

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

Studi di visibilità per il telescopio di neutrini KM3NeT/ARCA

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Matteo Giacomo Bernardi

Correlatore:
Dott. Francesco Filippini

Anno Accademico 2022/2023

Abstract

Il telescopio KM3NeT/ARCA è un rivelatore di neutrini posizionato in fondo al Mar Mediterraneo. Esso colleziona la luce prodotta per effetto Cherenkov dal passaggio di particelle cariche risultanti dalle interazioni del neutrino con la materia circostante. L'obiettivo della sua ricerca è di raccogliere dati al fine di studiare sorgenti di neutrini astrofisici ad alta energia. In questo modo, complementando le osservazioni effettuate tramite raggi cosmici e radiazione elettromagnetica, è possibile ottenere una descrizione più dettagliata del cosmo.

In questa trattazione si è analizzato un dataset relativo ad una simulazione Monte Carlo. Dopo un primo confronto tra i dati della generazione e quelli forniti dall'algoritmo di ricostruzione degli eventi di KM3NeT, si sono prodotte alcune mappe del cielo Healpix per visualizzare il cielo visibile dal telescopio e la distribuzione celeste degli eventi in funzione della loro energia. Si riscontra un accordo della distribuzione degli eventi con il comportamento atteso al crescere dell'energia e dell'angolo zenitale. Infine, un ricampionamento dei dati ha consentito un notevole aumento della statistica e quindi una maggiore definizione delle mappe in questione.

Indice

Introduzione	1
1 Astronomia con neutrini	2
1.1 Elementi di fisica del neutrino	2
1.1.1 Caratteristiche fisiche	2
1.1.2 Oscillazione del neutrino	4
1.2 Astronomia multimessaggera e sorgenti di neutrini	6
1.2.1 Raggi Cosmici	6
1.2.2 Neutrini cosmici	8
1.2.3 Neutrini atmosferici	9
1.2.4 Sorgenti galattiche ed extragalattiche	9
2 Telescopio KM3NeT/ARCA	11
2.1 Rivelazione del neutrino	11
2.1.1 Effetto Cherenkov	11
2.1.2 Classificazione degli eventi	12
2.2 KM3NeT	16
2.2.1 Struttura del telescopio KM3NeT/ARCA	16
2.2.2 Moduli ottici	17
2.2.3 Sorgenti di background	19
2.2.4 Cielo visibile	20
3 Studi di visibilità	21
3.1 Generazioni Monte Carlo	21
3.2 Mappe del cielo Healpix	23
3.2.1 Sistemi di coordinate	24

3.3	Elaborazione dati	25
3.3.1	Descrizione del dataset	25
3.3.2	Analisi di visibilità	26
3.3.3	Dipendenza dall'energia della distribuzione degli eventi	28
3.3.4	Ricampionamento dei dati	32
	Conclusioni	35

Introduzione

I neutrini sono le particelle più misteriose del modello standard, tanto che ancora non è stato possibile fare luce su alcune sue caratteristiche che potrebbero differenziarli dalle altre particelle elementari conosciute. Tuttavia, si hanno oggi conoscenze sufficienti per rivellarli e per studiarne la natura.

La fisica multimessaggera è una disciplina sviluppatasi negli ultimi anni, che si occupa della rivelazione di diverse tipologie di sonde provenienti dal cosmo, al fine di caratterizzare le sorgenti astrofisiche che le hanno prodotte. Tra le possibili tipologie di sonde, questo documento si concentra proprio sulla rivelazione di neutrini astrofisici di alta energia, e sulle tecniche utilizzate in questo ambito.

L'idea di un telescopio di neutrini, basata sulla rivelazione di particelle risultanti dalla loro interazione con la materia, è nata già negli anni 60, ad opera del fisico russo Markov [1], ma la sua realizzazione è stata possibile soltanto con le tecnologie acquisite negli ultimi anni. Questa strategia consente di rivelare neutrini con energie superiori al PeV, molto più elevate di quelle raggiungibili da un'acceleratore di particelle, richiedendo però un volume strumentato dell'ordine del km^3 .

La collaborazione europea KM3NeT, nata dall'esperienza acquisita con il telescopio ANTARES, sta sviluppando una rete di telescopi di neutrini posizionati sul fondale del Mar Mediterraneo, al fine di studiare sia aspetti delle caratteristiche intrinseche del neutrino, sia le possibili sorgenti di neutrini astrofisici.

Nonostante non siano ancora stati completati, entrambi i rivelatori sono già in grado di acquisire dati, con i quali è stata svolta un'analisi del cielo visibile dal telescopio ARCA, riportata nel terzo capitolo di questo documento.

Capitolo 1

Astronomia con neutrini

1.1 Elementi di fisica del neutrino

Secondo la teoria del Modello Standard, i neutrini sono leptoni di spin $1/2$, privi di carica elettrica e di colore e dotati di una massa piccolissima, tale che con i mezzi attualmente a disposizione è possibile soltanto stabilire dei limiti superiori ad essa. Essi sono continuamente prodotti in natura, in ambienti astrofisici come all'interno della nostra Galassia, nel Sole o in esplosioni di Supernovae, ma anche nell'atmosfera terrestre. Nonostante ciò, per via della loro bassissima probabilità di interazione con la materia, la loro rivelazione risulta relativamente complessa.

1.1.1 Caratteristiche fisiche

I neutrini esistono in tre sapori, uno per ogni famiglia leptonica (e, μ, τ). L'unica interazione fondamentale a cui sono soggetti è quella debole, considerando trascurabile quella gravitazionale, quindi i processi che li coinvolgono sono mediati da bosoni W^\pm e Z^0 . A seconda della carica elettrica del bosone mediatore, possono interagire in processi a corrente carica (CC) o a corrente neutra (NC). Indicando con N un nucleone e con X il sistema adronico formatosi dall'interazione, si possono riassumere i processi rilevanti

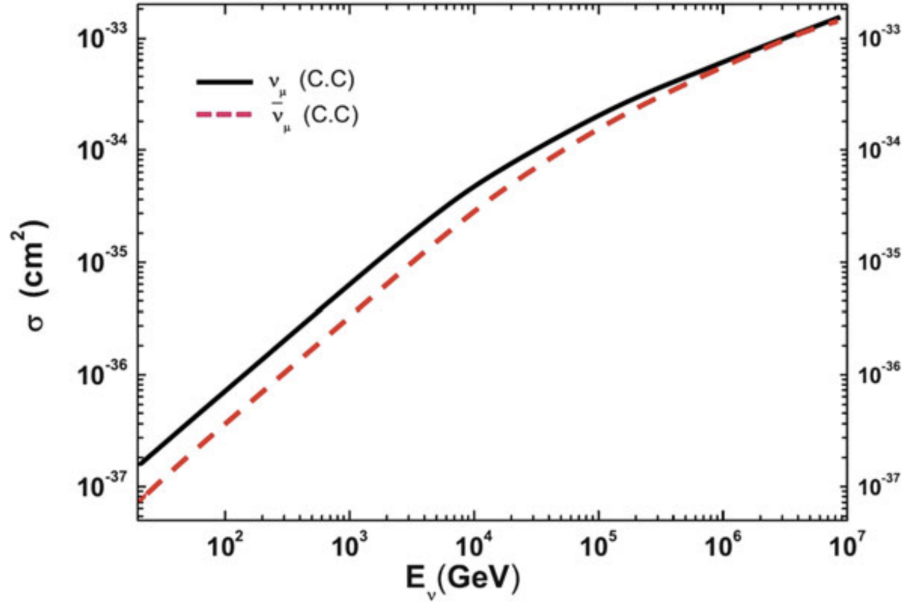


Figura 1.1: Andamento della sezione d'urto di ν_μ e $\bar{\nu}_\mu$ in funzione dell'energia. Si noti che l'andamento si può considerare lineare fino ad energie $E_\nu \sim 10$ TeV, mentre per valori superiori l'andamento risulta smorzato. Fonte: [2].

per la rivelazione del neutrino come:

$$\nu_l + N \rightarrow l + X \quad \text{Interazione CC} \quad (1.1)$$

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X \quad \text{Interazione NC} \quad (1.2)$$

dove l è uno dei tre sapori leptonici.

È importante sottolineare che i neutrini sono caratterizzati da una sezione d'urto piccolissima, che ha un andamento proporzionale all'energia, approssimativamente come:

$$\sigma \simeq 10^{-38} E_\nu / \text{GeV} \quad [\text{cm}^2] \quad (1.3)$$

In figura 1.1 si riporta a titolo esemplificativo la dipendenza dall'energia della sezione d'urto di neutrini e antineutrini muonici.

Parallelamente alla sezione d'urto, si possono fare alcune considerazioni sul libero cammino medio (λ) del neutrino per apprezzare meglio la sua elusività. Questa grandezza rappresenta la distanza media che esso percorre mediamente prima di interagire con un

ipotetico bersaglio fisso. Considerando un rivelatore in acqua e assumendo $E_\nu = 1$ TeV, si ottiene $\lambda \simeq 2 \times 10^9$ m [2].

Queste caratteristiche evidenziano la necessità di rivelatori di grandi dimensioni, al fine di aumentare la probabilità di osservare un evento riconducibile al passaggio di un neutrino.

1.1.2 Oscillazione del neutrino

La scoperta del fenomeno di oscillazione del neutrino è relativamente recente, ed è stata annunciata da due esperimenti indipendenti: nel 1998, Super-Kamiokande ha misurato una discrepanza tra il flusso atteso di neutrini atmosferici e quello misurato, mentre l'esperimento canadese SNO (Sudbury Neutrino Observatory) ha pubblicato nel 2002 osservazioni simili rispetto ai flussi di neutrini solari.

Questa proprietà quantomeccanica del neutrino è dovuta al fatto che massa e sapore sono per i neutrini due osservabili incompatibili. Ciò significa che non è possibile determinare simultaneamente il sapore e la massa del neutrino: infatti l'autostato di sapore in cui il neutrino è generato è una sovrapposizione coerente di autostati di massa, generalmente indicati con ν_i ($i = 1, 2, 3$). La relazione che intercorre tra gli autostati di massa ν_i e gli autostati di sapore ν_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) è determinata dalla matrice unitaria 3×3 di Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata (PMNS), per cui si può scrivere:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{\mu 1} & U_{\tau 1} \\ U_{e2} & U_{\mu 2} & U_{\tau 2} \\ U_{e3} & U_{\mu 3} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

dove i parametri $U_{\alpha i}$ sono funzione di tre angoli di mescolamento θ_{ij} e di una fase complessa. Si noti che ogni autostato di massa evolverà nel tempo come un'onda con una fase dipendente dalla quantità di moto p , e quindi dal valore della massa e dall'energia iniziale. La diversa frequenza di propagazione delle onde darà luogo a un fenomeno di interferenza. Nello specifico, un neutrino prodotto in un determinato autostato di sapore, con energia fissata E_ν , avrà una certa probabilità non nulla di trovarsi in una diversa sovrapposizione di autostati di massa, diversa da quella iniziale, dopo aver percorso una certa distanza. La probabilità che ciò avvenga dipende dagli angoli di mescolamento θ_{ij} e dalla differenza delle masse al quadrato Δm_{ij}^2 .

