

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Fisica

# Neutrini dal piano galattico con ANTARES

Relatore:  
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:  
Alessandra Gioventù

Correlatore:  
Dott. Luigi Antonio Fusco

Sessione II  
Anno Accademico 2014/2015



## Sommario

In questa tesi si cerca un flusso diffuso di neutrini nel piano Galattico. ANTARES, un telescopio di neutrini che si trova nel Mar Mediterraneo, ha un'area di visibilità tale da poter osservare questa parte di cielo, quindi isolare l'emissione di neutrini per trovarne le sorgenti.

Sono confrontate diverse regioni del cielo, selezionate in modo tale che abbiano le stesse dimensioni. In particolare si comparano la regione corrispondente al Centro Galattico, detta *on-zone*, e altre regioni, dove secondo i modelli analizzati ci si aspetta un minor segnale, dette *off-zone*.



---

*“There is a theory which states that if ever anyone discovers  
exactly what the Universe is for and why it is here,  
it will instantly disappear and be replaced by something  
even more bizarre and inexplicable.  
There is another theory which states that this has already happened.”*

Douglas Adams - “Restaurant at the end of the Universe”



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>iii</b>
<b>1 Astrofisica con Neutrini</b>	<b>1</b>
1.1 Importanza dell'astrofisica con Neutrini . . . . .	1
1.2 Raggi Cosmici . . . . .	2
1.3 I Neutrini . . . . .	4
1.4 Acceleratori di RC e sorgenti di Neutrini . . . . .	5
1.4.1 Neutrini atmosferici . . . . .	5
1.4.2 Sorgenti cosmiche . . . . .	5
<b>2 Telescopi di neutrini e ANTARES</b>	<b>9</b>
2.1 Principio di rivelazione di neutrini . . . . .	9
2.1.1 Rivelazione di muoni . . . . .	10
2.1.2 Effetto Cherenkov . . . . .	10
2.2 L'esperimento ANTARES . . . . .	11
2.2.1 Ricostruzione delle tracce . . . . .	12
<b>3 Ricerca di neutrini dal piano galattico con ANTARES</b>	<b>15</b>
3.1 Neutrini dal piano galattico . . . . .	15
3.1.1 La Via Lattea . . . . .	15
3.1.2 Flusso di neutrini dalle osservazioni di raggi- $\gamma$ . . . . .	16
3.2 Ricerca di neutrini dal piano galattico . . . . .	18
3.2.1 Osservazioni di neutrini cosmici . . . . .	18
3.2.2 Metodo di ricerca . . . . .	20

3.3 Analisi dati . . . . .	21
<b>Conclusioni</b>	<b>25</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>26</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>28</b>



# Introduzione

L'Astrofisica delle particelle è il settore della scienza che indaga i problemi di natura astronomica facendo ricorso ad apparati sperimentali tipici della fisica delle particelle. Per individuare nuova fisica, questa disciplina studia i fenomeni cosmici per determinare le proprietà della materia celeste e quelli le cui condizioni non possono essere attuate nei laboratori. Agli inizi del secolo scorso l'indagine, fino ad allora prettamente legata ai fotoni, si estese ai Raggi Cosmici (RC, scoperti nel 1912), portando a scoperte sia nel campo della fisica delle particelle, sia in quello dell'astrofisica. Negli ultimi anni, si è sviluppata, focalizzando lo studio sui neutrini.

In questa tesi si cerca un flusso diffuso di neutrini proveniente dal piano Galattico. Sono confrontate diverse regioni del cielo, selezionate in seguito ad analisi statistiche. Queste regioni di prova sono suddivise in modo tale che la regione di segnale (*on-zone*) corrisponda al Piano Galattico e che le altre regioni, dette *off-zone*, dove secondo i modelli analizzati ci si aspetta un minor segnale.

La relazione è divisa in tre parti. Nel primo capitolo sono trattate le caratteristiche generali dei raggi cosmici e dei neutrini. Si è posta particolare attenzione agli acceleratori di RC, quindi alle sorgenti di neutrini. 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. Per prima cosa sono descritte le caratteristiche principali della Galassia. Si passa quindi alle osservazioni dei neutrini galattici e cosmici da altri esperimenti sia di raggi gamma, come Fermi-LAT (orbitante attorno alla Terra), e di neutrini, come IceCube (in Antartide). Infine sono analizzati gli eventi di ANTARES applicando diversi tagli all'energia osservata.



# Capitolo 1

## Astrofisica con Neutrini

### 1.1 Importanza dell'astrofisica con Neutrini

L'astrofisica con neutrini ad alta energia (High-energy neutrino astrophysics) è una disciplina abbastanza recente, e deriva dalla necessità di estendere l'astronomia classica oltre l'usuale radiazione elettromagnetica. Quest'ultima, nonostante il considerevole numero di informazioni che ci può fornire, ha dei limiti. Per prima cosa non è possibile osservare direttamente la composizione interna dei corpi celesti (come i nuclei delle stelle), né i nuclei delle galassie attive o altre sorgenti astrofisiche che risultano opache ai fotoni. In secondo luogo, i raggi- $\gamma$  ad alte energie ( $E_\gamma > 10$  TeV) interagiscono con la radiazione di fondo (CMB) secondo il processo  $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$  limitando l'utilizzo dei fotoni ad un raggio d'indagine minore di  $\sim 10$  TeV.

Si possono utilizzare sonde diverse, come i Raggi Cosmici (vedi la sezione 1.2), particelle relativistiche di origine extra-solare con uno spettro molto ampio di energia. Sono costituiti da una componente carica e da una neutra. La componente carica, formata principalmente da protoni, è sensibile ai campi magnetici galattici e intergalattici, i quali ne deflettono la traiettoria facendo perdere le informazioni sulla direzione di provenienza. Questo problema è inesistente per la componente neutra formata da fotoni e neutrini. Questi ultimi, inoltre, hanno bassa probabilità di interagire con la materia interstellare raggiungendo la terra quasi indisturbati. Tali caratteristiche che li rendono sonde così efficienti, tuttavia li rendono anche particolarmente difficili da rivelare.

## 1.2 Raggi Cosmici

Agli inizi del '900, dopo la scoperta della radioattività (A. H. Becquerel 1896) iniziarono gli studi sulla radioattività naturale e si ipotizzò che la ionizzazione dell'aria fosse causata dalla radiazione emessa dal nostro pianeta. Il livello di ionizzazione sarebbe dovuto diminuire con l'aumentare dell'altitudine: questa ipotesi fu smentita dagli esperimenti di V. F. Hess del 1912. Egli fece diversi voli in palloni aerostatici (fino a 5 km s.l.m.) e vide che gli elettroscopi a foglie si scaricavano più velocemente all'aumentare dell'altitudine. Concluse che questa radiazione non aveva origini terrestri, ma proveniva dallo spazio esterno, da cui il nome "Raggi Cosmici" (RC), dato da Robert Millikan nel 1925.

Oggi sappiamo che la radiazione cosmica è interamente composta da nuclei e particelle elementari, che si muovono a velocità relativistiche. Le particelle accelerate direttamente da sorgenti astrofisiche sono definite *primarie*; queste interagiscono con gli atomi e le molecole dell'atmosfera terrestre, dando origine a sciame di particelle dette *secondarie*.

