

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Correlazioni tra UHECRs di Auger e neutrini di ANTARES

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Giada Bertini

Correlatore:
Dott. Luigi Antonio Fusco

Sessione II
Anno Accademico 2014-2015

A Massimo e Cristina.

Sommario

Questo lavoro ha lo scopo di individuare una strada nella ricerca di un confronto tra candidati eventi di neutrino cosmico da parte dell'esperimento ANTARES, nel Mar Mediterraneo a sud est della costa di Tolone, in Francia e gli *Ultra High Energy Cosmic Rays* dell'osservatorio *Pierre Auger* in Argentina. Si utilizzano dati raccolti dal telescopio di neutrini ANTARES tra il 2007 e il 2013, con energie dell'ordine del TeV, e quelli di Auger ottenuti tra il 2004 e il 2014, con energie dei raggi cosmici dell'ordine dell'EeV. Entrambi gli apparati sono basati sulla rivelazione di radiazione Cherenkov, ma l'osservatorio di *Auger* è dotato di un secondo rivelatore di luminescenza che lavora in sincrono per ridurre gli errori sistematici associati ai singoli rivelatori. Le distribuzioni degli eventi in base alle direzioni di arrivo e dell'energia osservata, sono i parametri necessari per la ricerca di una correlazione. Dalla sovrapposizione delle distribuzioni possiamo evidenziare le zone di visibilità caratteristiche di ciascun esperimento, e condurre un eventuale successiva analisi finalizzata ad una identificazione univoca di eventi coincidenti.

Indice

Introduzione	V
1 Neutrini e Raggi Cosmici	1
1.1 Raggi cosmici	1
1.1.1 Composizione e spettro energetico	2
1.1.2 Accelerazione dei raggi cosmici	4
1.2 I Neutrini	5
1.2.1 La storia	5
1.2.2 Interazioni dei neutrini e proprietà fisiche	6
1.2.3 Astronomia tramite neutrini	6
2 I telescopi di neutrini e ANTARES	9
2.1 Telescopi di neutrini	9
2.1.1 Rivelazione dei muoni e effetto Cherenkov	10
2.1.2 Proprietà del mezzo	11
2.1.3 I fotomoltiplicatori	12
2.2 Il telescopio di neutrini ANTARES	12
2.2.1 Struttura del rivelatore	13
2.3 Misure di fisica con ANTARES	15
3 Correlazione tra UHECRs da Auger e ν di ANTARES	17
3.1 L'Osservatorio Pierre Auger	17
3.1.1 Rivelatore di superficie	17
3.1.2 Rivelatore di fluorescenza	18

3.2	Eventi di ANTARES e UHECRs data	18
3.3	Risultati	19
	Conclusioni	25
	Appendice A	27
	Appendice B	29
	Bibliografia	31

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. 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, sullo studio dei Neutrini. Questa tesi avviene nell'ambito del gruppo dell'INFN di Bologna facente parte della Collaborazione ANTARES, un telescopio di neutrini posto nel Mar Mediterraneo, attualmente il più grande rivelatore di neutrini in funzione con maggiore sensibilità ad osservare l'emisfero australe, e quindi la regione del centro galattico, e si occupa principalmente dello studio dei neutrini di elevata energia che possono essere prodotti da sorgenti astrofisiche, oltre a molti altri studi legati a questi. Questo lavoro ha come obiettivo primario il confronto di due dataset di eventi rivelati da ANTARES e gli Ultra High Energy Cosmic Rays(UHECRs) dell'*Osservatorio Pierre Auger*, al fine di identificare possibili corrispondenze angolari tra gli eventi *up-going* di ANTARES e gli UHECRs di Auger, per esplorare la possibilità che entrambi siano prodotte dalla stessa sorgente astrofisica. Nel primo capitolo introdurrò la fisica dei raggi cosmici partendo dalla loro natura, dal loro spettro energetico e da quali possano essere i meccanismi che ne permettono l'accelerazione presso sorgenti astrofisiche fino ad energie estremamente elevate. Interagendo con i nuclei atmosferici, i raggi cosmici producono sciame di particelle secondarie, tra cui i neutrini, di cui saranno descritte le caratteristiche generali. Nel secondo capitolo mostrerò come si possano rivelare i neutrini in un rivelatore sottomarino, sfruttando la luce *Cherenkov* prodotta dal muone indotto dall'interazione del neutrino con la materia che circonda il rivelatore. Approfondirò il caso di ANTARES, descrivendo la struttura e le caratteristiche del rivelatore e le misure possibili sulle sorgenti astrofisiche. Nel terzo capitolo descriverò in breve l'Osservatorio di Auger e esporrò

il confronto dei dati di ANTARES e degli UHECRs sfruttando la distribuzione angolare ed energetica, che sono le caratteristiche che permettono di distinguere un segnale dal fondo.

Capitolo 1

Neutrini e Raggi Cosmici

Fino ad oggi, lo strumento principale dell'esplorazione dell'universo è stato il fotone: ciò che sappiamo dei fenomeni astrofici deriva dall'analisi dello spettro elettromagnetico nella sua interezza. Tuttavia, alle alte energie, il fotone non costituisce una sonda valida perché, interagendo con la materia, non riesce ad uscire dalle regioni dense in cui è prodotto. Lo studio dell'universo alle alte energie, necessita dell'identificazione certa della sorgente di produzione, che può essere difficilmente effettuata se si ha a che fare con particelle cariche che subiscono una deflessione da parte dei campi magnetici galattici e intergalattici. Anche se ad energie maggiori di 10^{20} eV i loro effetti sono trascurabili, per i protoni diventa significativo l'effetto GZK, che ne limita l'energia, e i neutroni sono esclusi in quanto, data la brevità della loro vita a riposo, riescono a percorrere circa 1 Mpc prima di decadere. La sonda più affidabile per esplorare i fenomeni astrofici nell'universo lontano è il neutrino: l'assenza di carica elettrica e la piccola sezione d'urto, cioè la bassissima probabilità di interazione, gli permettono di uscire da regioni molto dense, opache alle altre particelle, e di propagarsi in linea retta, senza deflessioni né attenuazioni, fino a noi.

1.1 Raggi cosmici

All'inizio dello scorso secolo furono condotti vari esperimenti che mostravano l'esistenza di una componente di radiazione ambientale di natura extraterrestre. Il primo di questi esperimenti fu condotto da V. Hess [1] che, nel 1912, misurò con elettrometri a

foglia l'intensità della radiazione ambientale a quote crescenti, volando su di un pallone aerostatico. L'intensità di questa radiazione risultò essere crescente con l'altitudine, mostrando l'esistenza di un qualche tipo di radiazione che entrava dall'alto nell'atmosfera a cui Hess diede il nome di "radiazione cosmica". Successivamente, tra gli anni Trenta e Quaranta, questi "raggi cosmici" assunsero grande importanza per le molte scoperte di Fisica delle Particelle ad essi legate. Dall'osservazione di tracce di raggi cosmici in camere a nebbia C.D. Anderson, nel 1932, scoprì il positrone [2], la prima antiparticella ad essere osservata; coadiuvato da S.H. Neddermeyer, nel 1937, rivelò il muone [3] (e l'antimuone). Nel 1947, da tracce di raggi cosmici in emulsione nucleare, G. Occhialini, C. Powell e C. Lattes scoprirono i pioni carichi [4]. Dopo la Seconda Guerra Mondiale ci fu una vera e propria proliferazione di particelle scoperte nei raggi cosmici che rappresentarono, fino all'avvento degli acceleratori di particelle, la via primaria per le ricerche nella Fisica delle Particelle.

1.1.1 Composizione e spettro energetico

La radiazione cosmica incidente sugli strati superiori dell'atmosfera è interamente composta di particelle stabili e nuclei, come protoni(90%), nuclei di elio (9%) ed elementi più pesanti dell'elio(1%), oltre che da elettroni e fotoni. Tali particelle, accelerate direttamente da sorgenti astrofisiche, sono definite primarie ed interagiscono con gli atomi e le molecole dell'atmosfera terrestre, dando origine a sciame di particelle (Figura 1.1), dette secondarie, costituiti principalmente da muoni e neutrini che sono anche le uniche particelle in grado di penetrare sotto terra o sotto l'acqua, per la loro ridotta perdita di energia (i μ) o per la piccola sezione d'urto di interazione con la materia (i ν).

