

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Confronto tra la direzione di arrivo
dei neutrini
di ANTARES e ICECUBE

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Emma Minarelli

Sessione II
Anno Accademico 2013/2014

*... Salimmo sù, el primo e io secondo,
tanto ch'i' vidi de le cose belle
che porta 'l ciel, per un pertugio tondo.
E quindi uscimmo a riverder le stelle.*

Canto XXXIV, Divina Commedia

Dante Alighieri

Abstract. Questo lavoro è finalizzato al confronto delle rivelazioni di candidati eventi di neutrino cosmico da parte di due esperimenti ANTARES ed ICECUBE. I due apparati, entrambi basati sulla rivelazione di radiazione Cherenkov generata da prodotti di interazione CC dei neutrini, si differenziano per la geometria del detector e per il mezzo in cui viene prodotta la radiazione, e hanno quindi sensibilità e risoluzione diverse. L'analisi dei dati è basata sulla rappresentazione delle direzioni di arrivo degli eventi su mappa celeste nei due sistemi di coordinate galattico ed equatoriale. La sovrapposizione della distribuzioni degli eventi ha permesso di evidenziare le zone di visibilità sulla mappa celeste caratteristiche di ciascun esperimento. Una successiva analisi statistica ha analizzato la frequenza delle occorrenze di eventi del dataset di ANTARES in intorni di raggio crescente di eventi di ICECUBE, per valutare eventuali eventi identificabili nei due dataset. Questa analisi ha evidenziato la necessità di una selezione preventiva degli eventi del dataset di ANTARES, in base a criteri non solo topologici, in modo da permettere una eventuale identificazione univoca di eventi coincidenti.

Introduzione

L'Astrofisica è quel settore della scienza che indaga i problemi di natura astronomica, facendo ricorso ad 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, per individuare nuova fisica.

Agli inizi del secolo passato l'osservazione astrofisica era limitata alla ricerca di fotoni. Successivamente, l'indagine si è estesa ai Raggi Cosmici ed, in particolare, negli ultimi anni si è focalizzata sulla Astrofisica dei Neutrini.

Questa tesi confronta due dataset di eventi rivelati dagli esperimenti ANTARES e ICECUBE, al fine di identificare possibili eventi di neutrino cosmico.

Il progetto di questa tesi è suddiviso in tre capitoli.

Nel primo capitolo vengono trattate le caratteristiche generali dei neutrini, attraverso i loro processi d'interazione e l'individuazione delle sorgenti astrofisiche in cui possono essere prodotti. Dalle considerazioni riportate, emerge l'importanza degli studi di *Astrofisica con Neutrini* rispetto ai diversi approcci dell'astronomia tradizionale.

Nel secondo capitolo sono descritti due esperimenti di Telescopi a Neutrini a larga scala per la rivelazione di neutrini cosmici ad alte energie, dell'ordine dei $TeV - PeV$: ANTARES e ICECUBE. Il principio di rivelazione si basa sulla *Radiazione Cherenkov* originata dal percorso di muoni relativistici prodotti nelle interazioni di neutrini nell'acqua del mare e nel ghiaccio rispettivamente. Si delineano quindi le caratteristiche principali degli apparati sperimentali.

I Telescopi a Neutrini devono essere in grado di individuare i segnali puntiformi di possibili eventi di neutrini cosmici rispetto al gran numero di eventi di fondo. Le due caratteristiche che permettono di distinguere un segnale dal fondo sono la distribuzione angolare ed energetica.

In questa tesi si sono privilegiato l'aspetto topologico come criterio per confrontare i dati degli esperimenti di ANTARES e ICECUBE. Inizialmente vengono rappresentati i due set di eventi rivelati negli esperimenti, nei sistemi di coordinate equatoriali e galattiche. Nella seconda parte, si mostra una ricerca di correlazione tra i due set rispetto alla direzione di arrivo degli eventi rivelati.

Indice

Introduzione	iii
1 Astrofisica con Neutrini	1
1.1 I neutrini	1
1.2 Interazioni di Neutrini	2
1.3 Sorgenti astrofisiche di Neutrini	2
1.4 Importanza dell’Astrofisica con Neutrini	3
2 Esperimenti ANTARES e ICECUBE	7
2.1 Rilevazione di eventi	7
2.2 Effetto Cherenkov	9
2.3 Esperimento ANTARES e ICECUBE	10
3 Studi sui neutrini degli esperimenti ANTARES e ICECUBE	15
3.1 Mappa celeste in Coordinate Galattiche	15
3.1.1 Sistemi di Coordinate Equatoriali e Galattiche	16
3.1.2 Rappresentazione in Coordinate Equatoriali di dati del- l’esperimento ANTARES	18
3.1.3 Rappresentazione in Coordinate Galattiche di dati del- l’esperimento ANTARES	20
3.1.4 Rappresentazione e relazione tra Coordinate Equato- riali e Galattiche dei dati	22
3.2 Ricerca di correlazione tra direzioni di arrivo dei neutrini . . .	22
3.2.1 Ricerca di eventi in intervalli scelti	24

3.2.2	Ricerca della frequenza di eventi in intervalli scelti . . .	25
3.2.3	Parametri e Risultati	26
	Conclusioni	33
	A Appendice	35
	Bibliografia	37

Elenco delle figure

2.1	Cono d'onda della Radiazione Cherenkov	10
2.2	Ricostruzione del Telescopio di Neutrini ANTARES, apparato sperimentale. [Fonte: ANTARES collaboration].	11
2.3	Mappa del cielo osservabile nel Sistema di Coordinate Galattiche. Sono indicate le percentuali di visibilità dei segnali, a sinistra per l'esperimento ICECUBE, a destra per l'esperimento ANTARES. [Fonte: ANTARES Collaboration]	12
2.4	Ricostruzione del Telescopio di Neutrini ICECUBE, apparato sperimentale. [ICECUBE Collaboration]	13
3.1	Sistema di Coordinate Galattiche	17
3.2	Rappresentazione Aitoff usata nei plot. Il modello utilizzato è una macro scritta con il framework ROOT.	18
3.3	Mappa del cielo nel Sistema di Coordinate Equatoriali degli eventi di ANTARES, creata attraverso il framework ROOT.	20
3.4	Mappa del cielo nel Sistema di Coordinate Galattiche degli eventi di ANTARES, creata attraverso il framework ROOT	21
3.5	Confronto fra la direzione di arrivo di eventi di ANTARES e ICECUBE, nei sistemi di Coordinate Equatoriali e Galattiche, ottenuto tramite il framework grafico ROOT.	23

3.6	Sovrapposizione della mappa celeste nel Sistema di Coordinate Galattiche della Galassia con le zone di non osservazione di seganli per l'esperimento ICECUBE, a sinistra, e ANTARES, a destra. [ICECUBE Collaboration]	27
3.7	Ricerca eventi per bin 3 deg	28
3.8	Ricerca eventi per bin 5 deg	28
3.9	Ricerca eventi per bin 7 deg	30
3.10	Ricerca eventi per bin 10 deg	30
3.11	Ricerca frequenza per bin 3 deg	31
3.12	Ricerca frequenza per bin 5 deg	31
3.13	Ricerca frequenza per bin 7 deg	32
3.14	Ricerca frequenza per bin 10 deg	32

Elenco delle tabelle

2.1	L'angolo di Cherenkov per particelle in condizioni relativistiche $\beta \approx 1$	10
3.1	Coordinate e tipologia degli eventi ICECUBE.	29

Capitolo 1

Astrofisica con Neutrini

Nel capitolo sono descritte le caratteristiche dei neutrini, i processi d'interazioni e da quali sorgenti astrofisiche sono prodotti.

Dalle considerazioni emerge l'importanza degli studi di *Astrofisica con Neutrini*.

1.1 I neutrini

Il neutrino ν è classificato tra le particelle elementari, e libere, del *Modello Standard* e possiede spin $s = \frac{\hbar}{2}$: è un *fermione*, ciò implica che i sistemi di particelle materiali identiche sono governati dalla *statistica Fermi-Dirac*. Dei neutrini si può parlare anche in termini delle loro corrispondenti antiparticelle elementari $\bar{\nu}$, dotate dello stesso spin e massa.

Il termine generico di neutrino deve essere caratterizzato secondo uno dei tre *sapori*: *neutrino elettronico*, *muonico* e *tauonico*.

Al fine di poter rilevare i neutrini è necessario conoscere a quali interazioni è soggetto:

- Non risentono dell'interazione forte ed elettromagnetica.
La carica di colore è nulla, per questo sono, tra le particelle (antiparticelle) elementari, classificati come *leptoni* (*antileptoni*) introducendo

il corrispondente il *numero leptonico/antileptonico*. La carica elettrica è nulla, pertanto non subiscono alcuna deviazione attraversando campi elettromagnetici.

- Risentono dell'interazione debole e gravitazionale.

1.2 Interazioni di Neutrini

I neutrini, trascurando gli effetti gravitazionali, interagiscono con la materia soltanto attraverso le interazioni deboli, in due processi possibili.

Il primo, d'interazione debole di Corrente Carica (CC) di neutrino (o anti-neutrino) con un nucleone della materia, produce un leptone e uno sciami adronico X . Il processo è mediato dai bosoni W^+ e W^- . Indicando con l il sapore leptonico ($l = e, \mu, \tau$) :

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \longrightarrow l^-(l^+) + X$$

Il secondo, d'interazione debole di Corrente Neutra (CN) di neutrino (o antineutrino) con un nucleone della materia. Il processo è mediato dal bosone Z^0 :

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \longrightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + X$$

L'indagine sui neutrini non può avvenire attraverso rilevazioni dirette, ma a partire dai prodotti di tale reazione.

1.3 Sorgenti astrofisiche di Neutrini

La produzione di neutrini ad alta energia è collegata all'interazione di protoni e nuclei, fortemente accelerati da sorgenti galattiche ed extra-galattiche, con altri nuclei o gas di fotoni. I protoni e nuclei accelerati, osservati come

Raggi Cosmici (RC), nell'interazione producono mesoni, in prevalenza pioni. Essi, a loro volta, decadono in tempi molto brevi in:

$$p + \gamma \longrightarrow \Delta^+ \longrightarrow \begin{cases} \pi^0 + p \longrightarrow \gamma + \gamma + p \\ \pi^\pm + n \end{cases}$$

I mesoni neutri π^0 danno origine a coppie di fotoni, osservati sulla Terra come raggi- γ , mentre i mesoni carichi producono leptoni, neutrini e antineutrini secondo il *modello astrofisico adronico*:

$$\begin{cases} \pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \end{cases}$$

Si osserva come nei processi adronici l'energia prodotta da una sorgente si distribuisce tra la produzione di Raggi Cosmici, raggi- γ e neutrini secondo un medesimo meccanismo. Si deduce, quindi, che le possibili sorgenti di neutrini sono in generale coincidenti con sorgenti in cui avviene l'accelerazione di Raggi Cosmici e l'emissione di raggi- γ .