I raggi cosmici primari sono costituiti dal  $\sim 90\%$  di protoni ad alta energia, il  $9\%$  da nuclei di elio (particelle  $\alpha$ ), mentre il restante  $1\%$  è costituito da nuclei più pesanti dell'elio, fotoni ed elettroni. La composizione di questa radiazione è simile a quella del Sistema Solare, fatta eccezione per alcune abbondanze, spiegabili come prodotti delle interazioni tra elementi pesanti fino al ferro e i protoni del mezzo interstellare.

L'energia dei raggi cosmici primari ha uno spettro che va da  $\sim 10^9$  a  $10^{21}$  eV come in figura 1.1; al di sotto di qualche GeV il flusso risente di modulazioni dovute al vento solare. Lo spettro energetico dei raggi cosmici primari segue la seguente legge di potenza:

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

dove il coefficiente  $\Gamma = 2.7$  fino ad energie minori di  $3 \cdot 10^{15}$  eV. Oltre a questo valore, fino a  $\sim 10^{19}$  eV, nella zona del *ginocchio* (*knee*),  $\Gamma = 3.1$ ; a energie più alte la curva subisce un appiattimento, detto *caviglia* (*ankle*) (vedi in figura 1.1)[2].

Fino a  $10^{14}$  eV la misura dell'energia dei raggi cosmici primari può essere condotta direttamente tramite satelliti o palloni stratosferici. In questo range di energie è possibile osservare l'esatta composizione della radiazione cosmica: questi esperimenti sono sostanzialmente degli spettrometri di massa, in grado di misurare la carica, l'energia e la massa della particella. A energie superiori, a causa dello scarso flusso di raggi cosmici, diventa

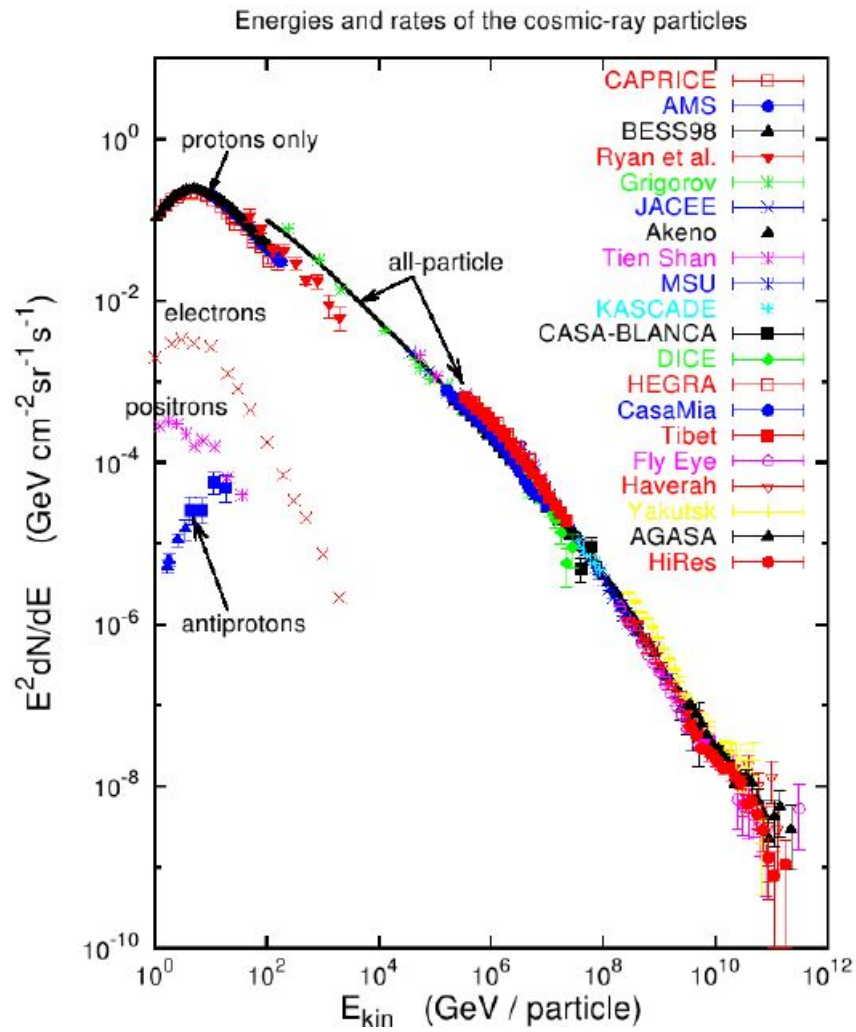


Figura 1.1: Spettro dei raggi cosmici misurato da diversi esperimenti [3].

necessario procedere a misure indirette, con grandi esperimenti posti sulla superficie terrestre. In questo caso si osserva lo sciame di particelle secondarie generate dal raggio cosmico primario nell'atmosfera e si ricostruisce l'energia del raggio cosmico primario osservando le particelle secondarie che giungono al rivelatore posto a terra. Oltre  $\Gamma = 3.1$ , nella *caviglia*, si assume che i raggi cosmici abbiano origine extra-galattica.

Nella misura dei raggi cosmici ad alta energia è necessario tenere conto dell'interazione di questi con i fotoni della radiazione cosmica di fondo (CMB) a 2.7 K. Questo effetto, chiamato Greisen-Zatsepin-Kuzmin effect (GZK), impone un limite teorico all'energia dei protoni ad un'energia dell'ordine di  $10^{19}$  eV(GZK cutoff)[2].

### 1.3 I Neutrini

L'esistenza del neutrino fu ipotizzata da Pauli nel 1930 per spiegare lo spettro non monocromatico degli elettroni prodotti dal decadimento  $\beta$  dei nuclei. Il nome neutrino fu assegnato successivamente da Fermi, nell'ambito della teoria sul decadimento beta.

Nel Modello Standard il neutrino  $\nu$  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 (*flavour* in inglese). I neutrini hanno carica elettrica e di colore nulla, risentono quindi soltanto dell'interazione debole, che agisce sul sapore. Hanno spin 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". Dal momento che l'interazione debole ha un range d'azione molto basso, la sezione d'urto d'interazione neutrino-materia è molto bassa. Ne consegue che la lunghezza di interazione dei neutrini è molto grande, perciò i rivelatori devono avere volumi grandi oppure elevata densità di materia. L'interazione debole ha tre mediatori: due carichi,  $W^+$  e  $W^-$ , e uno neutro,  $Z^0$ . In base alla carica del bosone coinvolto si distinguono due processi [1]: 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  $W^-$ .

## 1.4 Acceleratori di RC e sorgenti di Neutrini

La produzione di neutrini ad alta energia è collegata all'interazione di protoni e nuclei, fortemente accelerati da sorgenti galattiche ed extragalattiche (RC), con altri nuclei o gas di fotoni. In base al range di energia considerato, i raggi cosmici possono essere accelerati da diverse sorgenti. Dal momento che i meccanismi che producono raggi cosmici possono produrre neutrini e fotoni ad alta energia, le sorgenti candidate ad essere acceleratori di RC, sono le stesse per la produzioni di neutrini e raggi gamma ad alta energia[2]. In prima approssimazione, la classificazione delle sorgenti può essere fatta in base a dove avviene la produzione di neutrini, quindi alla distanza dalla Terra: sorgenti *locali*, *galattiche* e *extra-galattiche*.

