



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Rivelazione di neutrini astrofisici di alta energia con apparecchi Cherenkov sottomarini o al Polo Sud

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in Fisica e Astrofisica

Candidato

Giovanni Renzi
Matricola 1462349

Relatore

Chiar.mo Prof. Antonio Capone

Anno Accademico 2013/2014

Tesi non ancora discussa

Rivelazione di neutrini astrofisici di alta energia con apparati Cherenkov sottomarini o al Polo Sud

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2014 Giovanni Renzi. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con L^AT_EX e la classe Sapthesis.

Versione: 3 Novembre 2014

Email dell'autore: gionzi@hotmail.it

Indice

Introduzione	vii
1 Osservazione di Raggi Cosmici di alta energia	1
2 Sorgenti astrofisiche di neutrini	5
2.1 Sorgenti galattiche	5
2.2 Sorgenti extragalattiche	6
3 Rivelare neutrini	7
3.1 Interazioni dei neutrini con la materia	7
3.2 L'effetto Cherenkov	9
3.3 Dimensioni necessarie per un rivelatore	9
3.4 Caratteristiche ottimali di un rivelatore	10
3.5 Alcuni esempi di rivelatori	10
4 I risultati di IceCube	13
4.1 Il progetto IceCube e le sue caratteristiche	13
4.2 Risultati raggiunti	14
Conclusioni	19
Riferimenti bibliografici	21

Elenco delle figure

1.1	Spettro dei Raggi Cosmici da $10^9 eV$ a $10^{21} eV$ da [2]	2
1.2	Dettaglio del grafico precedente tra $10^{17} eV$ e $10^{21} eV$	2
3.1	Illustrazione dei vari tipi di reazioni in acqua: a. interazione a “Corrente Neutra”, b. interazione “CC” di un neutrino elettronico con conseguenti sciami adronici e elettromagnetici, c. reazione “CC” di un neutrino muonico con produzione di un muone con la sua caratteristica traccia, d. produzione di tau con decadimento dopo un breve percorso; immagine da [4]	8
3.2	Illustrazione di ANTARES di F.Montanet da [6]	12
3.3	Illustrazione della “torre” di NEMO con alcuni strumenti da [1]	12
4.1	Illustrazione della struttura di IceCube da [8]	13
4.2	Mappa del cielo con in viola la probabilità di presenza di sorgenti puntiformi. L è la probabilità dove L_0 corrisponde a probabilità nulla	16
4.3	Mappa delle fluttuazioni negli eventi osservati tra il 2008 e il 2012 da IceCube in coordinate equatoriali. La linea nera indica il Piano Galattico e il centro della Galassia è segnato da una croce, da [9]	16
4.4	Grafici della distribuzione degli eventi per energia e per declinazione. I dati sono segnati da punti neri con le barre delle incertezze, in rosso il flusso atteso per muoni atmosferici e in blu il flusso atteso per neutrini atmosferici	17

Introduzione

Negli ultimi anni si sta sviluppando una nuova astrofisica che mira a studiare le sorgenti più lontane, ricercando quindi particelle in grado di attraversare un grande spazio fino ad arrivare ai nostri rivelatori, cioè particelle di altissima energia in grado di sopravvivere alle interazioni a cui sono soggette durante il percorso. L'astrofisica di neutrini [1] si pone come valida alternativa all'astrofisica di fotoni e particelle comunque influenzabili elettro-magneticamente e ci offre così un nuovo punto di vista da cui osservare i fenomeni astrofisici.

Cominceremo perciò introducendo i Raggi Cosmici, particelle di alta energia che bombardano continuamente l'atmosfera, analizzandone il flusso e notando l'esistenza di particelle con energia maggiore di quella a cui potrebbero essere accelerate in ambito galattico. Ci soffermeremo quindi in particolare sul flusso delle particelle di più alta energia che, secondo i modelli attualmente accettati, sono accelerate in sorgenti extragalattiche e vedremo che le uniche particelle che possono arrivare a noi da tali sorgenti senza interagire sono i neutrini grazie alla loro piccola sezione d'urto. Elencheremo poi le varie possibili fonti di neutrini nell'universo, da quelle galattiche a quelle extragalattiche, per cercare di prevedere quali possano essere i flussi di neutrini verso la Terra. Ci concentreremo poi sul funzionamento degli apparati Cherenkov cercando di analizzare le dimensioni e le caratteristiche ottimali per il nostro scopo, mettendo in evidenza la necessità di apparati di grandi dimensioni, che porta a scegliere per convenienza siti naturali come basi per gli esperimenti. Citeremo alcuni esempi di esperimenti già portati a termine e di altri ancora in funzione per presentare infine il progetto IceCube situato in Antartide, illustrandone i risultati.

Capitolo 1

Osservazione di Raggi Cosmici di alta energia

I Raggi Cosmici (R.C.) sono particelle che colpiscono la superficie dell'atmosfera in modo continuo e sono costituiti per la maggior parte da protoni di alta energia con una componente di nuclei più pesanti, fotoni ed elettroni (raggi cosmici primari). Essi interagiscono con l'atmosfera provocando sciami adronici e elettromagnetici con prodotti (detti raggi cosmici secondari) misurabili anche a terra. Lo spettro dei Raggi Cosmici presenta un andamento piuttosto regolare ed è divisibile in tre sezioni caratterizzate da cambiamenti della pendenza del grafico (come si vede dalle Figure 1.1 e 1.2). Il primo di quest'ultimi si trova a circa $3 \cdot 10^{15} eV$ ed è caratterizzato da un aumento della pendenza; questo punto è denominato *knee* ("ginocchio"). Il secondo cambio consiste in un "appiattimento" del grafico intorno a $10^{19} eV$ ed è detto *ankle* ("caviglia").

Fino a energie dell'ordine di $10^{14} eV$ i Raggi Cosmici sono misurabili direttamente con apparati posti in palloni aerostatici nella stratosfera o su satelliti e sono proprio queste misure che hanno permesso di catalogarne le particelle costituenti. L'accelerazione di particelle in questo tratto è principalmente dovuta ai Supernovae Remnants che rimangono le principali sorgenti di Raggi Cosmici fino al *knee*.

Oltre $10^{14} eV$ le misure devono essere fatte a terra tramite i raggi cosmici secondari, la cui dispersione su una grande area permette di rivellarli tramite arrays di detectors. Gli esperimenti mostrano un aumento del numero di massa dei R.C. primari oltre il *knee*.

I Supernovae Remnants non possono spiegare il flusso di particelle oltre $\sim 10^{16} eV$ e non è ben chiaro come possano essere raggiunte energie fino a $\sim 10^{19} eV$.