Pertanto, le sorgenti responsabili della produzione di neutrini sono di origine galattica come Resti di Supernovae (SNR), Pulsar Wind Nebula (PWNe) e Microquasar e di origine extra-galattica come Nuclei Galattici Attivi (AGN) e Gamma-Ray Bursts (GRBs).

1.4 Importanza dell'Astrofisica con Neutrini

Lo svantaggio dell'astronomia classica, intesa come osservazioni nelle bande radio, infrarosso, ottica, ultravioletta, raggi-X o raggi- γ , è principalmente dovuto al fatto che la radiazione elettromagnetica è assorbita dalla materia. Inoltre, l'utilizzo di queste tecniche permette di osservare solo la superficie degli oggetti astronomici.

Notevoli sono le informazioni connesse allo studio dello spettro energetico dei fotoni: tuttavia le calde e dense regioni centrali di stelle, nuclei galattici attivi e altre sorgenti astrofisiche risultano opache ai fotoni, non permettendo l'osservazioni diretta di queste zone. Per esempio, la radiazione proveniente

dal Sole riporta informazioni dirette solamente della fotosfera.

I raggi- γ ad altissima energia (> 10 TeV) provenienti da sorgenti distanti, sono attenuati dalle interazioni $\gamma\gamma$ con fotoni della radiazione cosmica di fondo (CMRB) attraverso il processo:

$$\gamma + \gamma \longrightarrow e^+ + e^-$$

Esso limita l'utilizzo dei fotoni ad un raggio d'indagine dell'Universo entro ~ 100 Mpc.

Adeguati risultati potrebbero essere ottenuti attraverso un'astrofisica con protoni fortemente accelerati, principali componenti dei Raggi Cosmici. Precise informazioni sulla loro direzione sono conservate solo da protoni ad altissima energia ($> 10^7$ TeV): ad energie inferiori subiscono infatti forti deviazioni rispetto alla direzione originale a causa dei campi magnetici galattici. Tuttavia nelle alte energie, i protoni aumentano la sezione d'urto d'interazione con i fotoni γ_{CMBR} e ciò causa una diminuzione del loro libero cammino medio: questo limite è studiato come *Effetto Greisen-Zatsepin-Kuzmin*. Nelle collisioni tra i protoni e γ_{CMBR} , quest'ultimi sono nelle condizioni di energia di soglia sufficiente per attivare la fotoproduzione di pioni, causando forti perdite di energia:

$$p + \gamma_{CMBR} \longrightarrow \Delta^+ \longrightarrow \pi^\pm + n$$

Di conseguenza, si assiste ad una diminuzione, o *GZK-cutoff*, del flusso di Raggi Cosmici di origine extra-galattica.

Si deduce allora, in ultima analisi, quali dovrebbero essere i requisiti per una astronomia ottimale:

- L'utilizzo di astroparticelle o radiazioni che non risentano dei campi magnetici;
- Le particelle non devono decadere durante l'intervallo che le porta dalla sorgente alla Terra;
 - > si escludono i neutroni, a meno di considerare quelli ad altissima energia

- Le particelle non devono essere assorbite dal mezzo interstellare o intergalattico; da fotoni del range dell'infrarosso o della radiazione cosmica di fondo.

Tutti questi requisiti sono pienamente soddisfatti dai Neutrini, spiegando l'origine della fondamentale importanza dell'*Astrofisica con Neutrini* per lo studio dell'Universo.

Capitolo 2

Esperimenti ANTARES e ICECUBE

Nel capitolo vengono descritti due esperimenti di Telescopi a Neutrini a larga scala per la rivelazione di neutrini cosmici ad alte energie, dell'ordine dei TeV-PeV. Il principio di detenzione si basa sulla possibilità di rilevare la *Radiazione Cherenkov* originata dal percorso, in un mezzo trasparente, di muoni relativistici prodotti nelle interazioni di neutrini. I siti degli esperimenti devono essere tali da favorire questo tipo di rilevazione e da minimizzare il segnale di fondo costituito dai neutrini atmosferici e dai muoni *upgoing*. Vengono quindi descritte la tecnica di rivelazione di eventi e i due apparati sperimentali.

2.1 Rilevazione di eventi

Le due caratteristiche fondamentali che permettono di distinguere un segnale dal fondo sono la distribuzione angolare ed energetica. Focalizzando l'attenzione sull'aspetto spaziale della rilevazione di eventi, il segnale si raggruppa attorno alla direzione della sorgente del neutrino, assunta come puntiforme, con una estensione dipendente dalla risoluzione angolare del detector. Ne consegue che la risoluzione sia limitata dalla geometria del

rivelatore e dalle caratteristiche di propagazione della radiazione nel mezzo. La precisione per l'individuazione di sorgenti astrofisiche è limitata, dal punto di vista cinematico, dall'angolo tra il neutrino iniziale e il muone.

Come descritto nel primo capitolo, i neutrini possiedono tutte le peculiarità per candidarsi come ottimi messaggeri negli studi sull'Universo. Altra proprietà è la loro piccolissima sezione d'urto che permette loro di attraversare, subendo una moderata attenuazione, gli strati densi delle sorgenti astrofisiche in cui sono prodotti e il mezzo galattico/intergalattico durante il loro percorso. Tuttavia, una tale sezione pone stretti limiti tecnici per poter rivelare i neutrini.

Le interazioni di CC carica dei ν_μ producono muoni. Nel caso i neutrini siano ad alta energia ($> 1TeV$), i muoni prodotti possono percorrere in mezzi come acqua o ghiaccio distanze dell'ordine del chilometro. Questo permette di vedere interazioni di neutrini che avvengono fuori dal volume del rivelatore. Dal punto di vista sperimentale, raggiunte alte energie e selezionato il ν_μ tra gli altri *sapori*, si riesce ad ottenere una traccia visibile del suo transito, tale da consentire una accurata ricostruzione della direzione del muone e da conservare la direzione di provenienza del neutrino.

Ruolo fondamentale nella costruzione di un Telescopio a Neutrini è la relazione tra il neutrino iniziale e il muone definita dall'angolo medio tra la direzione del neutrino incidente e il muone in uscita:

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

Si ricava che per energie $> 10TeV$, la ricostruzione della direzione della traccia del muone equivale alla ricostruzione, entro il limite di risoluzione dell'apparato, della direzione del neutrino iniziale.

Un rivelatore che sia in grado di determinare accuratamente la direzione del μ prodotto nell'interazione sarà quindi in grado di ricavare, entro un certo grado di risoluzione angolare, la sorgente di emissione iniziale. Il fenomeno fisico che sottende questa possibilità è l'*Effetto Cherenkov*.

2.2 Effetto Cherenkov

Se una particella dotata di carica elettrica è in moto, in un mezzo con indice di rifrazione n , con una velocità v maggiore della velocità di fase della luce nel mezzo stesso, allora la particella emette radiazione elettromagnetica detta *Radiazione Cherenkov*. L'effetto è a soglia, in quanto avviene solo se:

$$v \geq \frac{c}{n} \Rightarrow \beta = \frac{v}{c} \geq \frac{1}{n}$$

Il fenomeno è simile alla generazione di un'onda d'urto: la radiazione è emessa entro un cono con angolo caratteristico relativo alla direzione della velocità della particella, di:

$$\theta_C = \arccos \frac{1}{n\beta}$$

L'indice di rifrazione è dipendente dall'energia dei fotoni emessi: $n = n(E_\gamma)$. L'emissione avviene in modo isotropo rispetto al cono d'onda con asse in direzione della particella carica incidente, come descritto in figura 2.1.

Attraverso il processo, una particella con numero atomico Z emette un numero di fotoni N per unità di lunghezza d'onda $d\lambda$ e per unità di distanza percorsa dx definita da:

$$\frac{d^2N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi Z^2}{\lambda^2} (\sin^2 \theta_C)$$

Si nota come, la radiazione di minore lunghezza d'onda produca in maniera più significativa radiazione.

Dall'effetto descritto emerge come i muoni, particelle dotate di carica elettrica prodotte nei processi deboli di CC, in condizioni di alte energie, rispondono ai requisiti per originare *Radiazione Cherenkov* attraverso il transito in un mezzo denso e trasparente, qual è l'acqua del mare o il ghiaccio considerati come radiator di luce Cherenkov naturali, per un confronto degli angoli caratteristici si veda tabella 2.1.

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

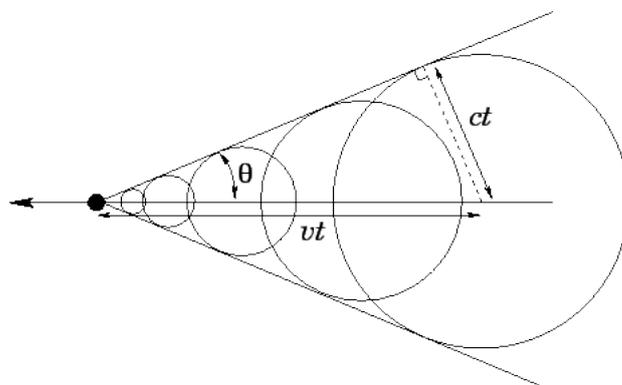


Figura 2.1: Cono d'onda della Radiazione Cherenkov

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.

Mezzo	Indice di rifrazione	Angolo Cherenkov
Acqua	1.364	$\sim 43^\circ$
Ghiaccio	1.33	$\sim 41^\circ$

Tabella 2.1: L'angolo di Cherenkov per particelle in condizioni relativistiche $\beta \approx 1$.

2.3 Esperimento ANTARES e ICECUBE

Nel paragrafo vengono trattati gli apparati dei due esperimenti.

Il Telescopio a Neutrini ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Anyss enviroment RESerch), situato a 43° di Latitudine Nord nel Mar Mediterraneo è attualmente il più grande osservatorio di neutrini ad alte energie presente nell'emisfero settentrionale. Esso è in grado di indagare su neutrini che arrivano dal basso dalla maggior parte del cielo (circa $3.5\pi sr$),

grazie alla rotazione della Terra, sfruttando il fenomeno della *Radiazione Cherenkov*. Questa zona della mappa celeste consente di indagare su una delle zone più interessanti, qual è il centro della Galassia, ove sono previste esservi numerose sorgenti di neutrini. Le declinazioni sotto -47° sono sempre visibili, mentre quelle sopra 47° non sono mai osservabili: declinazioni comprese tra -47° a 47° risultano visibili solamente durante la parte di giorno siderale.

L'apparato sperimentale consiste in un array di 900 *FotoMoltiplicatori (PMTs)* che formano un rivelatore a effetto Cherenkov di soglia di neutrini ad alta energie (range TeV - PeV). Essi sono disposti in 12 stringhe tali da coprire un'area di $\sim 0.1\text{km}^2$, un'altezza attiva di $\sim 0.3\text{km}$ e situati $\sim 2500\text{m}$ di profondità, si veda figura 2.2.

