

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

**Caratterizzazione dei parametri ambientali
per la simulazione di eventi nel telescopio
ANTARES**

Relatore:

Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:

Francesco Filippini

Correlatore:

Dott. Federico Versari

Sessione II

Anno Accademico 2017/2018

Sommario

Oggi l'astronomia multimessaggero offre interessanti opportunità per investigare, in un modo mai fatto prima, l'universo. ANTARES è il più grande telescopio di neutrini sottomarino esistente, il cui obiettivo principale è l'osservazione di neutrini astrofisici ad alta energia. Un ostacolo è senza dubbio rappresentato dal fondo costituito da neutrini e muoni originatisi nell'atmosfera terrestre. Questa tesi dunque sviluppa un approccio "Run-by-Run", all'interno della simulazione MonteCarlo condotta dalla collaborazione, il cui intento è quello di modellizzare il flusso di muoni atmosferici ad alte energie. Si è cercato quindi di individuare e selezionare gli 8000 runs che potessero rappresentare al meglio le condizioni ambientali e di stato del rivelatore, durante tutto il suo periodo di presa dati, che va da inizio 2007 fino a inizio 2018. Da questi 8000 runs si estrarranno così le informazioni necessarie, da inserire nei programmi di simulazione, in modo da riprodurre, il più fedelmente possibile, le condizioni di acquisizione dati.

”Non potrei sopportare la mia vita se avessi solo la fisica.
Come ogni altra persona, ho bisogno di calore, amore e affetto.”

S. Hawking - Buchi neri e universi neonati e altri saggi, 1993

Indice

Introduzione	1
1 Astrofisica a neutrini	2
1.1 Neutrini	3
1.1.1 Caratteristiche fisiche	4
1.2 Raggi cosmici	6
1.2.1 Spettro energetico dei raggi cosmici	6
1.2.2 Meccanismi di accelerazione	8
1.2.3 Neutrini atmosferici	9
1.2.4 Neutrini cosmici	10
1.2.5 Siti di accelerazione	11
2 Telescopi di neutrini e ANTARES	15
2.1 Rivelazione di neutrini	15
2.1.1 Effetto Cherenkov	16
2.1.2 Telescopio	17
2.1.3 Rivelazione di muoni	19
2.2 ANTARES	20
2.2.1 Struttura	21
2.2.2 Background derivante da neutrini e muoni atmosferici	23

2.2.3	Background ottico	24
2.2.4	Cielo osservabile	25
3	Simulazione MonteCarlo e Analisi Dati	26
3.1	Struttura della simulazione MonteCarlo in ANTARES	27
3.1.1	Generatore di eventi	28
3.1.2	Emissione e propagazione di particelle e luce Cherenkov	29
3.1.3	Risposta del rivelatore tramite una strategia RUN-BY-RUN (RBR) e Trigger	29
3.2	Analisi dati	30
3.2.1	Parametri ambientali	31
3.2.2	Struttura dell'analisi e risultati rappresentativi	33
	Conclusioni	39
	Ringraziamenti	41

Introduzione

L'astronomia a neutrini è una giovane disciplina che, insieme allo studio delle onde gravitazionali e a quello dei raggi cosmici, rientra nel quadro della cosiddetta astronomia multimessaggero. Le recenti scoperte in questo ambito hanno permesso di verificare e consolidare i modelli teorici e l'efficacia della metodologia sperimentale messa in campo.

L'obbiettivo portato avanti dai grandi telescopi di neutrini come ANTARES, su cui si incentra questa tesi, IceCube e KM3NET (in fase di costruzione) è quello di individuare sorgenti astrofisiche in grado di produrre neutrini ad energie ben più elevate di quelle raggiungibili in un odierno acceleratore di particelle. Le informazioni portate da questi messaggeri forniscono uno sguardo più approfondito sui processi astrofici che li hanno generati.

Il primo capitolo di questa tesi si concentra proprio sull'introduzione e la spiegazione dei concetti chiave per l'astrofisica particellare. Particolare rilievo verrà dato ai neutrini, ai raggi cosmici, e ai siti di accelerazione dove queste particelle vengono generate. Nel secondo capitolo verranno esposti i fenomeni fisici e le tecniche di rivelazione alla base del telescopio ANTARES, posto 40 km a sud delle coste francesi e ad una profondità di 2475 m. Nel terzo capitolo verranno brevemente enunciati quelli che sono i principi e il funzionamento alla base della simulazione MonteCarlo per questo esperimento. Infine l'analisi vera e propria, condotta sui dati raccolti dal 2007 fino a inizio 2018, intende monitorare i parametri ambientali più significativi necessari per simulare il fondo dovuto ai muoni atmosferici.

Capitolo 1

Astrofisica a neutrini

L'astrofisica con neutrini ad alta energia è una giovane disciplina nata dalla necessità di interrogare l'universo in maniera diversa. Le osservazioni del cielo, condotte fin dal tempo di Babilonesi ed Egizi, sono state portate avanti da un'astronomia basata sulla rivelazione dell'emissione elettromagnetica da parte di sorgenti cosmiche. Le limitazioni dei telescopi ottici sulla Terra, dovute all'assorbimento e alla diffusione della radiazione, sono state superate mediante l'utilizzo di telescopi basati su satellite, oppure costruendoli ad alte quote. Importanti passi in avanti a inizio Novecento si sono avuti con l'introduzione dell'astronomia infrarossa o con lo studio dell'emissione radio di alcune sorgenti. Seppur questo progresso ha permesso di fare meravigliose osservazioni e scoperte, ci sono dei limiti intrinseci dovuti all'uso della radiazione elettromagnetica. In primis non è possibile osservare direttamente la composizione interna dei corpi celesti, né i nuclei delle galassie che risultano opache ai fotoni. Inoltre i raggi- γ già ad energie dell'ordine di 10 TeV interagiscono con la radiazione cosmica di fondo (CMB) causando la creazione di coppie elettrone positrone. È dalla necessità di superare questi limiti che si intraprese, negli ultimi 30-40 anni, lo studio di raggi cosmici e, nello specifico, della loro "componente neutra", ovvero i neutrini che hanno permesso di ottenere informazioni complementari rispetto a quelle portate dai fotoni, offrendo così uno sguardo più ampio sul cosmo.

1.1 Neutrini

L'ipotesi dell'esistenza di una nuova particella, priva di carica elettrica, fù fatta per la prima volta da Wolfgang Pauli nel 1930, nel tentativo di spiegare come lo spettro energetico dell'elettrone, nel decadimento β , fosse continuo, con un limite superiore corrispondente proprio al valore di energia aspettato.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.1)$$

Quattro anni più tardi, l'italiano Enrico Fermi sviluppò la teoria matematica del decadimento β nella quale incluse la particella ipotizzata da Pauli e a cui diede appunto il nome di *neutrino*. Riuscì a descrivere il processo in termini quantitativi ed ebbe l'ulteriore merito di suggerire come questi neutrini potessero interagire con la materia. Come Bethe e Becker affermarono nel 1936: *"Sembra praticamente impossibile rivelare neutrini liberi, ossia dopo che sono stati emessi dall'atomo radioattivo. Esiste una sola reazione che neutrini possono causare: il processo β inverso, cioè la cattura di un neutrino da parte di un nucleo, accompagnata con l'emissione di un positrone"* [1].

Equivale al processo:

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow e^+ + n \quad (1.2)$$

Occorrerà attendere il 1954, la nascita dei reattori nucleari e lo sviluppo delle tecniche elettroniche per poter osservare finalmente questa particella.

Nei successivi anni, con un grande sforzo sperimentale, si arrivò anche alla scoperta di altri due leptoni con i rispettivi neutrini: (μ^-, ν_μ) e (τ^-, ν_τ) che insieme all'elettrone ed al suo neutrino formano le tre famiglie (o sapori) leptoniche del modello standard. Da sottolineare l'esistenza delle rispettive antiparticelle, anch'esse organizzate in famiglie e il fatto che fino al 1998 i neutrini erano considerati avere massa nulla.

1.1.1 Caratteristiche fisiche

Le caratteristiche fisiche dei neutrini (ν_e, ν_μ, ν_τ) sono principalmente quelle di essere particelle neutre, con massa molto piccola (se non nulla), con spin semintero e che perciò interagiscono solo tramite interazione debole. Questo tipo di interazione è basata sullo scambio dei mediatori W^\pm e Z^0 , che data la loro massa, conferiscono carattere debole e a corto range. Da notare anche la diversa carica elettrica di questi mediatori che danno vita infatti a due rispettivi tipi di interazione definiti a corrente carica (CC) e a corrente neutra (NC). Approfondiremo questi processi nel secondo capitolo. Possiamo capire però come i neutrini interagiscano andando ad analizzare un processo tipico come quello mostrato in Fig.1.1, dove un neutrino muonico diffonde, con corrente carica, da un elettrone. Per energie del neutrino molto minori della massa del W (80 GeV) troviamo un'espressione per la sezione d'urto, in m^2 , pari a:

$$\sigma = 10^{-45} E_{\nu_e} \quad (1.3)$$

con energia del neutrino espressa in GeV.

Il valore estremamente piccolo di questa grandezza può essere meglio apprezzato se calcoliamo il libero cammino medio di un neutrino, con energia di 1 MeV, che si propaga nel ferro. Troviamo:

$$L \simeq 3.74 \times 10^{17} m \quad (1.4)$$

Questi numeri ci indicano: da un lato la necessità di avere rivelatori molto massivi, dall'altro offrono la possibilità di poter osservare neutrini provenienti da zone molto lontane dell'universo senza che questi interagiscano con il mezzo interstellare [3].

Altra caratteristica fisica peculiare è il fatto che ognuno di questi neutrini non ha un valore separato e preciso per la propria massa. Troviamo infatti che i neutrini hanno massa definita (i cosiddetti autostati di massa) che non coincidono con quelli che sono gli autostati di sapore. Per chi ha un pò di confidenza con la meccanica quantistica non

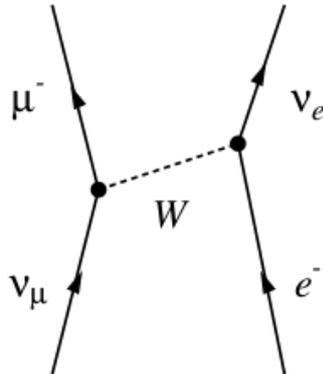


Figura 1.1: Diagramma di Feynman riguardante il fenomeno di diffusione di un neutrino muonico su elettrone [3].

trova paradossale ciò ma lo riconduce all'esistenza di osservabili incompatibili, come per esempio posizione e velocità. Gli autostati di massa vengono generalmente indicati con ν_i con $i=1,2,3$. Tra gli autostati di massa e quelli di sapore intercorre una relazione lineare, tramite una matrice unitaria detta matrice di mescolamento o matrice di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Attraverso U è possibile quindi esprimere matematicamente il fenomeno noto come oscillazione del neutrino. Negli esperimenti condotti si è anche notato come due neutrini abbiano una differenza di massa minore della differenza di massa con il terzo stato. Convenzionalmente gli autostati di massa vengono ordinati in modo che $m_1 < m_2$. Al momento non è noto se m_3 sia minore o maggiore di $m_{1,2}$. Se maggiore la gerarchia si dice normale, altrimenti invertita [4].

1.2 Raggi cosmici

Il nome "Raggi cosmici" (RC) fù assegnato, per la prima volta, nel 1925 da Robert Millikan, dopo numerosi studi ed esperimenti condotti sulla radioattività naturale e sulla ionizzazione dell'aria (doveroso menzionare V.F. Hess e i suoi palloni aerostatici).

