

## Capitolo 2

### L'esperimento NEMO

La rivelazione dei neutrini è possibile tramite l'identificazione delle particelle cariche, leptoni ed adroni, che sono prodotte nell'interazione dei neutrini stessi con la materia.

Le interazioni di corrente carica delle tre specie di neutrini,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$ , possono essere distinte solo se è possibile riconoscere la natura dei leptoni  $e$ ,  $\mu$  e  $\tau$ , originati nell'interazione primaria. Date le differenti modalità di interazione dei tre leptoni con la materia, quello che più facilmente può essere rivelato è il muone: la sua vita media è tale che per le energie in gioco potrebbe percorrere centinaia di chilometri prima di decadere. Un muone di energia  $E = 100 \text{ GeV}$  potrebbe percorrere, se non interagisse in altro modo con la materia che attraversa, un percorso

$$c\tau\gamma \simeq 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^3 \simeq 600 \text{ Km} \quad (2.1)$$

dove  $\tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  è il tempo di vita media del muone,  $c$  è la velocità della luce nel vuoto e  $\gamma = \frac{E}{mc^2}$ . Il muone inoltre trasporta la maggior parte dell'energia del  $\nu_\mu$  che lo ha prodotto e si muove lungo una direzione che è quasi coincidente con quella del  $\nu_\mu$   $\left( \theta_{\nu\mu} \sim \frac{1,5^\circ}{\sqrt{E_\nu[\text{TeV}]}} \right)$ .

La ricostruzione della direzione del muone potrà permettere di individuare la direzione di provenienza dei neutrini e dunque di individuarne le sorgenti.

Il grosso problema della rivelazione di queste particelle è che ad altissima energia, se provenienti da sorgenti astrofisiche, hanno un flusso molto basso. È quindi di fondamentale importanza, per la realizzazione di tali apparati, il controllo degli eventi di fondo, che vengono in gran parte

indotti dai  $\mu$  e dai  $\nu$  atmosferici.

Il bersaglio su cui fare interagire i  $\nu_\mu$  astrofisici deve essere molto grande, a causa dei flussi ridotti e quindi può essere costituito da una grande massa d'acqua o di ghiaccio.

Viste le energie che si vogliono rivelare, l'area efficace dell'apparato deve essere maggiore di  $1 \text{ Km}^2$ : tale apparato deve essere inoltre dotato di rivelatori su tutto il percorso previsto per il muone in acqua. L'esperimento NEMO usa come bersaglio per i neutrini una colonna d'acqua profonda circa 3500m, che serve inoltre come schermo dai muoni atmosferici e come mezzo trasparente in cui il muone può produrre luce Čerenkov. Il flusso di  $\mu$  atmosferici provenienti dall'alto, ad una tale profondità, è fortemente soppresso, ma non è nullo. Per rendere trascurabile il fondo di muoni atmosferici si può quindi cercare di rivelare solo i muoni indotti dai neutrini che vengono dalla direzione che è schermata dall'intero spessore della Terra (*neutrini up-going*) (figura 2.1). In questo modo si riduce però la porzione di cielo osservabile con un

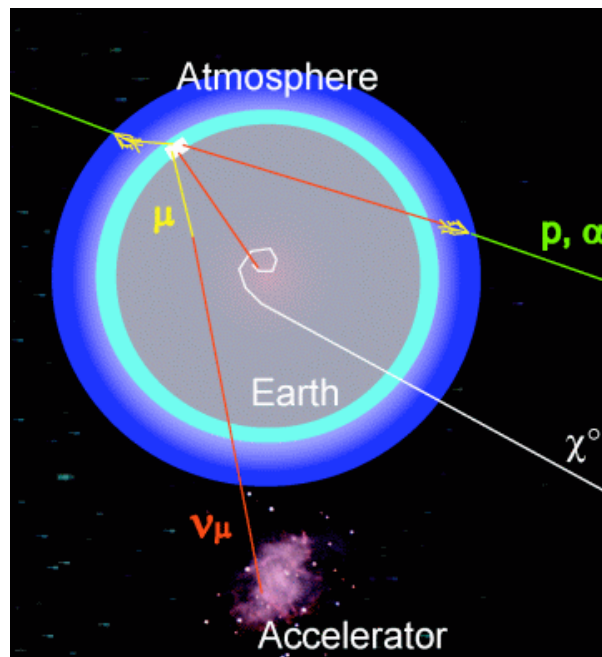


Figura 2.1: Possibili cause di “eventi con muoni” in un apparato sommerso: si riconoscono  $\mu$  atmosferici originati nell'atmosfera sopra il rivelatore (fondo),  $\mu$  da neutrini atmosferici (fondo),  $\mu$  da  $\nu$  astrofisici (segnali) e  $\mu$  da decadimenti di neutrini (segnali) [31].

telescopio sottomarino: nel caso dell'esperimento NEMO, che è attualmente in fase di progettazione, ma che sarà costruito nell'emisfero settentrionale, la porzione di cielo osservabile e le relative sorgenti di raggi cosmici (in particolare raggi  $\gamma$ ) finora identificate sono riportate in figura 2.2.

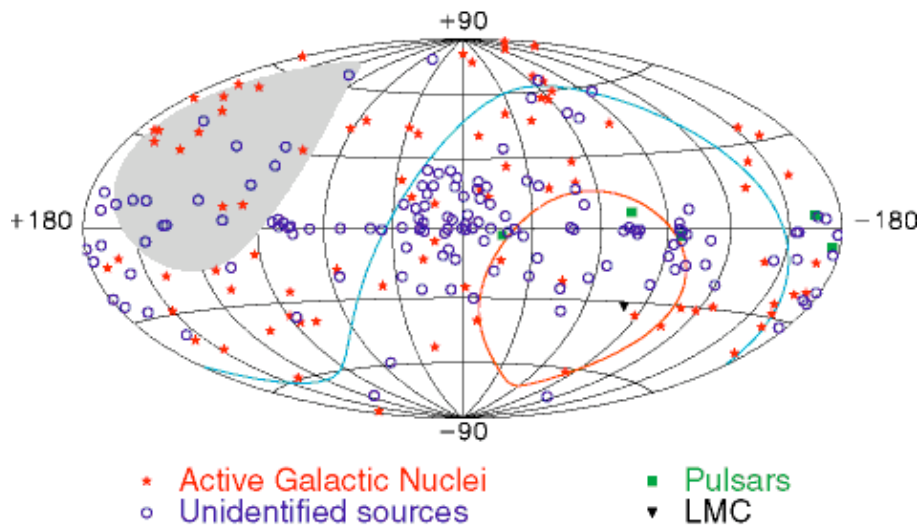


Figura 2.2: Il “Terzo Catalogo di Egret”: la mappa mostra tutte le sorgenti di  $\gamma$  identificate dall'esperimento EGRET, installato a bordo del Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO): si noti che sono 170 (su un totale di 271) le sorgenti che non sono ancora state identificate. Sovrapposta alla mappa, nella zona di colore grigio, è rappresentata la porzione di cielo che non è visibile per un “Telescopio Čerenkov per neutrini” posto nell'emisfero settentrionale. [31]

## 2.1 L'effetto Čerenkov

Quando una particella carica attraversa un materiale con costante dielettrica  $\epsilon$  e indice di rifrazione  $n$ , produce un campo elettromagnetico che si propaga con velocità  $\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ .

Il campo così prodotto polarizza gli atomi del materiale: la polarizzazione segue il moto della particella senza particolare scambio di energia, se la velocità della particella è  $v = \beta c \ll c/n$ ; se invece  $\beta c > c/n$  il materiale si polarizza lungo la direzione della particella ed emette radiazione coerente sulla superficie di un cono, il cui asse coincide con la direzione della particella.