Tuttavia, l'ordine degli autostati di massa rappresenta una questione irrisolta, nota come problema della gerarchia di massa. Inoltre, il fenomeno di oscillazione dei neutrini non fornisce informazioni sul valore assoluto della massa, in quanto il pattern di oscillazione dipende dalla differenza degli autostati. Attualmente sono soltanto stati posti dei limiti sul valore assoluto della massa, sia da esperimenti sia da considerazioni cosmologiche [3].

1.2 Astronomia multimessaggera e sorgenti di neutrini

Con l'espressione *astronomia multimessaggera* ci si riferisce ad una serie (coordinata o casuale) di osservazioni di diversi tipi di sonde, quali raggi cosmici, neutrini, onde gravitazionali, e la radiazione elettromagnetica di ogni frequenza. L'informazione raccolta, una volta combinata, permette di ottenere una descrizione più dettagliata della sorgente che ha emesso tali segnali.

1.2.1 Raggi Cosmici

I raggi cosmici *primari* sono particelle cariche prodotte direttamente in specifici *siti di accelerazione*, e sono costituiti al 90% da protoni, al 9% da nuclei di elio e per il restante 1% da nuclei di atomi più pesanti, tralasciando una piccola frazione di antimateria stabile (positroni e antiprotoni).

Lo spettro energetico dei raggi cosmici si estende per oltre 10 ordini di grandezza, fino a poco più di 10^{20} eV, e il loro flusso segue un andamento esponenziale del tipo $\Phi \propto KE^{-\alpha}$ (si veda il grafico in figura 1.2).

In base ai risultati sperimentali, il parametro α risulta diverso in alcuni range energetici ben definiti:

- dai 10 GeV a 1 PeV, $\alpha = 2.7$;
- da 1 PeV a 1 EeV, $\alpha = 3.1$;
- sopra i 10 EeV, $\alpha \sim 2.6$, e si osserva un netto calo attorno ai 10^{20} eV.

Le regioni di transizioni tra i suddetti range vengono denominate rispettivamente *knee*, intorno a ~ 3 PeV, e *ankle*, a ~ 3 EeV.

Questo documento si concentra in particolare sulla rivelazione di neutrini, che complementa lo studio degli altri "messaggeri", risultando di fondamentale importanza per l'identificazione di sorgenti astrofisiche e per la comprensione del meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici.

Come già visto, i neutrini sono caratterizzati da una ridotta sezione d'urto e da un elevato libero cammino medio. Proprio per questi motivi, e per il fatto che non sono

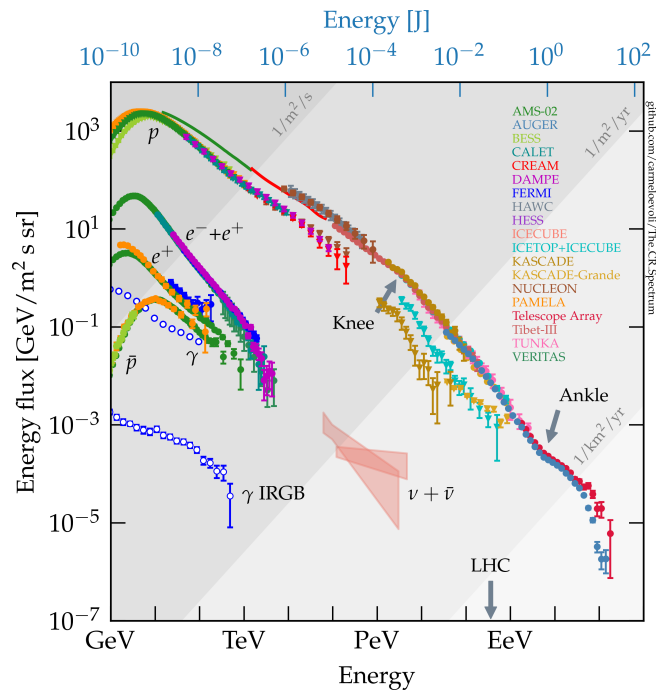


Figura 1.2: Flusso di raggi cosmici rilevati, suddivisi in base all'esperimento che ha condotto le osservazioni. Per bassi valori energetici viene riportato anche il contributo di elettroni, positroni e antiprotoni. Si notino anche le porzioni di area in rosso, che rappresentano le diverse osservazioni di flussi diffusi di neutrini astrofisici, misurati dalla collaborazione IceCube. Fonte: [4].

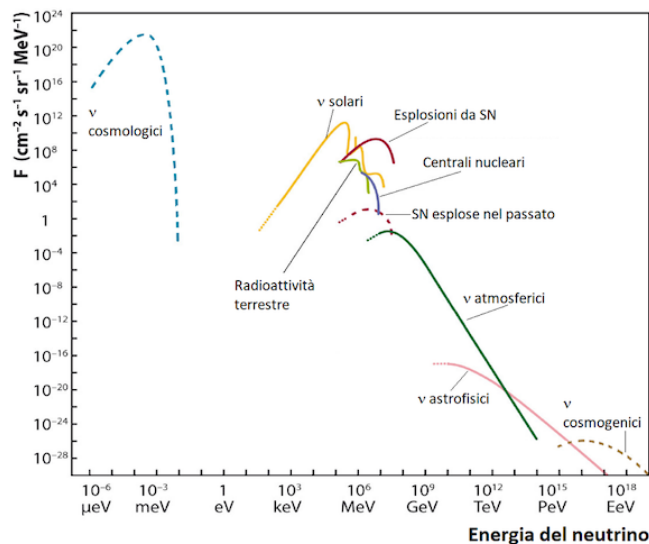


Figura 1.3: Flusso atteso di neutrini in funzione dell'energia del neutrino stesso. Fonte: [5].

soggetti all'influenza di campi magnetici, si deduce che essi possano essere utilizzati per lo studio di sorgenti lontane. L'orizzonte osservabile tramite neutrini astrofisici è infatti più esteso rispetto a quello ottenibile con i raggi- γ , dato che questi hanno una probabilità considerevole di interagire con la radiazione extra-galattica prodotta da altre sorgenti astrofisiche.

Assumendo che l'accelerazione dei RC avvenga secondo il *meccanismo di Fermi*, si ottiene che il flusso atteso di neutrini cosmici corrisponde ad un indice spettrale $\alpha = 2$ [6]. Si riportano in figura 1.3 anche i flussi attesi di neutrini di altra natura, tra cui quelli atmosferici, per cui si assume un andamento corrispondente ad $\alpha = 3.7$.

1.2.2 Neutrini cosmici

Il cosiddetto *modello adronico astrofisico* descrive la produzione di particelle neutre secondarie (neutrini e raggi gamma) grazie all'interazione di particelle cariche (RC) con la materia circostante. Tali sorgenti vengono perciò comunemente chiamate siti di accelerazione [2].

Secondo tale modello, l'interazione di protoni ad alta energia con fotoni ed altri protoni all'interno dei siti di accelerazione provoca la formazione della risonanza¹ Δ^+ , che a sua volta decade in pioni neutri π^0 o carichi π^\pm . Mentre i primi producono una coppia di fotoni, i pioni carichi decadono secondo i seguenti processi:

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \quad \Rightarrow \quad \mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+; \quad (1.4)$$

$$\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^- \quad \Rightarrow \quad \mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-. \quad (1.5)$$

I raggi gamma possono essere generati attraverso il decadimento del π^0 , oppure attraverso l'interazione di elettroni con campi magnetici e fotoni nella sorgente stessa, rispettivamente per bremsstrahlung e per effetto Compton inverso. Al contrario, i neutrini possono essere prodotti soltanto attraverso i processi 1.4 e 1.5, rappresentando una prova incontrovertibile della presenza di sorgenti astrofisiche di raggi cosmici [7, 2].

¹La risonanza Δ^+ è un barione composto da due quark *up* e un *down*, che decade in tempi brevissimi, dell'ordine di 10^{-24} s.

1.2.3 Neutrini atmosferici

L'interazione dei RC con i nucleoni degli atomi presenti nell'atmosfera terrestre genera catene di decadimenti analoghe a quelle riportate in precedenza (1.4-1.5), e vengono così prodotti i raggi cosmici *secondari*. I neutrini risultanti da tali interazioni sono detti *atmosferici*.

Tuttavia, questa tipologia di eventi può costituire, in alcuni scenari, una sorgente di background rispetto al segnale cercato, come nel caso della ricerca di neutrini astrofisici, come verrà illustrato nel capitolo successivo.

1.2.4 Sorgenti galattiche ed extragalattiche

Si riportano di seguito alcuni presunti siti di accelerazione di raggi cosmici e di produzione di neutrini.

Le *Supernovae Remnants* (SNR), o resti di supernove, sono ciò che rimane di una stella di massa superiore a 8 masse solari. Nell'ultima fase della vita di una stella, il collasso gravitazionale degli strati esterni, combinato alla pressione di degenerazione del nucleo, provoca un'onda d'urto in grado di produrre una grande quantità di protoni in un ambiente ad alta densità. Ne consegue che tali protoni sono forzati ad interagire con elettroni liberi, generando neutroni e neutrini tramite un processo di cattura elettronica. Si stima che un ambiente di questo tipo emetta il 90% di energia tramite neutrini. Una SNR può eventualmente evolvere nello stadio successivo di *Pulsar Wind Nebulae*, se si forma una stella di neutroni avvolta da una nebulosa.

Le *microquasar* sono sistemi binari costituiti da un corpo nero poco massivo e da una stella che fornisce la massa per il suo disco di accrescimento. L'interazione di questi oggetti provoca la formazione di getti relativistici di plasma, che li rende dei candidati come siti di accelerazione di raggi cosmici.

Tra le possibili sorgenti extragalattiche, menzioniamo i *Nuclei Galattici Attivi* (AGN) e i *Gamma Ray Bursts*. I primi sono buchi neri supermassicci localizzati al centro di alcune galassie a spirale, circondati da dischi di accrescimento e da un toroide di polveri. Anche questa categoria di oggetti emette getti relativistici di particelle cariche, oltre ad uno spettro di radiazione elettromagnetica variabile a seconda dell'inclinazione del piano della galassia in cui si trova. Se i getti relativistici citati vengono emessi lungo l'asse del piano galattico (si veda la figura 1.4), l'AGN viene detto *blazar*. I blazar sono quindi

considerati come un'ottima sorgente di raggi cosmici e di neutrini astrofisici, dati anche i recenti risultati di osservazioni pubblicati dall'osservatorio IceCube negli ultimi anni.

Infine i GRB sono lampi di raggi- γ molto intensi, che riescono ad emettere in un breve tempo (da qualche millisecondo, fino a un'ora) un'energia pari a quella emessa dal Sole in tutta la sua esistenza. Nell'ottobre del 2017, la prima osservazione in coincidenza di un'onda gravitazionale con la controparte elettromagnetica ha permesso di confermare l'ipotesi secondo cui eventi del genere siano generati dalla fusione di due stelle di neutroni, o di una stella di neutroni ed un buco nero nel caso dei GRB brevi. Potrebbero quindi essere responsabili del flusso di raggi cosmici più energetici mai rilevati.

