

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

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

**Studio dell'area efficace del telescopio  
KM3NeT/ARCA**

**Relatore:**  
**Prof. Maurizio Spurio**

**Presentata da:**  
**Camilla Benedetti**

**Correlatore:**  
**Dott. Francesco Carenini**

Anno Accademico 2023/2024

Per papà.  
Per mamma.  
Grazie alle persone incontrate  
lungo questo percorso meraviglioso,  
alle amiche e agli amici,  
ai compagni e alle compagne  
che hanno reso lo studio  
di questa scienza "dura" più lieve.

# Indice

<b>1</b>	<b>Astrofisica con i neutrini</b>	<b>4</b>
1.1	Neutrini . . . . .	4
1.1.1	Cenni storici . . . . .	4
1.1.2	La fisica del neutrino . . . . .	5
1.1.3	Interazione debole . . . . .	6
1.2	Neutrini astrofisici . . . . .	7
1.2.1	I neutrini come messaggeri ideali . . . . .	7
1.2.2	Processi di emissione . . . . .	7
1.3	Sorgenti di neutrini . . . . .	9
1.3.1	Neutrini atmosferici . . . . .	9
1.3.2	Sorgenti di neutrini astrofisici . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Il telescopio KM3NeT e la rivelazione di neutrini</b>	<b>13</b>
2.1	Infrastruttura di KM3NeT . . . . .	13
2.1.1	KM3NeT/ORCA . . . . .	13
2.1.2	KM3NeT/ARCA . . . . .	14
2.2	Struttura del telescopio KM3NeT/ARCA . . . . .	14
2.3	Rivelazione di neutrini . . . . .	16
2.3.1	Interazioni dei neutrini . . . . .	16
2.3.2	Topologie di eventi . . . . .	17
2.3.3	Radiazione Cherenkov . . . . .	19
2.3.4	Segnale di fondo . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Studio dell'area efficace di KM3NeT/ARCA</b>	<b>24</b>
3.1	Area efficace e numero di eventi attesi in un telescopio di neutrini . . . . .	24
3.1.1	Numero di eventi attesi . . . . .	25
3.2	Area efficace di KM3NeT/ARCA . . . . .	26
3.3	Segnale atteso con un flusso astrofisico . . . . .	28
	<b>Bibliografia</b>	<b>34</b>

# Abstract

I neutrini, osservati sperimentalmente per la prima volta meno di un secolo fa, sono stati sfruttati come sonde astrofisiche solo a partire da tempi recenti. Queste particelle neutre interagiscono con la materia ordinaria solo tramite interazione debole, con bassa probabilità. Questa caratteristica li rende messaggeri ideali, poiché possono viaggiare su distanze cosmologiche senza essere deviati e senza essere assorbiti dagli intensi campi magnetici che incontrano durante la loro propagazione, portando informazioni sulle loro sorgenti. Oltre alle tradizionali osservazioni nello spettro elettromagnetico, i neutrini e le altre sonde sfruttate dall'astrofisica multi-messaggera avranno una rilevanza sempre maggiore e complementare nello studio del Cosmo.

KM3NeT/ARCA è un telescopio sottomarino di neutrini di ultima generazione. Questa struttura è attualmente in costruzione sul fondale al largo della costa siciliana, con un modulo parziale già in presa dati. Il suo obiettivo è quello di rivelare neutrini di origine Galattica ed Extragalattica per lo studio di oggetti astrofisici. Per fare questo, sfrutta la luce Cherenkov indotta dalle particelle secondarie che si originano dall'interazione dei neutrini con i nuclei dell'acqua marina.

In questo lavoro è stata studiata l'area efficace del telescopio KM3NeT/ARCA, con dati forniti dalle simulazioni della collaborazione KM3NeT. È stata poi effettuata una stima del numero di eventi attesi per un flusso astrofisico transiente, con un blocco di KM3NeT/ARCA in presa dati.

# Capitolo 1

## Astrofisica con i neutrini

Le osservazioni astronomiche sono sempre state portate avanti storicamente dalla rivelazione dei fotoni provenienti dalle sorgenti astrofisiche, prima nella componente ottica e poi in tutto lo spettro elettromagnetico. Nonostante l'enorme progresso tecnologico dei telescopi e il miglioramento delle osservazioni, rimangono alcuni limiti intrinseci dovuti alla radiazione elettromagnetica stessa, che può essere assorbita dalla polvere interstellare e che non consente osservazioni dei fenomeni fisici interni ai corpi celesti o alle galassie. L'astrofisica multi-messaggera sfrutta diverse sonde quali le onde gravitazionali, i Raggi Cosmici e i neutrini, cercando di ricostruire le informazioni mancanti per la comprensione dei meccanismi astrofisici. I neutrini, la componente neutra dei Raggi Cosmici, riescono ad emergere dalle zone opache ai fotoni grazie alla loro bassa probabilità di interazione. Queste particelle forniscono informazioni complementari rispetto alla radiazione elettromagnetica, offrendo così uno sguardo più completo sull'Universo.

### 1.1 Neutrini

#### 1.1.1 Cenni storici

L'esistenza del neutrino venne postulata già da Wolfgang Pauli negli anni '30 del Novecento, per spiegare lo spettro continuo degli elettroni emergenti dal decadimento beta [1]. Il nucleo di un elemento radioattivo  $(Z, N)$ , con  $Z$  numero atomico e  $N$  numero di neutroni, può trasformarsi in un nucleo  $(Z+1, N-1)$  tramite decadimento beta negativo, oppure in un nucleo  $(Z-1, N+1)$  tramite decadimento beta positivo. All'inizio del 1900 era noto che nel decadimento beta negativo un elettrone  $e^-$  viene emesso dal nucleo:

$$(Z, N) \rightarrow (Z + 1, N - 1) + e^- . \quad (1.1)$$

Se questa fosse l'equazione completa, l'elettrone dovrebbe essere emesso sempre con la stessa energia, per la legge di conservazione. In realtà, gli elettroni emergenti dai

decadimenti beta negativi assumono valori di energia variabili con spettro continuo e picco massimo corrispondente al totale dell'energia rilasciata durante il processo. Questa evidenza sperimentale portò Pauli a postulare l'esistenza di una particella priva di massa e carica elettrica, ancora mai rivelata, che doveva trasportare l'energia, la quantità di moto e il momento angolare mancanti nelle osservazioni sperimentali. L'equazione proposta era:

$$(Z, N) \rightarrow (Z + 1, N - 1) + e^- + \nu. \quad (1.2)$$

Oggi sappiamo che il processo sottostante al decadimento beta è il decadimento del neutrone  $n$  in protone  $p$ , con l'emissione di un elettrone e di un antineutrino elettronico  $\bar{\nu}_e$ :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (1.3)$$

Fu Enrico Fermi nel 1934 a battezzare la particella di Pauli con il nome neutrino, per via della sua natura neutra ed elusiva, e ad aprire la strada per una teoria delle interazioni deboli, oltre ad ipotizzare una via per la rivelazione sperimentale.

Il neutrino fu poi rivelato per la prima volta nel 1956 da Clyde Cowan e Frederick Reines [2], quando le tecnologie dei reattori nucleari e l'uso dei circuiti elettronici nei rivelatori furono abbastanza maturi.

### 1.1.2 La fisica del neutrino

I neutrini sono inquadrati nel Modello Standard (MS) come fermioni di spin  $\frac{1}{2}$  e in particolare come leptoni. Si dividono in tre sapori distinti: elettronico  $\nu_e$ , muonico  $\nu_\mu$  e tauonico  $\nu_\tau$ . I neutrini nel MS hanno massa, carica elettrica e carica colore forte nulle. Interagiscono quindi con la materia ordinaria solo tramite interazione debole. Questa caratteristica li rende sonde astrofisiche ideali, poiché possono viaggiare su distanze cosmologiche senza essere deviati o assorbiti, portando informazioni sulle loro sorgenti.

Esistono prove sperimentali del fatto che la massa dei neutrini non è nulla, ma solo estremamente piccola, diversi ordini di grandezza minore rispetto alla massa degli altri leptoni, sotto  $1\text{eV}/c^2$  per i neutrini elettronici [3] [4] [5]. I neutrini interagiscono anche via forza gravitazionale, ma questa interazione è trascurabile rispetto alla debole. Il fenomeno dell'oscillazione [6], per il quale i neutrini cambiano il proprio sapore, è la prova della loro natura massiva. Ogni sapore per il MS è un autostato dell'hamiltoniana dell'interazione debole, sovrapposizione di tre diversi autostati di massa, combinati secondo gli angoli di miscelamento individuati dalla matrice PMNS (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata).

Nel MS, le generazioni di leptoni consistono in tre coppie di neutrino e leptone carico associato (neutrino elettronico  $\nu_e$  ed elettrone  $e^-$ , neutrino muonico  $\nu_\mu$  e muone  $\mu^-$ , neutrino tauonico  $\nu_\tau$  e tauone  $\tau^-$ ). Ogni leptone carico è un fermione di Dirac, ovvero è distinto dalla sua antiparticella, rispettivamente positrone  $e^+$ , antimuone  $\mu^+$  e antitauone

$\tau^+$ . I neutrini potrebbero essere fermioni di Dirac oppure fermioni di Majorana, in quanto non è ancora noto se coincidano o meno con le proprie antiparticelle, gli antineutrini.

### 1.1.3 Interazione debole

I neutrini, essendo leptoni privi di carica elettrica e di colore, possono partecipare solo a processi mediati dall'interazione debole. Le reazioni indotte dalle interazioni deboli possono essere suddivise in leptoniche, quando sono coinvolti solo leptoni, semi-leptoniche, quando partecipano sia leptoni che adroni, e adroniche quando non sono coinvolti leptoni.

Un esempio di processo debole leptonicco è il decadimento del muone:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e. \quad (1.4)$$

In Fig.1.1 è schematizzato il diagramma di Feynman del decadimento.

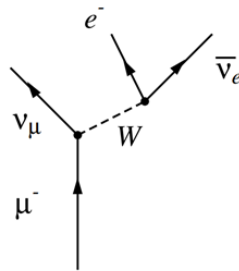


Fig.1.1: Diagramma di Feynman del decadimento del muone in elettrone, mediato dal bosone  $W^-$ . Immagine presa da [7].

Un esempio di processo debole semi-leptonico è il decadimento del neutrone libero (Eq.1.3), rappresentato in Fig.1.2.

Un'ulteriore classificazione dei vertici distingue le interazioni deboli a corrente carica, mediate dai bosoni carichi  $W^\pm$ , da quelle a corrente neutra, mediate dal bosone neutro  $Z^0$ . Un esempio di interazione in corrente neutra è lo scattering anelastico  $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ .

In tutti i processi deboli conosciuti viene conservato il numero leptonico, definito +1 per ogni leptone e -1 per ogni antileptone.

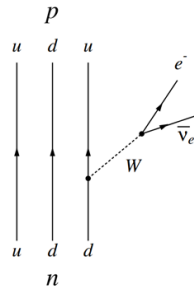


Fig.1.2: Diagramma di Feynman del decadimento del neutrone in protone, mediato dal bosone  $W^-$ . Immagine presa da [7].

## 1.2 Neutrini astrofisici

### 1.2.1 I neutrini come messaggeri ideali

Per studiare l'Universo, l'astrofisica si serve di sonde neutre e stabili, come i neutrini e i fotoni, particelle che non vengono deviate dai campi elettromagnetici e puntano quindi con molta precisione la direzione di provenienza. L'astrofisica con neutrini è un campo di ricerca estremamente recente, poiché richiede tecniche di rivelazione all'avanguardia. Il vantaggio dei neutrini è la bassa probabilità di interazione con la materia, dovuta alla loro piccola sezione d'urto. Ad esempio, i neutrini astrofisici con energia intorno a 1 TeV hanno una sezione d'urto di circa  $10^{-35}$  cm<sup>2</sup>. Questo permette loro di emergere dai processi che avvengono all'interno degli oggetti astrofisici e di attraversare anche regioni di spazio molto dense, che risultano opache ai fotoni, senza essere assorbiti, come illustrato in Fig.1.3. Grazie a queste proprietà, i neutrini possono essere sfruttati per studiare le sorgenti da cui hanno origine.

### 1.2.2 Processi di emissione

I neutrini sono particelle secondarie emesse da processi che accelerano i protoni e possono essere prodotti solo in uno scenario adronico, dove vengono prodotti come secondari anche i raggi gamma. In particolare, i neutrini astrofisici vengono prodotti dall'interazione dei Raggi Cosmici con gas o radiazione presenti nelle vicinanze delle loro sorgenti. Il processo più comune per la generazione di neutrini è il decadimento di pioni carichi  $\pi^\pm$ . Dal decadimento di pioni neutri  $\pi^0$  vengono generati raggi gamma ( $\gamma$ ). Questi mesoni vengono prima prodotti dalle collisioni protone-protone:  $p + p \rightarrow \pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^0, p, n...$  [9]

I pioni  $\pi^\pm$  e  $\pi^0$  possono anche essere prodotti dall'interazione tra i protoni accelerati e la radiazione di fotoni presente intorno a molte sorgenti astrofisiche galattiche ed



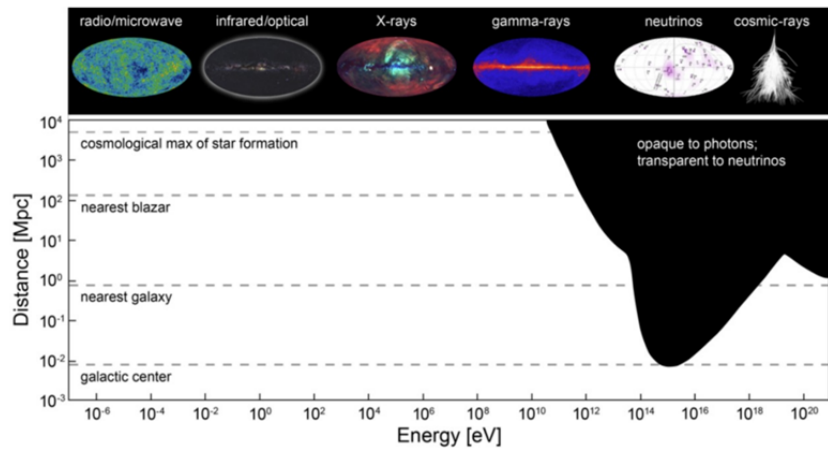


Fig.1.3: Grafico Energia-Distanza che illustra la regione opaca ai fotoni ma trasparente ai neutrini. Immagine presa da [8].

extragalattiche:

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 + p, \quad (1.5)$$

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n, \quad (1.6)$$

dove  $\Delta^+$  è una risonanza intermedia, un barione composto da due quark up e un quark down, stato eccitato di spin del protone con una massa maggiore. I pioni decadono poi nei canali:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma, \quad (1.7)$$

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+, \quad (1.8)$$

$$\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-. \quad (1.9)$$

Il decadimento dei muoni  $\mu^-$  e  $\mu^+$  produce infine neutrini  $\nu_\mu$ ,  $\nu_e$  e antineutrini  $\bar{\nu}_\mu$  e  $\bar{\nu}_e$ , rispettivamente muonici ed elettronici:

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

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-. \quad (1.11)$$

I neutrini vengono prodotti dalle sorgenti con un rapporto di sapore  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : \leq 10^{-5} \approx 1 : 2 : 0$ , ma giungono a noi da grandi distanze con un rapporto  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$  a causa del fenomeno di oscillazione.

## 1.3 Sorgenti di neutrini

### 1.3.1 Neutrini atmosferici

Nei rivelatori di neutrini astrofisici è sempre presente un fondo di altra origine, dovuto ai neutrini atmosferici. Questi ultimi vengono generati dall'interazione dei Raggi Cosmici (CRs) con i nuclei degli strati più esterni dell'atmosfera terrestre. Fino ai 100 TeV di energia circa i neutrini vengono prodotti principalmente dal decadimento di pioni e kaoni carichi, in sciame, secondo le Eq.1.8, 1.9. Questo flusso costituisce la componente convenzionale del flusso di neutrini con energie comprese tra 1 e 100 TeV, esprimibile con uno spettro del tipo  $\frac{d\phi_\nu}{dE}(E) \propto E^{-\alpha_\nu^A}$ , con  $\alpha_\nu^A \approx 3.7$  [9]. L'interazione dei CRs con i nuclei dell'atmosfera produce anche mesoni charmed, dal decadimento dei quali deriva un ulteriore flusso di neutrini, dominante sopra i 100 TeV (flusso prompt), che non è ancora mai stato rivelato e la cui stima è soggetta a grandi incertezze. Per la ricerca astrofisica è fondamentale studiare il fondo, per eliminarlo tramite opportuni tagli sui dati e isolare i segnali di origine galattica ed extragalattica.

### 1.3.2 Sorgenti di neutrini astrofisici

L'esistenza di oggetti acceleratori di Raggi Cosmici sembrerebbe garantire la presenza di neutrini ad alta energia e raggi gamma. Le sorgenti di raggi gamma vengono prese in considerazione come possibili sorgenti di neutrini, ma i fotoni possono essere prodotti anche in uno scenario leptonic, senza la presenza dei neutrini. I processi di produzione di fotoni più comuni nelle sorgenti astrofisiche sono il Compton inverso, in cui gli elettroni cedono energia ai fotoni con uno scattering, e il bremsstrahlung, per cui le particelle cariche decelerate emettono radiazione elettromagnetica. Non è esclusa l'esistenza di sorgenti di neutrini che non vengono osservate tramite raggi gamma, soprattutto se la sorgente è nascosta da polvere o campi di radiazione intensi che assorbono i fotoni lungo la linea di vista. I neutrini astrofisici si distinguono dalle energie e dai flussi caratteristici (Fig.1.4). Le sorgenti si dividono in galattiche ed extragalattiche.

#### Sorgenti galattiche di neutrini

Come possibili sorgenti nella nostra Galassia si trovano i resti di Supernovae (SNRs). Una delle sorgenti più interessanti è il Centro Galattico (GC): nel centro gravitazionale della Via Lattea è presente una sorgente puntiforme, coincidente con il buco nero supermassiccio Sagittarius A\* e il SNR Sgr A East. Anche il Piano Galattico (GP) è una candidata sorgente di neutrini, a causa delle interazioni tra i Raggi Cosmici e il mezzo interstellare. In Fig.1.5 si vedono il cielo e il GP, visti dal telescopio a raggi gamma Fermi-LAT.

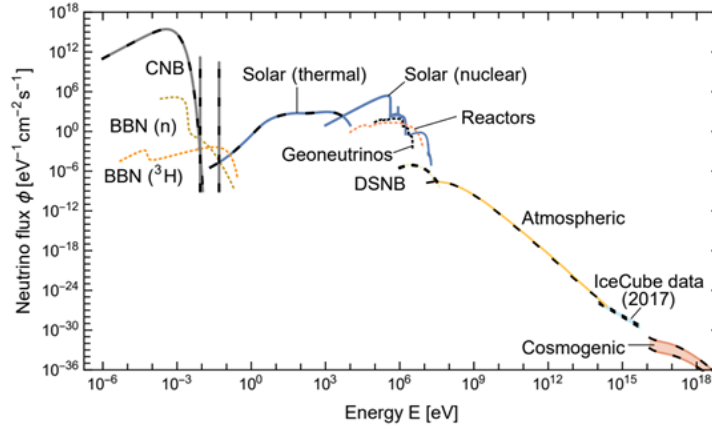


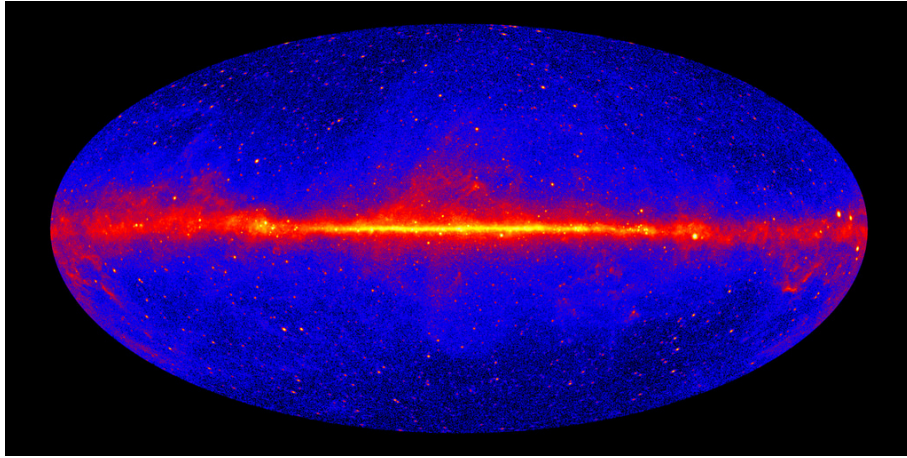
Fig.1.4: Grafico del flusso di neutrini a Terra, integrato su tutte le direzioni con il contributo di ogni sapore. Le linee continue sono per i neutrini, mentre quelle tratteggiate sono per gli antineutrini. Sono evidenziate le diverse origini dei neutrini: cosmologici dal Big Bang (Cosmic Neutrino Background), neutrini solari dalle reazioni termonucleari all'interno del Sole, neutrini provenienti da reattori e dall'attività radioattiva del nucleo terrestre, neutrini da Supernovae, neutrini atmosferici dall'interazione dei Raggi Cosmici con i nuclei dell'atmosfera, neutrini astrofisici ad alte energie (dati presi dal telescopio IceCube). Immagine presa da [10]

I SNRs sono lo stadio finale della vita di stelle con massa compresa tra  $10M_{\odot} - 30M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  è la massa del Sole), ciò che rimane dall'esplosione di Supernovae. Alla fine del processo rimane una stella di neutroni, mentre il 99% dell'energia viene espulsa sotto forma di neutrini. Il flusso di neutrini atteso per questi oggetti è compreso tra  $10^{-1}$  e  $10^2$  TeV [11].