Indicazioni che lasciano credere che R.C. oltre $\sim 10^{19} eV$ siano di origine extragalattica vengono soprattutto dall'osservazione che a quelle energie il giroradio di un protone in campi magnetici dell'ordine di quello galattico supera il raggio stesso della galassia, che quindi non è in grado di accelerarlo. Il flusso di R.C. primari in questo intervallo di energia è talmente piccolo che per misurare un campione di eventi statisticamente valido c'è bisogno di enormi apparati di rivelazione a terra.

Un importante limite teorico viene dato dal cosiddetto effetto di "Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff" che afferma che oltre una soglia di qualche $10^{19} eV$ i protoni interagiscono con il fondo cosmico di microonde producendo, in condizioni di riso-

nanza, e quindi con grande probabilità, dei pioni nello stato finale. Per via di questa interazione perdono energia, e perciò sono in grado di percorrere solo poche decine di Mpc. Alcuni esperimenti hanno confermato questa teoria che limita l'esistenza di sorgenti di Raggi Cosmici di alta energia all'interno del super-ammasso di galassie locale.

Figura 1.1. Spettro dei Raggi Cosmici da $10^9 eV$ a $10^{21} eV$ da [2]

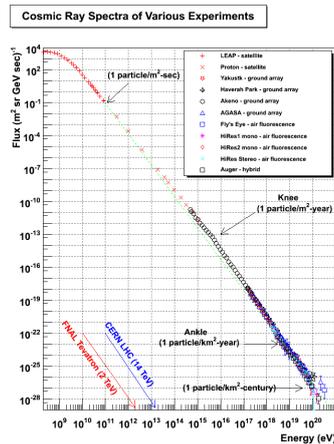
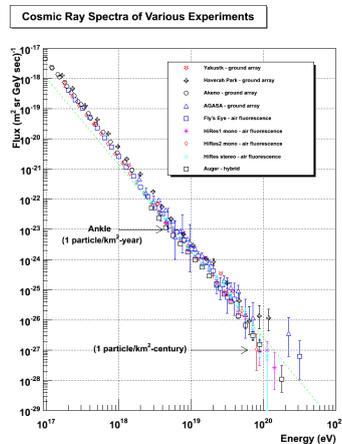


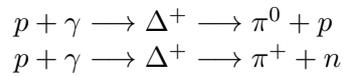
Figura 1.2. Dettaglio del grafico precedente tra $10^{17} eV$ e $10^{21} eV$



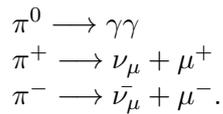
Come si può notare anche dalle immagini il flusso dei raggi cosmici primari diminuisce molto all'aumentare dell'energia e assume il valore di $1 \text{ part}/\text{km}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{yr}$ intorno all'*ankle*.

Volendo risalire all'origine dei Raggi Cosmici, cioè alle sorgenti galattiche o extragalattiche che li accelerano, si incontra una seria difficoltà in quanto i protoni, che ne costituiscono la maggior parte, sono particelle cariche e quindi deviate da parte di campi elettromagnetici che ne possono modificare la traiettoria facendo rivelare agli strumenti una direzione che non indica più la posizione della sorgente. Si può quindi pensare di "fare astronomia" utilizzando particelle neutre di alta energia [3], il che ci porta a considerare i fotoni (raggi gamma nel caso considerato) e i neutrini. Essi

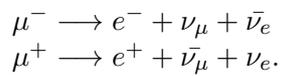
possono essere prodotti già nello stesso ambiente dove vengono accelerati i protoni. Questi ultimi infatti possono partecipare a reazioni del tipo:



dalle quali sono prodotti i pioni che possono decadere in fotoni (π neutri) e neutrini (π carichi) secondo i decadimenti:



Altri neutrini sono prodotti nei decadimenti μ :



Come si è appena visto, le sorgenti di Raggi Cosmici producono anche fotoni e neutrini di alta energia e l'energia totale si ripartisce tra questi tre tipi di particelle. Avendo i meccanismi presentati di produzione di fotoni e neutrini probabilità simili si può supporre che le sorgenti in cui la produzione di fotoni è dovuta al decadimento di pioni neutri originati nelle interazioni appena descritte siano anche sorgenti di neutrini.

Capitolo 2

Sorgenti astrofisiche di neutrini

Gli oggetti astrofisici più accreditati per essere sorgenti di neutrini di alta energia sono sia galattici che extra-galattici. Come già accennato in precedenza si ipotizza che in tali sorgenti siano accelerati dei protoni dalla cui interazione con la radiazione e/o con la materia presente vengono originati dei pioni neutri e carichi. Tali sorgenti, che vengono pertanto definite “sorgenti adroniche” di fotoni, sono quindi anche sorgenti di neutrini.

2.1 Sorgenti galattiche

Le più accreditate sorgenti di neutrini nella Galassia sono le stesse responsabili dell’accelerazione dei raggi cosmici fino all’*ankle*.

Dopo l’esplosione di una Supernova le particelle possono essere accelerate nei già citati Supernovae remnants e se è presente all’interno una stella di neutroni questa può ulteriormente accelerare le particelle grazie al suo campo magnetico. Tra questi resti sono considerati i migliori acceleratori quelli cosiddetti “a guscio” (“shell-type”). Queste sorgenti presentano un forte flusso di fotoni γ con energie quindi dell’ordine del TeV , così si ipotizza un flusso di neutrini di altrettanta energia. Un esempio di sorgente di questo tipo è il supernova remnant nella Vela Jr.

Un altro tipo di resto di Supernova è rappresentato dalle cosiddette Pulsar Wind Nebulae le quali sono caratterizzate da una stella di neutroni nel centro che emette getti di materiale a velocità molto elevate nella nebula, probabilmente con meccanismo di accelerazione di sincrotrone. Per questi oggetti è stato osservato un flusso di fotoni γ per i quali non si esclude la possibilità di un’origine adronica che porterebbe quindi a considerare l’esistenza di un flusso di neutrini di alta energia.

Un altro punto di interesse nella Galassia è il Centro Galattico. Il flusso di fotoni γ indica in questo punto una presenza di Raggi Cosmici maggiore che nel resto della Galassia.

I Microquasars sono sistemi binari a raggi X presenti nella Galassia che presentano dei getti relativistici nella banda radio. Questi oggetti sono di forma simile ai Nuclei Galattici Attivi e si pensa che anche i processi che li governano siano dello stesso tipo. Essi sono considerati i maggiori responsabili dell’accelerazione fino a $\sim 10^{16}eV$ delle particelle cariche e per i processi di accelerazione sono considerati molto validi quelli adronici, il che lascia ipotizzare un flusso di neutrini da queste sorgenti.

