

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

Stima della significatività post-trial nella
ricerca di neutrini astrofisici con
KM3NeT/ARCA

Relatore:

Prof. Maurizio Spurio

Correlatore:

Dott. Francesco Carenini

Presentata da:

Valerio Andresini

Anno Accademico 2025/2026

Indice

1	Astronomia dei neutrini	3
1.1	Cenni storici sul neutrino	3
1.2	Fisica dei neutrini	4
1.2.1	Proprietà dei neutrini	4
1.2.2	Interazioni dei neutrini ad alta energia	4
1.3	Origine e flussi dei neutrini ad alta energia	6
1.3.1	Flussi attesi di neutrini a Terra	6
1.3.2	Processi di emissione di neutrini astrofisici ad alta energia	7
1.3.3	Raggi cosmici e neutrini atmosferici	8
1.3.4	Sorgenti di neutrini astrofisici	8
2	I rivelatori KM3NeT	12
2.1	Infrastruttura KM3NeT	12
2.2	Struttura dei telescopi	13
2.3	Rilevazione dei neutrini ad alta energia	15
2.3.1	Effetto Čerenkov	15
2.3.2	Topologie di eventi	16
2.3.3	Origine del fondo per KM3NeT/ARCA	19
3	Stima della significatività post-trial nella ricerca di neutrini astrofisici con KM3NeT/ARCA	22
3.1	Cataloghi utilizzati	22
3.2	Metodi per la ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini	23
3.3	Distribuzione attesa di p -valori	25
3.4	Significatività post-trial	27
3.5	Calcolo del p -valore post-trial sui dati di KM3NeT/ARCA	27
A	Le coordinate equatoriali	30
	Bibliografia	31

Abstract

I neutrini rappresentano messaggeri ideali per lo studio delle sorgenti astrofisiche. Interagendo esclusivamente tramite l'interazione debole, presentano una sezione d'urto estremamente ridotta che consente loro di viaggiare su distanze cosmiche senza essere assorbiti dalla materia interposta tra la sorgente e la Terra. Essendo inoltre particelle elettricamente neutre, le loro traiettorie non vengono deflesse dai campi magnetici spaziali, conservando intatta l'informazione direzionale. Tuttavia lo studio dei neutrini astrofisici rappresenta una sfida sperimentale estremamente complessa a causa del loro flusso atteso, che risulta esiguo e fortemente sovrastato dal fondo di neutrini e muoni atmosferici. Per compensare tale limite, le attuali tecniche di rivelazione richiedono volumi strumentati su scala del chilometro cubo.

KM3NeT/ARCA è un rivelatore Čerenkov di neutrini di nuova generazione, attualmente in costruzione nelle profondità del Mediterraneo al largo delle coste della Sicilia. Ottimizzato per la rivelazione di neutrini astrofisici ad alta energia, si prospetta come un rivelatore essenziale per l'identificazione delle sorgenti di neutrini, galattiche ed extragalattiche.

In questo lavoro viene descritta la procedura statistica sviluppata per valutare la significatività statistica post-trial nella ricerca di sorgenti puntiformi con KM3NeT/ARCA, sulla base dei dati raccolti dal rivelatore con 19 e 21 stringhe in presa dati. Lo studio si basa su tre diversi cataloghi astrofisici, analizzati con lo stesso insieme di dati. Per valutare la compatibilità dei risultati ottenuti dalla Collaborazione KM3NeT con una fluttuazione statistica del fondo atmosferico, la procedura implementata, basata su pseudo-esperimenti, mira a ottenere una significatività corretta che tenga conto del Look-Elsewhere Effect.

Capitolo 1

Astronomia dei neutrini

1.1 Cenni storici sul neutrino

Alla fine dell'Ottocento era noto che determinati elementi radioattivi, come l'uranio o il radio, emettevano delle radiazioni invisibili capaci di attraversare i corpi opachi e impressionare le lastre fotografiche. Queste emissioni vennero catalogate come α , β e γ in base alla loro diversa capacità di penetrare la materia. Successivamente si concluse che i diversi effetti provocati da ciascun tipo di radiazione fossero dovuti a particelle diverse, emesse a seguito del decadimento dei nuclei radioattivi. Nello specifico, il decadimento α consisteva nell'emissione di nuclei di elio (allora chiamati particelle α), il decadimento β nell'emissione di elettroni (particelle β) e il decadimento γ nell'emissione di fotoni ad alta energia (particelle γ). Inizialmente, si riteneva che tutti questi processi fossero decadimenti a due corpi; per il decadimento β , ad esempio, si ipotizzava una reazione della forma:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta. \quad (1.1)$$

Le leggi di conservazione di energia e quantità di moto prevedono che in decadimenti a due corpi di questo tipo, l'energia finale delle particelle emesse assuma sempre lo stesso valore. Mentre questo trovava conferma sperimentale per i decadimenti α e γ , evidenze sperimentali avevano mostrato che la particella β assumeva uno spettro continuo di energia.

Tale inconsistenza con la teoria rappresentò un grande dilemma; la soluzione fu avanzata nel 1930 dal fisico Wolfgang Pauli, il quale ipotizzò che il decadimento β producesse una terza particella, fermionica per garantire la conservazione del momento angolare, e non rivelata fino a quel momento poiché priva di carica elettrica. Indicando con $\bar{\nu}_e$ questa particella e indicando con e^- la particella β , il decadimento β corretto si può scrivere come:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (1.2)$$

Quando Fermi sviluppò la teoria di campo quantizzato delle interazioni deboli accolse l'idea di Pauli e chiamò la nuova particella neutrino. Nel 1956 l'esistenza del antineutrino elettronico fu confermata sperimentalmente da C. Cowan e F. Reines, che riuscirono a rivelare i neutrini prodotti da un reattore nucleare. Ad oggi sono stati scoperti altri due tipi di neutrini, quello muonico e quello tauonico, associati rispettivamente ai leptoni muone e tau.

1.2 Fisica dei neutrini

1.2.1 Proprietà dei neutrini

I neutrini sono particelle elementari del Modello Standard che si distinguono in tre sapori: il sapore elettronico con ν_e e $\bar{\nu}_e$, il sapore muonico con ν_μ e $\bar{\nu}_\mu$ ed infine il sapore tauonico con ν_τ e $\bar{\nu}_\tau$. Hanno spin semintero e quindi fanno parte della famiglia dei fermioni. Appartengono al gruppo dei leptoni e quindi senza carica di colore e insensibili alla forza forte. Hanno carica elettrica nulla e quindi non interagiscono elettromagneticamente. Il Modello Standard prevede che i neutrini abbiano massa nulla. Tuttavia, il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini [1, 2], per il quale essi mutano sapore viaggiando nello spazio, è la prova della loro natura massiva: questo cambio di sapore è infatti possibile solo se i neutrini possiedono masse non nulle e diverse tra loro. Sebbene l'esistenza della massa dei neutrini sia ormai accertata, ad oggi non è stato possibile misurarne il valore assoluto, ma soltanto la differenza tra i quadrati delle masse.

I neutrini sono soggetti in modo significativo alla sola interazione debole. Se da un lato ciò li rende sonde ideali per studiare l'interazione debole allo stato puro, dall'altro li rende estremamente elusivi: infatti al TeV la sezione d'urto è dell'ordine di 10^{-35} cm^2 [3].

1.2.2 Interazioni dei neutrini ad alta energia

Le interazioni dei neutrini si hanno principalmente per mezzo dell'interazione debole. I mediatori di questa forza sono i bosoni Z^0 , W^+ e W^- . I bosoni W^+ e W^- sono gli unici mediatori di forze del Modello Standard dotati di carica elettrica, rispettivamente positiva e negativa. Per questo motivo le interazioni deboli vengono distinte in *interazioni deboli a corrente carica* (CC) se coinvolgono $W^\pm$, o in *interazioni deboli a corrente neutra* (NC) se mediate solo da Z^0 . Le interazioni in CC presentano proprietà peculiari come la non conservazione del sapore nel settore dei quark. Ciò può essere osservato nel decadimento β^- per esempio:

$$n \xrightarrow{W^-} p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (1.3)$$

dove un quark down (sapore down) all'interno del neutrone si trasforma in un quark up (sapore up) per formare il protone.

Può tornare utile considerare come i neutrini ad alta energia (superiore al GeV) interagiscano con i costituenti della materia.

Ad alte energie, la sezione d'urto neutrino-elettrone è sufficientemente piccola rispetto a quella con i nucleoni da poter trascurare i processi deboli che coinvolgono gli elettroni, approssimando di fatto le interazioni alle sole reazioni con i nucleoni.

Le interazioni di neutrini molto energetici con i nucleoni si hanno sia in CC che NC. Indicando con l un generico leptone carico, con ν_l il neutrino associato ad esso, con N un nucleone ed X lo stato adronico finale, le interazioni in NC sono:

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X, \quad \bar{\nu}_l + N \rightarrow \bar{\nu}_l + X. \quad (1.4)$$

Le interazioni in CC ad alta energia sono:

$$\nu_l + N \rightarrow l^- + X, \quad \bar{\nu}_l + N \rightarrow l^+ + X. \quad (1.5)$$

Nel regime di alte energie lo stato adronico finale X non si riduce mai a una singola particella, ma è sempre formato da uno sciame di adroni.

Chiamando E_X l'energia di X e E_ν l'energia del neutrino incidente, in Figura 1.1 viene mostrata la previsione dell'inelasticità media, definita come il rapporto $\langle E_X/E_\nu \rangle$, in funzione di E_ν sia per le interazioni in CC che NC. Per energie ~ 10 GeV, in media il leptone trasporta almeno il 50% dell'energia del neutrino incidente e questa percentuale aumenta all'aumentare di E_ν .

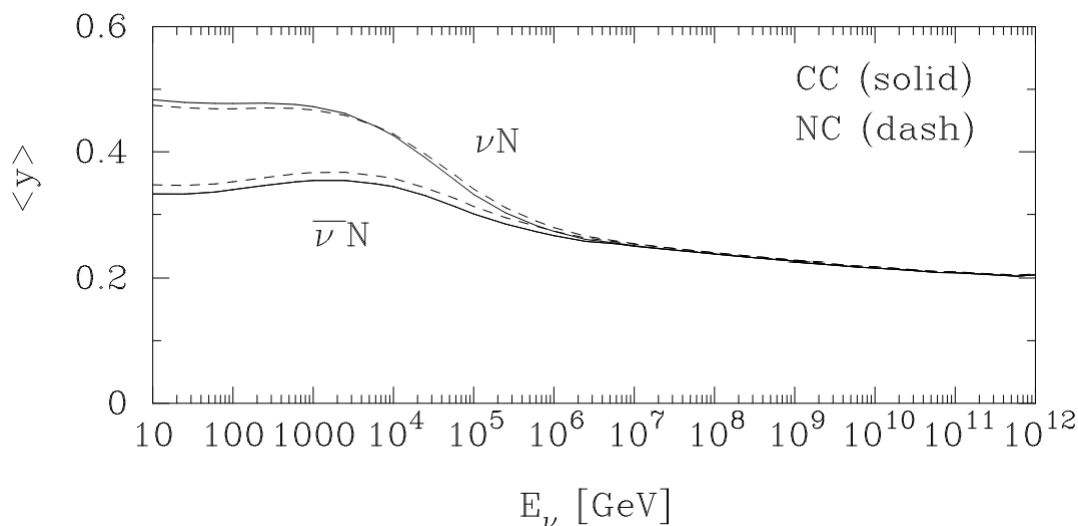


Figura 1.1: Dipendenza dell'inelasticità in un urto neutrino-nucleone in funzione dell'energia del neutrino incidente. Le interazioni in CC sono indicate con linee continue, mentre quelle in NC con linee tratteggiate. Immagine presa da [4].

