

Capitolo 3

L'esperimento ANTARES

La realizzazione dei "telescopi per neutrini" si basa sulla rivelazione della luce Cherenkov originata dal percorso, in un mezzo trasparente quale acqua o ghiaccio, dei muoni relativistici prodotti nelle interazioni dei neutrini. Il piccolo valore della sezione d'urto di interazione dei neutrini e il piccolo valore del loro flusso al crescere dell'energia delle particelle fanno sì che, per realizzare rivelatori di neutrini, occorra utilizzare radiatori Cherenkov naturali (oceani, ghiacci polari, masse rocciose). Questo capitolo presenta la motivazione scientifica che supporta la costruzione di un rivelatore sottomarino di neutrini di alta energia, con un'area effettiva di 0.1km^2 . Il sistema consiste in un array di fotomoltiplicatori (PMT), organizzati in un reticolo sul fondo del mare ad una profondità di 2400m . Con questa scelta si mira a rivelare la luce Cherenkov prodotta dai muoni dovuti all'interazione dei neutrini in acqua di mare e roccia e a minimizzare il segnale di fondo costituito dai neutrini atmosferici e dai muoni upgoing.

3.1 Principi di rivelazione

Poiché la Terra agisce come uno scudo contro tutte le particelle tranne i neutrini, un telescopio di neutrini utilizza il rilevamento di muoni provenienti dal basso come firma delle interazioni muone-neutrino avvenuta nella materia al di sotto del rivelatore. Il muone interagendo con un corpo d'acqua o di ghiaccio emette luce Cherenkov, che viene rivelata. Ciò consente l'individuazione della traiettoria del muone. La tecnica di rilevamento richiede di discriminare i muoni provenienti dal basso rispetto a un flusso molto più

alto di muoni atmosferici provenienti dall'alto. Per semplificare la discriminazione, il rivelatore deve essere installato in profondità dove uno strato di acqua o ghiaccio funge da scudo.

3.2 Interazioni di neutrino

I neutrini interagiscono con la materia solo attraverso le interazioni deboli. Per questo la loro lunghezza di interazione è enorme e i rivelatori di neutrini devono avere volumi molto grandi o densità di materia elevata. L'interazione debole di Corrente Carica (CC) di un neutrino (o anti -neutrino) con un nucleone della materia produce un leptone e uno sciame adronico

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \longrightarrow l^-(l^+) + X \quad (3.1)$$

dove l indica il sapore e il leptone prodotto nella interazione ($l = \mu, e, \tau$). Oltre all'interazione di CC, il neutrino può interagire per corrente neutra (CN) in cui nessun leptone è prodotto:

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \longrightarrow \nu_l(\bar{\nu}_l) + X \quad (3.2)$$

in cui la massa del leptone è trascurabile, e è data da

$$\frac{d^2\sigma_{\nu N}}{dx dy} = \frac{2G_F^2 m_N E_\nu}{\pi} \frac{M_W^4}{(Q^2 + M_W^2)^2} [xq(x, Q^2) + x(1-y)^2 \bar{q}(x, Q^2)] \quad (3.3)$$

dove G_F è la costante di Fermi, m_W e M_W sono le masse del nucleone e del bosone W, e Q^2 è il quadrato del momento trasferito tra il neutrino e il muone. Le variabili di Bjorken x e y sono $x = Q^2/2m_N\nu$ e $y = (E_\nu - E_l)/E_\nu$, dove $\nu = E_\nu - E_l$ è l'energia persa dal leptone nel sistema di riferimento del laboratorio.

3.2.1 Interazioni a basse energie

Ad energie tali che $E_\nu \ll M_W^2/2m_W \approx 5\text{TeV}$, Q^2 può essere trascurato nel propagatore W. In questo caso la sezione d'urto media profondamente inelastica del processo νN cresce linearmente con l'energia del neutrino:

$$\sigma_{DIS}(\nu N) \simeq 0.67 \cdot 10^{-38} E_\nu [\text{GeV}] \text{cm}^2 \quad (3.4)$$

$$\sigma_{DIS}(\bar{\nu} N) \simeq 0.34 \cdot 10^{-38} E_\nu [\text{GeV}] \text{cm}^2 \quad (3.5)$$

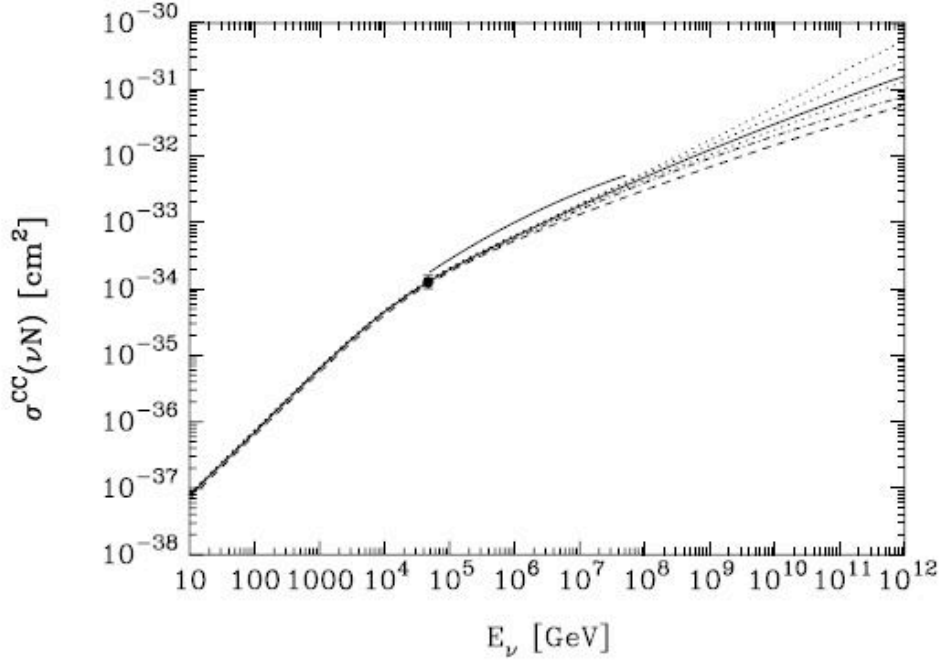


Figura 3.1: Sezione d'urto media di corrente carica per interazioni $\nu - N$ per differenti set di funzioni di distribuzione di partoni, [Gaisser, "Cosmic ray and particle physics"].

A energie anche più basse ($E_\nu < 100 \text{ GeV}$), devono essere considerati i contributi quasi-elastico e risonante nelle interazioni di corrente carica. In tal caso Q^2 deve essere abbastanza piccolo per permettere una interazione coerente con il nucleone bersaglio, così da avere sezioni d'urto essenzialmente costanti con energia. Un fit dei dati sopra 10 GeV ha determinato la seguente somma per i processi di produzione quasi elastico e risonante:

$$\sigma_{QE}(\nu_\mu N) + \sigma_{res}(\nu_\mu N) = 1.50 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 \quad (3.6)$$

$$\sigma_{QE}(\bar{\nu}_\mu N) + \sigma_{res}(\bar{\nu}_\mu N) = 1.58 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 \quad (3.7)$$

Integrando le sezioni d'urto date al di sopra di questo flusso per $E_\nu > 10 \text{ GeV}$ risulta un contributo quasi elastico e risonante dell'11% per l'interazione con ν_μ e del 21% per $\bar{\nu}_\mu$.

3.2.2 Interazioni ad alte energie

Ad energie tali che $E_\nu \gg M_W^2/2m_W \approx 5TeV$, i contributi quasi elastico e risonante sono completamente trascurabili. D'altra parte, il propagatore W limita la crescita di Q^2 fino a $\langle Q^2 \rangle \sim M_W^2$ e così la sezione d'urto è dominata dal comportamento delle funzioni di distribuzione a valori piccoli di x .

Ciò può essere trasferito nella sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone a $E_\nu \simeq 50TeV$ e può anche essere usato come guida per estrapolare la densità dei partoni al di là dei range misurati in x e Q^2 fino a quelle richieste per i neutrini di energia più elevata.

3.2.3 Interazioni di differenti tipi di ν in ANTARES

Il principale canale di rivelazione è quello dei muoni prodotti nelle interazioni $\nu_\mu N$, poichè le interazioni $\nu_e N$ e $\nu_\tau N$ sono difficili da sfruttare per studi di astronomia di neutrini.

Interazioni ν_μ di corrente carica producono leptoni μ così come uno sciame adronico puntiforme. L'energia del ν_μ può essere stimata dalla misura dell'energia misurata del μ . Nelle interazioni $\nu_\mu d \rightarrow \mu^- u$, l'energia media di μ^- è 1/2 dell'energia di ν_μ , nelle interazioni $\bar{\nu}_\mu u \rightarrow \mu^+ d$, l'energia media di μ^+ è 3/4 dell'energia di $\bar{\nu}_\mu$. L'energia di μ può essere determinata dal range, cammino entro cui il muone viene assorbito, per $E_\mu < 10GeV$, o dalla perdita di energia dE/dx per $E_\mu > 1TeV$. Per le interazioni ν_μ dentro il rivelatore, l'informazione aggiuntiva sull'energia di ν_μ è disponibile dallo sciame adronico. Il rivelatore di ANTARES è disegnato per rivelare queste interazioni di corrente carica di ν_μ .