La Galassia contiene materiale interstellare con campi magnetici inhomogenei che trattengono i Raggi Cosmici all'interno di essa. I processi necessari alla produzione di fotoni e neutrini dell'ordine del TeV avvengono nell'interazione dei R.C. con il materiale interstellare.

Per ultimi citiamo come possibili sorgenti di neutrini le stelle di neutroni in sistemi binari e le magnetars, stelle di neutroni con enormi valori di campo magnetico.

2.2 Sorgenti extragalattiche

I principali candidati ad essere sorgenti extra-galattiche di neutrini sono gli oggetti considerati all'origine dei Raggi Cosmici e in particolare ci si riferisce ai Nuclei Galattici Attivi e alle sorgenti di Gamma Ray Bursts; alcune osservazioni hanno portato inoltre all'ipotesi dell'esistenza di altre sorgenti nascoste di Raggi Cosmici, in particolare le cosiddette Starburst Galaxies, e quindi alla possibilità che ci sia produzione e accelerazione di neutrini di alta energia.

I Nuclei Galattici Attivi sono galassie con un nucleo centrale molto brillante e in cui probabilmente è presente un Buco Nero Supermassiccio. Essi rappresentano la maggiore sorgente di Raggi Cosmici di alta energia.

Un tipo particolare di Nuclei Galattici Attivi sono i Blazars, la cui caratteristica particolare è quella di avere dei getti allineati lungo la direzione di osservazione. Questa peculiarità fornisce la possibilità di rivelare più facilmente neutrini per via dell'aumento del flusso dai getti. I Blazars presentano un continuo di emissione non termico dal radio alle frequenze γ e il flusso è molto variabile. In alcuni modelli i processi di produzione della radiazione nell'ordine del TeV sono adronici e bisogna anche tenere conto del fatto che per sorgenti così lontane il flusso è assorbito per cui, tenendo conto delle misure effettuate su questi oggetti, ci si aspetterebbe un flusso di neutrini in grado di superare il fondo atmosferico.

I Gamma Ray Bursts sono invece dei veloci flash di raggi γ con durate tra i millisecondi e le decine di secondi. La loro principale emissione è nell'ordine del MeV ma presentano emissione anche nell'X, nell'ottico e nel radio. In questi oggetti l'interazione tra protoni e fotoni è molto probabile; considerando i fotoni con energia $E_\gamma \simeq 1MeV$ per la produzione di pioni illustrata precedentemente serve un'energia per i protoni dell'ordine di $E_p \simeq 10^{16}eV$, il che porta ad aspettarsi neutrini con energie dell'ordine di $E_\nu \sim 10^{14}eV$. Il vantaggio dei Gamma Ray Bursts è di essere sorgenti transitorie e per questo si può cercare un flusso di neutrini correlato in direzione e tempo con il flusso di fotoni, quindi in una finestra di pochi secondi, il che significa in un background atmosferico praticamente nullo.

Le Starburst Galaxies sono galassie caratterizzate da una frequenza di formazione stellare molto superiore alla norma con un mezzo interstellare molto denso e energetico. Le Supernovae "iniettano" nel mezzo particelle cariche relativistiche e i protoni così possono interagire nel mezzo interstellare producendo pioni e quindi neutrini. L'enorme densità interna di queste galassie non permette la fuoriuscita di particelle se non per i neutrini e quindi possono essere considerati dal nostro punto di vista dei veri e propri acceleratori di neutrini.

Capitolo 3

Rivelare neutrini

Una volta assodato che dall'universo possono arrivare flussi di neutrini e individuato quali possano esserne le sorgenti, è necessario cercare di capire come è possibile rivelare la presenza di neutrini e quali sono gli accorgimenti necessari a massimizzare il numero di eventi osservati.

L'idea è quella di sfruttare l'effetto Cherenkov in un mezzo trasparente, provocato dal passaggio di particelle cariche relativistiche prodotte dalle interazioni dei neutrini nel mezzo. I grandi vantaggi di questa scelta sono quelli di poter scegliere come mezzo per la produzione della radiazione Cherenkov l'acqua o il ghiaccio e questo significa avere grandi volumi naturali di cui servirsi senza dover costruire apparecchiature enormi. Per rivelare la luce Cherenkov si utilizzano Tubi Fotomoltiplicatori (Fototubi) immersi nel mezzo.

3.1 Interazioni dei neutrini con la materia

I neutrini interagiscono con i nuclei del mezzo attraversato soltanto tramite interazione debole mediante due tipi di reazioni: uno in cui viene prodotto un leptone (interazione di "Corrente Carica", CC) e uno in cui viene prodotto un neutrino (interazione di "Corrente Neutra", NC), e sono rispettivamente rappresentati in questo modo:

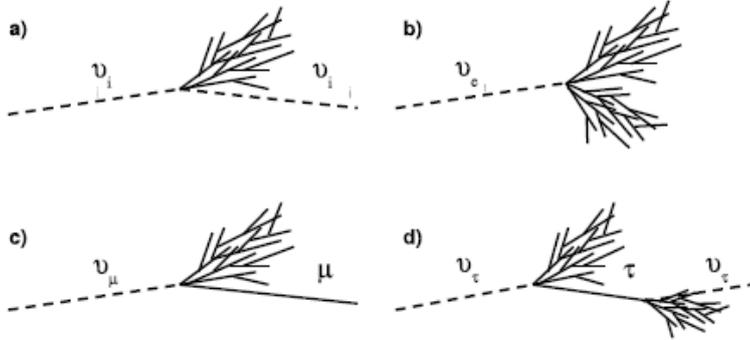
$$\nu_l + N \longrightarrow l + X$$

$$\nu_l + N \longrightarrow \nu_l + X$$

dove X sta ad indicare uno sciame di tipo adronico e l indica un leptone (e, μ, τ). Con le interazioni "CC" otteniamo perciò un leptone, che se ha sufficiente energia può indurre la produzione di luce Cherenkov dalla quale si possono ricostruire la direzione e l'energia del leptone stesso e quindi del neutrino correlato.