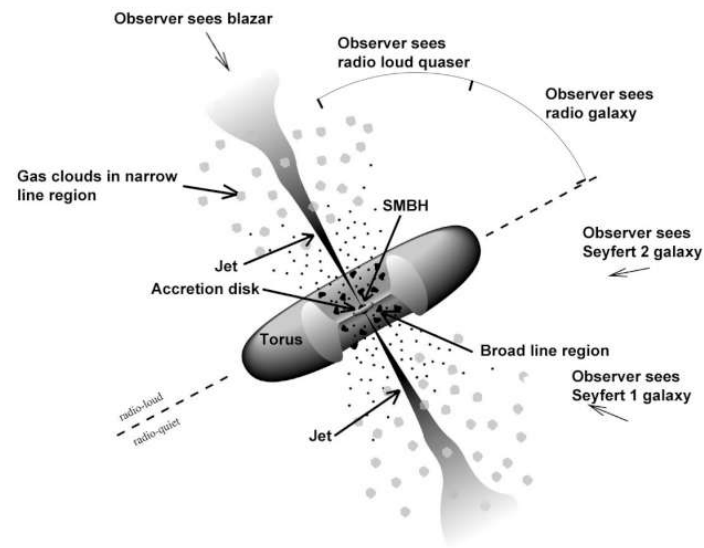


Figura 1.4: L'immagine rappresenta un generico AGN, secondo il *modello unificato*. Secondo questa teoria, tutti i nuclei galattici attivi presenterebbero caratteristiche comuni, ma verrebbero osservati come oggetti differenti in base all'angolo tra l'asse del piano galattico e la posizione dell'osservatore. Fonte: [8].

Capitolo 2

Telescopio KM3NeT/ARCA

In questo capitolo si vogliono presentare brevemente i principi di rivelazione alla base del funzionamento di un telescopio a neutrini. Nella seconda parte verrà poi approfondito il funzionamento del telescopio KM3NeT.

2.1 Rivelazione del neutrino

2.1.1 Effetto Cherenkov

Il principio fisico alla base del funzionamento dei telescopi a neutrini è l'effetto Cherenkov. Esso si verifica quando una particella carica attraversa un dielettrico ad una velocità maggiore di quella della luce nel mezzo, producendo un cono di radiazione elettromagnetica nel visibile e nell'ultravioletto, misurabile dai fotomoltiplicatori (PMT) dell'apparato strumentale.

Questo cono, come mostrato in figura 2.1, ha un'apertura descritta da un angolo caratteristico θ_C , dipendente dall'indice di rifrazione n del mezzo, e calcolabile grazie ad alcune considerazioni geometriche. Infatti, se la particella copre una distanza pari a $vt = \beta ct$, il fronte d'onda della radiazione Cherenkov generata compie nello stesso tempo uno spostamento pari a ct/n . Si ottiene quindi la relazione:

$$\beta ct \cos(\theta_C) = \frac{ct}{n} \quad \Rightarrow \quad \cos(\theta_C) = \frac{1}{\beta n} \quad (2.1)$$

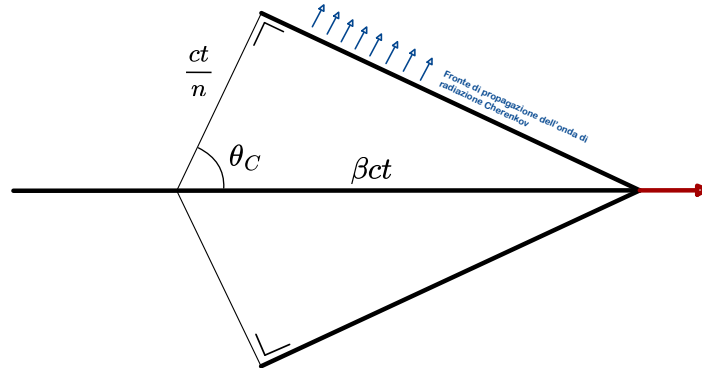


Figura 2.1: Rappresentazione grafica della produzione di radiazione Cherenkov. La direzione di propagazione della particella è indicata dalla freccia rossa, quella del fronte d'onda dalle frecce in blu.

Si riporta, per completezza, anche l'espressione dell'energia per unità di frequenza e di lunghezza percorsa, nota come formula di Frank-Tamm:

$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} = \frac{q^2}{4\pi} \mu \omega \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\omega)} \right). \quad (2.2)$$

Il parametro μ è la permeabilità magnetica del mezzo (per semplificare si assume $\mu \simeq 1$ per l'acqua) e $n(\omega)$ è l'indice di rifrazione, per cui è stata evidenziata la dipendenza dalla pulsazione ω della radiazione. Si può notare che per velocità relativistiche, l'intensità specifica della radiazione cresce con la pulsazione ω , motivo per cui la maggiore intensità della radiazione rilevata si misura soprattutto nell'ultravioletto. Per elevati valori di ω invece, il valore dell'indice di rifrazione tende all'unità, sopprimendo il contributo del termine tra parentesi e provocando una diminuzione dell'intensità.

2.1.2 Classificazione degli eventi

L'interazione del neutrino con la materia circostante il rivelatore produce particelle cariche in grado di produrre radiazione Cherenkov. I fotoni di tale radiazione raggiungono quindi i PMT del rivelatore, che misurano l'intensità della radiazione sfruttando l'effetto fotoelettrico. Il segnale, rilevato da una matrice tridimensionale di PMT, consente di

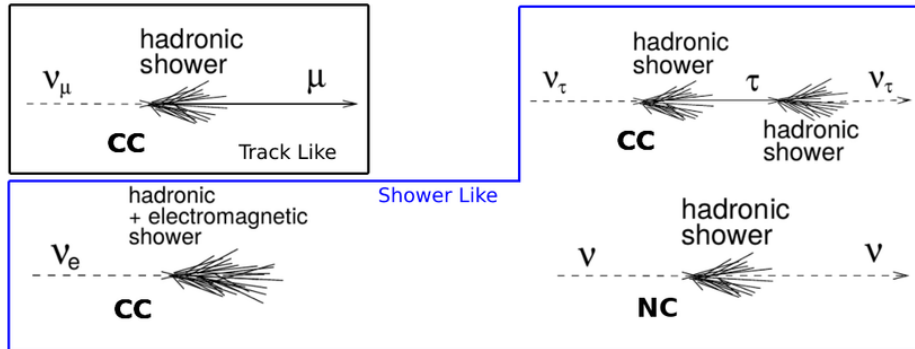


Figura 2.2: Rappresentazione grafica delle possibili interazioni del neutrino, a corrente carica e corrente neutra. Gli eventi nel riquadro blu sono detti eventi *cascata*, e il processo CC del ν_μ , nel riquadro nero, è detto evento di tipo *traccia*. Fonte: [9].

ricostruire la topologia dell'evento, analizzando l'intensità della radiazione e il tempo di arrivo dei fotoni sui moduli ottici del rivelatore.

Come già illustrato nella sezione (1.1.1), il neutrino può interagire secondo processi CC o NC. In entrambi i casi, ciò che può essere rivelato è il prodotto di tali interazioni.

Le topologie che possono essere osservate sono riassunte in figura 2.2.

Le interazioni NC di un neutrino di qualsiasi sapore generano uno sciame adronico che non consente di determinare con precisione inferiore ad 1° , la direzione di provenienza del neutrino, in quanto la radiazione Cherenkov prodotta è generata da diversi adroni carichi. Considerazioni analoghe valgono anche per le interazioni CC di ν_e e ν_τ : nel primo caso, oltre allo sciame adronico, viene prodotto dall'elettrone risultante uno sciame elettromagnetico¹; la produzione a corrente carica di un τ , invece, implica che si generi un secondo sciame adronico al suo decadimento. La distanza dei due vertici degli sciami adronici è funzione dell'energia del neutrino incidente, e se sufficientemente distinti, può generare un evento che in gergo viene chiamato *double bang*.

Le topologie illustrate finora, che valgono eventualmente anche per le relative antiparticelle, vengono classificate come eventi di tipo *cascata*. Gli eventi di tipo *traccia* invece, corrispondono ad interazioni a corrente carica di ν_μ (o $\bar{\nu}_\mu$). In questo caso, il muone prodotto riesce a propagarsi in acqua anche per qualche chilometro, generando

¹Uno sciame elettromagnetico, generato da un elettrone o da un positrone ad alte energie, consiste nella produzione di ulteriori coppie e^+/e^- dopo l'interazione con un nucleo atomico. Tali coppie a loro volta emettono fotoni per bremsstrahlung, finché l'energia non scende al di sotto della soglia minima per la produzione di coppie.

luce Cherenkov fino al suo decadimento. In figura 2.3 si riporta la rappresentazione di un generico evento di tipo traccia.

Per questi eventi è relativamente semplice trovare la direzione di provenienza del ν_μ iniziale, con una risoluzione angolare dipendente dall'energia del neutrino incidente. La seguente espressione fornisce la massima deviazione cinematica $\theta_{\nu\mu}$ del muone dalla direzione del neutrino:

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

Di conseguenza, per valori superiori a 10 TeV, la risoluzione angolare per questi eventi è dominata dall'accuratezza dell'algoritmo di ricostruzione.

Un ulteriore distinzione viene effettuata in base alla direzione di provenienza dei neutrini. Gli eventi provenienti dal basso (si veda figura 2.4) sono detti *up-going*, e rappresentano il *golden channel* per questo tipo di rivelatori. Infatti, osservando al di sotto della linea dell'orizzonte, si riduce notevolmente il rumore costituito da muoni atmosferici.

Per quanto riguarda gli eventi *down-going*, provenienti dall'alto, i telescopi di neutrini, malgrado siano situati sotto migliaia di metri di materiale, sono comunque soggetti ad un elevato flusso di muoni.

Si riportano come esempi il progetto IceCube, che posiziona il suo rivelatore nel ghiaccio dell'Antartide, GVD (*Gigaton Volume Detector*) nel lago Baikal in Russia, oltre naturalmente a KM3NeT, di cui si parlerà esaustivamente nella prossima sezione.

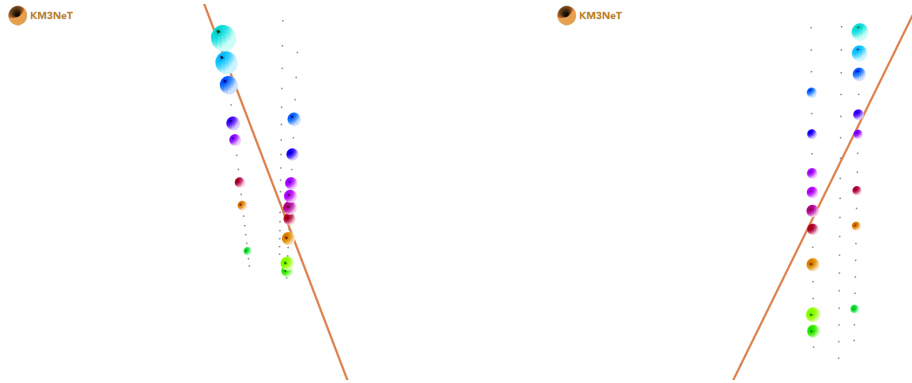


Figura 2.3: Le due immagini rappresentano lo stesso evento di tipo traccia da due prospettive differenti, rivelata da due Detection Unit del telescopio KM3NeT/ARCA nella prima fase della sua attività. Ogni sfera rappresenta un modulo ottico: la dimensione indica l'intensità del segnale rilevato, mentre la differenza di colore corrisponde al tempo di arrivo della radiazione al PMT [10].

