



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Astronomia con neutrini di alta energia in un contesto multimessenger

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

Candidato

Vasile Cristian Antochi  
Matricola 1524491

Relatore

Prof. Antonio Capone

Anno Accademico 2014/2015

Tesi non ancora discussa

---

**Astronomia con neutrini di alta energia in un contesto multimessenger**

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2015 Vasile Cristian Antochi. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con  $\text{\LaTeX}$  e la classe Sapthesis.

Email dell'autore: [cristian.v.antochi@gmail.com](mailto:cristian.v.antochi@gmail.com)

## Sommario

contenuto della tesi in breve... da scrivere.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Raggi Cosmici</b>	<b>3</b>
2.1	Spettro e composizione dei Raggi Cosmici carichi . . . . .	3
2.1.1	Raggi Cosmici di energia fino a $10^{14}eV$ . . . . .	5
2.1.2	Raggi Cosmici di alta energia: oltre il <i>ginocchio</i> . . . . .	5
2.2	I neutrini ad alta energia e radiazione $\gamma$ . . . . .	6
2.2.1	Sorgenti galattiche . . . . .	7
2.2.2	Possibili sorgenti extragalattiche . . . . .	8
2.2.3	Neutrini atmosferici . . . . .	8
2.3	Onde gravitazionali e le sorgenti transienti . . . . .	9
2.3.1	Osservazione delle onde gravitazionali . . . . .	9
<b>3</b>	<b>L'osservazione dei neutrini</b>	<b>11</b>
3.1	Radiazione Cherenkov . . . . .	12
3.2	Esperimenti nell'acqua . . . . .	12
3.2.1	ANTARES . . . . .	13
3.3	Esperimenti nel ghiaccio: AMANDA e IceCube . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Esperimenti e sistemi di allerta multimessenger</b>	<b>17</b>
4.1	Neutrini e raggi cosmici: ANTARES e AUGER . . . . .	17
4.2	Neutrini e Raggi $\gamma$ . . . . .	19
4.2.1	Follow-up ottico: TAToO . . . . .	19
4.3	Neutrini e onde gravitazionali . . . . .	20



# Capitolo 1

## Introduzione

L'astronomia con neutrini ad alta energia è una disciplina relativamente giovane, nata dal bisogno fondamentale di estendere l'osservazione astronomica oltre i messaggeri elettromagnetici, in modo da ottenere un quadro più completo dei fenomeni cataclismici dell'universo.

Per la sua natura dunque, indagando fenomeni ad alta energia, l'astronomia a neutrini è strettamente collegata ad altri *messenger* che i modelli astrofisici prevedono per le situazioni in cui essi possono essere originati: *raggi cosmici*, *raggi  $\gamma$*  e *onde gravitazionali*.

I recenti sviluppi di nuovi detector e metodi sperimentali hanno offerto all'astronomia multimessenger ad alta energia l'opportunità di osservare la radiazione cosmica nell'Universo in tutta la sua varietà, riuscendo a unire vari settori della fisica, in particolare fisica delle particelle, fisica teorica e astronomia. Se da una parte infatti neutrini e raggi cosmici che sono prodotti dall'accelerazione di particelle pesanti (adroni), e i raggi  $\gamma$ , dall'accelerazione di leptoni, *bremstrahlung* e annichilamento di particelle, portano informazione sui processi fisici che governano una sorgente, dall'altra, le onde gravitazionali, prodotte dal moto dell'intera struttura (bulk motion) del progenitore, portano informazioni sulla *dinamica* della regione centrale della sorgente.

Tuttavia i meccanismi complessivi dietro la produzione della radiazione ad alta energia rimangono ancora sconosciuti, richiedendo ulteriori studi e sviluppi delle tecniche multimessenger e dei programmi volti ad esplorare la radiazione cosmica.

In questa tesi si cercherà pertanto di effettuare una presentazione dei motivi che spingono a indagare l'origine dei neutrini ad alta energia e i vari programmi di collaborazione con l'osservazione multimessenger a livello globale.



## Capitolo 2

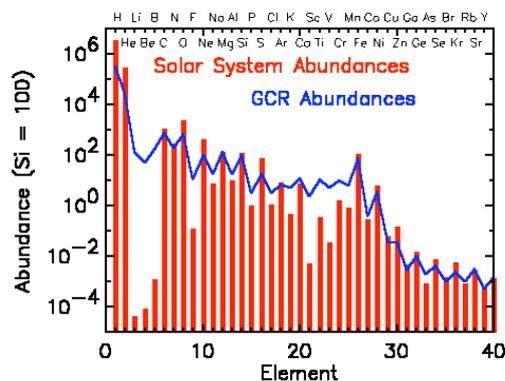
# Raggi Cosmici

In questa sezione si cercherà di dare un quadro generale su cosa siano i raggi cosmici, da dove vengano e perché ci sia bisogno di studiarli. Inoltre verrà sottolineato il legame che intercorre tra i raggi cosmici e la produzione di neutrini e radiazione  $\gamma$  di alta energia. Infine verrà discussa la possibilità di produzione di onde gravitazionali negli eventi che portano all'accelerazione dei raggi cosmici.

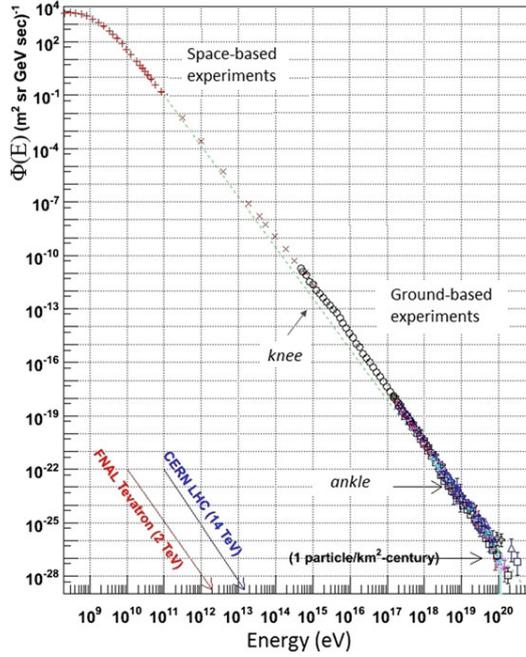
### 2.1 Spettro e composizione dei Raggi Cosmici carichi

I *raggi cosmici* primari sono prevalentemente nuclei di atomi completamente ionizzati, prevalentemente protoni, e altre particelle accelerate da sorgenti astrofisiche che arrivano sulla Terra.