I leptoni sono di tre tipi e si comportano in modi diversi all'interno del mezzo. Il più interessante è certamente il muone, in quanto può percorrere un tratto molto lungo prima di decadere e può quindi essere rivelato anche quando la reazione avviene fuori dalla zona strumentata e può essere analizzato dagli strumenti con maggiore precisione. Gli elettroni invece provocano uno sciame elettromagne-

Figura 3.1. Illustrazione dei vari tipi di reazioni in acqua: **a.** interazione a “Corrente Neutra”, **b.** interazione “CC” di un neutrino elettronico con conseguenti sciame adronici e elettromagnetici, **c.** reazione “CC” di un neutrino muonico con produzione di un muone con la sua caratteristica traccia, **d.** produzione di tau con decadimento dopo un breve percorso; immagine da [4]



tico della dimensione di qualche metro, mentre i leptoni tau percorrono un breve tratto prima di decadere e provocare tipicamente uno sciame adronico. Le reazioni descritte sono illustrate in Figura 3.1.

Quando un ν_μ ha energia dell'ordine di $E_{\nu_\mu} \sim 1TeV$ il muone prodotto nell'interazione “CC” ha mediamente $E_\mu \sim 500GeV$ e può percorrere in acqua più di $1km$. La sua direzione è facilmente ricostruibile ed è inoltre molto vicina a quella del neutrino da cui è prodotto. L'angolo medio di deviazione tra il neutrino e il muone è infatti dato da:

$$\bar{\theta}_{\nu\mu} \leq \frac{1,5^\circ}{\sqrt{E_{\nu[TeV]}}}.$$

La sezione d'urto neutrino-nucleone cresce con andamento lineare con l'energia del neutrino fino a $\sim 1TeV$ per poi crescere più lentamente quando il quadrimpulso scambiato Q è maggiore della massa del bosone M_W , infatti si può scrivere:

$$\sigma_{\nu N} \propto \frac{M_W^4}{Q^2 + M_W^2}.$$

Un problema da affrontare è sicuramente quello di riconoscere gli eventi (una traccia di un muone che si propaga nell'apparato) dovuti all'interazione di neutrini di origine astrofisica (galattica e/o extragalattica) tra gli eventi di fondo, in cui il muone è originato negli sciame atmosferici o prodotto dall'interazione di neutrini atmosferici. Infatti il bombardamento di R.C. verso l'atmosfera produce reazioni e sciame di particelle, includendo ovviamente anche neutrini e muoni. Il flusso di muoni si riduce sensibilmente scendendo in profondità e usando perciò, ad esempio in mare, l'acqua sovrastante come scudo. Il modo migliore per ridurre il background è osservare tracce provenienti dal basso, che quindi non possono essere dovute a muoni atmosferici (che non possono attraversare la Terra), ma possono invece essere dovute a muoni prodotti da neutrini che hanno attraversato tutto lo spessore della Terra prima di arrivare nella zona in cui si fa osservazione. In questo modo non possono

esserci muoni di background e l'unico "rumore" è quello dei neutrini atmosferici prodotti dai R.C. dall'altra parte della Terra. I telescopi di neutrini sono perciò strumenti che, al contrario di quelli classici, guardano verso il basso.

3.2 L'effetto Cherenkov

L'effetto Cherenkov [5] viene provocato dalle particelle cariche quando si muovono in un mezzo a velocità maggiore di quella della luce nel mezzo considerato. Una particella carica passando polarizza le molecole vicine generando un momento di dipolo, l'onda di luce si crea quando gli elettroni delle molecole alterate tornano al loro stato iniziale emettendo fotoni che si "sommano coerentemente" sulla superficie di un cono (detto cono Cherenkov) con angolo caratteristico di apertura dato da:

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n}.$$

Il numero di fotoni così indotti dal passaggio di una particella di carica elementare e per unità di percorso e di lunghezza d'onda è:

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

Il numero di fotoni per metro calcolato nell'intervallo di lunghezze d'onda (cioè 300 – 600nm) in cui i fototubi sono sensibili è $3,5 \cdot 10^4$.

3.3 Dimensioni necessarie per un rivelatore

In questo paragrafo e nel prossimo saranno discusse alcune caratteristiche necessarie dei rivelatori.

La prima cosa da fare è calcolare le dimensioni necessarie affinché all'interno del rivelatore si possa registrare un numero ragionevole di eventi. È stato esposto precedentemente (paragrafo 3.1) come la lunghezza delle tracce dei muoni ne permetta la rivelazione anche quando la loro produzione avviene fuori dal volume del rivelatore. Ciò ci permette di definire un volume effettivo del rivelatore come:

$$V_{eff} = A_{detector} \cdot R_\mu$$

dove $A_{detector}$ sta ad indicare l'area del rivelatore e R_μ il percorso del muone.

Per i motivi descritti nel Cap. 1, si può supporre che il flusso di fotoni, se prodotto con meccanismi adronici, sia simile al flusso di neutrini cioè: $\frac{d\phi_\nu}{dE_\nu} \simeq \frac{d\phi_\gamma}{dE_\gamma}$. A questo punto si può definire un "flusso" di eventi come:

$$\Phi = \int_{E > E_\mu^{min}} dE_\nu \frac{d\phi_\nu}{dE_\nu} \cdot P_{\nu\mu}(E_\nu, E_\mu^{min})$$

dove $P_{\nu\mu}(E_\nu, E_\mu^{min})$ è la probabilità che un neutrino produca un muone con energia superiore a una soglia minima fissata.

Si può ora definire il numero di eventi in un certo tempo T in un rivelatore di volume efficace V_{eff} racchiuso da una superficie A_{eff} , come:

$$N_{ev} = \Phi \cdot A_{eff} \cdot T$$

Nel range tra $1 - 10^3 TeV$, per una sorgente che emette come la Nebulosa del Granchio ($1C.U.$ (Crab Unit)) l'integrale Φ assume il valore $\Phi = 5 \cdot 10^{-19} s^{-1} cm^{-2}$, perciò il numero di eventi per tempo è $\frac{N_{ev}}{T} = A_{eff} \cdot 5 \cdot 10^{-19} s^{-1} cm^{-2}$; assumendo la superficie $A_{eff} \simeq 5 km^2$ corrispondente a quella che racchiude una sfera di $1 km^3$ si trova $\frac{N_{ev}}{T} = 5 \cdot 10^{10} cm^2 \cdot 5 \cdot 10^{-19} cm^{-2} s^{-1} = 2,5 \cdot 10^{-8} s^{-1} \sim 1/yr$.

Questo risultato porta alla conclusione che è necessario un "telescopio per neutrini" con dimensioni minime di $1 km^3$.

3.4 Caratteristiche ottimali di un rivelatore

La questione che ci si può porre a questo punto è il numero di Fototubi necessari per una rivelazione ottimale degli eventi interessanti.