### 1.4.1 Neutrini atmosferici

I RC colpiscono i nuclei presenti nell'alta atmosfera (altezza  $10 \div 20$  km) producendo sciami di particelle secondarie, le quali possono decadere a loro volta. In particolare, per  $E_\nu > 100 \text{ GeV}$  i kaoni ( $K^0$ ,  $K^\pm$ ) rappresentano la fonte dominante per la produzione di neutrini, nonostante sia più probabile la produzione di un mesone  $\pi$  che di un  $K^{\pm,0}$ . Per  $E_\nu \sim \text{GeV}$  il decadimento dei pioni carichi produce muoni e neutrini muonici:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \\ \pi^- &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-\end{aligned}\tag{1.2}$$

A loro volta i muoni possono decadere nel modo seguente:

$$\begin{aligned}\mu^+ &\rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e\end{aligned}\tag{1.3}$$

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

### 1.4.2 Sorgenti cosmiche

Ci sono diverse ipotesi sui processi di accelerazione dei RC. Questa è dovuta a processi iterativi di *scattering* con fronti d'onda piani, come le onde d'urto generate in seguito

ad eventi esplosivi, come collassi gravitazionali. Ogni particella con energia  $E$  guadagna circa  $\Delta E \sim \beta E$ , con  $\beta \sim 10^{-2}$  (Meccanismo di Fermi, *knee*). La produzione attraverso *processi adronici* consiste nell'interazione di protoni accelerati nei pressi degli emettitori di RC per mezzo della risonanza  $\Delta^+$ :



Le sorgenti più accreditate per la formazione di neutrini sono i relitti di supernovae (SNR), *Active Galactic Nuclei*, e i *Gamma Ray Bursts*.

**Supernova remnants (SNR)** I resti di supernovae sono i siti più accreditati per l'accelerazione di neutrini. 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  $\nu$ , che arrivano sulla terra in tempi molto brevi ed in grande numero. Dopo l'esplosione spesso si forma una nebulosa con al centro una stella di neutroni o una pulsar. Le pulsar 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 (eq. 1.4)[2].

**Active Galactic Nuclei (AGN)** Gli AGN sono galassie al cui centro è presente un buco nero supermassivo ( $M \sim 10^6 \div 10^9 M_\odot$ ). Questo attrae una grande quantità di materia, la quale 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 ( $L > 10^{47} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Interessanti AGN sono i *blazar*, in cui uno dei due *jet* è allineato con l'osservatore. Per via dell'elevato flusso del getto verso quest'ultimo, sono individuabili come sorgenti puntiformi. Un comportamento simile agli AGN lo hanno anche i *microquasar*, sistemi di stelle di binarie X in cui sono presenti *jet* radio. Questi 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*.



Sembra che la somiglianza tra *AGN*, *blazar* e *microquasar* non sia soltanto morfologica. I meccanismi che determinano la formazione di un disco di accrescimento e l'espulsione di materia potrebbero essere gli stessi che governano, su scala molto maggiore, gli *AGN*. In modo analogo agli *AGN*, i jet generati da questi oggetti galattici possono accelerare particelle cariche.

**Gamma Ray Bursts (GRB)** I Gamma Ray Bursts (GRB) sono lampi di raggi  $\gamma$  seguiti spesso da un'emissione negli spettri radio, ottico ed X, di durata complessiva compresa tra i millisecondi e qualche decina di secondi. Si tratta di fenomeni estremamente energetici, in cui la maggior parte dell'energia è portata da fotoni di energia superiore al MeV, e sono spesso associati al collasso di stelle molto massive in buchi neri. L'energia totale rilasciata dal fenomeno è dell'ordine di  $10^{51} \div 10^{54}$  erg.

Il modello maggiormente utilizzato per spiegare il fenomeno dei *GRB* è detto *fireball model*. La *fireball* prodotta dal collasso si espande a velocità altamente relativistiche (con fattore di Lorentz  $\Gamma \sim 10^{2.5}$ ), spinta dalla pressione di radiazione. I protoni accelerati nello shock della *fireball* perdono energia interagendo con i fotoni presenti nell'ambiente circostante, in cui domina la produzione della risonanza  $\Delta^+$ . Conoscendo le condizioni necessarie per la produzione della  $\Delta^+$  e noto il fattore di Lorentz: per la produzione di fotoni di energia del MeV, è necessario che i protoni siano accelerati fino a  $10^{16}$  eV. I neutrini derivanti dal decadimento dei pioni carichi portano circa un 5% dell'energia del protone: ne consegue che è prevista l'osservazione di neutrini attorno al centinaio di TeV.



# Capitolo 2

## Telescopi di neutrini e ANTARES

### 2.1 Principio di rivelazione di neutrini

Un rivelatore di neutrini agisce da telescopio quando la direzione dei neutrini rivelati è ricostruita con una precisione . Se si ha una ricostruzione accurata della direzione di arrivo del neutrino, è possibile associarlo ad una sorgente già nota.

Il principio di rivelazione si basa sulla possibilità di usare la luce Cherenkov generata dai leptoni, prodotti dall'interazione dei neutrini che giungono al rivelatore con il mezzo. I leptoni scelti sono muoni poiché hanno massa tale per cui non perdono tutta l'energia nei processi radiativi, possono quindi attraversare grandi quantità di materia prima di decadere. In particolare in mezzi come acqua o ghiaccio possono percorrere distanze dell'ordine del chilometro.

La sezione d'urto e i flussi attesi per i neutrini astrofisici sono estremamente bassi, perciò sono necessari rivelatori di enormi dimensioni. Occorre quindi disporre di un gran numero di rivelatori in un mezzo trasparente, come l'acqua di mare (come nel caso dell'esperimento ANTARES e in futuro KM3NeT) o il ghiaccio antartico (esperimento IceCube). Si ha così un bersaglio di grandi dimensioni ed un mezzo trasparente per la propagazione di luce Cherenkov. Una volta rivelata questa è necessario ricostruire la direzione di arrivo della particella, o dello sciame, che l'hanno generata, per poi risalire a sua volta alla direzione di provenienza del neutrino.

Il telescopio, inoltre, deve essere posto in profondità in modo tale da avere una schermatura

rispetto alle particelle secondarie prodotte dai RC. I muoni che arrivano al rivelatore sono divisi in due tipologie in base al verso di propagazione: *down-going* se provenienti dall'alto e diretti verso il basso, e, viceversa, *up-going*. Questi ultimi possono essere solo eventi generati da neutrini poiché un muone non potrebbe attraversare più di 5 km di roccia.

### 2.1.1 Rivelazione di muoni

Nel caso di neutrini ad alta energia ( $E \geq 1\text{TeV}$ ) è possibile vedere interazioni di neutrini che avvengono fuori dal volume del rivelatore. Sperimentalmente, quindi, 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 alla direzione di provenienza del neutrino [2].

Per un telescopio di neutrini è fondamentale conoscere la relazione tra la direzione iniziale del neutrino e del muone in uscita. L'angolo medio tra queste due direzioni è:

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

Si trova che, entro il limite dell'apparato, per  $E_\nu > 10 \text{ TeV}$  la ricostruzione della direzione della traccia del muone equivale è entro a  $0.2^\circ$  rispetto a quella del neutrino iniziale, permettendo quindi di risalire alla sorgente.

### 2.1.2 Effetto Cherenkov

Ogni telescopio che opera nel range di energie TeV-PeV utilizza moduli ottici che sfruttano l'effetto Cherenkov delle particelle relativistiche. Se una particella carica è in moto in un mezzo con indice di rifrazione  $n$ , con una velocità  $v$  maggiore della velocità di fase della luce nel mezzo ( $v \geq c/n$ ), allora si ha un fenomeno simile alla generazione di un'onda d'urto. La particella, solo se  $\beta \geq 1/n$ , polarizza le molecole del mezzo lungo la sua traiettoria, e quando gli elettroni tornano allo stato di equilibrio emettono radiazione, detta *Cherenkov*. Questa viene emessa entro un cono con angolo caratteristico  $\theta_C$  dato dalla relazione:

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n} \quad (2.2)$$

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

$$\frac{d^2 N_\gamma}{d\lambda dx} = \frac{2\pi Z^2}{\lambda^2 137} \left( 1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) \quad (2.3)$$

Si noti come la radiazione di minor lunghezza d'onda contribuisca in maniera più significativa alla radiazione.