Grazie alle misure effettuate da satellite e da palloni aerostatici in stratosfera è stato possibile analizzare la composizione dei raggi cosmici, rivelando che in essi si trovano tutti gli elementi stabili della tavola periodica con abbondanze molto simili a quelle del sistema solare. Confrontando le abbondanze relative, le differenze fondamentali, come si può vedere nella Figura 2.1, si hanno soprattutto per le abbondanze di H e He che sono inferiori nei raggi cosmici, e per gli elementi Li, Be e B che non vengono prodotti nella nucleosintesi stellare, dunque sono poco abbondanti nella materia del



**Figura 2.1.** Confronto in scala logaritmica tra le abbondanze relative degli elementi nel sistema solare e nei raggi cosmici galattici, preso come riferimento la *Si*.



**Figura 2.2.** Spettro dei raggi cosmici in un intervallo di energia che va da  $10^9 eV$  a  $10^{20} eV$ . Risulta facilmente individuabile la struttura del *knee*, mentre l'*ankle* risulta meno evidente. La linea tratteggiata mostra uno spettro  $\propto E^{-3}$ .

sistema solare, ma vengono prodotti per spallazione negli eventi che portano poi anche all'accelerazione dei raggi cosmici [1]. In percentuali però essi risultano essere per  $\sim 90\%$  protoni,  $\sim 9\%$  nuclei di Elio e il restante  $\sim 1\%$  nuclei più pesanti. A differenza degli acceleratori costruiti sulla Terra che tipicamente producono un fascio monoenergetico di particelle, gli acceleratori cosmici producono uno spettro di potenza di ioni ad alta energia,

$$\phi(E) = K \cdot E^{-\alpha} \quad (2.1)$$

con uno spettro di raggi cosmici osservato dalla Terra caratterizzato da un'indice di  $\alpha = 2.7$  fino ad un'energia di circa  $3 \times 10^{15} eV$  (Figura 2.2.), dopo di che l'indice diventa  $\alpha = 3.1$ , caratteristica che prende il nome di *ginocchio* (*knee*). Proseguendo oltre il *ginocchio* e giungendo a energie di  $10^{19} eV$  si trova un appiattimento dello spettro chiamato *caviglia* (dall'inglese *ankle*)[2].

Le caratteristiche dello spettro dei raggi cosmici sono spiegate da diversi modelli di acceleratori galattici, dividendo lo spettro in diverse sezioni a seconda dell'energia.

### 2.1.1 Raggi Cosmici di energia fino a $10^{14} eV$

I raggi cosmici di energia fino a  $10^{14} eV$  sono prevalentemente di origine galattica. Questa conclusione deriva dal semplice modello di particelle cariche che si propagano nella materia interstellare e che vengono influenzate dai campi magnetici galattici. Dalle misure, il campo magnetico della galassia è orientato prevalentemente parallelo

al piano galattico con le linee di campo che seguono la distribuzione di materia. Dunque una particella carica che si muove nel campo magnetico è soggetta ad una forza di Lorentz perpendicolare alla velocità che le impone un'orbita circolare il cui raggio, chiamato *raggio di ciclotrone* o raggio di *Larmor* che è dato da

$$r_L = \frac{\gamma m v c}{ZeB} = \frac{E}{mc^2} \frac{m v c}{ZeB} = \frac{pc}{ZeB} \quad (2.2)$$

che in approssimazione di particella relativistica, che è il caso della maggior parte dei raggi cosmici, risulta essere

$$r_L \simeq \frac{E}{ZeB}. \quad (2.3)$$

Considerando dunque il caso di un protone e assumendo per l'intensità del campo magnetico galattico un valore di  $B \simeq 4\mu G$ , il raggio di ciclotrone a diverse energie sarà:

$$\begin{aligned} r_L(E = 10^{12} eV) &\simeq 10^{13} m = 3 \times 10^{-4} pc \\ r_L(E = 10^{15} eV) &\simeq 10^{16} m = 0.3 pc \end{aligned} \quad (2.4)$$

valori che confrontati con lo spessore della galassia ( $\sim 300 pc$ ) risultano molto inferiori, dunque coerenti con l'ipotesi di particelle di origine galattica intrappolate dal campo magnetico diffuso [3]. Infatti le principali fonti di raggi cosmici di energia entro lo *knee* sono i resti di giovani supernove, o SNR (dall'inglese *Supernova remnants*). Il processo di accelerazione di queste particelle può essere spiegato dallo scattering iterativo nell'onda shock (*shock-wave*) della supernova, dove vengono intrappolate dai campi magnetici e dunque accelerate fino a quando riescono a sfuggire. Una volta accelerate, le particelle, influenzate dai campi magnetici galattici e dalla radiazione, quando finalmente arrivano sulla Terra non conservano più alcuna memoria della posizione di origine.

Il modello di accelerazione dovuto ai SNR prevede per i raggi cosmici uno spettro con una legge di potenza  $\propto E^{-\alpha_s}$  con  $\alpha_s \sim 2$ . L'indice misurato ( $\alpha \sim 2.7$ ) risulta essere più alto proprio a causa della deflessione di questi cosmici dovuta ai campi magnetici galattici [2].

### 2.1.2 Raggi Cosmici di alta energia: oltre il *ginocchio*

Nella regione di spettro compresa tra il *knee* e l'*ankle*, ovvero energie comprese tra  $\sim 10^{14} eV$  e  $\sim 10^{19} eV$ , le misure si riescono a fare solo da esperimenti terrestri, rilevando gli sciami di particelle secondarie create dall'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera. Tali esperimenti sono array di detector che coprono grandi superfici per riuscire a determinare energia e direzione di provenienza degli sciami. Questa limitazione sperimentale è uno dei motivi che potrebbe spiegare la struttura dello *knee* [4].

Oltre lo *knee* i modelli di SNR non riescono a spiegare il flusso osservato di raggi cosmici, tuttavia non c'è un modello preferito di acceleratore per raggi cosmici di energia fino a  $10^{19} eV$ . Una possibile spiegazione per particelle di tale energia può essere ad esempio una supernova il cui nucleo è una stella di neutroni ruotante

oppure supernove di stelle che precedentemente avevano espulso grandi quantità di materia tramite forti venti solari che accelerano ulteriormente le particelle, o sistemi astrofisici compatti ad alta energia come sistemi binari di pulsar e buchi neri.

Per energie che superano i  $10^{17}eV$  va introdotta una componente di raggi cosmici di origine extragalattica, poiché il raggio di ciclotrone a tali energie è paragonabile alle dimensioni galattiche.