Una delle principali questioni ancora irrisolte è quella della loro origine. Ci sono molti indizi sulla loro provenienza, sebbene non sia possibile correlare direttamente la direzioni di arrivo con la sorgente che li ha prodotti, in quanto intensi campi magnetici ne deviano la traiettoria. Quello che si è cercato, e si cerca di fare tuttora, è accumulare prove e informazioni portate da altri messaggeri originatesi dalle stesse sorgenti che hanno prodotto i RC. Infatti nei siti di accelerazione, ovvero i luoghi dove queste particelle raggiungono energie anche dell'ordine di 10^{20} eV, vengono prodotti raggi- γ dell'ordine del TeV dal decadimento del π^0 e neutrini dal decadimento di pioni carichi. Questo è quello che viene chiamato *modello adronico astrofisico* che stà alla base della produzione di neutrini e raggi- γ ad alte energie prodotti dall'interazione con i RC. Oggi sappiamo che i RC sono principalmente costituiti da protoni ad alta energia e da alcuni nuclei più pesanti che colpiscono costantemente gli strati più esterni della nostra atmosfera; questi vengono chiamati raggi cosmici *primari*. A seguito dell'interazione con l'atmosfera si originano sciami di particelle, costituiti prevalentemente da muoni, ma anche γ , elettroni, positroni e neutrini che giungono fino a noi e che prendono il nome di raggi cosmici *secondari*.

1.2.1 Spettro energetico dei raggi cosmici

Lo spettro energetico dei raggi cosmici primari, mostrato in Fig. 1.2, è stato misurato con grande precisione attraverso tecniche dirette e indirette e si può vedere come vari da energie dell'ordine di 10^9 eV fino a più di 10^{20} eV, e segue una legge esponenziale del tipo:

$$\left[\frac{dN_P}{dE} \right]_{obs} = K E^{-\alpha} \quad (1.6)$$

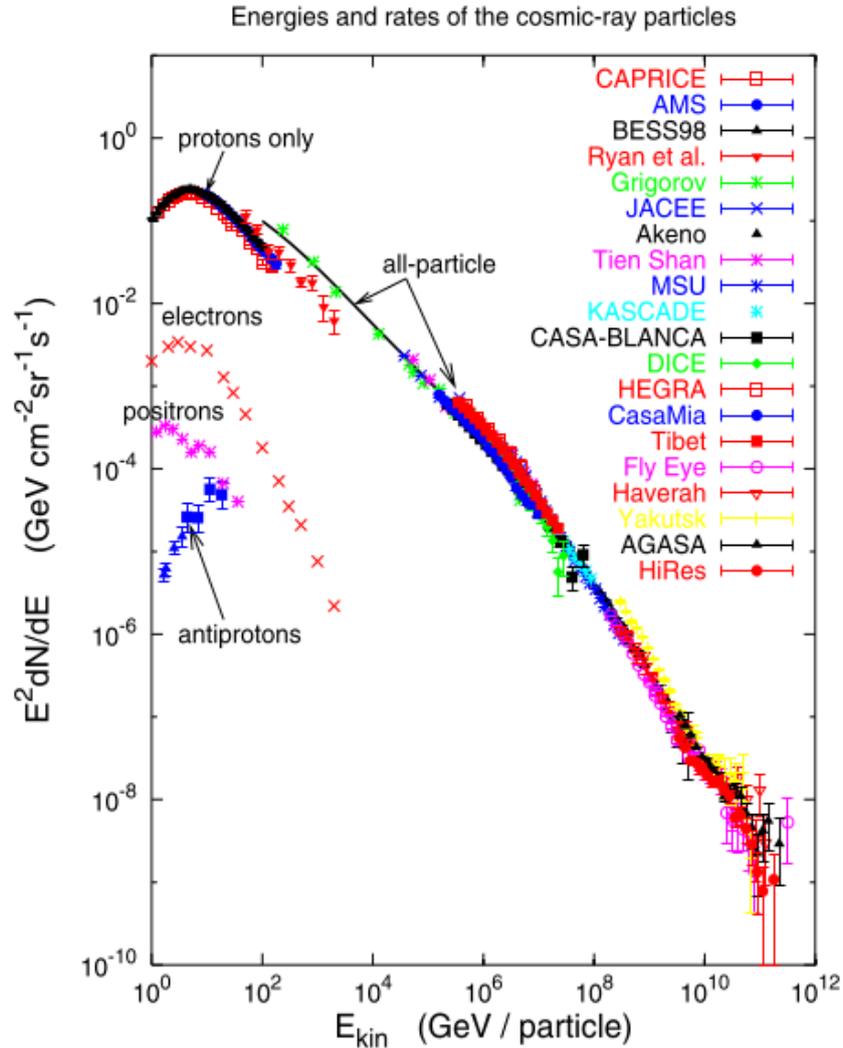


Figura 1.2: Spettro dei raggi cosmici misurato dalla Terra in un intervallo di energie compreso fra 10^9 eV e 10^{21} eV. Alle basse energie è stato riportato anche il contributo di protoni, elettroni, positroni e antiprotoni [5].

dove $\alpha=2.7$ per energie inferiori a 3×10^{15} eV. Oltre questo valore l'indice diventa $\alpha=3.1$. Questa caratteristica dello spettro è chiamata *knee*. Non si sa molto sui meccanismi di accelerazione per raggi cosmici con energie maggiori di 10^{15} eV, fino a energie dell'ordine di 10^{19} eV, dove si nota un'ulteriore flessione dello spettro, nota con il nome di

ankle. Dopo questo punto si assume che le sorgenti di RC siano di origine extragalattica. Per quanto riguarda invece energie inferiori al *knee*, lo spettro dei RC è direttamente misurabile e si è riusciti a determinarne la composizione. Le misure evidenziano come per $\sim 90\%$ siano costituiti da protoni, per $\sim 9\%$ da He e per il restante 1% da nuclei più pesanti. In questo range il meccanismo di accelerazione è il cosiddetto meccanismo di Fermi del primo ordine [5].

1.2.2 Meccanismi di accelerazione

Il meccanismo, responsabile dell'accelerazione dei RC, per energie $< 10^{16}$ eV è chiamato Meccanismo di Fermi.

Tale meccanismo avverrebbe principalmente nelle supernovae remnants, attraverso la propagazione di un fronte di shock che si allontana dal nucleo della stella a velocità relativistica. La propagazione può avvenire anche per diversi secoli ed è proprio in questa fase che protoni o nuclei possono, attraverso una serie di rimbalzi tra il fronte dello shock e il mezzo interstellare circostante, acquistare le enormi energie osservate.

Il meccanismo è molto complesso, ma può essere approssimato e spiegato qualitativamente con il modello-giocattolo dei due trenini che viaggiano in direzioni opposte, con velocità uguale in modulo.

Se una pallina viene lanciata dal treno B verso il treno A, con velocità $-w$ nel riferimento del treno B, essa avrà velocità $-(w+V)$ nel laboratorio. Nel riferimento di A questa si muoverà con una velocità pari a $-(w+2V)$. Ipotizzando che la collisione con il treno A sia frontale ed elastica, la velocità della pallina nel sistema di A sarà $(w+2V)$, mentre $(w+3V)$ nel sistema laboratorio [6].

È facile vedere come, iterando questo processo, la pallina acquisti facilmente una grande velocità. Le semplificazioni sono tante in quanto il problema dovrebbe essere tridimensionale, si dovrebbe considerare una legge di addizione della velocità relativistica e la presenza di intensi campi magnetici. Con le dovute modifiche quindi si arriva al

risultato di uno spettro energetico per i RC con un $\alpha=-2$. Le misure sperimentali, come riportato sopra, ci riconducono ad un indice $\alpha=-2.7$. La discrepanza è spiegata attraverso un modello definito *leaky box*, dove intensi campi magnetici ($\sim 3\mu\text{G}$) confinano le particelle che così hanno una bassa probabilità di scappare. Si può proprio definire una probabilità di diffusione, dipendente dall'energia, $P(E)\sim E^{\alpha_D}$ con un $\alpha_D \sim 0.6$ misurato sperimentalmente. Il flusso di RC alla sorgente può ora essere ricostruito utilizzando il flusso osservato:

$$\left[\frac{dN_P}{dE}\right]_{sorg} \propto \left[\frac{dN_P}{dE}\right]_{obs} \times P(E) \propto E^{-\alpha_{RC}} \quad (1.7)$$

con $\alpha_{RC}=\alpha-\alpha_D \sim 2$.

La spiegazione per il *knee* è ancora incerta, così come i meccanismi di accelerazione alla base di RC con energie $> 10^{16}$ eV. Infatti in questo range il meccanismo di Fermi risulterebbe inadatto. Sappiamo però che protoni con energie $> 10^{19}$ eV interagirebbero con la radiazione cosmica di fondo (CMB) secondo un effetto conosciuto come Greisen-Zapetsepkin-Kuzmin cutoff (GZK). Questo riuscirebbe a spiegare il fenomeno, osservato nello spettro energetico dei RC, che abbiamo chiamato *ankle*. Infatti il GZK cutoff impone un limite superiore all'energia di raggi cosmici provenienti da sorgenti lontane. Protoni a queste energie non potrebbero viaggiare oltre poche decine di Mpc e questo limita lo studio di sorgenti di RC ultra energetici all'interno del cluster locale della nostra galassia.

1.2.3 Neutrini atmosferici

Dall'interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei dell'atmosfera si ha la produzione di particelle a breve vita media, come nella reazione seguente:



con N nucleo generico. I pioni carichi hanno una vita media di circa 10^{-8} s e decadono:



A sua volta il muone decade in 10^{-6} s in:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.10)$$

L'interazione dei protoni con i nuclei atmosferici da vita, all'incirca con la stessa probabilità alla reazione di produzione del pione neutro:

$$p + N \rightarrow \pi^0 + \text{altro} \quad (1.11)$$

Anche il pione neutro decade in un tempo brevissimo (10^{-16} s), dando però vita alla reazione:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1.12)$$

I neutrini originati in questi sciami vengon chiamati anche *neutrini atmosferici* proprio perché originati dall'interazione dei RC con l'atmosfera. Il rate di neutrini osservati sulla Terra dovrebbe essere a questo punto di $\nu_e:\nu_\mu:\nu_\tau=1:2:0$, ma a causa del meccanismo di oscillazione del sapore (come spiegato nel paragrafo 1.1.1) si trova un rate pari a 1:1:1.

1.2.4 Neutrini cosmici

La nostra attenzione ora è rivolta a neutrini di origine cosmica, tralasciando quelli di origine solare e quelli originati dall'esplosione di supernovae ritenuti essere poco energetici.

Seguendo l'ipotesi del modello adronico astrofisico, si suppone che le principali reazioni, per la produzioni di queste particelle, siano il decadimento di pioni creati attraverso la risonanza Δ^+ . Infatti i RC interagendo con i fotoni danno vita proprio a questa particella. In formule:

$$\begin{aligned} p + \gamma &\rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 + p \\ p + \gamma &\rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n \end{aligned} \quad (1.13)$$

Come visto in (1.9) e (1.12), questi mesoni hanno vita media molto breve e decadono originando proprio neutrini e raggi- γ . Inoltre nel caso di sorgente *trasparente*, ovvero

una sorgente la cui grandezza è molto maggiore del libero cammino medio dei protoni, l'energia è ugualmente distribuita fra RC, raggi- γ e neutrini. Come abbiamo visto lo spettro energetico dei RC segue una legge di potenza del tipo $E^{-\alpha_{RC}}$ e da questo ci si aspetta che lo stesso valga per neutrini e γ ($\alpha_{RC} \sim \alpha_\nu \sim \alpha_\gamma$). Misurazioni fatte sui raggi- γ forniscono informazioni fondamentali sui raggi cosmici primari e pongono limiti sul flusso di neutrini che dovremmo aspettarci [5].

Finora però tutti gli oggetti osservati che emettono γ nella banda dei TeV sono anche sorgenti di raggi-X, presumibilmente originatesi da radiazione di sincrotrone. Dal momento che questi elettroni possono essere responsabili essi stessi di radiazione- γ attraverso il fenomeno del Compton inverso, questo modello *leptonico* rappresenta un altro importante processo di creazione di radiazione- γ dell'ordine del TeV. Solo quindi una misura coincidente di neutrini proveniente dalla stessa sorgente potrebbe fornire una prova incontrovertibile della scoperta di siti galattici di accelerazione di RC.

