoria della particella può essere individuata e si ha una *traccia*. Si distinguono due classi di eventi: eventi con traccia ed eventi senza traccia (*sciame*).

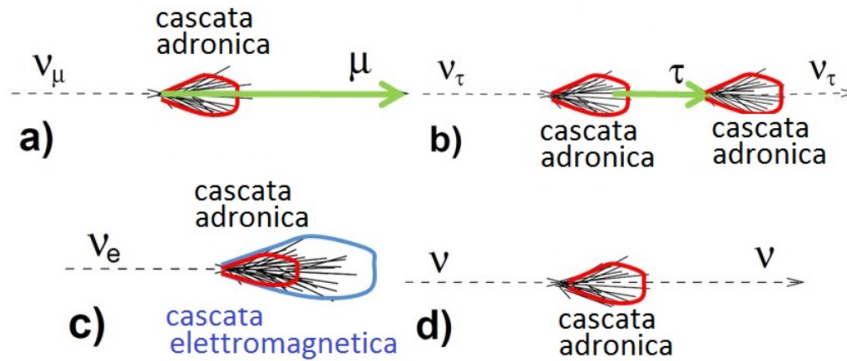


Figura 2.1: Interazioni dei neutrini di diverso sapore: (a) interazione a CC di un ν_μ con produzione di un muone; (b) interazione a CC di un ν_τ con produzione di un τ ; (c) interazione a CC di un ν_e e produzione di un e che induce una cascata di particelle; (d) interazione a CN di neutrino di ogni sapore. [3]

Per l'astronomia dei neutrini, l'osservazione dei muoni rappresenta quindi il canale privilegiato. In tutte le topologie, i soli eventi sicuramente indotti da neutrini sono quelli diretti verso l'alto. I muoni atmosferici diretti verso il basso rappresentano una contaminazione che oscura totalmente il segnale. Anche negli eventi verso l'alto vi è il fondo irriducibile dei neutrini atmosferici. Questo fondo è completamente isotropo e decresce molto più velocemente del segnale al crescere dell'energia.

I neutrini di origine astrofisica possono essere selezionati rispetto al fondo in due modalità: o selezionando un eccesso di eventi da una data direzione (usando eventi $\nu_\mu \rightarrow \mu \rightarrow \text{traccia}$) o evidenziando un eccesso di eventi di più alta energia rispetto a quanto aspettato nei neutrini atmosferici (usando eventi $\nu_e \rightarrow e \rightarrow \text{cascata elettromagnetica}$). Talvolta è possibile selezionare cascate indotte da eventi di alta energia anche diretti verso il basso, ma con risoluzione angolare piuttosto bassa.

Proprietà dell'acqua e del ghiaccio

Gli effetti del mezzo sulla propagazione delle luce sono l'*assorbimento* e la *dispersione* di fotoni. Il primo riduce l'ampiezza del fronte d'onda Cherenkov (ovvero, la quantità totale di luce sui PMTs); il secondo modifica la direzione di propagazione dei fotoni Cherenkov e la distribuzione dei loro tempi di

arrivo sui PMTs. Si definiscono fotoni *diretti* quelli che arrivano al PMT sul fronte d'onda Cherenkov senza subire deviazioni; gli altri sono detti *indiretti*.

La propagazione della luce nel mezzo trasparente è quantificata per una data lunghezza d'onda λ dalle proprietà ottiche del mezzo: assorbimento, dispersione e attenuazione, espressi come coefficienti costanti o come lunghezze. [1]

Proprietà del ghiaccio L'elevato potere dispersivo del ghiaccio è legato alla presenza di bolle d'aria e di impurità intrappolate che dipendono dalla qualità dell'aria presente nella neve. Essendo trasparente, il ghiaccio ha un potere di assorbimento molto inferiore rispetto a quello dell'acqua. Uno dei vantaggi principali di costruire telescopi nel ghiaccio (AMANDA e IceCube) è la quasi totale assenza di segnale di fondo. La precisione di rivelazione dei ν_μ è di $\sim 1^\circ$.

Proprietà dell'acqua I vantaggi di un telescopio marino rispetto ad uno installato nel ghiaccio riguardano principalmente la piccola dispersione che subiscono i fotoni, che favorisce una migliore ricostruzione delle tracce. La densità e la grandezza del particolato dà indicazioni sull'assorbimento e sulla dispersione causata dall'acqua: le sedimentazioni accumulate sui moduli ottici possono alterare l'efficienza del rivelatore. Per questo i telescopi marini devono essere posti a grandi profondità, di modo che ci siano alta pressione e lenti correnti marine, per mantenere stabile la posizione dei rivelatori. Le proprietà ottiche dell'acqua dipendono molto dalla lunghezza d'onda: la trasmissione della luce è enormemente favorita nell'intervallo 350-550nm, dove il PMT utilizzato per rivelare la radiazione Cherenkov raggiunge la massima efficienza quantica. L'ambiente marino, tuttavia, è molto più "rumoroso" di quello artico. Il segnale di fondo più consistente è costituito dai neutrini atmosferici e muoni atmosferici "dall'alto". A questi, però, si aggiungono due componenti ottici: il decadimento radioattivo del ^{40}K , presente nel sale, e la bioluminescenza diffusa organismi biologici. Ricordiamo, infine, che la precisione di rivelazione della direzione dei ν_μ è di $\sim 0.2^\circ$.

2.2 Il fondo di muoni atmosferici

Il flusso dei muoni "dall'alto" (vedi Figura 2.2) è fortemente predominante rispetto agli eventi indotti da neutrini, e la loro traccia nel rivelatore può essere totalmente confusa con quella di un muone indotto dalle interazioni dei neutrini con la materia. La rivelazione dei segnali dovuti ai muoni atmosferici avviene ponendo il telescopio in elevate profondità e trascurando tutti gli

eventi che incidono sul rivelatore dall'alto. Tutti i telescopi per neutrini quindi sono ottimizzati per la ricerca di neutrini provenienti "dal basso", cioè quei neutrini che hanno attraversato tutta la Terra e hanno interagito negli strati di Terra posti sotto al rivelatore o nell'acqua.

I muoni atmosferici sono comunque molto utili per verificare lo stato del rivelatore, fornendo informazioni, ad esempio, sulla sua calibrazione o eventuali effetti sistematici.

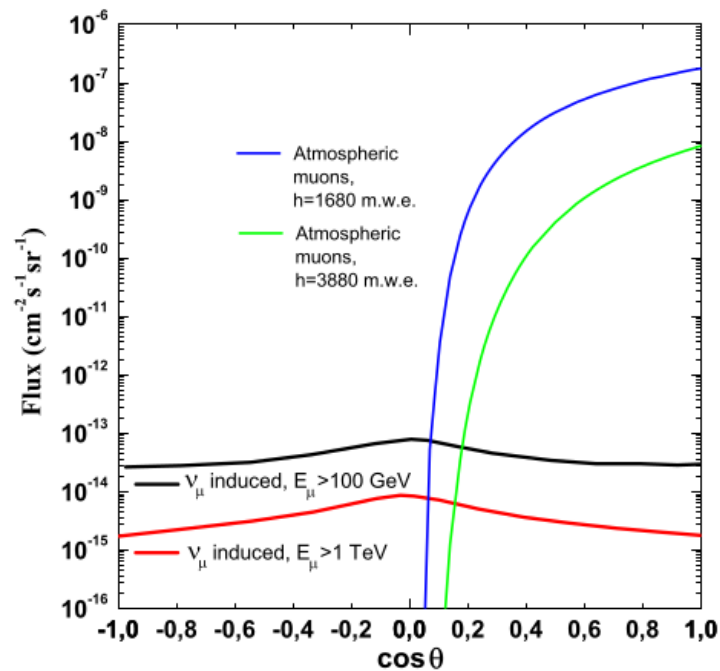


Figura 2.2: Muoni atmosferici a due differenti profondità (linea blu e verde); muoni generati dai neutrini atmosferici per due differenti soglie energetiche (linea nera e rossa).[1] Il flusso dei neutrini atmosferici è maggiore nella direzione orizzontale, questo è dovuto al fatto che i pioni e i kaoni orizzontali che sono prodotti nella parte più alta dell'atmosfera hanno una più alta probabilità di decadere in queste regioni meno dense.