## Sorgenti extragalattiche di neutrini

I principali candidati extragalattici come sorgenti di neutrini sono i Nuclei Galattici Attivi (AGNs) e i Gamma Ray Bursts (GRBs).

Un AGN è una regione compatta al centro di una galassia in cui la luminosità è molto maggiore rispetto ad altre zone della galassia. L'eccesso di luminosità non è prodotto da stelle, ma si pensa sia dovuto all'accrescimento di materia sul disco di un buco nero supermassiccio ( $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ ). Il flusso di neutrini più significativo è atteso nella fascia energetica tra il sub-PeV e il PeV [12].



*Fig.1.5: Il cielo visto dal telescopio a raggi gamma Fermi-LAT. La striscia luminosa al centro è il Piano Galattico della Via Lattea. Credits: NASA*

I GRBs sono rapidi e intensi impulsi di raggi gamma (soprattutto nella scala energetica dei MeV) e si trovano con una distribuzione uniforme su tutta la volta celeste. Questo indica un'origine extragalattica che è stata poi confermata dalle misure di redshift. Osservati per la prima volta nel 1973 [13], i GRBs sono rimasti un mistero per decenni, poiché sono fenomeni transienti e non ripetuti nel tempo, con curve di luce diverse caso per caso. I GRBs si classificano in short hard bursts e long soft bursts sulla base del T90, ovvero il tempo entro il quale il burst emette dal 5% al 95% dell'energia misurata. I long bursts hanno durata superiore ai 2 secondi (con durata media di circa 30 s) e si pensa siano prodotti dall'esplosione di supernove di tipo Ib e Ic (Core Collapse), in un fenomeno chiamato ipernova [14]. La natura degli short bursts non è ancora confermata, ma l'ipotesi più accreditata è quella della fusione di un sistema binario, costituito o da due stelle di neutroni o da una stella di neutroni e un buco nero [15]. Questa ipotesi ha a supporto l'osservazione multi-messaggera congiunta di onde gravitazionali e raggi gamma di GW170817 e GRB170817A [16].

Il meccanismo fisico all'origine dei GRBs è ancora un'incognita. Il modello teorico più accreditato è il fireball: descrive processi di accelerazione di particelle cariche fino a velocità relativistiche [17]. Secondo questo modello, si ipotizza un motore centrale costituito da un buco nero.

Dai GRBs è atteso un flusso di neutrini all'energia di circa  $10^{14}$  eV[11]. L'energia media corrisponderebbe al valore in cui i telescopi a neutrini con volume strumentato su scala di  $1 \text{ km}^3$  hanno un'alta efficienza di rivelazione. Essendo sorgenti transienti, con un breve e intenso picco di eventi attesi, i GRBs avrebbero il vantaggio di essere facilmente riconoscibili e isolabili dal fondo dei neutrini atmosferici. Sinora, nonostante i GRBs siano stati considerati come possibili candidati per la produzione di neutrini

extragalattici, gli esperimenti dei telescopi di neutrini IceCube ed ANTARES non hanno mai osservato alcun segnale in coincidenza spaziale e temporale con un GRB. Da queste non-osservazioni sono stati derivati limiti stringenti sui flussi di neutrini da GRB. I dati provenienti dal telescopio di neutrini KM3NeT/ARCA saranno fondamentali per gli studi futuri.

# Capitolo 2

## Il telescopio KM3NeT e la rivelazione di neutrini

I telescopi di neutrini sfruttano un grande volume di dielettrico trasparente, come l'acqua o il ghiaccio, strumentato con una matrice di rivelatori ottici. Maggiore è il volume e maggiore sarà la probabilità di interazione dei neutrini con i nucleoni degli atomi del dielettrico. La trasparenza del mezzo permette la rivelazione tramite fotomoltiplicatori, sfruttando il fenomeno della radiazione Cherenkov.

### 2.1 Infrastruttura di KM3NeT

Il progetto KM3NeT (Cubic Kilometer Neutrino Telescope) riguarda le infrastrutture dei telescopi di neutrini di ultima generazione nel mar Mediterraneo. Due rivelatori sono attualmente in costruzione: KM3NeT/ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) al largo delle coste di Tolone (Francia) e KM3NeT/ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) al largo di Capo Passero, in Sicilia. Entrambi i rivelatori di KM3NeT sfruttano la medesima tecnologia, già collaudata dal telescopio predecessore ANTARES [18]: sono costituiti da stringhe verticali o DUs (Detection Units) in cui vengono posizionati moduli o DOMs (Digital Optical Modules) contenenti fotomoltiplicatori (PMTs).

#### 2.1.1 KM3NeT/ORCA

Il rivelatore KM3NeT/ORCA è progettato per misurare il flusso di neutrini atmosferici a energie più basse (dai MeV ai sub-TeV), per studiare l'oscillazione dei neutrini e il problema della gerarchia di massa. KM3NeT/ORCA è il più piccolo tra i due rivelatori, con un volume finale previsto di circa  $0.0067 \text{ km}^3$ , strumentato con 115 DUs. Le stringhe

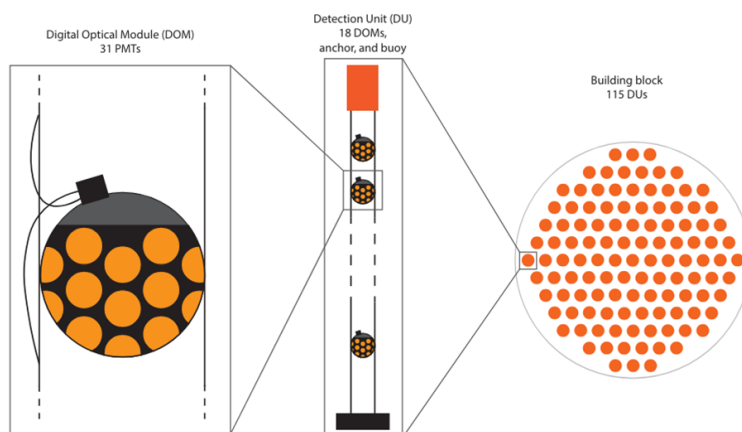
sono separate l'una dall'altra da una distanza 20 m, mentre i 18 DOMs che si trovano su una stessa DU sono distribuiti a distanza verticale di 6 m [19].

### 2.1.2 KM3NeT/ARCA

Il rivelatore KM3NeT/ARCA sarà più efficiente alle alte energie (dai sub-TeV ai PeV), per rivelare i neutrini astrofisici e studiarne le sorgenti. Nel telescopio di KM3NeT/ARCA, il volume totale strumentato raggiungerà  $1 \text{ km}^3$ . Da ottobre 2023 il telescopio è equipaggiato con 28 stringhe di rivelazione e il progetto prevede il completamento dell'infrastruttura con due blocchi da 115 DUs in tutto [19]. Le stringhe sono separate l'una dall'altra da una distanza di circa 90 m, mentre i 18 DOMs che si trovano su una stessa DU sono distribuiti a distanza di 36 m. KM3NeT/ARCA è situato nel mar Mediterraneo, quindi nell'emisfero boreale, e rivela principalmente neutrini upgoing provenienti dal cielo australe. Questo permette di osservare gran parte della Via Lattea e il Centro Galattico, consentendo allo stesso tempo di schermare le altre particelle e il fondo di neutrini atmosferici, sfruttando il volume della Terra.

## 2.2 Struttura del telescopio KM3NeT/ARCA

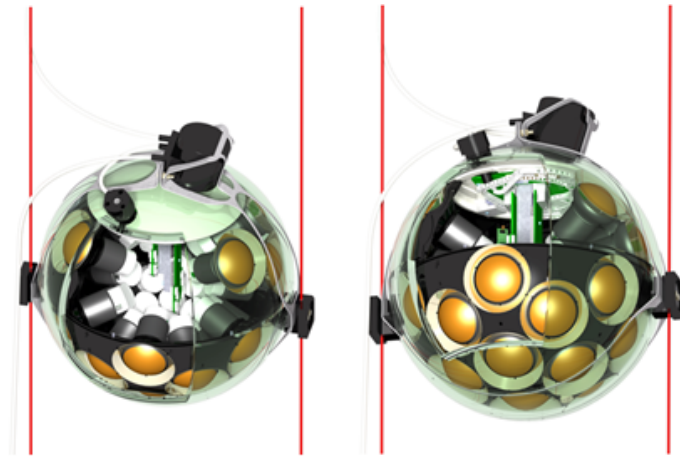
Il progetto completo di KM3NeT/ARCA prevede due blocchi cilindrici da 115 DUs ciascuno. Una DU consiste in una stringa verticale alta circa 700 m, con moduli ottici (DOM) posti a 36 m di distanza verticale, e la sua stabilità è mantenuta da una boa. In Fig.2.1 si riporta una rappresentazione della struttura di KM3NeT/ARCA.



*Fig.2.1: La struttura di KM3NeT/ARCA. Il rivelatore completo avrà due blocchi da 115 DUs. Immagine presa da [20].*

L'alimentazione del rivelatore e il trasferimento dei dati avvengono tramite due cavi optoelettronici principali, che si suddividono poi tramite due Branching Units, ognuna terminante con un Cable Termination Frame (CTF). Ogni CTF distribuisce l'alimentazione alle junction boxes secondarie, 12 per il primo blocco e 16 per il secondo, che permettono la connessione a 7 DUs ciascuna, tramite cavi di interconnessione in fibra ottica posizionati sul fondale marino. Attualmente è operativo soltanto un CTF, in quanto soltanto uno dei due blocchi del rivelatore è attivo ad oggi (luglio 2024), con 28 DUs in presa dati. Il cavo optoelettronico principale è connesso all'impianto per l'alimentazione della stazione di terra a Porto Palo di Capo Passero, dove è presente anche l'elettronica per acquisire i dati e il server per gestirli.