1.2.5 Siti di accelerazione

Oggi conosciamo numerosi siti dove, presumibilmente, avvengono questi fenomeni di accelerazione. Qui di seguito ne elencheremo alcuni:

- Supernovae Remnants (SNR): in questi siti il meccanismo principale di accelerazione è proprio quello di Fermi. Nella fase di contrazione gravitazionale di una stella si arriva al punto in cui l'unico fenomeno, in grado di bilanciare questo moto, è la pressione di degenerazione che causa il *rimbalzo* della parte più interna del nucleo della stella. Si liberano perciò forti onde d'urto che dissociano i nuclei di ferro, principale costituente appunto del nucleo stellare, generando grandi quantità di protoni. Questi, reagendo con gli elettroni del mezzo, permettono una rapida *neutronizzazione* del nucleo stellare, grazie proprio ad un processo β che libera enormi quantità di neutrini elettronici. Abbiamo ora una protostella di neutroni che è vista come una stella di raggio circa 30 km, che si contrae e si raffredda

emettendo neutrini e antineutrini. Una supernovae può essere dunque considerata come un corpo nero che si raffredda attraverso l'emissione di neutrini. Quasi tutta l'energia gravitazionale (3×10^{53} erg) viene portata via dai neutrini, emessi con spettri quasi termici, con un'energia media di 15 MeV. La supernovae 1987A fu il primo caso in cui si riuscì a correlare il segnale γ , proveniente da questa stella, con un flusso di neutrini. Kamiokande II in Giappone e IMB in Ohio rivelarono rispettivamente 11 e 8 antineutrini su un arco temporale di 10 s. L'energia misurata dei singoli neutrini corrispondeva alla temperatura iniziale attesa e la durata del segnale era in linea con i tempi caratteristici per questo processo. Il grande accordo fra osservazioni e predizioni teoriche, permise quindi di escludere il fatto che la supernovae perdesse energia attraverso l'emissione di particelle esotiche o attraverso processi sconosciuti. Importanti osservazioni sono state condotte recentemente attraverso l'esperimento FERMI-LAT e hanno riportato un'evidenza diretta della produzione di pioni neutri in interazioni di protoni accelerati all'interno di questi oggetti.

- Pulsar wind nebulae: questi corpi sono a tutti gli effetti dei remnants di supernovae, ma differiscono da quelli trattati sopra, definiti shell-type, poiché è presente al centro una pulsar che soffia venti equatoriali e jets di materiale all'interno della nebula. Le osservazioni in radio, ottico e X suggeriscono un'origine della radiazione elettromagnetica per radiazione di sincrotrone, anche se la possibilità di un'origine adronica, con conseguente emissione di neutrini, non è stata ancora scartata.
- Microquasar: sono sistemi binari che emettono *jets* relativistici osservati nella banda radio. Sono generalmente composti da un buco nero di poche masse solari e da una stella vicina che gli orbita attorno, fornendo il materiale per questi jets. Una forte somiglianza morfologica ai nuclei galattici attivi potrebbe sottendere un comune meccanismo di formazione del disco di accrescimento e dell'emissione di

getti. Questi oggetti sono stati proposti come responsabili dell'accelerazione dei RC fino ad energie di 10^{16} eV.

- Gamma ray burst (GRBs): sono brevi lampi di raggi γ , con durata che varia da qualche millisecondo a qualche decina di secondi, che portano gran parte dell'energia sotto forma di fotoni nella scala del MeV. Solitamente si originano dal collasso di una stella massiva in un buco nero. GRBs producono anche emissioni nella banda X, ottica e radio, dopo l'iniziale *burst* (queste emissioni vengono chiamate *afterglow*). Nel 1997 il satellite Beppo-Sax catturò, per la prima volta, un'immagine in X dell'afterglow del GRB970228, seguito da successive osservazioni in ottico e in radio. Questo permise di fare misure di precisione per il redshift e di identificare la galassia di origine. Tornando al meccanismo di accelerazione, alcuni modelli assumono che all'interno della *fireball*, prodotta nel collasso e che si espande con velocità ultra relativistica, i protoni accelerati perdano energia attraverso reazioni come in (1.13). I pioni carichi, prodotti da questi meccanismi, decadono producendo appunto neutrini con energie dell'ordine di 10^{14} eV. Il principale vantaggio di questo tipo di sorgenti, essendo transienti, è che sono praticamente prive di fondo dal momento che eventi, dovuti a neutrini, sono correlati sia in spazio che in tempo con i raggi- γ osservati.
- Nuclei galattici attivi (AGN): sono galassie con al centro probabilmente un buco nero supermassiccio (10^6 - 10^9 masse solari). Osservazioni e misure condotte dall'Auger observatory hanno riportato importanti evidenze della correlazione fra la direzione di provenienze di RC ultra energetici e AGN. Il buco nero supermassivo attrarrebbe a se enormi quantità di materia, rilasciando energia gravitazionale, con valori superiori a 10^{47} erg s $^{-1}$.

Un particolare tipo di AGN sono i blazars, dove i getti emessi in direzione dell'asse di rotazione del buco nero sono allineati, in maniera continua o intermittente, con

la Terra. Questi giustamente rappresentano la migliore possibilità di osservare un flusso di neutrini. Due papers pubblicati nel mese di Giugno riportano la prima evidenza diretta di questi fenomeni. Per la prima volta l'esperimento IceCube ha rivelato neutrini ultra energetici ($\sim 290\text{TeV}$) provenienti da un blazar, noto agli astronomi come TXS 0506+056. Questo evento, risalente al 22 Settembre 2017, ha fornito lo spunto per analizzare i dati raccolti dall'esperimento nei 9.5 anni precedenti. Un eccesso del flusso di neutrini ultra energetici, rispetto al naturale background, è stato trovato anche tra il Settembre 2014 e il Marzo 2015. Questo costituisce un'ulteriore prova, completamente indipendente dall'evento di *flaring* del 2017, che i blazars sono sorgenti di un flusso di neutrini ad alte energie [7].

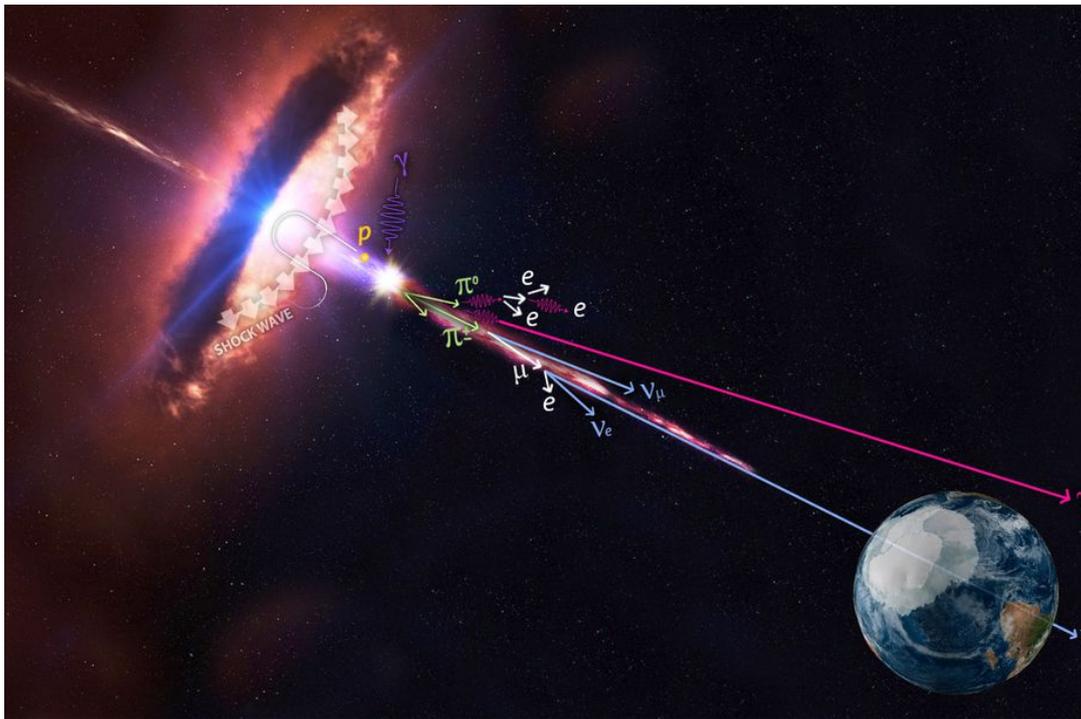


Figura 1.3: Schema delle principali reazioni che portano alla produzione di neutrini. Nello specifico viene raffigurato un blazar il cui asse, come si può notare, punta direttamente verso la Terra [8].

Capitolo 2

Telescopi di neutrini e ANTARES

L'idea di un telescopio, basato sulla rivelazione di particelle secondarie prodotte dall'interazione dei neutrini, fu formulata per la prima volta da Markov nel 1960 [9]. Come è stato anticipato nel primo capitolo, i neutrini sono particelle estremamente elusive, che richiedono rivelatori di grandi dimensioni e molto massivi; perciò per ottimizzare la probabilità di rivelarli, si sono sfruttate le grandi quantità di materiale trasparente che la natura ci mette a disposizione. Sono stati installati così grandi rivelatori in profondità nel mare o nei ghiacci dell'Antartide. L'esperimento ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) si trova a circa 40 km a largo delle coste di Tolone, in Francia, è situato a una profondità di 2475m, ed offre la possibilità di osservare direttamente al centro della nostra galassia.

2.1 Rivelazione di neutrini

Gli unici modi, menzionati nel capitolo precedente, per rivelare neutrini sono attraverso processi a corrente carica (CC):

$$\nu_l + N \rightarrow l + X \tag{2.1}$$

o attraverso processi a corrente neutra (NC):

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

Il meccanismo che si usa per rivelare questi neutrini è la luce Cherenkov, generata dai leptoni ottenuti dal processo descritto in (2.1) e dagli adroni carichi, presenti nel sistema di X , in (2.1) e (2.2). I rivelatori sono quindi costituiti, oltre che da grandi quantità di mezzo trasparente, anche da un array tridimensionale di fotomoltiplicatori in grado di misurare, con estrema precisione, il tempo di arrivo e il numero di fotoni generati.

2.1.1 Effetto Cherenkov

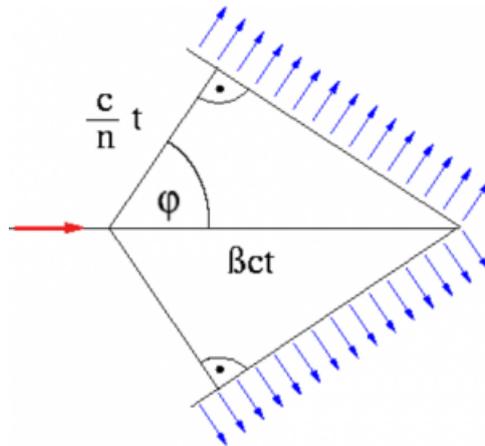


Figura 2.1: L'angolo evidenziato rappresenta il complementare di θ_c espresso dalla (2.3). In rosso è mostrato il verso di propagazione della particella. In blu è invece mostrato il fronte di propagazione della luce prodotta.

La radiazione Cherenkov è emessa da particelle cariche che attraversano un mezzo trasparente, con una velocità superiore a quella di propagazione della luce nel mezzo stesso. Le particelle cariche polarizzano le molecole lungo la loro traiettoria, e solamente

quando gli elettroni del mezzo tornano al loro stato fondamentale, emettono radiazione coerente. La radiazione viene emessa con un angolo caratteristico θ_c , vedi Fig.2.1, pari a:

$$\cos\theta_c = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (2.3)$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo e β è la velocità della particella, espressa in unità di c . Per l'acqua marina, dove $n=1.364$ e per particelle relativistiche ($\beta \sim 1$), l'angolo Cherenkov corrisponde a $\sim 43^\circ$. Si può calcolare anche il numero di fotoni emessi lungo un percorso di lunghezza dx , per una lunghezza d'onda $d\lambda$:

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \frac{\sin^2\theta_c}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

con α costante di struttura [5].