Le interazioni ν_e di corrente carica generano sciami elettromagnetici e adronici con dimensioni longitudinali che non superano qualche metro, poichè la lunghezza di radiazione e la lunghezza di interazione nucleare in acqua sono sotto $1m$. Sulla scala di ANTARES, ci sono eventi quasi puntiformi. Ad energie sopra $100GeV$, la risoluzione in energia di questi eventi ci si aspetta che sia migliore rispetto agli eventi muonici poichè questi lasciano tutta la loro energia all'interno del volume del rivelatore. D'altra parte la risoluzione angolare è povera rispetto agli eventi muonici, ciò è dovuto alla caratteristica puntiforme degli sciami.

Le interazioni ν_e di corrente carica saranno contaminate dalle interazioni di corrente neutra sia di ν_e che ν_μ (e di ν_τ se presente). Il numero di interazioni

di corrente neutra è circa $1/3$ del numero di interazioni di corrente carica. Il tipo di neutrino non è identificato nelle interazioni di corrente neutra, la risoluzione in energia è scarsa a causa della mancanza di neutrini nello stato finale, lo è anche la risoluzione angolare a causa del carattere puntiforme.

Le interazioni ν_τ di corrente carica producono leptoni τ , a seconda che la modalità di decadimento sia muonica o leptonica. Il vertice dell'interazione del ν_τ e il vertice del decadimento di τ non possono essere separati per energie al di sotto di $\sim 100TeV$. I modi elettronico e adronico avranno un aspetto simile alle interazioni ν_e di corrente carica e neutra. I decadimenti muonici $\tau^- \longrightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$, con un rapporto di branching del 17%, visibile in ANTARES, non possono essere distinti dalle interazioni di ν_μ .

3.3 Emissione di luce Cherenkov

Le particelle cariche emettono luce sotto un angolo caratteristico quando passano attraverso un mezzo se la loro velocità eccede la velocità della luce nel mezzo. L'angolo Cherenkov ϑ è relativo alla velocità β della particella e all'indice di rifrazione n del mezzo:

$$\cos \vartheta = \frac{1}{n\beta} \quad (3.8)$$

Nel range di energia di interesse per ANTARES ($E > 10GeV$), le particelle saranno generalmente ultrarelativistiche con $\beta = 1$. L'indice di rifrazione dell'acqua di mare è $n = 1.35$ per una lunghezza d'onda di $450nm$, pertanto la luce Cherenkov è emessa sotto un angolo di 42° per questa lunghezza d'onda. La geometria dell'emissione dei fotoni Cherenkov rispetto alla traccia del muone, permette di ricostruire la traccia rivelando i fotoni tramite la matrice di PMT disposti nello spazio occupato dal rivelatore.

Il numero di fotoni prodotti lungo il percorso di volo dx in un bin di lunghezza d'onda $d\lambda$ per una particella che trasporta una carica unitaria è

$$\frac{d^2N}{d\lambda dx} = 2\pi\alpha \sin^2 \vartheta / \lambda^2 \quad (3.9)$$

Alle lunghezze d'onda di $(400 - 500)nm$ l'efficienza dei fotomoltiplicatori così come la trasparenza dell'acqua sono massime. Entro un percorso di volo di $1cm$ sono emessi 100 fotoni in questo bin di lunghezza d'onda. Tra $285 - 400nm$ sono emessi un numero doppio di fotoni, tuttavia essi contribuiscono in misura minore al segnale rilevato dato che l'efficienza del PMT

è massima tra $(350 - 420)nm$. Ad una distanza perpendicolare di $40m$ da una traccia carica la densità di fotoni tra $(400 - 500)nm$ è ancora pari a 1 su $340cm^2$, effetti di scattering e di assorbimento trascurabili. L'area effettiva dei fotomoltiplicatori è stata considerata la medesima nel range $(300 - 500)nm$. Ciò dà un'indicazione sul volume del rivelatore attivo intorno a ogni fotomoltiplicatore.

Per $\beta = 1$ la resa della luce Cherenkov è indipendente dall'energia del-

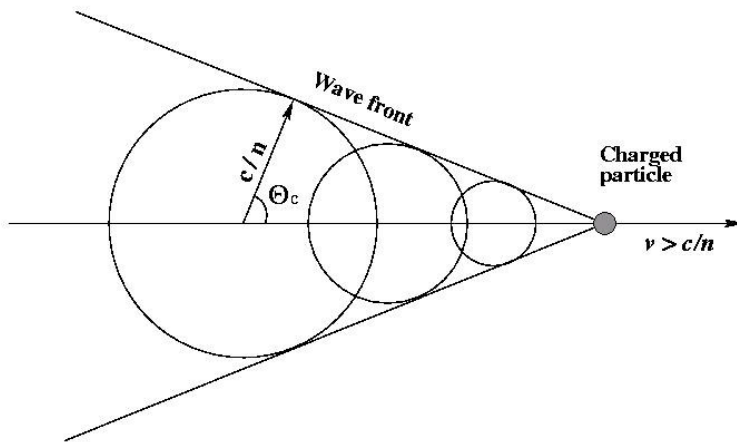


Figura 3.2: *Emissione di luce Cherenkov.*

la particella carica. Questo significa che della luce in uscita di una singola particella non è possibile misurarne l'energia. Tuttavia quando gli sciame adronici o elettromagnetici sono prodotti (che potrebbero verificarsi al vertice di un neutrino, nonché per i processi di radiazione lungo la traccia di un muone) la luce totale resa dallo sciame sarà proporzionale alla lunghezza totale della traccia nello sciame e pertanto alla sua energia iniziale. Questo consente alcune misure calorimetriche, se il vertice del neutrino è interno al volume attivo del rivelatore, o per tracce muoniche sopra $1TeV$, dove domina il processo radiativo, questa energia è persa.

3.4 Propagazione della luce nell'acqua di mare

I processi di assorbimento e scattering caratterizzano la trasmissione della luce in acqua. Questi sono parametrizzati dalla lunghezza di assorbimen-

to, λ_a , la lunghezza di scattering λ_s , e la funzione di scattering $\beta(\vartheta)$ che descrive la distribuzione angolare dello scattering. La finestra rilevante di lunghezze d'onda per un rivelatore di luce Cherenkov in acqua di mare è centrata nel blu. La trasparenza dell'acqua marina profonda è massima nel blu, con un tipico valore di $60m$ per λ_a e λ_s , e una funzione di scattering piccata in corrispondenza di un valore medio del coseno dell'angolo di scattering $\langle \cos(\vartheta) \simeq 0.9 \rangle$, come mostrato nella figura 3.3. Non sono prese in considerazione variazioni stagionali di questi valori, in special modo dei parametri di scattering.

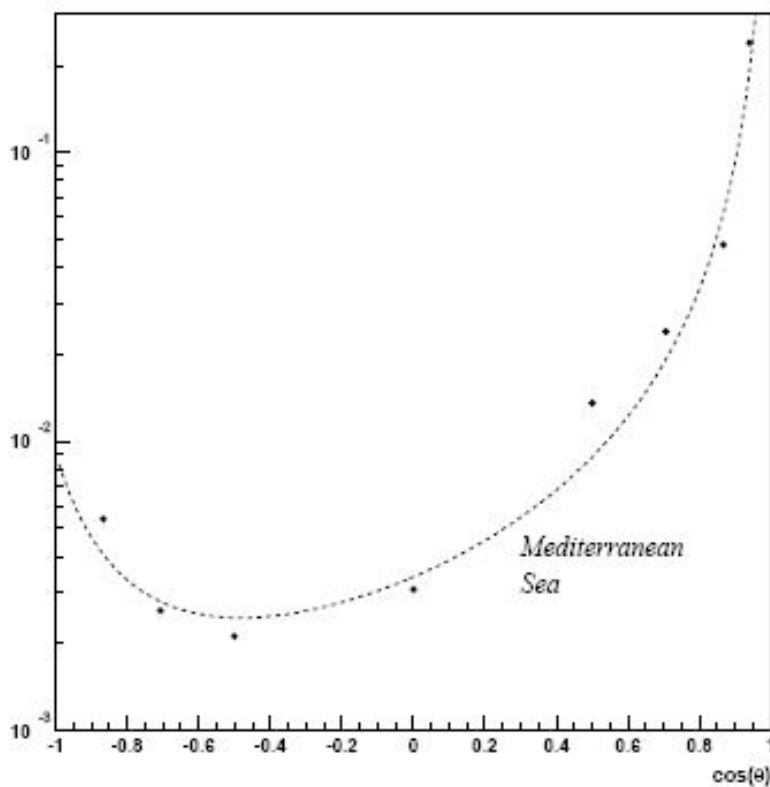


Figura 3.3: *Distribuzione angolare dello scattering nelle profondità del Mar Mediterraneo, [Collaboration].*