2.3 Radiazione Cherenkov

Ogni telescopio che opera nel range di energie GeV-PeV utilizza moduli ottici che sfruttano l'effetto Cherenkov delle particelle relativistiche. Immaginiamo una particella carica in moto in un mezzo con indice di rifrazione n e con una velocità v maggiore della velocità di fase della luce nel mezzo ($v \geq \frac{c}{n}$).

Si ha allora una sorta di shock elettromagnetico, un fenomeno simile alla generazione di un'onda d'urto. La particella, solo se $\beta \geq \frac{1}{n}$, polarizza le molecole del mezzo lungo la sua traiettoria, e quando gli elettroni tornano allo stato di equilibrio emettono una radiazione coerente detta *Cherenkov*. Questa viene emessa entro un cono con angolo caratteristico θ_C dato dalla relazione:

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n} \quad (2.3)$$

In particolare, per una particella relativistica ($\beta \simeq 1$) e in acqua marina ($n \simeq 1.364$), l'angolo Cherenkov vale circa $\theta_C \simeq 43^\circ$.

Il numero di fotoni Cherenkov N_γ emessi per unità di lunghezza d'onda $d\lambda$ e di distanza dx , da una particella di carica e e con numero atomico Z è pari a:

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

Si noti come una radiazione di minor lunghezza d'onda contribuisce in maniera più significativa alla radiazione. Da questo emerge come i muoni (*radiatori Cherenkov naturali*), in condizioni di alte energie, rispondono ai requisiti per originare radiazione Cherenkov nel passaggio in acqua o ghiaccio.

Un contatore di Cherenkov *a soglia* permette di raccogliere tutta la radiazione emessa a partire dal livello di soglia dell'effetto, rispondendo con esito positivo/negativo a seconda della velocità del muone nel mezzo. La costruzione di una matrice di fotomoltiplicatori di opportune dimensioni per misurare il numero, la posizione e il tempo di transito dei fotoni Cherenkov emessi dai muoni, permette di risalire alla sua direzione e, di conseguenza, a quella del neutrino.

2.4 Parametri dei telescopi

Si definiscono alcuni parametri fondamentali dei telescopi per comprenderne le effettive capacità di rivelazione.

Risoluzione angolare È definita come la mediana della distribuzione della separazione angolare tra le linee di volo del neutrino simulato e del muone ricostruito. Tale valore dipende dall'energia del neutrino incidente. Il valore medio per il telescopio ANTARES è all'incirca 0.15° .

Area efficace per i neutrini L'area efficace è la capacità del rivelatore di identificare una traccia di muoni μ . È l'area intorno ad una sezione di apparato all'interno del quale i muoni che passano sono rivelati. Viene

calcolata per stimare il numero di eventi attesi da un telescopio di neutrini e dipende sia dall'energia del neutrino incidente E_ν che dalla sua direzione. La sua stima avviene tramite lo studio di flussi di neutrini generati con tecniche Montecarlo:

$$A_\nu^{eff} = \frac{N_x}{N_{gen}} \cdot V_{gen} \cdot (\rho N_A) \cdot \sigma(E_\nu) \cdot e^{-\sigma(E_\nu)\rho N_A Z(\theta)} \quad (2.5)$$

dove N_x è il numero di eventi rilevati; N_{gen} il numero di eventi generati; ρ la densità del nucleo bersaglio; $\sigma(E_\nu)$ la sezione d'urto totale del neutrino; $e^{-\sigma(E_\nu)\rho N_A Z(\theta)}$ termine che tiene conto dell'assorbimento dei neutrini lungo la direzione $Z(\theta)$; N_A il numero di Avogadro. L'area efficace rappresenta uno strumento utile per il confronto fra diversi esperimenti, infatti per una sorgente data si può calcolare direttamente il numero di eventi aspettati da:

$$\frac{N_\mu}{T} = \int dE \cdot \frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu} \cdot A_\nu^{eff}(E_\nu) \quad (2.6)$$

2.5 L'esperimento ANTARES

ANTARES (acronimo di **A**stronomy with a **N**eutrino **T**elescope and **A**bbyss environmental **R**ESearch) è il più grande telescopio di neutrini attualmente in operazione nell'emisfero Nord della Terra. Il progetto è iniziato nel 1996 ed è stato completato nel 2008.

La base del rivelatore è localizzata ad una profondità di 2475 m nel Mar Mediterraneo, a sud est della costa di Tolone (circa 40km dalla costa) in Francia. La sua posizione geografica permette l'osservazione della maggior parte del piano galattico, incluso il Centro Galattico. L'area totale di visibilità (vedi Figura 2.3) di ANTARES è pari a 3.5π sr, con una sovrapposizione contemporanea di 0.5π sr con l'esperimento IceCube e AMANDA. In particolare, il Centro Galattico viene osservato per circa il 70% del giorno siderale. L'apparato sperimentale (vedi Figura 2.4) consiste in un matrice di circa 885 sensori ottici (fotomoltiplicatori, PMTs) disposti in 12 stringhe di lunghezza 300m, formati da 25 piani. Il volume totale occupato è di $\sim 0.05km^3$. I cavi elettro-ottici (le stringhe), saldamente ancorati sul fondo del mare e tenuti in tensione da apposite boe in cima, svolgono il triplo ruolo di reggere meccanicamente i PMT, di fornire l'energia elettrica necessaria, e di trasmettere verso la stazione di controllo posta a terra i segnali registrati dai PMT. L'unità minima di acquisizione dati di ANTARES è il piano, formato da tre moduli ottici ed un modulo di controllo locale per la corrispondente elettronica. Il modulo ottico (OM) è una sfera di vetro resistente alla pressione

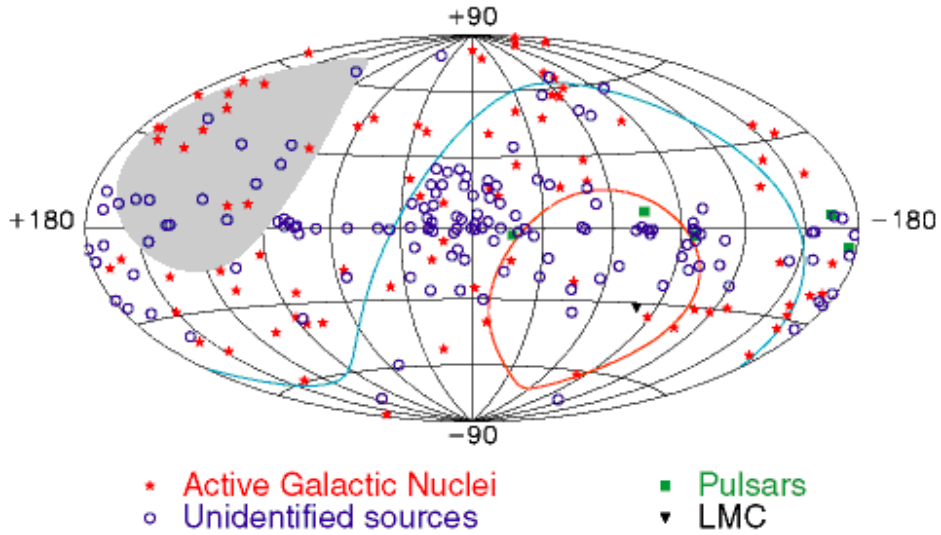


Figura 2.3: Visibilità del telescopio ANTARES in coordinate galattiche. L'area grigia è invisibile ad ANTARES, l'area all'interno della linea rossa è osservabile 24h al giorno. [6]