A energie superiori a  $10^{19}eV$ , il flusso, ancora predominato da protoni e nuclei, è inferiore a una particella per chilometro quadro per anno per steradiante. Pertanto l'osservazione di eventi di questo tipo si può effettuare solamente tramite l'uso di impianti terrestri di grandi dimensioni.

L'origine di particelle tanto energetiche (Ultra High Energy Cosmic Rays) si assume che sia extragalattica, per cui considerando una provenienza più diffusa rispetto alla galassia si ha un appiattimento dello spettro. Anche in questo caso, non ci sono modelli preferiti per l'accelerazione delle particelle, ma l'elevata energia è compatibile con situazioni come *Gamma-Ray Bursts* (GRB), micro-quasar o nuclei galattici attivi (AGN)[5].

Al giorno d'oggi il più grande esperimento è l'Auger Observatory che combina misure di luce di fluorescenza nell'atmosfera con misure di sciame estesi. L'osservatorio è situato nell'emisfero sud, in Mendoza, Argentina, ed è stato completato nel 2008 con quasi 1600 cisterne d'acqua per rivelare le particelle dello sciame tramite l'effetto Cherenkov, esteso su  $3000km^2$  e quattro telescopi a fluorescenza.

## 2.2 I neutrini ad alta energia e radiazione $\gamma$

Negli stessi processi di accelerazione dei raggi cosmici si aspetta una considerevole produzione di neutrini ad alta energia e raggi  $\gamma$ . Considerando un protone accelerato in una shock-wave, esso si dovrà propagare nella materia quindi potrà facilmente interagire con altri protoni producendo pioni secondo la reazione



e dal decadimento dei pioni si produrranno neutrini secondo la catena di decadimento



In questi acceleratori galattici non sono solo i protoni ad essere accelerati, ma anche gli elettroni che dunque produrranno fotoni per la radiazione di sincrotrone che, oltre a spiegare parte della radiazione  $\gamma$  delle sorgenti, interagisce con i protoni accelerati secondo



e gli iperoni  $\Delta^+$ , decadendo in



produce neutrini secondo la catena (2.6), oppure decadendo in



produce fotoni  $\gamma$  di origine adronica di energia superiore a quella prodotta da accelerazione leptonica. Si può dunque notare come la produzione di neutrini e raggi  $\gamma$  siano strettamente legati ai raggi cosmici.

Inoltre, se i protoni sono accelerati a energie superiori a  $\sim 10^{19}eV$ , essi hanno un'alta probabilità di interagire con i fotoni del fondo cosmico a microonde (CMB) [2]

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta^+ \quad (2.10)$$

producendo neutrini ad alta energia tramite il canale di decadimento del  $\Delta^+$  descritto in (2.8). Questo processo rende molto difficile l'osservazione e lo studio di raggi cosmici di origine extragalattica, la cui origine tuttavia si potrebbe studiare tramite l'astronomia a neutrini.

### 2.2.1 Sorgenti galattiche

Come precedentemente detto nella sezione 2.1.2, la radiazione cosmica di energia superiore ai  $\sim 10^{14}eV$  potrebbe essere accelerata in sorgenti piuttosto compatte e, se così, queste sarebbero idealmente sorgenti puntiformi di fotoni e neutrini.

Un esempio interessante di possibile sorgente puntiforme di neutrini sono i sistemi binari a raggi X o *X-ray binaries*. Questi sistemi consistono in un oggetto compatto, come una stella a neutroni o un buco nero, e una stella compagna. Questi oggetti sono governati da processi dinamici complicati che coinvolgono il passaggio di materia dalla stella all'oggetto compatto tramite un disco di accrescimento. Le stelle di neutroni hanno campi magnetici molto forti, fino a  $10^8 \sim 10^9 T$ , e certe volte periodi dell'ordine dei millisecondi, creando l'ambiente perfetto per l'accelerazione degli ioni del plasma del disco di accrescimento e dunque per l'interazione tra nucleoni e la produzione di neutrini [6].

Una regione di particolare interesse per l'emissione di neutrini e raggi  $\gamma$  è il Centro Galattico. Le osservazioni dell'esperimento HESS hanno rivelato una sorgente diffusa di raggi  $\gamma$  di energia superiore a  $10^{11}eV$  che comprende il centro gravitazionale della galassia e con uno spettro che fa intuire che la concentrazione di raggi cosmici nella regione è molto maggiore rispetto al flusso misurato sulla Terra. Ciò potrebbe indicare la prossimità di acceleratori di particelle nel centro galattico che producono raggi cosmici e neutrini possibilmente osservabili [7].

Altre sorgenti puntiformi che potrebbero fornire un flusso misurabile di neutrini di alta energia e fotoni  $\gamma$  di origine galattica potrebbero essere i giovani SNR, che, come precedentemente detto, sono anche i candidati più accreditati per l'accelerazione dei raggi cosmici galattici.

### 2.2.2 Possibili sorgenti extragalattiche

Come per l'origine dei raggi cosmici ad altissima energia (UHECR), i nuclei galattici attivi sono i principali candidati per la produzione di neutrini di origine extragalattica. Gli AGN sono galassie con un nucleo di emissione molto luminoso al loro centro dove è probabilmente presente un buco nero supermassivo ( $10^6 \div 10^9$  masse solari). Questo buco nero attrae materia su di sé rilasciando enormi quantità di energia gravitazionale, espellendo jet di particelle ultrarelativistiche in direzione perpendicolare al disco di accrescimento. In questi eventi violenti, essendo coinvolta una grande quantità di

materia, avvengono facilmente le interazioni adroniche che portano alla produzione di neutrini di altissima energia e radiazione  $\gamma$ , oltre all'accelerazione degli UHECR. Altre possibili sorgenti che secondo modelli teorici potrebbero sostenere un flusso misurabile di neutrini sono i *Gamma-Ray Bursts* e le *Starburst galaxies*.

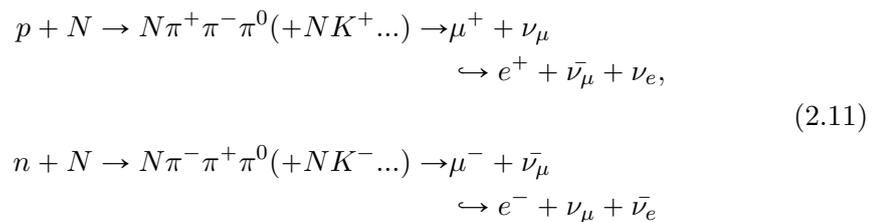
I GRB sono brevi lampi di raggi  $\gamma$  che durano tipicamente da pochi millisecondi a qualche decina di secondi [8] e sono dovuti probabilmente al collasso gravitazionale di stelle molto massive. A seguire il collasso c'è una fase di violenta esplosione in cui si verificano tutte le condizioni per la produzione di neutrini e raggi  $\gamma$  secondo la formula (2.7). Essendo sorgenti transienti, i GRB hanno il vantaggio di essere quasi esenti da rumore di background, poiché correlati temporalmente e spazialmente con produzione di raggi  $\gamma$ .