3.5 Ricostruzione della traccia

La traccia di un muone con energia superiore a 50GeV può essere considerata rettilinea, e la velocità del muone pari a quella della luce nel vuoto. La traccia è quindi completamente identificata dalla posizione $\vec{p} = (x_0, y_0, z_0)$ del muone al tempo di riferimento t_0 , e dai coseni direttori:

$$\vec{d} = [\cos \phi \sin \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \theta] \quad (3.10)$$

dove ϕ è l'angolo azimutale e θ l'angolo di zenith in un sistema di riferimento cartesiano (x, y, z) . Tenendo presente la figura 3.4 il tempo t_{PMTi} di arrivo del generico fotone Cerenkov, emesso con un angolo θ_C rispetto alla traccia, sull' i -esimo fotomoltiplicatore del rivelatore, in posizione $\vec{q} = (x_i, y_i, z_i)$, può essere calcolato sommando il tempo $t_1(t_{OA})$ che il muone impiega per arrivare al punto di emissione del fotone, al tempo $t_2(t_{AB})$ di propagazione del fotone nel mezzo con indice di rifrazione n (linea tratteggiata)

$$t_{PMTi} = t_0 + t_1 + t_2 \quad (3.11)$$

Definendo

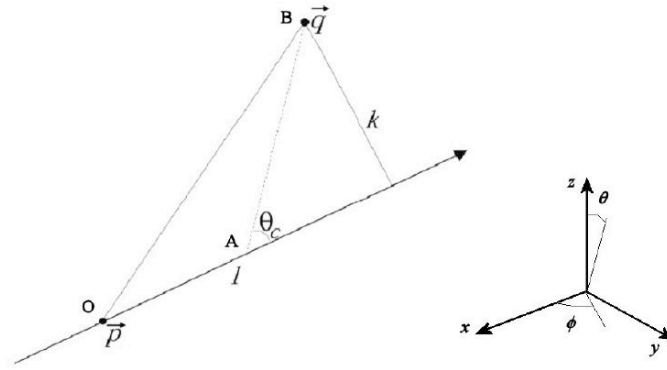


Figura 3.4: Traiettoria del muone e del generico fotone Cerenkov, e a destra sistema di riferimento.

$$\vec{v} = \vec{q} - \vec{p} \quad (3.12)$$

si ha

$$\vec{l} = \vec{v} \cdot \vec{d} \quad (3.13)$$

e

$$k = \sqrt{|\vec{v}|^2 - l^2} \quad (3.14)$$

che è la minima distanza della traccia dal PMTi.

Il tempo di arrivo su $\vec{q}(t_i)$ è allora

$$t_i = t_0 + \frac{1}{c} \left(l - \frac{k}{\tan \theta_C} \right) + \frac{1}{v_g} \frac{k}{\sin \theta_C} \quad (3.15)$$

dove v_g è la velocità di gruppo della luce in acqua $v_g = \frac{c}{n}$.

Per ogni quintupla di parametri $(x_0, y_0, z_0, \theta, \phi)$, che identifica univocamente la traccia del muone, la relazione precedente permette di calcolare il tempo di arrivo dei fotoni Cerenkov su ogni PMT dell'apparato. Quindi, dati i tempi di arrivo effettivamente misurati (hit), per ricostruire la traccia del muone si può costruire una funzione dei cinque parametri $(x_0, y_0, z_0, \theta, \phi)$ che rappresenta l'errore quadratico medio tra i tempi di hit teorici e quelli misurati, e minimizzare tale funzione, χ^2 , per trovare i valori geometrici della traccia nello spazio.

3.6 Risposta del rivelatore

I processi fisici coinvolti nelle interazioni di neutrino e muone pongono limiti sulla risoluzione angolare e energetica possibile con un telescopio di neutrini. Questi limiti devono essere presi in considerazione quando si cerca di ottimizzare la struttura del rivelatore

3.6.1 Risposta angolare per le interazioni di ν_μ

La risposta angolare del rivelatore rispetto alla direzione del neutrino entrante è cruciale per l'identificazione di sorgenti puntiformi di neutrini. Tre fattori determinano questa risposta: l'angolo tra il neutrino e il muone nell'interazione di neutrino, la deviazione della direzione del muone dovuta allo scattering multiplo e la risoluzione angolare del rivelatore rispetto al muone. L'effetto dei primi due fattori è illustrato nella figura 3.5. A 1TeV la differenza media tra la direzione di ν e quella di μ è circa 0.7° . La differenza diminuisce con l'aumentare dell'energia di ν . La risoluzione del rivelatore sarà determinata dalla qualità dell'allineamento dei componenti del rivelatore, dalla risoluzione temporale dei fotomoltiplicatori, dal tempo globale del

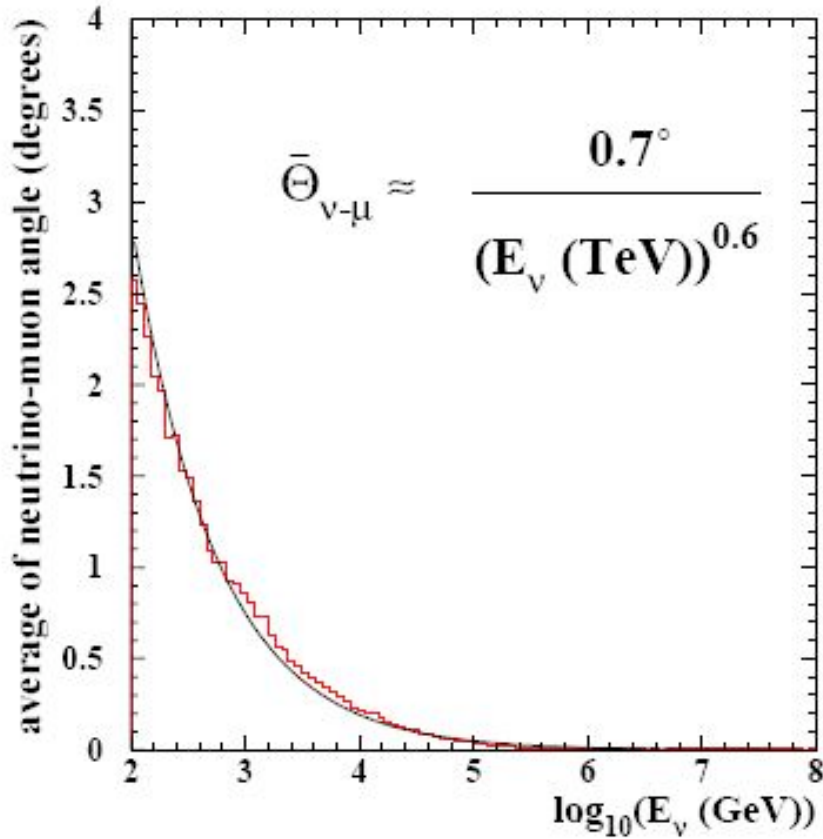


Figura 3.5: *Differenza angolare tra la direzione del neutrino iniziale e la traccia del muone; la forma della funzione mostra con la linea continua la dipendenza dall'energia, [ANTARES Collaboration].*

sistema di lettura e dalla qualità nella ricostruzione della traccia del muone. La ricostruzione della traccia sarà affetta dalla luce proveniente da particelle secondarie e dalla luce scatterata. Le simulazioni Monte Carlo mostrano che è possibile ottenere una risoluzione angolare di 0.1° . Questo significa che sopra 100TeV la risoluzione angolare totale è dominata da effetti dovuti al rivelatore, che, sotto 10TeV ha una risoluzione che dipende dalla distribuzione angolare delle interazioni dei neutrini.

La risoluzione angolare è mostrata in figura 3.6. Tramite simulazioni si ot-

tiene che la metà degli eventi provenienti da sorgenti puntiformi con uno spettro di ν di E^{-2} cadono in una regione circolare di raggio 0.2° centrata sulla posizione della sorgente. Al di sopra di 10TeV la risoluzione angolare

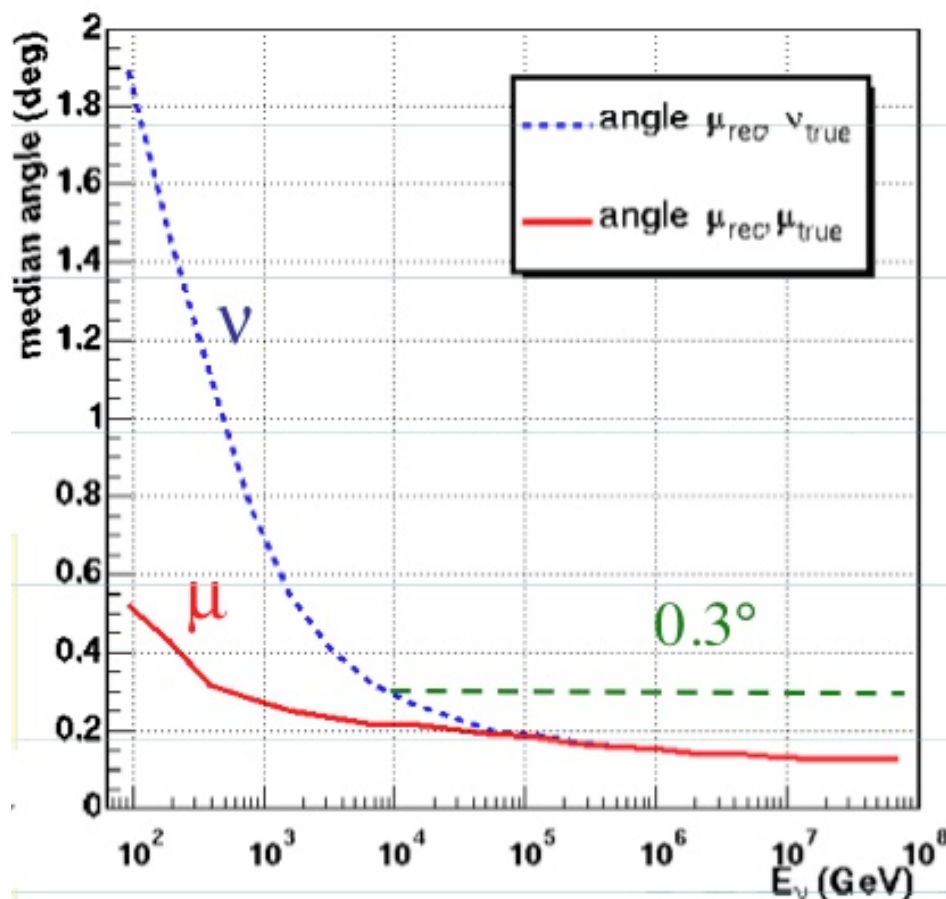


Figura 3.6: La linea solida mostra l'angolo nello spazio tra la traccia del muone ricostruita e la traccia generata tramite simulazione MonteCarlo. La linea tratteggiata mostra l'angolo tra la direzione del neutrino incidente e quella ricostruita dal muone indotto nella reazione $\nu_\mu N$.

