

# Attività di R&D

Dal 1999 la Collaborazione NEMO ha iniziato un programma di ricerche mirato alla realizzazione di un apparato sottomarino per la rivelazione di neutrini. Il programma avviato dalla Collaborazione si è concentrato su alcuni aspetti di R&D che sono ritenuti essenziali per poter realizzare un rivelatore di scala  $\text{km}^3$ , ed in particolare:

1. la ricerca e la caratterizzazione di un sito prossimo alle coste italiane atto all'installazione del  $\text{km}^3$ ;
2. lo studio e la progettazione di elettronica di basso consumo per la trasmissione dei dati dei circa 10000 PMT necessari;
3. la progettazione della meccanica di supporto dei moduli ottici e delle possibilità di posizionamento e recupero della struttura.

## Ricerca e caratterizzazione del sito sottomarino

### **Scelta del sito abissale**

Il sito più idoneo per la localizzazione di un telescopio per neutrini deve soddisfare diversi requisiti:

4. *Il sito deve essere sufficientemente profondo* per schermare l'apparato di misura dal grande flusso di muoni atmosferici, di bassa energia e provenienti dall'alto, in modo da permettere la rivelazione del più debole flusso di muoni, diretti verso l'alto, originati da neutrini che, dopo aver attraversato quasi tutta la Terra, interagiscono nello strato di roccia al di sotto del rivelatore. I muoni atmosferici rappresentano quindi un *rumore* per la rivelazione del *segnale* di neutrini astrofisici. La capacità di reiezione di tale rumore è funzione dell'angolo dei muoni rispetto alla verticale, della loro energia e dipende in gran parte dalla validità dell'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel distinguere tracce dirette verso il basso da quelle che si propagano verso l'alto. A livello del mare il flusso dei muoni atmosferici diretti verso il basso è circa  $10^{11}$  volte più intenso del flusso di neutrini. Alla profondità di circa 3500 m il flusso di muoni si riduce di cinque ordini di grandezza. Se la probabilità di ricostruire erroneamente come *diretta verso l'alto* una traccia dovuta ad un muone atmosferico è minore di  $10^{-6}$  (tale condizione sperimentale è raggiungibile) saremo in grado di riconoscere eventi dovuti a neutrini astrofisici.
5. *Il sito deve essere vicino alla costa*. La trasmissione dei dati dal rivelatore al laboratorio a terra, così come la trasmissione dell'energia necessaria all'apparato sottomarino, necessitano l'impiego di un cavo elettro-ottico sottomarino. Tali cavi, generalmente usati per comunicazioni e per trasmissioni di dati, sono costosi e richiedono opportuni

accorgimenti durante il posizionamento. Ciò farebbe preferire senza dubbio i siti abissali più vicini alle coste. D'altronde un sito troppo vicino alla costa potrebbe essere sede di pericolosi fenomeni di instabilità quali *correnti di densità* e di *torbida*. La scelta finale potrà essere fatta tenendo conto del fatto che, con le moderne tecnologie, è possibile trasmettere dati su fibra ottica per circa un centinaio di chilometri senza l'ausilio di amplificatori di segnali e quindi senza l'ausilio di ulteriori costosi apparati sottomarini.

6. *Il sito deve avere ottime proprietà di propagazione per la luce Cherenkov.* L'area efficace del rivelatore infatti è determinata non solo dall'estensione geometrica del volume instrumentato, ma è funzione anche delle proprietà di trasmissione della luce nell'acqua. Un muone che attraversi l'acqua al di fuori del rivelatore a circa 50 m di distanza dal rivelatore può ancora essere osservato se i fotoni emessi per effetto Cherenkov hanno una probabilità non nulla di raggiungere i sensori ottici. Due effetti microscopici determinano le proprietà di propagazione della luce in acqua: l'assorbimento e la diffusione. L'assorbimento della luce determina l'area efficace del rivelatore mentre la diffusione limita la precisione con cui è possibile ricostruire la direzione di propagazione delle particelle (basata sulla misura dei tempi di arrivo della luce sui diversi sensori per fotoni).
7. *Nel sito il tasso di sedimentazione deve essere basso.* La presenza di sedimenti in acqua può influenzare, negativamente, le capacità di misura del rivelatore. I sedimenti (organici ed inorganici) aumentano la diffusione della luce peggiorando la ricostruzione angolare delle tracce. Il deposito di sedimenti sulla regione sensibile dei rivelatori per fotoni, fotomoltiplicatori di grande superficie, riduce inoltre l'efficienza globale di rivelazione.
8. *Il sito deve essere "calmo",* cioè le correnti d'acqua sottomarine devono essere di piccola intensità e devono essere poco variabili in direzione. Ciò è molto importante per diversi motivi:
  - a) non implica particolari richieste per la struttura meccanica di sostegno dell'apparato
  - b) rende più semplice il posizionamento in acqua del detector
  - c) il *rumore* ottico dovuto alla *bio-luminescenza* è limitato; tale fenomeno è infatti fortemente correlato a variazioni della corrente d'acqua.