Le Starburst galaxies, sono regioni di spazio con una rate di formazione stellare incredibilmente alta, comuni nell'Universo, scoperte grazie a osservazioni nello spettro radio. Queste regioni di massiccia formazione stellare possono cambiare drammaticamente la struttura della galassia per le frequenti supernove e venti stellari e immettere nel mezzo intergalattico enormi quantità di energia e massa e creando le condizioni ideali per la produzione di neutrini tramite il decadimento di mesoni carichi precedentemente descritto.

### 2.2.3 Neutrini atmosferici

Un problema fondamentale per l'osservazione dei flussi di neutrini cosmici è che le sorgenti cosmiche non sono le uniche sorgenti che un telescopio per neutrini vedrebbe da Terra. Neutrini ad alta energia si formano anche in atmosfera come by-products di raggi cosmici negli sciami che essi creano all'arrivo.

Le reazioni che portano alla produzione di neutrini atmosferici sono reazioni a cascata descritte in modo qualitativo da [6]



Poiché i raggi cosmici giungono alla Terra in maniera piuttosto isotropa, senza una direzione privilegiata, anche i neutrini atmosferici hanno una distribuzione spaziale pressoché isotropa, formando un background notevole che rende difficile l'osservazione di neutrini cosmici, che solo di recente è stata confermata [9].

Il flusso dei neutrini atmosferici non è facilmente calcolabile poiché bisogna tenere in considerazione che lo spettro dei raggi cosmici, soprattutto quelli di alta energia, non è una semplice legge di potenza, ma presenta diverse strutture, come già visto, inoltre bisogna considerare la perdita di energia dei muoni e che i raggi cosmici che interagiscono con l'atmosfera non sono solo nucleoni ma anche nuclei.

## 2.3 Onde gravitazionali e le sorgenti transienti

I sistemi dinamici complessi che coinvolgono oggetti compatti di altissima massa, come sistemi binari di buchi neri o pulsar, o eventi straordinariamente violenti come le supernove e i GRB emettono enormi quantità di energia. Oltre l'emissione energetica in radiazione elettromagnetica, accelerazione di particelle e produzione di neutrini, gran parte dell'energia persa in questi eventi non si riesce a spiegare se non tramite emissione di onde gravitazionali. Esse sono prodotte dal moto d'insieme della massa del progenitore e come i neutrini, non vengono assorbite o deflesse né dal mezzo interstellare né dai campi magnetici, propagandosi in linea retta dalla sorgente fino alla Terra.

Anche nel caso delle onde gravitazionali i GRB sono i candidati più promettenti per la loro osservazione. I nuclei rapidamente ruotanti degli eventi di collasso nucleare delle stelle estremamente massive possono portare all'emissione di onde gravitazionali ad esempio tramite instabilità rotazionali nelle fasi iniziali di *proton neutron stars*, che portano alla formazione delle stelle di neutroni [6].

Un altro esempio di eventi cataclismici che potrebbero originare un'emissione violenta di onde gravitazionali, neutrini, raggi cosmici di altissima energia e onde elettromagnetiche, è la fusione di due oggetti compatti. Essi emettono forti onde gravitazionali mentre intrappolati in un'orbita a spirale si scontrano e si uniscono. Questo genere di eventi si pensa sia all'origine anche dei GRB di brevissima durata e altissima intensità.

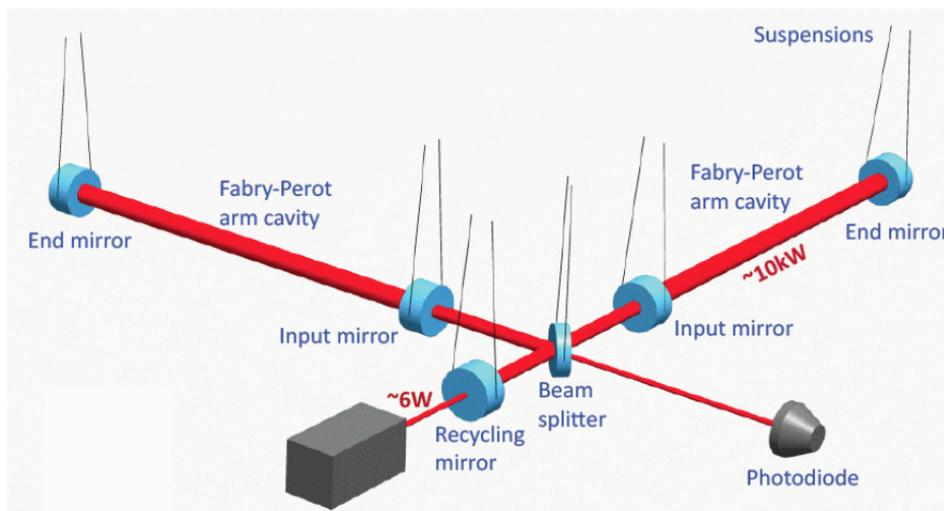
I rilevatori di onde gravitazionali idealmente riescono a osservare questi sistemi binari fino distanze di  $\sim 440Mpc$ . Queste distanze coincidono anche con il range in cui si stima che il flusso di neutrini ad alta energia è abbastanza elevato da poter essere rilevato dagli attuali detector di neutrini [10].

### 2.3.1 Osservazione delle onde gravitazionali

Per osservare le onde gravitazionali si utilizzano grandi osservatori interferometrici dalle dimensioni di qualche chilometro. I rilevatori di onde gravitazionali sono strumenti che non ricostruiscono immagini ma hanno una risposta da eventi in quasi ogni direzione. Per stabilire la direzione di una sorgente c'è bisogno di molteplici detector in modo che sia possibile stabilire l'ampiezza relativa e il ritardo temporale in diversi posti per la triangolarizzazione. Attualmente gli esperimenti operativi principali sono LIGO e Virgo.