I principali esperimenti degli ultimi anni utilizzano fototubi con caratteristiche simili e precisamente un'area di rivelazione $A_{pmt} \simeq 0,05 m^2$ e una efficienza quantica $\epsilon_{pmt} \simeq 0,25$ che rappresenta la probabilità di convertire un fotone in fotoelettroni da parte dello strumento. La lunghezza di assorbimento della luce in acqua o ghiaccio è $l_{abs} > 50 m$ e così si può calcolare il volume effettivo "osservato" dal singolo fototubo $V_{pmt} = A_{pmt} \cdot l_{abs} \simeq 2,5 m^3$. Il rapporto R tra il volume totale di efficacia di un fototubo e il volume totale del rivelatore è:

$$R = \frac{N_{pmt} V_{pmt}}{10^9 m^3} = 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot N_{pmt}$$

Il numero di fotoni emessi da un muone in una traccia di $1 km$ nell'intervallo di lunghezze d'onda tra $400 - 500 nm$, calcolato secondo la formula espressa nel paragrafo 3.2, è $N_\gamma = 3,5 \cdot 10^7$, da cui si ricava il numero di fotoelettroni prodotti come:

$$N_{p.e.} = N_\gamma \cdot R \cdot \epsilon_{pmt} \simeq 2 \cdot 10^{-2} \cdot N_{pmt}$$

Si consideri ora che sullo stesso fototubo arrivano diversi fotoni entro il tempo di integrazione dell'elettronica, si può quindi assumere ragionevolmente per il numero di fotoelettroni un valore $N_{p.e.} \sim 100$ dal quale si ricava il numero di tubi fotomoltiplicatori necessari a coprire l'area del telescopio:

$$N_{pmt} = \frac{N_{p.e.}}{2 \cdot 10^{-2}} = 5000$$

3.5 Alcuni esempi di rivelatori

Lo sviluppo di esperimenti legati allo studio di neutrini astrofisici è avvenuto nell'ultima parte del Novecento e continua tuttora nella ricerca di siti e tecnologie ottimali per la migliore rivelazione possibile. Per quanto riguarda la scelta dei siti

acquatici di collocazione degli strumenti si è cercato di trovare dei luoghi di grande profondità ma accessibili, il tutto accompagnato da studi oceanografici e biologici per poter raggiungere il massimo livello di precisione possibile. Per la tecnologia invece tutti gli esperimenti si sono serviti e si servono di moduli ottici composti da più fotomoltiplicatori connessi ai calcolatori con diversi tipi di cavi. I primi esperimenti sono stati sviluppati al largo delle Isole Hawaii e nel lago Baikal. Molti esperimenti recenti si sono sviluppati invece nella zona del Mar Mediterraneo al largo delle coste europee. Gli esperimenti nel ghiaccio si sono potuti realizzare soltanto al Polo Sud.

L'esperimento DUMAND (Deep Underwater Muons And Neutrinos Detection) fu il primo, si sviluppò a partire dal 1976 fino a concludere la sua attività nel 1995. La strumentazione fu situata a $4800m$ di profondità nell'Oceano Pacifico al largo della Grande Isola di Hawaii. L'esperimento è stato utile soprattutto per aver misurato il flusso muonico a diverse profondità. Il lungo periodo di sviluppo è stato dovuto a diverse difficoltà come la grande profondità alla quale si è lavorato, l'assenza di tecnologie di fibra ottica e di connettori resistenti alla pressione suboceanica e l'impossibilità di lavorare in controllo remoto.

DUMAND è stato molto importante perché ha fornito una preziosa esperienza per lo sviluppo dei successivi esperimenti.

Il lago Baikal si trova in Siberia e la scelta del luogo fu dovuta in particolare alla possibilità di usare il ghiaccio superficiale che si forma d'inverno come piattaforma per l'assemblaggio e il dislocamento degli strumenti. L'esperimento ha avuto una fase di studio approfondito delle proprietà dell'acqua e di sviluppo di tecnologie adatte al lavoro subacqueo e sul ghiaccio. La schiera di rivelatori fu mano mano arricchita nel tempo fino a raggiungere la configurazione finale con NT200 con circa 200 moduli ottici di rivelazione.

Il primo esperimento nei ghiacci del Polo Sud fu AMANDA (con il suo sviluppo successivo AMANDA-II) e fu sviluppato alla stazione Amudsen-Scott, dove il ghiaccio è profondo $2800m$. Quest'ultimo è stato scavato mediante getti di acqua calda. I maggiori limiti di questo esperimento sono stati le piccole dimensioni totali e la pressione del ghiaccio che ha causato la perdita o il malfunzionamento di alcuni moduli ottici. Per questo esperimento sono stati provati diversi mezzi di trasmissione dei segnali, analogici, dei PMT, come cavi coassiali, doppini e fibre ottiche. I primi due hanno sofferto di un'elevata dispersione del segnale mentre il terzo ha avuto un range dinamico molto limitato. Questo esperimento è stato il precursore di IceCube che sarà analizzato più nel dettaglio nel successivo capitolo 4.

ANTARES è il primo progetto sviluppatosi nel Mar Mediterraneo e la sua posizione nell'emisfero Nord del Pianeta gli garantisce una vista privilegiata su molte aree interessanti del cielo come ad esempio il Centro Galattico. L'esperimento è situato a $2475m$ di profondità a $40km$ dalla costa francese. Le stringhe su cui sono fissati i fotomoltiplicatori sono ancorate sul fondo del mare e sono tenute in tensione tramite boe. Per una rivelazione precisa è necessario tenere conto della flessibilità delle stringhe e che quindi piccole correnti marine provocano uno spostamento delle boe di tensionamento, per questo è necessario un monitoraggio costante della posizione dei rivelatori. ANTARES copre $3,5\pi sr$ di cielo con una sovrapposizione di $0,5\pi sr$ con IceCube e osserva il Centro Galattico per il 67% del giorno.