La Collaborazione NEMO ha identificato quattro aree, vicine alle coste italiane, che soddisfano i requisiti "geografici" a) e b). Tali aree sono localizzate approssimativamente:

- a) 35° 50' N, 16° 10' E nel Mar Ionio, a Sud-Est di Capo Passero;
- b) 39° 05' N, 13° 20' E nel Mar Tirreno, a Nord-Est dell'isola di Ustica;
- c) 39° 05' N, 14° 20' E nel Mar Tirreno, a Nord dell'isola di Alicudi;
- d) 40° 40' N, 12° 45' E nel Mar Tirreno centrale, a Sud-Ovest dell'isola di Ponza.

Dal 1998 è iniziata una serie di campagne di studio nei siti selezionati, allo scopo di studiarne le proprietà oceanografiche ed ottiche dell'acqua.

### Proprietà ottiche dell'acqua marina nei siti abissali.

La propagazione della luce in acqua, funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$  della luce stessa, è caratterizzata da parametri fisici ben quantificabili: i coefficienti di assorbimento,  $a(\lambda)$ , e di diffusione,  $b(\lambda)$ , che compaiono nella legge di Lambert

$$I_{a,b}(\lambda) = I_0 e^{-(a,b)\lambda} \tag{IV.1}$$

che descrive, in funzione di  $\lambda$ , la riduzione dell'intensità della luce in funzione del suo percorso  $x$  nel mezzo. Si definiscono rispettivamente con  $L_a(\lambda) = 1/a(\lambda)$  ed  $L_b(\lambda) = 1/b(\lambda)$  la lunghezza di assorbimento e di diffusione. Tali lunghezze rappresentano il cammino dopo il quale un fascio di fotoni di intensità  $I_0$ , che si propaga nella direzione di emissione, è ridotto all'intensità  $I_0/e$  per via di fenomeni di assorbimento o di diffusione rispettivamente. Si definisce coefficiente di attenuazione  $c(\lambda)$  la somma dei coefficienti di assorbimento e di diffusione.

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \tag{IV.2}$$

L'assorbimento è un fenomeno in cui l'energia del fotone è interamente rilasciata al mezzo attraversato. La trasformazione dell'energia dei fotoni in energia termica è la maggiore causa dell'assorbimento della luce nell'oceano [DUN63]. In un processo di diffusione (o scattering) la direzione del fotone è modificata ma la sua lunghezza d'onda rimane inalterata. Più