Il fronte d'onda si propaga lungo una direzione che forma con la traccia della particella un angolo  $\theta_c$ , tale che:

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (2.2)$$

L'energia emessa per unità di percorso e di frequenza da una particella con velocità  $\beta c$  e carica elettrica  $ze$  è data da [2]:

$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} = \frac{z^2 e^2 \omega}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) = z^2 \frac{\alpha \hbar \omega}{c} \text{sen}^2 \theta_c \quad (2.3)$$

e il numero di fotoni emessi con energia  $\hbar\omega$  è

$$\frac{d^2 N}{dx d\omega} = \frac{z^2 \alpha}{c} \text{sen}^2 \theta_c \quad (2.4)$$

Il numero di fotoni emessi nell'unità di tempo si ottiene integrando nell'intervallo di frequenze  $\Delta\omega$  in cui  $n > 0$ , ed è soddisfatta la condizione  $\frac{1}{\beta(\omega)} \leq n(\omega)$ .

$$\frac{dN}{dx} = \frac{z^2 \alpha}{c} \int \text{sen}^2 \theta_c d\omega \quad (2.5)$$

Nel visibile ( $\lambda \sim 300 \div 700$  nm), il numero medio di fotoni emessi è

$$\frac{dN}{dx} \sim 300 \cdot \text{cm}^{-1} \quad (2.6)$$

Lo spettro della radiazione emessa è del tipo

$$\frac{dN}{dx} \propto \lambda^{-2} \quad (2.7)$$

e copre anche la zona del visibile, che coincide con l'intervallo di lunghezze d'onda che rende massima l'efficienza quantica di un fotomoltiplicatore (PMT), ovvero il rapporto tra il numero di fotoni incidenti sul fotocatodo e il numero di elettroni che vengono raccolti sul primo dinodo: in particolare l'efficienza quantica massima si ha nel blu ( $\lambda \sim 440$  nm).

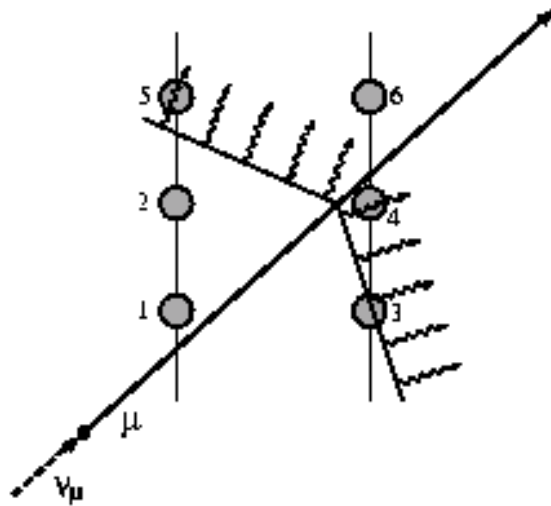


Figura 2.3: Le informazioni ottenute da almeno cinque fotomoltiplicatori permettono di ricostruire la traccia del muone incidente [5].

Per individuare la traccia della particella carica che ha prodotto radiazione Čerenkov in questo intervallo di lunghezze d'onda, si usano quindi le informazioni ottenute dal segnale raccolto dai PMT che compongono i rivelatori Čerenkov sottomarini, secondo quanto inizialmente proposto da Markov nel 1960 [17].

La ricostruzione delle tracce viene fatta combinando l'informazione spaziale (la posizione del PMT che ha rivelato il segnale ottico) e quella del tempo di arrivo del fotone sul PMT: nota la velocità della luce e combinando le informazioni di almeno cinque PMT, si può ricostruire la traccia dei muoni.

L'interazione di corrente carica di  $\nu$  astrofisici con la Terra produce nello stato finale un leptone carico che, se sufficientemente energetico, può produrre luce Čerenkov, visibile se attraversa un materiale trasparente.

La soglia di energia al di sopra della quale si ha emissione di fotoni Čerenkov è data da:

$$E_c > m \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

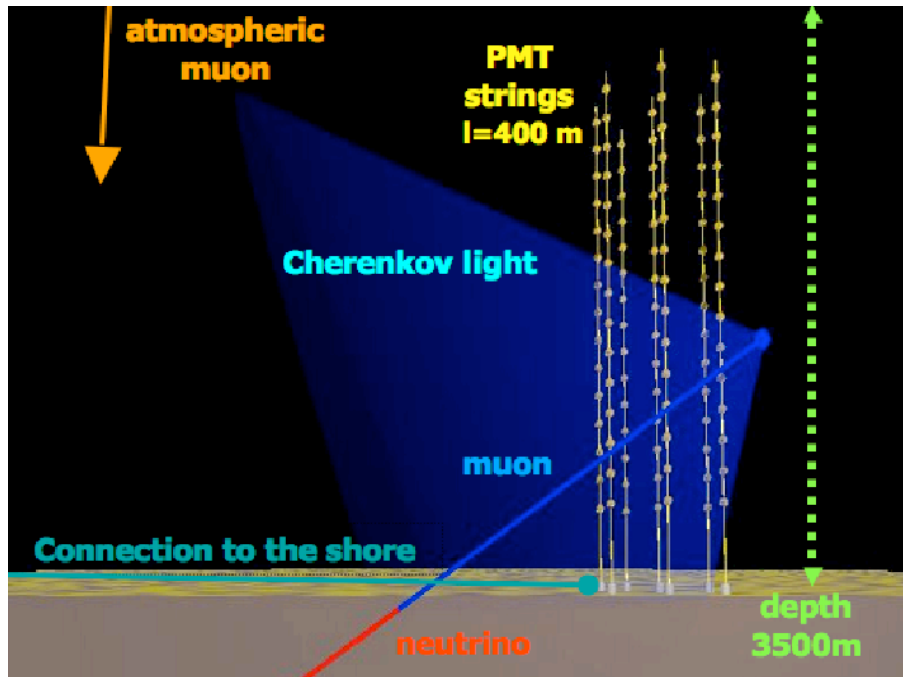


Figura 2.4: Rappresentazione dei processi che portano alla produzione di luce Čerenkov in seguito al passaggio in acqua di un neutrino [31].

dove  $m$  rappresenta la massa a riposo della particella.

In particolare, se si considera l'acqua come mezzo in cui avviene l'interazione, si hanno i seguenti limiti per l'energia:

- $E^{e^-} \geq 264 \text{ KeV}$
- $E^{\mu^-} \geq 52 \text{ MeV}$

Nell'emissione di luce Čerenkov, una particella carica perde energia secondo la legge

$$\frac{dE}{dx} \sim z^2 \text{sen}^2 \theta_C [\text{KeV cm}^{-1}] \quad (2.9)$$

Per un muone, che è la particella meglio rivelabile in un telescopio sottomarino, la perdita di energia espressa dalla 2.9 è molto inferiore rispetto all'energia persa per ionizzazione ( $\frac{dE}{dx} \sim 2 \text{ MeV/cm}$ ), per energie  $< 100 \text{ GeV}$ . Ad energie superiori il maggior contributo alla perdita di energia dei muoni è dovuto a fenomeni di irraggiamento (Bremsstrahlung).

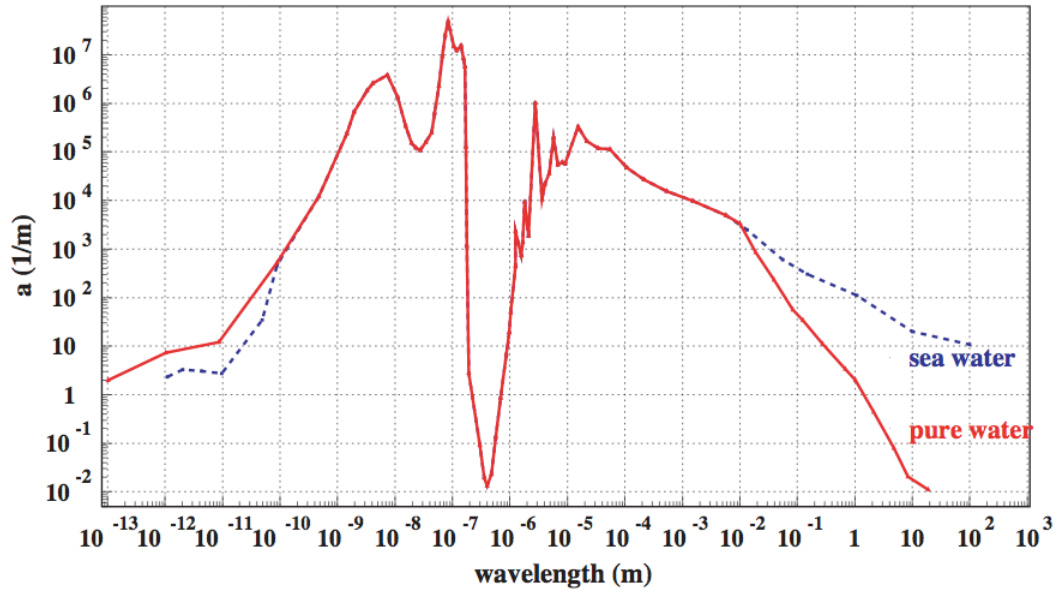


Figura 2.5: Coefficiente di assorbimento di un'onda elettromagnetica in acqua pura e in acqua di mare, in funzione della lunghezza d'onda [11].