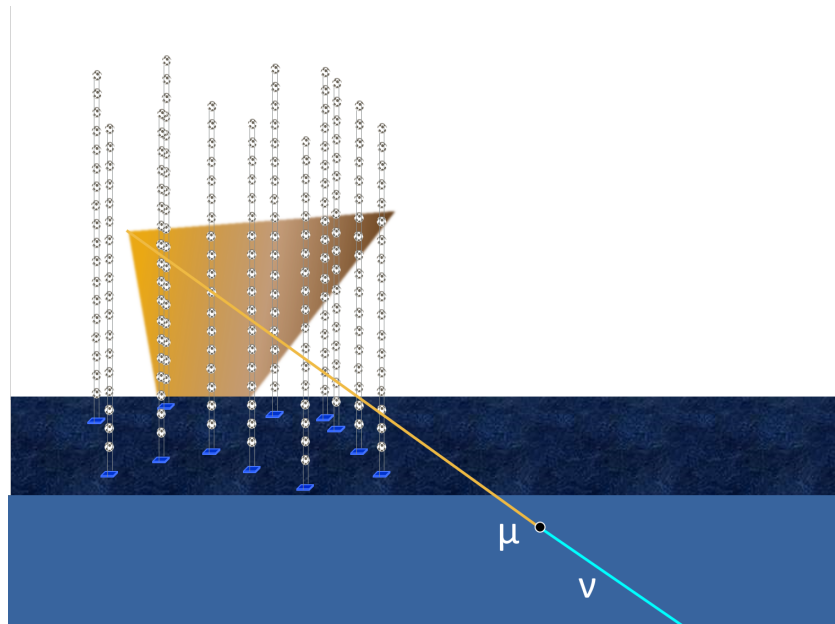


Figura 2.4: Schematizzazione di un evento up-going: un neutrino interagisce con la materia circostante il rivelatore, e il muone prodotto attraversa il suo volume fiduciale [10].

2.2 KM3NeT

L'esperimento KM3NeT (Cubic Kilometre Neutrino Telescope) è una infrastruttura di ricerca europea che ospita una rete di rivelatori in fondo al Mar Mediterraneo. È nato come proseguimento del progetto ANTARES, che ha raccolto dati dal 2008 al 2022, in un sito a circa 10 km dall'attuale posizionamento di KM3NeT/ORCA, in Francia. ANTARES ha dimostrato per la prima volta la possibilità di rivelare neutrini astrofisici nelle profondità marine e gli rivelatori di KM3NeT seguono le stesse strategie di ricerca, ma con tecnologie di nuova generazione [11].

KM3NeT/ARCA

Il telescopio KM3NeT/ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) si trova a 100 km al largo della località di Capo Passero, in Sicilia, ad una profondità di 3500 m, e si occupa dello studio di sorgenti di astroparticelle. È quindi ottimizzato per rivelare eventi nel range energetico dal TeV a oltre 1 PeV.

KM3NeT/ORCA

Il telescopio KM3NeT/ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) è localizzato al largo della costa meridionale francese, ad una profondità di 2500 m, e concentra la sua ricerca sul fenomeno di oscillazione del neutrino, rivelando neutrini atmosferici con energia dell'ordine di qualche GeV.

2.2.1 Struttura del telescopio KM3NeT/ARCA

Il rivelatore è composto attualmente da 28 Detection Units (DU), ma l'obiettivo è l'installazione di due blocchi da 115 DUs ciascuno. Una Detection Unit consiste in una stringa verticale di moduli ottici (DOM) posti a 36 m di distanza. Ogni stringa, di altezza totale pari a ~ 800 m, è mantenuta in posizione verticale da una boa, e si trova a distanza di 90 m l'una dall'altra.

Questo posizionamento dei DOMs e delle DUs consente di massimizzare il volume di acqua marina instrumentato (attualmente di $\sim 0,1$ km³), pur conservando una risoluzione angolare per eventi di tipo traccia inferiore al grado. Attualmente, nella configurazione con 28 DU attive, per un evento di questo tipo, con energia pari a 10 TeV, la risoluzione

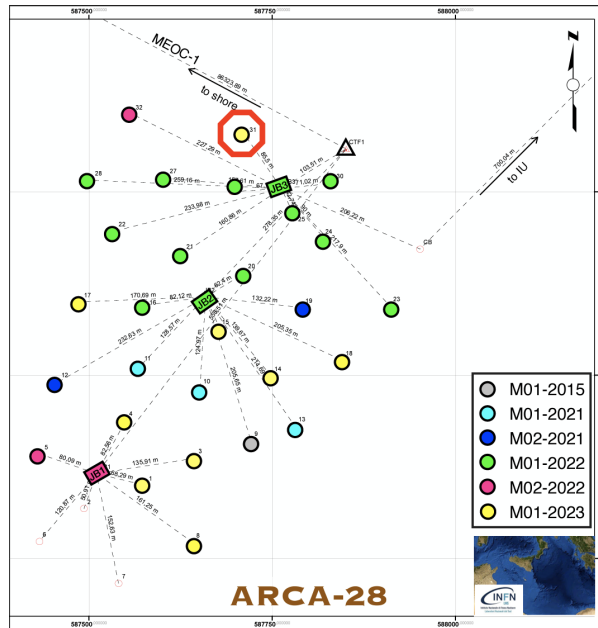


Figura 2.5: Posizionamento delle Detection Unit del sito di KM3NeT/ARCA sul fondale marino.

angolare dichiarata è di 0.1 gradi, ed essa diminuisce all'aumentare dell'energia. Per quanto riguarda gli eventi cascata, che si sviluppano su scale spaziali minori della distanza tra le singole DU, è possibile una misura più accurata dell'intensità della radiazione, e quindi dell'energia dell'evento. Tuttavia, la risoluzione angolare per questi eventi risulta maggiore.

La struttura complessiva del rivelatore è organizzata in modo tale che un Cable Termination Frame (CTF) distribuisca l'alimentazione a delle Junction Box secondarie, ancorate al fondale marino, che a loro volta forniscono energia e raccolgono dati tramite cavi in fibra ottica. Attualmente è operativa soltanto un CTF, in quanto soltanto uno dei due blocchi del rivelatore è attivo ad oggi (marzo 2024). In figura (2.5) si riporta una rappresentazione della disposizione delle DU di KM3NeT/ARCA.

2.2.2 Moduli ottici

Il Digital Optical Module (DOM, in figura 2.6) è l'unità fondamentale per entrambi i rivelatori di KM3NeT/ARCA e KM3NeT/ORCA. Si tratta di una sfera in vetro, resistente

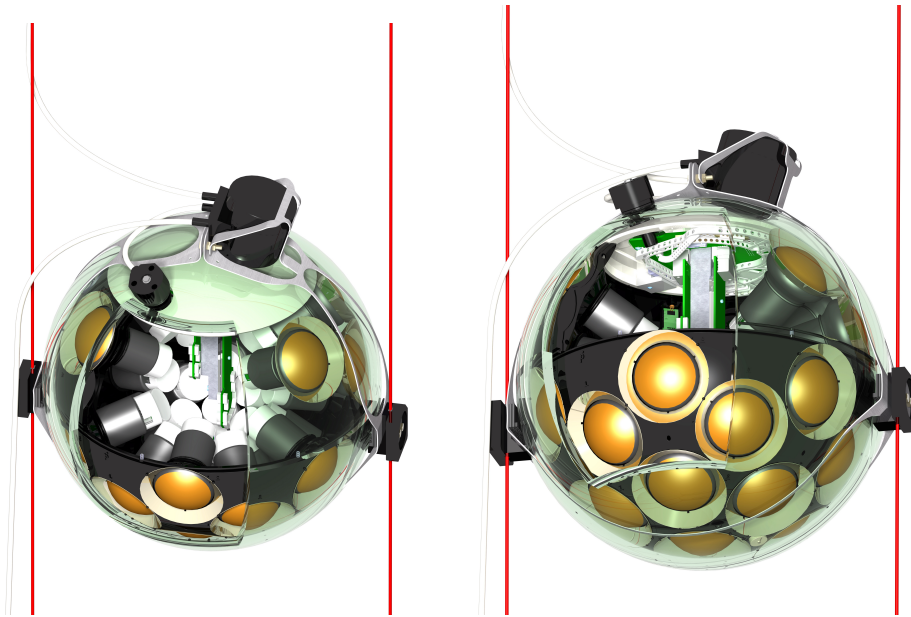


Figura 2.6: Render grafico di un modulo ottico digitale, nell'immagine di sinistra visto dall'alto e in quella di destra dal basso.

all'elevata pressione dell'acqua sul fondale marino, che racchiude 31 fotomoltiplicatori e la relativa elettronica.

Questo design innovativo permette di raggiungere un'elevata area di fotocatodo (circa tre volte maggiore rispetto a soluzioni adottate in passato da IceCube o ANTARES), di raccogliere maggiore informazione direzionale riguardo ai fotoni incidenti e di raggiungere una risoluzione temporale dell'ordine del nanosecondo, consentendo una notevole riduzione del rumore ottico (si veda la sezione 2.2.3).

La disposizione dei PMT, all'interno del DOM, maggiore nell'emisfero inferiore (19 sui 31 totali), è stata ottimizzata per osservare con maggiore accuratezza gli eventi up-going.

È importante notare che la forma delle DU è fortemente influenzata dalle correnti marine; di conseguenza sarà necessario un sistema di calibrazione spaziale che tenga conto della variabilità della posizione di ogni singolo DOM. La calibrazione avviene per mezzo di alcuni sensori inseriti all'interno del DOM, che forniscono informazioni sull'orientazione del modulo, e grazie ad un sistema di posizionamento acustico, che permette di ricostruire la posizione dei moduli ottici all'interno del volume strumentato. Con questi sistemi si è in grado di conoscere la posizione aggiornata ogni minuto dei DOM, con una precisione di ~ 10 cm [12].

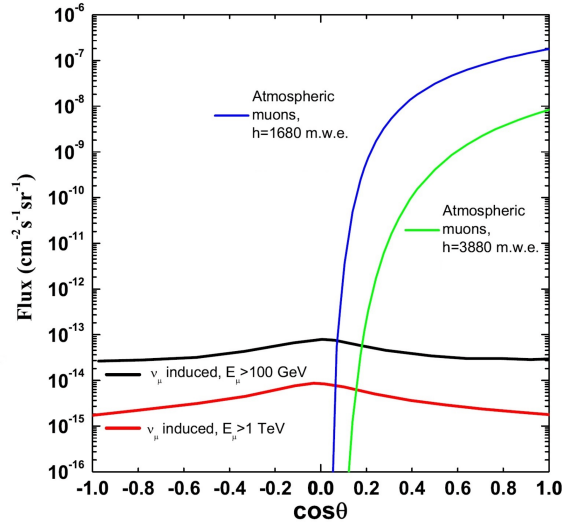


Figura 2.7: Flusso di muoni atmosferici, in funzione del coseno dello zenit, per due valori di *meter water equivalent* (m.w.e.). Sono riportati anche i flussi di ν_μ atmosferici, corrispondenti a due valori energetici del neutrino.