LIGO si trova negli Stati Uniti e ha due interferometri di Michelson entrambi con bracci lunghi 4 km. Uno dei detector si trova a Hanford, Washington, mentre il secondo si trova in Livingston, Louisiana. I due interferometri sono sensibili a onde gravitazionali in una banda di frequenza di 40 - 7000 Hz, che coincide con le frequenze che i modelli prevedono per gli eventi di produzione di GRB. Virgo, invece è un'esperimento situato in Italia, vicino Cascina, ed è un interferometro di Michelson con bracci lunghi 3 km sensibile a frequenze simili a quelle di LIGO.

Il principio di funzionamento dei due esperimenti (Figura 2.3.) è lo stesso. Essi rivelano onde gravitazionali monitorando lo spostamento relativo di masse (gli specchi). Un'onda gravitazionale in arrivo modifica la differenza di cammino ottico tra i



**Figura 2.3.** Schema ottico per un rivelatore interferometrico di onde gravitazionali che consiste in due raggi laser gemelli che si propagano in bracci perpendicolari della lunghezza di qualche chilometro con gli specchi ad alta riflettività che fanno da masse di prova.

bracci dell'interferometro creando interferenza misurabile tramite un fotodiode [8].

Nello studio di sorgenti transienti che coinvolgono oggetti compatti e fenomeni estremamente violenti, le tecniche multimessenger sono a tutti gli effetti gli unici approcci che potrebbero portare ad una piena comprensione dei processi alla loro base.

## Capitolo 3

# L'osservazione dei neutrini

Rispetto agli altri messenger di alta e altissima energia, l'osservazione dei neutrini presenta alcuni vantaggi. I raggi cosmici, trattandosi di particelle cariche o massive, vengono diffuse e deviate notevolmente dai campi magnetici galattici o locali e dalla materia interstellare e i raggi  $\gamma$ , essendo onde elettromagnetiche molto energetiche, interagiscono con il background di microonde (CMB) o con la materia e vengono assorbiti, per cui in entrambi i casi la loro osservazione presenta dei limiti fisici non indifferenti. I neutrini essendo neutri e avendo una sezione d'urto molto bassa, proseguono indisturbati dal loro punto di origine fino alla Terra dove possono essere osservati e studiati. La loro piccola sezione d'urto però è anche il più grande inconveniente da superare poiché la loro osservazione richiede grandi volumi di materia [2].

L'idea di un telescopio a neutrini che rivelasse le particelle secondarie prodotte dalle interazioni dei neutrini fu formulata nel 1960 da Markov. La sua idea era quella di utilizzare dei rivelatori nelle profondità marine e cercare di determinare la direzione delle particelle cariche grazie alla luce Cherenkov.

In generale i neutrini ad alta energia interagiscono con un nucleone attraverso o interazioni di corrente debole carica

$$\nu_l + N \rightarrow l + X \quad (3.1)$$

o interazioni di corrente debole neutra

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X. \quad (3.2)$$

I resti di  $X$  formano uno sciame adronico e le particelle relativistiche cariche emettono luce Cherenkov nel mezzo trasparente in cui si propagano.

Gli eventi che più interessante tuttavia, sono le interazioni di Charge Current(CC) che coinvolgono i neutrini muonici che portano alla produzione di muoni carichi relativistici, poiché la lunga portata dei muoni aumenta il volume effettivo del detector, rilevando neutrini che hanno interagito anche a qualche chilometro al di fuori del volume dello strumento pur riuscendo ad attraversare completamente il detector, se l'evento è di energia abbastanza elevata (superiore a  $\sim 1TeV$ ).

Come precedentemente anticipato (Sezione **2.2.3**) i telescopi a neutrini non sono liberi dal background, poiché l'atmosfera terrestre produce muoni atmosferici e neutrini atmosferici dall'interazione con i raggi cosmici. I muoni possono penetrare

l'atmosfera e percorrere diversi chilometri di acqua marina, pertanto i detector di neutrini devono essere situati in profondità sotto grandi quantità di materia che li schermi per ridurre il background. A tale scopo i telescopi a neutrini, a differenza dei telescopi ottici, puntano verso il basso. I muoni diretti verso l'alto possono essere prodotti solo da interazioni di neutrini che hanno attraversato la Terra dal emisfero opposto con i soli neutrini atmosferici che hanno attraversato la Terra a rappresentare un background irriducibile nello studio dei neutrini cosmici.

### 3.1 Radiazione Cherenkov

Qualsiasi telescopio a neutrini proposto od operativo nel range di energie TeV-PeV, funziona raccogliendo luce Cherenkov tramite un array tridimensionale di tubi fotomoltiplicatori. Dal numero di fotoni rivelati e dal loro tempo di arrivo si riesce a ricostruire la traccia del muone e dunque la direzione di provenienza e l'energia del neutrino originario.

La radiazione Cherenkov è emessa da particelle cariche che viaggiano in un mezzo isolante con velocità superiore della velocità della luce in quel mezzo. Il motivo di tale emissione può essere ricondotto agli effetti di polarizzazione e depolarizzazione del mezzo, associati al passaggio della carica. Questi moti di carica intorno ad ogni punto toccato dalla carica in moto generano una serie di onde sferiche che viaggiano con velocità di gruppo  $v_g = c/n$ , con  $n$  indice di rifrazione, il cui involuppo costituisce un fronte d'onda conico [11].

L'angolo di emissione della luce Cherenkov è dato dalla relazione

$$\begin{aligned} \beta c \cos \theta_C &= v_g = \frac{c}{n} \\ \cos \theta_C &= \frac{1}{\beta n} \end{aligned} \quad (3.3)$$

mentre il numero di fotoni emessi per unità di lunghezza e unità di energia è dato da:

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx dE} = \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n E^2} \right) = \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \sin^2 \theta_C \quad (3.4)$$

dove  $\alpha$  è la costante di struttura fine e  $z$  è la carica della particella relativistica. In termini di lunghezza d'onda, assumendo la carica della particella  $z = 1$ , la formula (3.4) può essere scritta come:

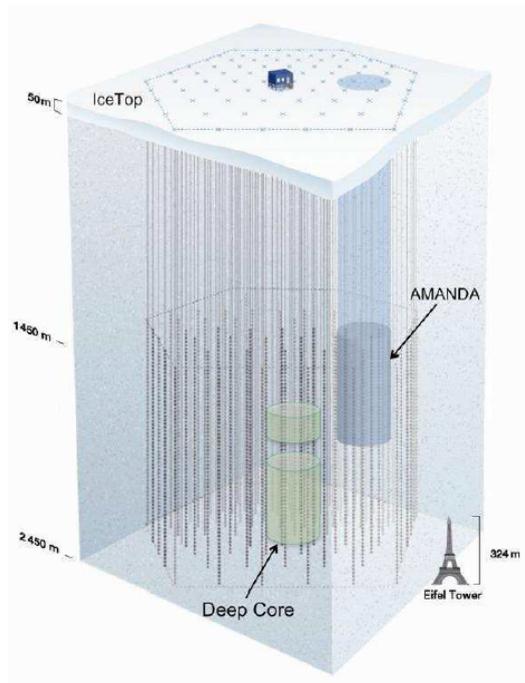
$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx dE} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n \lambda^2} \right). \quad (3.5)$$

L'osservazione della luce Cherenkov proveniente dalle interazioni dei neutrini viene osservata nell'acqua e nel ghiaccio, entrambi abbondanti sulla Terra. Gli esperimenti in acqua sono esperimenti sottomarini o nelle profondità di grandi laghi, mentre la calotta polare antartica è l'ambiente perfetto per osservazioni nel ghiaccio.