Da questo emerge come i muoni in condizioni di alte energie rispondono ai requisiti per originare *radiazione Cherenkov* nel passaggio in acqua o ghiaccio, considerati radiatori Cherenkov naturali. In particolare per una particella relativistica ( $\beta \simeq 1$ ) in acqua marina ( $n \simeq 1.364$ ) l'angolo di Cherenkov vale circa  $43^\circ$ .

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.

## 2.2 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.

La base del rivelatore è localizzata ad una profondità di 2475 *m* nel Mar Mediterraneo, a sud est della costa di Tolone, in Francia. La sua posizione geografica permette l'osservazione della maggior parte del piano galattico, incluso il Centro Galattico (figura 2.1). L'area totale di visibilità di ANTARES è pari a  $3.5\pi$  sr, con una sovrapposizione di 0.5 sr con l'esperimento IceCube. In particolare il centro galattico viene osservato per circa il 70% del giorno siderale.

L'apparato sperimentale consiste in un array di  $\sim 900$  fotomoltiplicatori (PMTs) disposti in 12 stringhe, un'altezza attiva di  $\sim 0.3$  km, occupando in totalità un volume di  $\sim 0.05$   $km^3$  (vedi fig. 2.2). L'unità di base del rivelatore è il modulo ottico (OM), una

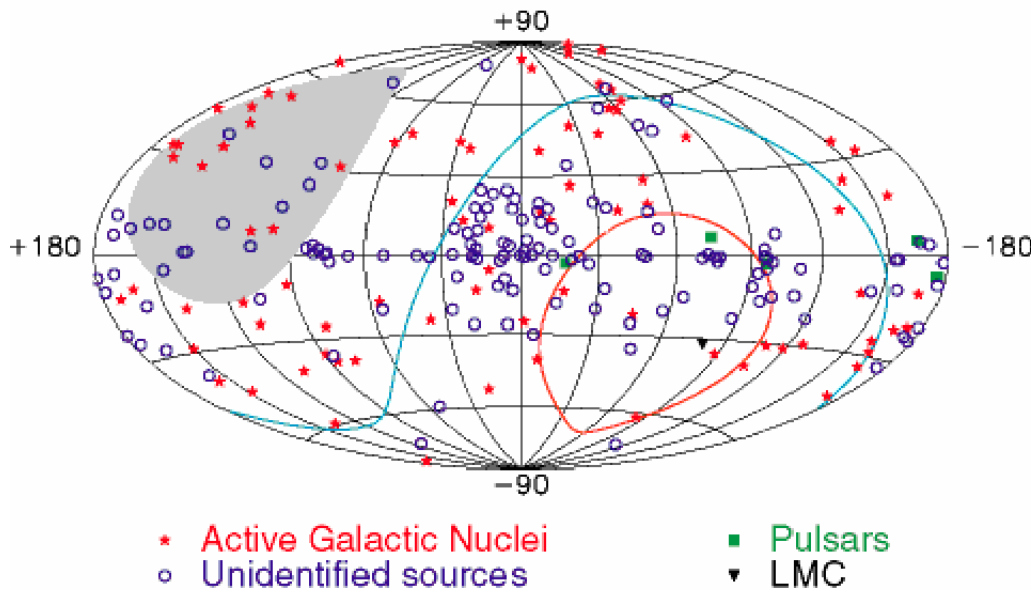


Figura 2.1: Visibilità del telescopio ANTARES in coordinate galattiche [4].

sfera di vetro resistente alla pressione dell'acqua del mare, al cui interno sono presenti un PMT emisferico, vari sensori e circuiti integrati associati al dispositivo. I moduli ottici, disposti nei piani delle stringhe, hanno l'asse dei fotomoltiplicatori a  $45^\circ$  sotto l'orizzonte. L'angolo di accettazione dei PMTs, per gli impulsi luminosi, è ampio in modo tale da rilevare 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.

Il fondo per i neutrini di origine astrofisica è costituito perlopiù da neutrini atmosferici e muoni down-going. A questi si aggiungono altri effetti dovuti all'ambiente come la bioluminescenza, dovuta al passaggio di batteri bioluminescenti nei pressi del rivelatore; e decadimenti di isotopi come  $^{40}\text{K}$ .

### 2.2.1 Ricostruzione delle tracce

La ricostruzione delle tracce dei muoni viene fatta attraverso metodi di massima verosimiglianza (maximum likelihood estimation, MLE)[2]. Si cerca la verosimiglianza tra

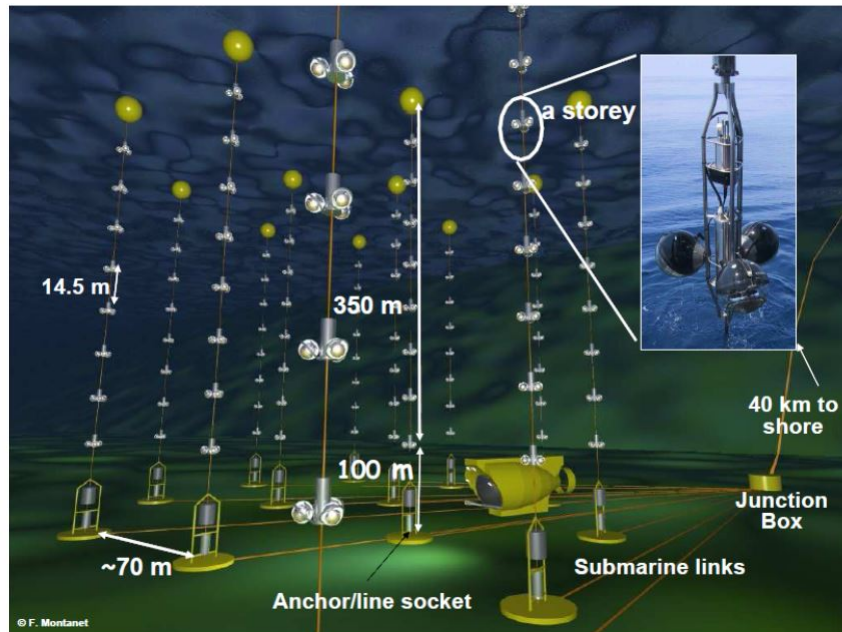


Figura 2.2: Visione schematica del rivelatore ANTARES [2].

tracce diverse considerando la posizione, la direzione e, a volte, l'energia, utilizzando funzioni che modellizzano la propagazione della luce. Si ottiene quindi la distribuzione di probabilità (PDF) di un fotone di colpire un PMT in funzione del tempo, noti l'orientamento della traccia da cui è stato irradiato e la posizione e l'orientamento del PMT. Solitamente queste distribuzioni sono calcolate attraverso simulazioni che tracciano i fotoni nel mezzo. Si utilizzano due strategie di MLE: nella ricerca *full-sky* si osserva l'intero cielo per cercare sorgenti puntiformi, sotto forma di un eccesso di eventi in una qualche direzione; nella *candidate search* si investigano neutrini provenienti da direzioni selezionate a priori, corrispondenti a sorgenti gamma note, alla ricerca di corrispondenze tra la sorgente e gli effetti rivelati. La qualità della ricostruzione della traccia è quantificata dal parametro  $\Lambda$ , basata 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  $\Lambda$ . Tale valore può essere ottenuto ottimizzando la riduzione del fondo e l'efficienza del segnale in termini del flusso di neutrini [11][12].