L'energia dei raggi cosmici primari va da 10^9 a 10^{21} eV e lo spettro energetico è descritto da una legge di potenza:

$$\frac{dN}{dE} = E^{-\gamma}$$

dove il coefficiente γ vale approssimativamente 2.7 fino al *ginocchio* (knee), cioè energie inferiori a 3×10^{15} eV, e diventa 3.1 fino a circa 10^{19} eV, energia alla quale lo spettro subisce un appiattimento, detto *caviglia* (ankle) (Figura 1.2) [5]. Fino a 10^{14}

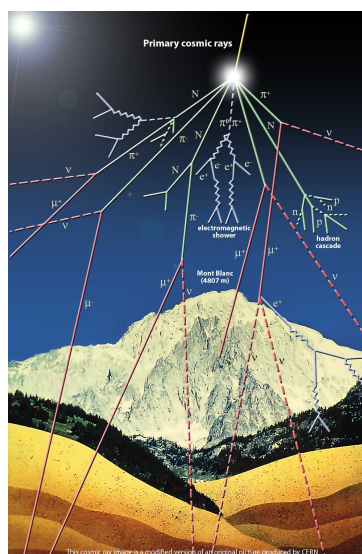


Figura 1.1: Esempio di interazione di un raggio cosmico nell'atmosfera con la formazione di cascate adroniche ed elettromagnetiche.

eV, è possibile osservare l'esatta composizione della radiazione e identificare le particelle rivelate in quanto la misura dell'energia dei raggi cosmici primari può essere condotta direttamente tramite satelliti o palloni stratosferici. Questi trasportano esperimenti che sono sostanzialmente spettrometri di massa, e garantiscono la misura della carica della particella, assieme alla sua energia e alla sua massa. Ad energie superiori, a causa dello scarso flusso, diventa necessario procedere con misure indirette, attraverso grandi esperimenti posti sulla superficie terrestre. In questo caso quello che si osserva è lo sciame di particelle secondarie generate dal raggio cosmico primario nell'atmosfera, la cui energia è quindi ricostruita osservando le particelle secondarie. Un limite superiore all'energia dei raggi cosmici in arrivo sulla Terra è dato dall'interazione di questi con i fotoni della radiazione cosmica di fondo (CMB) a 2.7 K. Tale risultato, noto come effetto Greisen-Zatsepin-Kuz'min (GZK), limita l'energia dei protoni a circa 3×10^{20} eV (GZK cutoff) [1][6]. La direzione di arrivo dei raggi cosmici sulla Terra è resa casuale dalla presenza dei campi magnetici galattici ($B \approx 3 \mu\text{G}$) e intergalattici ($\approx \text{nG}$) che deviano, a causa della forza di Lorentz, le particelle cariche. Questo fatto impedisce di poter "puntare" verso la sorgente di raggi cosmici sotto energie di 10^{19} eV, poiché ad energie inferiori subiscono deflessioni multiple nei campi magnetici galattici.

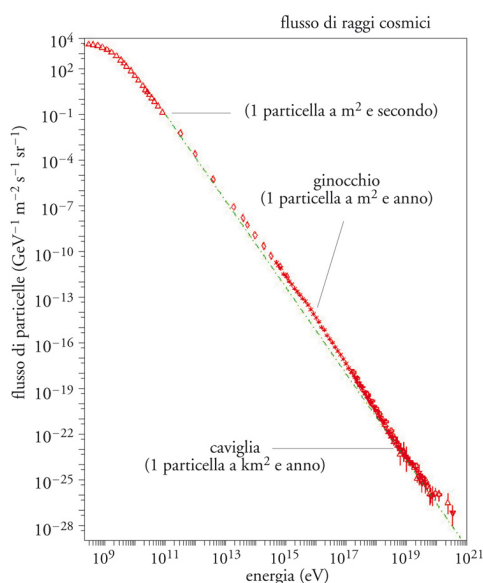


Figura 1.2: Spettro energetico dei raggi cosmici.

1.1.2 Accelerazione dei raggi cosmici

L'accelerazione dei raggi cosmici a seguito di processi iterativi di scattering fu proposta da Fermi [7][8]. L'idea alla base del meccanismo di accelerazione sta nel trasferimento di una certa quantità di energia cinetica da parte di un plasma in movimento alle singole particelle nel mezzo a causa di uno scattering ripetuto che, dopo molte collisioni, porta un guadagno netto di energia. Il meccanismo di Fermi si realizza quando si considerano collisioni di particelle con fronti d'onda piani; in questo caso il guadagno di energia è del primo ordine in u/c , dove u è la velocità relativa della nube di plasma rispetto al sistema di riferimento in cui la distribuzione dei raggi cosmici è isotropa, che viene chiamato meccanismo di Fermi del primo ordine. Le particelle così accelerate risultano avere uno spettro che segue una legge di potenza $E^{-\gamma}$.

1.2 I Neutrini

1.2.1 La storia

L'esistenza del neutrino, particella di massa piccolissima ed estremamente difficile da osservare, fu ipotizzata da Pauli nel 1930 nello studio dello spettro degli elettroni prodotti dal decadimento β dei nuclei per spiegare la violazione del principio di conservazione dell'energia nell'ipotesi che fossero fenomeni a due corpi, cioè in cui gli unici prodotti della reazione fossero protone ed elettrone; con il neutrino diventano processi a 3 corpi, dando origine ad uno spettro continuo degli elettroni emessi. Il nome neutrino fu assegnato a questa particella ignota da Fermi, nell'ambito della sua teoria del decadimento β [9]. Da un punto di vista teorico furono fatti molti passi avanti stabilendo la natura fermionica della particella e calcolando la sua sezione d'urto per i processi di scambio carica $\nu + n \rightarrow e^- + p$ e $\bar{\nu} + p \rightarrow e^- + n$. Si dovettero attendere oltre 25 anni prima che questa particella potesse essere rivelata, grazie all'esperimento di Reines e Cowan [10], nel 1956, che sfruttando un apparato d'acqua a qualche decina di metri da un reattore nucleare, rivelarono il neutrino elettronico. Nel 1958 B.Pontecorvo propose di indagare l'esistenza di un secondo tipo di neutrino, associato al muone, rivelato poi nel 1962 da Schwartz, Lederman e Steinberger all'acceleratore di Brookhaven tramite l'osservazione dei prodotti dei decadimenti di pioni carichi. Per la rilevazione sperimentale del neutrino tauonico, la cui esistenza fu postulata nel 1975[11], si è dovuto attendere fino al 2000 al Fermilab, dalla collaborazione DONUT[12]. Nel 1969, Raymond Davies iniziò l'era dell'astrofisica osservativa dei neutrini realizzando il primo esperimento radiochimico per la rivelazione di neutrini solari nella miniera di Homestake, negli Stati Uniti. Esperimenti condotti tra il 1995 e il 1999 hanno contribuito a determinare un flusso di neutrini solari inferiore alle previsioni del Modello Solare Standard, il che ha inizialmente messo in discussione la validità di questo modello e successivamente ha riportato alla luce problematiche sollevate già a partire dagli anni '40 de secolo scorso da E. Majorana, B.Pontecorvo ed altri, circa l'eventualità che il neutrino coincida con la sua antiparticella e soprattutto che sia dotato di massa ed oscilli, cioè cambi sapore.