### 3.2 Esperimenti nell'acqua

Il primo esperimento nell'acqua che derivò direttamente dall'idea di Markov fu DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detection), che nacque nel 1976.





**Figura 3.2.** Una visuale laterale del detector IceCube. Il detector AMANDA è presente nella parte destra di IceCube. Sono mostrati anche l'array di superficie IceTop e il DeepCore.

attraverso l'acqua marina. L'algoritmo di ricostruzione degli eventi si basa sull'angolo caratteristico di emissione della luce (circa 43 gradi) per determinare la direzione del muone e dunque ricavare la direzione del neutrino incidente. La precisione dell'informazione sulla direzione permette di distinguere i muoni diretti verso l'alto prodotti dai neutrini, dall'enorme background di muoni prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera provenienti da sopra il detector.

Nel prossimo futuro, nel Mediterraneo ANTARES affiancato da altri due progetti, NEMO dell'INFN nel mar Ionio a largo di Capo Passero e NESTOR a largo delle coste greche, costituiranno il Consorzio KM3NeT, una struttura di ricerca con un telescopio sottomarino di almeno  $1\text{km}^3$ . Allo stesso modo, anche il telescopio a neutrini del lago Baikal sarà implementato per raggiungere le dimensioni del chilometro cubo e tornare operativo a fianco del KM3NeT e di Icecube, il telescopio a neutrini nel ghiaccio situato al Polo Sud.

### 3.3 Esperimenti nel ghiaccio: AMANDA e IceCube

L'osservazione dei neutrini nel ghiaccio richiede un grande spessore del ghiaccio in cui si vogliono introdurre i moduli per l'osservazione della luce Cherenkov. Il progetto IceCube si sviluppa dal predecessore AMANDA situato alla base americana Amundsen-Scott al Polo Sud. Come anche nel caso di DUMAND, il progetto AMANDA ha incontrato notevoli difficoltà tecniche inaspettate dovute alla

situazione nuova di lavoro. Nonostante i problemi tecnici, AMANDA è stato un esperimento riuscito, nella sua forma finale contando 19 stringhe che montavano 677 sensori ottici [12].

IceCube è stato progettato per evitare i problemi relativi alla propagazione dei segnali e alla difficile calibrazione incontrati da AMANDA. Completato nel 2011, IceCube consiste in un detector in profondità (InIce) e un array di detector in superficie (IceTop). Il detector principale InIce è formato da 86 stringhe da 1450m a 2450m sotto la superficie, ognuna con 60 moduli ottici digitali (DOM) a distanza di 17 m l'uno dall'altro. Le stringhe sono state posizionate in una griglia esagonale con spaziatura nominale di 125m. Nelle 6 stringhe centrali è presente una maggiore densità di strumentazione a formare il DeepCore che aumenti le capacità di rivelazione del detector verso le energie più basse e potenzialmente aprendo alle osservazioni del cielo a neutrini dell'emisfero Sud altrimenti inaccessibile ad IceCube [13].

Il detector in superficie, IceTop, è invece un array di 80 stazioni per la rivelazione degli sciami aerei dei raggi cosmici e si trovano esattamente sopra le stringhe del detector nel ghiaccio. Gli strumenti in superficie possono essere usati sia in anticoincidenza per l'eliminazione dei muoni diretti verso il basso, sia in coincidenza per lo studio della composizione dei raggi cosmici.

La configurazione finale di IceCube raggiunge le dimensioni di  $\sim 1\text{km}^3$  di volume di rivelazione, facendo di esso il primo telescopio a neutrini delle dimensioni del chilometro cubo. ANTARES e IceCube riescono ad avere una copertura completa del cielo dei neutrini ad alta energia, occupandosi il primo del cielo dell'emisfero Sud con una copertura di  $3.5\pi$  sr, e il secondo del cielo Settentrionale con un overlap di  $0.5\pi$  sr.



## Capitolo 4

# Esperimenti e sistemi di allerta multimessenger

Dopo aver dato un quadro generale dell'attuale ricerca dell'astronomia con neutrini ad alta energia e aver spiegato i motivi del legame tra diversi messenger astrofisici, in questa sezione verranno presentati alcune collaborazioni ed esempi di ricerca multimessenger corredate di alcuni risultati e implicazioni future.

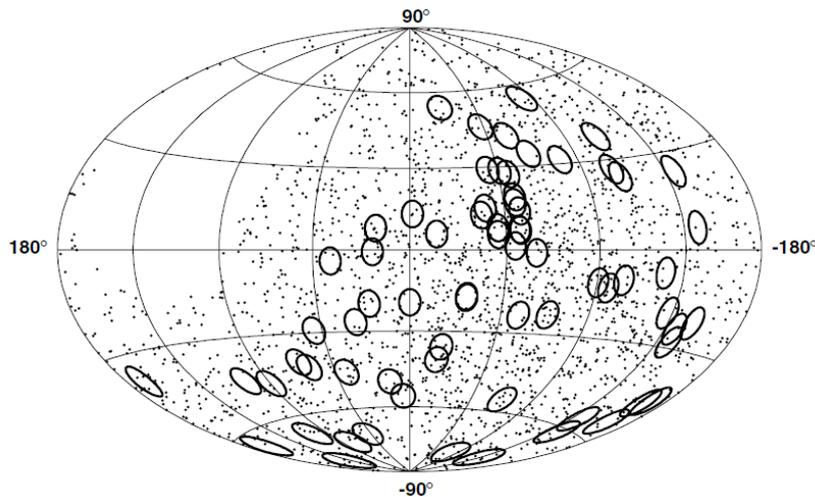
### 4.1 Neutrini e raggi cosmici: ANTARES e AUGER

Un possibile approccio multimessenger nell'identificazione delle sorgenti di raggi cosmici ad altissima energia (UHECR), è quella di studiare confrontare e analizzare insieme i dati delle misure dirette degli UHECR e quelli ricavati dai telescopi di neutrini. Un'analisi di questo genere è stata fatta utilizzando i dati riguardo agli UHECR del Pierre Auger Observatory e gli eventi candidati di neutrini rivelati da ANTARES e consiste nella ricerca di una correlazione nella direzione di arrivo dei neutrini e degli UHECR. Tale ricerca è stata effettuata nel 2013 da una collaborazione dei due gruppi.