# Capitolo 3

## Ricerca di neutrini dal piano galattico con ANTARES

### 3.1 Neutrini dal piano galattico

Il centro della Via Lattea è considerato 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.

Per prima cosa, è necessario conoscere la distribuzione e la composizione della materia nella Via Lattea, poiché è il bersaglio con cui interagiscono i RC ed il campo magnetico che agisce al suo interno, che ne causa la deviazione.

#### 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, che è composta da stelle e dal mezzo interstellare. Il raggio medio del disco è di  $\sim 15kpc$ , mentre l'altezza media è di  $\sim 0.3$  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  $\sim 3$  kpc [5].

Il mezzo interstellare è formato da gas e polveri e rappresenta il  $5 \div 10\%$  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  $B \simeq 4 \mu G$ . Una volta noti questo valore e le dimensioni della galassia, possiamo dedurre che particelle con energie minori di  $10^{18}$  eV sono confinate all'interno del volume galattico [5].

Per rappresentare la Galassia si possono utilizzare diverse proiezioni, in questa tesi è stato scelto di utilizzare il sistema di coordinate galattiche. Analogamente alle coordinate terrestri è composto da *latitudine* (l) e *longitudine* (b) galattiche. Il cerchio massimo di riferimento è dato dall'intersezione del piano parallelo al disco galattico passante per il Sole e la sfera celeste.

### 3.1.2 Flusso di neutrini dalle osservazioni di raggi- $\gamma$

I RC sono formati, come visto nella sezione 1.2, in maggioranza da protoni relativistici. Le interazioni di questi con i protoni del mezzo interstellare possono essere di due tipi: urti elastici, in cui entrambi i protoni escono intatti, e anelastici, dove un protone, o entrambi, si frammentano in seguito all'interazione. Alle energie considerate, circa l'80% della sezione d'urto dell'interazione protone-protone è dovuta ad urti anelastici [8]. Il meccanismo principale di produzione di neutrini è dato dal decadimento di leptoni e mesoni che decadono prima di interagire con altre particelle trasferendo la propria energia ai neutrini. Il decadimento di pioni e, in maniera minore, di kaoni costituisce la sorgente principale di neutrini dopo le interazioni dei RC primari.

I pioni carichi prodotti a seguito dell'interazione dei RC sono circa il doppio rispetto a quelli neutri.  $\pi^+$  e  $\pi^-$  decadono con *branching ratio*<sup>1</sup> BR= 99.99% [6] in

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}\tag{3.1}$$

---

<sup>1</sup>La frazione di decadimento, o *branching ratio*, quantifica il modo di decadimento di una particella ed è pari al rapporto tra la costante di decadimento parziale  $\Gamma_i$  della larghezza di decadimento considerato e la larghezza di decadimento totale  $\Gamma$ :  $BR = \frac{\Gamma_i}{\Gamma}$ ; inoltre si noti che  $\sum \frac{\Gamma_i}{\Gamma} = 1$  [1].

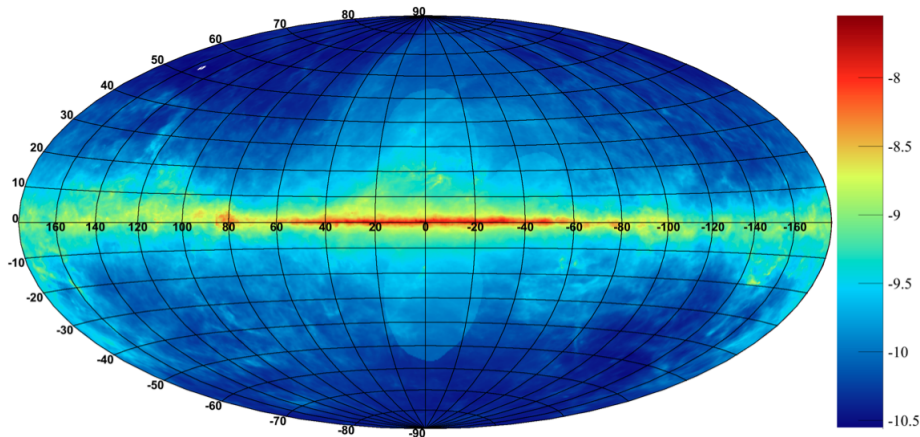


Figura 3.1: Mappa del flusso diffuso di raggi- $\gamma$  misurato da Fermi-LAT all'energia di 3.4 GeV in coordinate galattiche [8]. L'intensità del flusso diffuso è rappresentata dalla scala di colore.

mentre i  $\pi^0$  in una coppia di fotoni (BR= 98.80%) [6]. Da queste considerazioni si può dedurre che il flusso di neutrini è correlato al flusso di  $\gamma$  osservati. Si cerca allora una correlazione tra i dati provenienti dai telescopi di raggi- $\gamma$  ad alta energia e quelli dei telescopi di neutrini.

Il telescopio che offre la miglior misura del flusso diffuso di raggi- $\gamma$  nel piano galattico è il *Fermi-large area telescope* (LAT). Questo è il principale strumento collocato sulla navicella Fermi (Fermi Gamma Ray Space Telescope spacecraft), orbitante nell'orbita inferiore terrestre. Essa è progettata in modo tale che LAT sia sempre orientato verso la sfera celeste, cosicché la Terra non riduca la visuale del rivelatore che, in questo modo, copre circa il 20% del cielo in ogni momento. Il range di energia di Fermi-LAT va da 20 MeV fino a superare i 300 GeV [7]. In figura 3.1 è rappresentato il flusso di raggi- $\gamma$ , misurato da Fermi-LAT. Si osserva che nel Piano Galattico, in particolare nel Centro, il flusso è molto più intenso rispetto alle zone più esterne. La maggior densità di materia in queste zone, infatti, può essere la causa dell'aumento del flusso di raggi- $\gamma$ .

Sono stati sviluppati diversi modelli fenomenologici per la produzione di neutrini da queste regioni, dipendenti dalle proprietà di trasporto dei RC. Questi modelli prevedono flussi con un indice spettrale analogo a quello dei RC primari.

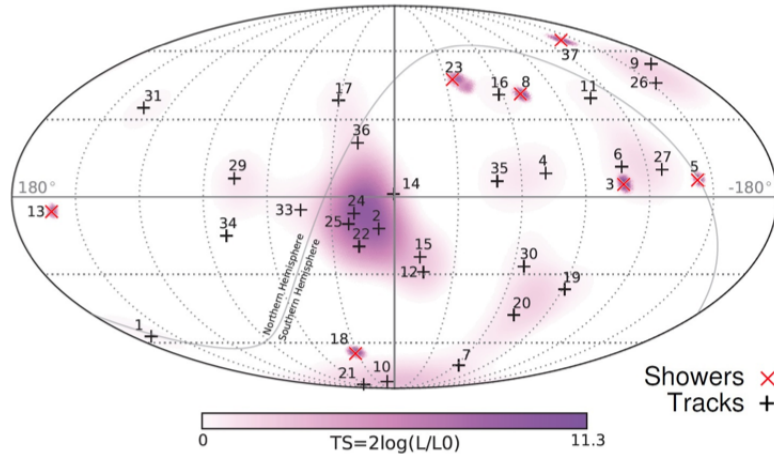


Figura 3.2: Direzioni di arrivo degli eventi del telescopio IceCube in coordinate galattiche. Gli eventi che contengono delle tracce di muoni sono segnati con  $\times$  e quelli riconducibili a sciame con  $+$  [5].