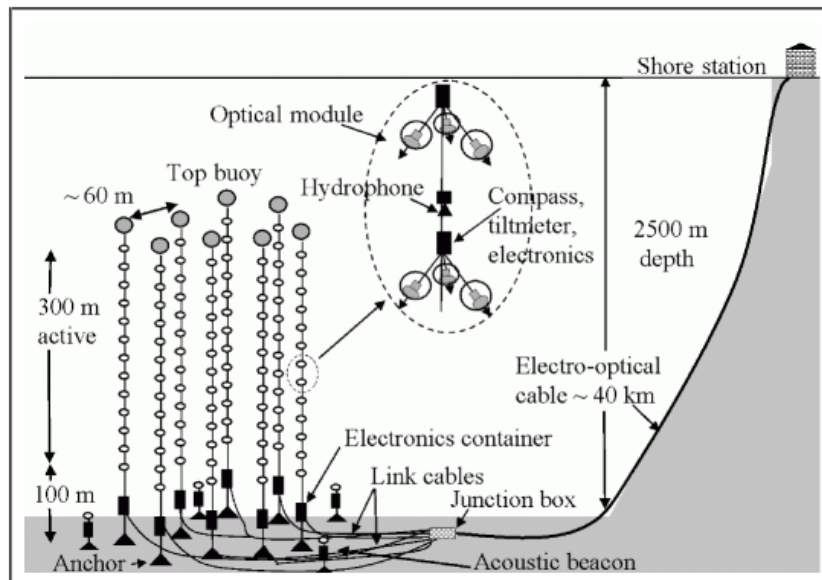


Figura 2.4: Rappresentazione grafica del telescopio per neutrini ANTARES nella sua configurazione finale. [6]

dell'acqua del mare, al cui interno sono presenti un PMT con diametro di 10 pollici e vari sensori con circuiti integrati associati. I tre OM di un medesimo piano sono posizionati simmetricamente attorno al cavo verticale, distanziati di 180° e agganciati ad una struttura di titanio. Il loro asse è orientato verso il basso con un angolo di 45° rispetto alla verticale, per minimizzare il problema della sedimentazione. Le correnti marine possono spostare lateralmente le boe e quindi tutti i PMT, anche di diversi metri. Per la ricostruzione delle traiettorie dei muoni, è necessario conoscere la posizione e l'orientazione di ciascun PMT. A tale scopo, si utilizza un sistema di idrofoni i cui segnali consentono di avere, istante per istante, l'informazione geometrica desiderata. L'angolo di accettazione³ dei PMTs, per gli impulsi luminosi, è ampio in modo tale da rivelare la radiazione nell'emisfero australe con alta efficienza. In questo modo ci sono le condizioni di sovrapposizione tra gli angoli di accettazione dei diversi moduli posizionati su ogni stringa, favorendo così la ricostruzione degli eventi basata sulla coincidenza dei segnali [1].

L'apparato è raggruppato in settori, ciascuno composto da 5 piani successivi, indipendenti gli uni dagli altri sia per l'alimentazione che per l'acquisizione dei dati. La strumentazione parte a 100 metri dal fondo per un duplice motivo: consentire alle particelle di sviluppare il cono Cherenkov ed evitare le turbolenze del fondale.

I dati raccolti dagli OM sono inviati ad una junction box sottomarina che li trasmette digitalizzati (*hit*) alla stazione in superficie. Questo principio di acquisizione è detto "all-data-to-shore".

2.6 Ricostruzione delle tracce

La ricostruzione delle tracce dei muoni è fatta utilizzando le informazioni ottenute tramite il tempo di arrivo e l'ampiezza del segnale dei fotoni Cherenkov sul PMT.

L'algoritmo di ricostruzione si basa su metodi di massima verosimiglianza. Si cerca la verosimiglianza tra tracce diverse considerando la posizione, la direzione e, a volte, l'energia, utilizzando funzioni che modellizzano la propagazione della luce. È possibile fare una stima approssimata dell'energia del muone o misurando la lunghezza della sua traccia o misurando le perdite di energia: per energia sopra 1TeV la perdita di energia muonica $\frac{dE}{dx}$ è proporzionale all'energia del muone stesso. Si ottiene la distribuzione di probabilità (PDF) di un fotone di colpire un PMT, in funzione del tempo,

³L'accettanza è una proprietà della luce in un sistema ottico, che esprime il grado di allargamento del fascio ottico in termini di area e di angolo.

noti l'orientamento della traccia da cui è stato irradiato, posizione e l'orientamento del PMT. Solitamente queste distribuzioni sono calcolate attraverso simulazioni che tracciano i fotoni nel mezzo.

La qualità della ricostruzione della traccia è quantificata dal parametro di qualità Λ , basato sul valore della distribuzione di massima verosimiglianza ottenuto per il muone. Gli eventi candidati ad essere neutrini sono selezionati applicando un taglio al parametro di qualità della ricostruzione. Tale valore può essere ottenuto ottimizzando la riduzione del fondo e l'efficienza del segnale in termini del flusso di neutrini. Il contributo dei muoni e neutrini atmosferici è di solito simulato mediante tecniche Montecarlo.

Capitolo 3

Ricerca di Neutrini nel piano galattico con ANTARES

3.1 Neutrini dal Piano Galattico

Il Centro Galattico (o centro della Via Lattea) è una sorgente diffusa di neutrini. Questi sono generati nel decadimento delle particelle a breve vita media, prodotte dall'interazione dei RC primari con il mezzo interstellare.

Oltre alle stelle, la nostra Galassia contiene campi magnetici e Raggi Cosmici con, approssimativamente, la stessa densità di energia. La disomogeneità dei campi magnetici confina i Raggi Cosmici all'interno della Galassia, quindi le interazioni adroniche dei RC con il materiale interstellare producono un flusso diffuso di raggi- γ e, probabilmente, di neutrini. Il flusso atteso sulla Terra deve essere correlato alla densità del gas nella Galassia: ci si aspetta una più intensa emissione lungo la linea di vista che interseca la maggior parte della materia. È necessario quindi conoscere la distribuzione e composizione della materia della Via Lattea ed il campo magnetico che agisce al suo interno.

3.1.1 La Via Lattea

La nostra Galassia è una galassia a spirale barrata, composta da un nucleo (*bulge*) attraversato da una struttura a forma di barra da cui dipartono i bracci di spirale. Il disco galattico contiene la maggior parte della materia luminosa (stelle e mezzo interstellare). Il raggio medio del disco è di ~ 15 kpc, mentre l'altezza media è di ~ 0.3 kpc. All'esterno dei bracci a spirale sono presenti stelle luminose e più giovani, mentre man mano che ci si avvicina al centro della Galassia aumentano il numero e l'età delle stelle presenti. Questa regione viene detta nucleo e la sua forma è approssimabile ad una

sfera di raggio $\sim 3\text{kpc}$. Il mezzo interstellare è formato da gas e polveri e rappresenta il 5-10% della massa galattica. È concentrato perlopiù nel piano galattico e nei bracci di spirale, ed è costituito in maggior percentuale da idrogeno ed elio. Il campo magnetico galattico è correlato alla riduzione della luce stellare dovuta alla presenza di polveri. L'intensità media del campo magnetico è difficile da misurare, poiché dipende dalla distanza dal centro galattico. Si è soliti assumere che in media $B \simeq 4\mu\text{G}$. Una volta noti questo valore e le dimensioni della galassia, possiamo dedurre che particelle con energie $\leq 10^{18}\text{eV}$ sono confinate all'interno del volume galattico.