2.2.3 Sorgenti di background

Gli eventi registrati dal telescopio KM3NeT sono costituiti per gran parte da rumore, inteso come radiazione proveniente da fenomeni non interessanti per le finalità sperimentali di KM3NeT/ARCA. Neutrini e muoni atmosferici sono i principali responsabili di questo tipo di background. Nonostante il flusso di eventi down-going venga soppresso in modo considerevole dallo strato di acqua sopra al rivelatore, alcuni raggi cosmici particolarmente energetici (superiore a 1 TeV) possono produrre *bundles* di muoni in grado di raggiungere il volume del rivelatore. In figura 2.7 si può osservare il flusso misurato di muoni atmosferici in funzione del coseno dell'angolo zenitale, per due valori di profondità. La luce prodotta da ogni singolo muone contenuto nel bundle, può essere erroneamente ricostruita come un unico neutrino cosmico ad alta energia.

Inoltre, un'ulteriore sorgente di background è rappresentata dal decadimento del potassio ^{40}K , un isotopo radioattivo disciolto in acqua marina. Questo decade secondo due possibili canali, e in entrambi i casi può generare elettroni con energia dell'ordine del MeV, in grado di produrre radiazione Cherenkov.

Sono anche da considerare dei lampi di luce occasionale dovuti a bioluminescenza. Questo tipo di rumore, difficilmente modellizzabile, è comunque correlato a fattori

stagionali e all'intensità della corrente.

2.2.4 Cielo visibile

Essendo KM3NeT/ARCA localizzato nell'emisfero boreale, gli eventi up-going da esso visibili provengono dall'emisfero Sud: è proprio in questa porzione di cielo che si osserva gran parte del piano galattico. Tramite le osservazioni di KM3NeT/ARCA sarà quindi possibile integrare le ricerche effettuate fino ad ora dal telescopio IceCube, posizionato al polo Sud.

Tuttavia, si noti che la rotazione terrestre implica una variazione del cielo visibile dal telescopio durante un giorno siderale. In particolare, considerando tutta la volta celeste, si avrà una porzione di cielo costantemente visibile, una osservabile periodicamente e una da cui non si possono raccogliere informazioni.

In ogni caso, gran parte del piano galattico rientra nel settore sempre visibile, e una buona percentuale di eventi provenienti dalla restante parte è comunque osservabile da KM3NeT/ARCA.

Capitolo 3

Studi di visibilità

In questo capitolo si riportano i risultati di un'analisi dati volta a studiare il cielo visibile dal telescopio KM3NeT/ARCA e la distribuzione angolare degli eventi osservabili in funzione dell'energia. L'analisi si è svolta interamente in ambiente Python, in quanto dotato di alcune librerie specifiche strettamente necessarie.

L'obiettivo è la produzione di una mappa del cielo che raffiguri la copertura celeste del telescopio KM3NeT/ARCA, rispetto agli eventi totali e successivamente in funzione del range energetico considerato.

Prima di entrare nel merito dell'analisi, si introducono alcuni degli strumenti impiegati nel suo svolgimento.

3.1 Generazioni Monte Carlo

Il metodo Monte Carlo consiste in generale nella generazione casuale di campioni di dati numerici, attraverso una molteplicità di metodi computazionali, per ottenere una riproduzione accurata di un fenomeno fisico. Le simulazioni Monte Carlo sono ampiamente utilizzate in fisica, ad esempio per risolvere problemi di ottimizzazione, per ottenere soluzioni approssimate, o anche solo per confrontare un set di dati misurati con le previsioni teoriche.

Nel caso di KM3NeT, vengono generati eventi casuali per mezzo di diversi software, molti dei quali sviluppati dalla collaborazione ANTARES. Il campione di eventi generati viene poi utilizzato per interpretare i dati raccolti e per studiare effetti sistematici.

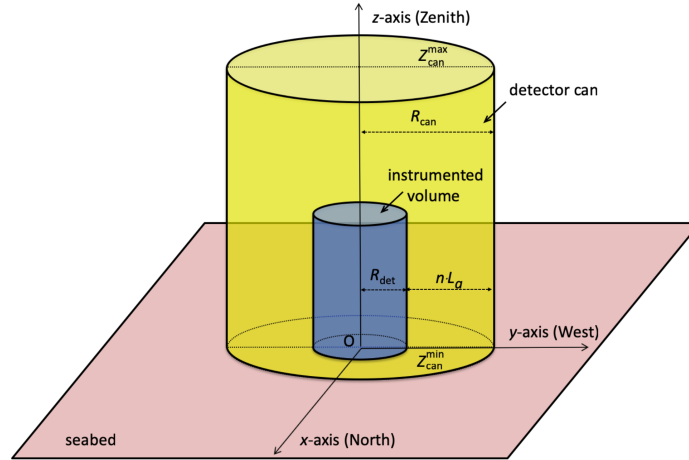


Figura 3.1: Raffigurazione del modello adottato da KM3NeT per la generazione di eventi Monte Carlo degli eventi. In blu è rappresentato il volume strumentato e in giallo quello della cosiddetta *can*, entrambi delimitati inferiormente dal fondale marino. Fonte: [13].

In particolare, si utilizza per la simulazione degli eventi un modello relativamente semplice, ma comunque efficace, per alleggerire il carico computazionale. Il volume strumentato viene considerato come un cilindro, ma dato che anche tutte le particelle che generano radiazione Cherenkov in prossimità del cilindro possono essere rivelate dai DOM, si considera come *volume attivo* un cilindro di raggio maggiore, detto comunemente *can*. In realtà, si deve considerare un ulteriore *volume di interazione*, variabile a seconda del tipo di evento, all'interno del quale un'eventuale interazione di un neutrino può formare le particelle cariche rivelabili. In figura 3.1 si riporta una rappresentazione del modello descritto sopra.

Successivamente alla generazione, si fanno propagare le particelle nel volume attivo e si simula la produzione di radiazione Cherenkov, rilevata poi dai moduli ottici. Viene quindi simulata la risposta del rivelatore, con le rispettive efficienze, ed infine viene applicato l'algoritmo di ricostruzione.

Per aumentare la statistica e l'accuratezza della simulazione, a ogni evento generato viene assegnato un peso, dipendente da molteplici fattori. Ci si limita a sottolineare, per la comprensione dell'analisi seguente, che questo peso dipende dalla probabilità di un neutrino di attraversare la Terra. Infatti, per energie superiori a ~ 200 TeV, il libero cammino medio diventa paragonabile al diametro terrestre [2]. In particolare, il flusso di neutrini segue una decrescita esponenziale all'aumentare dell'angolo zenitale (θ_z), e

quindi della quantità di materia attraversata, e della sezione d'urto $\sigma(E_\nu)$.

3.2 Mappe del cielo Healpix

Healpix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelisation) è un algoritmo di *pixelizzazione* di una sfera. La sua caratteristica fondamentale è la capacità di suddividere la sfera in porzioni di area equivalente, e di renderne possibile la proiezione sul piano, realizzando così delle mappe. Il numero di suddivisioni definisce quindi anche la risoluzione della mappa. Inoltre, l'algoritmo è in grado di organizzare i centri di tali porzioni in un numero discreto di circonferenze di uguale latitudine, realizzando di fatto delle *proiezioni di Mollweide*¹ della volta celeste. È possibile visualizzare l'operazione di pixelizzazione in figura 3.2.

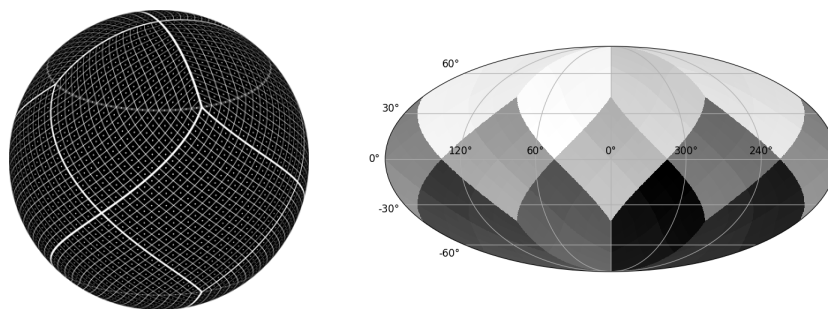


Figura 3.2: A sinistra: pixelizzazione di una sfera tramite algoritmo Healpix. A destra: proiezione di Mollweide delle porzioni di superficie sferica ottenute con l'algoritmo.

Queste mappe sono ormai diventate uno standard nell'astrofisica multimessaggera, in quanto permettono una agevole visualizzazione di tutta la volta celeste.

Si è fatto ampio uso, nella seguente analisi dati, della libreria *Healpy* [14], che implementa l'algoritmo Healpix in ambiente Python. La risoluzione della mappa, cioè il numero di pixel, è regolata tramite un parametro *NSIDE*, che determina la risoluzione angolare della mappa stessa. Nelle mappe che seguono, il valore ottenuto per quest'ultima è di 0.46 gradi.

¹Si tratta di una proiezione cartografica che non altera la distanza tra i paralleli, già nota nel XIX secolo.

3.2.1 Sistemi di coordinate

La produzione di mappe del cielo implica la necessità di avere strumenti adatti alla gestione di coordinate celesti. A tale scopo, la libreria *Astropy* [15] fornisce tutte le funzioni necessarie.

Si elencano i principali sistemi di coordinate per l'identificazione di una posizione nella volta celeste:

- Sistema *altazimutale* (coordinate locali): in questo sistema le coordinate di un punto dipendono dalla posizione dell'osservatore sulla Terra. L'*altitudine* è l'angolo rispetto all'orizzonte, e l'*azimuth* quello compreso tra la proiezione del punto sul piano dell'orizzonte e un altro punto di riferimento. Spesso si utilizza l'angolo zenitale piuttosto che l'altezza, suo complementare.
- Sistema *equatoriale*: si tratta di un sistema di coordinate fisso, i cui punti di riferimento sono la proiezione dell'equatore terrestre sulla volta celeste e l'asse di rotazione della Terra. La *declinazione* (Dec) è la distanza angolare dall'equatore celeste, e l'*ascensione retta* (RA) quella dal punto vernale.
- Sistema *galattico*: analogo al sistema equatoriale, ma il piano di riferimento è il piano galattico. Per quanto riguarda le coordinate, in questo caso si parla di *latitudine* e *longitudine galattica*.

3.3 Elaborazione dati

3.3.1 Descrizione del dataset

Il *dataset* utilizzato nell'analisi dati è relativo alla fase operativa ARCA21², corrispondente ad un *livetime* complessivo di 67 giorni. Il campione è costituito da quasi 5 milioni di eventi, generati da una simulazione Monte Carlo. Si tratta, in particolare, di eventi di tipo traccia, prodotti da interazioni CC di neutrini (e antineutrini) muonici, con distribuzione energetica nel range da 10^2 a 10^8 GeV.