non è dominata dall'angolo "fisico" tra il neutrino e il muone reale, ma dagli errori di ricostruzione.

3.6.2 Risposta in energia per le interazioni di ν_μ

La risposta in energia è determinata dalla frazione di energia trasferita al muone nell'interazione di neutrino, dall'energia persa dal muone fuori dal rivelatore e dalla risoluzione in energia del rivelatore. La determinazione dell'energia del muone richiede tecniche differenti in diversi range di energia.

Sotto 100GeV , i muoni sono vicini al minimo di ionizzazione, e l'energia di eventi contenuti, cioè i cui punti iniziale e finale siano misurati dentro il rivelatore, può essere determinata accuratamente dal range. La soglia per questo metodo è circa $(5 - 10)\text{GeV}$ per le tracce verticali, a seconda della distanza verticale tra i gruppi di moduli ottici, e circa 15GeV per eventi più isotropi, a seconda della distanza tra le linee orizzontali.

Sopra 100GeV , il range non può essere misurato a causa delle limitate dimensioni del rivelatore, ma il range visibile determina un'energia minima che può essere usata per l'analisi degli eventi parzialmente contenuti: a partire da eventi in cui il vertice è misurato all'interno del rivelatore, e fermandosi per gli eventi in cui il punto finale è misurato.

Sopra 1TeV , i processi stocastici (bremsstrahlung, produzione di coppie, raggi δ) sono dominanti, e l'energia persa dei muoni diventa proporzionale all'energia. Il range del muone sopra 1TeV aumenta soltanto logicamente con l'energia del muone, figura 3.7. D'altra parte, l'efficienza di rivelazione aumenta con l'energia a causa dell'ulteriore perdita di energia. La correlazione tra l'energia del muone misurata e l'energia del neutrino è mostrata nella figura 3.8. Le simulazioni Monte Carlo hanno evidenziato che l'energia del neutrino può essere determinata con un fattore 3 sopra 1TeV dall'energia media persa.

Sopra 1PeV , la Terra diventa opaca ai neutrini verticali provenienti dal basso. Tuttavia energie più alte sono accessibili vicino all'orizzonte. Neutrini tau di energia molto alta possono essere osservati perchè i τ , prodotti nelle interazioni di ν_τ , decadono prima di essere assorbiti, producendo ν_τ di bassa energia che continuano lungo la linea di volo dell'originale ν_τ , ma diminuendo la probabilità di interazione, e causando un accumulo di eventi al massimo delle energie rilevabili.

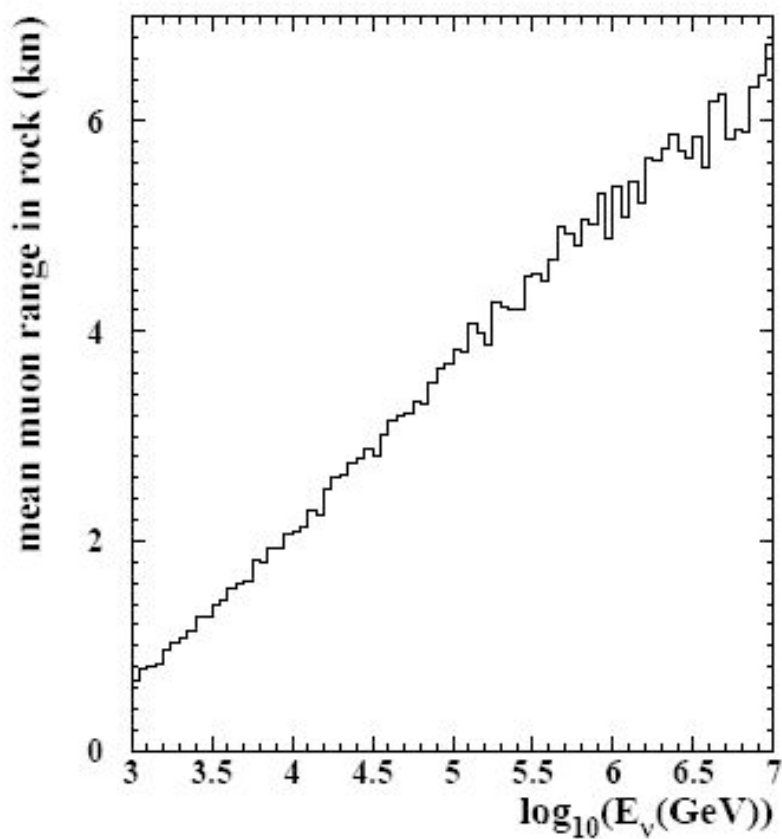


Figura 3.7: *Range medio del muone in una roccia standard come funzione dell'energia iniziale del neutrino, [ANATES Collaboration].*

3.7 Il design del rivelatore

Il design del rivelatore è vincolato dai seguenti fattori:

- le condizioni ambientali presso il sito, che influenzano la spaziatura dei moduli ottici, la struttura meccanica delle stringhe del rivelatore, e i rate di background aspettati;
- l'esperienza pratica acquisita tramite il design e la distribuzione della stringa prototipo;

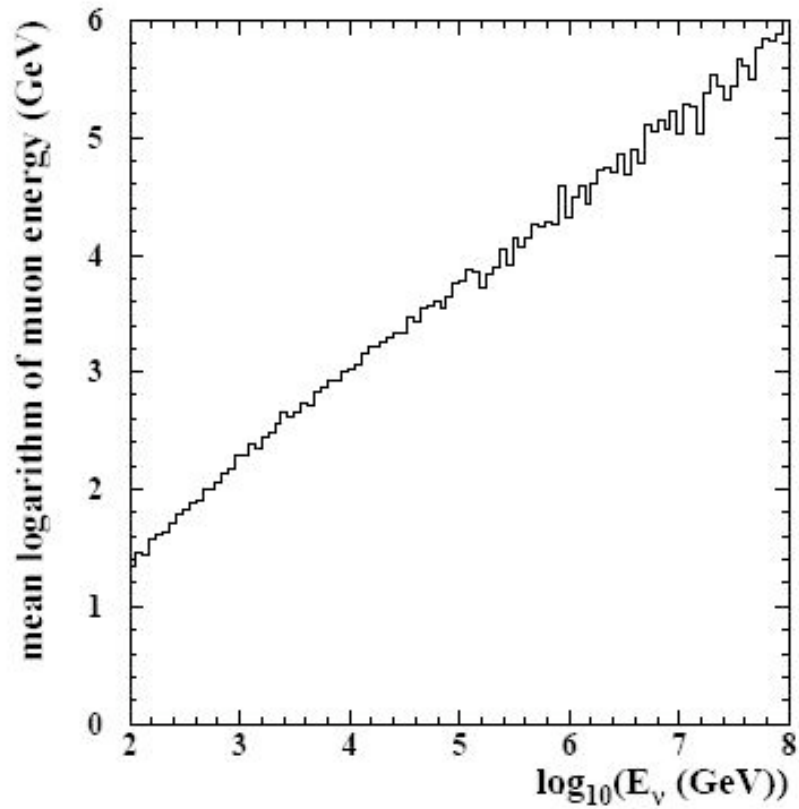


Figura 3.8: *Energia del muone al rivelatore come funzione dell'energia del neutrino parente, [ANTARES Collaboration].*

- il bisogno di ottimizzare le performance fisiche del rivelatore;
- la richiesta per un alto livello di affidabilità.