Per rappresentare la Galassia si possono utilizzare diverse proiezioni, ad esempio il sistema di coordinate galattiche che, analogamente alle coordinate terrestri, è composto da latitudine e longitudine galattiche (si veda appendice A).

3.2 Analisi dei dati

Il campione di dati analizzati in questo lavoro corrisponde al periodo di presa dati dell'esperimento ANTARES che va da Gennaio 2007 a Dicembre 2015.

I dati sono stati raccolti in un file `.root` che contiene 7809 eventi di cui 7629 di tipo *traccia* e 180 di tipo *sciame*. Per ciascuno dei due tipi, le variabili raccolte sono:

- l'angolo zenith θ e la sua incertezza β : dato il piano in cui è disposto il rivelatore e data una retta perpendicolare a tale piano, per angolo zenitale si intende l'angolo fra la retta perpendicolare e la direzione di arrivo dei muoni;
- le coordinate galattiche: longitudine (b) e latitudine (l);
- le coordinate equatoriali: declinazione (δ) e ascensione retta (α);
- dEdX: variabile che indica la perdita di energia della particella nell'interazione con il mezzo;
- coordinate galattiche ed equatoriali *scrambled*;
- due variabili booleane per la scelta del tipo dell'evento, *traccia* o *sciame*.

3.2.1 Distribuzione dell'angolo zenitale e distribuzione energetica

I dati analizzati hanno $\sim 90^\circ < \theta < 180^\circ$, essendo il telescopio ottimizzato per i neutrini provenienti dal basso. Selezionando eventi di tipo traccia, è stata graficata la distribuzione dell'angolo zenith θ (Figura 3.1).

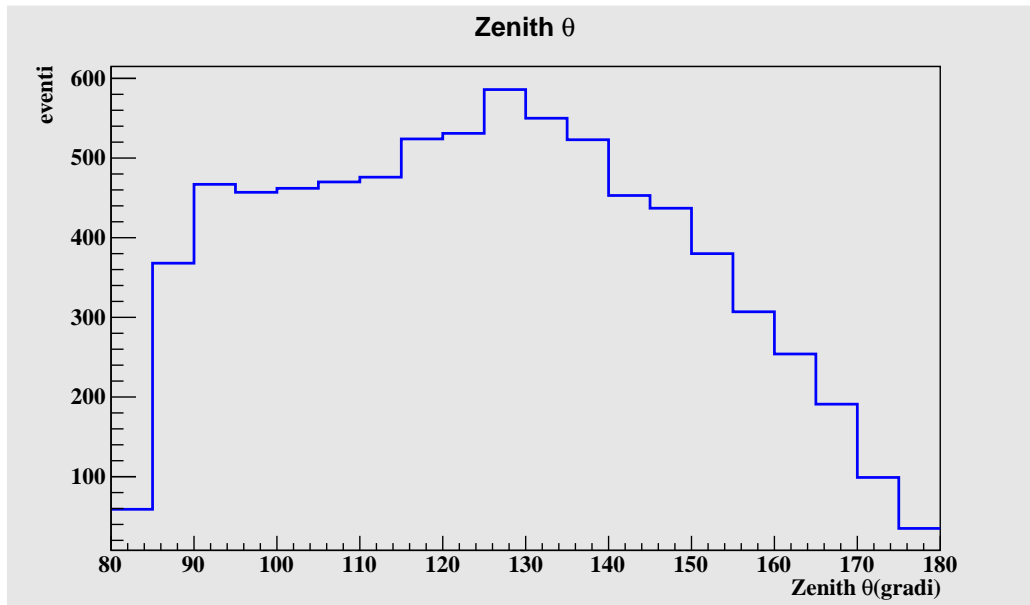


Figura 3.1: Distribuzione dell'angolo zenith per 7629 eventi traccia selezionati. La larghezza dei bin dell'istogramma è pari a 5° .

Dalla figura si nota che il maggior numero di eventi si ha nella zona compresa tra $\theta \sim 120^\circ$ e $\theta \sim 130^\circ$. Questo è dovuto ad una maggiore area efficace del rivelatore. Infatti, ricordando la relazione 2.6 a pag. 21, il numero di eventi (muoni μ) rivelati dipende dall'area efficace del rivelatore e dal flusso dei neutrini incidenti.

Selezioni sull'energia

La variabile $dEdX$ rappresenta la perdita di energia della particella lungo la direzione di attraversamento del mezzo (Figura 3.2). Si è scelto di rappresentare i dati in una carta logaritmica. Come osservato nella sezione 2.1.1 a pag.17, la distribuzione energetica degli eventi è più abbondante a basse energie, segue infatti una legge di potenza data da $E^{-\Gamma}$. Aumentando l'energia quindi si può diminuire l'effetto del fondo. Anche il segnale cosmico è rappresentato da una legge di potenza ma con indice spettrale che diminuisce meno

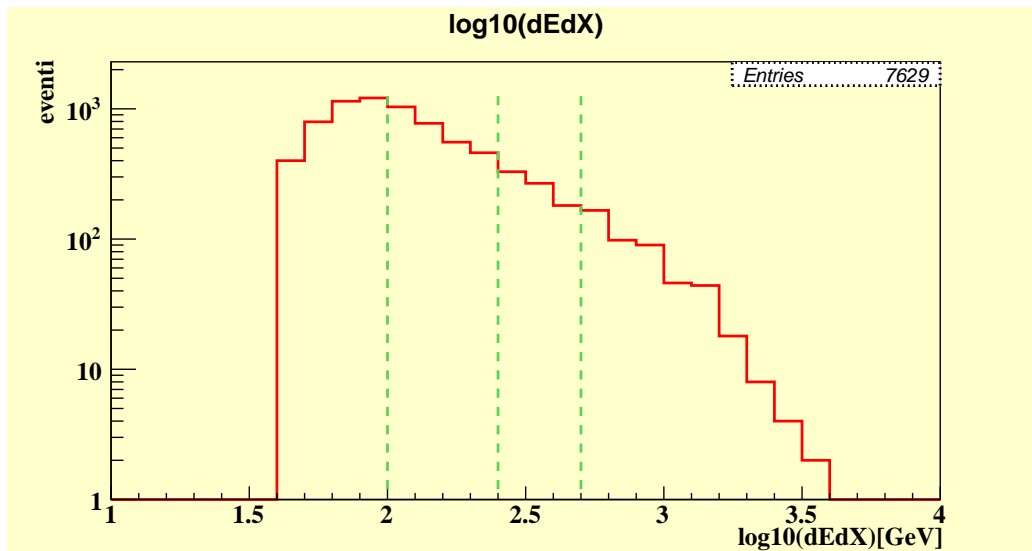


Figura 3.2: Distribuzione della perdita di energia in scala logaritmica per 7629 eventi traccia selezionati. L'istogramma è stato riempito in modo da avere 10 bin per unità.

velocemente all'aumentare dell'energia, quindi gli eventi di segnale cosmico diminuiscono meno rapidamente all'aumentare dell'energia. Inoltre, aumentando l'energia diminuisce la differenza angolare tra la direzione del neutrino incidente e quella del muone in uscita, migliorando quindi la ricostruzione della direzione del segnale (relazione 2.1). La nostra analisi è comunque focalizzata sullo studio del segnale di fondo.