1.2.2 Interazioni dei neutrini e proprietà fisiche

Il neutrino è un leptone di carica nulla e spin $\frac{1}{2}$ declinato in tre differenti sapori: elettronico, muonico e tauonico. Le uniche interazioni cui i neutrini sono soggetti, che possono trasformarli nel leptone a cui sono accoppiati, sono le interazioni deboli mediate dai bosoni W^+ , W^- di massa 80.3 GeV, interazioni dette a corrente carica, e dal bosone Z^0 di massa 91.2 GeV per le interazioni a corrente neutra. Esperimenti che osservavano i neutrini solari, hanno mostravano un deficit di neutrini osservati rispetto alle previsioni teoriche, imputabile ai fenomeni di oscillazione quantistica, che si verificano per particelle i cui autostati di massa differiscono dagli autostati di sapore. Ciò implica che i neutrini posseggono una massa, contrariamente a quanto previsto dal Modello Standard, che li prevede a massa nulla, e quindi che gli autostati di sapore ν_e , ν_μ , ν_τ possono essere espressi in termini di una combinazione lineare degli autostati di massa ν_1 , ν_2 , ν_3 , autostati dell'hamiltoniana di particella libera. Esistono perciò tre angoli θ_{12} , θ_{13} , θ_{23} che descrivono questo mixing. I neutrini si propagano con differente frequenza a seconda del valore di tale massa: gli autostati quindi raggiungono il rivelatore in tempi diversi e la loro ricombinazione lineare può produrre un autostato di sapore diverso da quello di partenza.

1.2.3 Astronomia tramite neutrini

Gli oggetti astrofisici che accelerano i raggi cosmici producono sia fotoni di alta energia (raggi γ) sia neutrini, che possono trasportare informazioni originate in sorgenti remotissime dell'universo a tempi prossimi a quelli del Big Bang: essendo privi di carica elettrica non risentono di alcuna deflessione da parte dei campi magnetici, galattici ed extra-galattici. Analogamente, avendo una piccolissima sezione d'urto, la possibilità che interagiscano con altre particelle è estremamente ridotta. Ci si attende che lo spettro dei neutrini prodotti presso oggetti astrofisici sia del tipo E^{-2} , come quello dei raggi cosmici. L'analisi dei flussi di neutrini permette di caratterizzare l'emissione di alta energia delle sorgenti galattiche ed extragalattiche da cui provengono e identificarne la posizione sul piano galattico.

- *Neutrini Atmosferici*

I neutrini sono prodotti in abbondanza nell'atmosfera terrestre per interazione dei raggi cosmici primari, con energie che partono dai pochi MeV ed arrivano fino ai TeV: essi costituiscono un fondo molto importante nei telescopi. Sono prodotti dai decadimenti di pioni e di muoni in processi di *beam dump*. Il flusso di neutrini non è isotropo e dipende fortemente dall'angolo di zenith, in particolar modo alle alte energie. Pioni e muoni prodotti intorno la direzione tangente la Terra hanno un tempo di volo più lungo in un'atmosfera meno densa, perciò possono decadere prima di interagire: il flusso di neutrini atmosferici osservato negli esperimenti presenta un picco nella direzione d'arrivo orizzontale ovunque sulla Terra.

- *Neutrini da GRB*

I Gamma Ray Bursts (GRB) sono lampi di raggi gamma di durata complessiva compresa tra i millisecondi e qualche decina di secondi. Si tratta del fenomeno più energetico finora osservato nell'universo, la cui energia totale rilasciata è dell'ordine di 10^{46} J, e sono associati al collasso di stelle massicce. Solo recentemente osservazioni sistematiche hanno mostrato una distribuzione isotropa nello spazio e rilevato che la frequenza dei bursts è di ≈ 3 al giorno. Dopo la messa in orbita del satellite Beppo-SAX, capace di localizzare il flusso di fotoni X emessi dalla coda del burst (*afterglow*) e comunicare la posizione a terra, lo studio delle emissioni di bassa energia tipiche di questo fenomeno ha permesso di determinare il redshift dei GRB e stabilire che la distanza tipica a cui avvengono è cosmologica: $0.8 < z < 3.4$. Si pensa che i GRB derivino dall'ultimo stadio di coalescenza di due buchi neri compatti o di un buco nero e di una stella di neutroni, con la formazione di un oggetto di grandissima massa e caldo, che producono una fireball. Il modello che descrive l'evoluzione del sistema prevede che durante la fase di espansione possono essere accelerati protoni ad altissime energie con un meccanismo di Fermi del primo ordine, nelle collisioni tra i fronti d'onda d'urto che si propagano con diversi fattori di Lorentz (*internal shocks*). In questa fase, dalle interazioni $p\gamma$ e, in numero minore, pp , vengono prodotti i neutrini di alta energia fino a $\approx 10^{14}$ eV e la forma del loro spettro dipende dalla forma dello spettro dei fotoni. Neutrini con

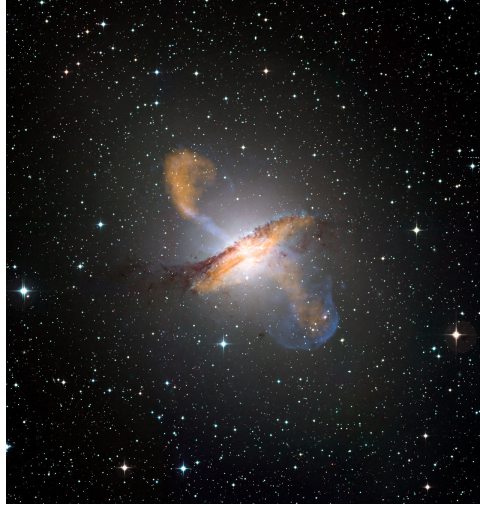


Figura 1.3: Immagine a colori della galassia *Centaurus A*, che contiene un nucleo galattico attivo (AGN). L'immagine rivela i lobi e i getti provenienti dal buco nero centrale della galassia attiva. Immagine da "European Southern Observatory".

energie maggiori di $\approx 10^{18}\text{eV}$, possono essere prodotti durante gli shocks esterni nelle interazioni tra i protoni di altissima energia ed i fotoni di afterglow.

- *Neutrini da AGN*

I nuclei galattici attivi (Active Galactic Nuclei, AGN) sono oggetti astrofisici estremamente interessanti ed energetici; sono costituiti da un buco nero supermassiccio (10^9 masse solari) al centro di una galassia che attrae una grossa quantità di materia che compone il cosiddetto disco di accrescimento, di forma toroidale; il conseguente rilascio di energia gravitazionale rende il centro galattico estremamente luminoso ($\approx 10^{40}$ J/sec), anche più dell'intera galassia di cui fa parte. Perpendicolarmente al disco di accrescimento si formano due getti di materia (Figura 1.3), in direzione opposta, dove può avvenire l'accelerazione dei raggi cosmici. Di particolare interesse per le ricerche di neutrini al altissima energia sembrano essere quegli AGN che storicamente furono definiti blazars in cui uno dei due getti è allineato con la linea di vista dell'osservatore.

Capitolo 2

I telescopi di neutrini e ANTARES

2.1 Telescopi di neutrini

Un rivelatore di neutrini agisce da telescopio quando la direzione dei neutrini rivelati è ricostruita con una precisione angolare di 1° , o migliore[5]. Se infatti si ha una ricostruzione accurata e precisa della direzione di arrivo del neutrino, può essere associato ad una sorgente, eventualmente già nota. Negli anni sessanta M.A. Markov [13] propose per la prima volta di realizzare apparati che potessero offrire tale opportunità. L'idea era di utilizzare la luce Cherenkov generata dai muoni, prodotti dal deep inelastic scattering dei neutrini che giungevano al rivelatore. I muoni, infatti, sono particelle estremamente penetranti, essendo sufficientemente massive da non perdere tutta la loro energia in processi radiativi; questa proprietà permette loro di attraversare km di acqua o roccia senza essere fermati. La sezione d'urto e i flussi attesi per neutrini astrofisici sono estremamente ridotti e sono quindi necessari rivelatori di enormi dimensioni. Per poter realizzare un telescopio di neutrini occorre quindi disporre di un gran numero di rivelatori in un mezzo trasparente, come l'acqua del mare o il ghiaccio antartico. Così si ha a disposizione un grande bersaglio per l'interazione dei neutrini ed un mezzo trasparente per la propagazione della luce Cherenkov emessa dalle particelle relativistiche prodotte dall'interazione dei neutrini. Una volta rivelata la luce occorre poter ricostruire la direzione di arrivo della particella, o dello sciame di particelle, che l'ha generata: questa è infatti correlata con la direzione di provenienza del neutrino. Il telescopio deve essere

posto in profondità: la presenza di un certo spessore di materia al di sopra del rivelatore permette di avere una schermatura rispetto alle particelle secondarie prodotte dai raggi cosmici. L'intensità dei muoni prodotti negli sciami secondari è infatti decrescente con la profondità. Inoltre, eventi up-going, provenienti cioè dal basso e che hanno quindi attraversato la Terra, possono essere solo eventi generati da neutrini poiché un muone non può attraversare più di 5 km di roccia.