Il dataset comprende anche valori restituiti in output dall'algoritmo di ricostruzione, ma nell'analisi che segue si è deciso di utilizzare soltanto le informazioni simulate, per analizzare direttamente la fisica del problema, in prima approssimazione.

A titolo esemplificativo, si riporta comunque un confronto tra la distribuzioni bidimensionali in zenith e in energia, relativamente alle informazioni Monte Carlo e a quelle ricostruite, sia per eventi astrofisici, sia per eventi atmosferici, (figura 3.3).

Gli istogrammi riportati rappresentano uno studio preliminare delle principali variabili considerate nel proseguimento dell'analisi. Si può notare come l'effetto della risoluzione angolare e quello della risoluzione in energia modifichino la forma delle distribuzioni per le variabili ricostruite, rispetto alle distribuzioni Monte Carlo.

²Con questa denominazione si intende che 21 DU di ARCA erano attive in quel momento.

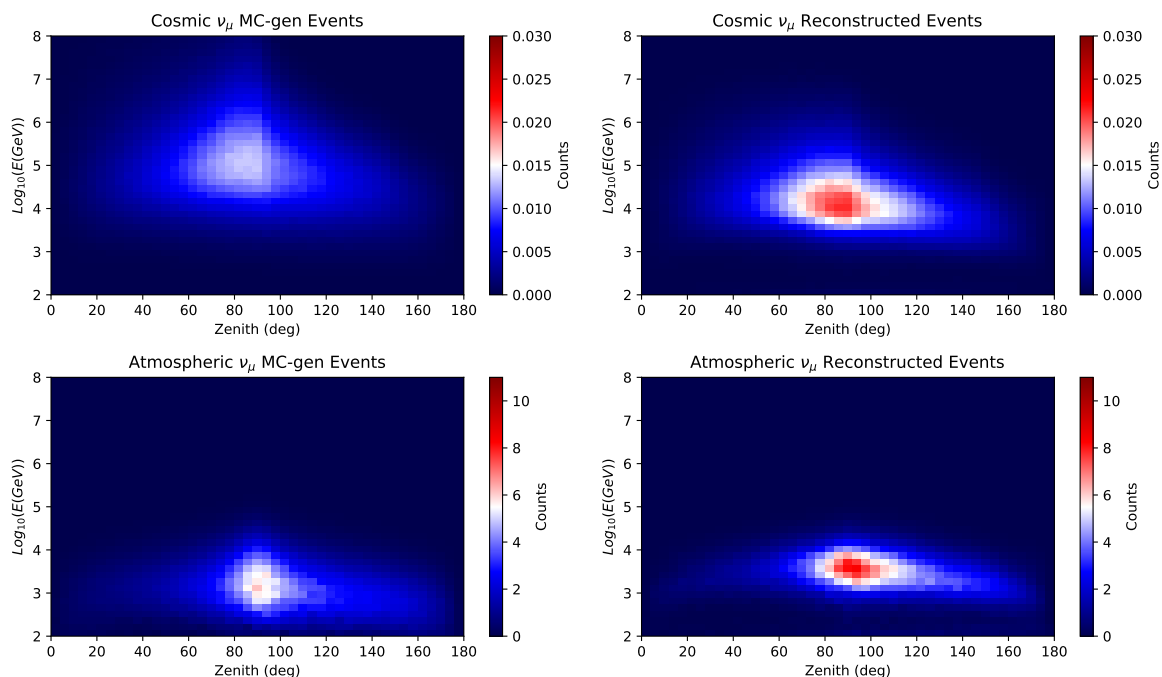


Figura 3.3: Istogrammi bidimensionali della distribuzione in zenit e in energia degli eventi, in alto di neutrini astrofisici, in basso di quelli atmosferici. I grafici a sinistra corrispondono alle informazioni Monte Carlo, mentre quelli a destra alle informazioni ricostruite, relativamente agli stessi eventi.

3.3.2 Analisi di visibilità

In primo luogo si è prodotta una mappa del cielo visibile, generando uniformemente eventi up-going, cioè per valori dello zenit superiori a 90° . In particolare si è effettuata una generazione uniforme degli eventi in azimut e zenit, per un certo numero di frazioni temporali di un giorno siderale. Per ottenere un risultato soddisfacente è necessario popolare in maniera dettagliata ogni pixel della mappa. Sono stati generati quindi 10^7 punti per ogni *shift* temporale, il cui valore è stato ottimizzato a 5 minuti.

Per ogni frazione temporale considerata, si è costruita la rispettiva mappa del cielo visibile in coordinate galattiche. Ad ogni pixel popolato è stato poi assegnato un valore booleano pari ad 1.

La sovrapposizione di tutte le mappe così ottenute, una volta normalizzata al numero di shift temporali, fornisce la percentuale di cielo visibile del telescopio.

Successivamente, per ottenere i risultati ottenuti in figura 3.4, si è suddivisa la

mappa in un numero discreto di regioni, selezionate in base ad alcune soglie fissate a predeterminate percentuali di visibilità (<25%, 25-75% e >75%).

È possibile generalizzare la procedura per elaborare mappe di visibilità di un detector qualunque, semplicemente specificandone le coordinate terrestri in longitudine e latitudine. In questo modo si è generata, con la medesima procedura, anche la mappa del cielo visibile per il telescopio IceCube, sempre in figura 3.4.

Infine si sono aggiunte sulla mappa le coordinate di alcune sorgenti puntiformi, oggetto di recenti studi da parte della collaborazione KM3NeT (figura 3.5).

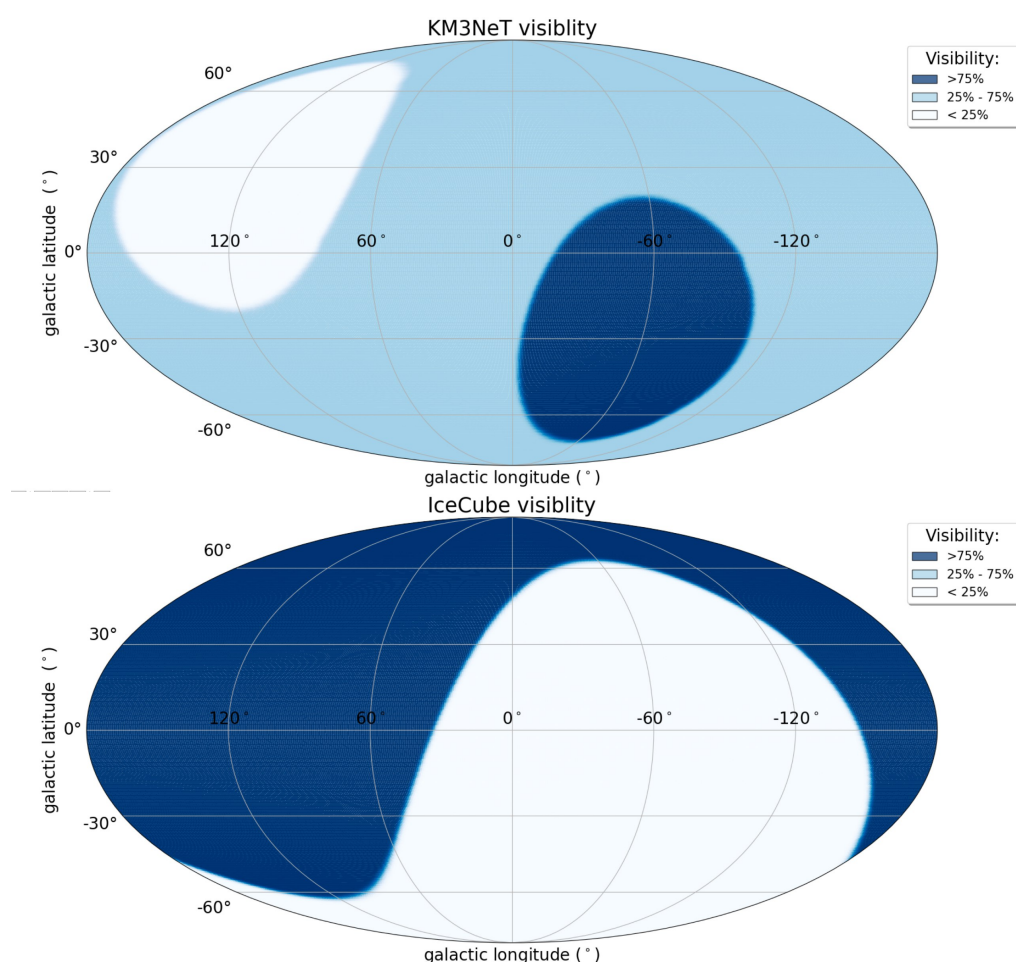


Figura 3.4: Confronto tra le mappe di visibilità relative a KM3NeT/ARCA (sopra) e IceCube (sotto). Le aree in blu rappresentano le regioni di cielo che è possibile osservare per oltre il 75% del giorno siderale; la porzione azzurra, distinguibile nettamente solo nel primo caso, corrisponde ad una percentuale di visibilità compresa tra il 25% e il 75%; non è possibile rilevare eventi up-going provenienti dalla regioni in bianco.

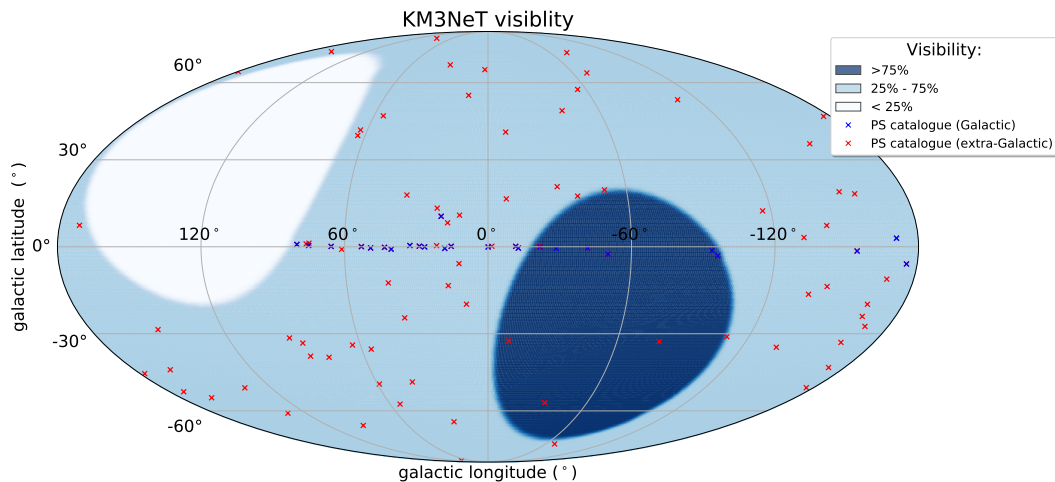


Figura 3.5: Posizione, in coordinate galattiche, delle sorgenti puntiformi attualmente in fase di studio da parte della collaborazione KM3NeT.