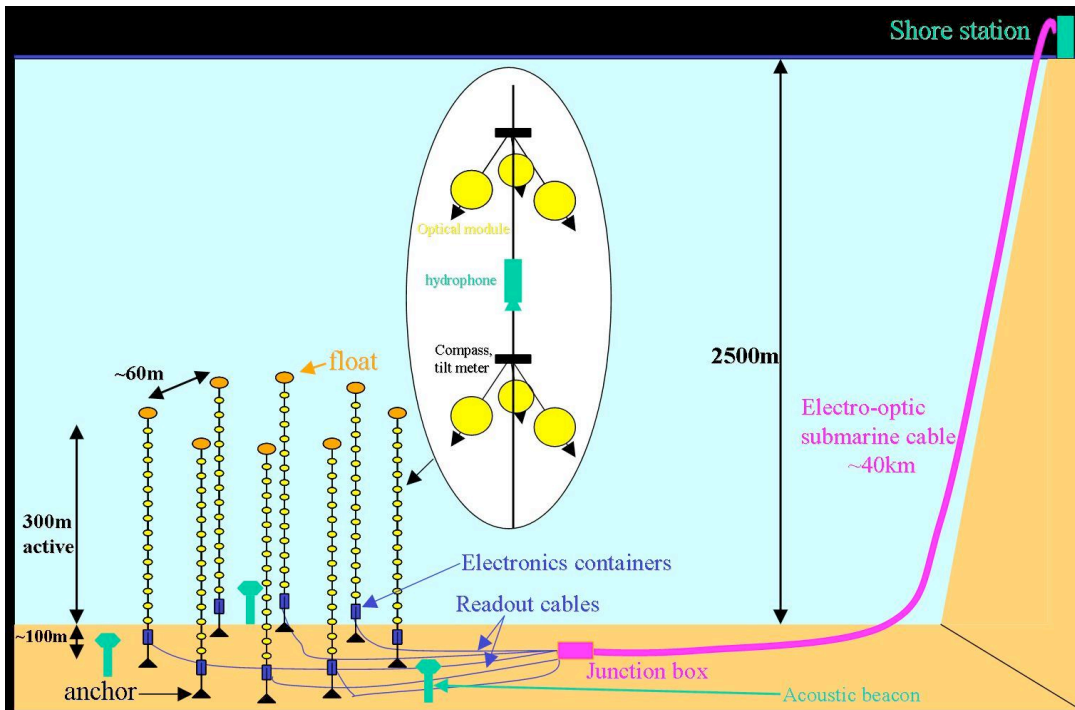


Figura 3.9: Schematizzazione dell'array di rivelatori, [ANTARES Collaboration]

3.8 Panoramica generale

L'esperimento ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch), costruito nel Mar Mediterraneo, è un array di 900 moduli ottici che formano un rivelatore di neutrini di alta energia (nel range $TeV - PeV$). I fotomoltiplicatori sono posti in 12 stringhe che coprono un'area di circa $0.1 km^2$ e con una altezza attiva di circa $0.3 km$, si trovano ad una profondità di circa $2500 m$ a $40 km$ dalle coste di Tolone (Francia). La figura 3.9 mostra una visione schematica dell'array che costituisce il rivelatore indicandone i componenti principali.

L'unità di base del rivelatore è il modulo ottico, che consiste di un tubo fotomoltiplicatore, sensori vari, l'elettronica associata, il tutto allocato in sfere di vetro resistenti alla pressione dell'acqua circostante, fig 3.11. L'elettronica include un circuito elettrico che cattura e memorizza le forme d'onda, altezze

di impulso e informazioni temporali così come l'alimentatore HV (High Voltage) per i tubi fotomoltiplicatori e i nodi della rete per la trasmissione dei dati e lo slow control.

I moduli ottici sono raggruppati insieme in piani di tre moduli, interconnessi tramite un cavo elettromeccanico. Nel presente design il rivelatore ha 12 stringhe, ognuna delle quali ha un'altezza totale di circa 400m e 25 piani per stringa.

I moduli ottici sono disposti in un piano con l'asse dei tubi fotomoltiplicatori a 45° sotto l'orizzonte. L'angolo di accettazione dei moduli ottici è ampio. Questo significa che il posizionamento proposto per i moduli ottici (OMs) rivela luce nell'emisfero inferiore con alta efficienza, e ha accettazione per le direzioni dei muoni sotto l'orizzonte. Nell'emisfero inferiore c'è una sovrapposizione nell'accettazione angolare tra i moduli ottici, permettendo un evento di trigger basato su coincidenze.

La posizione relativa di tutti i moduli ottici è data in tempo reale dal siste-

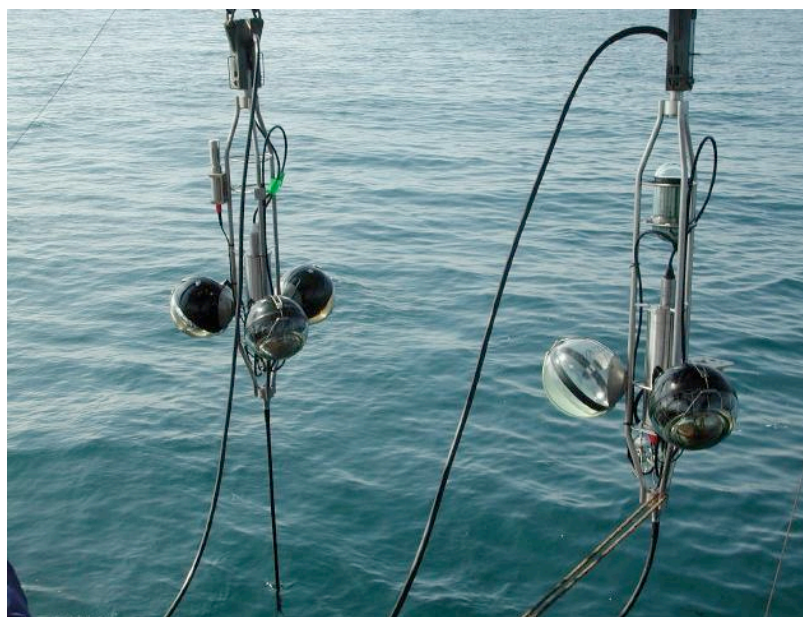


Figura 3.10: *Moduli ottici montati a 180° l'uno dall'altro che stanno per essere posizionati in mare, [ANTARES Collaboration].*

ma di posizionamento che descriveremo nel seguente paragrafo.



Figura 3.11: *Modulo ottico con PMT, [ANTARES Collaboration].*

Ogni stringa è un contenitore di diversi strumenti elettrici: in ogni piano c'è un modulo di controllo locale (LCM, Local Control Module), e alla base di ogni stringa c'è un modulo di controllo della stringa (SCM, String Control Module). In speciali contenitori sono alloggiare attrezzature acustiche e di calibrazione. Ognuno di questi contenitori costituisce un nodo di trasmissione dati di rete, ricevendo e trasmettendo dati e comandi allo slow control. Le funzionalità che questi includono sono la lettura dei sensori, dei parametri acustici, il trigger, la distribuzione dell'energia, del timing e i segnali resettati dall'elettronica.

I singoli moduli di controllo della stringa (SCMs) sono collegati alla comune junction box da cavi elettro-ottici che sono connessi usando un sommergibile. Alla profondità standard in mare il cavo collega la junction box con una stazione dove i dati sono filtrati e registrati.

Il trigger in mare è previsto per essere il più semplice e flessibile possibile. Il primo livello di trigger richiede una coincidenza tra due moduli ottici (OMs) in un unico piano. Il trigger di secondo livello è basato su combinazioni di trigger di primo livello. In seguito un secondo livello di trigger porta a termine la rivelazione completa che sarà successivamente letta. Un più raffinato

trigger di terzo livello, che impone coincidenze temporali più serrate su un ampio numero di moduli ottici, sarà effettuato da processori a terra. La lettura dei dati ci si aspetta che sia superiore al kHz , e il corrispondente tasso di registrazione dei dati meno di 100 eventi al secondo.

3.8.1 Posizionamento

Una stringa non è un supporto rigido per i moduli ottici. Due sistemi indipendenti sono stati inseriti nella stringa per fornire una precisa conoscenza della posizione relativa di ciascun modulo ottico(OM) in qualsiasi momento. Ciò risulta di estrema importanza per la ricostruzione della traccia e quindi per la risoluzione angolare. Il primo sistema si basa su una serie di bussole che misurano gli angoli di inclinazione locali e l'orientazione della stringa. La ricostruzione della forma della linea sotto la distorsione, dovuta ai flussi di corrente dell'acqua, è ottenuta da un fit di misurazioni effettuate in diversi punti lungo la stringa. Il secondo sistema, basato sulla triangolazione acustica, è più preciso ma richiede un'elettronica più complessa e dispendiosa. In questo sistema i contatori, (idrofoni con un contenitore per l'elettronica), posizionati sulla stringa spediscono un segnale acustico a un minimo di tre trasponder fissati sul fondo del mare. Ogni trasponder risponde con la propria frequenza caratteristica. Il fit globale dei percorsi acustici misurati dà la precisa posizione tridimensionale dei contatori, dalla conoscenza della posizione dei trasponder e della velocità del suono in acqua.

3.9 Stringa del rivelatore

Una stringa si mantiene verticalmente rispetto al fondo del mare tramite il galleggiante e l'ancoraggio. Tra questi due aspetti, la parte di rivelatore attivo comprende una serie di segmenti elementari di rivelazione. Questi segmenti sono standardizzati e quindi possono essere prodotti in massa. In ogni caso, la progettazione dei componenti della stringa soddisfa le specifiche di base come ad esempio la resistenza alla corrosione, necessaria vista la prolungata immersione in acqua salata, la resistenza all'alta pressione e all'acqua stagna. Allo stesso modo, in alcuni casi, il colore e le proprietà superficiali degli elementi rivelatori devono essere scelti in modo da minimizzare la riflessione della luce. Tutti i componenti del rivelatore devono rimanere funzionali per una durata minima di 10 anni.