In Figura 1.2 è riportato l'andamento della sezione d'urto per neutrini e antineutrini muonici sui nucleoni in funzione dell'energia. Come si evince dalla figura, la probabilità di interazione cresce all'aumentare dell'energia del neutrino incidente.

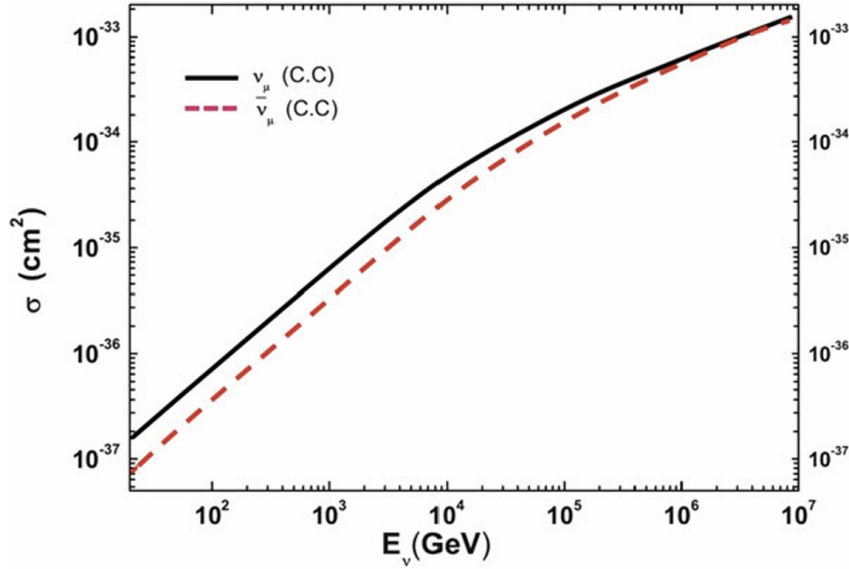


Figura 1.2: *Grafico della sezione d'urto per l'interazione di neutrini e antineutrini muonici sui nucleoni in funzione dell'energia secondo la distribuzione partonica CTEQ6-DIS. Immagine presa da [5].*

1.3 Origine e flussi dei neutrini ad alta energia

1.3.1 Flussi attesi di neutrini a Terra

In natura i neutrini vengono prodotti attraverso processi fisici molto diversi tra loro, distinguibili analizzando il loro flusso in funzione dell'energia. La Figura 1.3 mostra lo spettro di neutrini previsto a Terra: in funzione dell'energia il flusso è dominato da processi fisici differenti.

Nei capitoli successivi verranno approfondite le scale di energia rilevanti per il rivelatore KM3NeT/ARCA, che è ottimizzato per la rivelazione di neutrini con energie superiori al TeV (10^{12} eV). In questo intervallo di energia, nel grafico in Figura 1.3, per energie crescenti si incontrano prima i neutrini atmosferici e poi un flusso di neutrini astrofisici diffusi rilevati dal telescopio IceCube [7], entrambi osservati sperimentalmente. Alle energie più estreme dello spettro si collocano i neutrini cosmogenici, la cui presenza

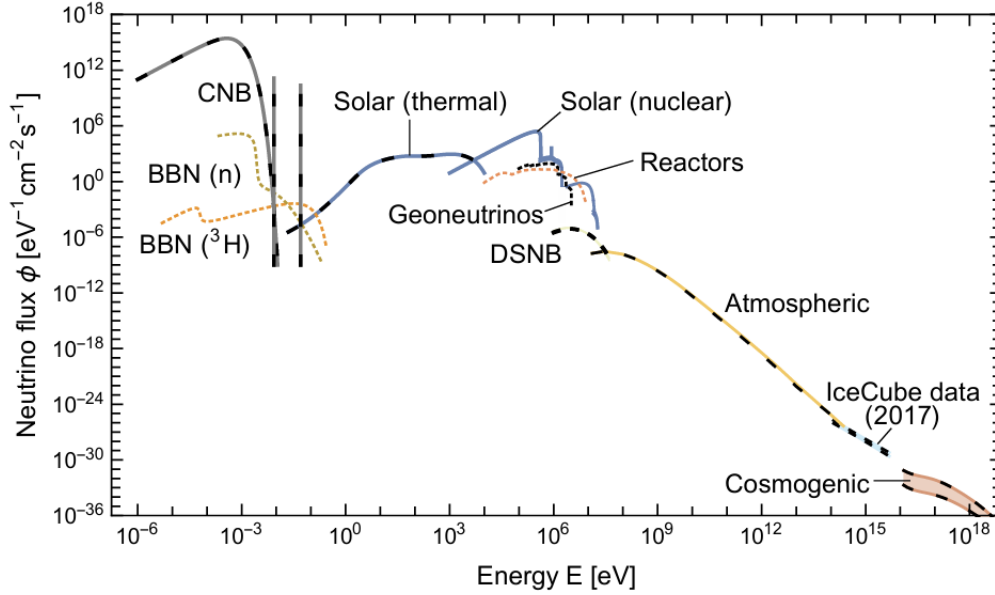


Figura 1.3: *Flusso dei neutrini a Terra, integrato su tutte le direzioni con il contributo di ogni sapore. Le linee continue indicano i neutrini, quelle tratteggiate gli antineutrini. Accanto a ogni curva è indicato il processo fisico che contribuisce a quel flusso. Ad energie superiori al TeV si trovano, per energie crescenti, i neutrini atmosferici, i dati di neutrini astrofisici presi dal rivelatore IceCube e i neutrini cosmogenici. Immagine presa da [6].*

è al momento solo una previsione teorica a causa del loro flusso estremamente basso. I limiti sperimentali si stanno però spingendo verso queste scale con l'osservazione da parte della Collaborazione KM3NeT di un neutrino con energia stimata pari a 220 PeV [8], rivelato dal telescopio KM3NeT/ARCA. Questo evento, denominato KM3-230213A, è il neutrino più energetico mai osservato e fornisce la prima prova che nell'Universo vengono prodotti neutrini di energie così elevate. Ad oggi, non è stata identificata una sorgente precisa, ma si ipotizza che il neutrino potrebbe essersi originato in un acceleratore cosmico differente rispetto ai neutrini a più bassa energia, oppure che potrebbe trattarsi della prima rivelazione in assoluto di un neutrino cosmogenico [9].

1.3.2 Processi di emissione di neutrini astrofisici ad alta energia

Il meccanismo predominante nella produzione di neutrini extraterrestri ad alta energia è il decadimento dei pioni, generati a seguito di interazioni protone-protone ("pp") o protone-fotone ("pγ") che avvengono in processi astrofisici. Essendo i pioni instabili

questi decadono nei seguenti modi:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (1.6)$$

Anche i muoni sono instabili e decadono in:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (1.7)$$

Contando i neutrini prodotti, complessivamente si ha una distribuzione di sapore di circa $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 2 : 0$. L'approssimazione deriva dal fatto che sono state incluse solo le interazioni predominanti; l'inclusione di canali di reazione più rari modificherebbe leggermente questo rapporto. Su distanze di propagazione cosmologiche i neutrini oscillano; la composizione di equilibrio attesa a Terra a seguito delle oscillazioni vale: $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 1 : 1$.

È importante notare che il processo produce anche fotoni ad alta energia provenienti dal decadimento di π^0 . Per questo motivo, ci si può aspettare una stretta correlazione tra le sorgenti di fotoni e quelle di neutrini. È tuttavia necessario considerare che esistono scenari astrofisici in cui i fotoni vengono prodotti senza alcuna emissione di neutrini, oppure contesti in cui la radiazione elettromagnetica viene assorbita da materia che risulta invece trasparente ai neutrini.

1.3.3 Raggi cosmici e neutrini atmosferici

I *raggi cosmici primari* sono particelle ad alta energia ($\gtrsim$ GeV) prodotte da meccanismi di accelerazione di sorgenti astrofisiche. Essi sono costituiti principalmente da protoni e nuclei atomici. Quando queste particelle collidono con i nuclei degli atomi presenti in atmosfera producono sciame di particelle secondarie. Non avendo origine astrofisica vengono chiamate *raggi cosmici secondari*. Tra tutti i raggi cosmici secondari, le particelle più importanti per quanto concerne la produzione di neutrini sono i $\pi^\pm$ e $K^\pm$. I neutrini prodotti dal loro decadimento vengono chiamati *neutrini atmosferici*. Tra questi, i neutrini di energia superiore al TeV sono principalmente muonici e provengono da processi analoghi a quelli descritti da Equazione (1.6). A queste energie, i processi di produzione di neutrini elettronici sono sfavoriti; per esempio il decadimento descritto dall'Equazione (1.7) non avviene in atmosfera poiché, per effetto della dilatazione relativistica dei tempi, il muone arriva sulla superficie terrestre prima di decadere. Complessivamente al TeV i neutrini elettronici sono meno del 10% di quelli muonici [6] e diminuiscono ulteriormente ad energie maggiori.

1.3.4 Sorgenti di neutrini astrofisici

Come discusso in sezione 1.3.2 la produzione di neutrini extraterrestri ad alta energia ($\gtrsim$ TeV) ha origine da collisioni pp e p γ che avvengono in ambienti astrofisici. Sebbene sia stato osservato un fondo *diffuso* di neutrini astrofisici ad alta energia di origine

extraterrestre con una significatività di 5.7σ [10], ad oggi non è stata confermata l'esistenza di sorgenti astrofisiche *puntiformi*. I risultati più solidi finora ottenuti per sorgenti individuali si fermano al livello di evidenza, raggiungendo una significatività di oltre 3σ per il blazar TXS 0506+056 [11] e di 4.2σ per la galassia attiva NGC 1068 [12], senza superare la soglia dei 5σ richiesta per una scoperta. Tuttavia, benché manchino conferme sperimentali definitive, esistono vari candidati che vengono proposti come potenziali sorgenti di neutrini astrofisici.

Sorgenti galattiche di neutrini

Esiste una forte evidenza di emissione neutrinica proveniente dalla Via Lattea [13]. Analizzando il Piano Galattico, la regione in cui si concentra la maggior parte della materia della nostra Galassia, è stato individuato un segnale compatibile con un flusso diffuso di neutrini con una significatività di 4.5σ . Non è possibile escludere che tale risultato derivi, almeno in parte, da una popolazione di sorgenti puntiformi irrisolte. Come riportato in un recente preprint della Collaborazione IceCube [14], la significatività statistica per l'emissione di neutrini dal piano galattico è stata aggiornata a 5.7σ . Questo risultato stabilisce la Via Lattea come la prima sorgente astrofisica di neutrini ad alta energia a superare la soglia di scoperta dei 5σ .

I *resti di supernova* sono promettenti candidati di sorgenti di neutrini astrofisici. Una supernova è un'esplosione che conclude la vita di una stella. L'evento comporta l'espulsione della maggior parte, e talvolta della totalità, del materiale stellare, da cui hanno origine i resti di supernova. Le potenti onde d'urto generate da questo meccanismo accelerano protoni che, collidendo con il mezzo interstellare circostante (interazioni pp), producono neutrini. Ad oggi, l'unica osservazione congiunta di neutrini e fotoni da una supernova riguarda SN1987A [15], dalla quale sono stati rilevati neutrini con energie dell'ordine del MeV. Questa scala energetica è inferiore di circa sei ordini di grandezza rispetto alle energie del TeV attese dai resti di supernova, che rimangono i principali candidati galattici per l'emissione ad alta energia.