Per rivelare neutrini astrofisici di energie comprese tra  $10^{11} \div 10^{16}$  eV la rivelazione della luce Čerenkov tramite un reticolo di PMT è una tecnica ideale: le lunghezze d'onda che minimizzano il coefficiente di assorbimento della luce in acqua (figura 2.5) coincidono con quelle che rendono massima l'efficienza quantica di un PMT.

## 2.2 Proprietà ottiche dell'acqua a grandi profondità

Uno studio delle modalità di propagazione della luce in acqua è fondamentale per stabilire l'architettura dell'apparato: in particolare, la lunghezza di assorbimento della luce pone un limite superiore alla distanza tra due PMT, da cui ci si aspetti la misura in coincidenza temporale dei fotoni Čerenkov prodotti nello stesso frammento di traccia del muone. La velocità della luce nel mezzo è inoltre determinata dall'indice di rifrazione.

L'assorbimento della luce diminuisce l'efficienza dell'apparato, mentre la diffusione dei fotoni

sulle molecole d'acqua o sul particolato in sospensione può peggiorare drasticamente la capacità dell'apparato di ricostruire le tracce.

L'indeterminazione sulla ricostruzione della traccia dipende inoltre dalla risoluzione temporale dei PMT e dell'elettronica e dall'indeterminazione sulla conoscenza della posizione relativa dei PMT in acqua, oltre che dal fondo dovuto a cause ambientali.

La trasparenza dell'acqua può essere parametrizzata in termini di due grandezze [24], che dipendono dalla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica incidente: la lunghezza di assorbimento  $L_a(\lambda)$ , la lunghezza di diffusione  $L_b(\lambda)$ .

Queste rappresentano il percorso dopo il quale un fascio di fotoni di lunghezza d'onda  $\lambda$  e intensità  $I_0$  risulta attenuato di un fattore  $1/e$ , a causa di fenomeni di assorbimento o di diffusione rispettivamente.

I due coefficienti  $a = \frac{1}{L_a(\lambda)}$  e  $b = \frac{1}{L_b(\lambda)}$  vengono spesso utilizzati per caratterizzare la trasmissione della luce in acqua, anche tramite il "coefficiente di attenuazione"  $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ . I processi di scattering in cui il fotone, prodotto per effetto Čerenkov, è coinvolto sono essenzialmente di tipo elastico [11]: nell'interazione con il particolato in sospensione o con le molecole d'acqua, la radiazione cambia solo la sua direzione, non la sua energia. Scattering di tipo anelastico, in cui il fotone esce dall'interazione con una diversa lunghezza d'onda (scattering Raman), sono poco frequenti.

La variazione dell'intensità luminosa lungo una direzione fissata può essere descritta da:

$$I_{a,b,c} = I_0 e^{\frac{-x}{L_{a,b,c}}} \quad (2.10)$$

dove  $x$  rappresenta il cammino della radiazione e i pedici a, b, c si riferiscono rispettivamente ai fenomeni di assorbimento, scattering e attenuazione.

È dunque molto importante conoscere la dipendenza dei parametri finora descritti dalla lunghezza d'onda, in modo tale da poter progettare in modo funzionale l'apparato.

Le proprietà ottiche dell'acqua di mare dipendono dalla sua salinità, dalla sua temperatura e dalla concentrazione di materia organica e inorganica che vi è disciolta.

La collaborazione NEMO ha svolto negli anni passati, a partire dal luglio 1998, diverse cam-

pagne in mare [21] per studiare le proprietà ottiche di diversi siti abissali nel Mediterraneo in modo tale da scegliere per l'apparato quello con le migliori condizioni di trasmissione del segnale luminoso.

Verranno ora brevemente discusse le caratteristiche principali che un sito abissale, adatto ad ospitare un telescopio sottomarino per neutrini, deve soddisfare. In particolare:

- **Deve essere in profondità:** il numero di muoni atmosferici che raggiungono l'apparato decresce rapidamente in funzione dello spessore di materiale attraversato (figura 1, Introduzione).
- **Deve essere vicino alla costa:** in questo modo la trasmissione dei dati e dell'alimentazione può essere fatta tramite dei cavi elettro-ottici commerciali, senza dunque doverne progettare dei nuovi.
- **Non deve essere situato in una zona caratterizzata da turbolenze.**
- **Il fondale deve essere piatto:** un'ampia zona pianeggiante permette di facilitare l'ancoraggio delle varie strutture e quindi di poter costruire un apparato molto esteso.
- **La trasparenza dell'acqua deve essere buona.**
- **La "luminosità"** dovuta a processi di natura ambientale (bioluminescenza, fotoni Čerenkov prodotti nel decadimento di nuclei radioattivi) deve essere bassa.

I siti studiati nelle campagne in mare sono stati in partenza selezionati per la loro vicinanza alla costa, per la struttura del fondale e per la profondità: le misure sono quindi state dedicate alla caratterizzazione delle loro proprietà ottiche. Alla fine delle campagne, il sito prescelto è quello di Capo Passero (KM4), che si trova nel Mar Ionio a SE della Sicilia, ad una profondità di  $\simeq 3350$  metri (figura 2.6).

Questo sito mostra delle ottime proprietà ottiche, paragonabili in alcuni casi a quelle dell'acqua marina pura, si trova in una zona in cui il fondale è ampio e piatto ed inoltre vicino a tre porti

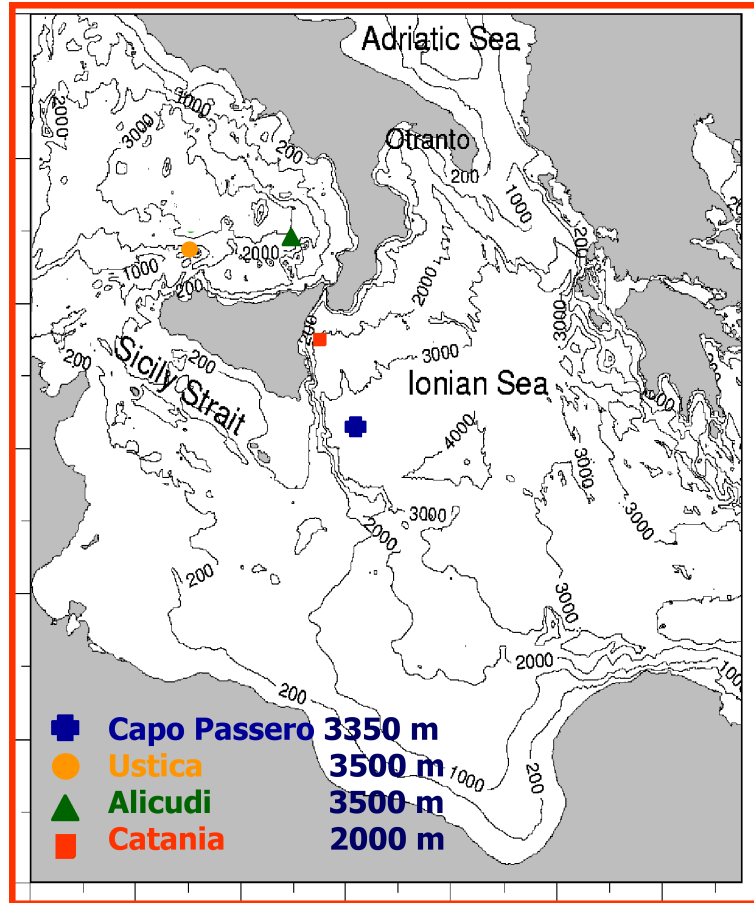


Figura 2.6: Siti sottomarini esaminati dalla Collaborazione NEMO. Il sito abissale di Capo Passero, nel Mar Ionio, a SE della Sicilia, ad una distanza di circa 40 miglia nautiche dalla costa e ad una profondità di 3350 metri è stato scelto per il posizionamento del futuro “Telescopio per Neutrini” da  $1 \text{ km}^3$  [21].

attrezzati. In figura 2.7 vengono mostrati gli andamenti di temperatura, salinità e dei coefficienti di assorbimento e attenuazione  $a(\lambda) = 1/L_a(\lambda)$  e  $c(\lambda) = 1/L_c(\lambda)$ , in funzione della profondità,