A lunghezze d'onda di 400-500 nm l'efficienza dei fotomoltiplicatori e la trasparenza dell'acqua è massima. In questo range di lunghezze d'onda per un tratto di 1 cm, 100 fotoni sono emessi. Per lunghezze d'onda minori il numero di fotoni prodotti raddoppia, ma peggiora la trasparenza dell'acqua, per un contributo totale al segnale minore del caso precedente.

2.1.2 Telescopio

Un telescopio di neutrini è un particolare tipo di rivelatore che ha la capacità di osservare metà dell'emisfero celeste con una precisione, nella ricostruzione degli eventi, inferiore al grado. Deve cioè riuscire a ricostruire la direzione di particelle con estrema precisione in modo da correlarle con possibili sorgenti. Per ottenere la migliore risoluzione angolare possibile, solo le interazioni a CC sono usate e in particolare quelle generate da ν_μ . Il motivo lo possiamo capire anche solo guardando la Fig.2.2: in un processo a CC, in cui è coinvolto un ν_μ , si origina un muone la cui traccia, nell'acqua del mare, riesce a propagarsi anche per diversi km, al contrario della cascata adronica che si arresta in

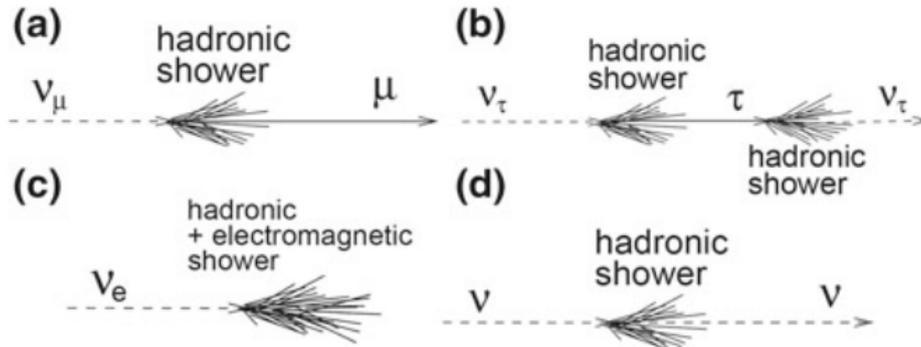


Figura 2.2: Interazioni di neutrini di diverso sapore: le prime tre riguardano processi a CC. L'ultimo mostra un tipico processo a corrente neutra (NC) [10].

qualche decina di metri. Un muone di questo tipo è dunque facilmente riconoscibile, anche se l'interazione è avvenuta qualche km fuori dal rivelatore. Proprio questa incertezza sulla posizione di interazione rende difficoltosa la stima dell'energia del muone. Queste caratteristiche sono peculiari di eventi denominati di tipo *traccia*.

Il processo che coinvolge un neutrino elettronico, invece, genera una cascata elettromagnetica, che si estende, in acqua per una decina di metri. Un processo a CC per un ν_τ può essere facilmente riconosciuto se sia il neutrino che il τ creano la cascata adronica all'interno del rivelatore. Infine un processo a NC genera anch'esso una cascata adronica. La cascata, in tutti questi casi, può essere approssimata come un ellissoide, con diametro maggiore molto più piccolo della distanza fra due sensori ottici. I segnali raccolti vengono usati per ricostruire l'energia del neutrino (proporzionale alla quantità di luce) e la sua direzione (parallela al diametro maggiore dell'ellissoide), arrivando ad ottenere un valore in energia molto migliore del caso precedente, ma una precisione di 3° - 4° . Questo tipo di eventi è denominato appunto di tipo *cascata*.

Altra caratteristica dei telescopi di neutrini, come possiamo osservare in Fig.2.3, è quella di osservare verso il basso. Cercano cioè muoni, generati da neutrini che hanno attraversato parte della Terra, e che quindi hanno interagito con la roccia alla base

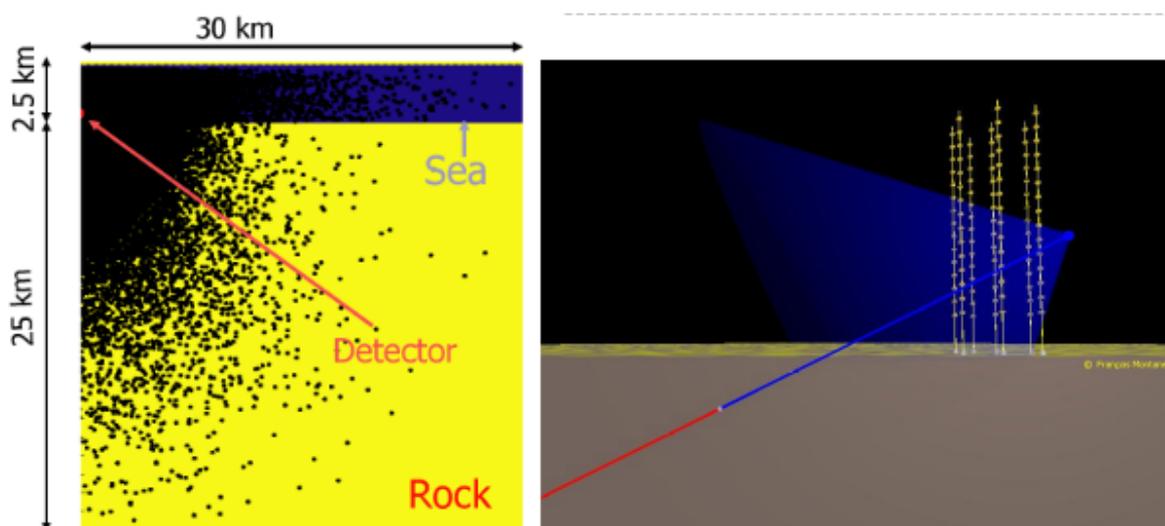


Figura 2.3: A sinistra: i punti neri mostrano il luogo di interazione dei neutrini con la roccia sottostante e con lo strato più profondo di acqua marina. A destra: meccanismo di interazione e di rivelazione. In rosso il neutrino proveniente dal basso. In blu il muone generato dall'interazione del neutrino, che si propaga all'interno del rivelatore emettendo luce Cherenkov [11].

del rivelatore o all'interno del rivelatore stesso. Da questo si capisce perché neutrini e muoni vengano classificati in *upgoing*, cioè diretti dal basso verso l'alto e in *downgoing*, dall'alto verso il basso. Queste ultime sono proprio quelle particelle generate all'interno dell'atmosfera sopra il rivelatore. Gli ampi strati di acqua marina, posta sopra al detector, servono a ridurre il flusso permettendo di arrivare, in linea di principio, ad avere un fondo costituito solo da quei pochi neutrini atmosferici che provengono anch'essi dal basso.

2.1.3 Rivelazione di muoni

Come detto nel paragrafo precedente i ν_μ (~ 1 TeV) sono di particolare interesse per questo tipo di esperimenti. L'interazione dei neutrini può avvenire fuori dal volume del

rivelatore, così da generare muoni con sufficiente energia da attraversare comunque il rivelatore stesso. L'angolo medio fra la direzione del neutrino incidente con il muone generato, può essere approssimato dalla formula:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}} \quad (2.5)$$

dove E_ν rappresenta l'energia del neutrino espressa in TeV. La perdita di energia, da parte del muone, è dovuta a diversi fenomeni (ionizzazione, bremsstrahlung, produzione di coppie) ed esiste una relazione precisa che ci fornisce l'energia persa in un tratto infinitesimo:

$$\frac{dE_\mu}{dx} = \alpha(E_\mu) + \beta(E_\mu)E_\mu \quad (2.6)$$

dove il primo termine tiene conto delle perdite di energia per ionizzazione, mentre il secondo riguarda le perdite con emissione di radiazione. Facendo un esempio: un muone con $E_i=10$ TeV iniziale viaggia per più di 4 km in acqua, alla fine dei quali ha ancora più di 1 TeV di energia. Questo evento sarebbe rivelato, anche se l'interazione del neutrino fosse avvenuta fuori dal rivelatore.

Per energie superiori ai 10 TeV la risoluzione angolare è di circa 0.3° , cioè neutrino e muone sono praticamente allineati e gli errori derivano dai meccanismi di ricostruzione della traccia.

2.2 ANTARES

ANTARES, frutto di un'ampia collaborazione di università e di istituzioni, è un rivelatore installato a largo delle coste francesi. Terminato nel 2008, esso consiste di 875 fotomoltiplicatori (PMT) raggruppati in 12 stringhe, ancorate al fondo del mare, per un'altezza attiva di ~ 0.3 km e un volume totale di ~ 0.05 km³.

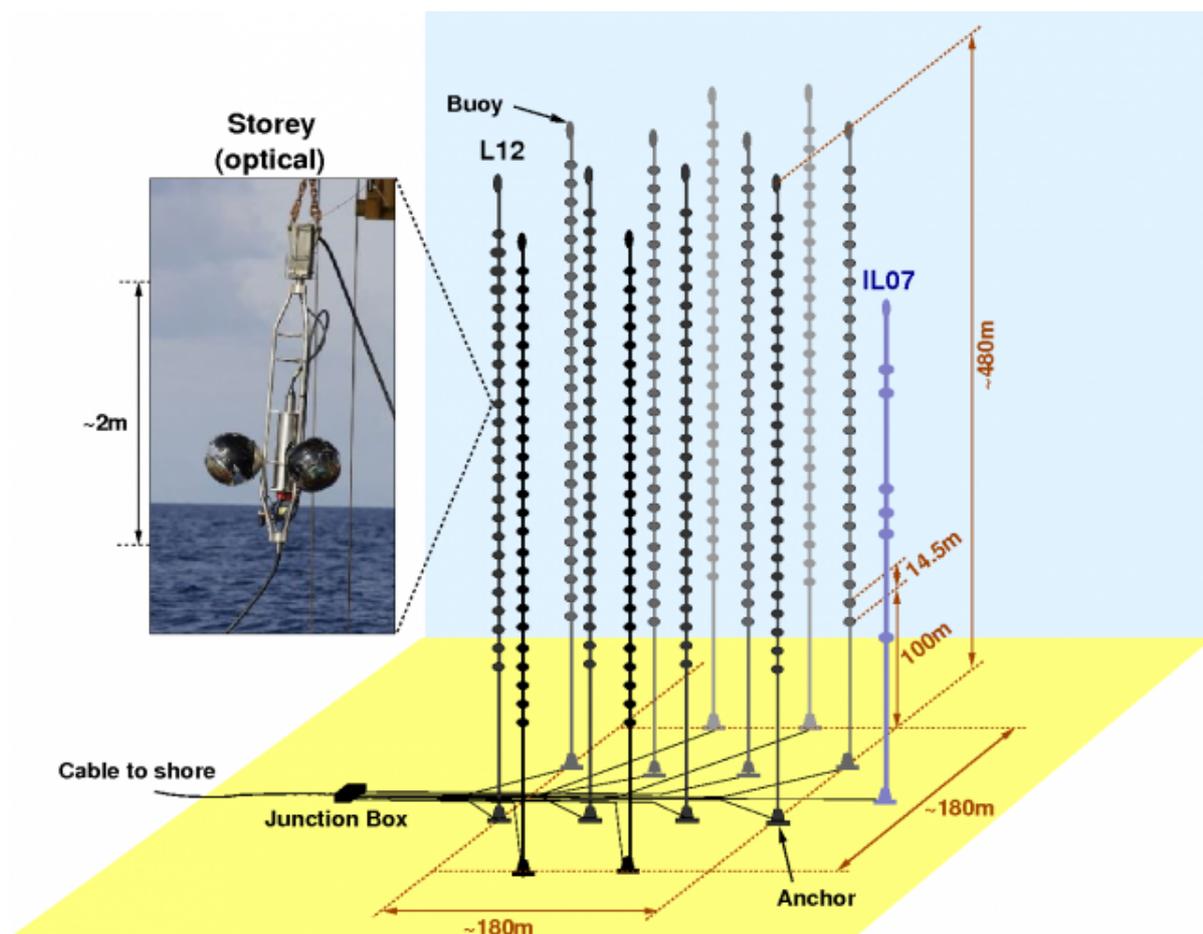


Figura 2.4: Sketch del rivelatore ANTARES. La foto nel riquadro mostra un tripletto di PMT ed il relativo contenitore per l'elettronica associata.