Ad alte energie è stato notato che i dati di Fermi-LAT non seguono l'andamento previsto dai modelli. Per risolvere questa discrepanza è stato proposto che parte del flusso atteso potrebbe essere prodotto dall'interazione di RC forniti da acceleratori giovani e confinati da campi magnetici locali. Altri modelli spiegano questo eccesso introducendo una dipendenza radiale alla propagazione e all'interazione con il mezzo interstellare dei RC confinati nella parte centrale della Galassia.

## 3.2 Ricerca di neutrini dal piano galattico

### 3.2.1 Osservazioni di neutrini cosmici

Oltre ad ANTARES, un altro importante telescopio di neutrini è IceCube, come accennato nel capitolo 2. Esso ha le stesse finalità di ANTARES, ma, essendo collocato in Antartide, osserva una differente porzione di cielo, quindi gli eventi provenienti dall'emisfero meridionale sono osservati come *down-going* (figura 3.2).

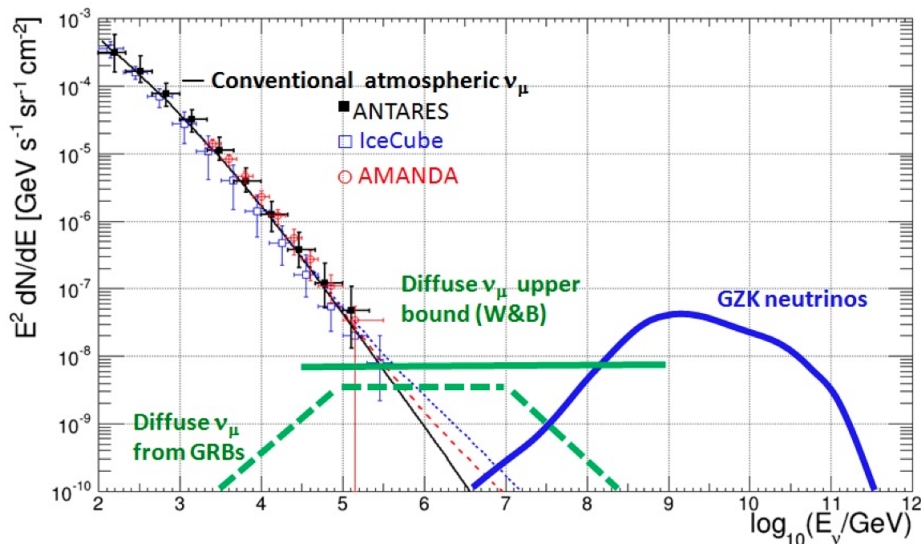


Figura 3.3: Flussi attesi da diversi modelli di sorgenti diffuse e background di neutrini atmosferici. I punti rappresentano le misure del flusso di neutrini atmosferici ( $\nu_\mu$  e  $\bar{\nu}_\mu$ ) in funzione dell'energia. La linea nera rappresenta il flusso atteso e quella verde tratteggiata rappresenta il limite superiore per i neutrini muonici prodotti dai GRBs [5].

Questi ultimi sono selezionati con una tecnica di veto che favorisce la rivelazione di sciame, con una risoluzione di  $\sim 10 \div 15^\circ$  [9].

Recentemente IceCube ha rivelato un flusso di neutrini cosmici con un range di energia che va dai 30 a 2000 TeV e la maggior parte di questi è *down-going*. Questo flusso di neutrini provenienti dall'alto ha energie molto maggiori rispetto a quelle attese dai neutrini prodotti dagli sciame secondari in atmosfera, in particolare sono stati ricostruiti eventi con  $E_\nu > 100$  TeV [10]. Il flusso di neutrini astrofisici potrebbe essere generato da sorgenti cosmiche distribuite in modo isotropo, tuttavia rimane sempre un eccesso dall'emisfero Sud. Potrebbe essere interpretato come un insieme di sorgenti puntiformi relativamente piccola o una distribuzione di sorgenti nel cielo.

Come menzionato nella sezione 1.4, gli AGN e i GRBs sono le più probabili sorgenti di neutrini cosmici con energie dell'ordine del centinaio di TeV. I modelli che descrivono questi oggetti celesti prevedono una distribuzione isotropa del segnale.

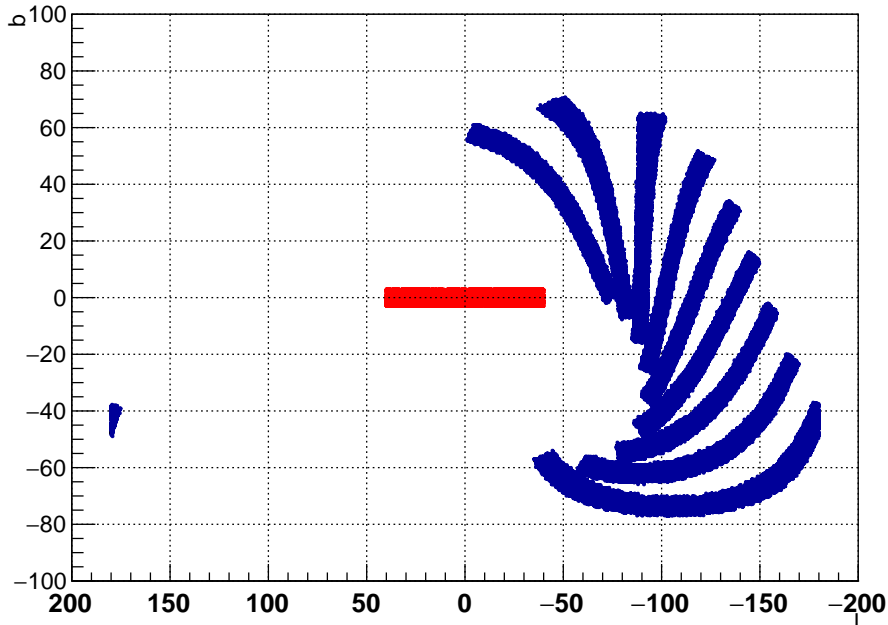


Figura 3.4: On-zone in rosso e off-zone in blu in coordinate galattiche ( $|l_{cut}| \leq 40^\circ$  e  $|b_{cut}| \leq 3^\circ$ ).

### 3.2.2 Metodo di ricerca

In questa analisi sono stati utilizzati i dati dal 2007 al 2013, dopo essere stati selezionati accuratamente, in modo da eliminare il fondo e gli effetti ambientali. L'idea che sta alla base della nostra analisi è che l'aumento del flusso di neutrini da una certa regione del cielo, in un certo angolo solido, può essere trovata comparando il numero di eventi provenienti da quella zona (*on-zone*) e quelli provenienti da altre regioni, dove non è atteso il segnale (*off-zone*).