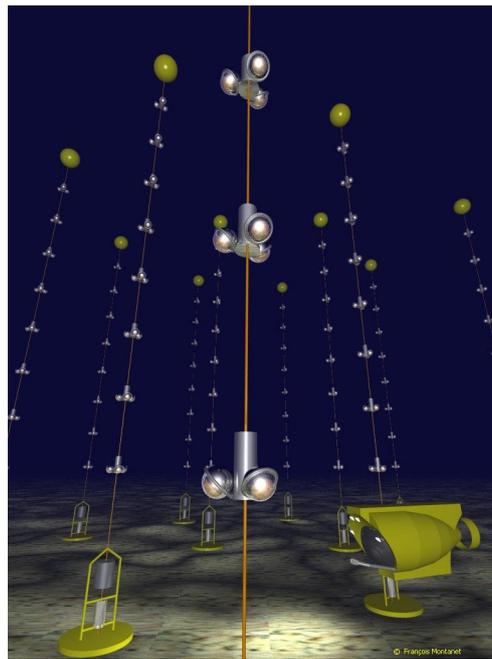


Figura 2.2: Ricostruzione del Telescopio di Neutrini ANTARES, apparato sperimentale. [Fonte: ANTARES collaboration].

L'unità di base del rivelatore è il *Modulo Ottico (OM)*, che consiste in un tubo fotomoltiplicatore, vari sensori e circuiti elettronici integrati associati al dispositivo. Tali componenti sono posti in sfere di vetro adeguate a resi-

stere alla pressione dell'acqua del mare. In particolare, l'elettronica include: il circuito che cattura e memorizza i segnali dei PMTs, rileva la posizione angolare e misura i tempi di transito nel detector, un alimentatore High Voltage per i PMTs ed i nodi della rete per la trasmissione dei dati.

I moduli ottici, disposti nei piani delle stringhe, hanno l'asse dei tubi fotomoltiplicatori a 45° sotto l'orizzonte. L'angolo di accettazione dei PMTs, per gli impulsi luminosi, è ampio tale da rilevare la radiazione nell'emisfero australe con alta efficienza. Significa che ci sono le condizioni di sovrapposizione tra gli angoli di accettazione dei diversi moduli posizionati su ogni stringa: è favorita la ricostruzione degli eventi basata sulla coincidenza o *muon-veto* dei segnali. Tutto ciò è particolarmente adeguato alla cattura di muoni provenienti dal basso, escludendo il segnale di fondo costituito dai neutrini atmosferici e dai muoni *upgoing*. Come spiegato nel paragrafo precedente, anche il ghiaccio è un radiatore naturale di luce Cherenkov, ponendo le basi per un rivelatore posto al Polo Sub. Esso è il Telescopio a Neutrini ICECUBE (South Pole Neutrino Observatory): possiede un'area di indagine complementare alla porzione di cielo osservabile da ANTARES, permettendo insieme ad esso una visione globale della mappa celeste, vedi figura 2.3.

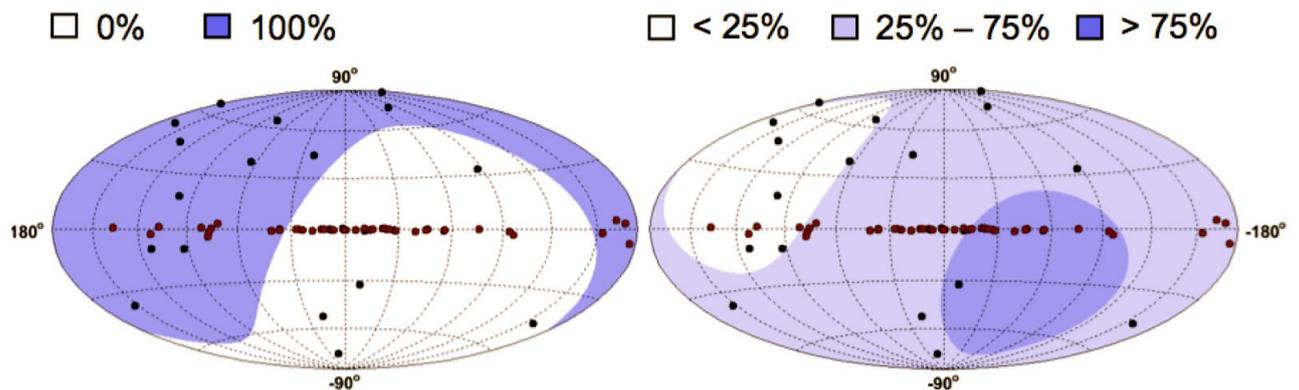


Figura 2.3: Mappa del cielo osservabile nel Sistema di Coordinate Galattiche. Sono indicate le percentuali di visibilità dei segnali, a sinistra per l'esperimento ICECUBE, a destra per l'esperimento ANTARES. [Fonte: ANTARES Collaboration]

L'apparato sperimentale del detector è composto da due parti: una superficiale (TopIce) e una interna allo strato di ghiaccio (InIce), si veda figura 2.4.

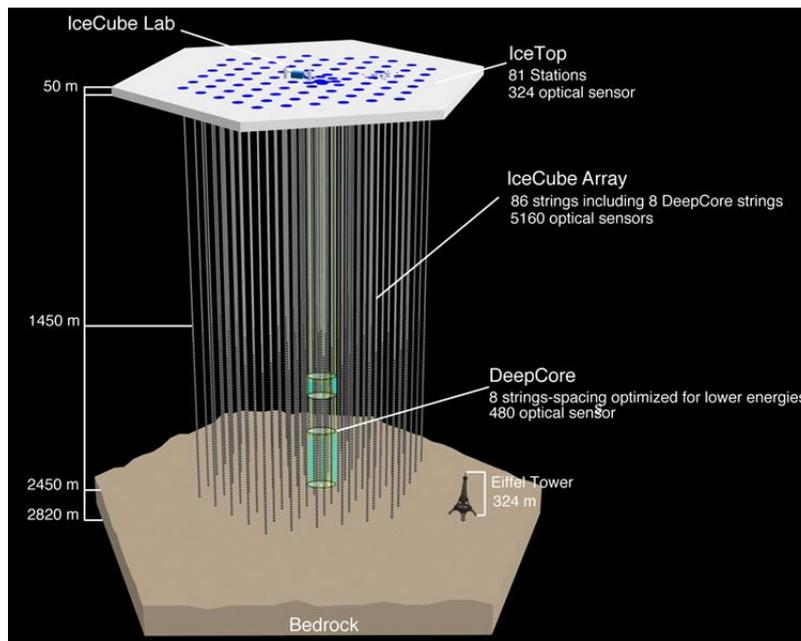


Figura 2.4: Ricostruzione del Telescopio di Neutrini ICECUBE, apparato sperimentale. [ICECUBE Collaboration]

La struttura della zona InIce è composta da 80 stringhe, sepolte tra 1450 e 2450 metri sotto la superficie del ghiaccio, ognuna delle quali possiede 60 Moduli Digitali Ottici (DOMs), separati tra di loro da 17m. Le stringhe sono posizionate su di una griglia esagonale di lato pari a 125m, garantendo un volume del dispositivo di rilevazione di 1Km^3 . L'apparecchiatura elettronica è localizzata al centro dell'array. La struttura della zona TopIce è predisposta da un array di 80 basi per lo studio degli sciami elettromagnetici di origine atmosferica. Ogni base, posizionata sopra ad una stringa, si compone di due serbatoi riempiti con ghiaccio, ognuno dei quali contiene due DOMs dello stesso tipo di quelli implementati nella IcIce zona.

Gli array in superficie, $\sim 1\text{Km}^2$ possono operare in due differenti modalità. *Anti-coincidence muon veto* con gli eventi rivelati nell'area interna per poter

rigettare i muoni *downgoing*. Oppure, *coincidence muon veto* per ottenere un utile metodo di indagine sulla composizione dei Raggi Cosmici.

Capitolo 3

Studi sui neutrini degli esperimenti ANTARES e ICECUBE

I Telescopi a Neutrini devono essere in grado di individuare i segnali puntiformi di possibili eventi di neutrini cosmici rispetto al gran numero di eventi di fondo. Le due caratteristiche che permettono di distinguere un segnale dal fondo sono la distribuzione angolare ed energetica.

In questo lavoro si è privilegiato l'aspetto topologico come criterio per confrontare i dati degli esperimenti di ANTARES e ICECUBE.

Nella prima parte del capitolo verranno descritti due modalità di rappresentazione di set di eventi rivelati nei due esperimenti. Nella seconda parte, si mostra una ricerca di correlazione tra i due set rispetto alla direzione di arrivo degli eventi rivelati.

3.1 Mappa celeste in Coordinate Galattiche

Si è utilizzato un file con circa 5500 seguenti informazioni: in coordinate equatoriali J2000 l'ascensione retta (RA) e la declinazione (Dec) in radianti, il numero di sensori accesi e la precisione angolare della traccia in gradi.

L'obiettivo è ottenere la rappresentazione dei dati, passando attraverso il Sistema di Coordinate Equatoriali, a Coordinate Galattiche.

3.1.1 Sistemi di Coordinate Equatoriali e Galattiche

Per fissare la posizione di un qualsiasi oggetto astronomico su una mappa celeste è necessario definire un adeguato sistema di riferimento, o *Sistema di Coordinate*, in cui si assegni una coppia di numeri o *coordinate* all'oggetto in analisi.

I sistemi si classificano rispetto al piano di riferimento utilizzato.

Sistema di Coordinate Equatoriali

Il sistema è riferito al piano equatoriale della Terra. È composto da *declinazione* e *ascensione retta*. Essendo le proiezioni di questi punti sulla sfera celeste costanti, il sistema è ideale per descrivere oggetti astronomici fissi nel cielo.

Si osservi come il sistema sia vincolato alla posizione dell'asse di rotazione terrestre che, a causa dei moti di nutazione e precessione, non rimane costante al trascorrere del tempo. Pertanto, ogni Sistema di Coordinate Equatoriali deve includere l'epoca a cui è riferito: J2000 si riferisce infatti alle coordinate basate sulla posizione dell'asse nell'anno 2000.

Sistema di Coordinate Galattiche

È utile per ottenere dei confronti di oggetti celesti entro la nostra Galassia. È composto da *longitudine* e *latitudine galattica*. Il piano fondamentale è quello della nostra galassia e la direzione fondamentale è quella che si ottiene congiungendo il Sole al centro della Galassia, vedi figura 3.1.

Rappresentazione Aitoff

Affinché un grafico rappresenti adeguatamente i sistemi di coordinate descritti, occorre la *rappresentazione Aitoff* ideata da David Aitoff nel 1889, vedi la figura 3.2.