2.2.1 Struttura

L'unità fondamentale di questo rivelatore è il modulo ottico (OM), che comprende un tubo fotomoltiplicatore, vari sensori per la calibrazione e la sincronizzazione, e l'elettronica associata, il tutto all'interno di una sfera di vetro resistente alla pressione. Gli OM sono posizionati con un orientazione di 45° sotto l'orizzontale ed una gabbia metallica li avvolge in modo da schermarli dal campo magnetico terrestre. Questi sono poi raggruppati in tripletti e suddivisi, in modo tale da creare una matrice tridimensio-

nale. Sono infatti a loro volta posizionati su 12 stringhe diverse, ognuna delle quali è divisa in 25 piani (*storeys*), come si può vedere nel riquadro di Fig. 2.4. Ogni stringa ha una lunghezza di circa 350 m e a loro volta sono distanziate di circa 70m, mentre i piani sono distanziati fra loro di 14.5 m. Uno dei problemi intrinseci a questo tipo di esperimenti è il fatto che le stringhe del rivelatore sono esposte alle correnti marine, che possono variarne l'orientazione. Dal momento che uno dei parametri fondamentali, per ricostruire le tracce, è il tempo di arrivo dei fotoni agli OMs, diventa necessario sapere la posizione di questi, con una precisione intorno a $\sim 10\text{cm}$. Per fare ciò troviamo strumenti dedicati come idrofoni (5 per linea), che permettono di ricostruire la posizione tramite un sistema di posizionamento acustico e dei fari LED (4 per linea), che servono per la calibrazione temporale. Inoltre ad ogni *storey* è presente un modulo di controllo locale (LCM), e alla base di ogni stringa è presente uno string control module (SCM). Le varie linee sono ora collegate insieme ad un *junction box* da cui parte un ulteriore cavo per telecomunicazioni, lungo 40 km, che raggiunge la terra ferma. Qui i dati vengono filtrati, attraverso algoritmi di trigger, alla ricerca di interessanti eventi fisici e salvati. Primi meccanismi di trigger sono, in realtà, applicati all'interno del rivelatore. Questi seguono una logica il più possibile flessibile e semplice. Il primo livello richiede una coincidenza di segnale fra 2 dei 3 OMs di un singolo *storey*. Il secondo livello è basato sulla combinazione di dati filtrati dal primo livello. Ora, quello che abbiamo ottenuto, può essere inviato a terra dove un terzo livello di trigger imporrà condizioni più rigide, come una più stretta coincidenza temporale dei segnali su più OMs. Uno dei principali problemi in un sistema di acquisizione di questo tipo è la mole di dati raccolti. Infatti dato l'alto rate di background si crea un flusso di dati da 0.3 GB/s fino a 1GB/s, a seconda delle particolari condizioni del fondo e dal numero di linee attive. Molti degli eventi che hanno passato il filtro del trigger però rappresentano proprio quei neutrini atmosferici *upgoing* che vanno a costituire un fondo irriducibile.

2.2.2 Background derivante da neutrini e muoni atmosferici

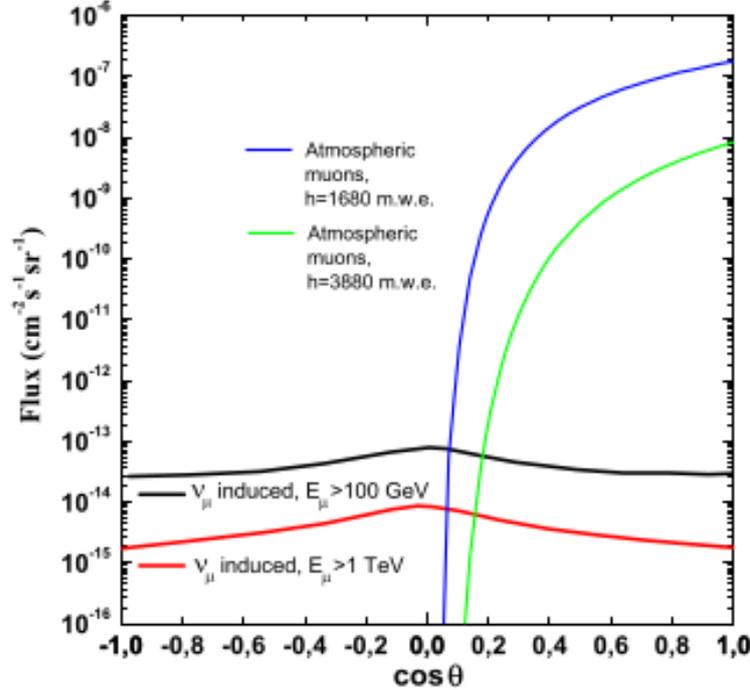


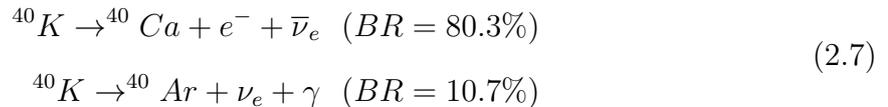
Figura 2.5: Flusso di muoni atmosferici (blu e verde) a diverse profondità e di muoni indotti da neutrini atmosferici (rosso e nero) per diverse energie in funzione del coseno dell'angolo zenitale [12].

Come abbiamo descritto nel capitolo 1, l'interazione dei RC con gli strati più esterni dell'atmosfera produce uno sciame di particelle secondarie. Tra queste abbiamo muoni e neutrini atmosferici che giungono al nostro rivelatore da due direzioni diverse: dall'alto o dal basso. I muoni *upgoing* vengono schermati dalla Terra, mentre quelli *downgoing* possono penetrare ampi strati dell'atmosfera e anche uno spessore considerevole di acqua, generando così un segnale all'interno del nostro rivelatore. Il flusso muonico diretto verso il basso è molto maggiore degli eventi indotti dai neutrini atmosferici nella stessa direzione, come si può notare anche in Fig.2.5, ma diminuisce con l'aumentare della profondità.

Questi muoni possono comunque essere utilizzati per monitorare lo stato del detector in tempo reale, la variazione di efficienza dei PMTs e possono anche fungere da calibrazione. Il grande problema che rappresentano deriva, però, dal fatto che le tracce di muoni provenienti dall'alto possano essere mal ricostruite ed interpretate come eventi provenienti dal basso, e quindi generati dall'interazione di neutrini ad alta energia che hanno attraversato la Terra. Per questo non basta solo ricostruire tracce ma serve anche applicare ulteriori tagli, applicando specifici fattori di qualità.

2.2.3 Background ottico

Un altro tipo di background presente in ANTARES è quello dovuto all'ambiente che circonda il rivelatore. Infatti nell'acqua del mare è disciolto un isotopo radioattivo, il ^{40}K che produce un segnale praticamente costante nel tempo, i cui canali di decadimento sono:



Gran parte degli elettroni prodotti nella prima reazione hanno energia sufficiente per produrre luce Cherenkov. L'energia dei γ nel secondo processo è pari a 1.46 MeV e possono, attraverso scattering Compton, portare gli elettroni a superare la soglia oltre la quale inizierebbero a produrre luce. L'intensità globale derivante dal decadimento del ^{40}K dipende dalla sua concentrazione. A questo si sovrappone un fondo dovuto alla bioluminescenza di batteri, più o meno costante e picchi (*burst*) di pochi secondi dovuti alla bioluminescenza di macro-organismi. Questi ultimi segnali, a differenza di quelli prodotti dal ^{40}K seguono variazioni stagionali o annuali. ANTARES ha scoperto che la componente costante, denominata *baseline*, considerabile come la somma del fondo derivante dal ^{40}K e da bioluminescenza di batteri non è correlata a correnti marine e neppure alla frequenza dei *burst*. Piccole variazioni della *baseline* sono state comunque misurate su periodi di tempo molto lunghi. Si osserva invece una stretta correlazione fra

bioluminescenza e velocità della corrente. Ulteriori approfondimenti verranno forniti nel capitolo successivo.

2.2.4 Cielo osservabile

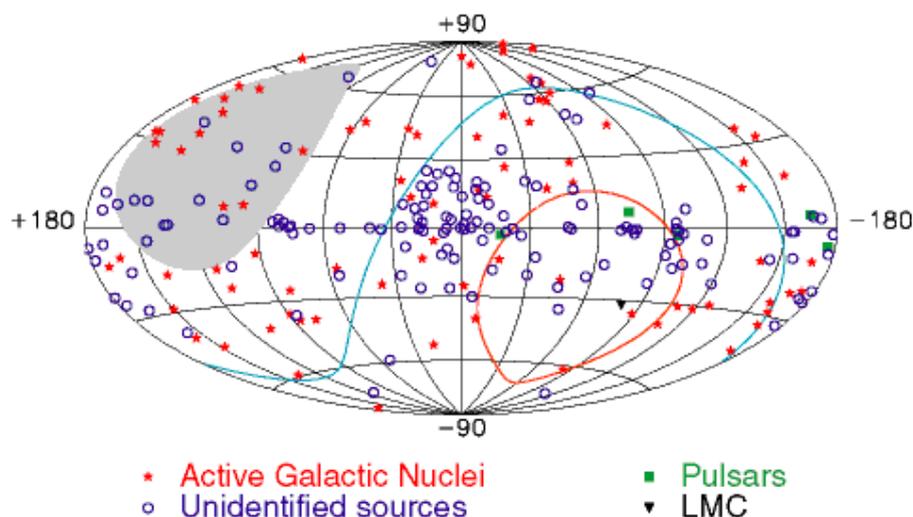


Figura 2.6: Cielo osservabile da ANTARES. In grigio abbiamo l'area che il telescopio non riesce mai a vedere. In rosso invece la porzione osservabile 24h al giorno [11].

ANTARES è posizionato nell'emisfero nord terrestre ($43^\circ N$) ed è in grado di osservare gran parte del cielo (3.5π sr). Data la sua posizione e considerando che i telescopi di questo tipo guardano "verso il basso", ANTARES riesce ad osservare gran parte del piano galattico e il centro della nostra galassia, per quasi tutta la durata del giorno siderale. Inoltre data la posizione del rivelatore IceCube, situato fra i ghiacci del polo sud, le aree visibili dei due si intersecano permettendo un confronto diretto dei dati raccolti. Come altri rivelatori underground, anche ANTARES riesce ad osservare il cielo a qualsiasi ora del giorno, indipendentemente dalla fase lunare e dal meteo.

Capitolo 3

Simulazione MonteCarlo e Analisi

Dati

Con il termine simulazioni MonteCarlo (MC) si indica, generalmente, una categoria di programmi che, attraverso l'uso di campionamento casuale, ottiene risultati numerici che riproducono, il più fedelmente possibile, determinati processi fisici.

Oggi le simulazioni MC trovano largo impiego nella fisica, e servono, principalmente, a fornire una soluzione approssimata, con la precisione voluta, a quei problemi che non hanno soluzione analitica. Spesso infatti alcuni modelli teorici vengono implementati attraverso queste simulazioni per poter poi essere confrontati con i dati sperimentali ottenuti. Nel caso di ANTARES, l'applicazione del metodo MC trova largo impiego nella simulazione di eventi di neutrini e del fondo generato dai muoni atmosferici. Lo studio dell'interazione fra questi muoni e il rivelatore, in un contesto controllato come quello di una simulazione, permette di ottenere molte informazioni e di testare il funzionamento stesso del detector.