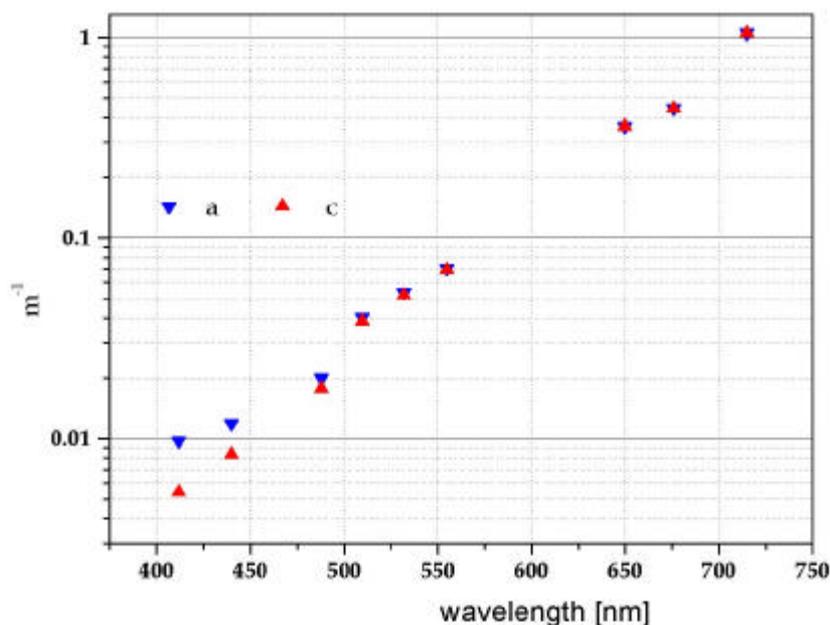


Fig. IV.1 - Proprietà ottiche dell'acqua pura: coefficienti di assorbimento (triangoli rossi rivolti verso l'alto) e di attenuazione (triangoli blu rivolti verso il basso) in  $m^{-1}$  in funzione di  $\lambda$  [SMI81].

raramente avvengono eventi di diffusione in cui anche la lunghezza d'onda del fotone viene

modificata (effetto Raman). Si possono avere fenomeni di diffusione su molecole (Rayleigh) o sul particolato disciolto (Mie).

In acqua otticamente pura (cioè priva di particolato disciolto), l'assorbimento e la diffusione della luce visibile sono fortemente dipendenti dalla lunghezza d'onda (fig. IV.1), e presentano un minimo a circa 420 nm (per tale motivo l'acqua marina ha un colore blu-verde). Questa "finestra" in lunghezza d'onda della luce corrisponde anche alla regione in cui i fotomoltiplicatori hanno normalmente il massimo di efficienza nella rivelazione della luce. Sfortunatamente in questa stessa regione di frequenze la diffusione Rayleigh è dominante.

In acqua marina la presenza di particolato disciolto, organico ed inorganico, aumenta i fenomeni di assorbimento e diffusione della luce. Il coefficiente di attenuazione totale della luce è quindi la somma del coefficiente di attenuazione dell'acqua pura ( $c_w$ ) e di quello relativo al particolato ( $c_p$ ):

$$c = c_w + c_p \quad (IV.3)$$

Nei siti profondi sottomarini l'assorbimento della luce non differisce in modo significativo da quello tipico dell'acqua pura, la presenza del particolato è invece rilevante per i processi di diffusione.

## Misura dei coefficienti di assorbimento e di attenuazione della luce

Per misurare i coefficienti di attenuazione e di assorbimento della luce direttamente nei siti abissali selezionati la Collaborazione NEMO ha utilizzato un apparato di misura basato su uno strumento, denominato AC9 (fig. 2) [WET00], prodotto dalla WETLabs, Oregon. Le piccole dimensioni dello strumento (68 cm di lunghezza  $\times$  10.2 cm di diametro) e la capacità di resistere fino a 6000 m di profondità fanno dell'AC9 uno strumento perfetto per effettuare misure *in situ*. L'AC9 permette di effettuare misure dei coefficienti di attenuazione e di assorbimento contemporaneamente ed indipendentemente, usando due diversi cammini ottici, per nove diverse lunghezze d'onda (412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676 e 715 nm). L'accuratezza dell'AC9 nella misura di  $a(\lambda)$  e  $c(\lambda)$  è dell'ordine di  $\sim 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ .

Nel canale dell'AC9 per la misura del coefficiente di attenuazione (fig. IV.4), la luce emessa da una lampada ad incandescenza è collimata, filtrata da 9 filtri interferenziali monocromatici, montati su una supporto ruotante, e divisa in due fasci luminosi da uno specchio. Uno dei due fasci è inviato direttamente, per avere una misura di riferimento della intensità  $I_0$  della sorgente luminosa, su un sensore per fotoni in silicio. Il secondo fascio, attraversata una finestra al

Fig. 2 – AC9

quarzo resistente alla pressione, passa attraverso un tubo lungo  $L = 25$  cm in cui è presente il mezzo di cui si vuole conoscere le proprietà di attenuazione della luce. La superficie interna del tubo è nera per poter assorbire tutti i fotoni diffusi dall'acqua. All'altra estremità del tubo è posto un rivelatore per fotoni al silicio, collimato lungo la direzione di propagazione della luce. La forte collimazione (l'accettanza angolare del rivelatore è pari a soli  $0.7^\circ$ ) permette di rivelare solo fotoni che non abbiano interagito attraversando i 25 cm d'acqua.