Sono stati effettuati tre tagli sul parametro energetico (le tre linee verticali in Figura 3.2): $dEdX > 100$; $dEdX > 250$; $dEdX > 500$. Il numero di eventi registrato dopo ogni taglio di energia è riportato nella seguente tabella:

Energia	N° eventi
$dEdX > 100$	4078
$dEdX > 250$	1262
$dEdX > 500$	480

Tabella 3.1: Numero di eventi dopo ciascun taglio effettuato al parametro di energia.

3.2.2 Coordinate galattiche ed equatoriali celesti

Per identificare una posizione sulla sfera celeste si utilizzano principalmente due sistemi di coordinate celesti: le coordinate equatoriali celesti e le coordinate galattiche (appendice A).

Sono stati rappresentati due plot bidimensionali:

- Latitudine Galattica in funzione della Longitudine Galattica (Figura 3.3);
- Declinazione in funzione dell'Ascensione Retta (Figura 3.4).

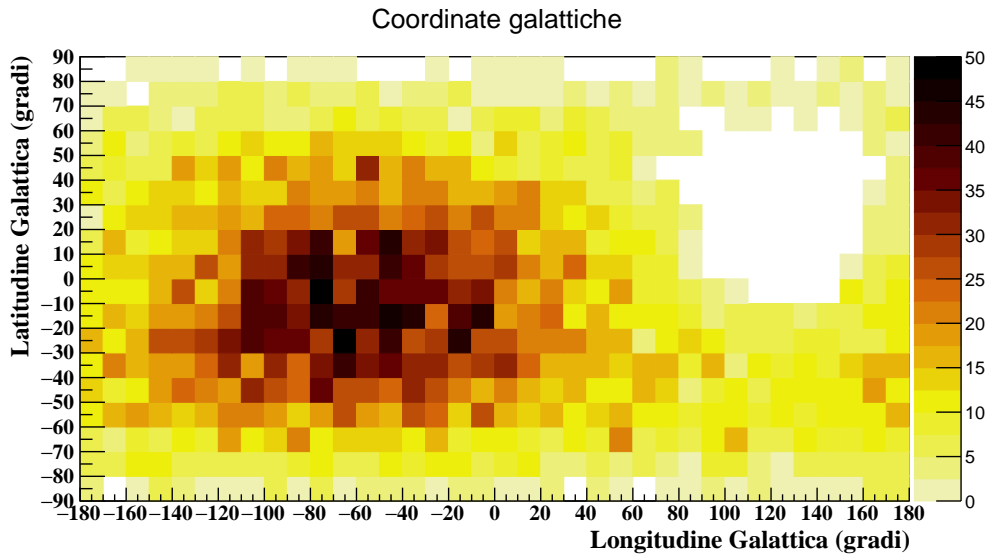


Figura 3.3: Distribuzione dei 7629 eventi ricostruiti in funzione della latitudine (asse y) e longitudine (asse x) galattiche. La dimensione dei bin su entrambi gli assi è 10° . La scala di colori sulla destra rappresenta il numero di eventi.

Le zone bianche si riferiscono ad assenza di eventi, infatti il rivelatore, durante la rotazione terrestre, può vedere zone di cielo in cui il segnale è completamente assente.

Per la posizione del rivelatore, declinazioni al di sotto di -47° sono sempre visibili, mentre quelle al di sopra di 47° non lo sono mai. Il fatto che siano presenti delle zone di colore per $\delta > 47^\circ$ è dovuto al fatto che gli eventi partono leggermente sopra l'orizzonte ($\cos \theta < 0,1$).

Si può notare la posizione del Centro Galattico nel punto $(0^\circ, 0^\circ)$ in Figura 3.3, e nel punto $(\alpha \sim 266^\circ, \delta \sim -29^\circ)$ in Figura 3.4.

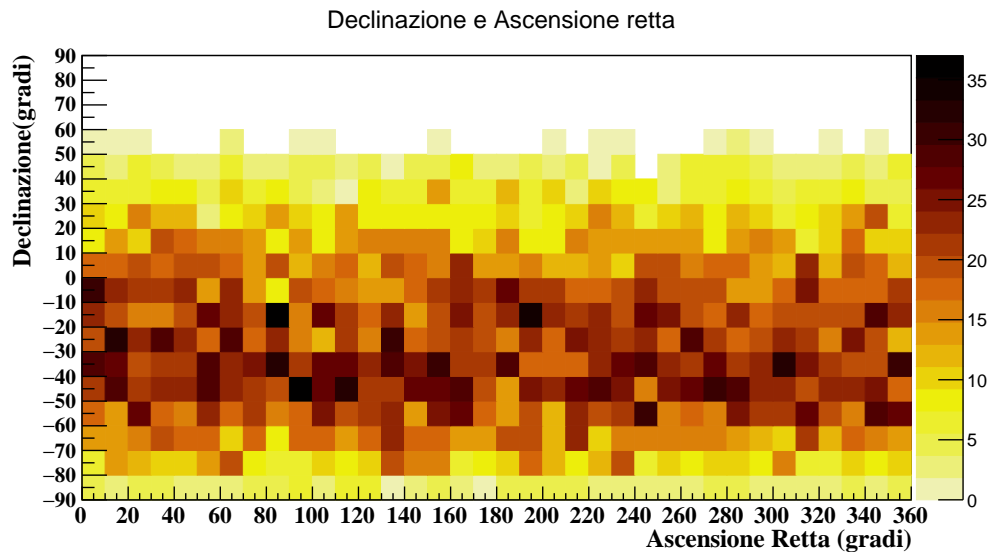


Figura 3.4: Distribuzione dei 7629 eventi ricostruiti in funzione della declinazione (asse y) e ascensione retta (asse x). La dimensione dei bin su entrambi gli assi è 10° . La scala di colori sulla destra rappresenta il numero di eventi.

Regione centrale della Galassia

In base ad analisi statistiche è stato calcolato che la sezione ottimizzata per la regione di segnale nel Piano Galattico:

$$|l| < 3^\circ; |b| < 40^\circ \quad (3.1)$$

In Figura 3.5, è stata graficata la regione centrale della Galassia. Gli istogrammi sono stati riempiti in modo da avere una larghezza pari a 10° per la Longitudine Galattica e 3° per la Latitudine Galattica. Si osserva quindi la variazione del numero degli eventi graficando le coordinate galattiche nella porzione di area individuata dalla 3.1 (Figura 3.5) rispetto ai plot nel cielo totale. Il numero di eventi è diminuito da 7629 a 128.