3.1 Struttura della simulazione MonteCarlo in ANTARES

La simulazione in ANTARES si sviluppa a partire dalla generazione di una serie di eventi, indotti da neutrini o muoni, in prossimità del rivelatore. Queste particelle vengono propagate nel mezzo producendo luce Cherenkov, che viene fatta arrivare fino ai moduli ottici. Infine viene simulata la risposta del rivelatore. Tutto questo meccanismo avviene all'interno di un volume ben delimitato, chiamato *can*. Come si può vedere in Fig.3.1, questa è considerata come un cilindro più interno contenete tutti i fotomoltiplicatori, intorno al quale viene aggiunto un guscio cilindrico, di raggio circa tre volta la lunghezza di assorbimento della luce in acqua (~ 200 m). Fuori da questo volume vengono considerati solo processi di perdita di energia per le particelle propagate al suo interno.

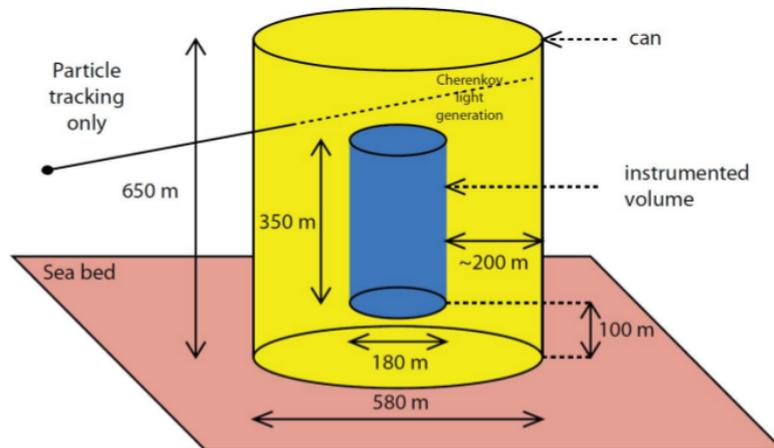


Figura 3.1: Can di ANTARES. In blu il volume contenete la strumentazione. In giallo il guscio cilindrico, delimitato in basso dal fondale marino, in cui viene generata e propagata la luce Cherenkov [13].

3.1.1 Generatore di eventi

Il programma dedicato alla generazione di neutrini, con energie comprese fra 5 GeV e 100 PeV, è il pacchetto GENHEN, basato sul software GEANT. Come abbiamo visto lo spettro energetico dei neutrini tende a seguire una legge di potenza, caratterizzata da un indice spettrale, che in questo metodo è possibile inserire come parametro iniziale. Diverso discorso deve essere fatto per la generazione di eventi indotti da muoni atmosferici. Come abbiamo già detto, intensi sciame di queste particelle, generate dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, raggiungono il nostro rivelatore, seppur posto a grande profondità.

Gli effetti di questi muoni sono studiati attraverso due differenti metodi di simulazione. La prima è una simulazione completa, che parte dallo studio della prima interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera, per proseguire con lo sviluppo di ampi sciame aerei. Questi a loro volta sono propagati in acqua fino al detector, includendo tutti i processi di perdita di energia.

Il secondo metodo si basa su formule parametriche, ottenute con una simulazione MC completa e che permette di tenere in considerazione la distribuzione energetica dello sciame, la distribuzione spaziale rispetto all'asse principale del fascio e la distribuzione in molteplicità dei muoni generati.

In ANTARES, fasci di muoni sono generati dal software MUPAGE sulla superficie della *can*. Questo è un metodo parametrico ottimizzato per riprodurre il flusso sotterraneo, lo spettro energetico e la distanza fra i muoni del fascio, misurato dall'esperimento MACRO ai laboratori del Gran Sasso.

I principali vantaggi di una simulazione completa come la prima è la possibilità di prendere in considerazione diversi modelli per il flusso atteso di RC e poter così osservare le differenze. Naturalmente tutto questo a discapito di un consumo in termini di CPU time molto alto. Al contrario la seconda permette un risparmio considerevole

di CPU ed è particolarmente adatta per la simulazione del background per eventi di neutrino.

3.1.2 Emissione e propagazione di particelle e luce Cherenkov

Il codice di simulazione usato in questa fase prende il nome di KM3, sviluppato nell'ambito di ANTARES. Il codice propaga sia le particelle, sia i fotoni generati per effetto Cherenkov al passaggio delle prime nell'acqua. In ingresso viene fornito un modello di interazione e di scattering della luce con il mezzo in cui la si vuol fare propagare. Posizione, velocità e tempo vengono salvati ogni volta che i fotoni attraversano sfere concentriche con centro nel punto di origine della traccia del muone. A questo punto i fotoni possono essere assorbiti oppure uscire dalla *can* del rivelatore. In entrambi i casi il campo di fotoni viene poi convoluto con le orientazioni possibili dei moduli ottici, e al termine di questo processo si calcolano le probabilità che un fotone emesso raggiunga i fotomoltiplicatori, in funzione della distanza e dell'angolo tra la direzione del fotone e il modulo ottico. Si individuano così i fotomoltiplicatori coinvolti nell'evento in esame e si riesce a definire tempi di arrivo e ampiezze del segnale ("hit").

3.1.3 Risposta del rivelatore tramite una strategia RUN-BY-RUN (RBR) e Trigger

La risposta del rivelatore è simulata attraverso un programma denominato *Trigger efficiency*, sviluppato nello specifico dalla collaborazione ANTARES. Questo software ha il compito di aggiungere *hits* dovute al background ottico, di simulare l'elettronica del rivelatore e di applicare i primi algoritmi di trigger. L'aggiunta del fondo può essere fatta fissando una frequenza di segnali di fondo, oppure attraverso una strategia definita "Run-By-Run". L'idea alla base è proprio quella di avere un file di simulazione MonteCarlo per ogni run acquisito. Il numero di *hits* di fondo ottico da aggiungere viene estratto

direttamente dal run con cui la simulazione dovrà poi confrontarsi. In questo modo si cerca di ricreare le condizioni ambientali e di efficienza del rivelatore che si avevano durante la presa dati di ogni specifico run. La simulazione dell'elettronica invece ha il compito di riprodurre fedelmente il sistema di acquisizione di ANTARES. A questo punto i dati simulati seguono gli stessi processi di trigger e di filtro dei dati reali.

3.2 Analisi dati

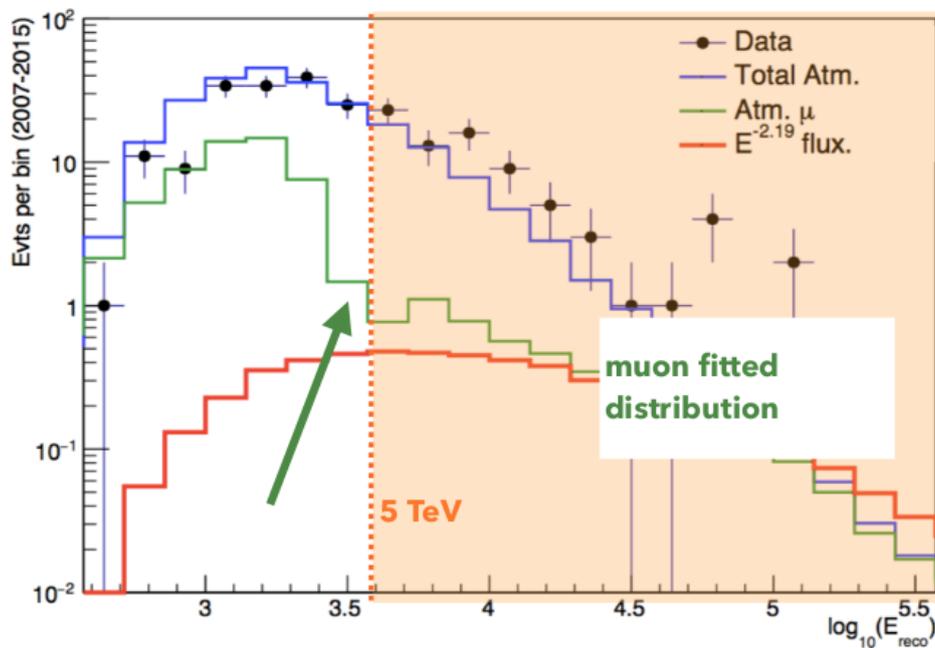


Figura 3.2: Distribuzione in energia ricostruita degli eventi rivelati. I punti in nero rappresentano i dati sperimentali raccolti, in verde il flusso di muoni atmosferici mal ricostruiti come upgoing, in blu la somma di neutrini atmosferici e muoni atmosferici. La curva rossa è invece la distribuzione attesa per un flusso di neutrini cosmici quale misurato dall'esperimento IceCube[14].

Le analisi condotte in ANTARES, per la selezione di eventi di neutrini ad alta energia, hanno evidenziato una mancanza di statistica a livello di muoni atmosferici (vedi

Fig.3.2)[14]. Come è stato anticipato nella prima parte del capitolo, questi muoni atmosferici sono generati attraverso il programma MUPAGE. L'obiettivo della simulazione, che ho contribuito a realizzare, è stato andare a studiare e tentare di modellizzare la forma dello spettro energetico per questi muoni, con attenzione particolare ad energie superiori al TeV.

Precedenti lavori della collaborazione avevano calcolato il tempo richiesto, in termini di CPU time, per la produzione e la propagazione di muoni ad alta energia tramite, rispettivamente, il metodo MUPAGE e KM3 [15]. Andando a combinare importanti fattori di soglia come l'energia e la molteplicità dello sciame di muoni atmosferici, si è visto come, il principale fattore limitante sia dovuto al metodo KM3. Per ottimizzare i tempi di generazione degli eventi, si è deciso di considerare solo quelli con energia superiore ai 5 TeV e con molteplicità ≥ 1 . Per ragioni computazionali si è deciso di dividere la simulazione in 8000 file MonteCarlo, ognuno dei quali con una durata relativa di ~ 0.46 giorni di presa dati e contenente circa 200000 eventi, in modo da riprodurre i dieci anni circa di funzionamento del rivelatore.

Il problema affrontato in questa tesi è stato quello di scegliere un campione di 8000 run dai dati reali che fosse il più rappresentativo possibile dell'insieme totale degli eventi. La frequenza di fondo presente in ciascun run campione è stata poi utilizzata per simulare il fondo in un run MC con la tecnica "Run-by-Run".

3.2.1 Parametri ambientali

I parametri presi in considerazione sono quelli che più caratterizzano il fondo ottico naturale presente nell'acqua del mare e lo stato del rivelatore. Come si può osservare in Fig.3.3 in cui è mostrato il numero di hits al secondo su un singolo fotomoltiplicatore, possiamo individuare alcuni parametri:

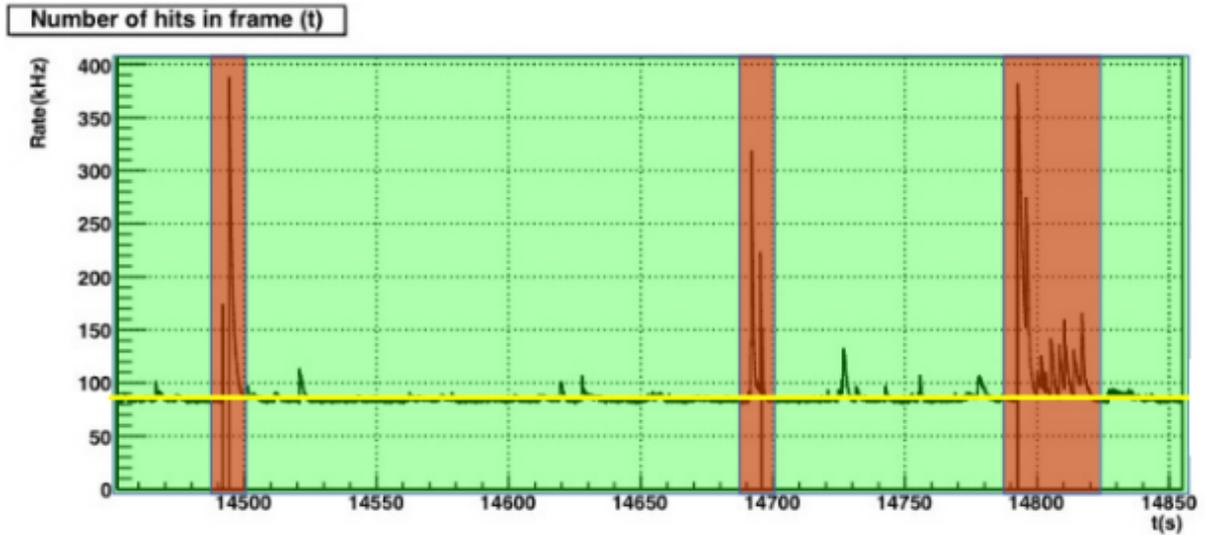


Figura 3.3: Rate medio (in kHz) di background misurato da un modulo ottico in ANTA-RES. In giallo è evidenziata la baseline. In rosso gli intervalli di tempo in cui è presente un picco di bioluminescenza, e in verde il tempo totale.