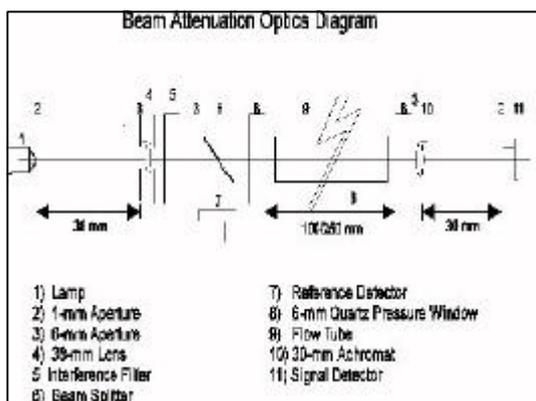


Fig. 3a – AC9 canale per la misura dell'attenuazione

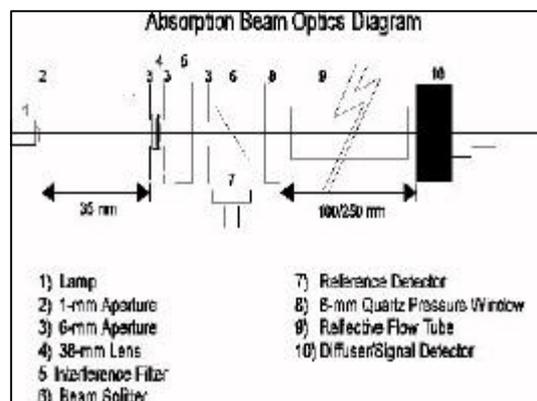


Fig. 3b AC9 canale per la misura dell'assorbimento

Il coefficiente di attenuazione può quindi essere calcolato tramite la formula:

$$c(I) = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (IV.4)$$

Il canale che permette la misura del coefficiente di assorbimento (fig. IV.5) segue uno schema operativo simile. La differenza principale nel canale di assorbimento è costituita dal tubo in cui fluisce l'acqua marina che internamente è perfettamente riflettente. La luce diffusa dall'acqua contenuta nel tubo è riflessa dalla superficie riflettente e finisce per essere rivelata dal rivelatore a silicio posto alla fine del tubo. Tale rivelatore, a differenza di quello utilizzato nel canale di attenuazione, ha una grande superficie ed una grande accettanza angolare. Se tutta la luce diffusa è rivelata il rapporto fra l'intensità  $I_0$ , misurata dal rivelatore di riferimento, e l'intensità  $I$ , misurata alla fine del tubo, è funzione solo del coefficiente di assorbimento dell'acqua marina. Usando i dati dell'AC9, il coefficiente di diffusione può essere calcolato, per ogni valore di lunghezza d'onda, sottraendo dal coefficiente di attenuazione il valore del coefficiente di assorbimento (eq. IV.2).

### Apparato di misura sottomarino

Durante le misure sottomarine a grandi profondità l'AC9 è connesso ad uno strumento diffusamente utilizzato in misure oceanografiche per le misure di Conducibilità, Temperatura e profondità (Depth), usualmente denominato CTD (abbiamo utilizzato il modello Ocean

MK-317 prodotto da IDRONAUT). L'acqua all'interno dei tubi di misura dell'AC9 è continuamente rinnovata per mezzo di una pompa, capace di lavorare anche a grandi profondità, alimentata da un pacco batterie esterno che fornisce +14 V. In figura IV.6 si mostra l'intero apparato di misura sospeso ad una struttura di sostegno realizzata in acciaio AISI-316 e lo schema logico-circuitale del sistema di acquisizione.