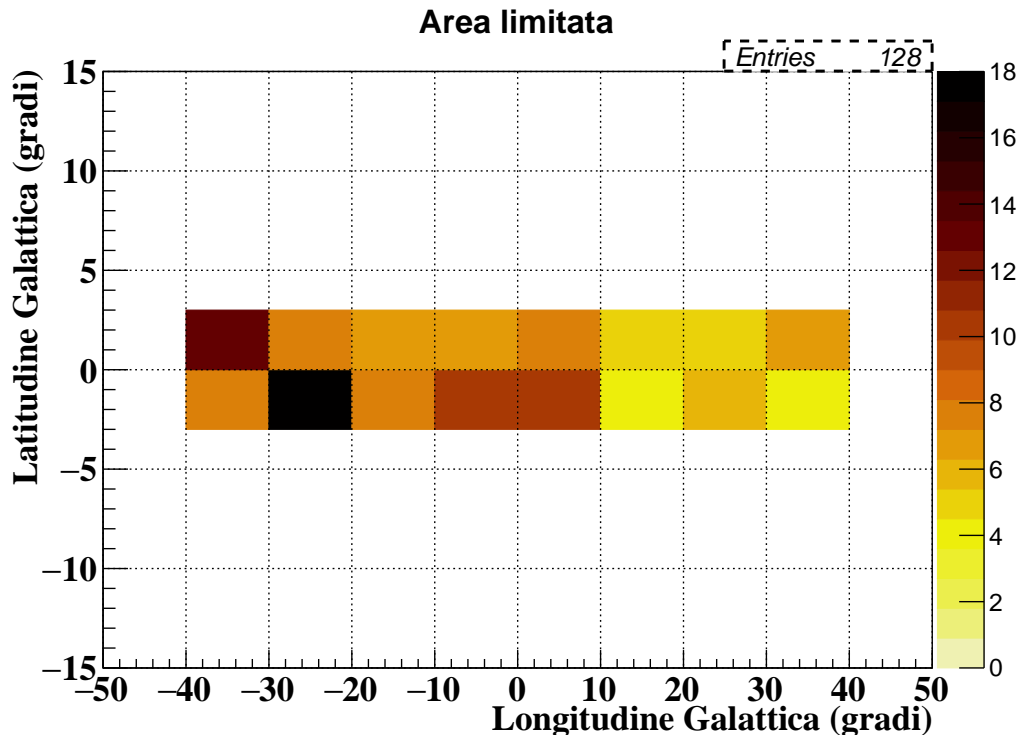


Figura 3.5: Distribuzione dei 128 eventi ricostruiti in funzione della latitudine (asse y) e longitudine (asse x) galattiche nella regione centrale della Galassia. La larghezza dei bin è 10° sull'asse x, 3° sull'asse y. La scala di colori sulla destra rappresenta il numero di eventi.

3.2.3 Metodo di simulazione dei dati di fondo con la tecnica di *scrambling*

Come già detto nella sezione 2.1, l'individuazione della direzione dei neutrini astrofisici presenta due principali segnali di fondo: i muoni atmosferici diretti verso il basso e i neutrini atmosferici. A seconda del tipo di analisi che viene svolta, il segnale di fondo può essere, almeno parzialmente, stimato usando vari parametri come la qualità della ricostruzione dell'evento o un estimatore dipendente dall'energia [7]. L'analisi delle direzioni di arrivo ricostruite tramite gli eventi registrati permette la ricerca di un eccesso sul segnale uniforme di fondo atmosferico.

La tecnica dello *scrambling*, o mescolamento, consiste nella simulazione del segnale di fondo e si ottiene mantenendo costante una coordinata (nel nostro caso la declinazione δ) e variando l'altra in maniera casuale (l'ascensione retta α). Questa tecnica si può applicare nel caso in cui il segnale

atteso è di gran lunga inferiore al fondo. In Figura 3.6 è rappresentato il numero di eventi in funzione delle coordinate galattiche scrambled dell'area totale di visualizzazione, mentre in Figura 3.7 il numero di eventi in funzione delle coordinate galattiche scrambled ma nell'area 3.1. Si confrontano quindi i risultati ottenuti con quelli nei plot in coordinate galattiche normali.

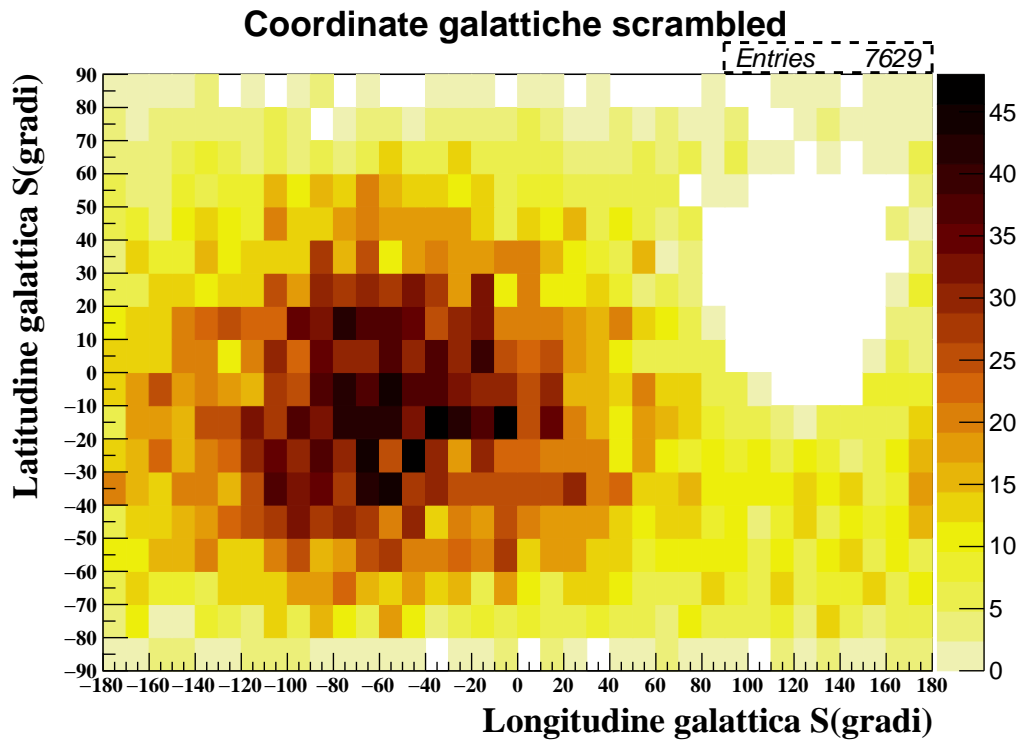


Figura 3.6: Distribuzione dei 7629 eventi ricostruiti in funzione della latitudine (asse y) e longitudine (asse x) galattiche scrambled. La dimensione dei bin su entrambi gli assi è 10° . La scala di colori sulla destra rappresenta il numero di eventi.

Poiché dal plot in Figura 3.5 abbiamo ottenuto 128 eventi, possiamo dire che l'osservazione nelle coordinate reali è statisticamente compatibile con l'osservazione nelle coordinate scrambled, nella regione centrale della Galassia.

	l, b	l, b scrambled
N° di eventi in $ l < 3^\circ, b < 40^\circ$	128 ± 11	113 ± 11

Tabella 3.2: Confronto del numero di eventi nella regione centrale della Galassia, in coordinate galattiche reali e scrambled.