2.1.1 Rivelazione dei muoni e effetto Cherenkov

I telescopi di neutrini sono formati da reticoli di fotomoltiplicatori che cercano di rivelare fotoni Cherenkov prodotti dai muoni fortemente relativistici nel mezzo che costituisce il rivelatore. La ricostruzione di questi segnali può permettere di risalire alla direzione e all'energia del neutrino che ha dato origine al muone in reazioni di disintegrazione. La relazione tra direzione del neutrino e muone [5] è essenziale per definire il concetto stesso di telescopio di neutrini:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0,06^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}}$$

dove $\theta_{\nu\mu}$ rappresenta la differenza media tra la direzione di provenienza del neutrino e quella in cui è prodotto il muone. Ricostruendo la traccia del muone è possibile risalire alla direzione di arrivo del neutrino che lo ha generato.

Il passaggio di una particella carica in un mezzo ne provoca la polarizzazione, eccitandone le molecole. Quando avviene la depolarizzazione, le molecole si diseccitano emettendo radiazione elettromagnetica. Essendo c la velocità della luce nel vuoto ed n l'indice di rifrazione nel mezzo, in quest'ultimo la luce si propaga ad una velocità $\frac{c}{n}$. Poiché $n > 1$, una particella carica di alta energia potrà muoversi nel mezzo, provocando quindi l'eccitazione e la diseccitazione delle sue molecole, ad una velocità superiore a quella della luce nello stesso (ovvero con $\beta > \frac{1}{n}$). La particella avrà percorso uno spazio βct , mentre il fronte d'onda della radiazione emessa dalla diseccitazione delle molecole del mezzo $\frac{ct}{n}$ (Figura 2.1). Tale effetto di produzione di luce nel mezzo è detto *effetto Cherenkov*. In acqua, ad esempio, essendo l'indice di rifrazione pari a 1.33, l'angolo di emissione di luce Cherenkov per una particella relativistica ($\beta \approx 1$) risulta di circa 41° . L'acqua di mare

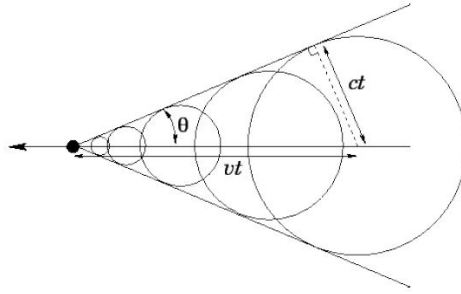


Figura 2.1: Cono d'onda della Radiazione Cherenkov

ha un indice di rifrazione leggermente diverso, dando un angolo Cherenkov di circa 42° . La rivelazione della luce emessa dalla particella permette di ricostruirne la traiettoria.

2.1.2 Proprietà del mezzo

Gli effetti del mezzo in cui la luce Cherenkov si propaga sono l'assorbimento e la diffusione (o scattering) dei fotoni. L'assorbimento riduce l'ampiezza del fronte d'onda Cherenkov, cioè il numero totale di fotoni rivelabili; lo scattering cambia la direzione di propagazione dei fotoni Cherenkov e, quindi, la distribuzione dei loro tempi di arrivo sui PMT. Per una certa lunghezza d'onda λ , la propagazione della luce nel mezzo è caratterizzata dalle proprietà ottiche del mezzo, tramite i coefficienti di assorbimento $a(\lambda)$, scattering $b(\lambda)$ e attenuazione $c(\lambda)$, o dalle rispettive lunghezze di assorbimento L_a , scattering L_b e attenuazione L_c :

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$$

$$L_a = \frac{1}{a(\lambda)}$$

$$L_b = \frac{1}{b(\lambda)}$$

$$L_c = \frac{1}{c(\lambda)}$$

Ciascuna delle lunghezze rappresenta il cammino dopo il quale l'intensità di un fascio di luce è ridotta ad un fattore $\frac{1}{e}$ dell'intensità iniziale a causa dell'assorbimento o della diffusione. L'acqua marina ha proprietà ottiche che dipendono dalla sua salinità, dalla

temperatura (e quindi dallo stato di aggregazione delle molecole di H_2O) e dal particolato che galleggia in essa; tali caratteristiche sono quindi dipendenti dal tempo, poiché possono subire variazioni dovute alle correnti. In generale l'acqua presenta una lunghezza di scattering effettiva maggiore rispetto al ghiaccio, garantendo una migliore risoluzione angolare nella ricostruzione delle tracce dei muoni, per la presenza di minori impurità che costituiscono centri di diffusione per i fotoni. Al contrario l'acqua presenta una lunghezza di assorbimento minore, mentre il ghiaccio è maggiormente trasparente [5]. In acqua marina occorre tenere conto del fondo ottico, dato da due principali contributi naturali: il decadimento di elementi radioattivi presenti in soluzione dell'acqua e la luminosità prodotta da organismi viventi (bioluminescenza). L'intensità di tale rumore dipende dalla concentrazione di potassio nelle acque, ovvero dalla salinità del mare. La bioluminescenza è presente in tutti gli oceani, ma è un evento variabile a seconda della località, del tempo e della profondità.

2.1.3 I fotomoltiplicatori

L'elemento fondamentale di cui si compone un telescopio di neutrini è un insieme di tubi fotomoltiplicatori il cui funzionamento di base è l'effetto fotoelettrico. Il fotoelettrone che si forma è immesso in una catena di elettrodi posti in tensione (dinodi) fino ad arrivare ad un anodo finale e la differenza di tensione tra i vari dinodi permette di amplificare il segnale iniziale, generando una cascata elettronica fra i dinodi, con un fattore di guadagno dipendente dal numero di elettrodi presenti nel fotomoltiplicatore. Tale amplificazione deve essere necessariamente elevata per poter avere un segnale all'anodo rilevabile; si deve tipicamente giungere a fattori di guadagno di 10^7 per poter avere un segnale utilizzabile.

2.2 Il telescopio di neutrini ANTARES

ANTARES (acronimo di Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) è attualmente il telescopio di neutrini in funzione con maggiore sensibilità ad osservare l'emisfero australe, avendo quindi la possibilità di vedere la regione del centro galattico, di particolare interesse astrofisico. Le ricerche hanno avuto avvio nel

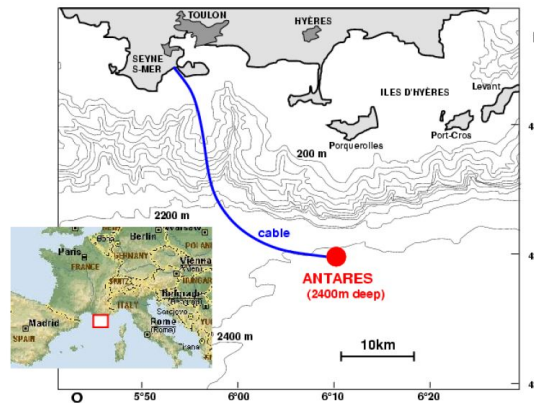


Figura 2.2: Localizzazione di ANTARES nel Mar Mediterraneo, di fronte alla costa della Francia.

1996 con le operazioni preliminari di scelta del sito, per una fase di R&D che ha avuto una durata complessiva di 3 anni; i primi apparati di rivelazione sono stati posti in mare nel 2006 e due anni dopo, nel maggio 2008, è stato completato l'intero apparato [5]. La base del rivelatore è localizzata ad una profondità di 2475 m nel Mar Mediterraneo, a sud est della costa di Tolone, in Francia (Figura 2.2). Un cavo elettro-ottico di circa 40 km fornisce energia al rivelatore e trasporta i dati dall'apparato alla sala di controllo, situata a La Seyne-sur-Mer, sulla costa francese. L'esperimento ANTARES è dotato anche di apparati di osservazione delle profondità marine con una varietà di sensori dedicati a studi acustici, oceanografici e delle scienze della Terra.