Altri candidati sono il *Centro Galattico*, le *microquasars* e le *nebulose del vento di pulsar*. Nel Centro Galattico è presente il buco nero supermassiccio Sagittarius A*, in grado di accelerare la materia circostante. Le microquasars sono sistemi binari costituiti da un buco nero poco massiccio e da una stella, da cui il buco nero accresce materia: una parte di questa viene inghiottita, un'altra viene accelerata ed espulsa nello spazio. Infine, le nebulose del vento di pulsar sono costituite da una pulsar (ovvero una stella di neutroni) che inietta particelle in una nebulosa circostante composta da gas e polveri. È proprio all'interno della nebulosa che avvengono i processi di accelerazione a seguito dei quali i neutrini potrebbero venir prodotti.

Sorgenti extragalattiche di neutrini

Il flusso diffuso di neutrini extraterrestri discusso all'inizio di sezione 1.3.4 presenta caratteristiche che suggeriscono un contributo significativo di neutrini di origine extragalattica. Esistono vari candidati di sorgenti extragalattiche di neutrini ad alta energia; i principali sono i *nuclei galattici attivi* (AGNs), le *galassie starburst* e i *gamma ray bursts* (GRBs) [16].

Un AGN è una regione compatta al centro di una galassia che presenta un eccesso di luminosità rispetto al resto della galassia ospite; le caratteristiche di questa radiazione suggeriscono che non è prodotta da stelle. Infatti questo eccesso di luminosità è osservato contemporaneamente per bande di frequenza che vanno dal radio ai raggi gamma. L'origine di questa radiazione è imputabile all'accelerazione di particelle cariche da parte di un buco nero supermassiccio al centro della galassia ospite. In Figura 1.4 è riportato lo schema strutturale di un generico AGN. Intorno al buco nero è presente un *disco di accrescimento*, una struttura piana formata da materia che precipita verso il buco nero stesso. In direzione perpendicolare al piano del disco, la materia viene proiettata verso l'esterno a velocità prossime a quelle della luce in due direzioni opposte, generando due *getti relativistici*. In questi getti i protoni vengono accelerati fino ad energie

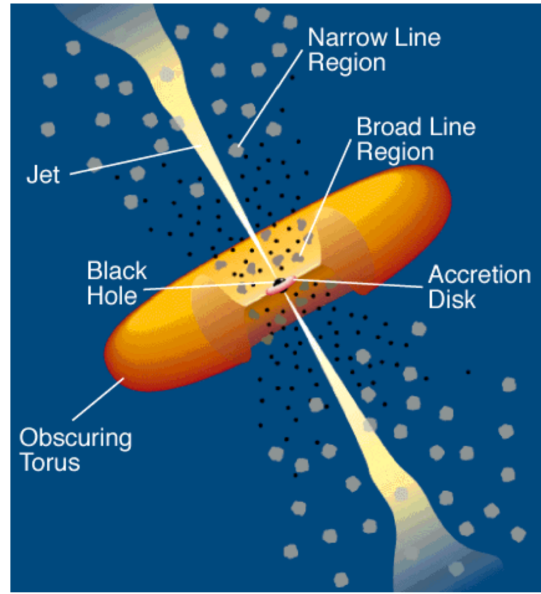


Figura 1.4: *Schema strutturale di un AGN. I getti relativistici sono perpendicolari al disco di accrescimento del buco nero che si trova al centro dell'AGN. Se il getto punta verso l'osservatore, si parla di blazar. Immagine presa da [17].*

estreme e i neutrini vengono prodotti per mezzo di collisioni $p\gamma$, dove i fotoni bersaglio provengono proprio dalla radiazione elettromagnetica emessa dall'AGN. Complessivamente, i modelli teorici prevedono che i neutrini così prodotti presentino uno spettro energetico compreso tra il regime sub-PeV e la scala del PeV, con stime che si estendono fino ai 100 PeV [18]. L'energia irradiata dall'AGN lungo la direzione dei getti è di gran lunga superiore rispetto a tutte le altre direzioni; di conseguenza, la sorgente appare estremamente più luminosa se uno dei getti punta direttamente verso l'osservatore. Per questo motivo, un AGN con un getto relativistico che punta verso la Terra viene chiamato *blazar*. Un blazar che presenta uno spettro ottico privo di righe di emissione marcate viene detto *BL Lacertae* (BL Lac). Un *High-frequency-peaked BL Lac* (HBL) è un blazar di tipo BL Lac in cui il picco della radiazione di sincrotrone cade a frequenze comprese

tra 10^{15} - 10^{17} Hz (UV-raggi X). Per un *Extreme High-energy peaked BL Lac* (EHBL) il picco si spinge a frequenze maggiori di 10^{17} Hz.

Le galassie starburst sono galassie che subiscono un tasso di formazione stellare estremamente elevato. Per esempio, mentre la Via Lattea ha un tasso di formazione di circa 3 masse solari all'anno, una galassia starburst può arrivare a generarne 100 o più. In questi ambienti estremi, raggi cosmici possono essere accelerati ad energie dell'ordine di ~ 10 PeV. Attraverso collisioni protone-protone (scontri pp) contro il gas denso circostante, questi raggi cosmici contribuiscono alla produzione di neutrini ad energie del PeV. NGC 1068, menzionata ad inizio di sezione 1.3.4, è una galassia starburst. È noto che le galassie starburst emettano infrarossi perché la densa polvere galattica assorbe la luce delle stelle appena nate e, riscaldandosi, riemette quell'energia sotto forma di radiazione infrarossa. Si ritiene che le emissioni infrarosse a luminosità superiori a $10^{12} L_{\odot}$, dove $L_{\odot}$ è la luminosità solare, si originino da un contributo combinato di *starburst* e AGN [19]. Per questo motivo le *Ultraluminous Infrared Galaxies* (ULIRGs), galassie caratterizzate da un'emissione infrarossa compresa tra $10^{12} L_{\odot}$ e $10^{13} L_{\odot}$, rappresentano sorgenti privilegiate per la ricerca di neutrini astrofisici.

Infine, i GRBs sono eventi esplosivi transienti, osservati come lampi di raggi γ estremamente intensi ma di breve durata. In un lasso di tempo brevissimo (che va da qualche millisecondo a qualche ora) riescono a liberare una quantità di energia pari a quella che il Sole emetterà in tutta la sua vita. Questa transitorietà è la caratteristica fondamentale che li differenzia dalle sorgenti descritte in precedenza. Il meccanismo predominante per la produzione di neutrini in questi scenari è l'interazione $p\gamma$. Da tali collisioni si attende la produzione di neutrini ad alta energia, con valori che si aggirano attorno ai 10^{14} eV [20].

Nonostante diverse classi di oggetti extragalattici siano considerate candidate per la produzione di neutrini ad alta energia, non sono state identificate sorgenti precise. In questo scenario, i futuri dati del rivelatore KM3NeT/ARCA saranno cruciali per l'identificazione delle controparti astrofisiche del flusso diffuso di neutrini cosmici.

Capitolo 2

I rivelatori KM3NeT

Lo studio dei neutrini ad alta energia provenienti dal cosmo si sviluppa agli inizi degli anni '60, quando due lavori indipendenti di Greisen [21] e di Markov e Zheleznykh [22] presentano la stessa idea: costruire un telescopio di neutrini. Greisen suggerisce la costruzione di un rivelatore Čerenkov dal diametro di 15 metri, situato in una miniera profonda e riempito con 3000 tonnellate di liquido a basso costo con funzione di bersaglio. Markov, invece, suggerisce di collocare un rivelatore Čerenkov di superficie di 1000 m^2 in un mezzo dielettrico trasparente. Entrambi stimano un tasso di neutrini osservabili estremamente basso, ma sottolineano il vantaggio di poter studiare particelle anche con energie di 100 GeV, all'epoca irraggiungibili dagli acceleratori, e allo stesso tempo, fornire un nuovo strumento utile per la fisica delle astroparticelle. Da queste idee nascono due linee evolutive distinte. L'approccio di Greisen ha portato negli anni alla realizzazione di grandi rivelatori sotterranei come Super-Kamiokande, Borexino e JUNO. L'intuizione di Markov ha trovato applicazione nei moderni telescopi sottomarini, come Antares e i rivelatori KM3NeT/ARCA e KM3NeT/ORCA, e subglaciali, come il telescopio IceCube.

2.1 Infrastruttura KM3NeT

KM3NeT (*Cubic Kilometre Neutrino Telescope*) è un'infrastruttura di ricerca europea in costruzione, che ospita due rivelatori Čerenkov di neutrini ad alta energia nelle profondità del Mar Mediterraneo, sviluppati a partire dall'esperienza e dalle competenze tecniche affinate con l'esperimento ANTARES [23]. I due rivelatori sono KM3NeT/ORCA (*Oscillation research with Cosmics in the Abyss*), situato a 2500 m di profondità al largo di Tolone (Francia), e KM3NeT/ARCA (*Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss*), situato a 3500 m di profondità al largo di Portopalo di Capo Passero (Sicilia). KM3NeT/ORCA è progettato per lo studio delle oscillazioni dei neutrini atmosferici ed è quindi ottimizzato per rivelare neutrini ad energie comprese tra i MeV e i sub-TeV.

KM3NeT/ARCA invece è progettato per studiare neutrini di origine astrofisica ad alte energie ed è ottimizzato per rivelare neutrini a energie fino al multi-PeV.

2.2 Struttura dei telescopi

KM3NeT/ARCA e KM3NeT/ORCA sono costruiti a partire dalla stessa tecnologia modulare, scelta per garantire scalabilità e agevolare le procedure di controllo qualità, suddivisa in tre livelli strutturali: i *Digital Optical Modules* (DOMs), le *Detection Units* (DUs) e i *building blocks*.



Figura 2.1: A sinistra l'immagine di un DOM. Si tratta di una sfera di vetro dal diametro di 44 cm, contenente 31 PMTs. A destra è presente un singolo PMT necessario alla rivelazione di luce Čerenkov. Crediti: KM3NeT, <https://www.km3net.org/>.

I DOMs (Figura 2.1, sinistra) sono moduli ottici progettati per rivelare la luce Čerenkov; questa viene indotta nell'acqua da particelle cariche prodotte quando i neutrini interagiscono con la materia. A tale scopo, il modulo è caratterizzato da un'accuratezza temporale inferiore al nanosecondo ed è in grado di rivelare segnali nella banda del blu-UV ($\sim 350\text{-}550\text{ nm}$) composti da un singolo fotone fino a una cascata di migliaia di fotoni [24]. Costruttivamente, un DOM è una sfera di 44 cm di diametro, rivestita di vetro trasparente e resistente all'elevata pressione degli abissi marini. Ogni DOM racchiude 31 tubi fotomoltiplicatori (PMTs, Figura 2.1, destra) da 3 pollici, strumenti di calibrazione ed elettronica per l'alimentazione, la lettura e l'acquisizione dati. Il design multi-PMT rappresenta un'evoluzione rispetto a quello di ANTARES, che utilizzava un unico PMT più grande da 10 pollici, comportando diversi vantaggi descritti in [24]. I miglioramenti principali includono un'area fotocatodica (ossia la superficie effettiva del

senso in grado di intercettare la luce) circa tre volte superiore, unita a un'estesa copertura angolare e a un'ottima sensibilità direzionale. A livello di acquisizione dati, questa architettura assicura una buona risoluzione nel conteggio dei fotoni e un'accurata calibrazione spazio-temporale. Infine, si ottiene una significativa riduzione dei costi a parità di prestazioni.