NEMO è un progetto dell'INFN. Esso ha avuto una fase importante di studio per la scelta del sito di Capo Passero a $3500m$ di profondità a $80km$ dalla costa. La

Figura 3.2. Illustrazione di ANTARES di F.Montanet da [6]

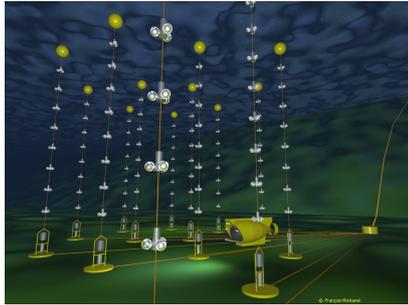
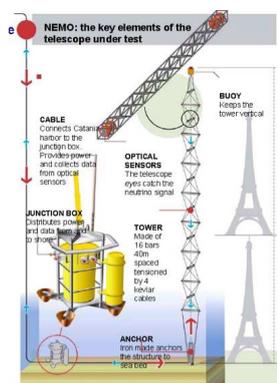


Figura 3.3. Illustrazione della “torre” di NEMO con alcuni strumenti da [1]



particolarità dell'esperimento consiste nella sua struttura. Esso infatti è costituito da una “torre” di 700m composta da 16 piani, disposti lungo la verticale, distanti tra loro 40m e ruotati di 90° l'uno rispetto all'altro. Una prima fase consisteva in una torre ridotta per la verifica della validità delle soluzioni tecnologiche adottate.

Vale la pena citare anche il progetto NESTOR proposto al largo della costa greca a oltre 3500m di profondità.

Il più recente progetto è KM3NeT: un progetto che coinvolge vari paesi europei e riunisce i precedenti tre esperimenti nel Mediterraneo, con tre siti di installazione e diversi centri a terra.

I tre siti sono distribuiti lungo il Mediterraneo e precisamente al largo di Toulon in Francia (KM3NeT-Fr), al largo di Porto Palo di Capo Passero in Italia (KM3NeT-It) e al largo di Pylos in Grecia (KM3NeT-Gr). I dati saranno inviati direttamente al KM3NeT Data Centre a Lione e il quartier generale (KM3NeT-HQ) è situato ad Amsterdam in Olanda.

Capitolo 4

I risultati di IceCube

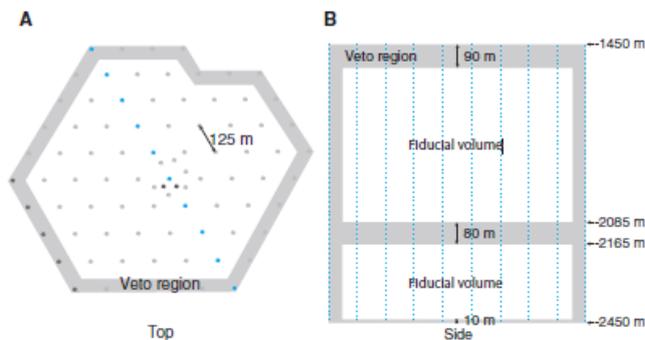
4.1 Il progetto IceCube e le sue caratteristiche

IceCube [7] è stato costruito per far fronte alla necessità di avere un telescopio per neutrini al Polo Sud dopo l'esperimento AMANDA, del quale ha superato i limiti raggiungendo la dimensione auspicata di 1km^3 e scegliendo di disporre i fototubi a una profondità maggiore di 1500m dove le caratteristiche del ghiaccio sono migliori.

La struttura di IceCube è divisa in due parti principali: una parte in profondità nel ghiaccio (InIce) e una parte di superficie (IceTop). La struttura vista dall'alto segue una griglia esagonale nella quale si distribuiscono tutti gli strumenti necessari alla rivelazione.

InIce è composto da 86 stringhe, ognuna composta di 60 moduli ottici digitali (DOMs, Digital Optical Modules) distanziati di 17m l'uno dall'altro e distribuiti nell'intervallo di 1km di profondità tra 1450m e 2450m . IceTop consiste in 86 stazioni poste sopra le stringhe; ogni stazione consiste in due contenitori riempiti di ghiaccio contenenti due DOMs ciascuno. IceTop può funzionare in anticoincidenza con InIce per escludere gli eventi che vanno verso il basso oppure in coincidenza per studiare le caratteristiche dei Raggi Cosmici. IceTop copre 1km^2 e al suo centro è presente il laboratorio dove sono alloggiati gli apparati per la ricezione e trasmissione dei dati sperimentali raccolti.

Figura 4.1. Illustrazione della struttura di IceCube da [8]



La costruzione dell'apparato è stata possibile solo durante l'estate australe per via delle condizioni meteorologiche invernali che impediscono i trasporti e il lavoro stesso. I buchi nel ghiaccio, come per AMANDA, sono stati scavati per mezzo di getti di acqua calda (a $88^{\circ}C$) e il tempo necessario per scavare fino $2500m$ di profondità è di circa 40 ore, sommate ad altre 12 che servono per collocare la stringa di DOMs. Tutta l'apparecchiatura è stata costruita per essere in grado di resistere al congelamento. Il completamento dell'apparato è stato raggiunto solo recentemente con un aumento graduale a partire dalla configurazione IC-9, con 9 stringhe funzionanti, passando per IC-22, IC-40 nel 2008, IC-59 nel 2009 e IC-79 nel 2010 per arrivare nel 2011 a IC-86; l'attuale configurazione è denominata IC-86 2014.

Il sistema di acquisizione dati è basato sull'elettronica dei DOMs che è in grado di leggere, digitalizzare, processare e trasmettere i dati presi dai fototubi. Le acquisizioni sono fatte a 300 milioni di campionamenti al secondo in una finestra temporale di $425ns$. In ogni DOM sono presenti due sistemi di acquisizione che funzionano alternatamente per ridurre i tempi morti. I dati sono trasmessi in superficie da un coppia di cavi di rame intrecciati il cui compito è anche quello di fornire energia. I cavi contengono inoltre dei circuiti di coincidenza locale che rendono comunicanti i DOMs vicini tra loro. Ogni DOM contiene inoltre un set di 12 LED blu che servono per varie calibrizioni e per lo studio delle proprietà ottiche del ghiaccio. Il basso valore della frequenza del "rumore ottico" ($300Hz$) permette una sensibilità anche a energie basse, dell'ordine del MeV , che permette la rivelazione di eventi dovuti a Supernovae nella Via Lattea e nella Grande Nube di Magellano.

4.2 Risultati raggiunti

Le rivelazioni fatte tra il 2010 e il 2012 da IceCube hanno portato a risultati [8] interessanti che confermano l'esistenza di neutrini di origine astrofisica.

Le osservazioni sono state fatte con le ultime due configurazioni quindi una prima parte è stata fatta con 79 stringhe mentre la parte successiva con 86 stringhe che significano un totale di 5160 moduli ottici per la rivelazione. Tra le osservazioni in questo lasso di tempo, sono stati identificati 28 eventi riconducibili a neutrini di origine esterna alla Terra, tutti con energie tra $30 - 1200TeV$ su un background totale di $10,6_{-3,6}^{+5,0}$ eventi dovuti a neutrini o muoni atmosferici. Sui 28 totali, 7 eventi contengono chiare tracce di muoni, mentre gli altri 21, tra cui sono presenti i due eventi di energia maggiore (oltre il PeV), sono sciame provocati dalle interazioni "CC" con neutrini elettronici o tau o dalle interazioni "NC", quindi sciame sia adronici che elettromagnetici (come descritto nel paragrafo 3.1).