2.2.1 Struttura del rivelatore

ANTARES è costituito da 12 stringhe verticali flessibili disposte ad ottagono, equipaggiate da 885 PMT, posti in tripletti, e separate alla base da 60 m l'una dall'altra. Ciascuna stringa è alta circa 450 m e consta di 25 piani di 14,5 m, mantenuta in verticale da una boa alla sommità e da un'ancora legata al fondale. L'elemento base del rivelatore è il modulo ottico (*Optical Module, OM*), costituito da un tubo fotomoltiplicatore, alcuni sensori ed apparecchiature elettroniche, contenuti in sfere di vetro resistente alla pressione fino a profondità di 6 km e schermate dal campo magnetico terrestre mediante una sottile gabbia. Gli OM sono posti in tripletti a formare uno *storey* (piano)(Figura 2.3)

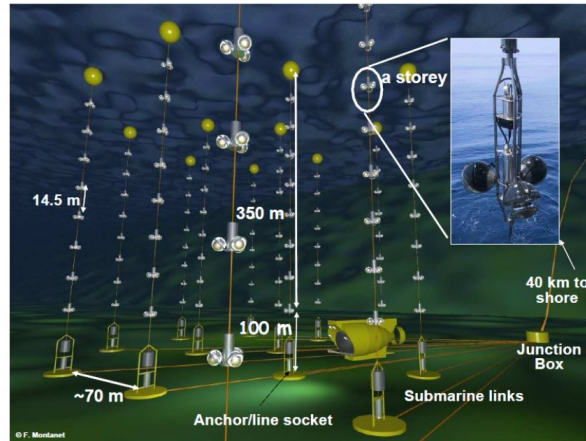


Figura 2.3: Visione schematica del rivelatore. Nel riquadro piccolo un'immagine di un tripletto di moduli ottici, uniti a formare uno *storey*.

e sono montati su di un *Optical Module Frame* (OMF) in titanio, in modo da formare un angolo di 45° rispetto alla verticale puntando verso il basso. Gli OM sono collegati al *Local Control Module* (LCM), ed alla base delle stringhe c'è il modulo di controllo di stringa (*String Control Module*, *SCM*): costituiscono i nodi della rete di trasmissione dati e le sedi dell'elettronica di controllo di quei parametri fisici fondamentali per la correttezza e l'implementazione dei dati come la temperatura dell'acqua, la velocità delle correnti, la posizione delle stringhe e le soglie del trigger. Le stringhe infatti sono libere di muoversi con le correnti, ed è stato messo a punto un sistema di misuratori di torsione e bussole che rivelano l'inclinazione locale ed un sistema di triangolazione acustica per localizzare la stringa in tre dimensioni. Gli LCM contengono dei circuiti integrati, gli *Analogue Ring Sampler* (ARS) e i *Time-to-Voltage Converter* (TVC) che forniscono ai fotomoltiplicatori il voltaggio necessario e lavorano alla digitalizzazione del segnale che arriva. Quando un segnale supera il trigger T_0 , il TVC fornisce un segnale analogico proporzionale al tempo passato; il circuito ARS apre un *gate* della durata di 25 ns in cui integra i segnali in ingresso dai PMT che hanno energia sufficiente a superare il trigger. Una volta chiuso il *gate*, l'AMS digitalizza il segnale e resta inattivo per circa 250 ns di *tempo morto*: per minimizzare il rischio di perdere degli eventi significativi, ogni LCM è equipaggiato con due AMS che lavorano alternativamente nel tempo morto dell'altro. Ogni stringa è collegata ad una *Junction Box* (JB) che costituisce il punto di distribu-

zione di energia e dati tra le stringhe ed il cavo elettro-ottico principale, di circa 48 Km, (*Main Electro-Optical Cable, MEOC*) verso la sala di controllo a terra. La conoscenza del timing relativo dei fotoni in arrivo sui PMT è necessaria per la ricostruzione corretta delle tracce. Occorre quindi conoscere l'offset temporale di ogni clock locale, tramite una calibrazione dei clock interni. Un sistema basato su emettitori LED, presenti in ogni OM, provvede alla determinazione degli offset temporali presenti tra il fotocatodo e l'elettronica di lettura. Un sistema di calibrazione basato su beacon ottici è utilizzato per stimare gli offset temporali tra i PMT [14].

2.3 Misure di fisica con ANTARES

- *Ricerca di sorgenti cosmiche di alta energia:* La ricerca di neutrini cosmici, e delle loro sorgenti, rappresenta uno degli scopi principali dell'esperimento ANTARES. Sorgenti puntiformi di neutrini sono state ricercate utilizzando i dati raccolti da ANTARES dal 2007 al 2013. L'analisi utilizza un metodo di unbinned maximum likelihood con due differenti strategie: 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 cercano neutrini provenienti da 40 direzioni selezionate a priori, corrispondenti a sorgenti di raggi gamma note.
- *Astronomia Multi-Messenger:* Varie analisi sono svolte in ANTARES cercando la coincidenza tra i neutrini osservati e misure esterne di fenomeni astrofisici.
- *Flaring blazars:* Sono condotte delle analisi time-dependent di neutrini in correlazione temporale con l'emissione variabile di raggi gamma da parte di blazars, secondo quanto misurato dallo strumento LAT presente sul satellite Fermi [15].
- *Gamma Ray Bursts:* Vari modelli prevedono l'emissione di neutrini di alta energia nei Gamma Ray Bursts. Restrungendo la ricerca dei neutrini alla sola durata dell'evento si elimina virtualmente tutto il fondo: l'osservazione di anche pochi eventi potrebbe quindi costituire già una scoperta. Una prima strada prevede di studiare il canale dei neutrini muonici, sfruttando la buona risoluzione angolare

del rivelatore per ottenere una correlazione direzionale, oltre che temporale, con il GRB [16].

- **Optical follow-up:** Per poter migliorare la sensibilità di ANTARES a sorgenti transienti come GRB, AGN, ecc. . . è stato sviluppato un nuovo metodo di rivelazione basato su osservazioni coincidenti di neutrini e segnali ottici. Un algoritmo di ricostruzione di traccia online, per la ricerca di eventi coincidenti o di alta energia, è utilizzato per lanciare un allerta ad una rete di telescopi ottici[17], che seguono poi l'evento osservato in ANTARES nel suo sviluppo temporale.
- **Ricerche di fisica "esotica":** ANTARES è anche alla ricerca di segnali di fisica oltre il Modello Standard. Un'analisi è svolta nella ricerca di neutrini prodotti da particelle di materia oscura che annichiscono nel Sole e nel Centro Galattico. Monopoli Magnetici con masse comprese tra 10^{10} e 10^{14} GeV potrebbero essere rivelati come tracce estremamente luminose nell'apparato. A tale proposito è stato ottenuto un limite sul flusso di questi monopoli per $\beta > 0.55$ e tale limite è più stringente di quanto prodotto finora da altri esperimenti nella regione di $\beta > 0.65$ [15]. Un'altra forma di materia che potrebbe essere osservata in ANTARES sono i Nucleariti, corpuscoli formati da materia "strana"; la firma per questo genere di eventi è una traccia estremamente luminosa che si muove lentamente ($\approx 10^{-3} c$) nel rivelatore [15].

Capitolo 3

Correlazione tra UHECRs da Auger e ν di ANTARES

3.1 L'Osservatorio Pierre Auger

L'osservatorio Pierre Auger (Pierre Auger Observatory) è un osservatorio internazionale di raggi cosmici, progettato per rivelare raggi cosmici di altissima energia. Il flusso dei raggi cosmici è molto basso, per questo l'osservatorio Pierre Auger ha una superficie di rivelazione di circa 3000 km^2 e si trova nell'Argentina dell'ovest. Fu proposto da Jim Cronin e Alan Watson nel 1992, ha iniziato a prendere dati stabilmente nel 2004 ed è stato completato nel 2008. L'osservatorio è costituito da due rivelatori distinti: un rivelatore di superficie (*Surface Detector, SD*) e un rivelatore di fluorescenza (*Fluorescence Detector, FD*) che operano in sinergia in modo da ridurre gli errori sistematici associati ai singoli rivelatori, riducendo le incertezze, in particolare sulla ricostruzione dell'energia.