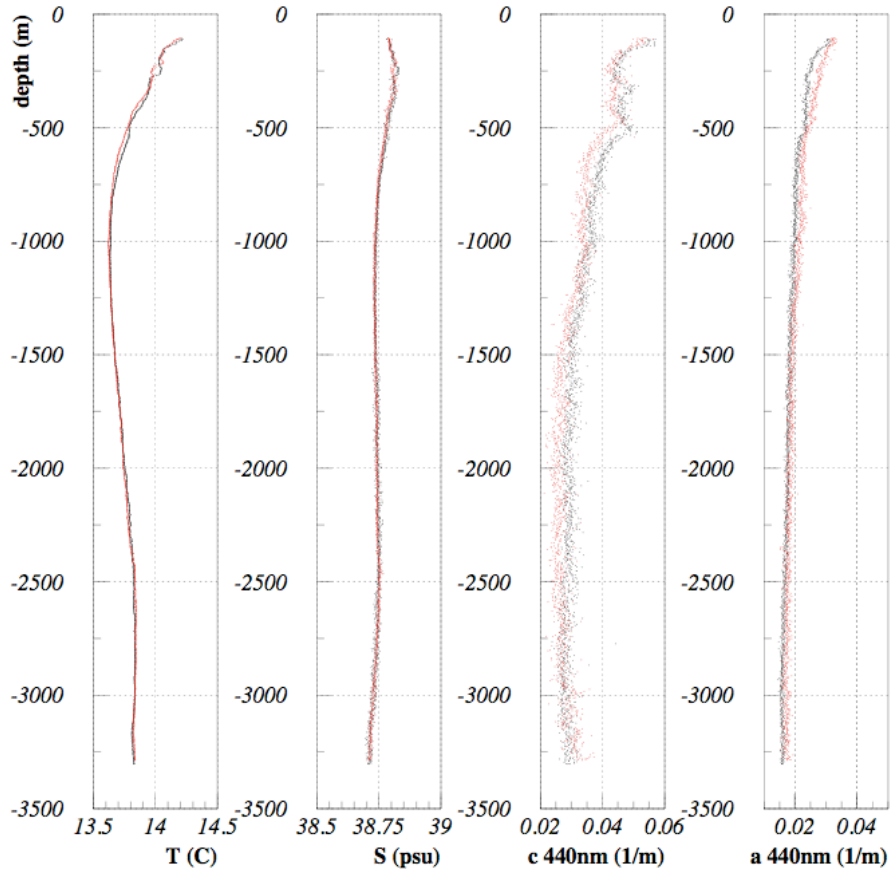


Figura 2.7: Profili di temperatura ( $T$ ), salinità ( $S$ ), coefficiente di attenuazione  $c(440)$  e coefficiente di assorbimento  $a(440)$  misurati nel sito KM4, in funzione della profondità [21].

misurati nel sito di Capo Passero. Gli andamenti sono sempre piuttosto regolari e in particolare sembrano essere molto regolari alle profondità interessanti per il posizionamento del telescopio per neutrini (2700 ÷ 3350m).

Nella figura 2.8 è rappresentato l'andamento della lunghezza di assorbimento della luce in acqua, in funzione della lunghezza d'onda, misurata in diversi siti e confrontata con l'andamento che si ha per l'acqua marina pura (priva di sedimenti). Si vede dunque che, a differenza degli altri siti studiati, quello di Capo Passero mostra, per tutte le lunghezze d'onda interessanti per

l'esperimento ( $320\text{nm} \leq \lambda \leq 580\text{nm}$ ), valori di  $L_a(\lambda)$  che sono confrontabili con quelli relativi all'acqua marina pura.

Si nota in particolare che, per  $\lambda = 440\text{nm}$ , dove l'efficienza quantica di un PMT è massima, la

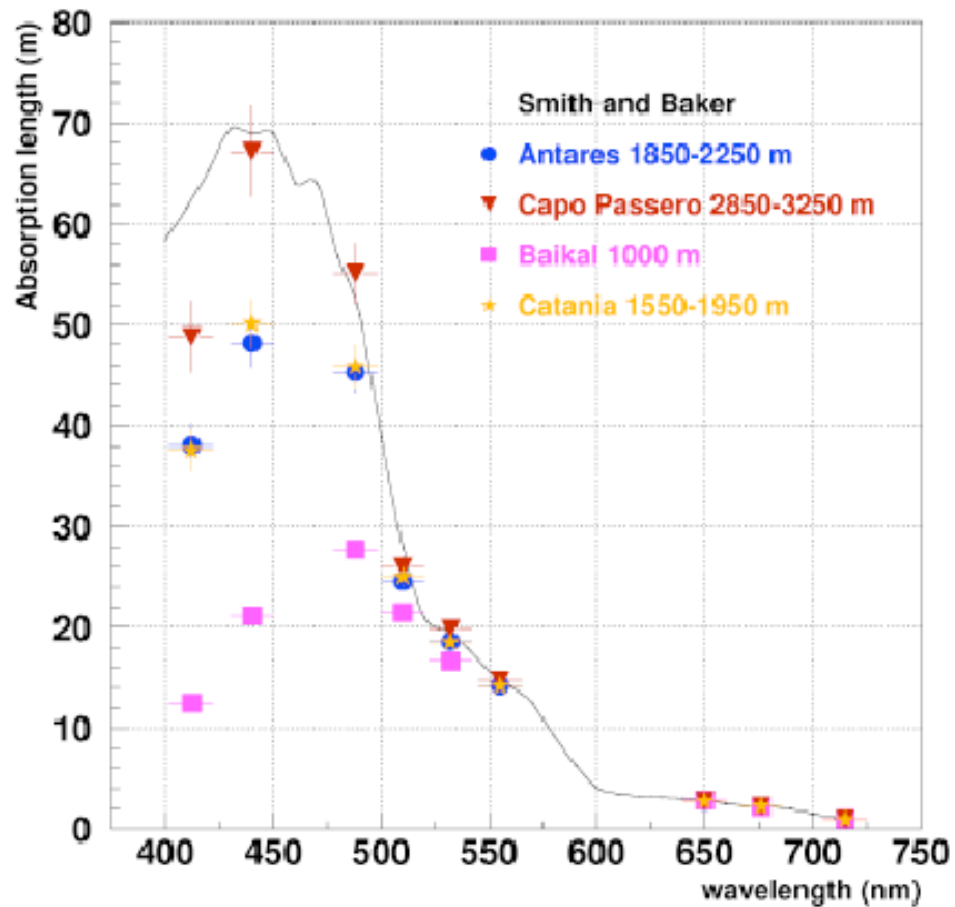


Figura 2.8: Lunghezza di assorbimento in funzione della lunghezza d'onda per diversi siti abissali, confrontata con i valori dell'acqua marina pura (linea continua) [21].

lunghezza di assorbimento è confrontabile con quella dell'acqua marina pura nel sito di Capo Passero ( $L_a(440) \simeq 68\text{ m}$ ), è di circa 50 m nel “test-site” di Catania, è inferiore a 50m nel sito scelto dalla collaborazione ANTARES (che si trova a circa 2200 metri di profondità) ed è di circa 20 m nelle acque salmastre del lago Baikal (situato a circa 1000 metri di profondità).

In figura 2.9 è rappresentato invece l'andamento della lunghezza di attenuazione  $L_c(\lambda)$  per di-