Gli sciame osservati sono caratterizzati da una lunghezza di $\sim 10m$ in ghiaccio, i fotomoltiplicatori sono colpiti con distribuzione sferica ma si può risalire alla direzione del leptone primario tramite la successione temporale dei segnali. La risoluzione angolare per questo tipo di eventi è di $10^{\circ} - 15^{\circ}$ mentre la risoluzione sull'energia depositata è del $10 - 15\%$.

La riconoscibilità delle tracce permette invece per questo tipo di eventi una risoluzione angolare $< 1^{\circ}$.

È importante sottolineare come l'energia depositata nel rivelatore è solo un limite

inferiore all'energia dei neutrini che generano gli eventi in quanto i neutrini e i muoni portano una parte dell'energia fuori dal rivelatore.

Riguardo alle caratteristiche del background sono state fatte diverse ipotesi. Una è che il fondo sia generato dai decadimenti di pioni e kaoni già misurati abbondantemente a energie più basse. Un'ipotesi più congruente con i dati è che ad energie più alte sia presente un background dovuto a decadimenti di mesoni "charmed" con eventi in quantità uguali tra neutrini elettronici e neutrini muonici. Il contributo di neutrini atmosferici da mesoni con "charm" comunque non è sufficiente a descrivere il segnale osservato che si manifesta quindi come la prima osservazione di neutrini astrofisici di alta energia.

Per limitare il background sono possibili diversi accorgimenti. Il più semplice è quello che è stato già descritto precedentemente (nel paragrafo 3.1) e consiste nel selezionare solo eventi che vengono dal basso e vanno verso l'alto; un altro tipo di selezione si può fare riducendo la ricerca ai soli eventi di altissima energia ($\sim 1PeV$); l'accorgimento usato per IceCube è invece più elaborato e consiste nel rigettare eventi che producano fotoelettroni nella regione di veto (vedi figura 4.1) e al massimo 6000 fotoelettroni totali. Con questo sistema si elimina il 99,999% dei muoni di background e il 70% dei neutrini atmosferici "downgoing" di solito accompagnati da muoni appartenenti allo sciame in cui sono stati originati.

Un altro tipo di eventi di background è costituito da quei muoni che non emettono luce nella regione di veto ma emettono i primi fotoni all'interno del rivelatore, in pratica simulando un evento da neutrino. Il rate di passaggio attraverso la zona di veto può essere calcolato tramite anticoincidenza tra le due parti del rivelatore. Osservando i muoni che passano in entrambe le parti si può ricavare il rate di muoni che non passano in funzione della luce emessa e quindi calcolare il background totale di muoni che nei due anni delle osservazioni riportate è di $6,0 \pm 3,4$ eventi.

Il background di neutrini si può calcolare tramite il veto sui muoni calcolando la frazione di neutrini accompagnati da muoni con energie oltre i $10TeV$, che è una funzione che dipende fortemente dall'energia e dall'angolo, con maggiore soppressione ad alte energie per neutrini che vengono dall'alto verso il basso. Il background è di $4,6^{+3,7}_{-1,2}$ eventi, che sono concentrati vicino all'energia di soglia.

Analizzando i dati si può notare un eccesso di eventi nell'emisfero sud dovuto principalmente all'assorbimento terrestre oltre i $10TeV$ ed anche rinormalizzando il flusso, rimane un piccolo eccesso dovuto probabilmente a una fluttuazione statistica, o a una popolazione relativamente piccola di sorgenti o distribuita non uniformemente nel cielo. Ogni speculazione su possibili anisotropie comunque oggi è prematura visto il numero limitato di eventi osservati.

Un'ulteriore analisi può essere fatta sulla possibilità di individuare le sorgenti di provenienza dei neutrini rivelati. A questo proposito la statistica degli eventi è molto limitata. Un gruppo di 5 eventi fa ipotizzare delle sorgenti presenti nella zona del centro galattico anche se non si è ancora in grado di determinare precisamente le sorgenti né in quella zona né nel resto del cielo. A questo proposito si riporta (figura 4.3) una mappa delle fluttuazioni su tutti gli eventi, compresi quelli di background, rivelati da IceCube con le configurazioni IC-40, IC-59, IC-79 e IC-86, che presenta una distribuzione tale che tutte le fluttuazioni non superano quelle previste dal modello (rimangono entro $3 \div 5\sigma$) e quindi non possono identificare sorgenti puntiformi.

Riguardo il flusso totale di neutrini, le distribuzioni energetica e angolare (per declinazione) degli eventi (figura 4.4) eccedono evidentemente i valori aspettati per flussi dovuti solo a fenomeni di natura atmosferica (Raggi Cosmici secondari) confermando la natura extraterrestre dei 28 eventi osservati.

Figura 4.2. Mappa del cielo con in viola la probabilità di presenza di sorgenti puntiformi. L è la probabilità dove L_0 corrisponde a probabilità nulla

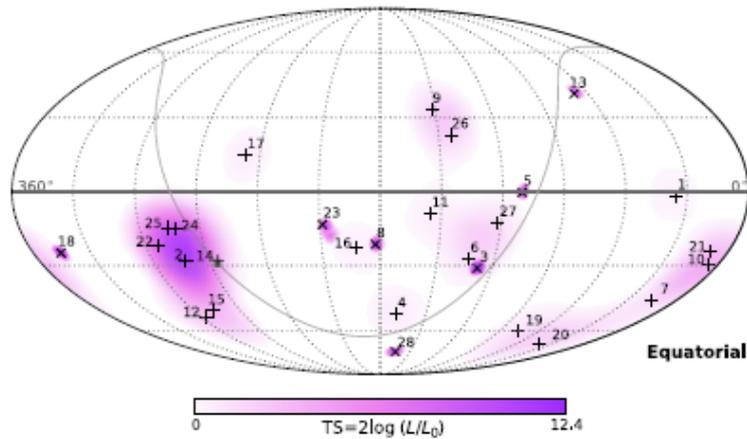


Figura 4.3. Mappa delle fluttuazioni negli eventi osservati tra il 2008 e il 2012 da IceCube in coordinate equatoriali. La linea nera indica il Piano Galattico e il centro della Galassia è segnato da una croce, da [9]