3.1.1 Rivelatore di superficie

Il rivelatore di superficie dell'osservatorio è costituito da 1600 taniche d'acqua distribuite sulla superficie di rivelazione, ognuna delle quali contiene 12 tonnellate di acqua ultrapura, scrutata da 3 fotomoltiplicatori. Quando una particella dello sciame secondario attraversa l'acqua genera luce per effetto Cherenkov, che viene quindi rivelata dai fotomoltiplicatori. Ogni stazione è dotata di un modulo GPS per consentire di calcolare

con alta precisione il tempo di arrivo delle particelle e, confrontando il segnale e il tempo di arrivo dello sciame in ogni stazione, è possibile ricostruire la direzione di arrivo del raggio cosmico primario e la sua energia.

3.1.2 Rivelatore di fluorescenza

Il cielo sopra l'intera area coperta dall'SD è osservato da 24 telescopi, suddivisi in 4 stazioni. Questi telescopi osservano la debole luce ultravioletta che viene emessa dagli atomi dell'atmosfera che vengono eccitati dalle particelle dello sciame. Essendo l'intensità della luce proporzionale al numero di particelle nello sciame è possibile studiarne il progredire nella discesa verso il suolo (profilo longitudinale). Questa misura permette di accedere a due parametri fondamentali dello sciame: l'energia e il punto in cui viene raggiunto il massimo numero di particelle, quest'ultimo indicatore di quale tipo di particella era il raggio cosmico primario. Lo svantaggio del rivelatore di fluorescenza è il suo poter operare solo in chiare notti senza luna quindi non tutti gli eventi sono visti sia dal rivelatore di superficie sia dal rivelatore di fluorescenza.

3.2 Eventi di ANTARES e UHECRs data

Dal confronto dei dati di ANTARES, per eventi con energie dell'ordine del TeV, e degli eventi di UHECRs, con energie dell'ordine dell' EeV, ci proponiamo di esplorare la possibilità che entrambi gli eventi di neutrini cosmici rivelati siano prodotte dalla stessa sorgente astrofisica. Il modo più significativo per investigare sulla relazione tra i neutrini di ANTARES e gli UHECRs data è studiare la correlazione angolare tra i neutrini cosmici e gli UHECRs.

Per fissare la posizione di un qualsiasi oggetto astronomico su una mappa celeste è necessario definire un 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, nel nostro caso il piano equatoriale della Terra, e quindi sfruttiamo il Sistema di Coordinare Equatoriali. Questo 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: per esempio, J2000 si riferisce infatti alle coordinate basate sulla posizione dell'asse nell'anno 2000. I dati utilizzati per graficare i diversi parametri di cui abbiamo bisogno corrispondono a eventi raccolti da ANTARES tra il 2007 e il 2013, con energia dell'ordine dei TeV.

I parametri di Auger necessari per raggiungere l'obiettivo vengono estrapolati da un articolo intitolato *Searches for Anisotropies in the Arrival Directions of the Highest Energy Cosmic Rays Detected by the Pierre Auger Observatory*[18] nel quale vengono dati la direzione di arrivo e l'energia di 231 eventi con $E > 52$ EeV e $\theta < 80^\circ$ ottenuti dal 1 Gennaio 2004 al 31 Marzo 2014. Le informazioni su questi eventi sono riportati in una Tabella dell'articolo sopracitato [18], in cui sono tabulati l'anno, il giorno relativo a quell'anno, l'angolo di Zenith, l'energia, l'Ascensione Retta, la Declinazione, longitudine Galattiche e latitudine Galattica.

3.3 Risultati

I seguenti grafici sono ottenuti attraverso il programma di analisi dati ROOT applicando dei tagli ai parametri interessanti quali Λ e β che sono, rispettivamente, il parametro di qualità e la risoluzione angolare. La Figura 3.1 rappresenta la distribuzione dei dati in funzione di Λ per tracce up-going con risoluzione angolare $\beta < 1^\circ$. Il taglio di Λ è stato applicato in $\Lambda > -5.2$ per indicare quali sono gli eventi effettivamente significativi, e quindi utilizzabili. La Figura 3.2 rappresenta la distribuzione dell'angolo di Zenith per eventi provenienti dal basso. Qui sono graficate 3 distribuzioni: in nero troviamo la distribuzione di tutti gli eventi, in rosso di quelli per cui $\Lambda > -5.2$ e in verde quelli con $\Lambda > -5.2$ e $\beta < 1^\circ$. In Figura 3.3 è graficata la distribuzione degli eventi in funzione dell'energia osservata, in cui si nota un picco per energie stimate dell'ordine di 100 TeV. Tutti e tre i grafici hanno sull'asse delle y il logaritmo del numero di eventi.

I dati di Auger necessari per l'elaborazione sono disponibili nell'articolo [18]. Per poter essere in grado di graficare i risultati attraverso ROOT, per prima cosa bisogna rendere accessibile il file LaTeX dal quale sono stati presi i dati trasformandolo in un file ASCII, così da poterlo implementare in C++, creare una macro di estensione `.root` e

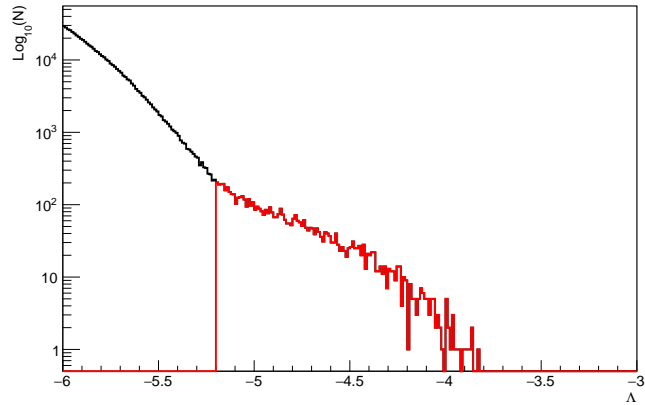


Figura 3.1: Distribuzione degli eventi in funzione del parametro di qualità Λ (asse x) per tracce up-going con risoluzione angolare $\beta < 1^\circ$. Vediamo che il taglio è stato applicato in $\Lambda > -5.2$, che rappresenta il punto di incontro tra la distribuzione dei neutrini e quella dei muoni, cioè quel valore di Λ per il quale gli eventi rivelati sono significativi e possono essere utilizzati.

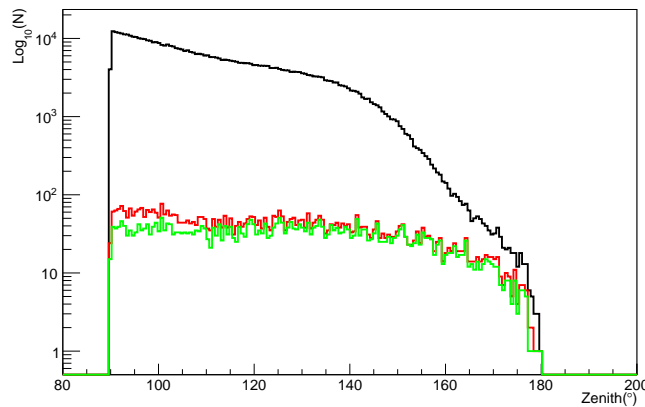


Figura 3.2: Distribuzione degli eventi provenienti dal basso in funzione dell'angolo di Zenith per tutti gli eventi (nero), per tagli in $\Lambda > -5.2$ (rosso) e per $\Lambda > -5.2$ e $\beta < 1^\circ$ (verde).