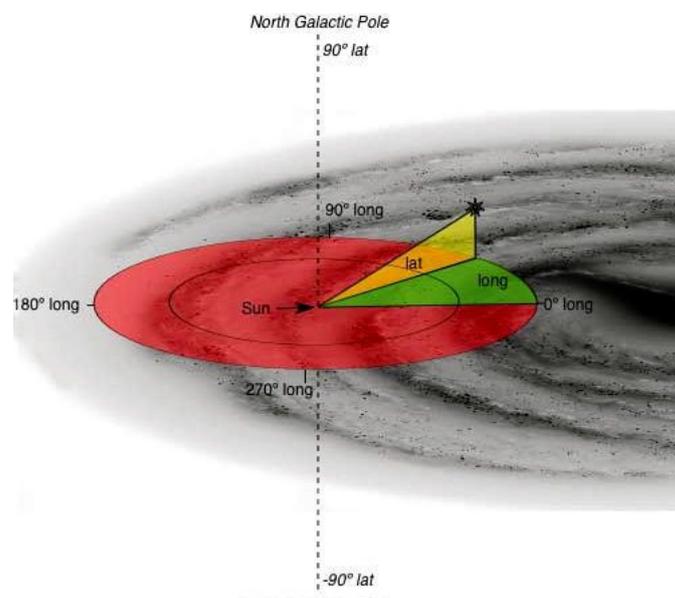


Figura 3.1: Sistema di Coordinate Galattiche

Essa permette una proiezione equivalente della sfera terrestre, grazie alle seguenti caratteristiche:

1. la sfera viene confinata in un'ellisse di rapporto tra asse maggiore e minore 2:1;
2. i Meridiani:
 - Centrale è una linea retta che passa a metà della lunghezza dell'Equatore;
 - gli altri meridiani sono curve per i poli, ugualmente distanziate lungo l'Equatore, concave verso il Meridiano Centrale (rendendo meno evidente la distorsione nelle regioni polari);
3. i Paralleli:
 - l'Equatore è una linea retta, perpendicolare al Meridiano Centrale;
 - gli altri paralleli sono curve, ugualmente distanziate lungo il Meridiano Centrale, concave verso il Polo più vicino;

4. il sistema è simmetrico rispetto all'Equatore e al Meridiano Centrale;
5. non è una proiezione ortografica, né di equal-area e l'unico punto della carta privo di distorsione è il punto centrale.

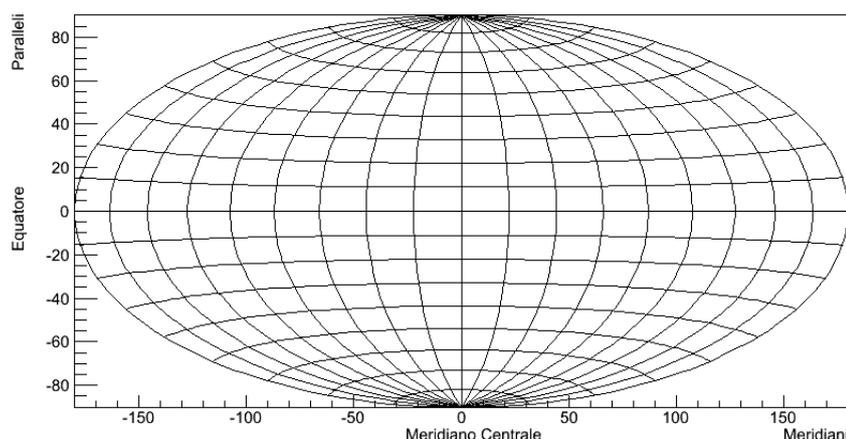


Figura 3.2: Rappresentazione Aitoff usata nei plot. Il modello utilizzato è una macro scritta con il framework ROOT.

3.1.2 Rappresentazione in Coordinate Equatoriali di dati dell'esperimento ANTARES

Dalle informazioni degli eventi, si è selezionato ed inserito attraverso l'editor *emacs* in ASCII i valori di ascensione retta (RA) e declinazione (Dec) in radianti del sistema Coordinate Equatoriali J2000.

Si è scritto un *codice in C++* che in input legga il file e lo allochi in opportuni arrays. Dopo aver convertito i dati da radianti a gradi, ai valori di RA è stato sottratto il valore 180° . L'array di RA così ottenuto è stato poi invertito. Questi accorgimenti sono stati necessari al fine di ottenere la rappresentazione Aitoff. Infine, i nuovi arrays RA e Dec sono stati scritti come file ASCII. Nel *framework ROOT* per creare un opportuno plot delle coordinate si uti-

lizza la funzione statica *ProjectAitoff2xy*. Essa converte l'ascensione retta e la declinazione in X,Y attraverso il contour plot Aitoff per confinare i dati correttamente, generando mappe celesti adatte alla rappresentazione di coordinate in sistemi equatoriali e galattici, con le coordinate centrate nel punto di longitudine zero.

Si è quindi scritta una macro in grado di leggere in input il file ASCII e di convertire questi dati attraverso la funzione *ProjectAitoff2xy*. Per poter creare con questi valori grafici usando *ROOT*, è necessario infine convertirli in output in un file con estensione root.

Ottenuto il file.root, si è scritta una macro per creare la mappa celeste dei dati. Il metodo di implementazione si è basato sulla sovrapposizione di tre *TPad* differenti. Il primo per disegnare la skymap in formato Aitoff; inoltre, è stato necessario invertire l'asse delle ascisse con una ulteriore funzione di *reverseaxis* per riuscire a visualizzare i dati sull'intera larghezza dei paralleli. Il secondo è il risultato della lettura dei dati dal file.root e il loro corretto posizionamento sulla mappa grazie alla proiezione Aitoff: gli eventi sono singolarmente individuati. Il terzo definisce l'intensità topologica degli eventi sulla mappa: per identificarli si è considerato il loro numero all'interno di celle quadrate di lato pari a 10° . Una cella di lato unitario sarebbe stata troppo piccola, al suo interno sarebbe caduto solo un evento: ciò non permette di visualizzare globalmente la distribuzione. Quindi, scegliendo il bianco per indicare l'assenza di eventi e il rosso per indicarne la presenza, scegliendo opportune gradazioni all'interno dell'intervallo per indicare la variazione del numero di eventi. La barra di colore riporta la densità di eventi: il numero di eventi per cella con $l=10^\circ$. Si è quindi ottenuto il risultato riportato in figura 3.3. La distribuzione degli eventi sulla carta celeste nel sistema di Coordinate Equatoriali segue l'andamento delle porzioni di cielo che, dalla posizione geografica del sito dell'esperimento, non sono accessibili. Esse si trovano nell'emisfero Nord, a partire circa da 45° di latitudine Nord proseguendo verso il Polo Nord. Infatti nel grafico ottenuto si osserva che gli eventi oltre questa latitudine subiscono una progressiva attenuazione fino a

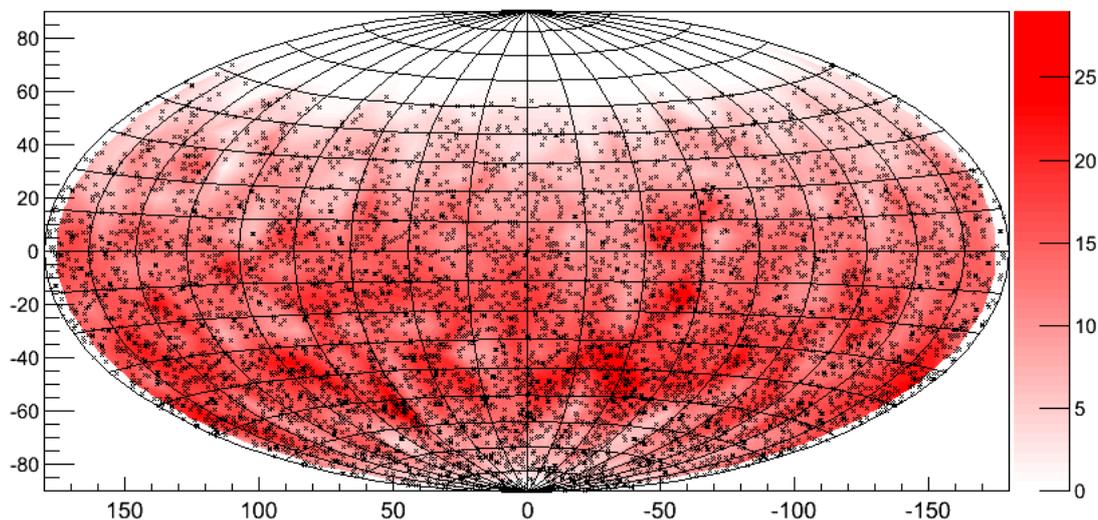


Figura 3.3: Mappa del cielo nel Sistema di Coordinate Equatoriali degli eventi di ANTARES, creata attraverso il framework ROOT.

scompare oltre 50° di latitudine Nord.

3.1.3 Rappresentazione in Coordinate Galattiche di dati dell'esperimento ANTARES

Il procedimento utilizzato per ottenere la rappresentazione è analogo a quello descritto nel paragrafo precedente.

Dopo aver scritto un *codice in C++*, che permetta la lettura del file ASCII dei valori di ascensione retta (RA) e declinazione (Dec) e la sua allocazione in opportuni arrays per poterli convertire in gradi, si è utilizzato le formule di conversione da Coordinate Equatoriali J2000 a Galattiche. Con l, b si indicano, rispettivamente la longitudine e la latitudine galattica. La direzione del Polo Nord Galattico è indicata come $\alpha_p = 12h51.4'$, $\delta_p = 27^\circ 08'$; la

direzione della longitudine galattica del polo celeste come $l_n = 123.0^\circ$:

$$\begin{aligned}\sin(l_n - l) \cos b &= \cos \delta \sin(\alpha_p - \alpha) \\ \cos(l_n - l) \cos b &= \cos \delta \sin \delta_p \cos(\alpha_p - \alpha) + \sin \delta \cos \delta_p \\ \sin b &= \cos \delta \cos \delta_p \cos(\alpha_p - \alpha) + \sin \delta \sin \delta_p\end{aligned}\quad (3.1)$$

Dei nuovi arrays ottenuti, quello di RA è stato invertito.