I DOMs sono disposti a distanze regolari lungo stringhe verticali, chiamate Detection Units (DUs, Figura 2.2), e sono interconnessi da un cavo optoelettronico, dedicato all'alimentazione dei sensori e alla trasmissione dei dati acquisiti. Ogni DU è ancorata al fondale marino tramite una struttura di base (*Base Module*) ed è mantenuta in posizione verticale grazie a una boa sottomarina posta alla sua sommità.

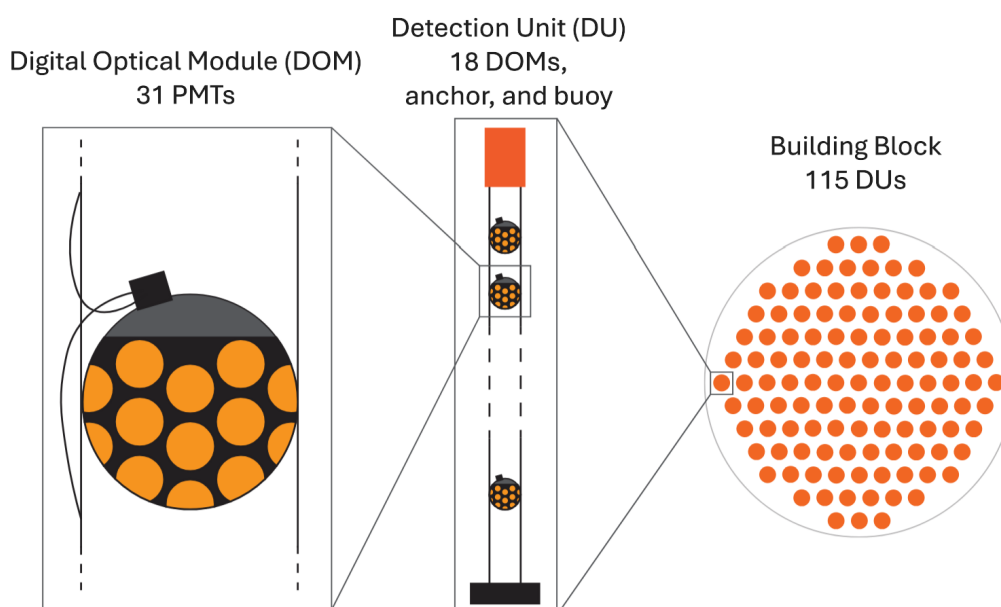


Figura 2.2: Schema delle strutture principali dei telescopi di KM3NeT. Ogni DOM contiene 31 fotosensori. Ogni DU presenta 18 DOMs equidistanziati verticalmente. Un building block è formato da 115 DUs. Figura presa da [25].

Un insieme di 115 DUs, disposte in modo tale da formare un volume cilindrico, è chiamato building block (Figura 2.2). L'installazione delle singole DUs che compongono un building block avviene attraverso diverse missioni marine. Tra una missione e l'altra, il rivelatore viene mantenuto attivo e in presa dati. Le configurazioni parziali assunte dall'esperimento nel corso del tempo vengono tipicamente denotate affiancando al nome del telescopio il numero di stringhe operative in quella specifica fase. Per esempio, la sigla ARCA-51 indica il rivelatore KM3NeT/ARCA in configurazione con 51 DUs in presa dati. L'alimentazione dell'intero apparato e il trasferimento dei dati verso terra avvengono tramite una rete di cavi optoelettronici sottomarini. Nel caso di KM3NeT/ARCA,

l'infrastruttura di cavi è connessa alla stazione di terra a Portopalo di Capo Passero, dove è presente l'elettronica per acquisire i dati e i server per gestirli.

Strutturalmente KM3NeT/ARCA e KM3NeT/ORCA si distinguono per la distanza verticale tra i DOMs nelle DUs e la distanza orizzontale tra le DUs all'interno del building block. Questi parametri sono scelti sulla base dell'intervallo energetico per il quale il rivelatore è ottimizzato. Per KM3NeT/ARCA, i DOMs sono distanziati di 36 m uno dall'altro, mentre le DUs sono separate orizzontalmente di 90 m. Al suo completamento KM3NeT/ARCA sarà formato da due building blocks e una volta concluso instrumenterà 1 km³. A luglio 2026, le DUs installate sono 51. KM3NeT/ORCA sarà più piccolo: consisterà di un solo building block con una separazione verticale di 9 m tra i DOMs e con una distanza orizzontale di 20 m tra le DUs.

2.3 Rilevazione dei neutrini ad alta energia

2.3.1 Effetto Čerenkov

Qualsiasi telescopio per neutrini, operativo o in fase di progettazione, ottimizzato per l'intervallo energetico che va dal TeV al PeV, funziona raccogliendo i fotoni ottici prodotti dall'effetto Čerenkov.

Una particella carica che attraversa un mezzo trasparente con velocità superiore a quella della luce nel mezzo polarizza le molecole che incontra lungo la sua traiettoria, creando dei dipoli temporanei. Quando le molecole tornano allo stato di equilibrio, emettono onde elettromagnetiche. L'interferenza costruttiva tra le onde emesse da ciascuna molecola dà origine a un fronte d'onda luminoso e coerente di forma conica [26], come schematizzato in Figura 2.3.

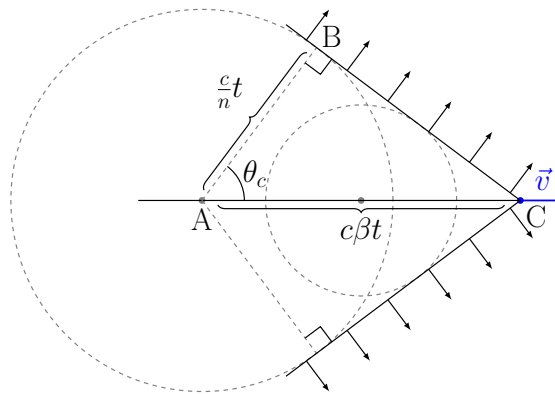


Figura 2.3: Schema dell'effetto Čerenkov. Una particella carica attraversa un mezzo dielettrico con velocità v superiore a quella della luce nel mezzo. Si forma un fronte d'onda luminoso e coerente di forma conica.

Il coseno dell'angolo θ_c è dato dal rapporto tra la lunghezza del cateto AB, la distanza percorsa dalla luce in un tempo t , e la lunghezza dell'ipotenusa AC, la distanza percorsa dalla particella carica al tempo t . Dunque chiamando n l'indice di rifrazione del mezzo e $\beta = \frac{v}{c}$, il rapporto tra la velocità della particella carica v e la velocità della luce nel vuoto, $\cos(\theta_c)$ vale:

$$\cos(\theta_c) = \frac{1}{n\beta}. \quad (2.1)$$

L'angolo θ_c è noto come *angolo di Čerenkov*, l'effetto viene chiamato *effetto Čerenkov* e la radiazione emessa è detta *radiazione Čerenkov*. Per una particella relativistica ($\beta \approx 1$) in acqua marina ($n \approx 1.364$) l'angolo θ_c è costante e vale circa 43° .

Il numero di fotoni emessi per radiazione Čerenkov per unità di lunghezza d'onda $d\lambda$ e per unità di distanza percorsa dalla particella carica dx , è descritto dalla formula di Frank-Tamm [27]:

$$\frac{d^2 N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi z^2 \alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right), \quad (2.2)$$

dove α è la costante di struttura fine e la carica della particella relativistica vale ze , con e la carica elettrica. L'acqua è trasparente per le lunghezze d'onda comprese tra 350 nm e 550 nm; l'integrale su questo intervallo restituisce:

$$\frac{dN}{dx} \simeq 340 \text{ fotoni/cm}. \quad (2.3)$$

I telescopi di KM3NeT riescono a rivelare queste quantità di fotoni e a ricostruire il fronte d'onda. Noti la direzione di propagazione del fronte d'onda e il valore di θ_c è possibile ricostruire la direzione percorsa dalla particella carica che ha indotto l'emissione di radiazione Čerenkov.

2.3.2 Topologie di eventi

In KM3NeT, i bersagli per le interazioni dei neutrini sono costituiti dai nuclei dell'acqua marina o del fondale marino, e le interazioni sono descritte dalle Equazioni (1.4) e (1.5). Se le particelle cariche prodotte dall'interazione attraversano l'acqua a una velocità superiore a quella della luce nel mezzo, inducono l'emissione di radiazione Čerenkov. Vengono quindi rivelate quando transitano abbastanza vicino ai rivelatori di KM3NeT. In particolare, si distinguono due tipi di eventi: l'evento di tipo traccia, in cui si riesce a risolvere la traiettoria della particella carica, e l'evento di tipo sciame in cui viene prodotto uno sciame di particelle secondarie che depositano la loro energia in pochi metri. In Figura 2.4 viene presentato lo schema delle principali topologie di eventi per le interazioni in CC e NC.

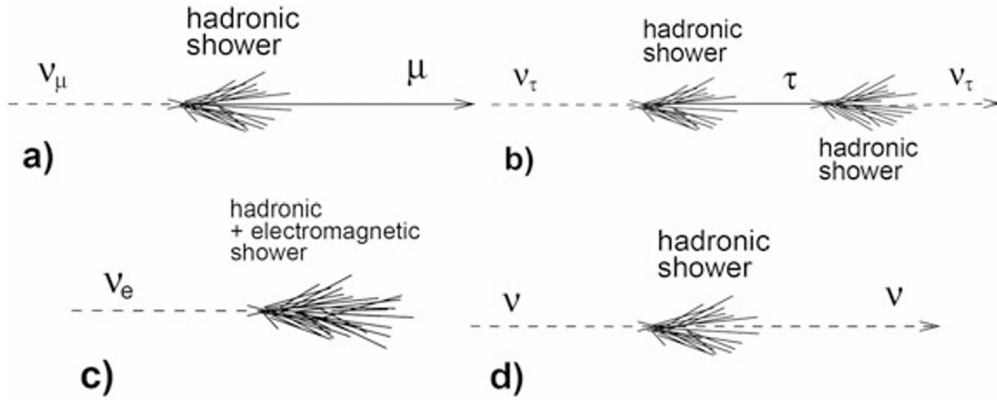


Figura 2.4: Schematizzazione delle principali topologie per le interazioni dei neutrini con la materia in CC e NC. (a) L'interazione in CC con ν_μ produce uno sciame adronico e un muone. (b) L'interazione in CC con ν_τ produce un tauone che decade e genera una topologia detta "double bang". (c) L'interazione in CC con ν_e produce sciame elettromagnetici e sciame adronici. (d) Le interazioni in NC producono uno sciame adronico indipendentemente dal sapore del neutrino incidente. Immagine presa da [5].

In Figura 2.5 viene invece mostrata la distanza media percorsa in acqua dalle principali particelle secondarie prodotte dall'interazione dei neutrini, in funzione della loro energia. Tale distanza rappresenta il tratto compiuto dalle particelle prima di decadere o di scendere sotto la soglia di energia minima necessaria all'emissione della radiazione Čerenkov.