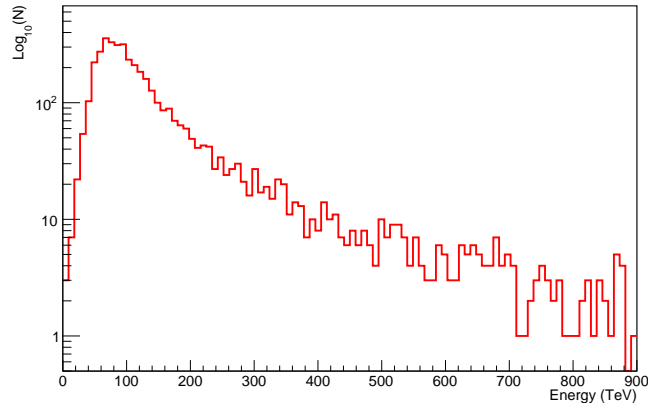


Figura 3.3: Distribuzione degli eventi in funzione dell'energia osservata (asse x). Notiamo un massimo di eventi per energie stimate dell'ordine di 100 Tev.

graficare il tutto con ROOT. Per convertire i dati si utilizzano degli stream di output perche dobbiamo includere il file di testo nel quale sono salvati i dati riportati in tabella. A questo punto si crea un ciclo che, andando a prendere dato per dato, compresa l'intestazione della tabella, distribuisce i dati all'interno di un array. Il programma svolto in C++ viene riportato nell'Appendice A, mentre quello in ROOT nell'Appendice B. Le variabili che ci interessano sono l'Ascensione Retta, l'angolo di Zenith, la distribuzione energetica, e una mappatura dell'Ascensione Retta e della Declinazione, la più importante al fine del nostro scopo.

La Figura 3.4 rappresenta la distribuzione degli eventi di Auger in funzione dell'angolo di Zenith in cui sull'asse delle x troviamo appunto lo Zenith, mentre su quello delle y il numero di eventi. La distribuzione degli eventi di Auger in funzione dell'energia la riportiamo in Figura 3.5, in cui in nero troviamo la distribuzione di tutti gli eventi, mentre in rosso solo quelli con energia osservata maggiore o uguale di 100 EeV. Sull'asse delle x troviamo l'energia, su quello delle y il numero di eventi. In Figura 3.6 troviamo la distribuzione degli eventi di Auger in cui l'asse x rappresenta l'Ascensione Retta(RA) e l'asse y l'angolo di Zenith. I quadrati vuoti identificano la distribuzione di tutti gli eventi, mentre quelli in rosso sono gli eventi con energia uguale o superiore a 100 EeV. Nella Figura 3.7 descriviamo la distribuzione degli eventi di Auger in funzione di Ascensione

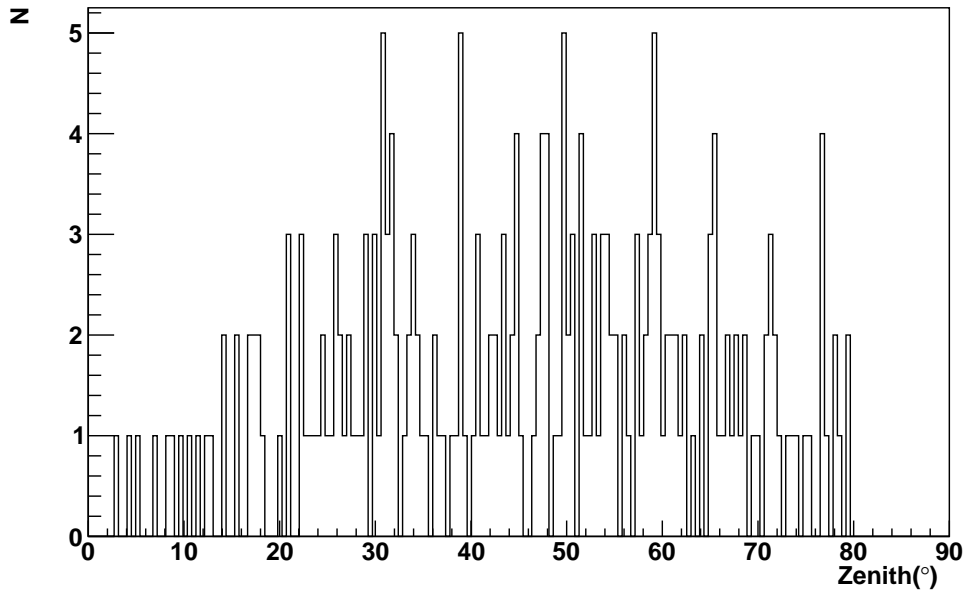


Figura 3.4: Distribuzione degli eventi di Auger in funzione dell'angolo di Zenith sull'asse delle x e il numero di eventi su quello delle y .

retta (asse x) e Declinazione (asse y). I quadrati vuoti identificano la distribuzione di tutti gli eventi, mentre quelli in rosso sono quegli eventi con energia uguale o superiore di 100 EeV. Si noti che quest'ultimi sono 6.

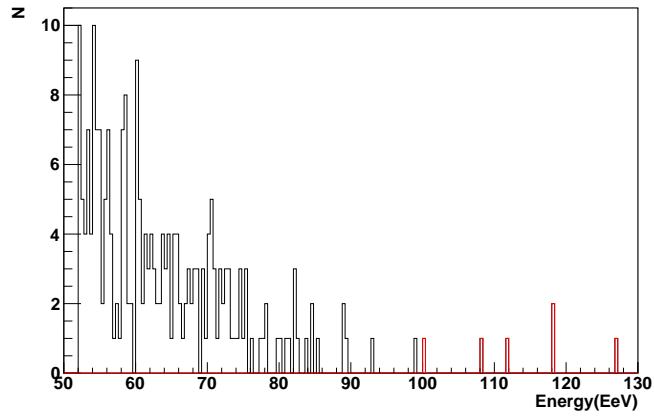


Figura 3.5: Distribuzione degli eventi di Auger in funzione dell'energia (asse x). In nero troviamo l'output di tutti gli eventi, in rosso quelli con energia osservata maggiore o uguale di 100 EeV.

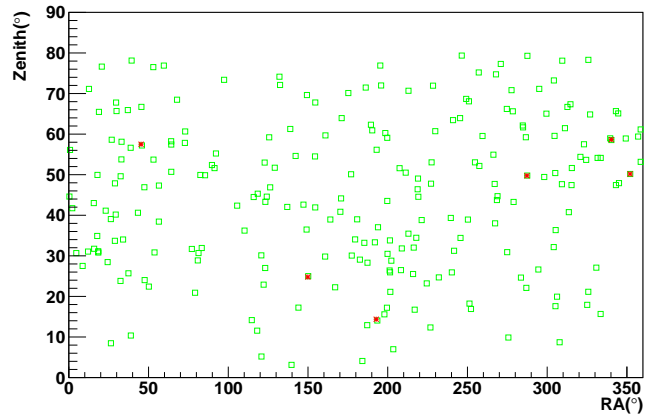


Figura 3.6: Distribuzione degli eventi di Auger in funzione dell'Ascensione Retta (RA) sull'asse x e l'angolo di Zenith sulle y . I quadrati vuoti identificano la distribuzione di tutti gli eventi, mentre quelli in rosso sono gli eventi con energia uguale o superiore a 100 EeV.

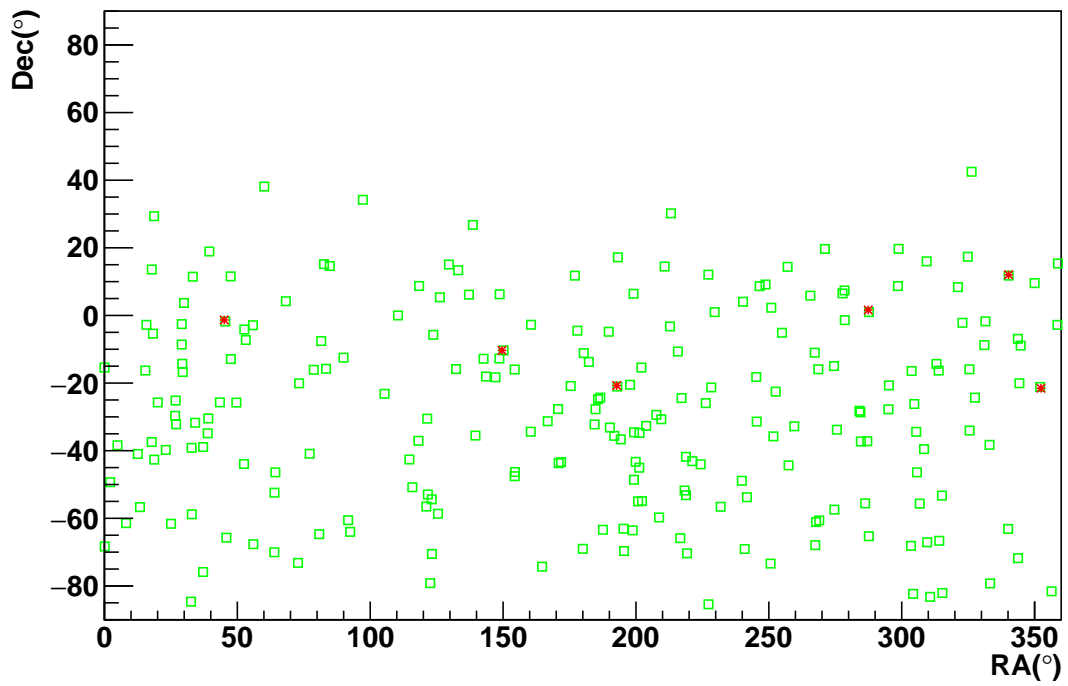


Figura 3.7: Distribuzione degli eventi di Auger in funzione di Ascensione Retta (RA) sull'asse x e Declinazione(Dec) sulle y . I quadrati vuoti identificano la distribuzione di tutti gli eventi, quelli in rosso degli eventi con energia uguale o superiore a 100 EeV, che sono 6.