Per l'analisi dei dati riguardanti gli eventi di neutrini è stato sfruttato il metodo del *source stacking*, in cui il segnale aumenta linearmente con il numero di sorgenti, mentre il rumore aumenta con la radice quadrata della somma quadrata del background attorno alle sorgenti, ovvero il rapporto segnale-rumore è proporzionale alla radice quadrata del numero di sorgenti. Dunque, i dati acquisiti da ANTARES nel 2007 e 2008 sono stati utilizzati come background e su di questo sono stati posizionati gli eventi nella direzione degli UHECR osservati all'Auger Observatory. Dalle simulazioni Monte Carlo sui background si sono invece ottenuti i conteggi di segnale necessari per poter dichiarare una correlazione tra i dati.

I dati finali utilizzati consistevano in 2190 eventi di neutrini diretti verso l'alto con una risoluzione angolare stimata di  $0.5^\circ \pm 0.1^\circ$  e 69 eventi di UHECR di energia superiore a 55 EeV e con una risoluzione angolare di  $\sim 1^\circ$ .

Ottimizzato un bin angolare a  $4.9^\circ$ , per ottenere una correlazione entro  $5\sigma$  si sarebbe dovuto verificare un conteggio di 6-10 eventi di neutrini per bin. Questo eccesso non è stato verificato da nessuno dei 69 bin angolari centrati sugli eventi di UHECR, con solo poche fluttuazioni locali significative.



**Figura 4.1.** Mappa del cielo in coordinate galattiche dove gli eventi di neutrini sono rappresentati dai puntini neri e i bin di ricerca angolare di  $4.9^\circ$  centrati sugli eventi osservati di UHECR dai cerchi neri.

L'assenza di correlazione tra i neutrini osservati da ANTARES e gli UHECR osservati dal Pier Auger Observatory può essere dovuta a due principali motivi: la possibile deflezione dei raggi cosmici e il fatto che i neutrini potrebbero aver avuto origine da sorgenti molto più lontane dei raggi cosmici osservati [14].

In futuro, l'aumento della statistica e l'avvento di nuovi strumenti per la rilevazione dei neutrini permetteranno a questo tipo di ricerca di ridurre le incertezze e ottenere risultati migliori in studi di questo genere.

## 4.2 Neutrini e Raggi $\gamma$

Come evidenziato nella sezione 2.2, la produzione di neutrini ad alta energia e di raggi  $\gamma$  sono strettamente legate e l'approccio di uno studio incrociato delle sorgenti con telescopi a neutrini e telescopi  $\gamma$  potrebbe essere l'unico modo per comprendere a fondo i processi di produzione.

Programmi di collaborazione tra gli esperimenti con neutrini ad alta energia e telescopi  $\gamma$  hanno cominciato a operare sfruttando il metodo del *time integrated search* per la ricerca di correlazione tra le sorgenti note di raggi  $\gamma$  ed eventi di neutrini, e ricerca di corrispondenza temporale tra eventi di neutrini ad alta energia e *Gamma-Ray Flares*.

I primi risultati di queste ricerche, anche se statisticamente inconclusivi, sono quanto meno promettenti. Da una parte, tramite la *time integrated search*, già dai dati di AMANDA II, precursore di IceCube, si evincono alcuni eccessi di neutrini tra cui uno in prossimità della regione di emissione della Nebulosa del Granchio [12], dall'altra, l'assenza di eventi in corrispondenza temporale pone dei limiti al flusso di neutrini provenienti da Gamma-Ray Flares [15].

### 4.2.1 Follow-up ottico: TAToO

Un altro metodo implementato per lo studio delle sorgenti transienti è quello del follow-up ottico di alcuni eventi di neutrini poco dopo la loro rivelazione tramite il telescopio a neutrini ANTARES.

Il sistema di allerta operativo, noto come *TAToO* (Telescopes and ANTARES Target of Opportunity), utilizza una ricostruzione online della traccia con una precisione di puntamento di circa  $0.5^\circ$ . Esso dunque permette di innescare telescopi ottici come TAROT per l'osservazione nell'ottico del campo di interesse [17].

TAROT è una rete composta da due telescopi ottici robotici situati a Calern, nel sud della Francia e a La Silla, in Cile. I principali vantaggi di questi strumenti sono il campo visivo largo ( $1.86^\circ \times 1.86^\circ$ ) e il loro tempo di posizionamento molto veloce, inferiore ai 10 s.

I criteri di selezione di eventi per il trigger di TAToO sono basati sulle caratteristiche del segnale di neutrini atteso per le sorgenti interessate. Al momento il trigger online è implementato basandosi su tre criteri:

- la rivelazione di multipletti di muoni indotti da neutrini provenienti da direzioni simili entro una finestra temporale inferiore a 15 min;
- la rivelazione di singoli eventi ad alta energia;
- la rivelazione di un singolo evento di muone indotto da neutrino per cui la direzione punti verso una galassia locale (entro  $0.5^\circ$ ).

Una richiesta fondamentale per l'osservazione in coincidenza di neutrini e controparte ottica è che la precisione del telescopio a neutrini debba essere quanto meno comparabile con il campo di vista del telescopio ottico.

Da Gennaio 2010 a Gennaio 2015 sono state analizzate un totale di 42 allerte. Per 11 delle allerte, il tempo tra la rivelazione dell'evento di neutrino e l'inizio dell'acquisizione della prima immagine è inferiore a 1.2 minuti e per 7 di queste arriva a essere anche di soli 25 secondi [16].

Sfortunatamente nessuna delle 42 allerte di neutrini è risultata avere una controparte ottica osservabile. Ciò può indicare che le osservazioni sono state fatte troppo tardi quando ormai le sorgenti potrebbero essere già diminuite in intensità al di sotto della sensibilità dei telescopi ottici, o che le sorgenti erano al di fuori del campo visivo dei telescopi, oppure che i neutrini che hanno innescato l'allerta potrebbero avere altra origine.