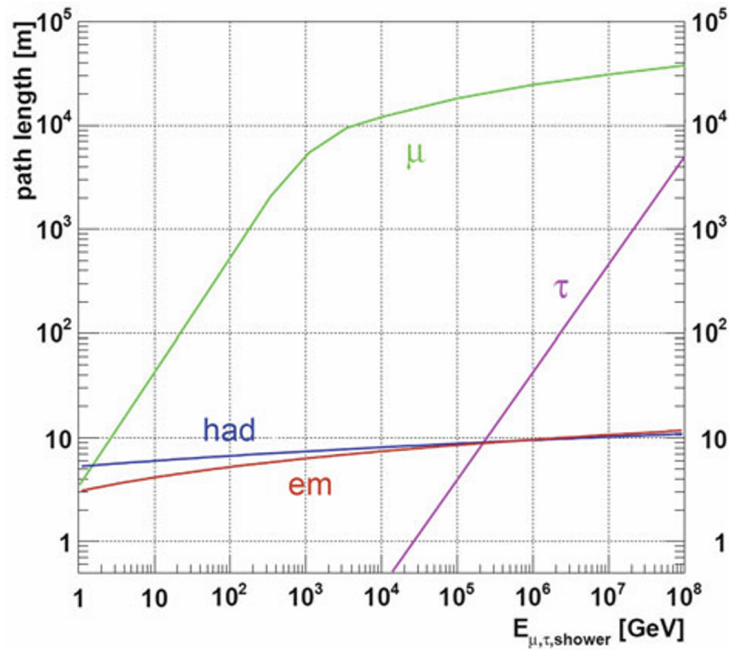


Figura 2.5: Distanza media percorsa in acqua dalle particelle cariche secondarie prodotte dall'interazione dei neutrini. In verde i muoni (μ), in viola i tauoni (τ), in blu gli sciame adronici (had) e in rosso gli sciame elettromagnetici (em). Immagine presa da [5].

Eventi di tipo sciame

Gli elettroni ad alta energia prodotti a partire da interazioni in CC con ν_e hanno un'alta probabilità di irradiare fotoni per bremsstrahlung dopo aver attraversato qualche decina di centimetri in acqua. I fotoni generano a loro volta coppie e^+e^- , innescando un processo a catena che continua finché è presente abbastanza energia per alimentare queste reazioni. Lo sciame di fotoni, elettroni e positroni che si viene a formare è detto *sciame elettromagnetico*. Se l'elettrone iniziale ha un'energia di 10 TeV, lo sciame elettromagnetico si propaga per circa 8 m. Tale distanza è minore di quella tra le DUs nei rivelatori di KM3NeT; per questo motivo non è possibile determinare accuratamente la direzione di provenienza del segnale. Per KM3NeT/ARCA completato, la risoluzione angolare media attesa per interazioni in CC con ν_e è superiore al grado [25].

Come discusso in sezione 1.2.2, le interazioni di neutrini ad alta energia in CC e NC producono uno sciame di adroni. Da Figura 1.1 si vede che a energie superiori al TeV in media circa il 30% dell'energia del neutrino incidente è trasportata dallo sciame adronico. Ciò introduce una notevole incertezza nella ricostruzione dell'energia per gli eventi in NC, dal momento che il neutrino uscente porta via con sé circa il 70% dell'energia iniziale senza produrre alcun segnale. La dinamica degli sciami adronici è complessa e soggetta a fluttuazioni evento per evento molto più ampie rispetto agli sciami elettromagnetici. Le particelle secondarie dominanti in uno sciame adronico sono i pioni, mentre kaoni, protoni o neutroni sono presenti in frazioni variabili. Il decadimento dei pioni carichi può produrre muoni: poiché questi ultimi tendono a fuoriuscire dal volume dello sciame portando con sé parte dell'energia, contribuiscono in modo rilevante alle fluttuazioni. Il decadimento di pioni neutri può generare sciami elettromagnetici. Sebbene si tratti di processi fisici differenti, Figura 2.5 mostra come le distanze medie percorse dagli sciami adronici ed elettromagnetici siano comparabili. L'intero sviluppo di questi sciami avviene tipicamente su distanze dell'ordine di una decina di metri, una scala spaziale nettamente inferiore alla distanza tra i DOMs di KM3NeT/ARCA (36 m). Dunque il rivelatore non possiede una risoluzione spaziale sufficiente per distinguere questi due tipi di sciame. Tuttavia, la luce totale raccolta dai DOMs permette comunque di effettuare una misura calorimetrica dell'energia dell'evento.

Per le interazioni in CC con ν_τ , il tauone prodotto, dopo aver percorso la distanza media, decade in uno sciame di particelle secondarie. Per energie inferiori al PeV, il tauone percorre una distanza troppo breve prima di decadere perché la sua traccia sia risolvibile. A energie superiori al PeV, il tauone percorre almeno un centinaio di metri prima di decadere, come si può vedere in Figura 2.5. Questa distanza è abbastanza lunga da permettere di separare lo sciame adronico prodotto a seguito dell'interazione del neutrino con la materia dallo sciame prodotto dal decadimento del tauone. L'evento è caratterizzato da due a sciami più la traccia del tauone ed è chiamato *double bang*.

Eventi di tipo traccia

Gli eventi di tipo traccia sono dati principalmente dai muoni prodotti nei processi in CC con neutrino incidente ν_μ . Se il neutrino incidente ha un'energia di 1 TeV, da Figura 1.1 si vede che in media l'energia trasportata dal muone sarà di circa 700 GeV. Per tale energia la distanza media percorsa dal muone in acqua vale circa 3 km. Essendo questa distanza superiore alle dimensioni dell'apparato, la particella può attraversare per intero il volume strumentato di KM3NeT/ARCA, permettendo di ricostruirne la direzione con buona precisione. L'angolo cinematico medio tra il neutrino incidente e il muone uscente vale approssimativamente [28]:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}}, \quad (2.4)$$

dove $E_\nu(\text{TeV})$ è l'energia del neutrino espressa in TeV.

Complessivamente, al TeV KM3NeT/ARCA completato raggiungerà una risoluzione angolare per i neutrini muonici sotto il grado [25]. Nei processi in CC con ν_μ viene prodotta anche una cascata adronica. Tuttavia, poiché l'estensione di essa è dell'ordine di 10 m (oltre due ordini di grandezza inferiore rispetto a quella di un muone di 700 GeV), l'evento viene rivelato unicamente con una topologia di tipo traccia.

2.3.3 Origine del fondo per KM3NeT/ARCA

Il telescopio KM3NeT/ARCA è costruito per rivelare la luce Čerenkov proveniente da particelle cariche relativistiche ad alta energia. In questo modo è possibile misurare anche i neutrini astrofisici, che, interagendo con la materia, generano particelle secondarie rivelabili. Tuttavia, esistono altri processi fisici che producono segnali analoghi, pur non avendo alcuna origine astrofisica. Tali eventi costituiscono un fondo fisico e ambientale nella ricerca di sorgenti astrofisiche e devono essere opportunamente rigettati.

Muoni e neutrini atmosferici

Il contributo principale al fondo è dato dalle interazioni dei neutrini e dei muoni atmosferici, prodotti a seguito dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre. In Figura 2.6 viene mostrato come i due processi contribuiscano al flusso di muoni in funzione dell'angolo zenitale. I muoni atmosferici provenienti da sopra l'orizzonte (*downgoing*) riescono a raggiungere la profondità di 3880 metri sotto il livello del mare, dove possono essere rivelati da KM3NeT/ARCA. Il flusso dei muoni atmosferici *upgoing*, ovvero provenienti da sotto l'orizzonte, è invece soppresso poiché questi vengono completamente assorbiti dalla Terra. Selezionando solo eventi di tipo *upgoing* è dunque possibile eliminare il fondo di muoni atmosferici. Questa strategia di selezione comporta tuttavia una riduzione della statistica osservabile ad alte energie: infatti a energie superiori al

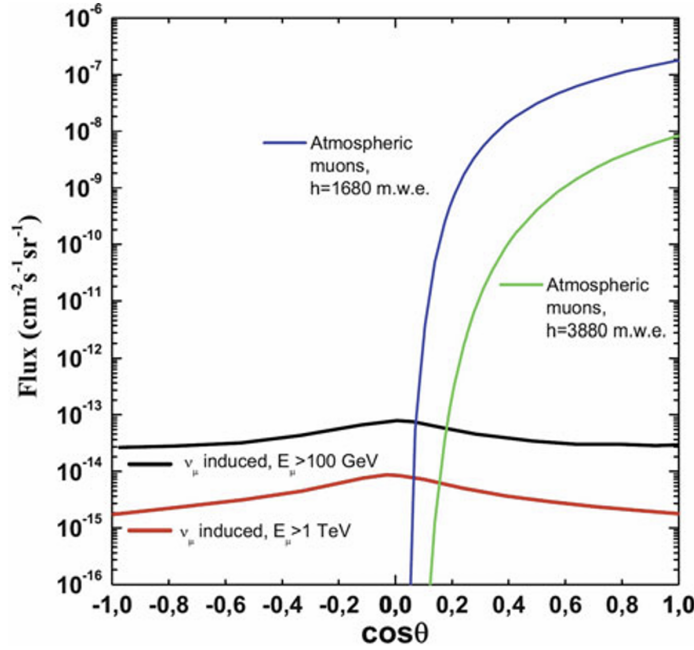


Figura 2.6: *Flusso in funzione dell'angolo zenitale θ dei muoni atmosferici a due profondità diverse e dei muoni prodotti dalle interazioni in CC dei neutrini atmosferici ν_μ . A eventi di tipo upgoing (downgoing) corrisponde $\cos(\theta) < 0$ (> 0). Immagine presa da [5].*

TeV, la Terra cessa di essere completamente trasparente ai neutrini. A causa del loro assorbimento, il flusso di neutrini upgoing risulta attenuato rispetto al flusso downgoing.

Come discusso in sezione 1.3.3, a energie superiori al TeV i neutrini atmosferici sono prevalentemente muonici. Essi costituiscono un segnale di fondo ineliminabile a livello di acquisizione; pertanto, per sottrarre il loro contributo, devono essere applicati opportuni tagli di selezione sui dati, a partire da alcune considerazioni sullo spettro energetico. Il flusso dei neutrini atmosferici, infatti, diminuisce seguendo una legge di potenza proporzionale a $E^{-3.7}$. Invece secondo il modello di accelerazione di Fermi [29], i neutrini di origine cosmica presentano uno spettro proporzionale a E^{-2} . Sfruttando opportuni test di ipotesi, è possibile quantificare la significatività statistica di un eventuale eccesso di eventi ad alte energie, verificando la compatibilità dei dati con un ipotetico segnale astrofisico

Isotopi radioattivi e bioluminescenze

I segnali di fondo vengono prodotti anche da isotopi radioattivi presenti in acqua e dalla bioluminescenza.

Il potassio ^{40}K è un isotopo radioattivo presente nell'acqua del mare. Questo decade

nei seguenti canali:

$$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e \quad (\text{con probabilità } 80.3\%), \quad (2.5)$$

$$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu_e + \gamma \quad (\text{con probabilità } 10.7\%). \quad (2.6)$$

La maggior parte degli elettroni prodotti nel primo decadimento possiede un'energia sufficiente per produrre radiazione Čerenkov. Il fotone prodotto nel secondo decadimento è abbastanza energetico da generare, tramite effetto Compton, elettroni in grado di indurre luce Čerenkov [28].