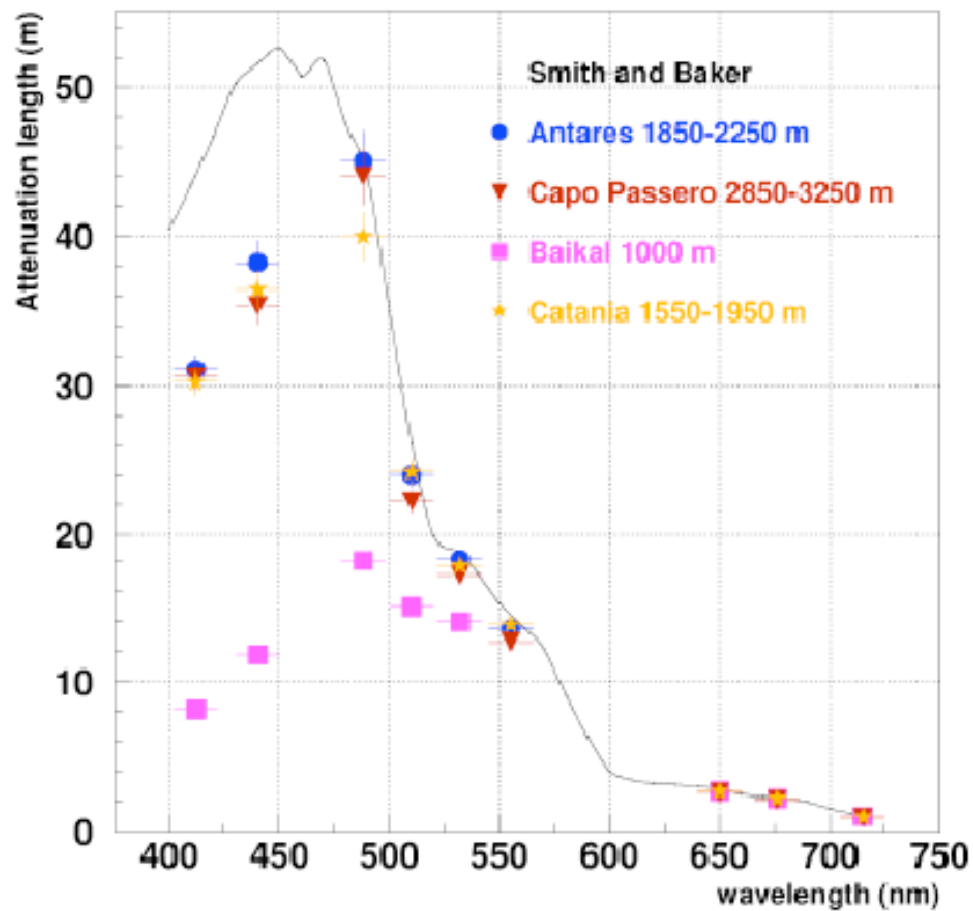


Figura 2.9: Lunghezza di attenuazione in funzione della lunghezza d'onda per diversi siti abissali, confrontata con i valori dell'acqua marina pura (linea continua) [21].

versi siti e si vede che questa non presenta invece grosse differenze nei vari casi, discostandosi molto dall'andamento dell'acqua marina pura soprattutto a piccole  $\lambda$ , vicino al blu: questo è dovuto al fatto che la luce ha, in questo intervallo, il minimo dell'assorbimento in acqua e quindi riesce a trasmettersi meglio, incontrando però del particolato in sospensione (assente nell'acqua pura) che agisce da centro diffusore, deviandola.

Scelto il sito, sono state fatte delle ulteriori campagne su tempi più lunghi, per stabilire l'esistenza di eventuali effetti stagionali nelle sue proprietà ottiche. In figura 2.10 sono riportati i

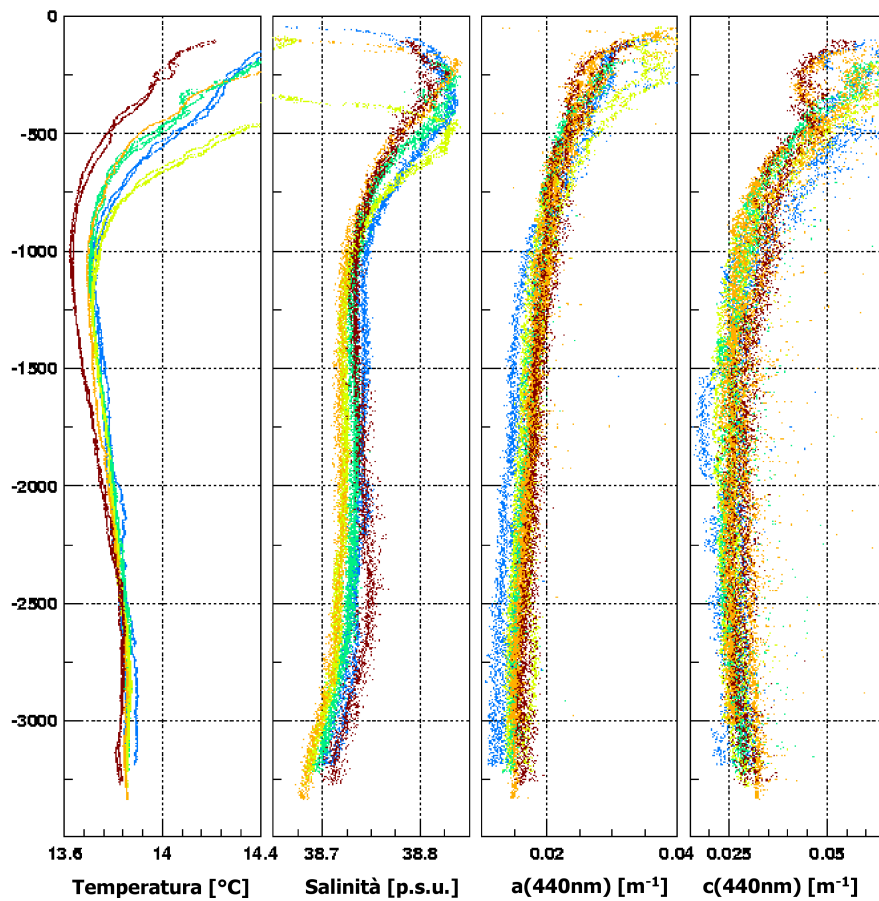


Figura 2.10: Profili di temperatura ( $T$ ), salinità ( $S$ ), coefficiente di attenuazione  $c(440)$  e coefficiente di assorbimento  $a(440)$  misurati nel sito KM4, in funzione della profondità. I profili si riferiscono a diverse campagne in mare: Marzo 2002 (giallo), Maggio 2002 (blu), Agosto 2002 (rosso) e Dicembre 1999 (celeste) [21].

risultati di tali campagne: gli andamenti di temperatura, salinità e dei coefficienti di attenuazione e assorbimento mostrano che in acque poco profonde, fino a circa 800 metri, la salinità e la temperatura sono piuttosto instabili e questo fatto si potrebbe ripercuotere sulle proprietà ottiche. Andando più in profondità, questa variazione stagionale è sempre meno evidente e in particolare alle profondità di interesse per l'esperimento questi effetti non sono più evidenti: questo permette di stabilire che le proprietà ottiche del sito non variano su lunghi periodi.

## 2.3 L'apparato sperimentale

I rivelatori sottomarini per neutrini attualmente operanti o in fase di realizzazione, come BAIKAL [34], NESTOR [32], ANTARES [31], possono raggiungere aree efficaci dell'ordine di  $4 \div 5 \cdot 10^4 m^2$ .

Questi apparati sono importanti per la loro funzione *pioneristica* di sviluppo di tecniche funzionali alla rivelazione di neutrini astrofisici, in condizioni ambientali estreme, come sono i siti abissali.

La collaborazione NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) svolge dal 1998, parallelamente al lavoro delle collaborazioni già operanti, un'attività di ricerca e sviluppo mirata alla realizzazione di un telescopio sottomarino nel Mar Mediterraneo, che avrà un volume maggiore di  $1km^3$ .

In questo modo, data la latitudine a cui verrà installato l'apparato, le informazioni raccolte potranno essere considerate complementari a quelle ottenute dal telescopio ICECUBE [33], che si troverà nell'emisfero meridionale.

La realizzazione di un simile apparato richiede uno studio dettagliato per la definizione di alcuni aspetti importanti:

- **la struttura del rivelatore**, in modo tale da ottimizzare le sue prestazioni in termini di area efficace e risoluzione angolare, anche in relazione ai costi.
- **un progetto funzionale dell'elettronica**, che permetta di ridurre i consumi e allo stesso tempo di trasferire in modo sicuro un'enorme quantità di dati per decine di chilometri in acqua.
- **una struttura meccanica** che garantisca la resistenza e la stabilità per le componenti dell'apparato e ne faciliti il corretto posizionamento sul fondale.

- **un sistema di identificazione della posizione dei moduli ottici** con un'ottima risoluzione spaziale, fondamentale per la ricostruzione delle tracce dei muoni.
- **la scelta e la caratterizzazione del sito.**

Possiamo schematicamente descrivere la struttura dell'apparato dividendola in tre parti:

1. **Il rivelatore** vero e proprio, costituito da un reticolo di fotomoltiplicatori distribuito su un volume maggiore di  $1km^3$ , disposti su delle strutture semirigide che servono a stabilizzare il sistema e a permetterne una facile installazione in acqua: le *torri*.
2. **La rete di cavi elettro-ottici** che permette il trasferimento dei dati e l'alimentazione delle strutture poste in mare.
3. **La stazione a riva** che supervisiona tutte le varie trasmissioni di dati e di alimentazione e in cui vengono accumulati i dati.

La disposizione e il numero dei PMT, come discusso nel paragrafo 2.2, sono fortemente influenzati dalle caratteristiche ambientali del sito e dal costo di realizzazione dell'apparato. A partire dai risultati ottenuti nelle campagne in mare sono state fatte delle simulazioni, con la tecnica "MonteCarlo", per trovare il migliore compromesso tra i costi e le prestazioni dell'apparato.