## 4.3 Neutrini e onde gravitazionali

I neutrini e le onde gravitazionali, come anticipato nella sezione **2.3**, possono avere un'origine comune, come nel caso delle sorgenti transienti. I segnali delle onde gravitazionali tuttavia si aspetta che siano poco frequenti e abbiano un basso rapporto segnale-rumore sia nei rivelatori attuali che nei rivelatori di prossima generazione. La ricerca di onde gravitazionali da transienti consiste dunque nella ricerca di deboli e rari eventi specifici in un lungo periodo di osservazione.

Per discriminare le onde gravitazionali da glitches non gaussiani del rumore di

fondo si utilizzano metodi di *eccesso di potenza coerente*, ovvero la ricerca di segnali in diversi rilevatori lontani tra loro che siano consistenti in tempo e fase. Ciò è realizzato concretamente combinando i flussi di dati da più detector, prendendo in considerazione la risposta dell'antenna e il livello di rumore di ciascun rivelatore in modo che la somma operi in costruttivamente per un burst di onde gravitazionali in una determinata direzione celeste.

Una delle più semplici ricerche di coincidenze di onde gravitazionali e neutrini ad alta energia sarebbe la ricerca di onde gravitazionali attorno ai tempi di arrivo e nella direzione stimata di un evento di muone indotto da neutrino. In questo modo, grazie alla riduzione del volume di dati analizzati, tali ricerche di onde gravitazionali possono essere effettuate con una soglia di rivelazione più bassa rispetto agli eventi non selezionati dal trigger, portando ad una maggiore probabilità di rilevazione. Dunque, l'uso di un trigger esterno può essere uno strumento molto efficace per ottenere dei risultati soddisfacenti.

Una prima ricerca di coincidenza tra onde gravitazionali e neutrini ad alta energia è stata effettuata utilizzando i dati iniziali degli osservatori LIGO-Virgo e del telescopio a neutrini ANTARES incompleto in configurazione con 5 stringhe, risalenti al 2007. Sono stati utilizzati dunque 158 eventi candidati di neutrini come trigger esterni ed è stata selezionata una finestra temporale simmetrica di  $\pm 500$  s attorno a questi eventi in cui si sono ricercati segnali di onde gravitazionali di diversa durata e frequenza. La ricerca tuttavia non ha trovato nessun evento significativo [8].

Un'altra ricerca congiunta di neutrini e onde gravitazionali è stata effettuata dai gruppi di ricerca di LIGO, Virgo e IceCube nel 2014. I dati utilizzati sono relativi agli anni 2007, 2009 e 2010 corrispondenti ai periodi operazionali dei detector LIGO e Virgo e al detector IceCube incompleto in configurazioni rispettivamente a 22, 59 e 79 stringhe. Comparando dunque il tempo di arrivo di neutrini con energie superiori a 100TeV, ai periodi operazionali delle antenne gravitazionali, non si è riscontrata nessuna tripla coincidenza temporale (IceCube+LIGO+Virgo) [10].

Programmi futuri che coinvolgeranno detector di prossima generazione, come KM3NeT e Advanced LIGO e Advanced Virgo, con un incremento significativo della sensibilità di misura probabilmente coincideranno nel tempo durante la presa dati permettendo studi simili in cui sarà possibile, se non rivelare segnali di onde gravitazionali, porre dei limiti più stringenti sui modelli astrofisici sul rate di produzione di onde gravitazionali e neutrini ad alta energia da parte di sorgenti transienti.

# Bibliografia

- [1] T.K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, pag 7, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [2] T. Chiarusi and M. Spurio, *High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes* 2009, arXiv:0906.2634v1 [astro-ph.HE].
- [3] M. Spurio, *Particles and Astrophysics: A Multi-Messenger Approach*, pag 44, Springer, 2015.
- [4] J.R. Hörandel, *Models of the knee in the energy spectrum of cosmic rays*, Astroparticle Physics 21, Elsevier, 2004.
- [5] J. Blümer, R. Engel, J.R. Hörandel, *Cosmic rays from the knee to the highest energies*, Progress in Particle and Nuclear Physics 63, Elsevier, 2009.
- [6] T.K. Gaisser, F. Halzen, T. Stanev, *Particle Astrophysics with High Energy Neutrinos*, 1994, arXiv:hep-ph/9410384v1.
- [7] The HESS Collaboration: F. Aharonian *et al.*, *Discovery of very high energy gamma-rays from the galactic centre ridge*, Nature 439, 2006, arXiv:astro-ph/0603021.
- [8] S. Ando *et al.*, *Multimessenger Astronomy with gravitational waves and high-energy neutrinos*, 2013, arXiv:1203.5192v2 [astro-ph.HE].
- [9] IceCube Collaboration: M.G. Aartsen *et al.*, *First Observation of PeV-Energy Neutrinos with IceCube*, Phys. Rev. Lett. 111, 2013.
- [10] IceCube Collaboration: M.G. Aartsen *et al.*, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration: J. Aasi *et al.*, *Multimessenger Search for Sources of Gravitational Waves and High-Energy Neutrinos: Results for Initial LIGO-Virgo and IceCube*, 2014, arXiv:1407.1042v2 [astro-ph.HE]
- [11] C. Dionisi, E. Longo, *Fisica Nucleare e Subnucleare*, Dispense, Dipartimento di Fisica, Sapienza, Roma, 2009.
- [12] A. Achterberg *et al.*, *Multi-Messenger Studies with AMANDA/IceCube: Observations and Strategies*, 2005, arXiv:astro-ph/0509396v1.
- [13] R. Abbasi *et al.*, *Time-Integrated Searches for Point-like Sources of Neutrinos with the 40-string IceCube Detector*, The Astrophysical Journal 732, 2011.

- 
- [14] S. Adrián-Martínez *et al.*, *Search for a correlation between ANTARES Neutrinos and Pierre Auger Observatory UHECRs arrival directions*, The Astrophysical Journal 774, 2013.
- [15] S. Adrián-Martínez *et al.*, *Search for Neutrino Emission from Gamma-Ray Flaring Blazars with the ANTARES Telescope*, 2011, arXiv:1111.3473v1 [astro-ph.HE]
- [16] S. Adrián-Martínez *et al.*, *Optical and X-ray early follow-up of ANTARES neutrino alerts*, 2015, arXiv:1508.01180v1 [astro-ph.HE]
- [17] M. Ageron *et al.*, *The ANTARES Telescope Neutrino Alert System*, 2011, arXiv:1103.4477v1 [astro-ph.IM]

## Ringraziamenti

*ringraziamenti*