Per poter realizzare opportunamente il grafico nel *framework ROOT* si è adottato il medesimo procedimento utilizzando la funzione *ProjectAitoff2xy* e la stessa struttura di celle con lato di 10° per ottenere la rappresentazione di densità di eventi, come descritto nel paragrafo precedente, si veda la figura ottenuta in 3.4. La distribuzione degli eventi sulla carta celeste nel sistema

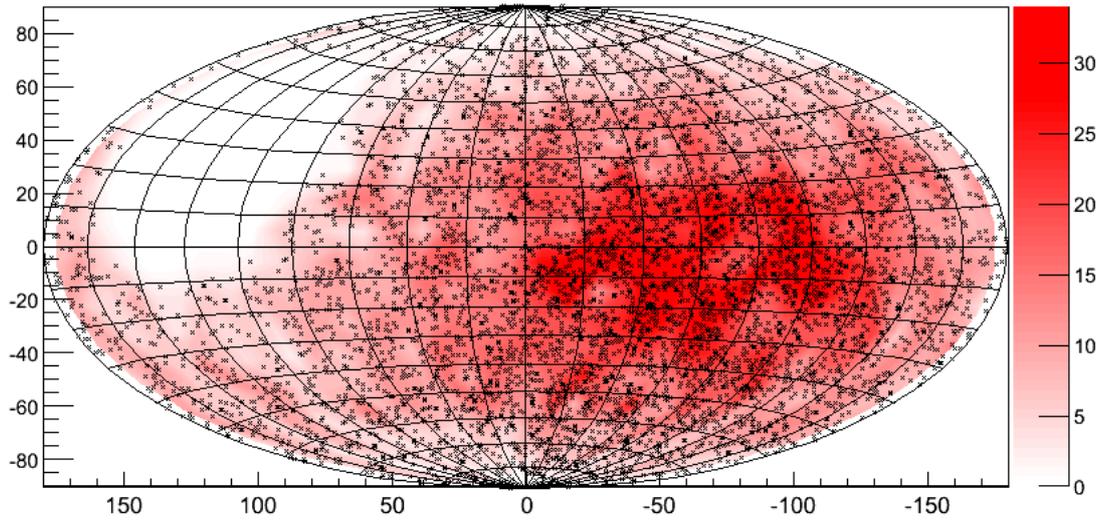


Figura 3.4: Mappa del cielo nel Sistema di Coordinate Galattiche degli eventi di ANTARES, creata attraverso il framework ROOT

di Coordinate Galattiche segue l'andamento delle porzioni di cielo che, dalla posizione geografica del sito dell'esperimento, non sono accessibili. Esse si trovano nell'emisfero Nord, comprese fra la longitudine di 90° e 160° . Infatti nel grafico ottenuto si osserva che gli eventi oltre questa latitudine subiscono

una progressiva attenuazione fino a scomparire oltre 50° di latitudine Nord.

3.1.4 Rappresentazione e relazione tra Coordinate Equatoriali e Galattiche dei dati

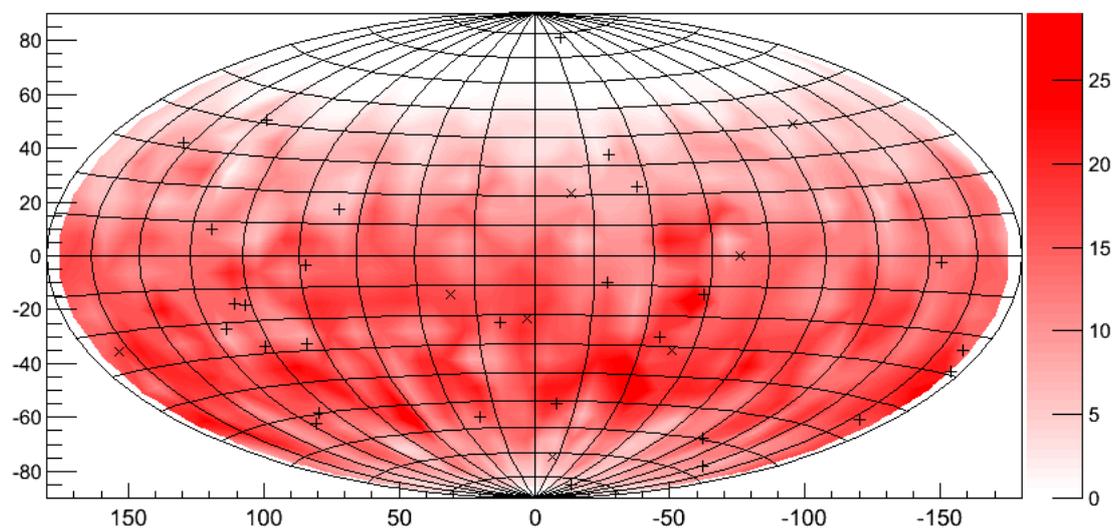
Per poter verificare se i procedimenti utilizzati per rappresentare e convertire le coordinate dei dati di ANTARES fossero corretto, si è implementato lo stesso metodo per rappresentare gli eventi in Coordinate Equatoriali J2000 e di conversione e rappresentazione dei medesimi eventi in Coordinate Galattiche sugli dati registrati dall'esperimento ICECUBE riportati in tabella 3.1, con l'obiettivo di riottenere i risultati presenti nell'articolo ¹. Nel grafico si è distinto gli eventi di tipo *shower* con simbolo + e di tipo *track* con simbolo x.

Una volta verificato questo procedimento, per enfatizzare la direzione di arrivo dei 36 eventi di ICECUBE rispetto alla distribuzione di eventi di ANTARES si è creata una macro con *ROOT* che sovrapponesse i dati di ICECUBE con il terzo tipo di *TPad* che definisce la densità di eventi di ANTARES su cella quadrata con lato pari a 10° nel sistema di coordinate considerato. Il risultato è mostrato nella figura 3.5.

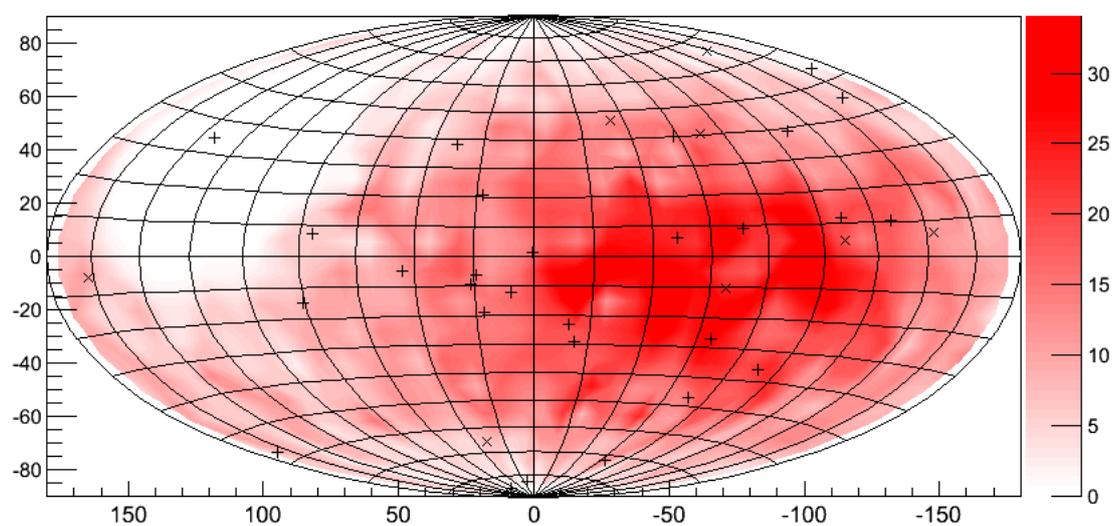
3.2 Ricerca di correlazione tra direzioni di arrivo dei neutrini

Si è notato dai grafici ricavati nella precedente sezione sui dati nel file ASCII di eventi di ANTARES e sui dati listati nella tabella 3.1, a causa della collocazione geografica del sito dell'esperimento, osservano porzioni di cielo complementari tra di loro.

¹arXiv:1405.5303v2, Smymap nel Sistema di Coordinate Equatoriali in suppl.fig.2 di pagina 12 e Smymap nel Sistema di Coordinate Galattiche in fig.5 di pagina 5.



(a) Coordinate Equatoriali



(b) Coordinate Galattiche

Figura 3.5: Confronto fra la direzione di arrivo di eventi di ANTARES e ICECUBE, nei sistemi di Coordinate Equatoriali e Galattiche, ottenuto tramite il framework grafico ROOT.

Pertanto è interessante ricercare se le coordinate di eventi di ANTARES si trovino entro aree scelte intorno agli eventi di ICECUBE ed osservare quale andamento si trova all'ampliamento di tale area. Per le medesime distanze scelte, cercare di graficare la frequenza con la quale gli eventi di ANTARES si trovino nelle vicinanze di eventi di ICECUBE.

Gli eventi di neutrini utilizzati sono quelli presenti nel file ASCII per ANTARES e nella tabella 3.1 per ICECUBE, entrambi in coordinate equatoriali.

3.2.1 Ricerca di eventi in intervalli scelti

Si è costruito un *codice in C++* "Ricerca di Eventi" composto da diversi script, di cui in seguito viene descritto il funzionamento.

Il file `LeggiData.cpp` effettua la lettura dei file ASCII degli eventi di ANTARES e ICECUBE in Coordinate Equatoriali J2000 e alloca in due arrays unidimensionali i valori RA e Dec, di dimensioni opportune al numero di righe lette in input: rispettivamente 5517 e 36 per i dati. Il file `Confronto.h` definisce la classe `Confronto`, con alcune variabili private e metodi pubblici, istanziati poi in `Confronto.cpp` dove si realizza il confronto tra i dati attraverso il calcolo della distanza. I dettagli dell'implementazione sono riportati in appendice A.

Nel file `main.cpp` viene richiesto all'utente quanti *numero di bin* per ogni data di ICECUBE si vuole confrontare e i valori di *bin* da inserire in ordine crescente. Infine, il risultato di `Confronto.cpp` viene qui scritto in un file ASCII composto da: un *numero di bin* di righe, ognuna rappresentate il caso di *bin* corrispondente e 36 colonne, pari al numero di eventi di ICECUBE.

Per esempio, il valore X presente nella m -esima riga, con $m \in [1, \text{numero di bin}]$, indica il numero di eventi di AN trovati alla distanza $n \in \text{bin}$ rispetto all'evento Y di IC, con $Y \in [1 - 36]$.

Nota

Essendo la precisione angolare della traccia dell'apparato di ANTARES pari a:

raggio = $\sqrt{RA^2 + Dec^2} < 0.5^\circ$,

significa che il rate minimo possibile del *bin* è di 0.5° .

Si è scritta una macro per creare l'istogramma con *ROOT* del file ASCII scritto dal codice "Ricerca di Eventi". Si costruisce per ogni *numero di bin* richiesto un grafico: ognuno ha in ascissa gli eventi di ICECUBE elencati come in tabella 3.1, mentre in ordinata ha un numero intero di eventi di ANTARES caduti in corrispondenza di ciascuno evento di ICECUBE per il *bin* considerato. Si vedano i grafici 3.7 - 3.10.

3.2.2 Ricerca della frequenza di eventi in intervalli scelti

Si è costruito un *codice in C++* "Frequenza di eventi" composto da un unico script composto da alcuni funzionamenti. Inizialmente legge in input il file ASCII scritto in output dal codice "Ricerca di Eventi". I valori sono allocati in un unico array unidimensionale, facilmente gestibile per l'allocatione dinamica della memoria, con dimensione $[36 * \text{numero di bin}]$. Questo array è stato inserito in un *loop* nel quale ogni 36 elementi, ciò corrisponde alla riga di un caso di *bin*, si cerca il *valore massimo*. Questo termine intero indica, indipendentemente a quale dei 36 eventi di ICECUBE è associato, il numero massimo di eventi di ANTARES registrati per il *bin* considerato.

Trovati questi valori, si è inizializzato un puntatore composto da una parte costante, il *numero di bin* definito dal file in input, e da una parte variabile, dipendente dal *bin* scelto con un range di elementi $[0, \text{valore massimo}]$. Attraverso un *ciclo for* viene analizzato il contenuto del puntatore: per ogni *numero di bin* si cerca con quale occorrenza compaiano i valori tra $[0, \text{valore massimo}]$ per il *bin* considerato. Si nota che, essendo *valore massimo* un numero di tipo intero, è assicurata la larghezza di ogni bin sia unitaria.