La bioluminescenza è la radiazione luminosa emessa dagli organismi viventi presenti negli abissi marini. Ne esistono principalmente due tipologie: un bagliore costante prodotto dai batteri e lampi di luce tipici degli animali. Queste emissioni presentano lunghezze d'onda comprese tra i 470 e i 480 nm e sono diversi ordini di grandezza più intense della luce generata dai decadimenti del ^{40}K [28]. La bioluminescenza mostra una correlazione con la velocità delle correnti e tende a diminuire all'aumentare della profondità [28].

Queste due tipologie di fondo sono già state caratterizzate e il loro segnale viene efficacemente rigettato a livello di acquisizione dati tramite appositi algoritmi [30].

Capitolo 3

Stima della significatività post-trial nella ricerca di neutrini astrofisici con KM3NeT/ARCA

La ricerca di sorgenti di neutrini astrofisici è ostacolata dalla presenza di un fondo di neutrini atmosferici insopprimibile a livello di acquisizione, che domina il flusso totale osservato. Distinguere i dati di fondo da quelli di segnale è possibile unicamente su base statistica. Per affrontare questo problema sono stati sviluppati dei metodi dedicati per quantificare la significatività di un'eventuale osservazione astrofisica. In particolare, in questo capitolo viene calcolato il p -valore post-trial, necessario per correggere la sovrastima della significatività indotta quando si eseguono diversi test sullo stesso insieme di dati. Eseguire test multipli è infatti necessario per esaminare simultaneamente diverse potenziali sorgenti: per questo motivo il punto di partenza dell'analisi è la selezione dei cataloghi da esaminare.

3.1 Cataloghi utilizzati

Ogni volta che un neutrino viene rivelato da KM3NeT/ARCA, i dati relativi alla sua direzione di arrivo in coordinate equatoriali (Appendice A) e alla sua energia vengono ricostruiti. I neutrini astrofisici vengono individuati cercando eccessi nel flusso osservato che non siano giustificabili come semplici fluttuazioni statistiche del fondo atmosferico. Questa ricerca può essere condotta confrontando i dati con le posizioni di sorgenti cosmiche note, osservate in altri messaggeri, come i fotoni. Le coordinate di queste sorgenti sono riportate all'interno di cataloghi astrofisici, resi pubblici da osservatori esterni. La Collaborazione KM3NeT ha svolto tre analisi indipendenti e basate sullo stesso insieme di dati, ovvero quelli raccolti da KM3NeT/ARCA in acquisizione con 19 e 21 stringhe, per un tempo di presa dati effettivo di 336 giorni e un totale di 1544 eventi di tipo traccia

selezionati. La ricerca ha coinvolto i seguenti cataloghi: blazar di tipo HBL, per un totale di 100 sorgenti selezionate, blazar di tipo EHBL, per un totale di 88 sorgenti selezionate, e ULIRG, per un totale di 75 sorgenti selezionate. Gli oggetti astrofisici in considerazione sono promettenti sorgenti extragalattiche di neutrini ad alta energia, come specificato nella sezione 1.3.4, e sono stati selezionati a partire dai cataloghi descritti in [31, 32]. La compatibilità dei cataloghi con un segnale astrofisico di neutrini viene valutata coi metodi descritti nella sezione di seguito.

3.2 Metodi per la ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini

La statistica degli eventi osservati può essere confrontata con quella attesa dal fondo di soli neutrini atmosferici per mezzo di un test di *Goodness-Of-Fit*. Questa è una procedura statistica che permette di determinare quantitativamente se i dati osservati sono compatibili con un'ipotesi nulla H_0 . Un'eventuale incompatibilità significativa con H_0 porta al rigetto di quest'ultima, fornendo un'evidenza statistica a favore dell'ipotesi alternativa H_1 . Nella ricerca di neutrini astrofisici, H_0 coincide con l'ipotesi che il campione di neutrini osservato sia di origine atmosferica, mentre H_1 afferma che una frazione di essi abbia origine astrofisica. In generale, se a seguito della presa dati è stato raccolto un insieme di misure indicato con X , per eseguire un test di Goodness-Of-Fit è necessario definire:

- (1) Una *statistica di test* $\lambda(X)$, ovvero una funzione scalare dei dati acquisiti, che può assumere valori compresi tra 0 e infinito. Essa è costruita in modo da ordinare i possibili risultati dell'esperimento e associare valori maggiori alle configurazioni dei dati meno probabili sotto l'ipotesi nulla.
- (2) Il p -valore, definito come la probabilità che un campione di dati, generato assumendo vera l'ipotesi nulla H_0 , produca un valore della statistica di test maggiore o uguale a quello effettivamente osservato.

Per la fisica delle alte energie, convenzionalmente H_0 viene rigettata se il p -valore calcolato con i dati misurati è minore di $2.87 \cdot 10^{-7}$, corrispondente a una significatività maggiore di 5σ in convenzione di distribuzione Gaussiana a una coda.

Nei telescopi per neutrini ad alta energia, la statistica di test è costruita a partire da una funzione di *likelihood*. Si consideri un campione di N eventi osservati, indicato con l'insieme $X = \{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N\}$, dove ogni vettore $\vec{x}_i = (\alpha_i, \delta_i, E_i)$ contiene α_i e δ_i , la direzione in coordinate equatoriali dell' i -esimo neutrino, ed E_i , l'energia stimata dell' i -esimo neutrino. La funzione di densità di probabilità di un singolo evento dipende da n_s , il numero di neutrini astrofisici attesi nel campione; verrà indicata come $p(\vec{x}, n_s)$ e dipenderà esplicitamente anche da questo parametro. Se i singoli eventi che compongono

X sono indipendenti, la funzione di likelihood $\mathcal{L}(n_s, X)$ si calcola come la produttoria delle loro funzioni di densità di probabilità:

$$\mathcal{L}(n_s, X) = \prod_{i=1}^N p(\vec{x}_i, n_s). \quad (3.1)$$

Se $\mathcal{B}(\vec{x})$ e $\mathcal{S}(\vec{x})$ rappresentano rispettivamente le funzioni di densità di probabilità di fondo e di segnale, nella ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini astrofisici:

$$p(\vec{x}, n_s) = \frac{n_s}{N} \mathcal{S}(\vec{x}) + \left(1 - \frac{n_s}{N}\right) \mathcal{B}(\vec{x}), \quad (3.2)$$

e quindi la likelihood diventa:

$$\mathcal{L}(n_s, X) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{n_s}{N} \mathcal{S}(\vec{x}_i) + \left(1 - \frac{n_s}{N}\right) \mathcal{B}(\vec{x}_i) \right). \quad (3.3)$$

La distribuzione $\mathcal{B}(\vec{x})$ si determina effettuando degli pseudo-esperimenti, ovvero generando campioni statistici di puro fondo a partire dai dati realmente acquisiti. Ciò viene fatto rimescolando casualmente l'ascensione retta dei dati reali, ma lasciando la declinazione e l'energia invariate. Tale procedura elimina le eventuali correlazioni spaziali dovute a vere sorgenti astrofisiche e deriva dall'assunzione che il flusso del fondo atmosferico sia isotropo rispetto all'ascensione retta.

La distribuzione di segnale $\mathcal{S}(\vec{x})$ cambia in base alla posizione e alla tipologia delle sorgenti studiate; ne è stata usata una diversa per ogni catalogo, assumendo o leggi di potenza, come nel caso delle ULIRG [33], o flussi derivati da modellizzazioni astrofisiche, come nel caso dei blazars [18, 34]. Le analisi condotte si basano sulla tecnica dello *stacking*, in cui il termine di segnale $\mathcal{S}(\vec{x})$ contiene la somma dei flussi attesi dalle singole sorgenti presenti nel catalogo selezionato. In questo modo, i cataloghi vengono usati per vedere se KM3NeT/ARCA è sensibile a segnali cumulativi, dato che i segnali attesi da ULIRG o blazars sono singolarmente troppo deboli.

Una stima statistica del numero di neutrini astrofisici nel campione, indicata con $\hat{n}_s$, viene determinata applicando il metodo della massima verosimiglianza: secondo questo principio, il valore più plausibile per il parametro è quello che massimizza $\mathcal{L}(n_s, X)$. Occorre precisare che $\hat{n}_s$ rappresenta unicamente una stima statistica: il principio di verosimiglianza determina solo il valore più plausibile per il numero di neutrini astrofisici presenti nel campione. Per questo motivo, ad esempio, è possibile che sotto H_0 venga calcolato un $\hat{n}_s > 0$. Tuttavia determinare il valore di questa quantità risulta fondamentale poiché a partire da essa è possibile definire la statistica di test $\lambda(X)$:

$$\lambda(X) = -\log \left(\frac{\mathcal{L}(0, X)}{\mathcal{L}(\hat{n}_s, X)} \right). \quad (3.4)$$

Calcolando la statistica di test su un elevato numero di pseudo-esperimenti, è possibile ricavare la sua densità di probabilità assumendo vera l'ipotesi nulla, indicata con $\mathcal{D}(\lambda|H_0)$. Se i dati sperimentali restituiscono una statistica di test che vale λ_{obs} , il p -valore può essere valutato come:

$$p\text{-valore} = \int_{\lambda_{obs}}^{\infty} \mathcal{D}(\lambda|H_0) d\lambda. \quad (3.5)$$

Questo è il procedimento che permette di associare a ciascun catalogo un p -valore.

3.3 Distribuzione attesa di p -valori

Al fine di valutare la distribuzione attesa dei p -valori per ciascun catalogo scelto, la Collaborazione KM3NeT ha generato 15000 pseudo-esperimenti, corrispondenti a diverse realizzazioni del set di dati, dove le ascensioni rette degli eventi sono state rimescolate casualmente. Per ogni pseudo-esperimento, la Collaborazione KM3NeT ha condotto un'analisi likelihood di sorgenti puntiformi, sulla base dei cataloghi precedentemente menzionati. I metodi descritti nel paragrafo precedente hanno permesso di calcolare tre p -valori distinti, uno per catalogo. Le loro distribuzioni sono riportate in Figura 3.1. Si

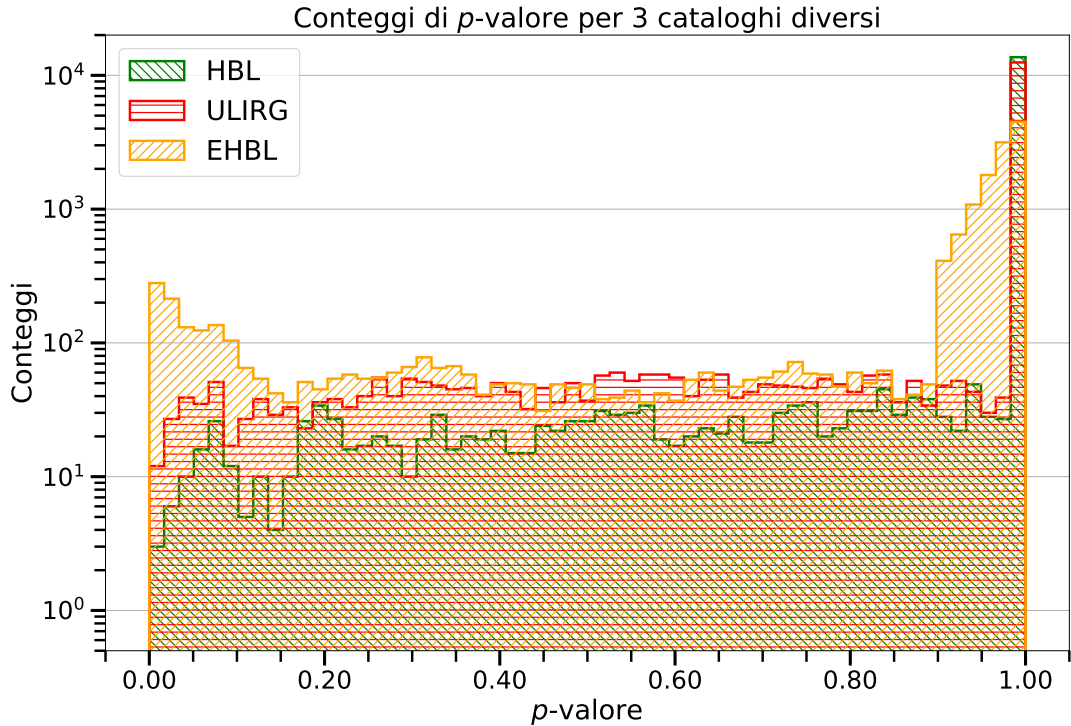


Figura 3.1: *Istogramma della distribuzione di p-valori ottenuti da 15000 pseudo-esperimenti per i cataloghi di EHBL (arancione), HBL (verde) e ULIRG (rosso).*

osserva che la maggior parte dei p -valori si accumula in corrispondenza di 1 ed è compatibile con l'ipotesi di solo fondo.