3.3.3 Dipendenza dall'energia della distribuzione degli eventi

Successivamente si è voluto studiare la distribuzione degli eventi nel cielo in funzione della loro energia. Per questo motivo si sono effettuati dei tagli sul dataset, per considerare distintamente alcuni range energetici. In primo luogo, è stato applicato un taglio sullo zenit (maggiore di 90 gradi) per selezionare eventi up-going, per poi selezionare quattro diversi range energetici, illustrati nell'elenco che segue. Tutti i tagli sono stati applicati considerando le informazioni Monte Carlo degli eventi.

Si riportano le denominazioni usate in questa trattazione:

- Il range *Low Energy* (LE) comprende eventi astrofisici con energia minore di 1 TeV, non molto interessanti per lo studio dei siti di accelerazione di RC.
- Il range successivo va da 1 a 100 TeV. Il limite superiore, in questo caso, è stato scelto in quanto oltre questa soglia, il flusso misurato di neutrini cosmici, per quanto riguarda eventi di tipo traccia, inizia ad essere dominante rispetto agli eventi atmosferici.
- Gli eventi con energia compresa tra 100 TeV e 1 PeV viene denominato *High Energy* (HE).

- Il range *Very High Energy* (VHE) riguarda neutrini cosmici con energia superiore ad 1 PeV.

Sono stati analizzati i sotto-campioni così ottenuti, in particolare la distribuzione in zenit degli eventi, riportata in figura 3.6.

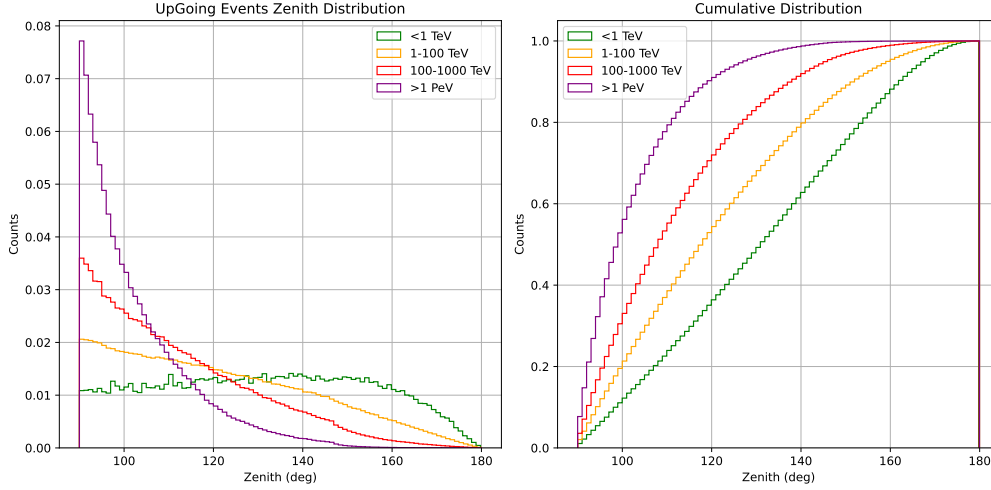


Figura 3.6: Distribuzione in zenit degli eventi relativi ad ogni range energetico considerato. A destra il corrispondente istogramma cumulativo normalizzato.

Si noti che all’aumentare dell’energia, diventa dominante l’effetto precedentemente citato di assorbimento della Terra (si veda la sezione 3.1), descritto da una legge di tipo esponenziale funzione della quantità di materia attraversata e quindi dell’angolo zenitale. Dall’istogramma cumulativo si evince che già per valori dello zenit oltre 120°, la percentuale di neutrini ad alta energia (VHE) osservabili diminuisce notevolmente; infatti oltre l’80% di eventi con energia superiore ad 1 PeV si trova in un range dei valori di zenit inferiori a 120°.

Nelle mappe del cielo riportate in figura 3.7, si possono visualizzare invece le distribuzioni nella volta celeste degli eventi relativi ai vari range.

Al fine di aumentare la statistica ed ottenere una mappa del cielo più definita in ognuno dei sotto-campioni selezionati, si è estrapolata, dalle distribuzioni delle declinazioni degli eventi, la relativa distribuzione di probabilità (PDF). Per questa operazione si è utilizzata la funzione della classe *Scipy* [16] che elabora una stima kernel di densità (KDE) del campione di dati. Si tratta di un metodo statistico che produce una funzione continua,

calcolando il probabile valore reale di una distribuzione in un punto qualsiasi. In figura 3.8 sono rappresentate le PDF ottenute con questo metodo.

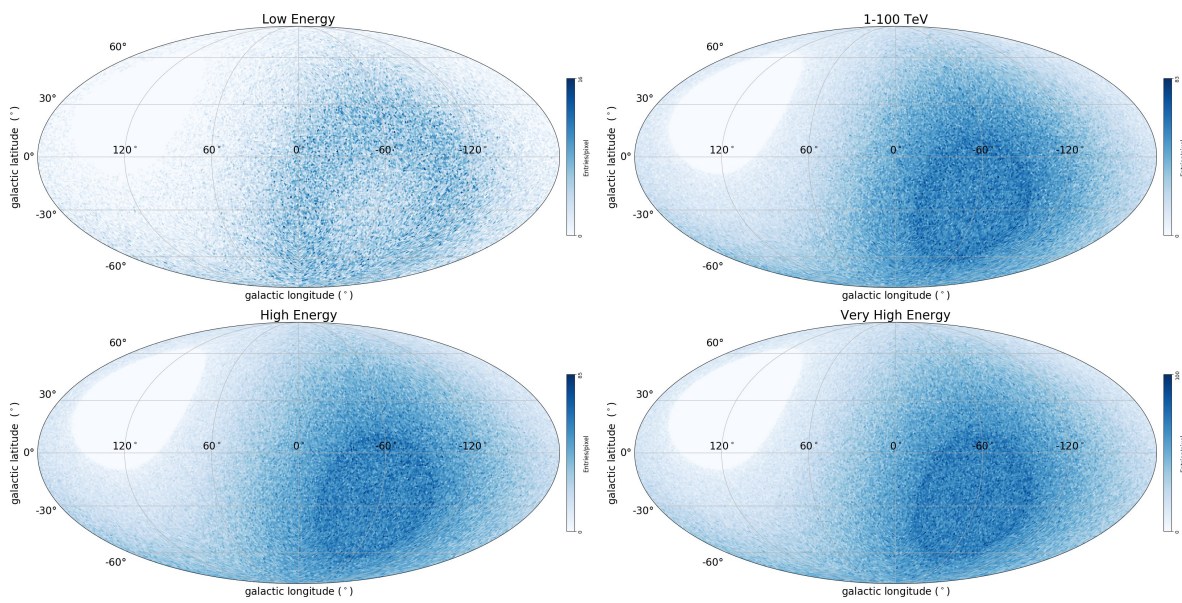


Figura 3.7: Mappe della distribuzione degli eventi per ogni range energetico.

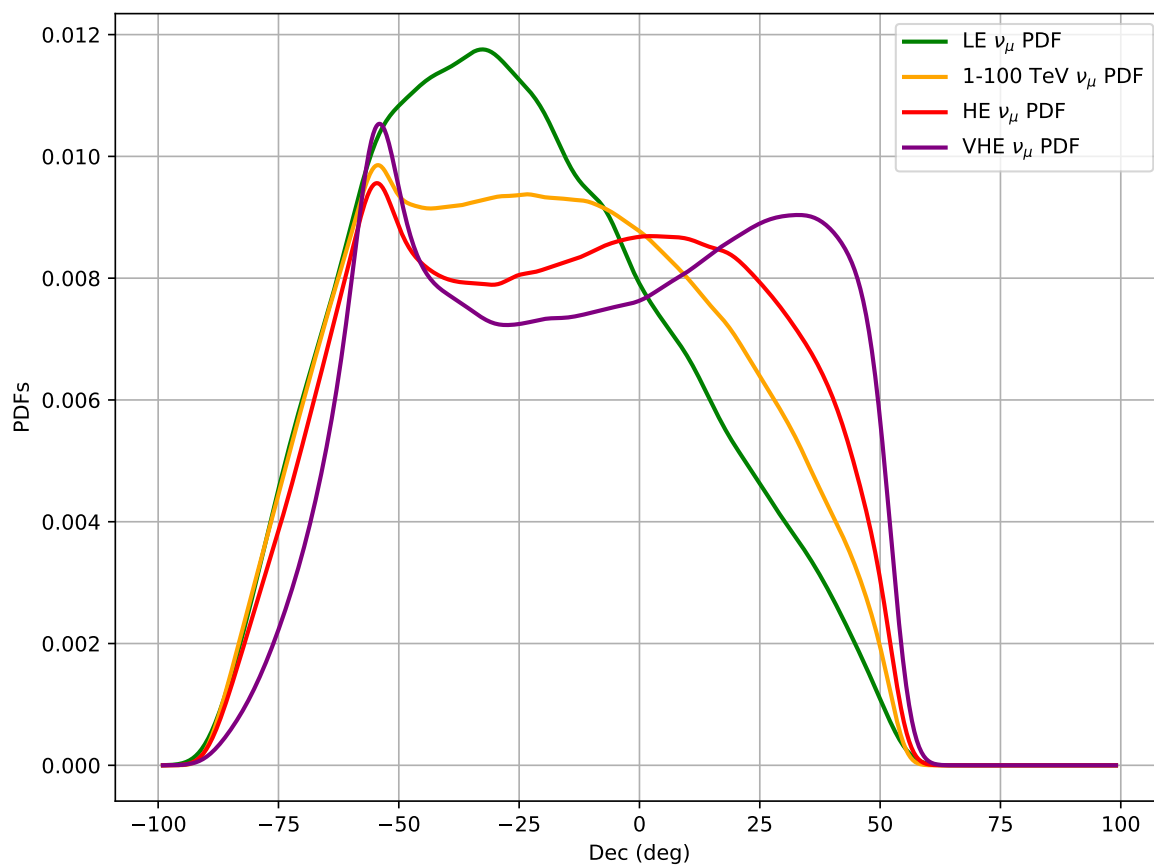


Figura 3.8: Funzioni di densità di probabilità degli eventi in funzione della declinazione. Il dominio dei valori che la declinazione può assumere è compreso tra -90° e 90° , ma l'algoritmo che produce la KDE, può eventualmente considerare una probabilità non nulla di rivelare eventi fuori tale range.

3.3.4 Ricampionamento dei dati

Applicando sul dataset i tagli descritti sopra, si riesce ad ottenere una descrizione dettagliata della distribuzione celeste degli eventi, ma inevitabilmente si incorre in una carenza di dati statistici. Per esempio, dopo questa procedura, gli eventi ad altissima energia (VHE), si riducono ad appena il 18.7% del numero iniziale di eventi nel dataset. Si è cercato di rimediare a questo problema generando un numero molto maggiore di eventi, sia per aumentare la statistica, sia per rendere confrontabili tra loro le mappe relative ai diversi range. In particolare, la classe *Scipy* fornisce un metodo di ricampionamento casuale dei dati, a partire dalla loro PDF.

Questo metodo è stato applicato alle distribuzioni in declinazione. Per quanto riguarda i valori di ascensione retta, la cui distribuzione si assume uniforme, i dati per i nuovi campioni sono stati selezionati in modo casuale a partire dal dataset originario.