La struttura attualmente prevista per l'apparato è quella di un reticolo costituito da ottantuno "torri", ognuna delle quali è ancorata al fondale e tenuta in posizione verticale da una boa, immersa, che si trova all'estremità superiore a circa 1000 m dal fondo.

La configurazione si ispira alla struttura delle *stringhe*, già adottata dalle collaborazioni ANTARES e BAIKAL, più semplice dal punto di vista costruttivo, ma meno affidabile dal punto di vista della rigidità della struttura, cosa che influisce sulla determinazione della posizione dei PMT.

La struttura "a torre", rappresentata schematicamente in figura 2.11, vincola i movimenti di gruppi di PMT adiacenti, permettendo di ricostruirne la posizione relativa in base ad un numero limitato di parametri.

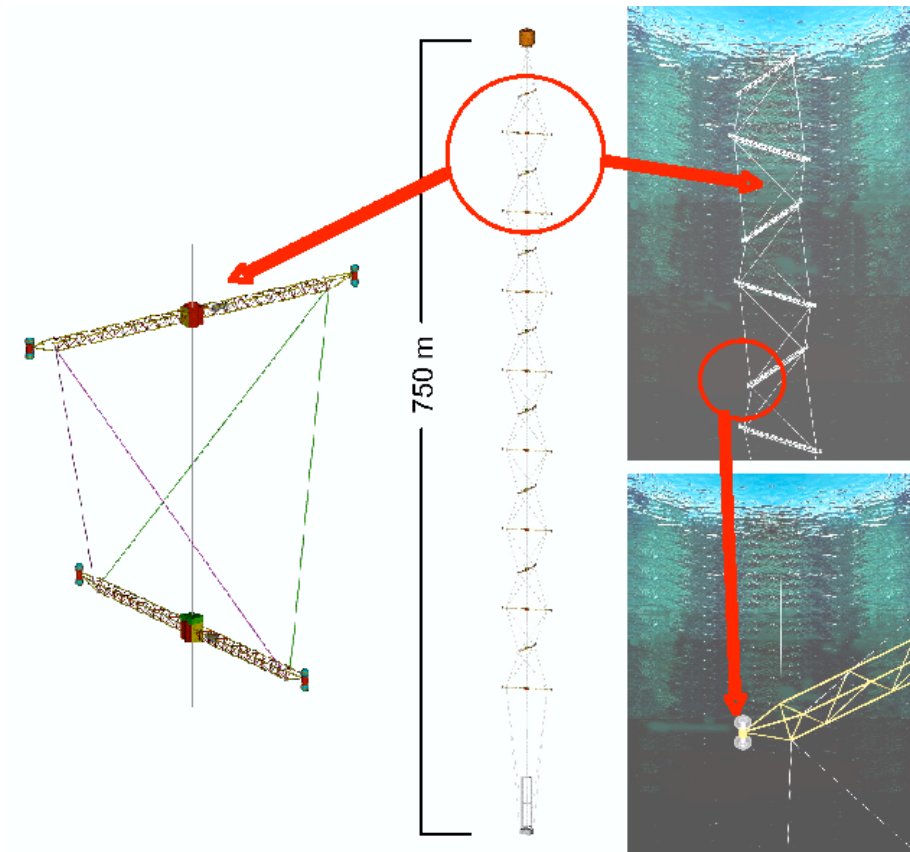


Figura 2.11: *Struttura schematica di una torre che costituisce l'apparato NEMO.*

La distanza tra due torri consecutive sarà circa 140 metri, pari a circa 2 lunghezze di assorbimento per la luce blu. Ogni torre sarà costituita da diciotto piani, lunghi 16 m e disposti a distanza di 40 m lungo la verticale ed orientati uno perpendicolarmente all'altro, per questioni di stabilità. Il primo piano sarà distante 150 metri dal fondale marino.

Le torri saranno inoltre dotate di un sistema acustico di misura della posizione dei moduli ottici, di un inclinometro e di bussole, che permettono di verificare eventuali spostamenti della struttura di supporto dei moduli ottici.

Il cuore, l'elemento sensibile dell'intero apparato sperimentale è costituito dai fotomoltiplicatori, che saranno installati all'interno di sfere di vetro (sfere BENTHOS), capaci di resistere a circa 600 atmosfere di pressione esterna, adeguate quindi alla profondità a cui dovranno lavorare. Le sfere sono importanti anche per isolarne il contenuto dall'esterno, per evitare inoltre che le connessioni e i cavi siano danneggiati da eventuali infiltrazioni d'acqua.

Ogni sfera BENTHOS ha un diametro esterno di 43 cm ed ha uno spessore di circa 14 mm. I fenomeni di riflessione sulla superficie di vetro riguardano solo lo 0,02% dei fotoni incidenti, essendo i due indici di rifrazione  $n_{acqua} = 1,35$  e  $n_{vetro} = 1,48$  simili.

L'insieme di un fotomoltiplicatore, dell'elettronica di alimentazione e dell'elettronica che serve ad interfacciare la singola sfera con il resto del sistema, costituisce un **modulo ottico** (OM).

Su ognuno dei diciotto piani che costituiscono una torre, sono alloggiati quattro moduli ottici e i quattro PMT al loro interno sono disposti a coppie, in modo che uno abbia il proprio asse rivolto verso il basso e l'altro verso l'orizzontale. In figura 2.12 è riportata la struttura interna di un modulo ottico (OM): una semisfera di diametro 17" (43 cm) ospita il PMT ed un gel che garantisce l'accoppiamento ottico e meccanico tra il fotocatodo e il vetro di cui è fatta la sfera stessa, l'altra ospita l'elettronica.

La parte interna della seconda semisfera è rivestita da una guaina nera: in questo modo un PMT può rivelare solo la luce proveniente da metà angolo solido, nella direzione in cui è rivolto il fotocatodo, in modo tale da mantenere l'informazione sulla direzione del fotone incidente.

Il gel di silicone, che ricopre completamente il fotocatodo, ha una lunghezza di assorbimento

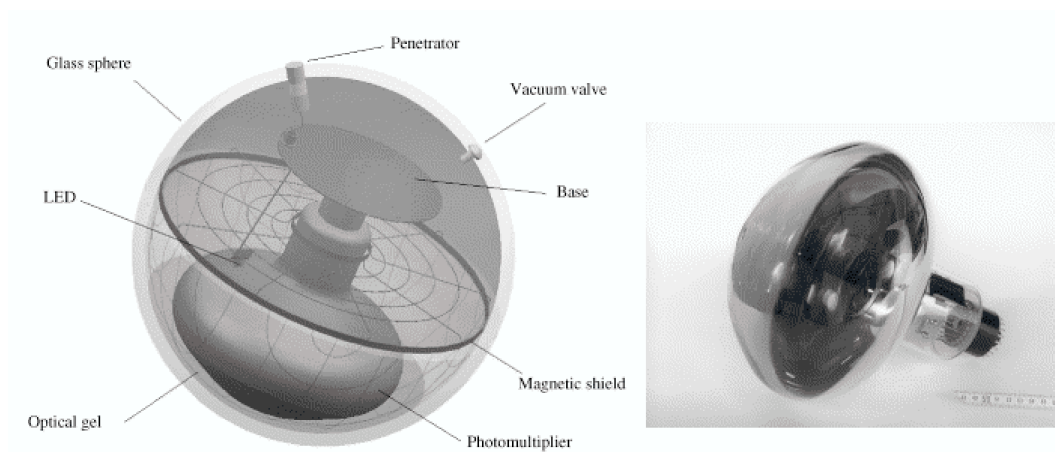


Figura 2.12: *Rappresentazione schematica di un modulo ottico [31].*

che, per la luce blu (440nm) vale  $\sim 60\text{cm}$ , il percorso medio di un fotone nel gel ottico è di  $\sim 3\text{mm}$ , quindi è possibile trascurarne gli effetti di attenuazione.

Negli anni passati sono state fatte diverse misure [25] per stabilire la miscela di gel da usare come guida di luce: in questo modo si è stabilito il miglior compromesso tra accoppiamento meccanico e ottico tra vetro e gel. Le misure sono servite anche a scegliere una miscela con un indice di rifrazione il più possibile vicino a quello del vetro, per minimizzare la riflessione nell'attraversamento delle superfici vetro-gel e con una lunghezza di assorbimento piuttosto grande.