Conclusioni

Questo lavoro ha come scopo l'analisi della distribuzione spaziale ed energetica di due dataset di eventi rivelati dal telescopio di neutrini ANTARES e dall'Osservatorio Pierre Auger. Viene data una descrizione dettagliata del telescopio al fine di comprendere le dinamiche della rivelazione, basate soprattutto sull'effetto Cherenkov, e capire come avviene la ricostruzione del segnale. In seguito si è analizzata la distribuzione delle direzioni di arrivo dei neutrini e quella energetica per entrambi gli esperimenti. Questi saranno i parametri principali su cui si baserà un'analisi di correlazione. Ad esempio, la Figura 3.1 mostra la distribuzione degli eventi in funzione del parametro di qualità Λ , con il taglio $\Lambda > -5.2$. Questa scelta è resa necessaria dal significato di tale parametro, onde selezionare gli eventi effettivamente significativi. Gli eventi che ci proponiamo di studiare vengono misurati con una precisione migliore del grado ($\beta < 1^\circ$), sia per gli eventi di ANTARES che per quelli di Auger. Lo sviluppo successivo di questo lavoro è lo studio di una possibile correlazione tra gli eventi di Auger e quelli di ANTARES. Da questo studio preliminare, come si può vedere dalla Figura 3.7, emerge che l'osservatorio Auger conta 44 eventi nell'emisfero boreale e 187 in quello australe, ma i candidati eventi di più alta energia sono solo 6: 2 nell'emisfero boreale e 4 in quello australe. I raggi cosmici carichi di più alta energia sono meno deflessi dai campi magnetici extragalattici e potrebbero essere correlati con gli eventi di neutrini.

Appendice A

Di seguito viene riportato il file in C++ che accede ai dati della tabella di [26], riportati in un file di testo.

```
# include<iostream>
# include<math.h>
# include<fstream>
# include<string>
# include<stdlib.h>
# include<sstream>
using namespace std;
const int n=231;
int anno[n], Giuliano[n];
double en[n], delta[n], l[n], b[n], alfa[n], teta[n], x;
void AUGER()
fstream file;
char s[256], c;
int SIZE = 256;
file.open("dati.txt",ios::in);
file.getline(s, SIZE, 'n');
file.getline(s, SIZE, 'n');
for (int i = 0; i<n; i++){
//anno
file.getline(s, SIZE, ' ');
anno[i]=atoi(s);
cout << anno[i] << ' ';
```

```

//Giuliano
file.getline(s, SIZE, ' ');
Giuliano[i]=atoi(s);
cout << Giuliano[i] << ' ';
//teta
file.getline(s, SIZE, ' ');
teta[i]=atof(s);
cout << teta[i] << ' ';
//en
file.getline(s, SIZE, ' ');
en[i]=atof(s);
cout << en[i] << ' ';
//alfa
file.getline(s, SIZE, ' ');
alfa[i]=atof(s);
cout << alfa[i] << ' ';
//delta
file.getline(s, SIZE, ' ');
delta[i]=atof(s);
cout << delta[i] << ' ';
//l
file.getline(s, SIZE, ' ');
l[i]=atof(s);
cout << l[i] << ' ';
//b
file.getline(s, SIZE, n);
b[i]=atof(s);
cout << b[i] << endl;
cout << "digitare valore en" << endl;
cin >> x;}

```

Appendice B

Di seguito riportiamo il file `.root` con il quale è stata graficata la distribuzione degli eventi in funzione dell'energia in Figura 3.7. Modificando il file con le opportune correzioni e selezionando le variabili di interesse, si ottengono le Figure 3.4, 3.5 e 3.6.

```
gROOT-> SetStyle("Plain");
TCanvas* c1=new TCanvas("c1", " ", 1000, 1000);
TH2F* h1 = new TH2F ("h1", " ", 400, 0, 360, 200, -90, 90);
h1->SetMarkerStyle(25);
h1->SetMarkerColor(kGreen);
for (int i=0; i<n; i++)
h1->Fill(alfa[i],delta[i]);
h1->GetXaxis()->SetTitle("Energy(EeV)");
h1->GetYaxis()->SetTitle("N");
TH2F* h2 = new TH2F ("h2", " ", 400, 0, 360, 200, -90, 90);
h2->SetMarkerStyle(31);
h2->SetMarkerColor(kRed);
for (int i=0; i<n; i++) {
if(en[i]>=x){
h2->Fill(alfa[i],delta[i]);}}
h2->GetXaxis()->SetTitle(" ");
h2->GetYaxis()->SetTitle(" ");
h1->Draw( );
h2->Draw("same");
```


Bibliografia

- [1] V. Hess, Physik. Zeit. XIII: 1084-1091 (1912).
- [2] C.D. Anderson, The Positive Electron, Phys. Rev. 43: 491-494 (1933).
- [3] S.H. Neddermeyer & C.D. Anderson, Note on the Nature of Cosmic Ray Particles, Phys. Rev. 51: 884-886 (1937).
- [4] C.M.G. Lattes et al., Processes involving charged mesons, Nature 159: 694-697 (1947).
- [5] T. Chiarusi & M. Spurio, High Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes, Eur. Phys. J. C65: 649-701 (2010).
- [6] K. Greisen, End to the cosmic rays spectrum, Phys. Rev. Lett. 16: 748 (1966).
- [7] E. Fermi, On the origin of cosmic rays, Phys. Rev. 75: 1169 (1949).
- [8] E. Fermi, Galactic magnetic fields and the origin of cosmic radiation, Astrophys. J. 119: 1-6 (1954).
- [9] E. Fermi, Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi β , La Ricerca Scientifica, II 12 (1933).
- [10] C.L. Cowan et al., Detection of the Free Neutrino: a Confirmation, Science 124 (3212): 103-104 (1956).
- [11] M.L. Perl et al., Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation, Phys. Rev. Lett. 35 (22): 1489 (1975).

- [12] K. Kodama et al. (DONUT Collaboration), Observation of tau neutrino interactions, Phys. Lett. B 504(3): 218 (2001).
- [13] M.A. Markov, Proceedings Int. Conf. on High Energy Physics, p.183, Univ. of Rochester (1960).
- [14] M. Ageron et al. (ANTARES Collaboration), The ANTARES Optical Beacon System, Nucl. Instrum. Methods A578: 498-509 (2007).
- [15] A. Heijboer (for the ANTARES Collaboration), Recent results from the ANTARES deep sea neutrino telescope, Proceedings of the 32nd ICRC, Beijing, China (2011).
- [16] C. Reed, M. Bouwhuis & E. Presani (for the ANTARES Collaboration), Searches for Neutrinos from GRBs Using the ANTARES Telescope, Proceedings of the 32nd ICRC, Beijing, China (2011).
- [17] M. Ageron et al. (for the ANTARES Collaboration), Search for neutrinos from transient sources with the ANTARES telescope and optical follow-up observations, Proceedings of the 32nd ICRC, Beijing, China (2011).
- [18] Searches for Anisotropies in the Arrival Directions of the Highest Energy Cosmic Rays Detected by the Pierre Auger Observatory (2014).