Infine, il risultato di viene scritto in output in un file ASCII composto da: un *numero di bin* di righe, ognuna rappresentate il caso di *bin* corrispondente e un numero ($\text{valore massimo} + 1$) di colonne, pari al range delle occorrenze

trovate nel caso esaminato.

Per esempio, il valore X presente nella m -esima riga, con $m \in [1, \text{numero di bin}]$, alla l -esima posizione, con $l \in [0, \text{valore massimo}]$, indica alla distanza $n \in \text{bin}$ è stato trovato per X volte la l -esima posizione.

Si è scritta una macro per creare l'istogramma con *ROOT* del file ASCII scritto dal codice "Frequenza di eventi". Con un procedimento analogo a quello utilizzato nel paragrafo precedente, si costruisce per ogni *numero di bin* richiesto un grafico: ognuno ha in ascissa l'intervallo da 0 al *valore massimo*, mentre in ordinata ha la frequenza con cui si sono trovati i valori di ANTARES per il *bin* considerato. Per rendere più efficace il confronto, la scala in ascissa è stata unificata per tutti i grafici da 0 al *valore massimo* trovato per il *bin* maggiore. Si vedano i grafici 3.11 - 3.14.

3.2.3 Parametri e Risultati

I parametri scelti nei grafici per la ricerca di eventi entro determinati intervalli:

- *Numero di intervalli*: 4;
- *Bin*: 3° , 5° , 7° , 10° .

I parametri scelti nei grafici per la ricerca della frequenza di eventi entro determinati intervalli:

- *Numero di intervalli*: 4;
- range in ascissa unificato: $[0, \text{valore massimo}] = [0, 35]$.

Osservazione 1. Nei grafici per la ricerca di eventi si verifica che all'aumentare dall'area di indagine attorno ad un evento di ICECUBE, aumenta la probabilità di trovare eventi di ANTARES.

Indipendentemente dal raggio considerato: l'evento 31 registra sempre un numero nullo di eventi, mentre gli eventi 13,29 mantengono in generale un numero limitato di eventi. Questi andamenti trovano spiegazione nel grafico di

confronto tra le posizioni di eventi ICECUBE e la densità degli eventi rivelati da ANTARES (cfr. grafici in figura 3.5). In essi si mostra come la porzione di cielo situata nell'emisfero Nord, a partire circa da 45° di latitudine Nord proseguendo verso il Polo Nord, non risulti visibile dal sito dell'esperimento. Nel caso del *bin* di 10° , nell'evento 21 di ICECUBE si trova il maggior numero, 35, di eventi di ANTARES trovati. In generale, attorno agli eventi 2,22,24,25 si ritrovano un discreto livello di eventi: la loro presenza potrebbe spiegarsi dalla posizione in cui sono stati rivelati, il centro della galassia.

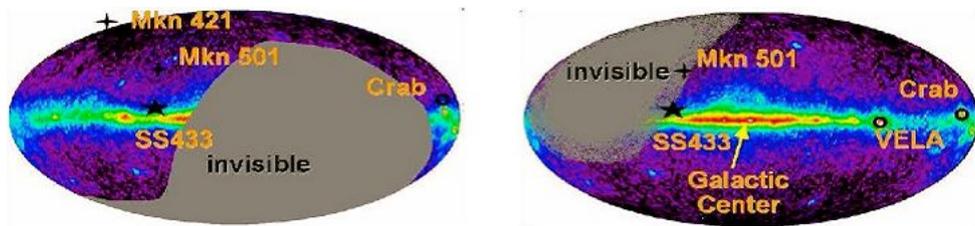


Figura 3.6: Sovrapposizione della mappa celeste nel Sistema di Coordinate Galattiche della Galassia con le zone di non osservazione di seganli per l'esperimento ICECUBE, a sinistra, e ANTARES, a destra. [ICECUBE Collaboration]

Osservazione 2. Nei grafici per la ricerca della frequenza di eventi, grazie alla scala in ascissa unificata è evidente come all'aumentare della distanza aumenti la probabilità di trovare eventi di ANTARES. Infatti, nel *bin* di 3° il *valore massimo* di eventi è 9, a 5° e 7° il valore è rispettivamente 14 e 17, fino a raggiungere 35 nel caso di 10° .

Eccetto per il caso con *bin* di 3° dove la piccola distanza analizzata rende isolati molti valori di ICECUBE con un'occorrenza di quattro volte per nessun evento registrato, la colonna con nessun evento registrato rimane unitaria: essa indica il caso dell'evento 31, situato proprio nel centro delle zone di non rilevamento per l'esperimento ANTARES.

Test: 0

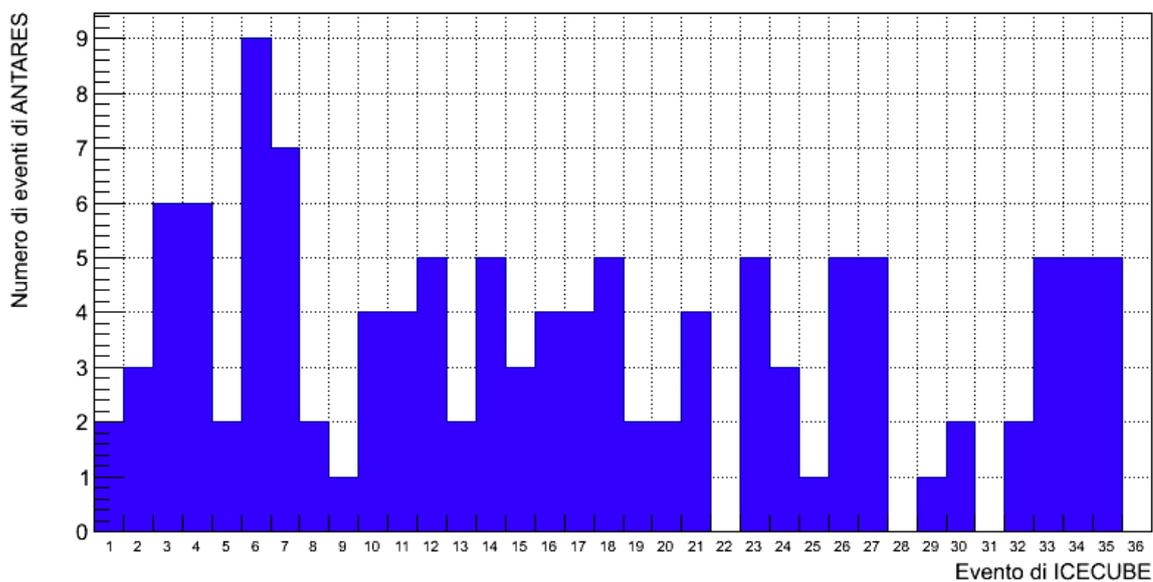


Figura 3.7: Ricerca eventi per bin 3 deg

Test: 1

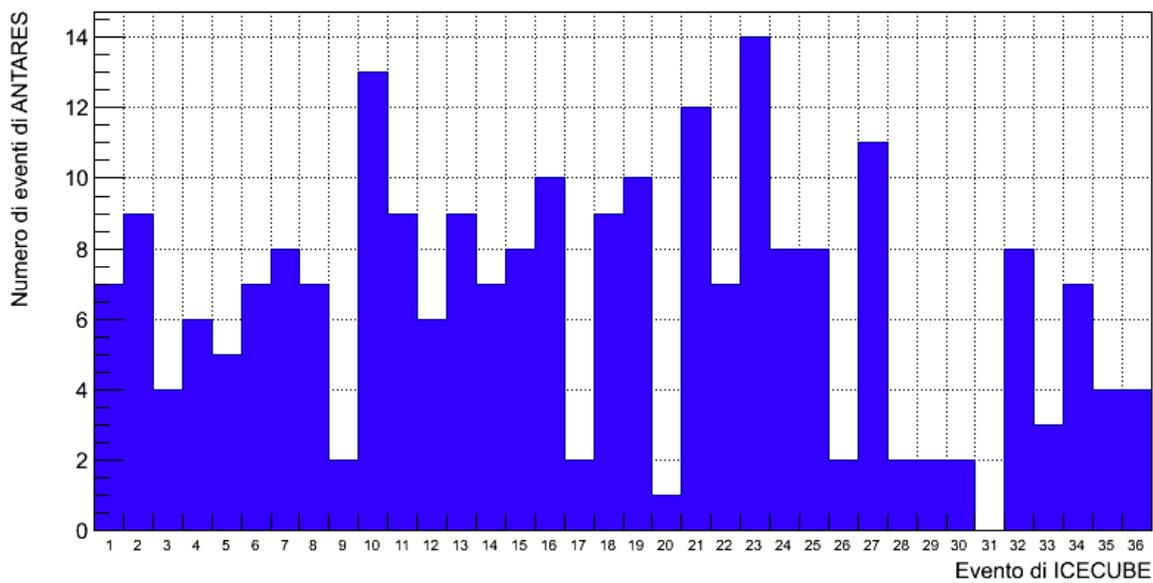


Figura 3.8: Ricerca eventi per bin 5 deg

Evento	RA (deg)	Dec (deg)	Tipologia
1	35.2	-1.8	Shower
2	282.6	-28.0	Shower
3	127.9	-31.2	Track
4	169.5	-51.2	Shower
5	110.6	-0.4	Track
6	133.9	-27.2	Shower
7	15.6	-45.1	Shower
8	182.4	-21.2	Track
9	151.3	33.6	Shower
10	5.0	-29.4	Shower
11	155.3	-8.9	Shower
12	296.1	-52.8	Shower
13	67.9	40.3	Track
14	265.6	-27.9	Shower
15	287.3	-49.7	Shower
16	192.1	-22.6	Shower
17	247.4	14.5	Shower
18	345.6	-24.8	Track
19	76.9	-59.7	Shower
20	38.3	-67.2	Shower
21	9.0	-24.0	Shower
22	293.7	-22.1	Shower
23	208.7	-13.2	Track
24	282.2	-15.1	Shower
25	286.0	-14.5	Shower
26	143.4	22.7	Shower
27	121.7	-12.6	Shower
28	164.8	-71.5	Track
29	298.1	41.0	Shower
30	103.2	-82.7	Shower
31	146.1	78.3	Shower
32	292.5	7.8	Shower
33	323.4	31.3	Shower
34	208.4	-55.8	Shower
35	257.7	-3.0	Shower
36	167.3	20.7	Track

Tabella 3.1: Coordinate e tipologia degli eventi ICECUBE.