Attorno ad ogni fotomoltiplicatore è posta una “gabbia” di metallo ad alta permeabilità magnetica, che serve a schermarlo dal campo magnetico terrestre, che riduce in maniera trascurabile la superficie sensibile del fotocatodo, la cui area ammonta a  $\sim 510\text{cm}^2$ .

La trasmissione dei dati viene fatta tramite cavi elettro-ottici, che trasferiscono a riva, su fibra ottica, tutte le informazioni ottenute dai singoli OM.

Ogni torre ha alla base un sistema elettronico racchiuso in una “Tower Box”, che raccoglie le fibre e i dati provenienti da ogni piano. Le fibre, con percorsi che variano a seconda della posizione della torre, raggiungono il “Main Electro - Optical Cable” che connette l'apparato

sottomarino alla stazione che si trova a riva.

Essendo la trasmissione dati fatta direttamente in mare è fondamentale che tali strutture siano progettate in modo tale da resistere alle alte pressioni dovute alla profondità e da evitare le infiltrazioni d'acqua. In alcuni esperimenti tali strutture vengono realizzate in titanio, che è però un materiale molto costoso; visto il numero di "Junction-Box" (JB) necessarie a trasferire dati per l'esperimento NEMO, si è trovata una soluzione alternativa e più economica.

Le JB sono infatti costituite da due strutture [16], inserite una dentro l'altra: un contenitore di acciaio resistente alle alte pressioni è posto all'interno di una struttura di fibra di vetro, resistente alla corrosione e riempita di olio minerale, per evitare infiltrazioni d'acqua tra un contenitore e l'altro e per resistere agli "stress" dovuti alla pressione.

Attualmente la collaborazione NEMO è giunta alla cosiddetta **Fase 1**: un periodo precedente alla completa realizzazione dell'apparato che ha lo scopo di mettere a punto, su scale più piccole rispetto a quelle previste per il  $km^3$ , le tecniche necessarie alla sua realizzazione.

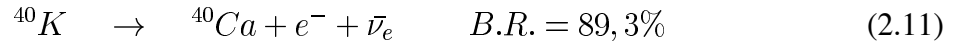
Primo passo nella realizzazione dell'apparato sarà dunque la messa in acqua di una "mini-torre" costituita da quattro piani, per verificare essenzialmente la resistenza dei dispositivi progettati alle forti sollecitazioni.

## 2.4 Limiti sperimentali di origine ambientale

Abbiamo visto che la scelta del sito deve tenere conto anche della sua profondità, in quanto l'apparato deve essere schermato il più possibile dagli eventi indotti dai muoni atmosferici, che possono indurre sui PMT dei segnali identici a quelli causati dal passaggio di neutrini di alta energia.

Segnali simili a quelli "veri" sono indotti sui PMT anche da due fenomeni naturali: radiazione Čerenkov dovuta a particelle originate nel decadimento degli elementi radioattivi che sono disciolti nell'acqua di mare e la luminescenza prodotta da organismi biologici (che viene detta "bioluminescenza").

Il maggior contributo alla radioattività dell'acqua di mare è dovuto ad un isotopo radioattivo del potassio, il  $^{40}K$ , che ha due principali canali di decadimento [19]:



Gli elettroni prodotti nella prima reazione hanno nella maggior parte dei casi energia sufficiente a produrre luce Čerenkov, mentre il  $\gamma$  viene prodotto con un'energia  $E_\gamma \sim 1.46$  MeV ed interagendo può produrre e emettere facilmente elettroni con energia sopra alla soglia Čerenkov.

Abbiamo visto nel paragrafo 2.2 che la salinità dell'acqua nel sito di Capo Passero non mostra evidenti variazioni stagionali e questo implica una regolarità anche nel verificarsi di tali eventi di "rumore ottico". La salinità nel sito di Capo Passero è circa 39 g/l, nota l'abbondanza relativa del  $^{40}K$  nell'acqua e la sua vita media, è possibile calcolare il numero di decadimenti per unità di volume d'acqua:

$$N = \frac{\ln 2}{\tau} S \epsilon \eta \frac{N_A}{A} = 13600 m^{-3} s^{-1} \quad (2.13)$$

dove  $\tau = 1,277 \cdot 10^9$  anni è la vita media del  $^{40}K$ ,  $A$  è la massa atomica dell'elemento,  $N_A$  è il numero di Avogadro,  $\epsilon$  rappresenta il contributo del  $^{40}K$  alla salinità totale,  $\eta = 1,17 \cdot 10^{-4}$  rappresenta la sua abbondanza relativa.

Il fondo luminoso dovuto al decadimento del  $^{40}K$  è d'altra parte facilmente riconoscibile, in quanto gli eventi sono prodotti da elettroni o fotoni comunque poco energetici, che si allontanano solo pochi centimetri dal punto in cui il  $^{40}K$  è decaduto, producendo 1000-2000 fotoni nell'intervallo di lunghezze d'onda in cui i PMT sono sensibili. Difficilmente i fotoni prodotti nel decadimento di un singolo  $^{40}K$  possono raggiungere due PMT differenti. Essendo i decadimenti di due atomi di  $^{40}K$  dovuti a fenomeni casuali, non sono correlati tra loro. Tali fatti permettono, scegliendo opportunamente le condizioni di *trigger*, di rigettare in fase di analisi quei segnali luminosi da  $^{40}K$  che non danno luogo a correlazioni spazio-temporali nei PMT compatibili con l'essere generati da una particella che si propaghi alla velocità della luce.

La bioluminescenza è invece prodotta da batteri che emettono radiazione luminosa di lunghezze

d'onda per le quali la trasparenza dell'acqua è massima (figura 2.5).

Anche in questo caso il fenomeno dipende molto dalla salinità dell'acqua di mare, ma a differenza degli eventi dovuti al decadimento del  $^{40}K$ , questi sono correlati tra loro, anche se su tempi "lungi", dell'ordine di millisecondi o addirittura secondi, e non sono distribuiti uniformemente nel tempo. La presenza di questi batteri, e dunque la frequenza dei segnali da loro emessi, dipende fortemente dalla profondità: la figura 2.13, risultato di alcune campagne in mare condotte nel 2004, mostra che nel sito di Capo Passero, per profondità superiori a  $\sim 2500m$ ,

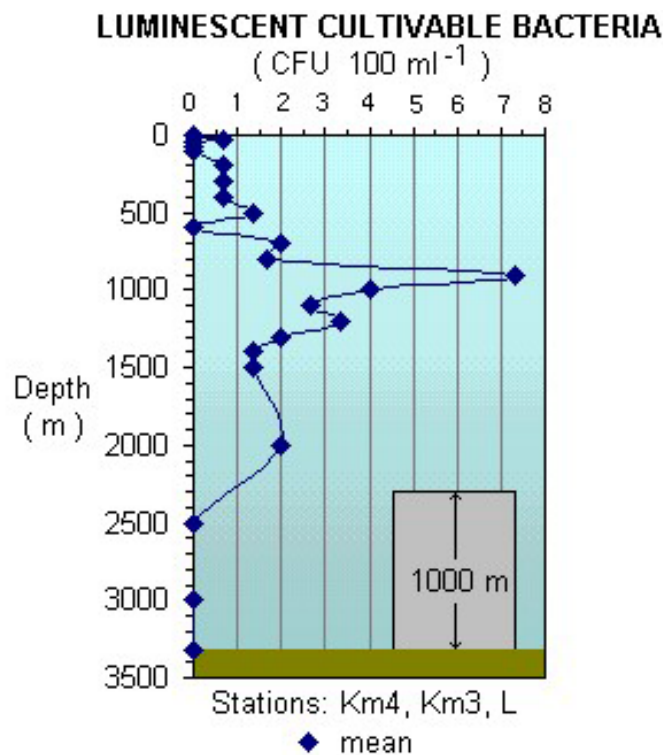


Figura 2.13: *Quantità di batteri luminescenti nel sito di Capo Passero (espressi Colony Forming Units per ml<sup>-1</sup>), in funzione della profondità [15].*

la quantità di batteri in grado di produrre bioluminescenza è trascurabile.

Gli eventi dovuti al decadimento del  $^{40}K$  costituiscono un fondo pressoché costante nel tempo, mentre i segnali emessi dai batteri bioluminescenti sono molto localizzati nel tempo ed hanno una frequenza molto maggiore rispetto agli altri eventi.