Il numero di eventi così ottenuti è stato impostato a 10^8 , ripopolando ogni range energetico con una statistica nettamente superiore rispetto ai dataset originari. In figura 3.9 si confrontano le distribuzioni delle declinazioni dei dati originali e di quelli ricampionati. Le distribuzioni (e le rispettive PDF ottenute), all'aumentare dell'energia, presentano un picco per valori di declinazione leggermente al di sotto di -50° . Si sono quindi generate le mappe del cielo relative ai nuovi campioni di dati, in figura 3.10.

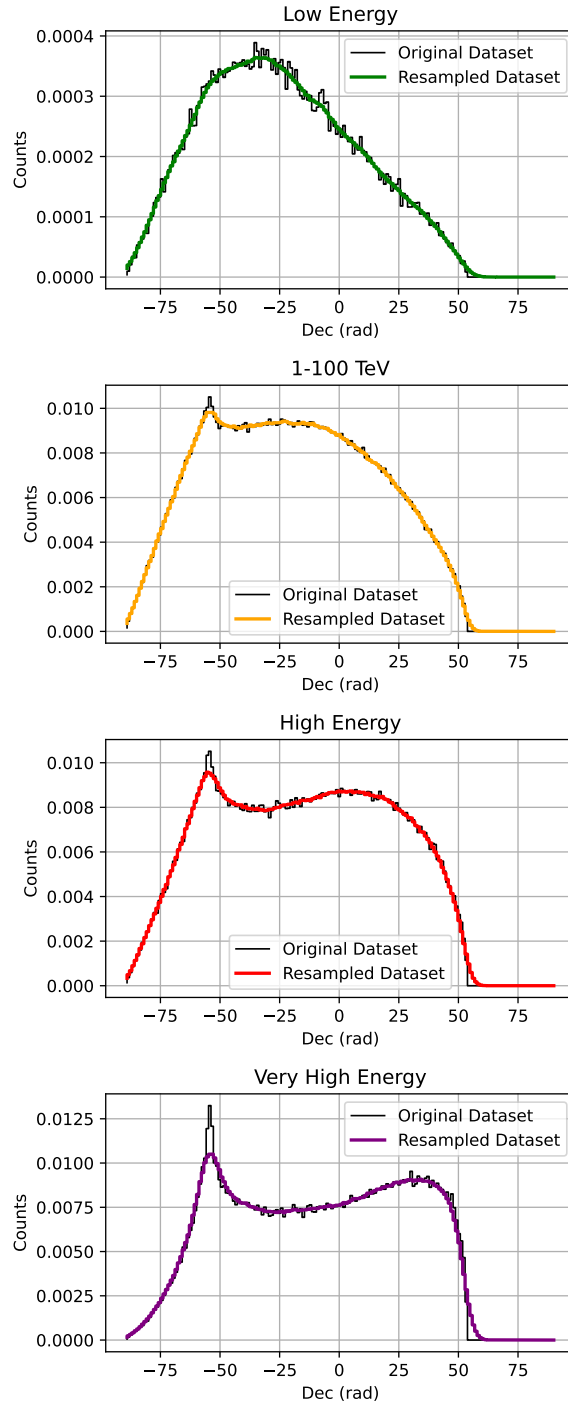


Figura 3.9: Confronto tra campioni di dati Monte Carlo originali (linea nera), e dati dopo il ricampionamento (linee colorate). Si può notare la conformità alle PDF in figura 3.8.

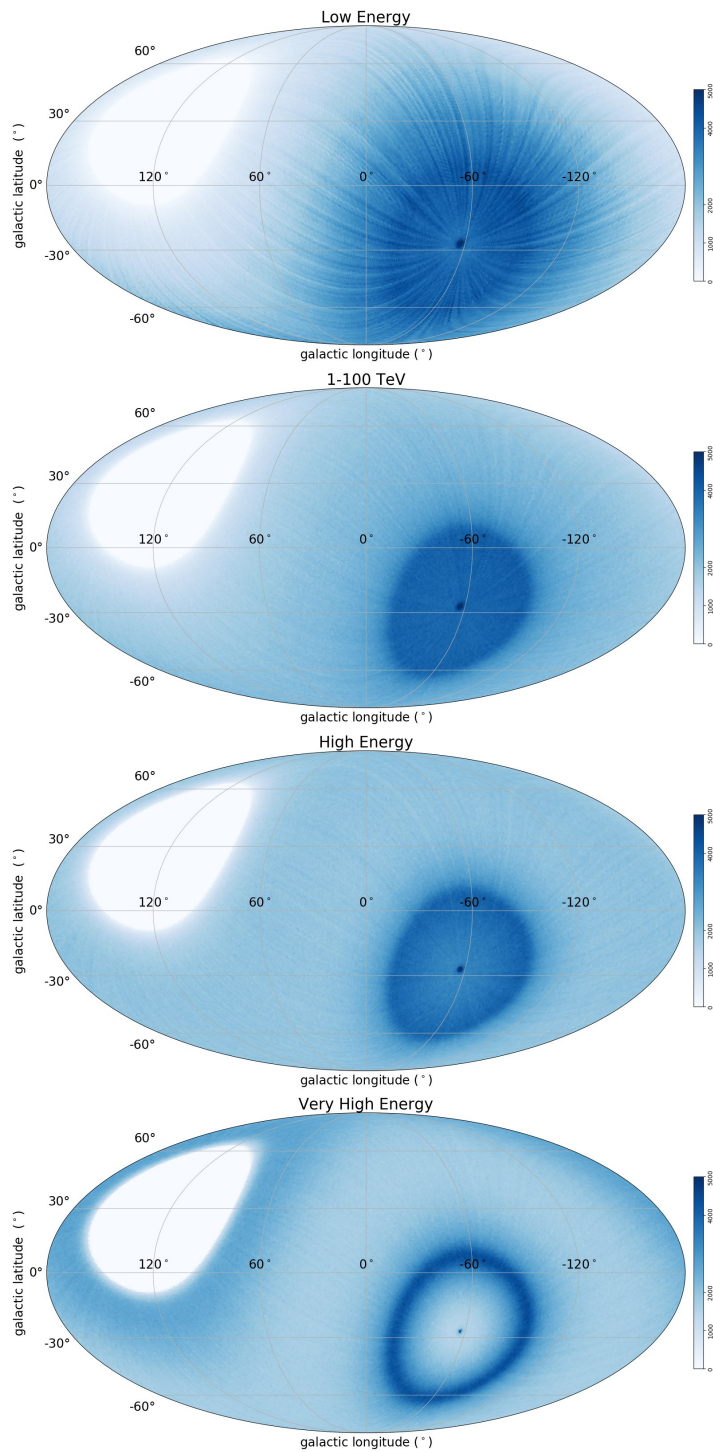


Figura 3.10: Mappe del cielo dei campioni ottenuti dopo il processo di ricampionamento, per ogni range energetico.

Conclusioni

Dalla analisi di visibilità condotta per il telescopio KM3NeT/ARCA, discussa in sezione 3.3.2, si conclude che gran parte del centro galattico risulta costantemente visibile attraverso eventi di tipo traccia up-going. La ottima risoluzione angolare che KM3NeT/ARCA riesce a raggiungere per questo tipo di eventi permetterà di complementare le recenti evidenze di un flusso diffuso di neutrini astrofisici provenienti dal centro galattico, in accordo con quanto già misurato da IceCube.

Inoltre, un'analisi combinata delle sorgenti puntiformi situate nelle zone di intersezione tra i cieli visibili dai due telescopi, potrà in futuro fornire ulteriori informazioni sui siti di accelerazione di raggi cosmici.

Dopo aver applicato dei tagli sul dataset di eventi Monte Carlo a disposizione, in corrispondenza di alcuni valori energetici, si è reso necessario un ricampionamento dei dati, al fine di aumentare la statistica e quindi la significatività dell'analisi.

Il ricampionamento (sezione 3.3.4) ha consentito di approfondire lo studio di eventi di tipo traccia causati da interazioni di ν_μ a corrente carica, in determinati range energetici distinti. Ciò che è emerso da questa analisi è una diversa distribuzione degli eventi rispetto al range considerato. Specialmente per quanto riguarda quella relativa ad eventi con energie superiori ad 1 PeV, dovrà essere tenuta in considerazione per successive analisi riguardanti il piano galattico.

Bibliografia

- [1] M. A. Markov. «On high energy neutrino physics». In: *10th International Conference on High Energy Physics*. 1960, pp. 578–581.
- [2] Maurizio Spurio. *Probes of Multimessenger Astrophysics: Charged cosmic rays, neutrinos, γ -rays and gravitational waves*. Springer, 2018.
- [3] D. Montanino. «Le oscillazioni di neutrino». In: *Ithaca VI* (2015).
- [4] Carmelo Evoli. *The Cosmic-Ray Energy Spectrum*. Dic. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.4396125. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4396125>.
- [5] *Raggi cosmici e neutrini e dal cosmo*. URL: <https://fisica-astronomia.unibo.it/it/ricerca/progetti-e-linee-di-ricerca/progetti-internazionali/km3/raggi-cosmici-e-neutrini-e-dal-cosmo>.
- [6] ENRICO Fermi. «On the Origin of the Cosmic Radiation». In: *Phys. Rev.* 75 (8 apr. 1949), pp. 1169–1174. DOI: 10.1103/PhysRev.75.1169. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.75.1169>.
- [7] Andrea Palladino, Maurizio Spurio e Francesco Vissani. «Neutrino Telescopes and High-Energy Cosmic Neutrinos». In: *Universe* 6.2 (feb. 2020), p. 30. ISSN: 2218-1997. DOI: 10.3390/universe6020030. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/universe6020030>.
- [8] J.D. Myers. Feb. 2016. URL: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/agn/>.
- [9] Bettina Hartmann. *Reconstruction of Neutrino-Induced Hadronic and Electromagnetic Showers with the ANTARES Experiment*. 2006. arXiv: astro-ph/0606697 [astro-ph].
- [10] *KM3NeT website*. URL: <https://www.km3net.org/pictures-and-videos/>.

- [11] S Adrián-Martínez et al. «Letter of intent for KM3NeT 2.0». In: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.8 (giu. 2016), p. 084001. DOI: 10.1088/0954-3899/43/8/084001. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>.
- [12] S. Aiello et al. «The KM3NeT multi-PMT optical module». In: *Journal of Instrumentation* 17.07 (lug. 2022), P07038. DOI: 10.1088/1748-0221/17/07/P07038. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/07/P07038>.
- [13] «gSeaGen: The KM3NeT GENIE-based code for neutrino telescopes». In: *Computer Physics Communications* 256 (2020), p. 107477. ISSN: 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2020.107477>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465520302241>.
- [14] Andrea Zonca et al. «healpy: equal area pixelization and spherical harmonics transforms for data on the sphere in Python». In: *Journal of Open Source Software* 4.35 (mar. 2019), p. 1298. DOI: 10.21105/joss.01298. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.01298>.
- [15] Astropy Collaboration. «The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package». In: *apj* 935.2, 167 (ago. 2022), p. 167. DOI: 10.3847/1538-4357/ac7c74. arXiv: 2206.14220 [astro-ph.IM].
- [16] Pauli Virtanen et al. «SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python». In: *Nature Methods* 17 (2020), pp. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.