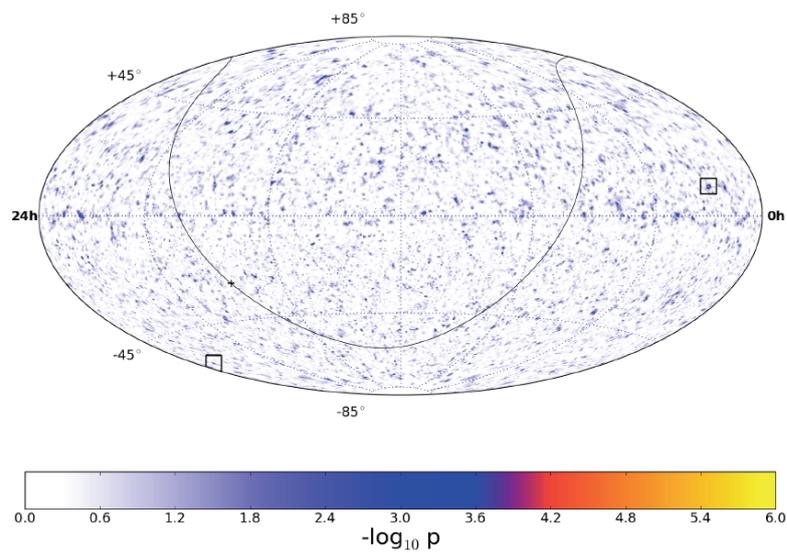
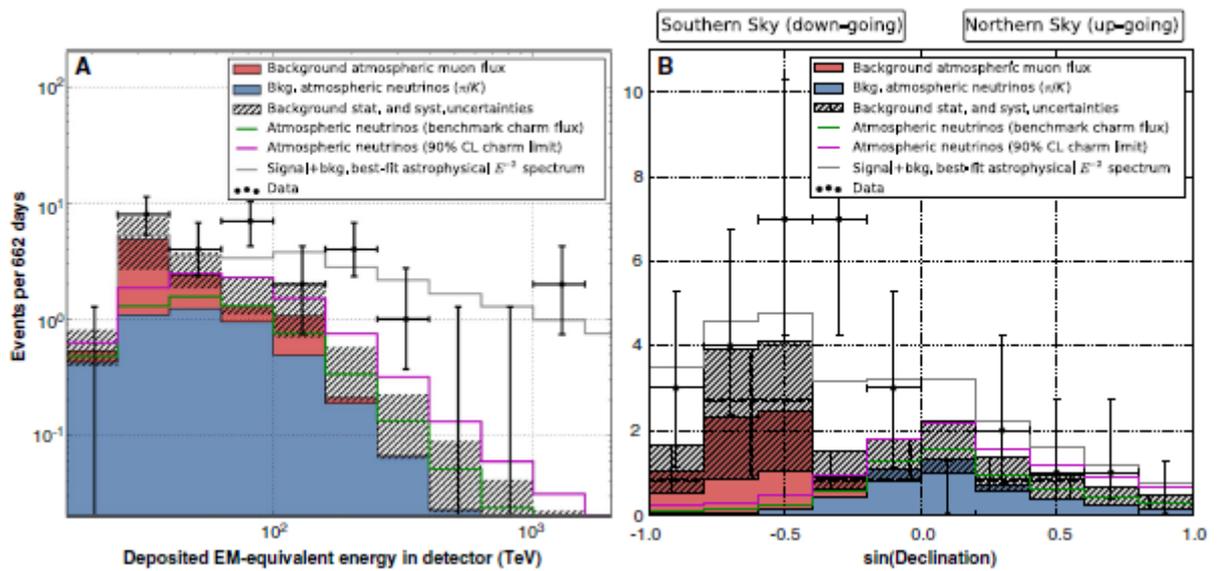


Figura 4.4. Grafici della distribuzione degli eventi per energia e per declinazione. I dati sono segnati da punti neri con le barre delle incertezze, in rosso il flusso atteso per muoni atmosferici e in blu il flusso atteso per neutrini atmosferici



Conclusioni

La rivelazione da parte di IceCube di eventi riconosciuti come provocati da neutrini di origine non terrestre apre definitivamente le porte all'astronomia con neutrini. I risultati raggiunti finora incoraggiano lo sviluppo e la realizzazione di nuovi esperimenti (come il già citato KM3NeT, par. 3.5) e il miglioramento di quelli già esistenti come Icecube, il cui progetto è di estendere a 120 il numero di stringhe e di aumentare il numero di DOMs per stringa in modo da migliorare la sensibilità e la capacità di rivelazione. L'astronomia con neutrini può contribuire fortemente all'analisi delle regioni più remote dell'universo e alla scoperta di nuove informazioni su molte delle sue componenti, utilizzando perciò i neutrini come "messaggeri". L'astronomia con neutrini è racchiusa in un disegno più ampio di "multi-messenger astronomy", tramite la quale si analizzano i diversi portatori di informazioni come fotoni, neutrini, particelle cariche di alta energia, onde gravitazionali che, plausibilmente, possono essere prodotti in una sorgente astrofisica.

Bibliografia

- [1] T. Chiarusi e M. Spurio. «High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes». In: *Eur. Phys. J. C* 65 (2010), pp. 649–701.
- [2] *Department of Physics and Astronomy of The University of Utah*. URL: <http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
- [3] F. Halzen e D. Hooper. «High-energy neutrino astronomy: the Cosmic ray connection». In: *Rept. Prog. Phys.* 65 (2002), pp. 1025–1078.
- [4] F. Barnard. «Caractérisation des performances d'un telescope sous-marin neutrinos pour la detection de cascades contenues dans le cadre du projet ANTARES». PhD thesis. Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, Marseille, France, 2000.
- [5] P. A. Cherenkov. «Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light». In: *Phys. Rev.* 52 (1937), pp. 378–379.
- [6] *ANTARES Online Site*. URL: <http://antares.in2p3.fr/Gallery/3D/index.html>.
- [7] *IceCube (South Pole Neutrino Observatory)*. University of Wisconsin-Madison. URL: <http://icecube.wisc.edu/>.
- [8] C. IceCube Collaboration: Kopper, N. Kurahashi e N. Whitehom. «Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector». In: *Science* 342 (2013).
- [9] M. G. IceCube Collaboration: Artsen, C. Kopper e N. Kurahashi. «Searches for Extended and Point-like Neutrino Sources with Four Years of IceCube Data». In: *ApJ* (2014).