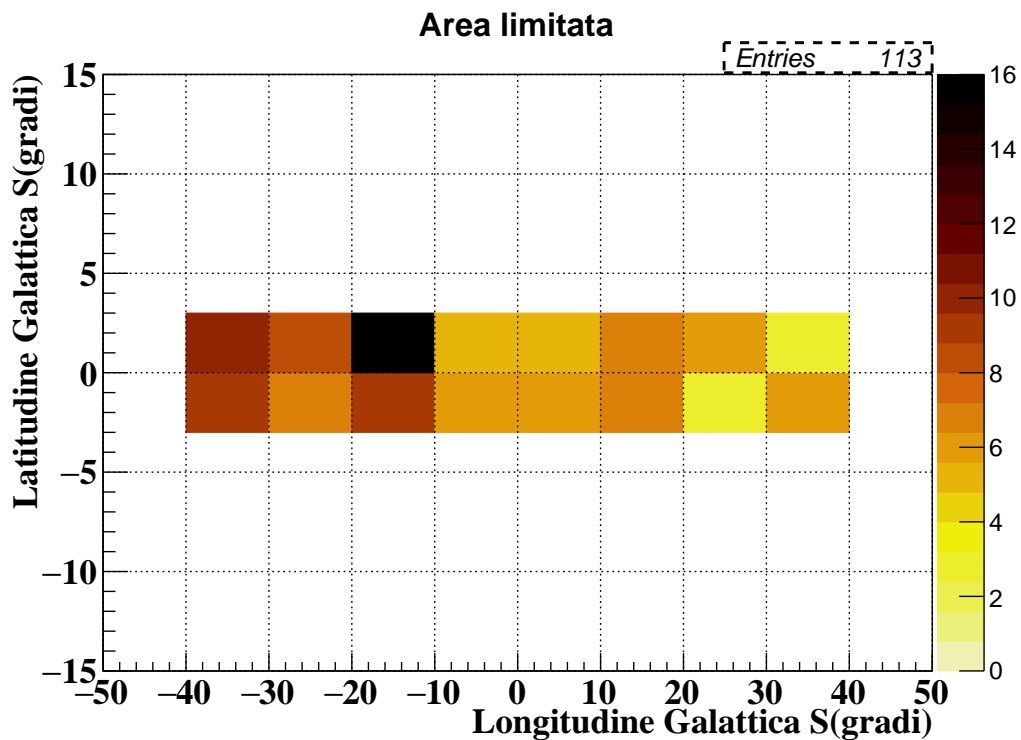


Figura 3.7: Distribuzione dei 113 eventi ricostruiti in funzione della latitudine (asse y) e longitudine (asse x) galattiche scrambled nella regione centrale della Galassia. La larghezza dei bin è 10° sull'asse x, 3° sull'asse y. La scala di colori sulla destra rappresenta il numero di eventi.

3.2.4 Analisi con limiti sul parametro energetico

Nell'ultima parte dell'analisi si effettuano selezioni sull'energia, sia nei plot in coordinate galattiche normali (Figura 3.3 e 3.5) che per quelli in coordinate scrambled (Figura 3.6 e 3.7). I limiti inferiori utilizzati sono quelli della sezione 3.2.1. Si confronta, quindi, il numero di eventi registrati per stimare la compatibilità delle osservazioni. I grafici sono riportati in Figura 3.8, con i rispettivi risultati.

	l,b	l,b scrambled
N° di eventi in area totale, $dEdX > 100$	4078	4078
N° di eventi in area totale, $dEdX > 250$	1262	1262
N° di eventi in area totale, $dEdX > 500$	480	480

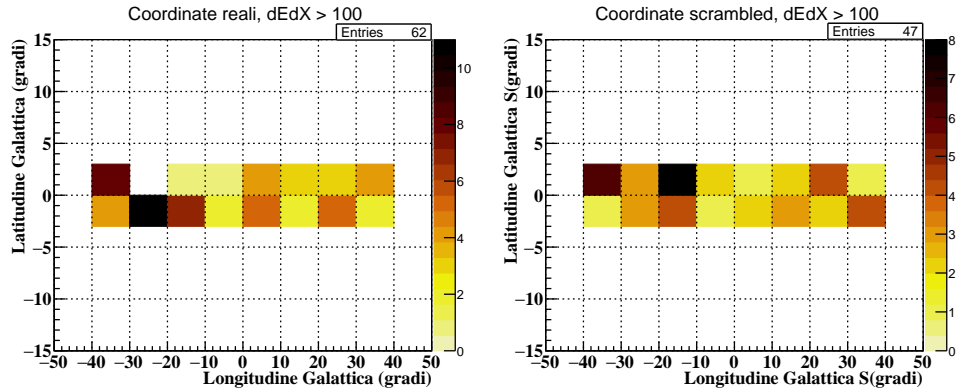
Tabella 3.3: Osservazione di eventi nella regione totale di visualizzazione del rivelatore, in coordinate galattiche reali e scrambled, con selezioni di energia.

	l, b	l, b scrambled
N° di eventi in $ l < 3^\circ, b < 40^\circ, dEdX > 100$	62 ± 8	47 ± 7
N° di eventi in $ l < 3^\circ, b < 40^\circ, dEdX > 250$	14 ± 4	20 ± 4
N° di eventi in $ l < 3^\circ, b < 40^\circ, dEdX > 500$	5 ± 2	3 ± 2

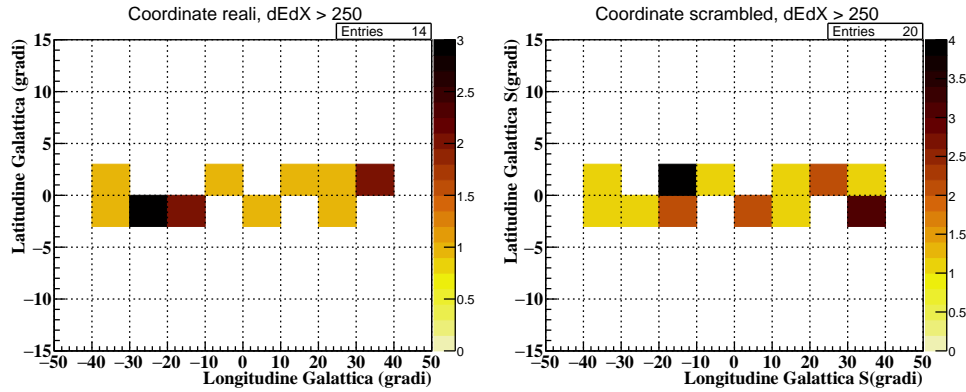
Tabella 3.4: Osservazione di eventi nella regione centrale della Galassia, in coordinate galattiche reali e scrambled, con selezioni di energia.

Quando si effettua lo scrambling delle coordinate osservando tutto il cielo, il numero di eventi osservato rimane fisso perché ciò che varia è solo l'Ascensione Retta. Nella regione centrale della Galassia, invece, ci sono variazioni del numero di eventi di segnale di fondo e l'osservazione nelle coordinate reali è statisticamente compatibile con l'osservazione nelle coordinate scrambled.

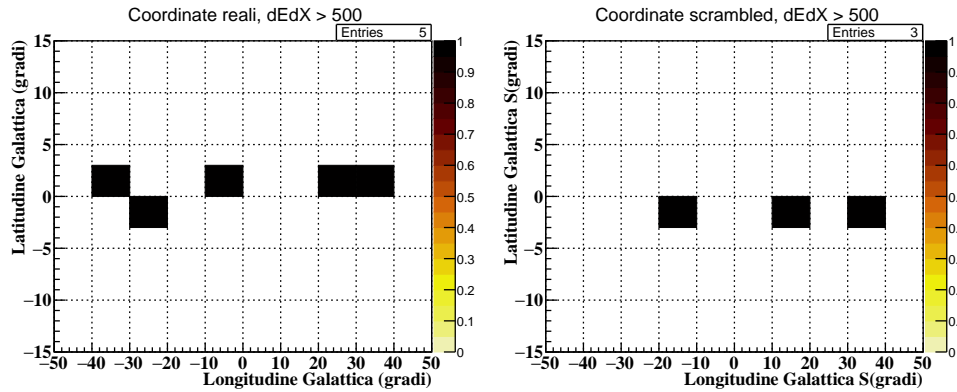
Il metodo di scrambling adottato ha portato un eccesso solo nel caso del taglio dell'energia $dEdX > 250$. Questo metodo, però, è solo uno dei possibili metodi (milioni di metodi diversi) di permutazione per ottenere delle coordinate scrambled. La significatività dell'osservazione si stima successivamente analizzando quanto l'osservazione nei dati si discosta da quanto osservato nei vari esperimenti scrambled.



(a) $dEdX > 100$; 62 eventi in coordinate galattiche normali (sinistra), 47 eventi in coordinate galattiche scrambled (destra).



(b) $dEdX > 250$; 14 eventi in coordinate galattiche normali (sinistra), 20 eventi in coordinate galattiche scrambled (destra).