Il Digital Optical Module (DOM, in Fig.2.2) è l'unità fondamentale per entrambi i rivelatori di KM3NeT. Si tratta di una sfera di 44 cm di diametro, rivestita di vetro trasparente e resistente all'elevata pressione dell'acqua sul fondale. Ogni DOM racchiude 31 fotomoltiplicatori e la relativa elettronica. Questo design ha molti vantaggi rispetto ai moduli ottici contenenti un singolo PMT più grande, utilizzati ad esempio in Ice-Cube o ANTARES. In particolare permette di raggiungere un'area di fotocatodo circa tre/quattro volte maggiore e di ottenere così una migliore informazione sulla direzione dei fotoni incidenti, con una maggiore risoluzione sia spaziale che temporale. Questo consente anche una notevole riduzione del fondo ottico (Sez.2.3.4). La disposizione dei PMT, più concentrati nell'emisfero inferiore, è stata studiata per sfruttare soprattutto gli eventi upgoing (Sez.2.3.2).



*Fig.2.2: Rappresentazione di un DOM di KM3NeT con i PMTs all'interno, visto dall'alto (a sinistra) e dal basso (a destra). Immagine presa da [21].*

Essendo le DUs costituite da cavi flessibili di fibra sintetica, la loro forma varia fortemente a seconda delle correnti marine. È quindi necessario un sistema di calibrazione



spaziale che registri la posizione dei DOMs. Questo avviene grazie ai sensori inseriti all'interno di ogni DOM, che monitorano la sua orientazione, e grazie ad un sistema di posizionamento acustico, per tracciare la posizione dei moduli ottici all'interno del blocco strumentato. La posizione dei DOM viene aggiornata ogni minuto e ha una precisione di circa 10 cm [22].

## 2.3 Rivelazione di neutrini

### 2.3.1 Interazioni dei neutrini

I neutrini sono particelle elusive e poco interagenti a causa della loro piccolissima sezione d'urto. La sezione d'urto varia in funzione dell'energia dei neutrini, come si vede dal grafico in Fig.2.3

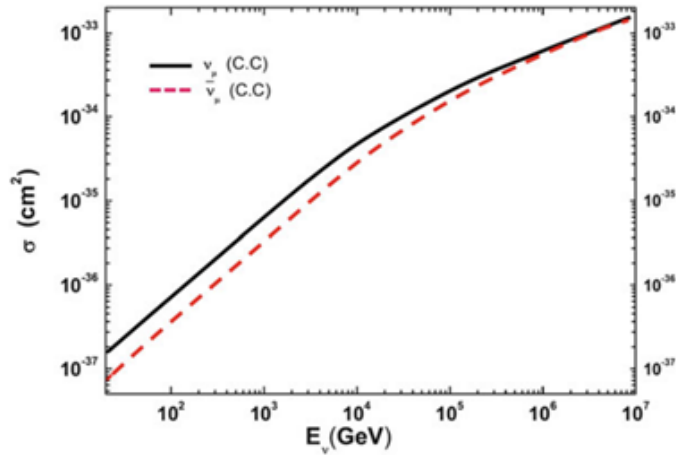
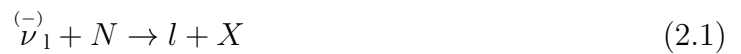


Fig.2.3: Grafico della sezione d'urto di neutrini e antineutrini muonici in funzione dell'energia, secondo la funzione di distribuzione partonica CTEQ6-DIS [23]. Si può notare che la sezione d'urto dei neutrini è maggiore di quella degli antineutrini. Inoltre, entrambe le curve presentano un appiattimento sopra il PeV. Immagine presa da [9].

I neutrini possono interagire con la materia, in particolare con un nucleone N di un nucleo, tramite due interazioni deboli distinte, via corrente carica (CC) oppure via corrente neutra (NC) (Sez.1.1.3). I due processi possono essere schematizzati come:



per corrente carica. Oppure come:

$$\bar{\nu}_1 + N \rightarrow \bar{\nu}_1 + X \quad (2.2)$$

per corrente neutra, in cui  $\bar{\nu}_1$  e  $l$  sono rispettivamente un (anti)neutrino e un (anti)leptone carico di una stessa generazione,  $N$  è il nucleone e  $X$  è il sistema adronico finale che si forma dall'interazione [9].

### 2.3.2 Topologie di eventi

I leptoni carichi secondari prodotti dalle interazioni dei neutrini (Eq.2.1 e 2.2) viaggiano attraverso il mezzo fino a che non interagiscono o decadono. La distanza media percorsa da una particella nel mezzo è chiamata libero cammino medio e dipende dalla sua energia e dalla dispersione di energia nel mezzo (Fig.2.4).

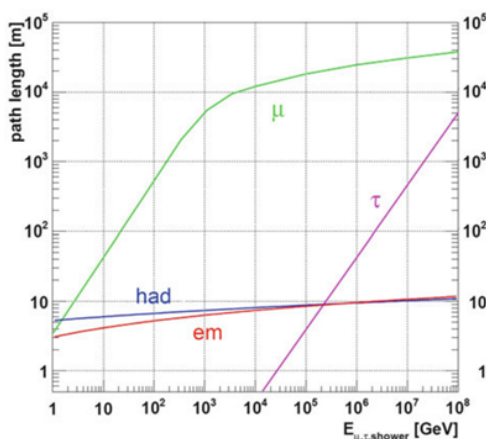


Fig.2.4: Libero cammino medio delle particelle prodotte dalle interazioni dei neutrini in acqua in funzione della loro energia: muoni ( $\mu$ ), tauoni ( $\tau$ ), sciame elettromagnetici (EM) e adronici (HAD). Immagine presa da [9].

Nei telescopi di neutrini si distinguono gli eventi in upgoing e downgoing, a seconda della direzione di provenienza dei neutrini. Per gli eventi downgoing, provenienti dall'emisfero in cui si trova il rivelatore, il fondo di neutrini atmosferici sarà maggiore. I neutrini upgoing, invece, attraversano la Terra prima di arrivare al telescopio, perciò quelli ad altissime energie sono assorbiti.

Si distinguono inoltre due classi principali di eventi: di tipo traccia, in cui si riesce a risolvere la traiettoria del leptone carico secondario, e di tipo sciame, in cui il leptone carico decade generando una grande quantità di particelle. La rivelazione delle particelle secondarie prodotte dall'interazione dei neutrini avviene tramite la misura dei fotoni ottici prodotti per effetto Cherenkov. La luce viene rivelata dai fotomoltiplicatori dei telescopi sottomarini. Dall'intensità della radiazione misurata, si possono ricavare il sapore, la direzione e l'energia dei neutrini, grazie agli algoritmi di ricostruzione. In questo tipo di rivelatori sottomarini, non è possibile distinguere i neutrini dagli antineutrini: sarebbero necessari intensi campi magnetici all'interno del volume strumentato, per separare i leptoni secondari carichi positivamente da quelli negativi.

Vengono usati principalmente eventi di tipo traccia come segnali di eventi astrofisici, per avere una risoluzione angolare migliore. Quest'ultima infatti deve essere dell'ordine di grandezza di qualche frazione di grado per permettere confronti con i dati dai telescopi a raggi gamma.

### Eventi di tipo traccia

Gli eventi di tipo traccia sono prodotti dall'interazione dei neutrini in CC (Eq.2.1). In particolare, è privilegiata la rivelazione dei  $\mu$  prodotti dall'interazione dei  $\bar{\nu}_\mu$ . Il libero cammino medio di un muone prodotto con 200 GeV di energia risulta di circa 1 km, una lunghezza maggiore della risoluzione spaziale del rivelatore. La traiettoria della particella può essere quindi risolta anche se il muone viene prodotto fuori dal volume strumentato, nella crosta terrestre o nel mezzo trasparente circostante. La direzione del muone può essere misurata con una risoluzione intrinseca che dipende fortemente dal mezzo di propagazione e dall'energia. In acqua la risoluzione può raggiungere valori anche fino a  $0.1^\circ$  [11]. Per KM3NeT/ARCA, una risoluzione di  $0.2^\circ$  viene raggiunta per neutrini muonici con energia sopra i 10 TeV, mentre sopra i 100 TeV si raggiunge una risoluzione migliore di  $0.2^\circ$  [19]. Dalla traiettoria ricostruita di  $\mu$ , si può ricavare la direzione di provenienza del  $\nu_\mu$  primario. L'angolo medio tra la direzione del neutrino incidente e quella del muone uscente dal vertice di interazione può essere approssimata con:

$$\theta_{\nu\mu} = \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}}, \quad (2.3)$$

dove  $E_\nu$  è l'energia del neutrino [11]. Negli eventi di questo tipo viene prodotto anche uno sciame dal vertice di interazione, ma il libero cammino medio di queste particelle è tre ordini di grandezza inferiore rispetto a quello dei muoni per energie sopra i 2 TeV, quindi spesso viene rivelata solo la traccia.

Anche i tauoni con energia superiore a 1 PeV creano un evento di tipo traccia risolvibile, con un libero cammino medio sufficientemente lungo da permettere di separare il segnale dello sciame generato dall'interazione primaria di  $\nu_\tau$  da quello generato dal decadimento di  $\tau$ .

## Eventi di tipo sciame

Gli elettroni energetici generati dall'interazione in CC di  $\nu_e$  (Eq.2.1) hanno un'alta probabilità di irradiare fotoni per bremsstrahlung, dopo qualche decina di cm di acqua. Dai fotoni si generano coppie  $e^+ e^-$  che, sempre via bremsstrahlung, danno origine a uno sciame elettromagnetico (EM). In questo modo, l'energia iniziale viene dissipata all'interno del mezzo. Lo sciame EM ha una lunghezza di circa 8 m per un  $e^-$  di 10 TeV, minore della distanza tra le Detection Units negli array. Per questo motivo, gli sciame EM non vengono usati per misurare accuratamente la direzione di provenienza del segnale (per KM3NeT/ARCA la risoluzione angolare media è superiore a  $1^\circ$ , secondo le simulazioni con l'algoritmo di ricostruzione [19]), ma vengono invece sfruttate per risalire all'energia del neutrino  $\nu_e$  iniziale. Anche se gli sciame EM sono diversi da quelli adronici in teoria, i canali  $\nu_e$  in CC e  $\nu_l$  in NC non sono distinguibili in un rivelatore con spaziatura verticale tra moduli ottici di 36 m, come KM3NeT/ARCA.