- baseline: contributo quasi costante derivante dall'isotopo radioattivo noto come K^{40} , il cui valor medio è evidenziato in figura dalla linea gialla;
- burst fraction: picchi di bioluminescenza (*burst*) molto intensi e di durata variabile, fino a qualche secondo, dovuti principalmente ad organismi macroscopici. Il parametro preso in considerazione nella nostra analisi è proprio il rapporto fra la durata dei *burst* e quella totale del run, che è quindi ottenibile come il rapporto fra l'area evidenziata di rosso e quella in verde in Fig. 3.3.

Altri parametri usati per caratterizzare la nostra analisi sono stati:

- ActiveOM: il numero di moduli ottici attivi per ogni run, poiché il loro numero poteva variare a seconda di possibili guasti o malfunzionamenti;
- RunDurationH (RDH): esprime la durata, in ore, di ogni run. Fino al 2013 questi runs avevano durata massima di qualche ora. Oggi si arriva anche a 12-13 h.

3.2.2 Struttura dell'analisi e risultati rappresentativi

L'analisi, condotta attraverso uno script bash che concatena alcuni programmi C++ e macro ROOT, è stata sistematizzata seguendo alcuni passi. Inizialmente si è diviso i runs totali in sottoperiodi, a seconda della diversa configurazione del detector. Da ogni sottoperiodo si sono estratti runs in maniera casuale, in numero pari a:

$$\#runs = \left[\frac{DurataTotPresaData(i\ sottoperiodo)}{DurataTotPresaData(campione)} \frac{DurataMediaRun(campione)}{DurataMediaRun(i\ sottoperiodo)} \right] * 8000$$

dove i indica l'iesimo sottoperiodo preso in considerazione.

A questo punto si sono confrontati gli andamenti per i quattro parametri ambientali, estratti dagli 8000 runs selezionati, rispetto all'andamento totale. Gli istogrammi, riguardanti il campione totale e il sottocampione, sono stati normalizzati rispetto al numero di runs (~ 20000 per il campione originale e ~ 8000 per il sottocampione), e sono stati sovrapposti. Per ognuno dei quattro istogrammi si è poi calcolata una variabile χ , definita come:

$$\chi = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - m_i)^2}{(N + M) * (\#bins)} \quad (3.1)$$

dove n_i rappresenta le occorrenze dell'iesimo bin per il campione originale e m_i quelle per il sottocampione estratto. Avendo precedentemente normalizzato gli istogrammi, N e M in questo caso valgono proprio 1. Il numero di bin utilizzato negli istogrammi varia per ognuno dei quattro parametri ed è riassunto in Tabella 3.1.

Per ottenere un unico parametro che esprimesse l'accordo fra il sottocampione e quello totale, è stato scelto di calcolare la media fra i quattro parametri χ ottenuti.

Sono stati fatti a questo punto 10000 campionamenti diversi, potendo andare così a rappresentare le distribuzioni della variabile χ per ognuno dei quattro parametri ambientali considerati (vedi Fig.3.4) e la distribuzione della loro media, come si può osservare in Fig.3.5. Infine il run selezionato, da applicare ai file MC, è stato quello con il valor

medio di χ minore, i cui valori sono mostrati in Tabella 3.1 e in Fig3.6 sono mostrati proprio gli istogrammi normalizzati relativi a questo sottocampione .

	$\tilde{\chi}^2$	# bins
RundurationH	0.254	13
Baseline	0.218	30
Burst fraction	0.153	18
Active OMs	0.149	16

Tabella 3.1: Sono mostrati i valori di χ e il numero di bin relativi al sottocampione che meglio approssima il campione originale.

Inoltre una verifica del lavoro svolto sopra è stata fatta estraendo gli 8000 runs, non in maniera proporzionale da ogni sottoperiodo , ma estraendoli casualmente dal totale dei runs disponibili. Il risultato ottenuto, come si può osservare in Fig.3.7, mostra come l'andamento della media di χ , ottenuto con questo procedimento, sia lievemente spostato verso valori più elevati, a evidenza quindi di una maggiore discrepanza, in media, fra il campione e i sottocampioni estratti.

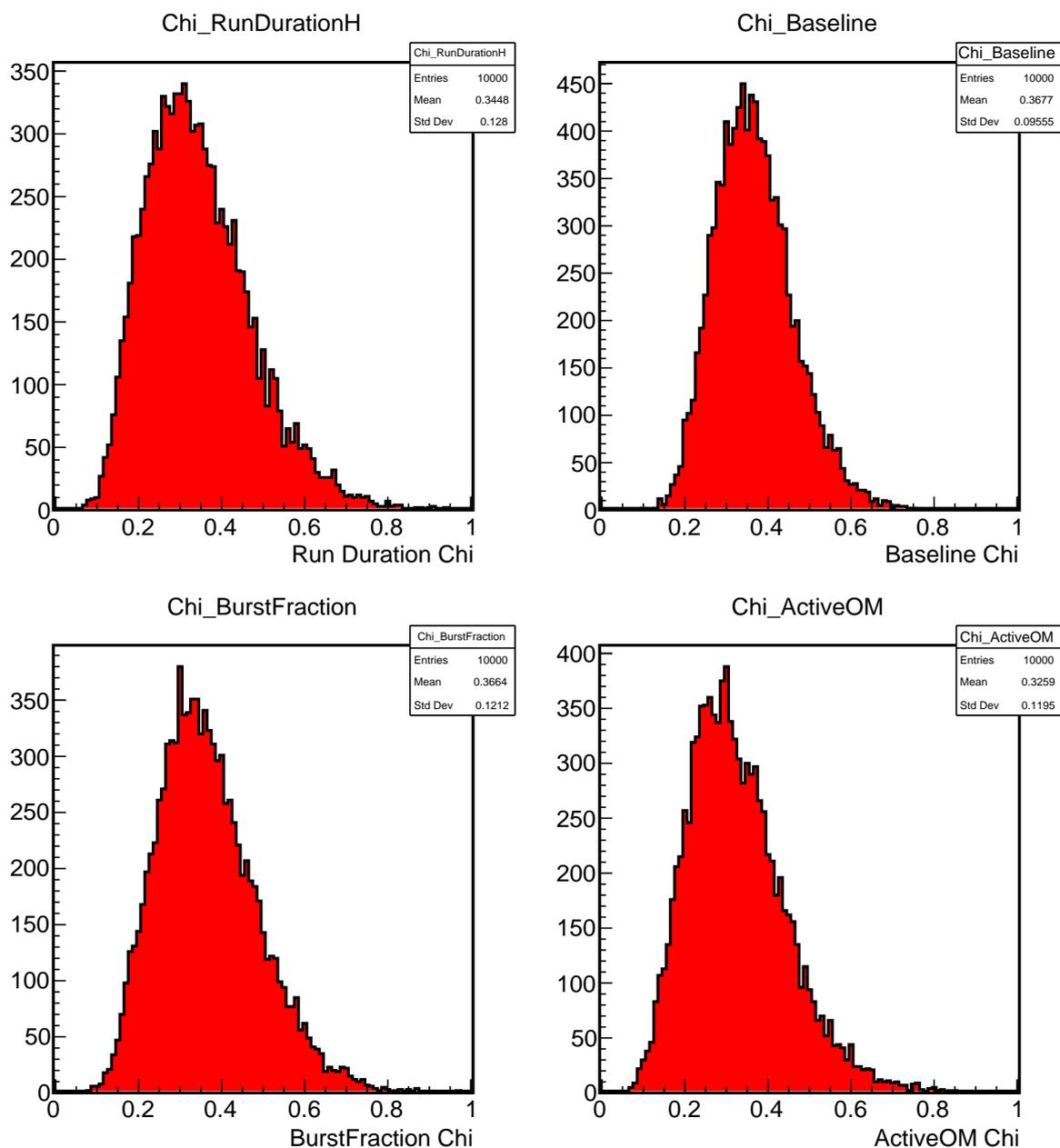


Figura 3.4: In alto a sinistra osserviamo la distribuzione della variabile χ ottenuta per il parametro *RunDurationH*. In alto a destra osserviamo la stessa distribuzione per il parametro *baseline*. In basso a sinistra ancora la distribuzione del parametro χ per la *burst fraction*, ed infine in basso a destra troviamo la stessa distribuzione per il numero di *OMs attivi*.

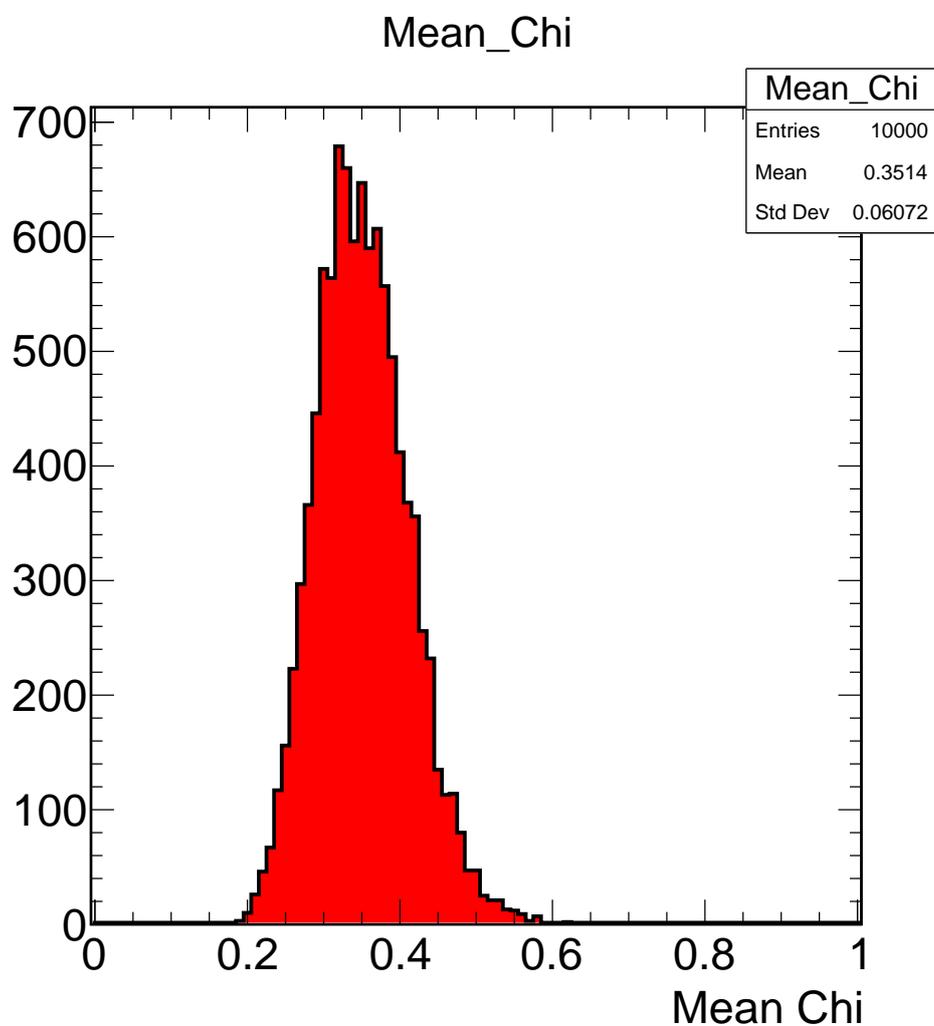


Figura 3.5: Distribuzione della media dei χ calcolata per ogni sottocampione estratto. Questo parametro è stato scelto come criterio di selezione per il sottocampione più rappresentativo.