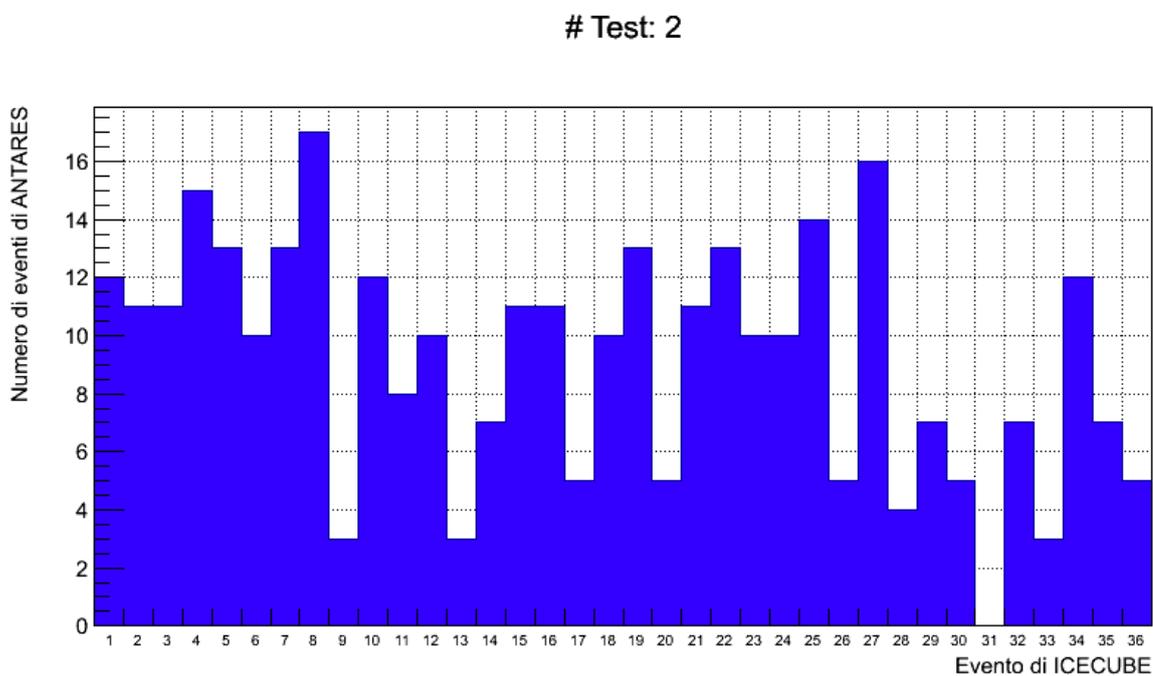


Figura 3.9: Ricerca eventi per bin 7 deg

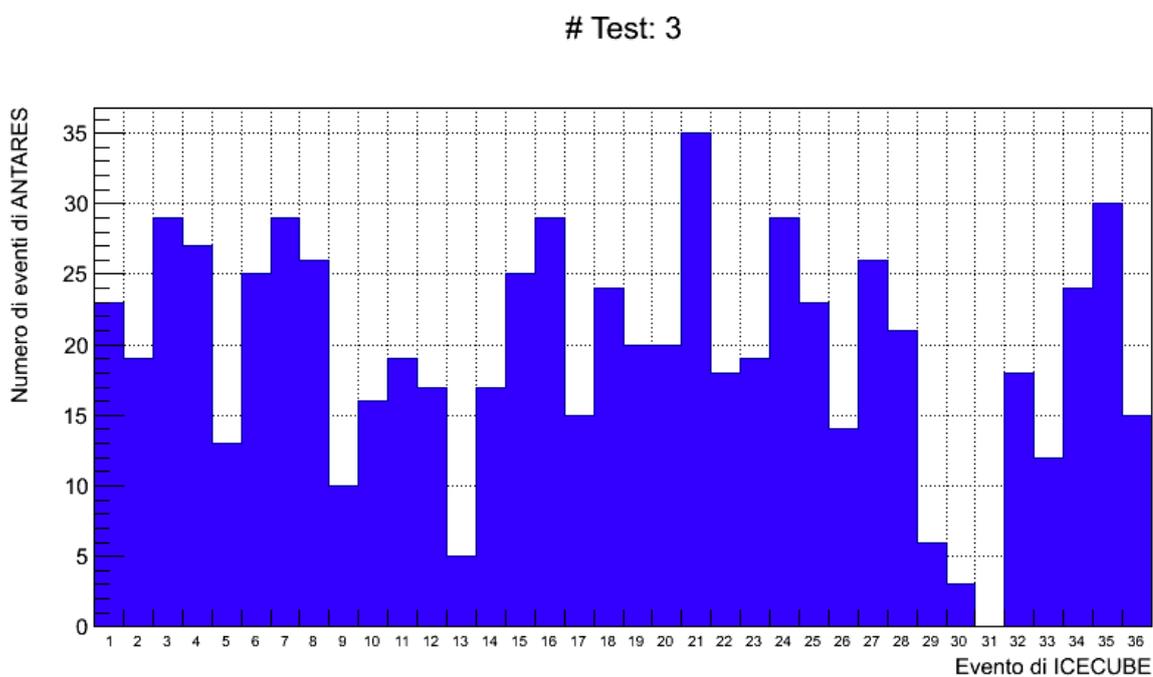


Figura 3.10: Ricerca eventi per bin 10 deg

Test: 0

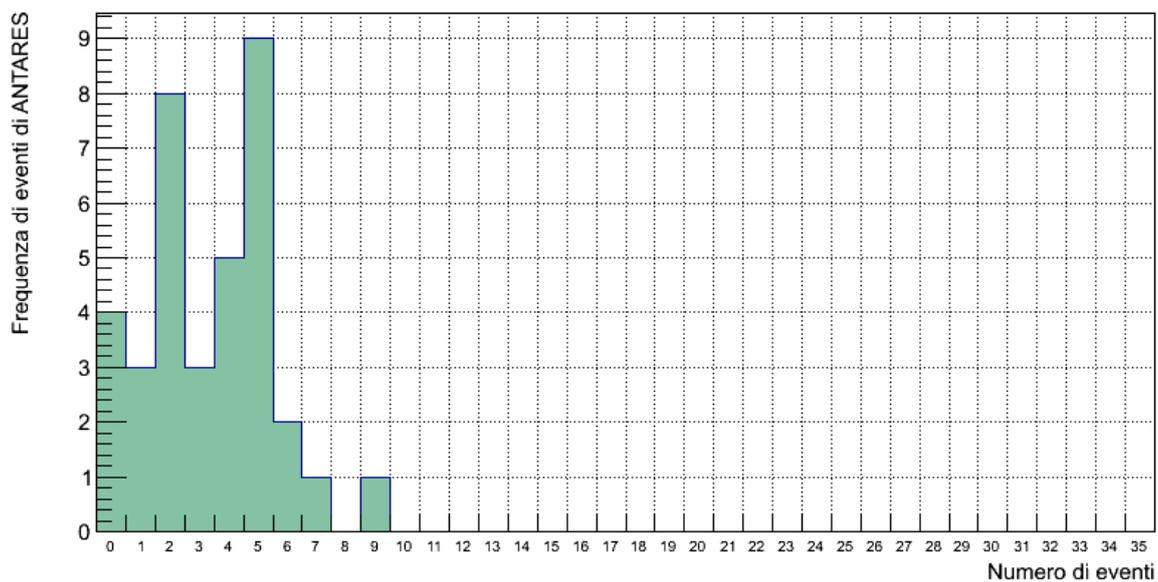


Figura 3.11: Ricerca frequenza per bin 3 deg

Test: 1

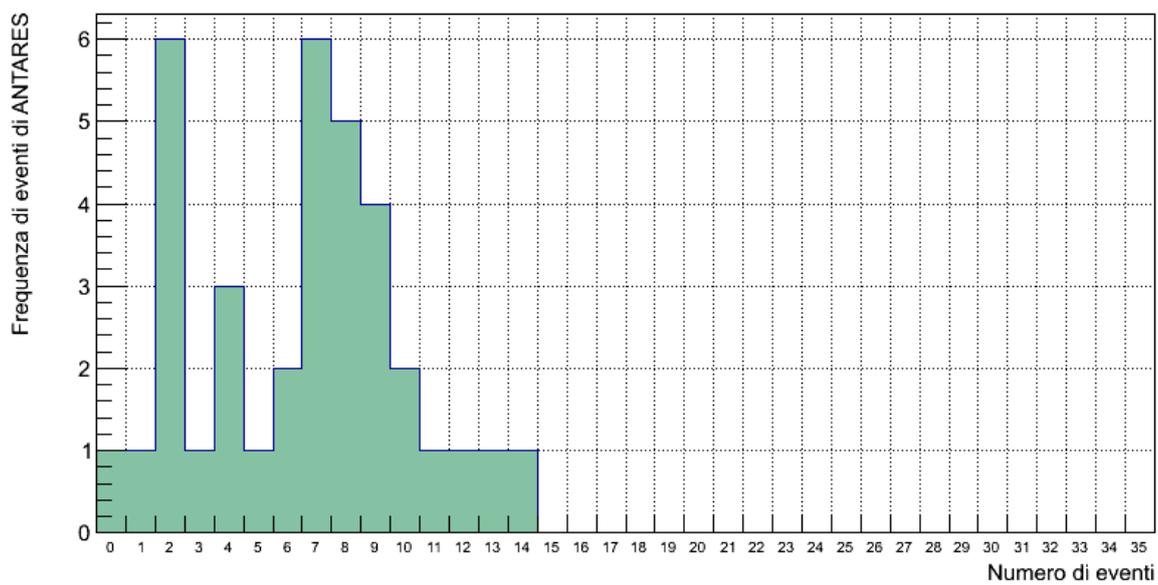


Figura 3.12: Ricerca frequenza per bin 5 deg

Test: 2

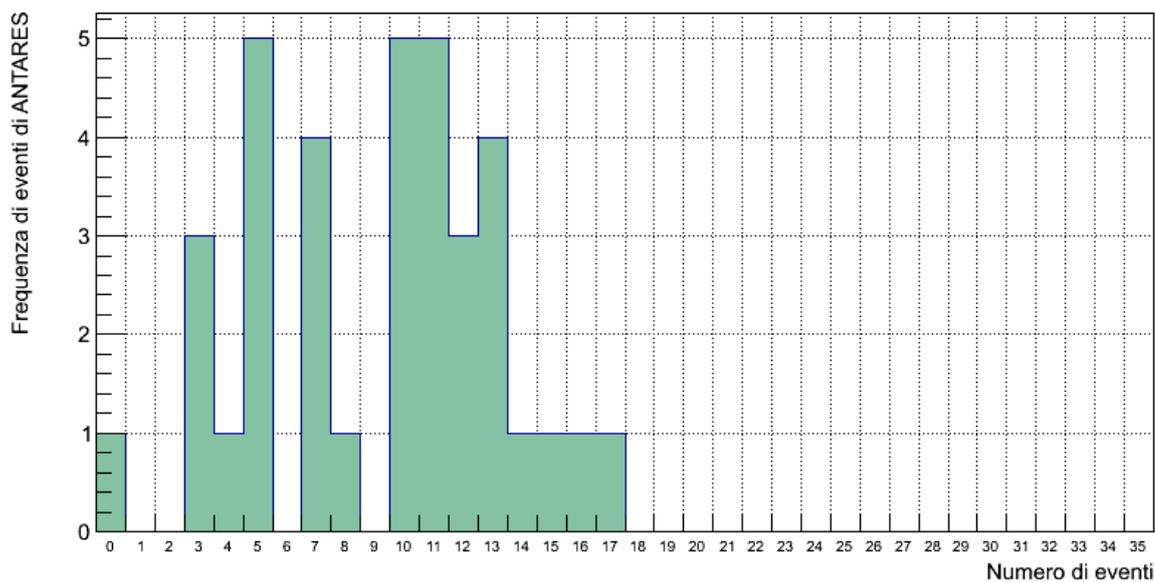


Figura 3.13: Ricerca frequenza per bin 7 deg

Test: 3

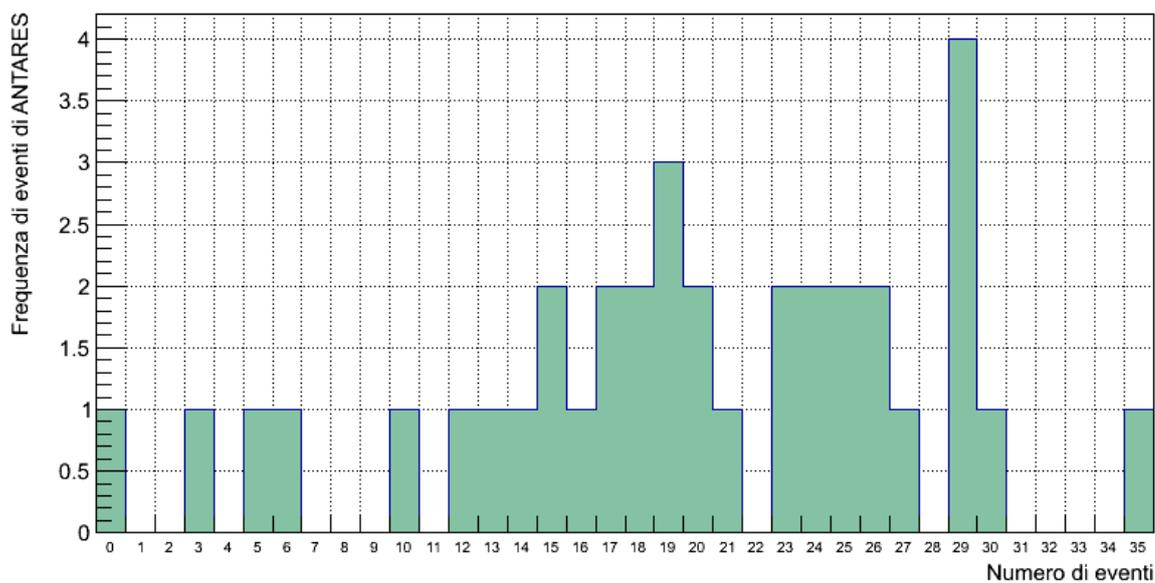


Figura 3.14: Ricerca frequenza per bin 10 deg

Conclusioni

Questo lavoro è ha come scopo l'analisi della distribuzione spaziale di due dataset di eventi rivelati dagli esperimenti ANTARES e ICECUBE. A questo scopo, le coordinate degli eventi sono state rappresentate su una mappa celeste nei due sistemi di coordinate galattico ed equatoriale.

Per verificare la correttezza dei procedimenti e delle formule di conversione delle coordinate, si sono riproposti i plot dei dati di ICECUBE presenti nell'articolo in bibliografia [6]. Si è poi sovrapposta la distribuzione topologica degli eventi sulla mappa celeste dei dati dei due esperimenti, si confrontano le figure 3.5. In esse, riportate sia in coordinate galattiche che equatoriali, si evidenziano le zone complementari di cielo osservabili in base ai siti degli apparati.

Come discusso nel secondo capitolo, sebbene la tecnica di rivelazione sia basata per entrambi gli esperimenti sull'Effetto Cherenkov, le diverse geometrie del rivelatore e i differenti mezzi in cui si produce la radiazione determinano una differente risoluzione angolare dei due apparati.

In seguito si è analizzata la distribuzione delle direzioni di arrivo dei neutrini nei due esperimenti, al fine di determinare una coincidenza tra le direzioni di eventi rilevati dalle due collaborazioni. Tramite istogrammi, si sono rappresentate le occorrenze di eventi di ANTARES in intorni di raggio crescente di eventi di ICECUBE. Da questa analisi, mostrata negli istogrammi 3.7 - 3.10, emerge che, coerentemente con la differente porzione di mappa celeste visibile agli esperimenti, le sovrapposizioni decrescono nelle aree in cui l'uno o l'altro dei rivelatori non hanno visibilità.

Per raggi crescenti, il numero di eventi di ANTARES che si osservano più frequentemente negli intorno di eventi di ICECUBE cresce, come mostrato negli istogrammi 3.11 - 3.14. Questo, verosimilmente legato al numero elevato di eventi nel dataset di ANTARES in relazione a quelli di ICECUBE, non permette di trarre univocamente conclusioni su una eventuale coincidenza degli eventi osservati dai due esperimenti, perchè non ne permette una identificazione univoca. Per far questo sarebbe necessaria una selezione degli eventi di ANTARES considerati, e questa analisi potrebbe essere oggetto di una futura indagine.

Appendice A

Appendice

Nel PARAGRAFO 3.2.1 Ricerca di eventi in intervalli scelti, il file Confronto.cpp svolge un ruolo centrale nell'implementazione del programma: in esso avviene il confronto tra i dati di ANTARES e ICECUBE. Per calcolare la distanza tra due eventi si è scelto la metrica euclidea bidimensionale.

Attraverso alcuni *cicli for*, per valutare progressivamente tutti gli eventi di ANTARES rispetto ad ogni evento di ICECUBE entro una determinata distanza o *bin*, si cerca:

```
if(sqrt(fabs((AN[0][an]-IC[0][ic])2+(AN[1][an]-IC[1][ic])2))) < bin
evento di ANTARES: (AN[0][an],AN[1][an]),
evento di ICECUBE: (IC[0][ic],IC[1][ic]),
an = [0;5517] ic = [1;36].
```

Il caso affermativo indica che per l'evento (IC[0][ic],IC[1][ic]) entro un cerchio di raggio *bin* cade l'evento (AN[0][an],AN[1][an]): in corrispondenza dell'evento di IC considerato si incrementa il contatore di eventi di AN trovati. E l'esito di questi conteggi sarà proprio il contenuto dell'asse delle ordinate degli istogrammi.

Bibliografia

- [1] S.Braibant, G. Giacomelli, M. Spurio, *Particelle e interazioni fondamentali*, Springer (2012).