Il primo bin degli istogrammi raccoglie i p -valori compresi nell'intervallo $[0, \sim 0.02]$. Per i cataloghi HBL e ULIRG questo bin registra il minor numero di conteggi, indicando una bassa probabilità di occorrenza per tali valori. Al contrario, per il catalogo EHBL sono stati registrati 280 eventi in questo intervallo, corrispondenti a una frequenza relativa di circa il 2%, rendendolo il bin più popolato per i p -valori compresi nell'intervallo $[0, 0.9]$.

In Figura 3.2 è mostrata la distribuzione della variabile $-\log_{10}(p\text{-valore})$, che consente di apprezzare con maggiore dettaglio la coda della distribuzione corrispondente a p -valori numericamente più piccoli. Come si può osservare, la statistica generata non è sufficiente per campionare p -valori dell'ordine di 10^{-7} (necessari per raggiungere una significatività di circa 5σ nella convenzione di distribuzione Gaussiana a una coda): a causa del numero limitato di pseudo-esperimenti, infatti, il p -valore minimo simulato raggiunge un ordine di grandezza pari a 10^{-4} . Il numero di pseudo-esperimenti è limitato dalle risorse computazionali disponibili. Si osserva inoltre che, a parità di pseudo-esperimenti simulati, la

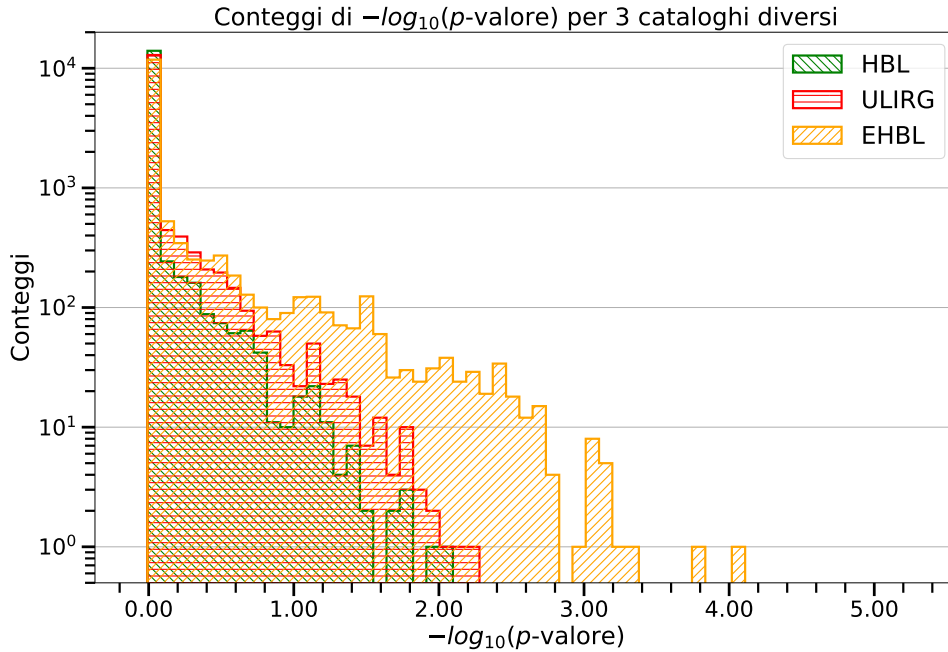


Figura 3.2: Istogramma della distribuzione di $-\log_{10}(p\text{-valore})$ ricavata da 15000 pseudo-esperimenti per i cataloghi EHBL (arancione), HBL (verde) e ULIRG (rosso).

distribuzione dei p -valori dei blazar EHBL si concentra su valori inferiori rispetto a quella delle altre due popolazioni. Questo comportamento suggerisce che, per questo specifico

catalogo, le caratteristiche delle fluttuazioni di fondo siano più facilmente confondibili con il segnale.

3.4 Significatività post-trial

A partire da dati acquisiti con KM3NeT/ARCA19 e KM3NeT/ARCA21, la Collaborazione KM3NeT ha cercato eccessi di neutrini nei tre cataloghi calcolando per ciascuno di essi un p -valore. Questi risultati sono definiti *pre-trial* poiché quantificano la significatività valutando ogni catalogo indipendentemente con lo stesso set di dati. Il p -valore minimo ottenuto dai dati sperimentali è stato osservato in corrispondenza del catalogo EHBL e verrà indicato con $p_{\text{EHBL}} = 4.6 \cdot 10^{-3}$, corrispondente a una significatività di 2.6σ [34] nella convenzione di distribuzione Gaussiana a una coda. Tale risultato si avvicina alla soglia di 3σ , che renderebbe l'osservazione evidenza statistica di emissione neutrinica da parte di queste sorgenti. Tuttavia è necessario tener conto del *Look-Elsewhere Effect*: effettuando tre test distinti sullo stesso set di dati e selezionando il risultato più promettente, la probabilità di osservare una fluttuazione statistica del fondo aumenta. È stata dunque implementata una procedura che penalizzi la significatività pre-trial calcolata, inglobando il *Look-Elsewhere Effect* per ricavare il p -valore *post-trial*.

A tale scopo è stata costruita la distribuzione dei p -valori minimi attesi, estraendo, per ciascuno dei 15000 pseudo-esperimenti effettuati, il p -valore minimo registrato tra i tre cataloghi. Questo approccio riproduce la tendenza naturale di riportare unicamente i dati sperimentali migliori in quanto più significativi, omettendo i restanti risultati poiché in linea con le attese. Il p -valore post-trial è calcolato come la frazione di pseudo-esperimenti aventi un p -valore minimo minore o uguale a p_{EHBL} , fornendo così una significatività corretta per il Look-Elsewhere Effect.

3.5 Calcolo del p -valore post-trial sui dati di KM3NeT/ARCA

In Figura 3.3 è riportata la distribuzione dei p -valori minimi ottenuti in ciascuno dei 15000 pseudo-esperimenti, espressi in termini di $-\log_{10}(p\text{-valore})$. La figura evidenzia inoltre la posizione di $-\log_{10}(p_{\text{EHBL}}) = 2.3$. Si osserva che questa distribuzione è dominata dal catalogo degli EHBL, che in media fornisce i p -valori più bassi rispetto agli altri cataloghi. Ciò comporta che questo catalogo influirà maggiormente nella determinazione della significatività post-trial.

Calcolando il p -valore post-trial con un semplice conteggio diretto degli eventi che restituiscono un valore minore di p_{EHBL} , si ottiene un valore pari a 0.007, che corrisponde a una significatività di 2.5σ nella convenzione di distribuzione Gaussiana a una coda.

Tuttavia questo metodo risulta impreciso: la scarsa statistica presente nella coda estrema della distribuzione introduce infatti forti fluttuazioni del risultato.

Per questo motivo, si è preferito stimare la frazione attesa di pseudo-esperimenti con p -valore $\leq p_{\text{EHL}}$ integrando una funzione ottenuta da fit. Poiché i dati con valori superiori alla mediana più due deviazioni standard in Figura 3.3 presentano un andamento lineare in scala logaritmica, è stato eseguito un fit esponenziale su questo intervallo. L'ottimizzazione dei parametri della funzione esponenziale si è svolta utilizzando la funzione `curve_fit()` della libreria SciPy di Python. Come variabile indipendente sono stati presi i centri dei bin dell'istogramma, mentre come variabile dipendente i relativi conteggi.

In questo modo è stato trovato un p -valore post-trial di 0.009 a cui corrisponde una significatività di 2.4σ nella convenzione di distribuzione Gaussiana a una coda. Come atteso, la significatività ottenuta è correttamente diminuita rispetto a quella pre-trial.

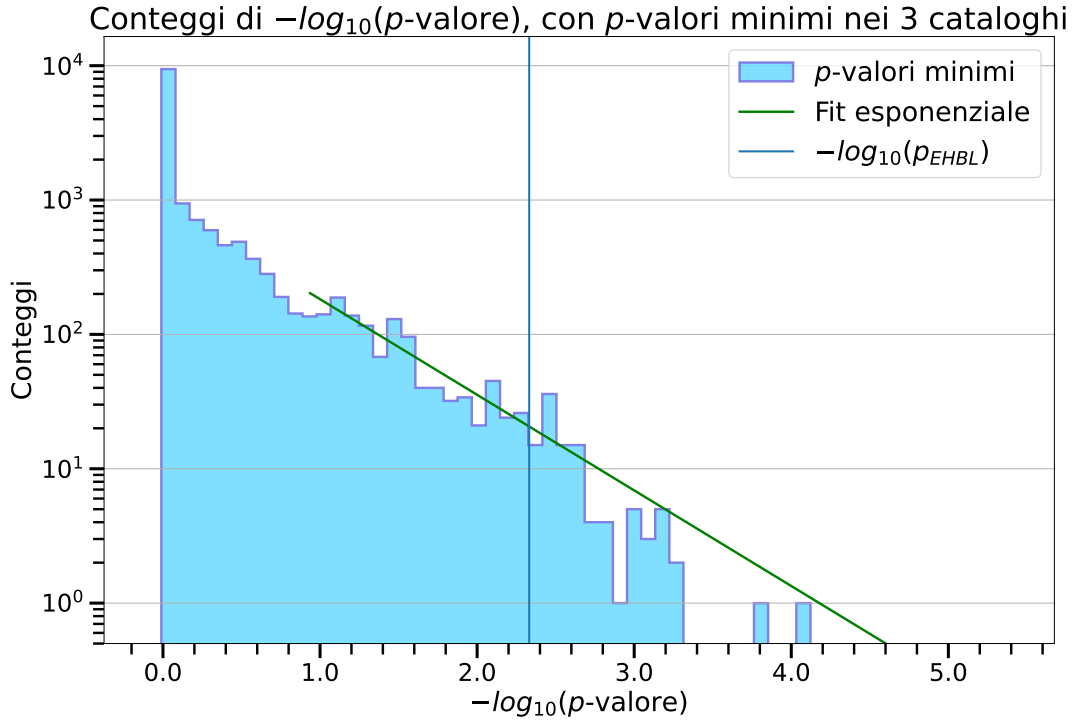


Figura 3.3: Istogramma della distribuzione del $-\log_{10}(p\text{-valore})$ massimo per ogni pseudo-esperimento. Questa trasformazione fa sì che i p -valori maggiori si accumulino vicino allo zero, mentre quelli più piccoli si estendano verso l'infinito. La linea verde rappresenta il fit esponenziale eseguito sulla coda della distribuzione, mentre la linea blu indica il valore misurato per il catalogo EHL, pari a $-\log_{10}(p_{\text{EHL}}) = 2.3$.