I principali elementi di ogni stringa sono illustrati nella figura 3.12.

La cavità inferiore della stringa (BSS, Bottom String Socket) ancora la stringa sul fondale marino e facilita il collegamento elettrico della stringa alla rete, oltre a consentire il rilascio e il successivo recupero della stringa. Al fine di consentire una precisa e semplice installazione della stringa la sua costruzione è stata ottimizzata per la gestione sulla nave, la resistenza agli urti, la stabilità durante la discesa.

Il cavo elettromeccanico (EMC, Electro-Mechanical Cable) fornisce un supporto meccanico per la stringa oltre a consentire l'interconnessione elettrica degli elementi della stringa. Deve cioè essere in grado di sostenere la resistenza a trazione, la flessibilità e la torsione per mantenere la stabilità della stringa. La sua costruzione deve essere adeguatamente flessibile per consentire l'integrazione delle varie configurazioni, come pure sostiene il servizio, il magazzino, la manipolazione, l'immersione e le fasi di recupero. Il cavo elettrico e le fibre ottiche consentono la distribuzione di energia e la trasmissione di segnali tra due contenitori consecutivi di elettronica (LCM o SCM).

Ogni stringa è costituita da 25 piani, (ES, Elementary Segment), su cui sono installati tre moduli ottici, un modulo di controllo locale (LCM) e un modulo di riferimento ottico. L'OMF supporta i vari elementi collocati all'interno di esso, cioè i moduli ottici, il contenitore LCM e eventualmente un idrofono acustico per il posizionamento. Le grandi forze di trazione necessarie per la distribuzione e il recupero non devono in alcun modo essere trasmesse a tali elementi della stringa.

Sulla cima della stringa c'è una boa, le sue dimensioni e la geometria sono ottimizzate per minimizzare gli effetti idrodinamici come il dragging e le vibrazioni in modo da mantenere una adeguata tensione della stringa. Inoltre, la galleggiabilità deve essere sufficiente a garantire un controllo della stringa durante il recupero.

3.10 Modulo ottico

Una visione schematica del modulo ottico di ANTARES è mostrato nella figura 3.11. Gli aspetti meccanici e ottici sono invece descritti nei paragrafi successivi. Il tubo fotomoltiplicatore e l'elettronica associata sono collocati in una sfera di vetro di diametro 43cm e spessore 15mm che può sopportare una pressione superiore a 700bar . L'attenuazione della luce a $\lambda = 450\text{nm}$

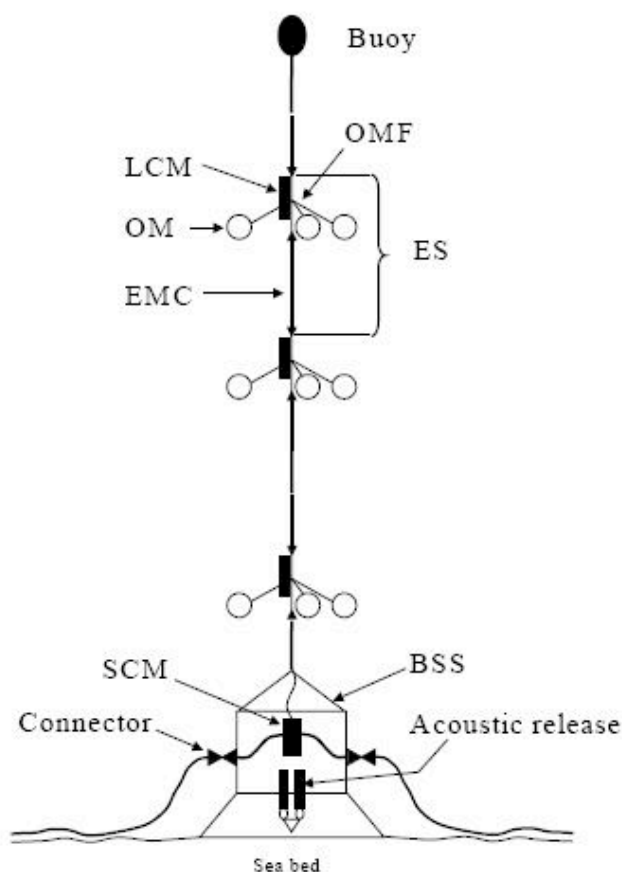


Figura 3.12: *Profilo della stringa di rivelazione, [ANTARES Collaboration].*

dovuta alla sfera è stata misurata essere inferiore al 2%.

Un gel di silicone garantisce l'accoppiamento ottico tra la superficie interna della sfera e il fotocatodo del fotomoltiplicatore. L'indice di rifrazione del gel ($n_{gel} = 1.40$), non corrisponde esattamente a quello della sfera ($n_{glass} = 1.48$), ma è più elevato dell'indice di rifrazione dell'acqua ($n_{water} = 1.35$) e quindi la quantità di luce riflessa dal modulo ottico è minimizzata. Il gel di silicone fotoelettrico copre l'intera area; la sua lunghezza di attenuazione è data come funzione della lunghezza d'onda nella figura 3.13. Il campo magnetico terrestre degrada notevolmente l'efficienza dei fototubi piegando le traiettorie degli elettroni, soprattutto tra il fotocatodo e il primo dinodo. Una

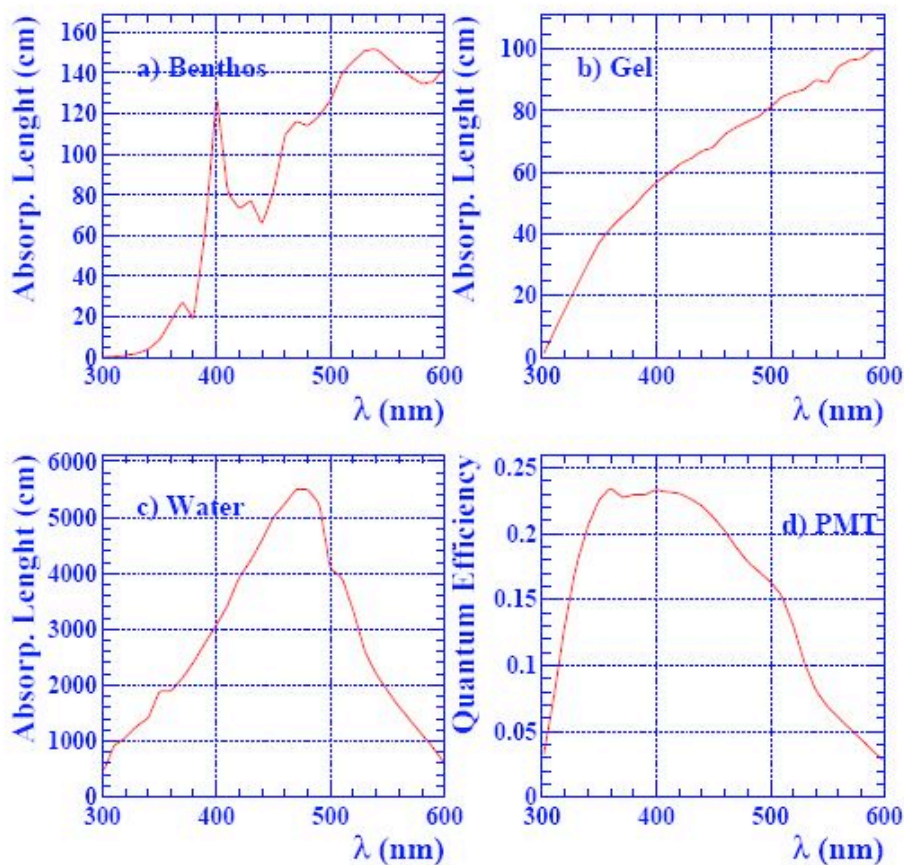


Figura 3.13: Lunghezza di attenuazione di (a) sfera di vetro, (b) gel di silicone e (c) acqua marina; (d) efficienza quantica del fotomoltiplicatore, [ANTARES Collaboration].

gabbia fatta di μ -metal, dello spessore di 1.1mm ad alta permittività è usata per schermare il fotomoltiplicatore e per minimizzare la dipendenza della risposta del modulo ottico rispetto al suo angolo con il Nord magnetico. La dimensione delle maglie della gabbia (6.8cm) è stata ottimizzata per ridurre la non uniformità della risposta angolare del PMT a meno del 5%, riducendo al minimo la frazione di luce persa a causa dell'ombra della gabbia.

3.10.1 Caratterizzazione del tubo fotomoltiplicatore

Per determinare le caratteristiche di rilievo dei fotomoltiplicatori da usare, questi sono stati sottoposti a vari tipi di test. Uno di questi è detto "il box scuro", in cui i fotomoltiplicatori, 10" Hamamatsu, sono esposti ad illuminazione uniforme provenienti da led rossi, verdi o blu o a laser a stato solido molto veloci. Questo consente la sistematica e precisa misurazione di un gran numero di caratteristiche del fotomoltiplicatore.

L'area efficace del fotocatodo (A_{eff}^{PC}) è definita come l'area sensibile del fotocatodo pesata con l'efficienza di raccolta. Viene misurata mediante la scansione dell'intera superficie del fotocatodo con un led blu collimato.