Gli eventi di tipo sciame adronico avvengono anche in NC, senza distinzione di sapore del neutrino interagente. Gli adroni dello sciame (principalmente pioni) sono altamente instabili e decadono in una decina di metri, perciò non si riesce a risolvere con elevata precisione la direzione di arrivo dei leptoni carichi secondari. In questo canale, una parte dell'energia di interazione viene trattenuta dal neutrino uscente (Eq.2.2), quindi si ottiene un errore proporzionale nel calcolo dell'energia del neutrino primario.

In Fig.2.5 è presente uno schema riassuntivo di alcune topologie di eventi delle particelle secondarie.

### 2.3.3 Radiazione Cherenkov

La radiazione rivelata dai fotomoltiplicatori viene emessa per effetto Cherenkov. Questo fenomeno avviene quando una particella carica attraversa un dielettrico trasparente con velocità superiore a quella della luce nel mezzo. Le molecole sono polarizzate al passaggio della particella. Quando il dipolo temporaneo si depolarizza e le molecole ritornano all'equilibrio viene emessa radiazione luminosa coerente, con un angolo caratteristico  $\theta_C$  (angolo di Cherenkov) rispetto alla direzione della particella carica. Questo angolo si può ricavare dalla relazione:

$$\cos(\theta_C) = \frac{1}{\beta n}, \quad (2.4)$$

dove  $\beta$  è la velocità della particella in unità di velocità della luce ( $\beta = v/c$ ) e  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo. Alla condizione  $v > \frac{c}{n}$ , la radiazione viene quindi emessa sulla superficie di un cono, come è rappresentato in Fig.2.6.

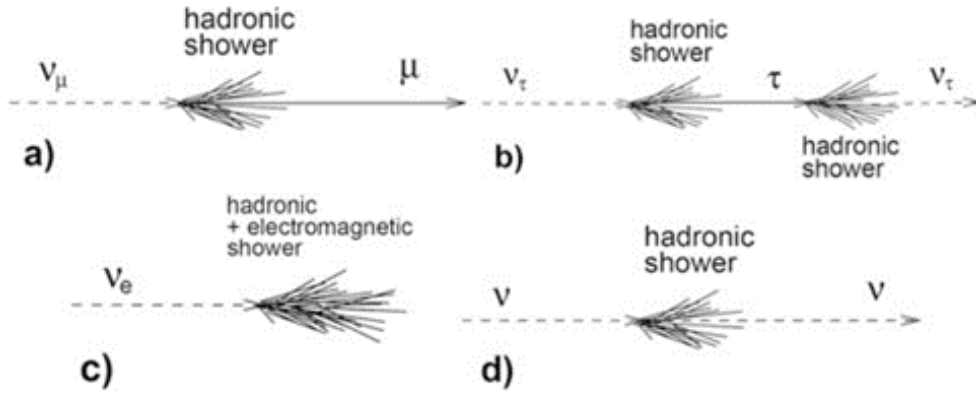


Fig.2.5: Alcune topologie per le interazioni dei neutrini di diverso sapore: (a) l'interazione in CC di  $\nu_\mu$  produce un muone e uno sciame adronico; (b) l'interazione in CC di  $\nu_\tau$  produce un tauone con due sciami adronici (double bang). (c) L'interazione in CC di  $\nu_e$  produce sia uno sciame EM che uno sciame adronico; (d) l'interazione in NC produce uno sciame adronico. Le particelle non possono essere distinte dalla proprie antiparticelle in rivelatori di neutrini sottomarini. Immagine presa da [9].

Per particelle relativistiche ( $\beta \approx 1$ ) che si muovono nell'acqua marina (indice di rifrazione  $n \approx 1.364$ ) l'angolo di Cherenkov risulta  $\theta_C = 43^\circ$  [9]. Il numero di fotoni Cherenkov emessi nell'intervallo di lunghezza d'onda  $d\lambda$ , per unità di distanza  $dx$  da una particella di carica  $e$  è dato da:

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi}{137\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right), \quad (2.5)$$

con  $\lambda$  lunghezza d'onda della radiazione.

Dalla formula si nota che le lunghezze d'onda minori danno contributi più significativi alla radiazione Cherenkov. Le proprietà ottiche dell'acqua dipendono fortemente dalla lunghezza d'onda: la luce viene meglio trasmessa nell'intervallo 350 – 550 nm [11], in cui i fotomoltiplicatori usati da KM3NeT raggiungono il picco massimo di efficienza quantistica.

### 2.3.4 Segnale di fondo

La radiazione Cherenkov emessa dai leptoni carichi generati dall'interazione dei neutrini nel mezzo viene rivelata dai PMTs. Tuttavia, negli eventi registrati dal telescopio è presente un fondo non trascurabile di fotoni provenienti da altri fenomeni fisici, non

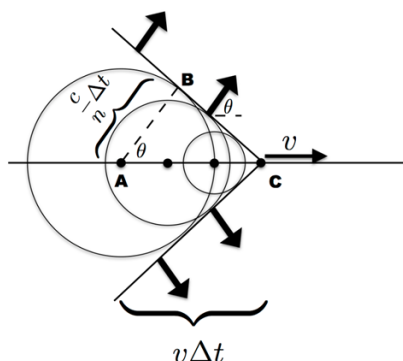


Fig. 2.6: Rappresentazione schematica della radiazione Cherenkov. Il punto C coincide con la particella carica, il punto A è il punto di emissione della radiazione e il punto B è sul fronte d'onda.  $\Delta t$  è il tempo di evoluzione del fronte. Immagine presa da [24].

collegati alle sorgenti astrofisiche di neutrini. Per ottenere dati utili alla ricerca astrofisica è dunque estremamente importante studiare il rumore di fondo per isolarlo dai segnali rilevanti.

### Neutrini e muoni atmosferici

Il contributo principale al fondo è dato dalle interazioni dei neutrini e dei muoni atmosferici, prodotti dall'interazione dei CRs con l'atmosfera terrestre. I neutrini atmosferici (Sez.1.3.1) costituiscono un segnale di fondo non eliminabile per gli esperimenti, quindi per sottrarre il loro contributo si operano dei tagli opportuni sui dati.

I muoni atmosferici possono penetrare nell'atmosfera e attraversare anche diversi km di acqua, possono essere usati per monitorare lo stato in diretta del rivelatore e sono utili per la sua calibrazione. Tuttavia rappresentano la porzione dominante del rumore di fondo, poiché possono essere interpretati come interazioni di neutrini ad alta energia. Il flusso di muoni atmosferici downgoing supera il flusso indotto dall'interazione dei neutrini atmosferici di molti ordini di grandezza e diminuisce con la profondità del rivelatore, come mostrato in Fig.2.7. Per eliminare il contributo dei muoni atmosferici si possono osservare eventi upgoing: il volume terrestre ha così un effetto schermante per il rivelatore.

### Fondo ottico

I fotoni rilevati dai PMTs possono provenire da altri fenomeni fisici, non correlati con i neutrini. Nelle profondità marine i due principali contributi al fondo ottico sono dati dal decadimento del potassio  $^{40}K$  e dalla bioluminescenza.

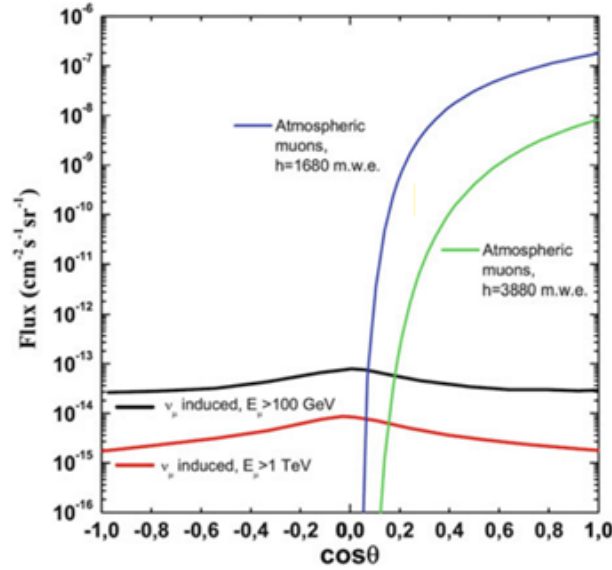


Fig.2.7: Flusso in funzione dell'angolo zenitale  $\theta$  per: (1) muoni atmosferici a due profondità diverse, (2) muoni generati da interazione CC di  $\nu_\mu$  atmosferici, per due diverse energia di soglia  $E_\mu$ . Gli eventi upgoing (downgoing) hanno  $\cos\theta < 0 (> 0)$ . Immagine presa da [9].

Il potassio  $^{40}\text{K}$  è un isotopo radioattivo disciolto naturalmente nell'acqua di mare. I canali di decadimento sono:

$$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \nu_e \quad (BR = 80.3\%), \quad (2.6)$$

$$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu_e + \gamma \quad (BR = 10.7\%). \quad (2.7)$$

Una grande percentuale degli elettroni prodotti dalla prima reazione supera l'energia di soglia per produrre luce Cherenkov. Il fotone che si origina dalla seconda equazione ha energia sufficiente per fare scattering Compton e produrre a sua volta elettroni con energia superiore alla soglia. L'intensità della luce prodotta dal decadimento di  $^{40}\text{K}$  dipende principalmente dalla concentrazione dell'isotopo nell'acqua di mare. Nel mar Mediterraneo la salinità è piuttosto uniforme, quindi l'intensità della luce Cherenkov prodotta è approssimativamente uguale in ogni sito [11].

La bioluminescenza è un fenomeno dovuto ai batteri e agli altri organismi presenti negli abissi marini. Contribuisce con un segnale di diversi ordini di grandezza maggiore rispetto alla luce prodotta dal decadimento di  $^{40}\text{K}$ . I contributi principali sono due: una luminescenza costante prodotta dai batteri e impulsi luminosi più intensi prodotti dagli animali che passano vicino al volume strumentato. Lo spettro tipico è centrato sui

470-480 nm, la lunghezza d'onda di massima trasparenza in acqua e anche il range nel quale i PMTs dei telescopi di neutrini risultano maggiormente sensibili (300-600 nm). La bioluminescenza può variare durante l'anno, è fortemente correlata alla velocità delle correnti marine e diminuisce con la profondità [11].



# Capitolo 3

## Studio dell'area efficace di KM3NeT/ARCA

I dati trasmessi dalle stringhe di rivelazione sono i cosiddetti "hits". Ciascun hit contiene informazioni su tempo di arrivo e ampiezza del segnale rivelato dal singolo fotomoltiplicatore all'interno di uno dei DOM della DU. I dati degli hits vengono utilizzati per ricavare la direzione e l'energia delle particelle cariche secondarie, per ricostruire poi quelle dei neutrini iniziali.

La ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini richiede una buona risoluzione, sia angolare che energetica, oltre ad una buona efficienza di rivelazione per identificare le tracce dei leptoni carichi. L'area efficace esprime l'efficienza di rivelazione di un telescopio a neutrini come KM3NeT/ARCA.

### 3.1 Area efficace e numero di eventi attesi in un telescopio di neutrini

I rivelatori che devono rivelare singoli neutrini (o particelle in generale) ad alta energia hanno un'efficienza intrinseca  $\epsilon(E_\nu)$ , che dipende sia dall'energia sia dalla direzione di provenienza delle particelle osservate. L'efficienza strumentale per la rivelazione di neutrini in funzione dell'energia e della direzione è espressa dall'area efficace. Questa grandezza è definita come l'area di un rivelatore con il 100% di efficienza e dipende dal sapore del neutrino, dal tipo di interazione (traccia o sciame, in CC o NC), dall'energia del neutrino e dalla sua direzione, dallo stato del rivelatore e dai tagli effettuati sul segnale di fondo. Il calcolo dell'area efficace si effettua usando simulazioni Monte Carlo dettagliate e dedicate per ogni singolo caso, per ogni sorgente.

La risposta di un rivelatore a simmetria cilindrica perfettamente efficiente è uniforme al variare dell'angolo azimutale, ma varia con l'angolo zenitale e con l'energia dei

neutrini. Infatti, se i neutrini attraversano una porzione maggiore di interno terrestre, quelli ad altissime energie vengono assorbiti e si osserva una diminuzione dell'area efficace. Questo effetto comincia ad essere non trascurabile a partire dalle decine di TeV e diventa estremamente significativo al PeV. In questo caso l'andamento dell'area efficace in funzione dell'energia sarà analogo a quello della sezione d'urto (si veda Fig.2.3).

L'area efficace per un  $\nu_\mu$  in CC, ad esempio, si calcola in funzione dell'energia, della probabilità del neutrino di non essere assorbito dalla Terra e di interagire sufficientemente vicino al rivelatore, della probabilità del muone generato di raggiungere il volume strumentato e di produrre abbastanza luce Cherenkov per la ricostruzione. L'area efficace si stima in questo caso con la formula analitica:

$$A_{\nu_\mu}^{eff} = A \cdot P_{\nu_\mu}(E_\nu, E_{thr}^\mu) \cdot \epsilon \cdot e^{-\sigma(E_\nu) \cdot \rho \cdot N_A \cdot Z(\theta)}, \quad (3.1)$$

in cui:

- $A$  [ $cm^2$ ] è l'area geometrica del rivelatore proiettata rispetto alla direzione della sorgente.
- $P_{\nu_\mu}(E_\nu, E_{thr}^\mu)$  è la probabilità che un neutrino con energia  $E_\nu$  produca un muone che arrivi al rivelatore con energia residua di soglia  $E_{thr}$ .
- $\epsilon = \epsilon_t \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_c$  è la frazione di muoni con energia  $E_{thr}$ , prodotto tra le efficienze di trigger e di ricostruzione e la probabilità di passare il taglio di selezione.
- $\sigma(E_\nu)$  è la sezione d'urto totale del neutrino.
- $\rho \cdot N_A$  è la densità di nucleoni del target.
- $Z(\theta)$  è il cammino del neutrino nel volume terrestre con  $\theta$  l'angolo zenitale del neutrino, rispetto al nadir.

### 3.1.1 Numero di eventi attesi

L'area efficace integrata in convoluzione con il flusso differenziale di neutrini, atteso da una sorgente nel tempo di osservazione, fornisce direttamente il numero di eventi attesi. Il numero di eventi per unità di tempo è dato da:

$$\frac{N_\nu}{T} = \int \frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu}(E_\nu) \cdot A_\nu^{eff} dE_\nu, \quad (3.2)$$

con  $N_\nu$  il numero di eventi attesi,  $T$  il tempo di osservazione,  $\frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu}(E_\nu)$  il flusso differenziale del segnale in funzione dell'energia dei neutrini,  $A_\nu^{eff}$  l'area efficace e  $dE_\nu$  l'intervallo di energia infinitesimo.

## 3.2 Area efficace di KM3NeT/ARCA

Nei grafici sottostanti (Fig.3.1, 3.2, 3.3), è stata riprodotta l'area efficace di un blocco strumentato da 115 DUs di KM3NeT/ARCA a livello di trigger, ovvero senza applicare selezioni sugli eventi rivelati e senza ottimizzare i parametri di ricostruzione. I dati sono stati presi dalle simulazioni Monte Carlo fornite dalla collaborazione di KM3NeT, solo per il canale di interazione in corrente carica (CC) con scattering profondamente anelastico. È stata presa l'area efficace per (anti)neutrini elettronici e muonici, divisi per sapore. L'area efficace, per come è definita, riflette l'andamento caratteristico della sezione d'urto riportata in Fig.2.3: la curva per i neutrini è sempre maggiore di quella per gli antineutrini e si osserva un appiattimento sopra il PeV. Il telescopio è ottimizzato per osservare ad energie superiori a  $10^2$  GeV, il livello di trigger, e fino a  $10^8$  GeV.

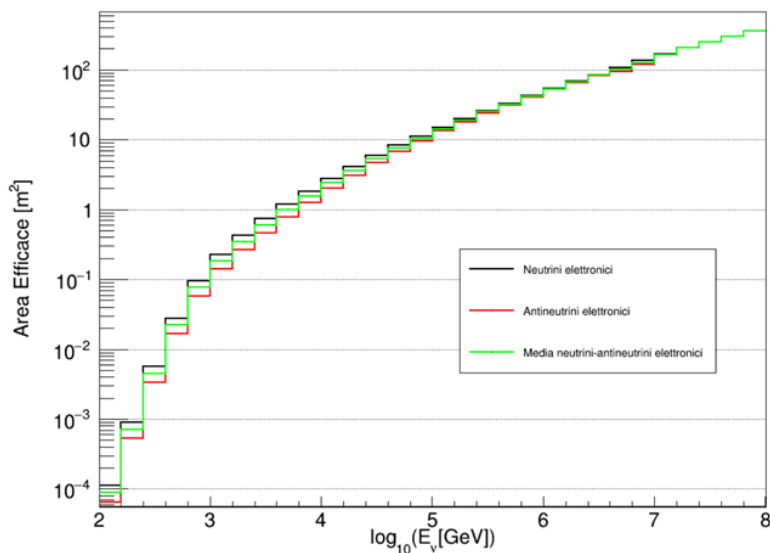


Fig.3.1: Grafico dell'area efficace di un blocco strumentato di KM3NeT/ARCA per i neutrini e gli antineutrini elettronici, mediata sui contributi provenienti da tutte le direzioni del cielo, in funzione del logaritmo dell'energia simulata. La linea verde è l'area efficace media tra le due.

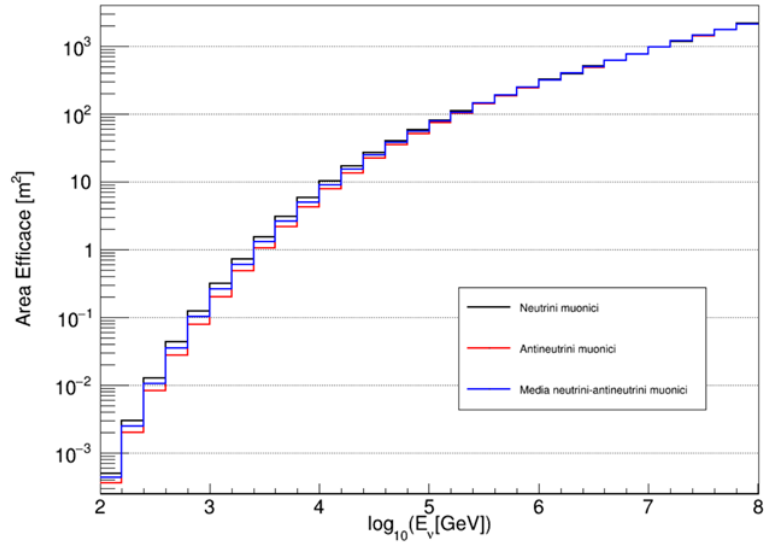


Fig.3.2: Grafico dell'area efficace di un blocco strumentato di KM3NeT/ARCA per i neutrini e gli antineutrini muonici, mediata sui contributi provenienti da tutte le direzioni del cielo, in funzione del logaritmo dell'energia simulata. La linea blu è l'area efficace media tra le due.

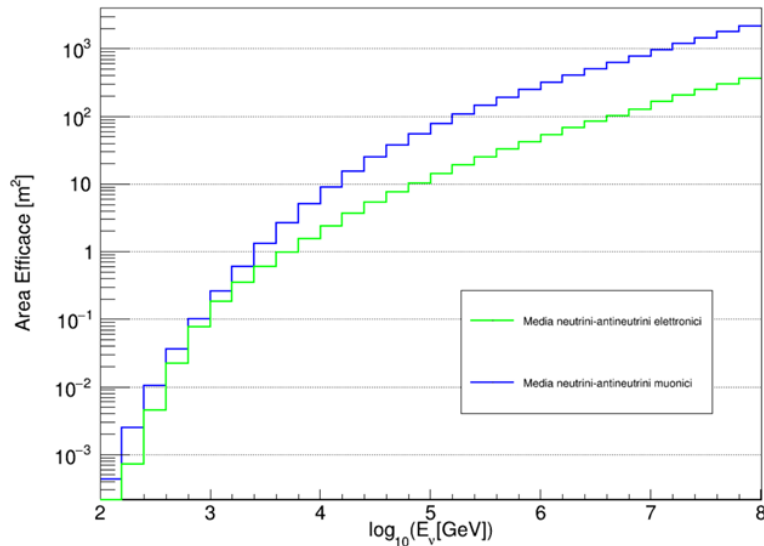
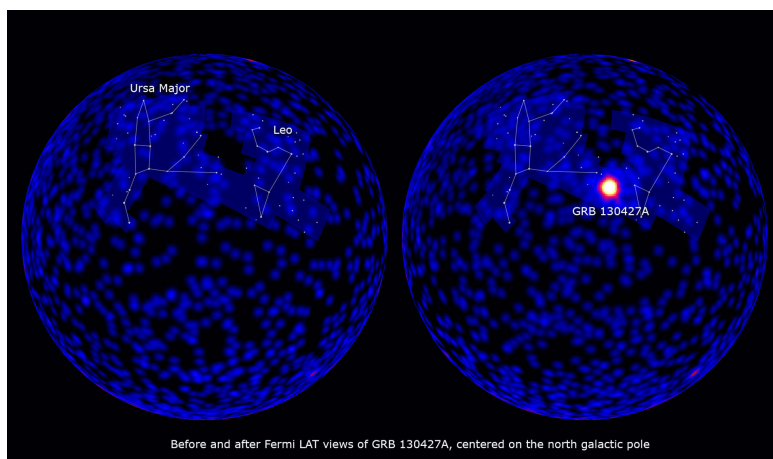


Fig.3.3: Grafico comparativo dell'area efficace media di un blocco strumentato di KM3NeT/ARCA per gli (anti)neutrini di sapori elettronico e muonico, in funzione del logaritmo dell'energia simulata.