La regione denominata *on-zone*, o di segnale, è rappresentata da un rettangolo in coordinate galattiche, come si vede in figura 3.4, le cui dimensioni sono state scelte in seguito ad analisi statistiche, che tengono conto di dove è atteso il maggior numero di eventi. Le *off-zone*, o regioni di background, hanno le stesse dimensioni e la stessa copertura del rivelatore della *on-zone*. Il numero e la posizione di queste è scelto in modo tale da avere il maggior numero di *off-zone* senza che ci sia sovrapposizione. Nella figura

3.4 si può osservare che le regioni di background sembrano coprire una superficie maggiore rispetto a quella di segnale. Questo effetto visivo è dovuto alla rappresentazione scelta.

In base ad analisi statistiche è stato calcolato che la sezione ottimizzata per la regione di segnale è pari a  $|l_{cut}| \leq 40^\circ$  e  $|b_{cut}| \leq 3^\circ$  [9]. In questa tesi sono stati utilizzati 4 ulteriori set di regioni di prova. Fissata  $l_{cut}$  a  $\pm 40^\circ$  si è variata  $|b_{cut}|$ , variando così anche il numero di *off-zone*, come si può vedere nella seguente tabella:

$ b_{cut}  \leq$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$	$6^\circ$	$8^\circ$
Numero di off-zone	12	9	8	6	5
$\sim \Delta\Omega$ (sr) [9]	0.097	0.145	0.194	0.292	0.388

Una volta stabilite le regioni *on* e *off*, è necessario applicare dei tagli ai fattori di qualità  $\Lambda$ , di cui è stato discusso nella sezione 2.2.1, e  $\beta$ , che rappresenta la risoluzione angolare. In particolare è stato impostato  $\Lambda > -5.2$  e  $\beta < 1$ , come nell'analisi delle sorgenti puntiformi [11][12]. Utilizzando l'estimatore  $E_{ANN}$ , calcolato da una rete neurale, sono stati applicati tagli diversi all'energia, in particolare 1, 3 e 5 TeV. Infine sono stati contati il numero di eventi nella regione di segnale e poi sono stati confrontati con quello delle regioni di background.

### 3.3 Analisi dati

In figura 3.5 sono rappresentati gli eventi misurati da ANTARES in due diversi range di energia. In particolare, in azzurro sono raffigurati gli eventi a cui sono stati applicati i tagli ai fattori di qualità  $\Lambda$  e  $\beta$  (vedi 3.2.2); mentre quelli in rosso sono gli eventi a cui è stato applicato anche il taglio all'energia:  $E > 10$  TeV. Da un punto di vista qualitativo, si può osservare che i dati in rosso sono in numero molto minore rispetto al resto.

L'energia delle tracce dei muoni è stata ricostruita utilizzando l'estimatore  $E_{ANN}$ . In figura 3.6 è raffigurato il numero di eventi misurati in funzione dell'energia nelle regioni di prova  $|b_{cut}| \leq 3^\circ$  e  $|b_{cut}| \leq 6^\circ$ . La distribuzione energetica della regione di segnale con i relativi errori è in rosso, mentre l'istogramma in nero rappresenta l'andamento medio nelle *off-zone*. Si ricorda che le barre di errore sono presenti soltanto nell'istogramma relativo all'*on-zone*, poiché l'incertezza associata alla misura in questa regione è maggiore di quella dovuta al numero di eventi calcolato su una media delle *off-zone*.

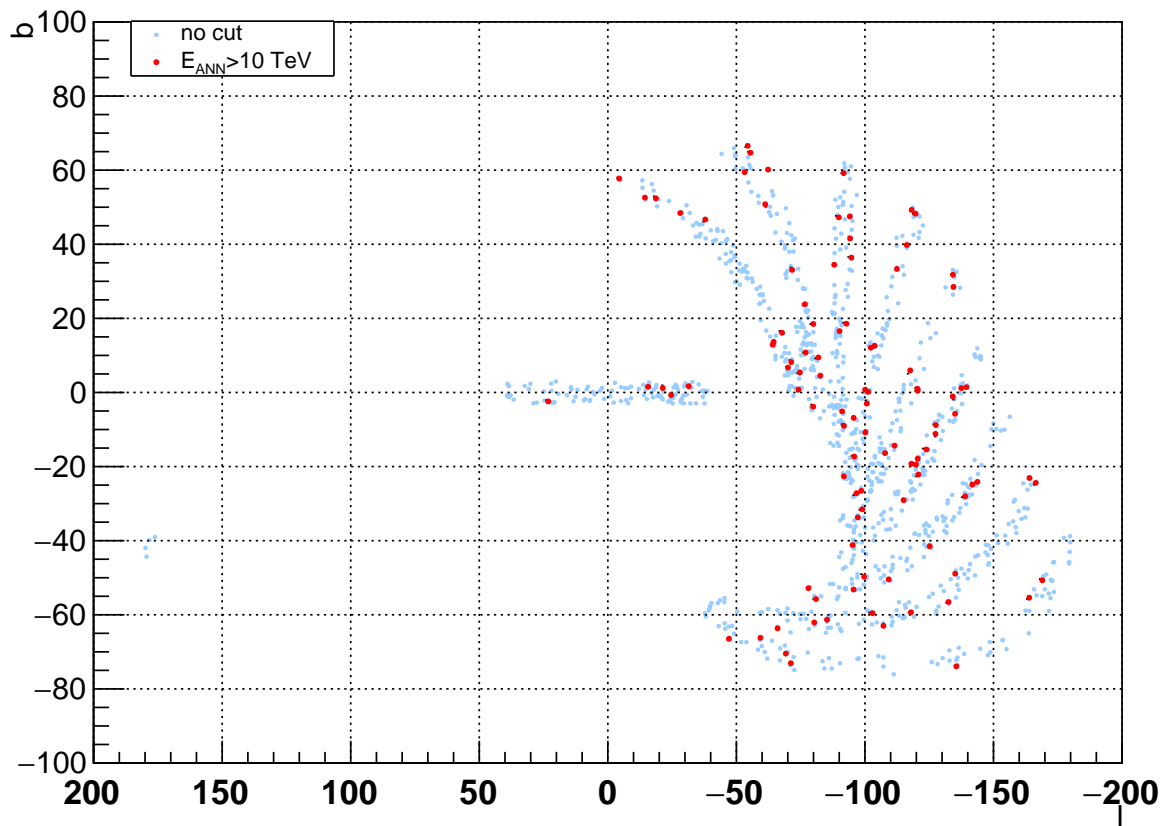


Figura 3.5: Eventi che rientrano nella on-zone e nelle 9 off-zone ( $|b_{cut}| \leq 3^\circ$ ) con i tagli  $\Lambda > -5.2$ ,  $\beta < 1$ , in rosso gli eventi che hanno  $E_{ANN} > 10$  TeV.



(a) $ b_{cut}  \leq 2^\circ$ , 12 off-zone			(b) $ b_{cut}  \leq 3^\circ$ , 9 off-zone		
$E_{ANN} >$	On	Off	$E_{ANN} >$	On	Off
No $E_{ANN}$ cut	66	66	No $E_{ANN}$ cut	102	97
1 TeV	49	48	1 TeV	74	70
3 TeV	21	21	3 TeV	27	30
5 TeV	15	14	5 TeV	18	20

(c) $ b_{cut}  \leq 4^\circ$ , 8 off-zone			(d) $ b_{cut}  \leq 6^\circ$ , 6 off-zone		
$E_{ANN} >$	On	Off	$E_{ANN} >$	On	Off
No $E_{ANN}$ cut	123	135	No $E_{ANN}$ cut	187	195
1 TeV	92	97	1 TeV	135	139
3 TeV	39	41	3 TeV	57	60
5 TeV	25	27	5 TeV	32	38

(e) $ b_{cut}  \leq 8^\circ$ , 5 off-zone		
$E_{ANN} >$	On	Off
No $E_{ANN}$ cut	259	263
1 TeV	189	190
3 TeV	76	82
5 TeV	41	51

Tabella 3.1: Numero di eventi misurati in tutti i set di regioni di prova

Nelle tabelle 3.1 sono rappresentati il numero degli eventi nelle regioni di prova per ogni taglio dell'energia. Per poter confrontare il numero di eventi, è stata fatta una media sulle *off-zone*. Si osserva che aumentando le dimensioni delle regioni di prova, aumenta anche il numero degli eventi.