Il guadagno del PMT è di $5 \cdot 10^7$. In vista dell'invecchiamento del fotomoltiplicatore e delle eventuali variazioni nelle specifiche è obbligatorio un guadagno massimo di almeno 10^8 .

A causa di imperfezioni degli elettroni ottici e della dimensione finita del fotocatodo, il tempo di transito del singolo fotoelettrone tra il fotocatodo e il primo dinodo ha una larghezza misurabile, di solito denominata tempo di transito della diffusione (TTS). Questo definisce i tempi di risoluzione dei fotomoltiplicatori, che deve essere paragonabile alla precisione di posizionamento globale, alla tempistica e alla precisione di lettura elettronica, cioè $1.3ns(rms)$ o una larghezza a metà altezza ,Full Width at Half Maximum (FWHM), di $3ns$. La misurazione della TTS è eseguita su tutta l'area del fotocatodo con un guadagno operativo del fotomoltiplicatore di $5 \cdot 10^7$.

3.11 Slow Control

Il sistema di slow control è destinato a un monitoraggio delle variabili che cambiano in maniera lenta, oltre a controllare vari aspetti operazionali del rivelatore. La tensione del fotomoltiplicatore, la temperatura e tensioni di alimentazione si leggono dai moduli ottici. Alcuni strumenti dedicati forniscono informazioni sul comportamento e l'orientazione della stringa, sulla velocità della corrente in acqua, sul posizionamento acustico e sul controllo dei dati. Il sistema di slow control così trasmette a una stazione a riva tutte le informazioni necessarie per monitorare e controllare il rivelatore, oltre a fornire informazioni di calibrazione necessarie per ricostruire gli eventi.

3.12 Calibrazione

La precisione di puntamento del rivelatore è determinata in larga misura dalla accuratezza sui tempi di ogni evento. Consiste in una somma quadratica di termini che sono:

- la precisione con cui il posizionamento spaziale e l'orientamento dei moduli ottici è nota: σ_{geom} ;
- l'accuratezza con cui è misurato il tempo di arrivo dei fotoni sui moduli ottici: σ_{pmt}
- la precisione con cui i tempi locali dei segnali rivelati dai moduli ottici individuali possono essere sincronizzati con ogni altro: σ_{align}

$$\sigma_t^2 = \sigma_{geom}^2 + \sigma_{pmt}^2 + \sigma_{align}^2. \quad (3.16)$$

3.13 Bioluminescenza e ^{40}K

Esistono altre due componenti di cui si deve tener conto nella stima del fondo di neutrini: il decadimento del ^{40}K e la bioluminescenza. I due principali rami di decadimento del potassio 40 sono:



L'attività del ^{40}K può essere calcolata conoscendo la salinità del sito abissale in esame, la percentuale di potassio rispetto a tutti gli altri sali, l'abbondanza relativa del ^{40}K e la vita media del ^{40}K stesso.

La bioluminescenza invece è dovuta ad alcune specie che costituiscono la fauna marina, che sono in grado di emettere un segnale di disturbo per la nostra osservazione. Questo rumore può essere ridotto notevolmente applicando i trigger di coincidenza tra PMT e tra i piani delle stringhe, descritte nel paragrafo 3.8.

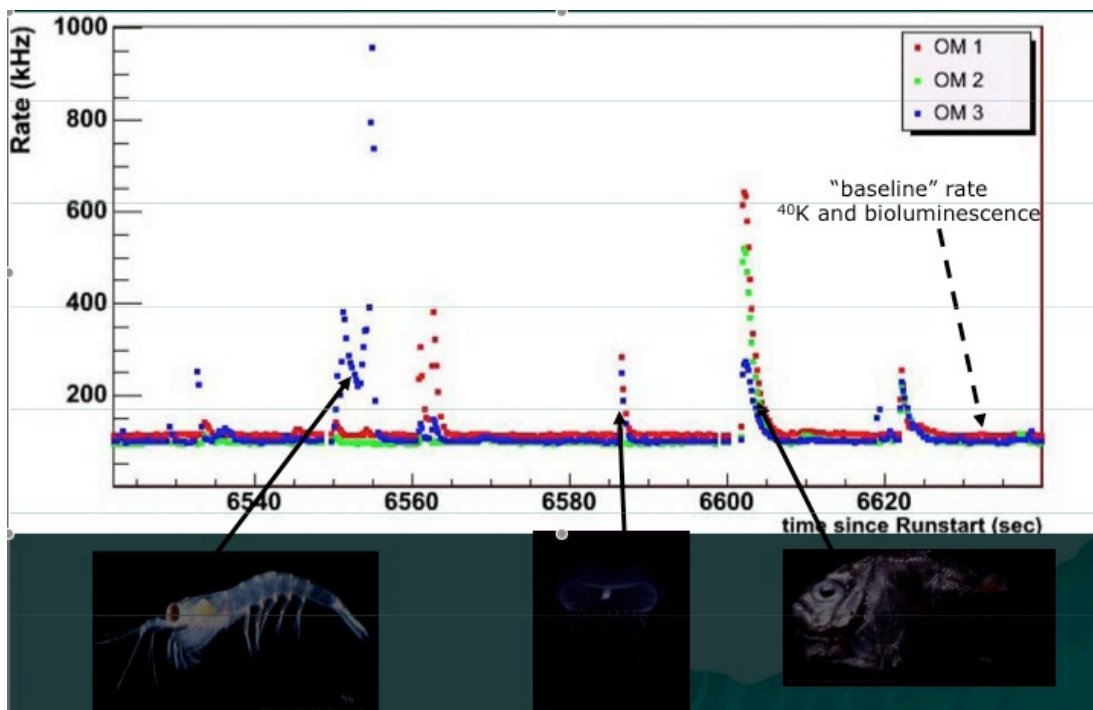


Figura 3.14: Nella figura sono mostrati i due diversi contributi al rumore ottico sui PMT dell'apparato: la banda scura che ha un andamento costante identifica l'azione del ^{40}K , mentre i picchi che superano tale livello sono dovuti alla bioluminescenza della fauna marina, [ANTARES Collaboration].

3.14 Il cielo osservabile

Il Telescopio per neutrini ANTARES, situato a 43° di latitudine Nord, può osservare i neutrini che arrivano dal basso dalla maggior parte del cielo (circa $3.5\pi sr$), grazie alla rotazione della Terra. Le declinazioni sotto -47° sono sempre visibili, mentre quelle sopra -47° non sono mai visibili. Le declinazioni comprese tra -47° e $+47^\circ$ sono visibili per parte del giorno siderale, figura 3.15. La maggior parte del piano Galattico è visibile, e il centro Galattico è visibile la maggior parte del giorno siderale. Dal momento che il telescopio per neutrini AMANDA, situato al polo Sud, è sensibile alle declinazioni positive, i due rivelatori avranno un ragionevole spazio in comune (circa $1.5\pi sr$) per controlli incrociati.

A energie più grandi di $\simeq 40\text{TeV}$, la lunghezza di interazione dei ν_μ di-

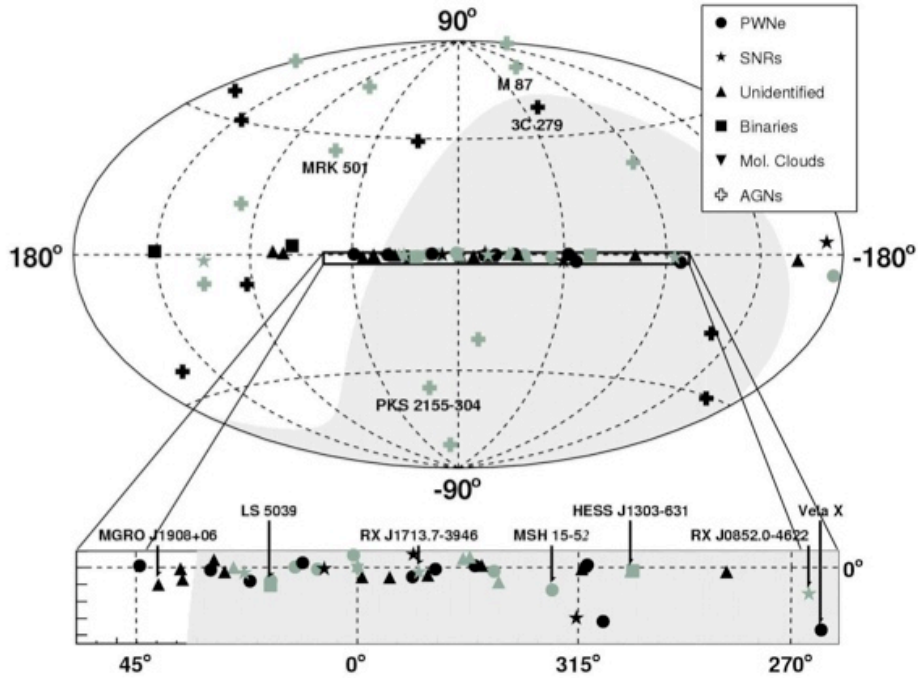


Figura 3.15: *Cielo visibile, in coordinate galattiche, per il rivelatore ANTARES (zona in grigio), nell'osservazione sono evidenziate in particolare modo le sorgenti di raggi gamma di alta energia che giacciono sul piano galattico.*

venta più piccola rispetto al diametro della Terra. Sopra 10PeV , quindi, la Terra è completamente opaca a neutrini verticali, mentre sono visibili solo ν con direzioni di arrivo orizzontali ($\theta = 90^\circ$). Il campo di vista può essere esteso 10° al di sopra dell'orizzonte a queste energie, dove il background è sensibilmente diminuito.