In figura 2.14 sono rappresentati i risultati di una campagna di misure in mare del 2004 durante la quale il rumore ottico è stato misurato usando due PMT. A sinistra sono riportati gli andamenti delle frequenze istantanee dei segnali registrate dai due PMT, in funzione del tempo. Si distingue il contributo quasi costante dovuto al decadimento del  $^{40}K$ , che rappresenta

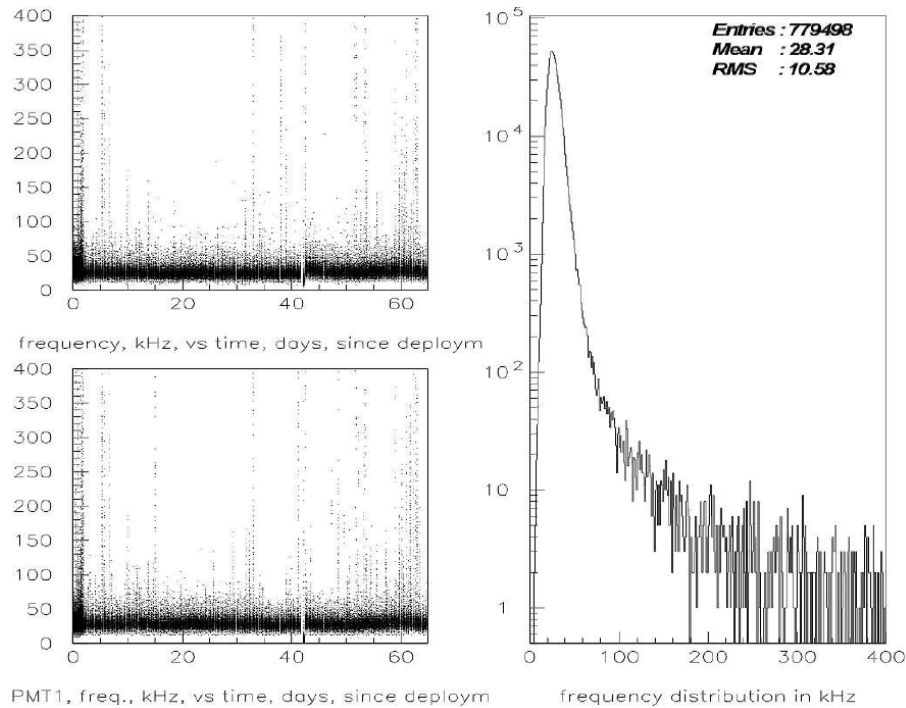


Figura 2.14: A sinistra: andamento temporale della frequenza del rumore ottico, misurato nel sito abissale di Capo Passero con due PMT durante una campagna di misure nel 2004 (con una soglia di 0.3 p.e.); a destra: dalla distribuzione dei valori della frequenza, si vede che il tasso medio di eventi di questo tipo è di circa 28KHz [15].

la maggior parte degli eventi, a cui si aggiungono di tanto in tanto i segnali prodotti dai batteri bioluminescenti: questo tipo di eventi sono riconoscibili per la loro breve durata e per l'alta frequenza dei segnali registrati sui PMT.

I due contributi al “rumore ottico” fanno sì che la distribuzione delle frequenze abbia la forma che si vede a destra nella figura: la maggior parte del tempo la frequenza istantanea dei segnali è “bassa” ( $\sim 28KHz$ ), occasionalmente si possono avere periodi di tempo con alta frequenza di segnali prodotti da batteri bioluminescenti.

Questo risultato è importante, se confrontato con quello ottenuto dalla collaborazione ANTARES nel 2002, con lo stesso apparato, e relativo al sito di Tolone. La frequenza media degli eventi registrata in condizioni “stabili”, cioè non in condizioni di eccitazione di batteri bioluminescenti, è pari a

$$f_{opticalnoise}^{ANTARES} \sim 58 \pm 3 \text{ KHz} \quad (2.14)$$

Questo risultato conferma che il sito di Capo Passero ha delle ottime proprietà ottiche, anche se confrontato con altri siti.

Sono state portate avanti numerose altre campagne con lo scopo di studiare il comportamento di altri parametri ambientali che possono influire negativamente sulle prestazioni dell'apparato, come le correnti sottomarine e la quantità di particolato in sospensione in acqua.

Le campagne hanno concluso che il sito non presenta disomogeneità nei valori delle correnti (non si hanno correnti maggiori di 12 cm/s), e inoltre il grado di sedimentazione è piuttosto basso.

Abbiamo visto che la parte fondamentale dell'apparato è costituita dai PMT, che sono contenuti all'interno di sfere di vetro resistenti alla pressione. Pur essendo ad elevate profondità, l'acqua è un ambiente ideale per lo sviluppo di organismi che tendono a depositarsi e a crescere sulle superfici che trovano “disponibili”. In questo modo può innescarsi un processo di sviluppo di tali organismi che può interessare anche le superfici dei moduli ottici: tali fenomeni possono portare al progressivo oscuramento delle superfici di vetro e dunque alla fine della loro utilizzazione nell'esperimento. Una prima campagna di misure, con lo scopo di stimare l'entità di questi processi è stata fatta nel Dicembre 1999 nel sito di Capo Passero.

L'apparato sperimentale utilizzato consisteva essenzialmente di una sfera Benthos su cui erano disposti alcuni fotodiodi (figura 2.15), che venivano illuminati da dei LED (Ligh Emitting Diode) blu.

Si studiava l'andamento temporale del rapporto tra il segnale raccolto dai vari fotodiodi disposti sulla superficie interna della sfera e quello raccolto dal fotodiodo che serve a monitorare la quantità di luce emessa, posto vicino alla sorgente luminosa. Ci si aspettava una lenta dimi-



Figura 2.15: *Sfera Benthos sulla cui superficie interna sono installati i fotodiodi.*

nuzione della trasparenza delle superfici di vetro. La raccolta dei dati sperimentali durò solo quaranta giorni (Gennaio - Febbraio 2002): come si vede in figura 2.16 non si notano effetti di oscuramento. I fenomeni di crescita del biofouling e di sedimentazione avvengono tipicamente in tempi “lunghi”, anni, per tale ragione la misura dell’oscuramento delle sfere BENTHOS è stata ripetuta.

Scopo di questa tesi è proprio l’analisi dei dati raccolti per lo studio dell’“oscuramento” delle superfici di vetro delle sfere BENTHOS esposte per circa due anni all’ambiente sottomarino, nel sito di Capo Passero.

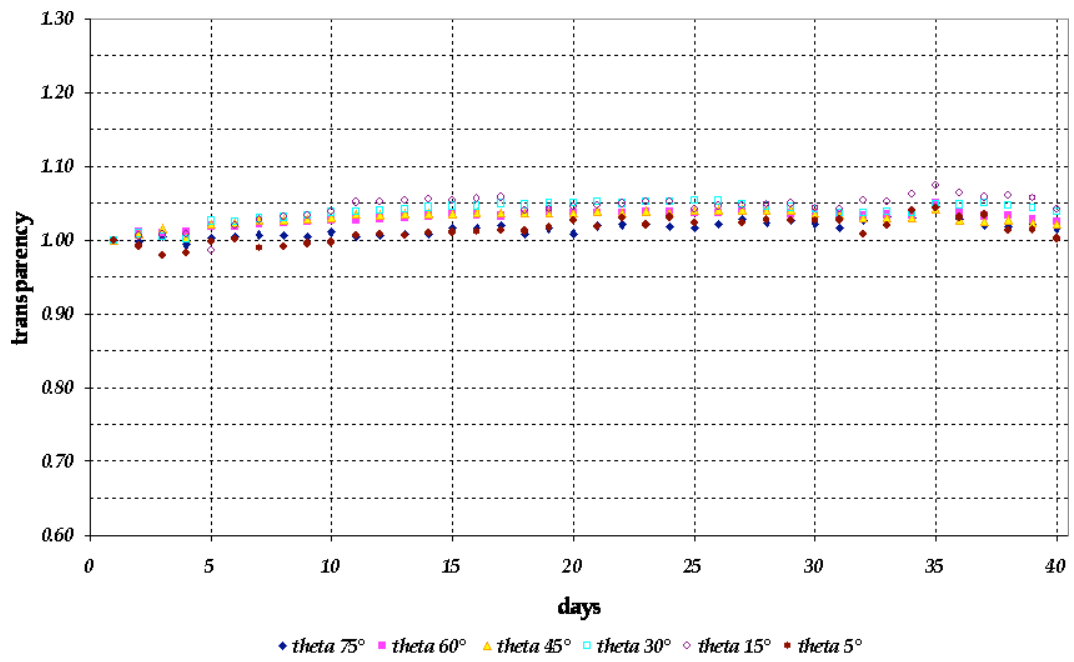


Figura 2.16: Andamento temporale della trasparenza.