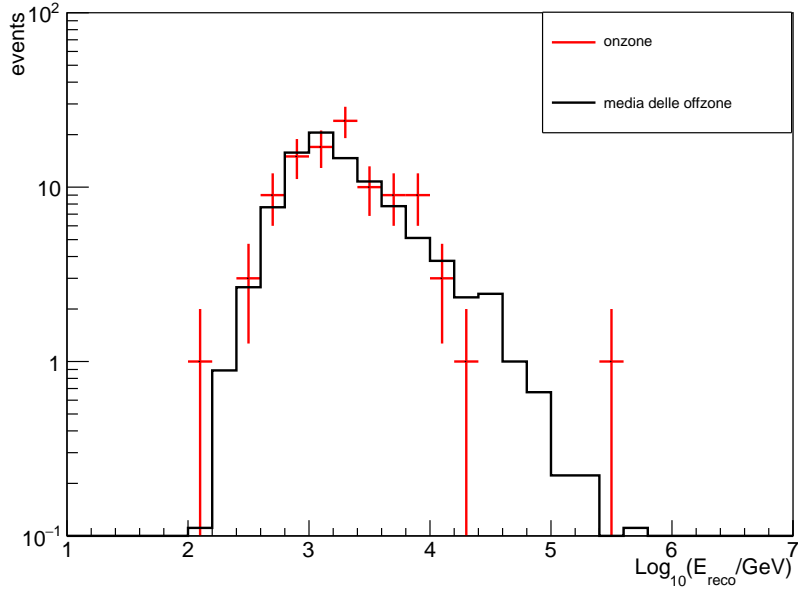
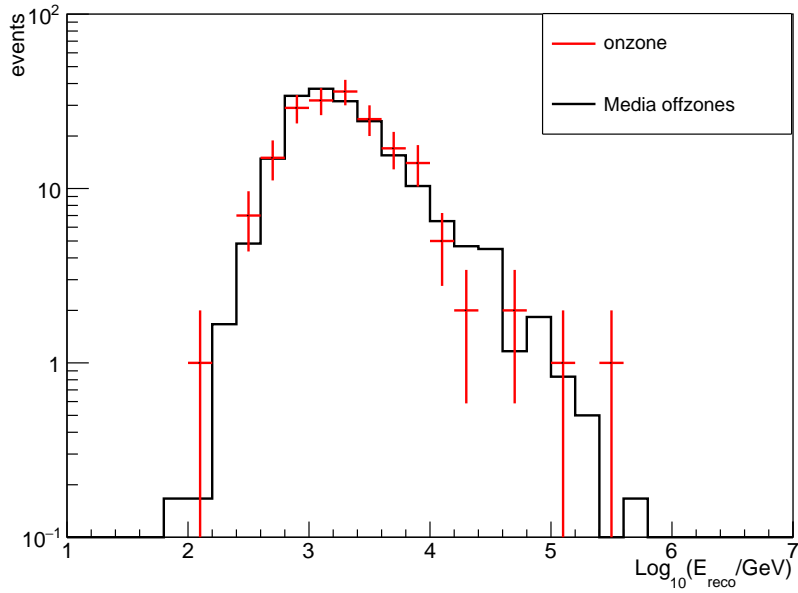
(a)  $|b_{cut}| \leq 3^\circ$ , 9 off-zone(b)  $|b_{cut}| \leq 6^\circ$ , 6 off-zone

Figura 3.6: Distribuzione dell'energia ricostruita dei muoni *up-going* nel Piano Galattico (in rosso) e nelle regioni di background per due diversi set di regioni.

# Conclusioni

In questa tesi sono stati analizzati 726714 dati, raccolti dal 2007 al 2013 da ANTARES, selezionati in modo tale da eliminare gli effetti ambientali e del fondo. Sono stati scelti cinque set di regioni di prova. Sapendo che la dimensione ottimale ha dimensioni  $|l_{cut}| \leq 40^\circ$  e  $|b_{cut}| \leq 3^\circ$ , si è scelto di mantenere costante  $l_{cut}$  a  $\pm 40^\circ$  e variare  $b_{cut}$ , variando così anche il numero di *off-zone*. In particolare i valori di  $b_{cut}$  scelti sono  $\pm 2^\circ$ ,  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 4^\circ$ ,  $\pm 6^\circ$  e  $\pm 8^\circ$ . Dopo aver applicato i tagli ai fattori di qualità  $\Lambda$  e  $\beta$  si è proceduto analizzando il numero di eventi, in funzione dell'energia. Come si può osservare nelle tabelle 3.1 e nella figura 3.5, dall'analisi fatta non è emerso alcun eccesso di eventi ad alta energia nelle regioni considerate.

# Bibliografia

- [1] “Particelle e interazioni fondamentali” 2 edizione - S. Braibant, G. Giacomelli, M. Spurio (2012) Springer
- [2] “High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes” - T.Chiarusi e M.Spurio Eur. Phys. J. C (2010) 65:649-701
- [3] “Hamburg University website” [www.iexp.uni-hamburg.de](http://www.iexp.uni-hamburg.de)
- [4] “ANTARES collaboration website” [antares.in2p3.fr](http://antares.in2p3.fr)
- [5] “Particles and Astrophysics - A multimessenger approach” - M. Spurio (2014) Springer
- [6] K. A.Olive *et al.* [Particle Data Group Collaboration], Chin. Phys. C **38**(2014)090001. doi:10.1088/1674 – 1137/38/9/090001
- [7] Fermi-LAT experiment website [fermi.gsfc.nasa.gov](http://fermi.gsfc.nasa.gov)
- [8] “Neutrinos from the Milky Way” - E. L. Visser Doctoral Thesis, Leiden University. <http://hdl.handle.net/1887/32966>(2015)
- [9] “Limits on the neutrino emission from the Galactic Ridge with the ANTARES telescope” - (2015)
- [10] “Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector” - M. G. Aartsen et al. [IceCube Collaboration], Science 342, 1242856 (2013) arXiv:1311.5238 [astro-ph.HE].
- [11] “First Search for Point Sources of High Energy Cosmic Neutrinos with the ANTARES Neutrino Telescope” - S. Adrià-Martínez et al., (2011) arXiv:1108.0292 [astro-ph.HE]

- [12] “Search for point sources of cosmic neutrinos with the ANTARES neutrino telescope”  
- J.P. Gomez-González on behalf of the ANTARES Coll. J. of Phys. (2012): Conf. Ser.  
355 012040

# Ringraziamenti

Grazie al Professore Spurio e a Dottor Fusco per la pazienza e la disponibilità dimostrata. Il grazie più grande va ai miei genitori che mi hanno sempre sostenuto e mi sono sempre stati vicino. Un doveroso ringraziamento inoltre va a Federico, che mi ha sopportato e mi è stato vicino ogni giorno in questi mesi. Last but not least, grazie a Marina, Octavio, Pit e gli altri amici con cui ho condiviso questi anni.