3.15 Area efficace

Una caratteristica fondamentale per il rivelatore ANTARES è l'area efficace. Infatti la capacità del rivelatore di identificare una traccia di un muone viene indicata con il parametro Area Efficace intendendo con questo termine l'area attorno ad una sezione dell'apparato all'interno della quale i muoni

che passano vengono rivelati. L'area efficace può essere calcolata conoscendo le efficienze di rivelazione, oppure stimata tramite simulazioni Monte Carlo. Scelta un'area di riferimento su cui calcolare il flusso di muoni che la attraversa, vengono conteggiate le tracce meglio ricostruite. La frazione di eventi ricostruiti moltiplicata per l'area geometrica di generazione dà l'area efficace. L'area geometrica di riferimento deve essere più grande dell'area che contiene il rivelatore, ad esempio con un margine di 5 lunghezze di attenuazione dei fotoni. L'area efficace dipende, oltre che dall'energia del muone, anche dalla geometria del rivelatore, per esempio dalla distanza tra i PMT rispetto alla lunghezza di attenuazione dei fotoni in acqua e dagli algoritmi di filtraggio e ricostruzione utilizzati nell'analisi degli eventi.

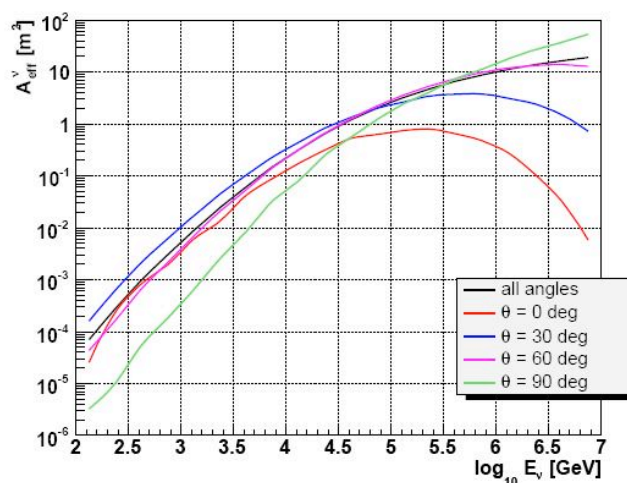


Figura 3.16: Nel grafico è mostrata l'area efficace per neutrini come funzione dell'energia per differenti valori dell'angolo zenitale del neutrino, [ANTARES Collaboration].

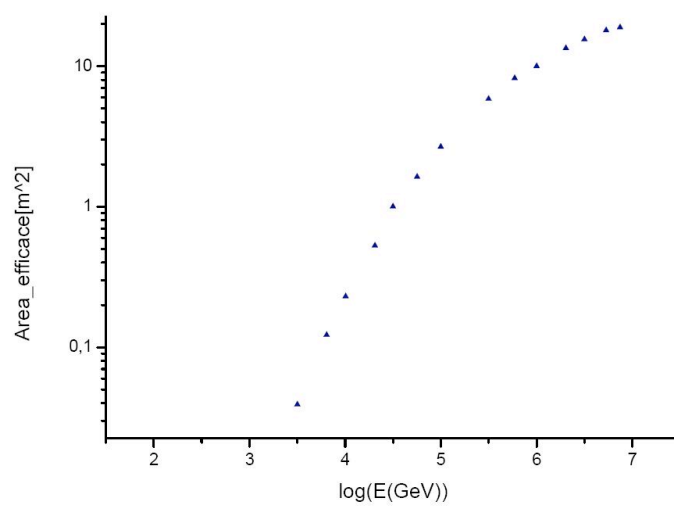


Figura 3.17: In figura è riportata l'area efficace di ANTARES in funzione del logaritmo dell'energia, al di sopra di 100GeV , per ogni bin considerato.

Energia bin [GeV]	Area efficace [m^2]
140.2813705	0.0000783
211.8361135	0.0002090
19.1537855	0.000556
628.0583588	0.002
995.4054174	0.005
1914.255925	0.017
3176.874071	0.039
6412.095766	0.122
10139.11386	0.23
20464.44637	0.529
31622.7766	1
56493.69748	1.632
100000	2.664
314774.8314	5.834
590201.0802	8.22
1000000	10
2027682.72	13.417
3162277.66	15.541
5333348.955	18
7481695.005	18.906

Tabella 3.1: Nella prima colonna è riportata l'energia per ogni bin in GeV, nella seconda la corrispondente area efficace in m^2

L'area efficace è diversa a seconda dell'inclinazione della traccia del muone rispetto alla verticale. In figura 3.16 è mostrata l'area efficace per neutrini di ANTARES (12 stringhe) per differenti angoli zenitali: le maggiori differenze si notano per energie $E_\nu > 100\text{TeV}$ oltre le quali diventa importante l'opacità terrestre. Nella figura 3.17 si mostra, invece, l'area mediata su tutto l'angolo zenitale.

Come vedremo nel prossimo capitolo, l'area efficace per neutrini, moltiplicata per il flusso atteso da una certa sorgente e per il tempo di osservazione, fornisce direttamente il numero di eventi attesi.

3.16 Stato attuale dell'esperimento

Il posizionamento in acqua di tutte le 12 stringhe è stato effettuato con successo. Dal 2 Marzo del 2006 è iniziata la presa dati, prima con un'unica linea, successivamente con 5 e ora con la totalità di esse. La figura 3.18 mostra uno degli eventi di muone upgoing osservati.

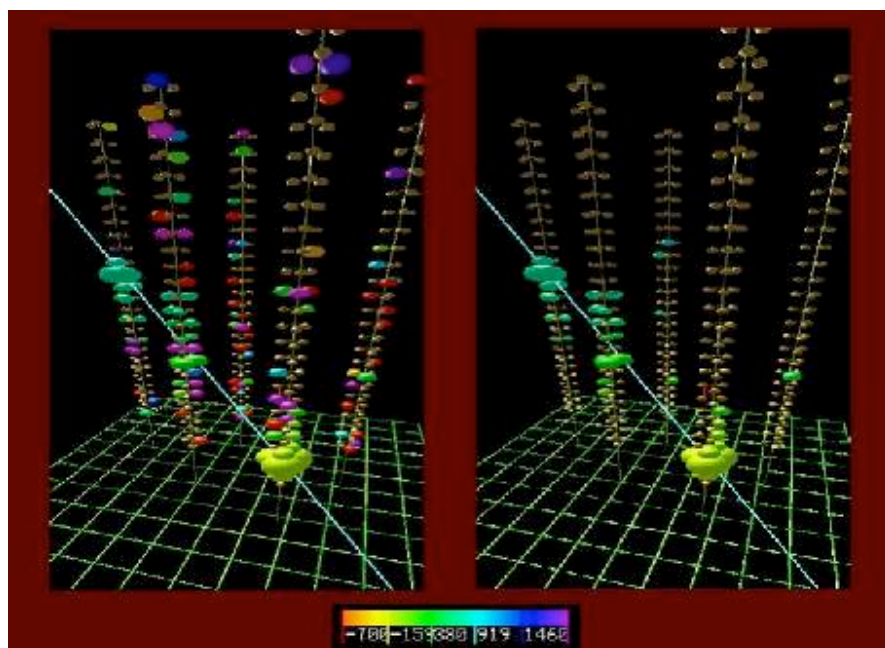


Figura 3.18: *Primo evento di muone upgoing osservato, [ANTARES Collaboration].*

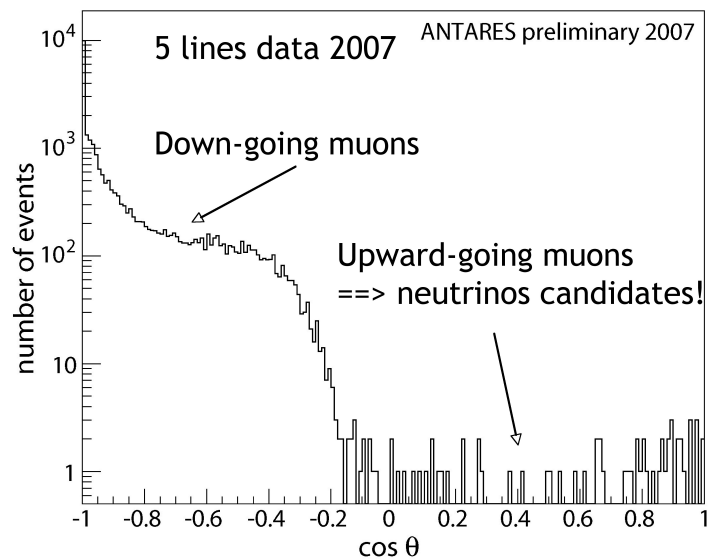


Figura 3.19: *Distribuzione del coseno dell'angolo zenitale per gli eventi ricostruiti con 5 linee, [ANTARES Collaboration].*