### 3.3 Segnale atteso con un flusso astrofisico

Si vuole stimare la risposta del rivelatore di KM3NeT/ARCA ad un ipotetico flusso astrofisico, per calcolare il numero di eventi attesi con un blocco di 115 DUs in presa dati. Per avere un segnale verosimile è stato scelto il Gamma Ray Burst GRB130427A, rivelato da diversi telescopi spaziali a raggi gamma il 27 aprile 2013 alle 07:47:06.42 UTC, ad ascensione retta 11:32:32.90 e declinazione +27:41:56.5 (J2000). In Fig.3.4 si può vedere la ricostruzione dell'evento dai dati del telescopio Fermi-LAT. È stato uno dei più intensi GRBs mai registrati, con una fluensa di fotoni dell'ordine di  $10^{-3} \text{ erg/cm}^2$ .



*Fig.3.4: Il cielo visto da Fermi-LAT tre ore prima l'evento di GRB130427A (a sinistra) e durante l'osservazione dell'evento (a destra). Credits: NASA.*

La fluensa usata in questo lavoro è stata presa dallo studio [25] e fa riferimento ad un ipotetico burst di neutrini avvenuto durante il T90 dell'emissione in raggi gamma. I dati della fluensa a Terra (ovvero l'energia per unità di area già integrata sul T90, divisa per sapore e in funzione dell'energia), sono stati rappresentati nei grafici in Fig.3.5, 3.6, 3.7. Il range energetico del segnale è compreso tra  $10^3 \text{ GeV}$  e  $10^{10} \text{ GeV}$ .

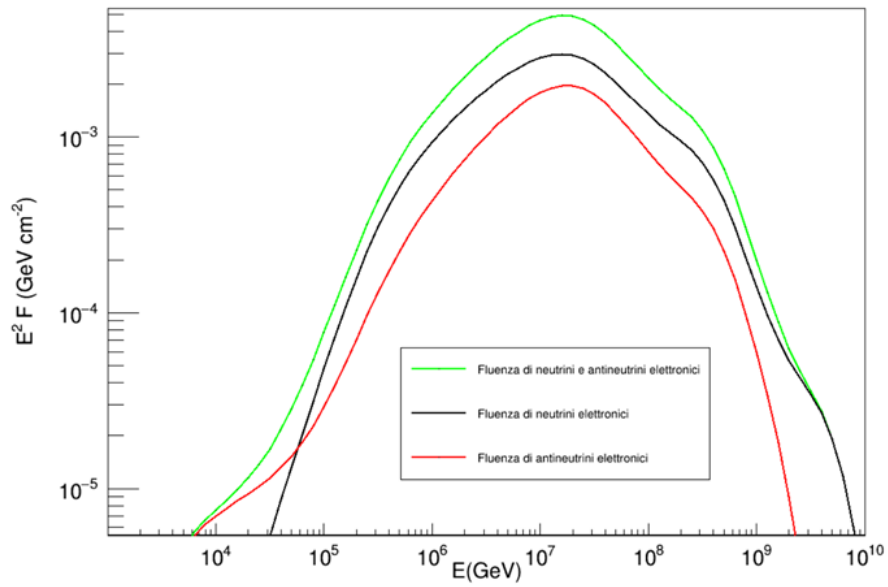


Fig.3.5: Grafico della fluenza simulata di neutrini e antineutrini elettronici espressa in funzione dell'energia.  $F$  è la fluenza differenziale. La linea verde è la somma delle due fluenze.

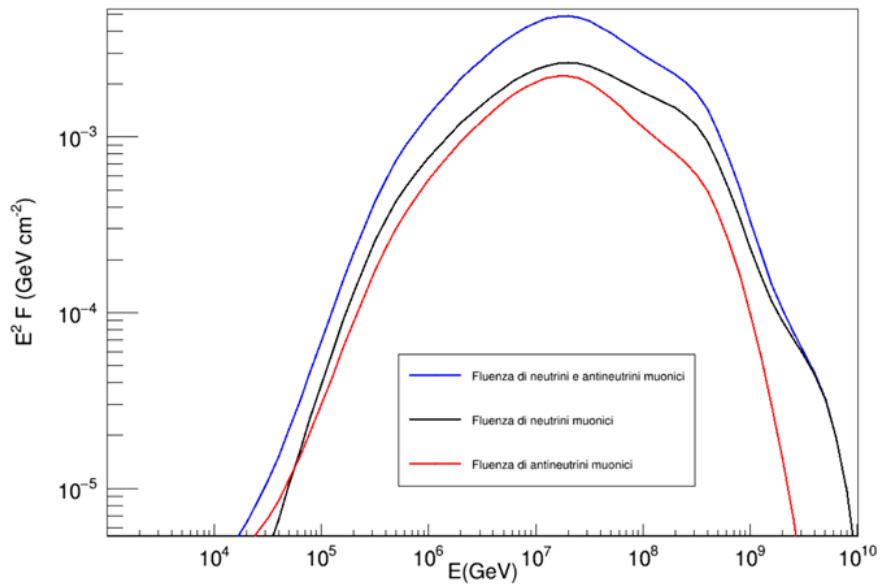


Fig.3.6: Grafico della fluenza simulata di neutrini e antineutrini muonici espressa in funzione dell'energia.  $F$  è la fluenza differenziale. La linea blu è la somma delle due fluenze.

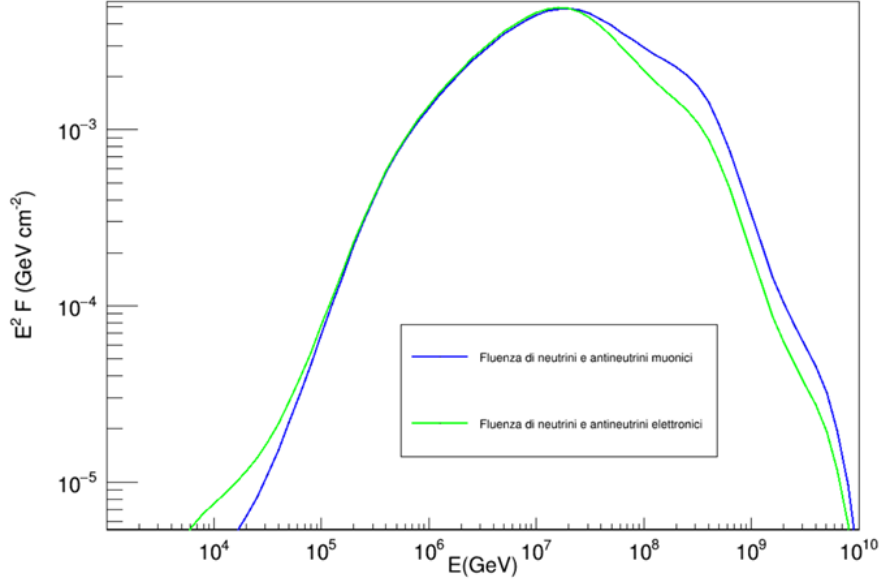


Fig.3.7: Grafico comparativo della fluenza simulata di neutrini e antineutrini muonici ed elettronici espressa in funzione dell'energia.  $F$  è la fluenza differenziale.

Per calcolare il numero di eventi attesi, è stato effettuato un integrale di convoluzione del prodotto tra la fluenza e l'area efficace. Come fluenza è stata presa la somma tra i contributi dei neutrini e degli antineutrini, mentre l'area efficace è stata presa come media tra quella per i neutrini e quella per gli antineutrini. Entrambe le grandezze sono state considerate distinte per i canali elettronico e muonico. Il numero di eventi attesi per il sapore  $s$  e per il bin energetico  $i$ -esimo  $N_{s,i}$  è dato da:

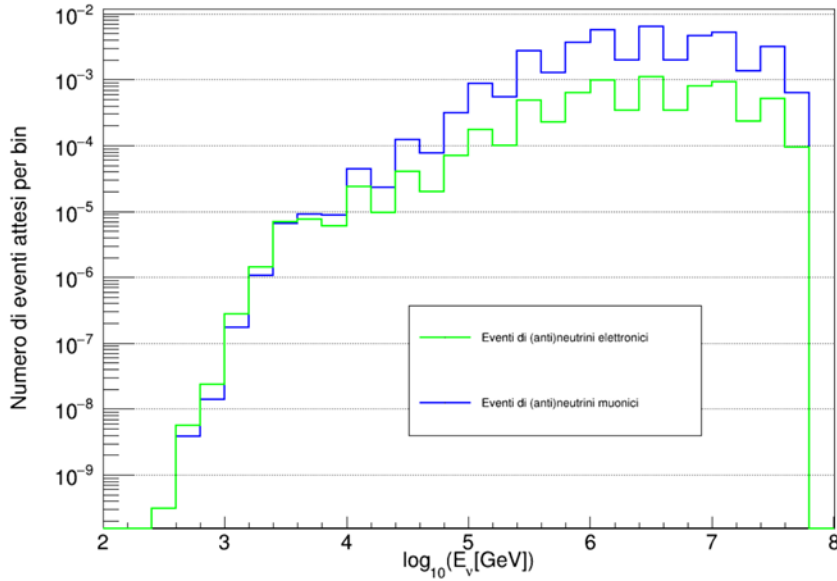
$$N_{s,i} = A_{eff,i} \cdot (E_{max,i} - E_{min,i}) \cdot \left. \frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu dS} \right|_i, \quad (3.3)$$

dove  $A_{eff,i}$  è l'area efficace in  $cm^2$ ,  $(E_{max,i} - E_{min,i})$  è il range energetico del bin  $i$ -esimo e  $\frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu dS}$  è la fluenza differenziale (per unità di energia), in  $GeV^{-1}cm^{-2}$ . È stato moltiplicato il contenuto, bin per bin, di area efficace e fluenza per ottenere il numero di eventi attesi per ogni sapore in funzione del bin energetico (Fig.3.8). Successivamente, sono stati calcolati gli integrali degli istogrammi per avere il numero totale di eventi attesi per gli (anti)neutrini elettronici e muonici. Il numero di eventi attesi è risultato in totale di:

- $N_e = 0.0071$  per il canale elettronico,

- $N_\mu = 0.041$  per il canale muonico.