Conclusioni

L'analisi descritta in questo lavoro ha permesso di determinare la significatività post-trial per la ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini sulla base di 3 cataloghi di sorgenti extragalattiche: blazar EHBL e HBL, e galassie ultra-luminose nell'infrarosso (ULIRG). Questo passaggio statistico è necessario per tener conto del Look-Elsewhere Effect. Il p -valore pre-trial ottenuto dal catalogo EHBL, corrispondente a una significatività di 2.6σ , viene così corretto a 2.4σ , rafforzando la sua compatibilità con una fluttuazione statistica del fondo piuttosto che con un segnale di origine astrofisica. È importante sottolineare come questi risultati dipendano dall'ipotesi spettrale assunta sul singolo catalogo. In questa prospettiva, ci si aspetta che perfezionando l'analisi svolta, aumentando per esempio il numero di pseudo-esperimenti, si continui a confermare la compatibilità con il fondo.

Miglioramenti possono essere attesi in seguito all'espansione del rivelatore, che sta accumulando nuovi dati con un numero di stringhe crescente: infatti il completamento di KM3NeT/ARCA sarà fondamentale per incrementare l'area efficace del rivelatore, mentre un maggiore tempo di esposizione permetterà di accumulare una statistica di eventi fisici sempre più significativa. Inoltre, il raggiungimento della configurazione finale del rivelatore consentirà di ottimizzarne le risoluzioni angolare ed energetica, fondamentali in un'analisi di tipo likelihood per identificare un segnale cosmico di neutrini da sorgenti puntiformi.

Appendice A

Le coordinate equatoriali

Il sistema di coordinate equatoriali (Figura A.1) è un sistema di riferimento che ha l'origine nel centro della Terra. Questo sistema di coordinate non dipende dalla posizione dell'osservatore o dal tempo di osservazione. Le coordinate utilizzate sono:

- Ascensione retta (α): misurata da 0 a 2π a partire dal punto vernale (ovvero la direzione in cui si trova il centro del Sole nell'istante dell'equinozio di primavera boreale). Può talvolta essere espressa in ore, minuti e secondi, dove 24 h corrispondono all'angolo giro (2π).
- Declinazione (δ): assume valori compresi nell'intervallo $[-\pi/2, \pi/2]$, dove $-\pi/2$ e $\pi/2$ corrispondono rispettivamente al polo sud e al polo nord celeste.

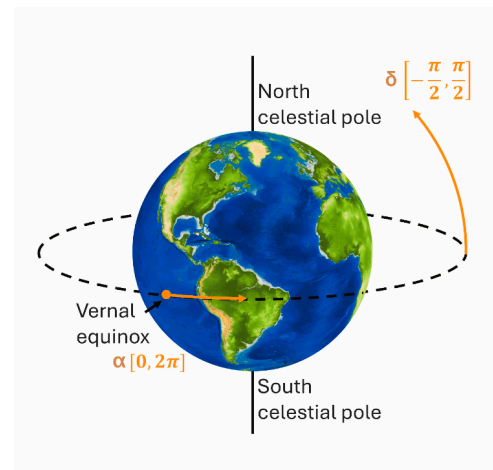


Figura A.1: *Sistema di riferimento equatoriale. La declinazione è indicata come δ , mentre α indica l'ascensione retta. Immagine presa da [35].*

Bibliografia

- [1] Y. Fukuda et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys. Rev. Lett.*, 81:1562–1567, 1998. [arXiv:hep-ex/9807003](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.81.1562](#).
- [2] Q. R. Ahmad et al. Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.*, 87:071301, 2001. [arXiv:nucl-ex/0106015](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.87.071301](#).
- [3] J. A. Formaggio and G. P. Zeller. From eV to EeV: Neutrino Cross Sections Across Energy Scales. *Rev. Mod. Phys.*, 84:1307–1341, 2012. Equations 90-91. [arXiv:1305.7513](#), [doi:10.1103/RevModPhys.84.1307](#).
- [4] Raj Gandhi, Chris Quigg, Mary Hall Reno, and Ina Sarcevic. Ultrahigh-energy neutrino interactions. *Astropart. Phys.*, 5:81–110, 1996. [arXiv:hep-ph/9512364](#), [doi:10.1016/0927-6505\(96\)00008-4](#).
- [5] Maurizio Spurio. *Probes of Multimessenger Astrophysics. Charged cosmic rays, neutrinos, γ -rays and gravitational waves*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer, 2018. [doi:10.1007/978-3-319-96854-4](#).
- [6] Edoardo Vitagliano, Irene Tamborra, and Georg Raffelt. Grand Unified Neutrino Spectrum at Earth: Sources and Spectral Components. *Rev. Mod. Phys.*, 92:45006, 2020. [arXiv:1910.11878](#), [doi:10.1103/RevModPhys.92.045006](#).
- [7] J. Ahrens et al. Icecube - the next generation neutrino telescope at the south pole. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 118:388–395, 2003. [arXiv:astro-ph/0209556](#), [doi:10.1016/S0920-5632\(03\)01337-9](#).
- [8] S. Aiello et al. Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT. *Nature*, 638(8050):376–382, 2025. [Erratum: *Nature* 640, E3 (2025)]. [doi:10.1038/s41586-024-08543-1](#).

- [9] O. Adriani et al. On the Potential Cosmogenic Origin of the Ultra-high-energy Event KM3-230213A. *Astrophys. J. Lett.*, 984(2):L41, 2025. [arXiv:2502.08508](#), [doi:10.3847/2041-8213/adcc29](#).
- [10] M. G. Aartsen et al. Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data. *Phys. Rev. Lett.*, 113:101101, 2014. [arXiv:1405.5303](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.113.101101](#).
- [11] M. G. Aartsen et al. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science*, 361(6398):147–151, 2018. [arXiv:1807.08794](#), [doi:10.1126/science.aat2890](#).
- [12] R. Abbasi et al. Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. *Science*, 378(6619):538–543, 2022. [arXiv:2211.09972](#), [doi:10.1126/science.abg3395](#).
- [13] R. Abbasi et al. Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane. *Science*, 380(6652):adc9818, 2023. [arXiv:2307.04427](#), [doi:10.1126/science.adc9818](#).
- [14] R. Abbasi et al. High-energy neutrino emission from the Milky Way. 7 2026. [arXiv:2607.25966](#).
- [15] K. Hirata et al. Observation of a Neutrino Burst from the Supernova SN 1987a. *Phys. Rev. Lett.*, 58:1490–1493, 1987. [doi:10.1103/PhysRevLett.58.1490](#).
- [16] Andrea Palladino, Maurizio Spurio, and Francesco Vissani. Neutrino Telescopes and High-Energy Cosmic Neutrinos. *Universe*, 6(2):30, 2020. [arXiv:2009.01919](#), [doi:10.3390/universe6020030](#).
- [17] Marco Roncadelli, Giorgio Galanti, Fabrizio Tavecchio, and Giacomo Bonnoli. Very-high-energy quasars hint at ALPs. In *9th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs*, pages 89–92, 2013. [arXiv:1310.2829](#), [doi:10.3204/DESY-PROC-2013-04/roncadelli_marco](#).
- [18] Francesco Carenini and Giulia Illuminati. KM3NeT/ARCA stacking search for high-energy neutrinos from blazars. *PoS, ICRC2025*:1005, 2025. [arXiv:2512.02656](#), [doi:10.22323/1.501.1005](#).
- [19] D. B. Sanders and I. F. Mirabel. Luminous Infrared Galaxies. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 34:749–792, 1996. [doi:10.1146/annurev.astro.34.1.749](#).
- [20] Eli Waxman and John N. Bahcall. High-energy neutrinos from cosmological gamma-ray burst fireballs. *Phys. Rev. Lett.*, 78:2292–2295, 1997. [arXiv:astro-ph/9701231](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.78.2292](#).

- [21] K. Greisen. Cosmic ray showers. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 10:63–108, 1960. doi:10.1146/annurev.ns.10.120160.000431.
- [22] M. A. Markov and I. M. Zheleznykh. On high energy neutrino physics in cosmic rays. *Nucl. Phys.*, 27:385–394, 1961. doi:10.1016/0029-5582(61)90331-5.
- [23] A. Albert et al. The ANTARES detector: Two decades of neutrino searches in the Mediterranean Sea. *Phys. Rept.*, 1121-1124:1–46, 2025. arXiv:2504.09473, doi:10.1016/j.physrep.2025.04.001.
- [24] S. Aiello et al. The KM3NeT multi-PMT optical module. *JINST*, 17:P07038, 2022. arXiv:2203.10048, doi:10.1088/1748-0221/17/07/P07038.
- [25] S. Aiello et al. Astronomy potential of KM3NeT/ARCA. *Eur. Phys. J. C*, 84(9):885, 2024. arXiv:2402.08363, doi:10.1140/epjc/s10052-024-13137-2.
- [26] Richard Phillips Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics*, volume 1, chapter 51. Addison-Wesley, 1963. URL: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_51.html.
- [27] S. Navas et al. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 110(3):587–588, 2024. doi:10.1103/PhysRevD.110.030001.
- [28] T. Chiarusi and M. Spurio. High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes. *Eur. Phys. J. C*, 65:649–701, 2010. arXiv:0906.2634, doi:10.1140/epjc/s10052-009-1230-9.
- [29] A. R. Bell. The acceleration of cosmic rays in shock fronts – I. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 182(2):147–156, 1978. doi:10.1093/mnras/182.2.147.
- [30] T. Chiarusi, M. Favaro, F. Giacomini, M. Manzali, A. Margiotta, and C. Pellegrino. The Trigger and Data Acquisition System for the KM3NeT-Italy neutrino telescope. *J. Phys. Conf. Ser.*, 898(3):032042, 2017. doi:10.1088/1742-6596/898/3/032042.
- [31] Yu-Ling Chang, Bruno Arsioli, Paolo Giommi, Paolo Padovani, and Carlos Brandt. The 3HSP catalogue of extreme and high-synchrotron peaked blazars. *Astron. Astrophys.*, 632:A77, 2019. arXiv:1909.08279, doi:10.1051/0004-6361/201834526.
- [32] R. Abbasi et al. Search for High-energy Neutrinos from Ultraluminous Infrared Galaxies with IceCube. *Astrophys. J.*, 926(1):59, 2022. arXiv:2107.03149, doi:10.3847/1538-4357/ac3cb6.

- [33] Antonio De Benedittis, Antonio Ambrosone, Walid Idrissi Ibnsalih, Antonio Marinelli, and Pasquale Migliozi. KM3NeT/ARCA Stacking Search for Ultra-Luminous Infrared Galaxies. *PoS, ICRC2025:1023*, 2025. doi:10.22323/1.501.1023.
- [34] Maria Rosaria Musone, Antonio Marinelli, "Pasquale Migliozi", and "Maria Petropoulou". Extreme blazars: stacking analysis with KM3NeT/ARCA. *PoS, ICRC2025:1125*, 2025. doi:10.22323/1.501.1125.
- [35] Rasa Simone Muller. *Getting to the point - First cosmic neutrino source search with the KM3NeT/ARCA detector*. PhD thesis, Amsterdam U., 2023.