- [2] C. Grupen, *Astroparticle Physics*, Springer (2005).
- [3] H. Karttunen, P. Kroger, H.Oja, M. Poutanen, K.J. Donner, *Fundamental Astronomy*, Springer (2007).
- [4] P. Duffett-Smith, J. Zwart, *Practical Astronomy*, Cambridge University Press (2011).
- [5] T. Chiarusi, M. Spurio (ANTARES Collaboration), *High-energy astrophysics with Neutrino Telescope*, ICRC2009, arXiv:0906.2634v2 (2009).
- [6] M.G. Aartsen et al.(ICECUBE Collaboration), *Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data*, arXiv:1405.5303v2 (2014).
- [7] L. Radel, C. Wiebusch, *Calculation of the Cherenkov-light yield from electromagnetic cascades in ice with Geant4*, arXiv:1210.5140v2 (2013).
- [8] J. Braun et al., *Methods for point source analysis in high energy neutrino telescopes*, arXiv:0801.1604v1 (2008).
- [9] M.G. Aartsen et al.(ICECUBE Collaboration), *Development of a general analysis and unfolding scheme and its application to measure the ener-*

- gy spectrum of atmospheric neutrino with IceCube*, arXiv:14094535v1 (2014).
- [10] F.Fehr, *Systematic studie, calibration and software development for event reconstruction and data analysis using the ANTARES deep-sea neutrino telescope*, Tesi PhD, University of Erlangen-Nurnberg (2010).
- [11] S. Adrian-Martinez et al.(ANTARES Collaboratio), *Serches for clustering in the time integrated skymap of the ANTARES neutrino telescope*, arXiv:1402.2809v2 (2014).
- [12] B. Stroustrup, *C++: linguaggio, libreria standard, principi di programmazione*, Pearson Addison Wesley (2000).
- [13] *online documentation root.cern.ch*: reference guide, tutorials.

Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Spurio per avermi permesso di avvicinarmi alla fisica Astroparticellare.

Un ringraziamento veramente sentito va a Chiara Latini, oltre ad essere una sincera amica a cui vanno tutto il mio rispetto e stima, per essere stata un insostituibile punto di riferimento. Inoltre, ringrazio anche Andrea Stefani, che trovatosi nel bel mezzo della faccenda, ha saputo dare un prezioso contributo.

Ringrazio vivamente l'incredibile disponibilità umana del prof. Servizi, per tutti i suoi suggerimenti ed insegnamenti che così dettagliatamente mi ha elargito nell'ambito della programmazione.

Rivolgo un speciale ringraziamento ai seguenti professori: prof. Bonsignori per l'entusiasmo e la curiosità trasmessomi nello studio della fisica, prof. Semprini per l'approccio estremamente stimolante con cui ha tenuto le lezioni e al prof. Prevedelli per avermi fatto scoprire l'ottica quantistica.

Un ringraziamento va ai sempre stimolanti professori del Liceo: la prof.ssa Maccaferri per avermi avvicinato alla matematica e il prof. Padovani per avermi introdotto alla filosofia.

Un particolare ringraziamento è indirizzato a tutti i Maestri di balletto con cui ho avuto il piacere di danzare: chi mi ha permesso di coltivare l'arte della danza, chi mi ha permesso di approfondirla e di maturare la mia capacità espressiva.

Un affettuoso abbraccio va ai miei compagni di corso, per aver con-diviso tante esperienze e riflessioni insieme: Alice Zanna, Clarissa Albertazzi, Clau-

dio Corte Coi, Federica Bucci, Francesco De Marco, Matteo Parisi, Santiago Barbieri, Samantha Cacagnile, Serena Bedeschi e Veronica Ilari. In particolare, ringrazio Giulia Giannini per lo spontaneo contributo.

Ringrazio tutte le fantastiche persone che ho avuto il piacere di conoscere attraverso la danza, tra le quali: Cecilia Di Natale, Irene Laura Lusetti, Giulia Gherardi e Silvia.

A testimoniare come l'amicizia vera non conosca vincoli, ringrazio Irene Moroni e Rebecca Travaglini.

Infine, un ringraziamento essenziale va ai miei genitori, per avermi costantemente sostenuta nel mio percorso e per aver sempre creduto in me.

... Come inizia tutto questo?
Credo non vi sia nessun inizio.
Semplicemente continua.
E uno...

Martha Graham, Memorie Un'autobiografia