Questo conferma che nell'osservazione di segnali astrofisici il contributo maggiore agli eventi, di almeno un ordine di grandezza, sarebbe dato dal sapore muonico. Questa differenza è dovuta principalmente alla maggiore area efficace del telescopio per gli (anti)neutrini muonici (vedi Fig.3.3).



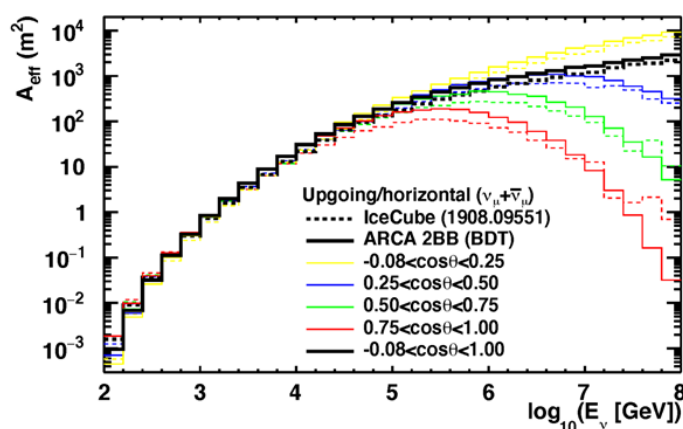
*Fig.3.8: Grafico del numero di eventi attesi in funzione del logaritmo dell'energia, per i due sapori analizzati.*

È importante sottolineare che l'area efficace usata per calcolare la convoluzione non contiene una dipendenza dall'angolo zenitale della sorgente, ma è integrata su tutto il cielo. Questa è una buona prima approssimazione per il calcolo di eventi attesi per un generico evento astrofisico. Per eventi puntiformi e transienti, tuttavia, si dovrebbe utilizzare l'area efficace calcolata alla declinazione esatta. Il GRB analizzato, che è avvenuto quando KM3NeT/ARCA non era ancora in presa dati, sarebbe risultato un evento downgoing per un telescopio di neutrini situato nel Mediterraneo. In un caso come questo, per uno studio più dettagliato, oltre all'utilizzo dell'area efficace calcolata all'angolo zenitale specifico, si dovrebbero applicare sicuramente dei tagli per ridurre il rumore di fondo di neutrini e muoni atmosferici. Se il segnale ipotetico fosse invece upgoing, ci sarebbero assorbimenti significativi degli (anti)neutrini alle più alte energie. La conseguenza sarebbe una diminuzione dell'area efficace (come mostrato nella Fig.3.9)



e quindi degli eventi attesi sopra il PeV.

Secondo questa stima, avendo ottenuto un numero di eventi attesi pari a 0.041 e 0.0071, rispettivamente per i sapori muonico ed elettronico, la probabilità di osservare un GRB con questa fluenza è praticamente nulla per KM3NeT/ARCA. Statisticamente, con un blocco da 115 DUs, bisognerebbe attendere 25 GRBs analoghi per riuscire a rivelare un singolo (anti)neutrino muonico proveniente da essi, assumendo che non ci sia rumore di fondo.



*Fig.3.9: Area efficace in funzione dell'energia dei neutrini per due blocchi di KM3NeT/ARCA, con tagli di selezione sulla direzione di arrivo e ottimizzazione sui parametri di ricostruzione. I diversi colori indicano l'andamento dell'area efficace al variare dell'angolo zenitale  $\theta$ . La linea nera rappresenta l'area efficace integrata sul cielo upgoing, ottenuta considerando anche il contributo di eventi orizzontali. L'area efficace di IceCube è stata presa da [26]. Immagine presa da [27].*

## Conclusioni

Dallo studio dell'area efficace di KM3NeT/ARCA, con i dati delle simulazioni fornite dalla collaborazione KM3NeT, è emerso un andamento in funzione dell'energia correlato con quello della sezione d'urto di neutrini e antineutrini, coerente con la definizione di questa grandezza. In particolare, l'area efficace per i neutrini è maggiore rispetto a quella per gli antineutrini ed entrambe hanno un appiattimento sopra il PeV.

Una prima stima del numero di eventi attesi per un flusso transiente da GRB ha confermato che per un evento di questo tipo il contributo più significativo sarebbe dato dai neutrini e dagli antineutrini muonici (0.041 eventi attesi) piuttosto che da quelli elettronici, che avrebbero un contributo di un ordine di grandezza minore (0.0071 eventi attesi). La probabilità di osservare un GRB con questa fluenza è quindi praticamente nulla per un blocco strumentato di KM3NeT/ARCA. Statisticamente, bisognerebbe attendere 25 GRBs analoghi per riuscire a rivelare un singolo evento, assumendo che non ci sia rumore di fondo.

In questo lavoro è stata utilizzata un'area efficace integrata su tutto il cielo. Tuttavia un'analisi più raffinata richiederebbe simulazioni Monte Carlo che tengano conto della posizione nel cielo e in particolare dell'angolo zenitale del GRB, per il calcolo dell'area efficace e quindi del numero di eventi attesi.

# Bibliografia

- [1] M. Spurio S. Braibant G. Giacomelli. *Particelle e interazioni fondamentali, 2a edizione*. Springer, 2012.
- [2] C. L. Cowan Jr. et al. “Detection of the Free Neutrino: A Confirmation.” In: *Science* 124.3212 (July 1956), pp. 103–104. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.124.3212.103>.
- [3] Aker M. et al. “First direct neutrino-mass measurement with sub-eV sensitivity.” In: *arXiv e-prints, arXiv:2105.08533. arXiv: 2105.08533 [hep-ex]* (May 2021). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.08533>.
- [4] The KATRIN Collaboration. “Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity”. In: *Nature Physics* 18 (2022), pp. 160–166. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01463-1>.
- [5] R.L. Workman et al. (Particle Data Group). “Prog.Theor.Exp.Phys. 2022, 083C01 (2022) and 2023 update”. In: (). URL: <http://pdg.ge.infn.it/2023/listings/rpp2023-list-neutrino-prop.pdf>.
- [6] Lisi E Camilleri L e Wilkerson J. “Neutrino Masses and Mixings: Status and Prospects”. In: *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 58 (2008), pp. 343–369. DOI: [10.1146/annurev.nucl.57.090506.123038](https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.57.090506.123038).
- [7] *Ithaca: Viaggio nella Scienza Numero, VI Anno, 2015, Dipartimento di Matematica e Fisica “Ennio De Giorgi” dell’Università del Salento*.
- [8] *Highlights from the ANTARES neutrino telescope*. URL: <https://indico.cern.ch/event/1034990/contributions/4663420/attachments/2370969/4049325/Epiphany-ANTARES.pdf>.
- [9] Maurizio Spurio. *Probes of Multimessenger Astrophysics. Charged Cosmic Rays, Neutrinos,  $\gamma$  – Rays and Gravitational Waves (Second Edition)*. Springer, 2018.
- [10] Raffelt G. Vitagliano E. Tamborra I. “Grand Unified Neutrino Spectrum at Earth: Sources and Spectral Components”. In: *arXiv e-prints* (Dec. 2020). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.11878>.

- [11] M. Spurio T. Chiarusi. “High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes”. In: *arXiv e-prints* (Nov 2009). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.0906.2634>.
- [12] F. Vissani A. Palladino M. Spurio. “Neutrino Telescopes and High-Energy Cosmic Neutrinos”. In: *arXiv e-prints* (Sep 2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/universe6020030>.
- [13] R. A. Olson R. W. Klebesadel I. B. Strong. “Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin”. In: *Astrophysical Journal of Letters* 182, L85 (June 1973). DOI: [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/1973ApJ...182L..85K/doi:10.1086/181225](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1973ApJ...182L..85K/doi:10.1086/181225).
- [14] J. S. Woosley S. E. Bloom. “The Supernova Gamma-Ray Burst Connection”. In: *Annual Review of Astron and Astrophys* 44 (Sept. 2006), pp. 507–556. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.43.072103.150558>.
- [15] Karttunen H. et al. *'Fondamenti di Astronomia'. A cura di A. Cimatti e P. Focardi*. UTET Università, 2023.
- [16] B. P. Abbott et al. “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger\*.” In: *ApJL* (2017). DOI: [10.3847/2041-8213/aa91c9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9).
- [17] G. Ghisellini. “Gamma ray bursts: some facts and ideas”. In: *arXiv e-prints* (Nov. 2001). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0111584>.
- [18] *ANTARES Collaboration*. URL: <https://antares.in2p3.fr/>.
- [19] KM3NeT Collaboration. “Letter of intent for KM3NeT 2.0”. In: *Journal of Physics G Nuclear Physics* 43, 084001. *arXiv: 1601.07459* (Aug 2016). DOI: <https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>.
- [20] Soto A. G. et al. “Astronomy potential of KM3NeT/ARCA.” In: *arXiv: 2402.08363v2 [astro-ph.HE]* (29 Mar 2024). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.08363>.
- [21] *KM3NeT Collaboration*. URL: <https://www.km3net.org/>.
- [22] S Adrian Martinez et al. “Letter of intent for KM3NeT 2.0.” In: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.8 (giu. 2016). DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>.
- [23] J. Pumplin et al. “New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analysis.” In: *JHEP* (2002). DOI: <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2002/07/012>.
- [24] URL: [https://casper.astro.berkeley.edu/astrobaki/index.php/Cherenkov\\_Radiation](https://casper.astro.berkeley.edu/astrobaki/index.php/Cherenkov_Radiation).
- [25] Silvia Celli. “Search for high-energy neutrinos from GRB130427A with the ANTARES neutrino telescope.” In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 689 012011 (2016). DOI: [10.1088/1742-6596/689/1/012011](https://doi.org/10.1088/1742-6596/689/1/012011).

- [26] M. G. et al. Aartsen. “Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data.” In: *Phys. Rev. Lett.* *124*, 051103. *arXiv:1910.08488* (2020). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.08488>.
- [27] A. G. et al. Soto. “Sensitivity estimates for diffuse, point-like, and extended neutrino sources with KM3NeT/ARCA.” In: *JINST* *16*, C09030. *arXiv:2107.13050* (2021). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.13050>.