(c) $dEdX > 500$; 5 eventi in coordinate galattiche normali (sinistra), 3 eventi in coordinate galattiche scrambled (destra).

Figura 3.8: Distribuzione degli eventi ricostruiti in funzione della latitudine (asse y) e longitudine (asse x) galattiche reali (colonna di sinistra) e scrambled (colonna di destra) nella regione centrale della Galassia, con taglio sul parametro $dEdX$: (a) $dEdX > 100$; (b) $dEdX > 250$; (c) > 500 . La larghezza dei bin è 10° sull'asse x e 3° sull'asse y . La scala dei colori sulla destra rappresenta il numero di eventi.

Conclusioni

In questa tesi sono stati analizzati 7809 eventi di segnale di neutrini atmosferici provenienti da tutto il cielo osservabile di ANTARES. È stata graficata la distribuzione del numero di eventi in funzione della coordinata locale zenith per osservare la direzione di provenienza del maggior numero di eventi.

Sono stati effettuati tre tagli sul parametro energetico dEdX per osservare l'effettiva diminuzione del numero di eventi all'aumentare dell'energia.

È stata graficata la distribuzione degli eventi in funzione delle coordinate equatoriali (declinazione δ e ascensione retta α) e galattiche (latitudine l e longitudine b), per visualizzare il cielo osservabile del telescopio ANTARES. È stata poi graficata la distribuzione degli eventi nella regione centrale della Galassia ($|l| < 3^\circ$; $|b| < 40^\circ$), dove ci si aspetta, con maggiore probabilità, un segnale di neutrini cosmici.

Attraverso un'analisi statistica di permutazione delle coordinate galattiche (*scrambling*) è stata stimata la significatività dell'osservazione reale con un'osservazione in coordinate "fittizie". Si è scelto di mantenere fissa la declinazione δ variando l'ascensione retta RA. Si è ottenuta compatibilità tra le osservazioni.

Infine, sono stati effettuati gli stessi tagli precedenti all'energia per le varie combinazioni di distribuzioni: in funzione delle coordinate galattiche normali e scrambled, sia nell'area totale di visualizzazione che nella regione centrale della Galassia. Il confronto del numero di eventi ha portato compatibilità tra le osservazioni reali e fittizie.

Appendice A

Sistemi di coordinate celesti

Sistemi di coordinate equatoriali

Il sistema di coordinate equatoriali sferiche è un metodo per identificare la posizione degli astri sulla sfera celeste. È identificato da un'*origine*, il centro della Terra, da un *piano fondamentale*, l'equatore celeste, proiezione dell'equatore sulla sfera celeste, e da una *direzione principale* verso il punto dell'Ariete, uno dei due punti in cui l'equatore celeste interseca l'eclittica (proiezione dell'orbita della Terra sulla sfera celeste). La presenza di un piano fondamentale e di una direzione primaria implica che il sistema di coordinate non ruota con la Terra, ma rimane (relativamente) fisso sullo sfondo delle stelle. Le coordinate sono positive verso il nord e verso est nel piano fondamentale, e sono la *declinazione* δ e l'*ascensione retta* α . La declinazione δ misura la distanza angolare di un oggetto in direzione perpendicolare all'equatore celeste, positiva verso nord, negativa verso sud ($+90^\circ$ al Polo Nord, -90° al Polo Sud), ed è analoga alla latitudine terrestre. L'ascensione retta α va da 0° a 360° e misura la distanza angolare di un oggetto lungo l'equatore celeste verso est (senso antiorario), a partire dal punto dell'ariete ($\alpha=0^\circ$) fino al cerchio orario che passa per l'oggetto. Essa corrisponde alla longitudine terrestre.

Sistemi di coordinate galattiche

È un sistema centrato sul Sole e allineato con il centro della Via Lattea. L'equatore galattico è così allineato con il piano galattico. È formato da longitudine b ($0^\circ < b < 360^\circ$) e latitudine l ($-90^\circ < l < +90^\circ$). Il cerchio massimo di riferimento è dato dall'intersezione del piano parallelo al disco galattico passante per il Sole e la sfera celeste. Il sistema delle coordinate galattiche sta alla base della suddivisione del piano galattico in quattro quadranti, dove il grado 0 corrisponde al centro della Via Lattea.

Bibliografia

- [1] "High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes" - T.Chiarusi e M.Spurio Eur. Phys. J. C (2010) 65:649-701
- [2] "L'enigma dei Raggi Cosmici" - Luisa Bonolis <http://matematica.unibocconi.it/articoli/1%E2%80%99enigma-dei-raggi-cosmici>
- [3] "Neutrini in profondità: Vita, morte e miracoli dei neutrini rivelati sotto terra, sotto i ghiacci o in fondo al mare" - Maurizio Spurio (Dipartimento di Fisica e Astronomia Università di Bologna // INFN sezione di Bologna)
- [4] "Come nascono i neutrini?" - Laboratori Nazionali del Gran Sasso <https://www.lngs.infn.it/it/neutrini>
- [5] "Inizia l'era del neutrino cosmico" - Stefano Parisini, Notiziario online dell'Istituto nazionale di Astrofisica <http://www.media.inaf.it/2013/11/22/inizia-lera-del-neutrino-cosmico/>
- [6] "ANTARES collaboration website" <http://antares.in2p3.fr/>
- [7] "Autocorrelation analysis of ANTARES data" - Fabian Schussler, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, France <http://galprop.stanford.edu/elibrary/icrc/2011/papers/HE2.3/icrc0238.pdf>

Elenco delle figure

1.1	Spettro dei Raggi Cosmici	4
1.2	Spettro energetico dell'elettrone	6
2.1	Interazioni dei neutrini di diverso sapore	17
2.2	Muoni atmosferici e muoni generati dai neutrini atmosferici . .	19
2.3	Visibilità del telescopio ANTARES	22
2.4	Configurazione finale di ANTARES	22
3.1	Distribuzione dell'angolo zenith	27
3.2	Distribuzione dell'energia	28
3.3	Distribuzione Latitudine/Longitudine galattica	29
3.4	Distribuzione Declinazione/Ascensione Retta	30
3.5	Distribuzione Latitudine/Longitudine in area limitata	31
3.6	Distribuzione Latitudine/Longitudine galattiche scrambled . .	32
3.7	Distribuzione Latitudine/Longitudine galattiche scrambled in area limitata	33
3.8	Distribuzione Latitudine/Longitudine galattica normali e scram- bled, nella regione centrale della Galassia con tre tagli sul parametro energetico dE/dX	35

Ringraziamenti

Ringrazio il Professor Spurio e il Dottor Fusco per la grande disponibilità e pazienza mostrata durante il lavoro.

Grazie ai miei genitori che mi danno sempre il coraggio e il sostegno di affrontare qualsiasi battaglia. E grazie ai miei fratelli, perché senza i loro consigli e sorrisi non sarei ciò che sono.

Grazie a Carlos che in questi mesi mi è stato vicino ogni giorno ed in ogni momento.

Grazie a Greta, per l'amicizia e il sostegno di questi anni.

Grazie a Chiara, mia fedele compagna di laboratorio, Matteo D., Marco G., Daniele, Silvia, ... e a tutti i ragazzi che sono stati miei compagni in questi anni e hanno contribuito a renderli unici.

Grazie al prof. Servizi che mi ha trascinato in questa avventura prima che me ne accorgessi.

Ringrazio infine Marianna Cicchetti e Michele Cancelliere, per la pazienza ed i consigli preziosi, e tutti gli amici e familiari di Matera e Bologna, che mi hanno dato supporto e fiducia.