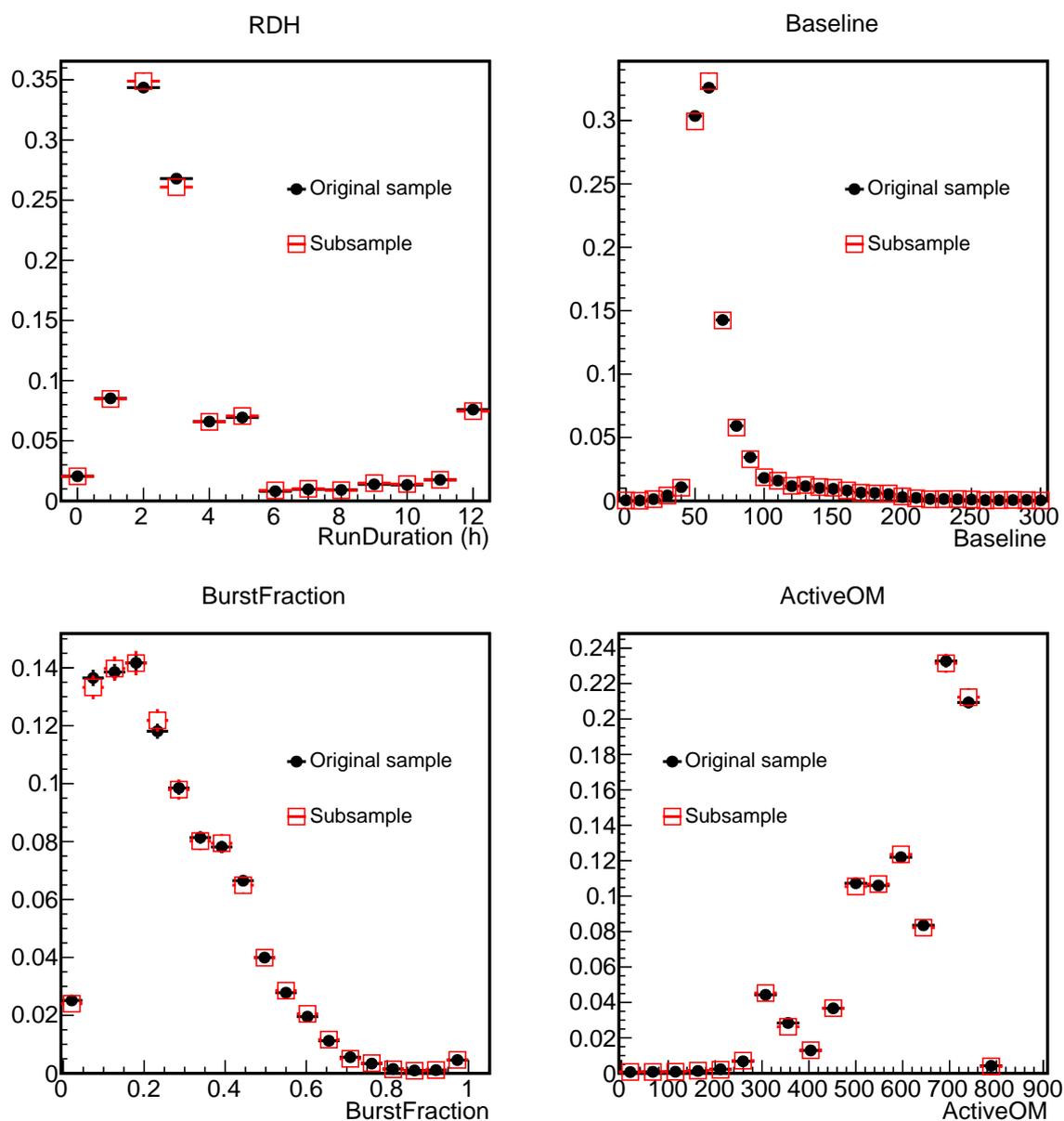


Figura 3.6: Sovrapposizione di istogrammi normalizzati al numero di runs. In nero i punti relativi al campione originale e in rosso quelli relativi al sottocampione. Nello specifico sono mostrati gli istogrammi relativi al sottocampione selezionato.

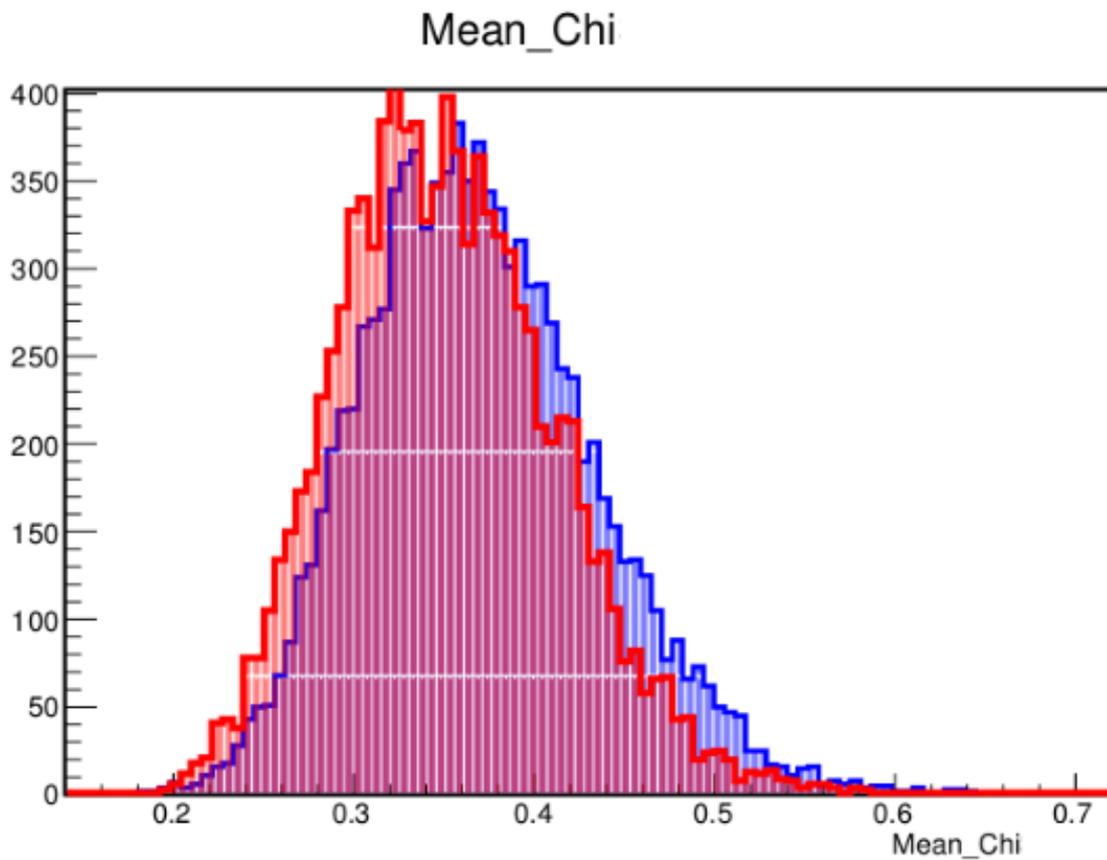


Figura 3.7: Confronto fra l'andamento mostrato in Fig.3.5 (in rosso) e l'andamento della media dei χ ottenuta estraendo i runs in maniera casuale dal totale (in blu). Lo spostamento evidente della curva in blu denota, in maniera indiretta, l'efficacia del nostro metodo di estrazione.

Conclusioni

Questa tesi aveva il principale obiettivo di sviluppare una strategia "Run-by-Run", da applicare alle simulazioni dell'esperimento ANTARES, condotte per colmare la mancanza di statistica, riscontrata a livello di muoni atmosferici ad alta energia. Per ragioni di ottimizzazione, si è dovuto selezionare gli 8000 runs che meglio rappresentassero il totale degli eventi analizzati. Le analisi condotte hanno tenuto in considerazione i quattro parametri, ambientali e di configurazione del detector, che meglio sintetizzano le condizioni esistenti nel momento della presa dati.

La procedura di selezione sviluppata, ha permesso così di estrarre gli 8000 runs richiesti e attraverso il parametro definito (χ), abbiamo potuto stimare l'accordo fra il campione estratto e il totale analizzato. Ripetendo il processo di campionamento 10000 volte, abbiamo infine ottenuto il campione che meglio approssima l'andamento totale, ottenendo per questi un χ medio pari a 0.194. Ulteriori verifiche, condotte sui dati, hanno convalidato il processo di selezione adottato e i risultati ottenuti.

Bibliografia

- [1] M. Spurio - Neutrini in profondità: Vita, morte e miracoli dei neutrini rivelati sotto terra, sotto i ghiacci o in fondo al mare, *Giornale di fisica* VOL LVII, N.3 (2016);
- [2] S. Braibant, M. Spurio, G. Giacomelli, - *Particelle ed interazioni fondamentali*, 2 a edizione, Springer (2012);
- [3] G. Cò, - *Neutrini ed interazione debole*, Ithaca N.VI (2015);
- [4] D. Montanino, - *Le oscillazioni di neutrino*, Ithaca N.VI (2015);
- [5] T. Chiarusi, M. Spurio, - *High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes*, *The European Physical Journal* 65:649-701 (2010);
- [6] V. Flaminio, - *I neutrini in astrofisica*, Ithaca N.VI (2015);
- [7] <https://icecube.wisc.edu/news/view/586>;
- [8] <https://www.vox.com/science-and-health/2018/7/12/17552586/neutrino-cosmic-ray-ice-cube-multimessenger-astronomy-astrophysics-nsf>;
- [9] M.A. Markov, *Proceedings Int. Conf. on High Energy Physics*, p. 183, Univ. of Rochester, 1960;

-
- [10] B. Hartmann. Reconstruction of neutrino-induced hadronic and electromagnetic showers with the ANTARES experiment, PhD thesis, University of Erlangen-Nurnberg, 2006;
- [11] <http://antares.in2p3.fr/>
- [12] Y. Becherini et al, *Astrop. Phys.* 25: 1-13, 2006
- [13] F. Versari, - Search for a diffuse flux of cosmic neutrinos in the shower channel with the ANTARES telescope, LM tesi, Università di Bologna, 2015;
- [14] J. Aublin, A. Coleiro, L.A. Fusco, A. Kouchner, - Selection of ANTARES high energy neutrino candidates, ANTARES Internal Note;
- [15] F. Versari, - High energy MUPAGE production, ANTARES Internal Note.

Ringraziamenti

Al prof Maurizio Spurio e al Dott.Federico Versari per la pazienza e la disponibilità sempre dimostratami. A loro va tutta la mia gratitudine soprattutto per la passione che li anima e che sono riusciti a trasmettermi.

Alla mia famiglia rivolgo un ringraziamento speciale per avermi sempre sostenuto in ogni scelta e nutrito la mia curiosità.

A Giorgia, per la fiducia e l'amore che mi ha sempre dato.

A tutti gli amici, che da sempre mi sopportano e con cui ho condiviso momenti belli della mia vita.

A tutte le persone che mi sono più vicine.