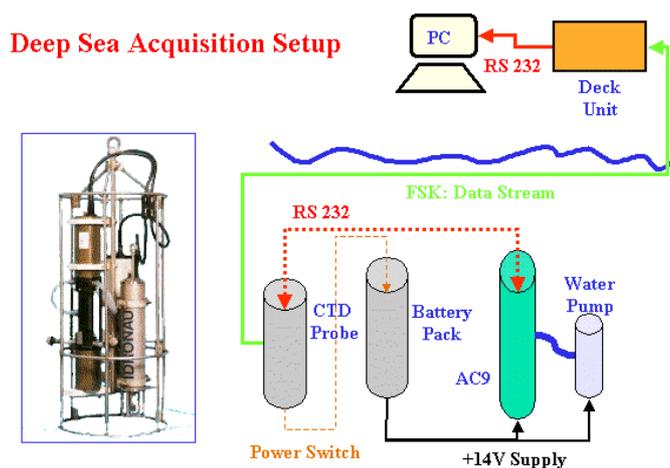
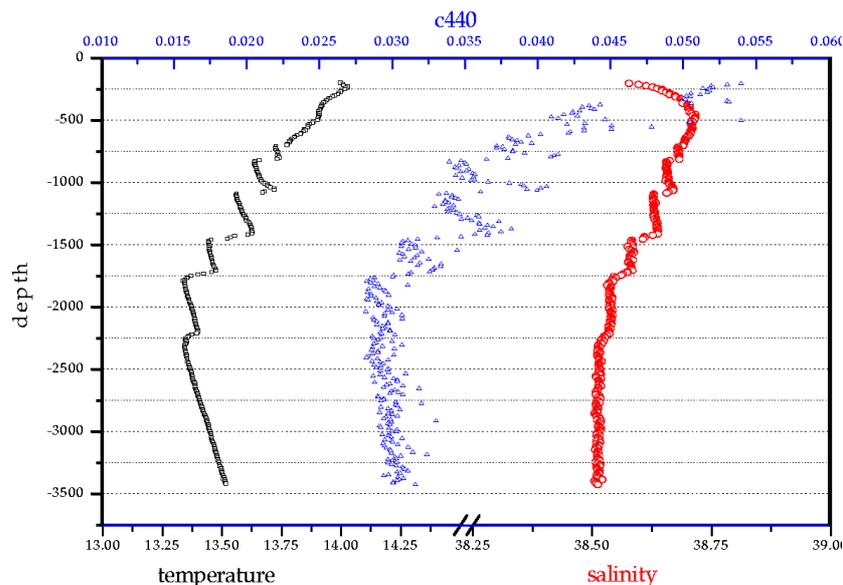


Fig. IV.6 – Apparato per misure ottiche sottomarine

Quando l'apparato è immerso e si opera una misura, il flusso di dati raccolti dall'AC9 viene trasmesso al CTD tramite una linea seriale RS232. Il CTD quindi ritrasmette gli stessi dati in superficie tramite un modem, con protocollo FSK, utilizzando come supporto un cavo elettrico unipolare posto all'interno del cavo d'acciaio che, dalla nave oceanografica, sostiene l'apparato di misura. Lo stesso cavo è utilizzato per fornire l'alimentazione (+30 V) al CTD. Il sistema d'acquisizione infine permette di registrare i dati sperimentali dell'AC9 tramite un calcolatore a bordo della nave oceanografica e, contemporaneamente, di rappresentarli, in "tempo reale", su uno schermo. Profondità, salinità e temperatura dell'acqua sono registrate su una memoria locale del CTD e sono successivamente correlate ai dati dell'AC9 tramite l'informazione del "tempo assoluto di misura" presente nei due campioni di dati. In tal modo è possibile studiare le proprietà ottiche dell'acqua marina in funzione della profondità della sonda. L'AC9 permette di effettuare circa 6 campionamenti al secondo. Immergendo la sonda alla velocità di  $0.5 \div 1$  m/s siamo in grado di studiare, con sufficiente accuratezza statistica, le proprietà ottiche dell'intera colonna d'acqua.

Dall'Agosto del 1998 ad oggi, in undici diverse campagne oceanografiche, abbiamo effettuato misure ottiche sottomarine in numerosi siti del Mediterraneo, nelle vicinanze delle coste italiane. Abbiamo raccolto dati in prossimità di Ponza (il sito denominato "d" nel paragrafo 2), Capo Passero (sito "a"), Ustica (sito "b"), Alicudi (sito "c"), Catania (~20 km ad Est della città) e nelle vicinanze dell'abisso di Matapan (il punto più profondo del Mediterraneo, non lontano dalle coste greche, con coordinate  $36^{\circ} 30' N$ ,  $21^{\circ} 12' E$ ). Le misure hanno messo in



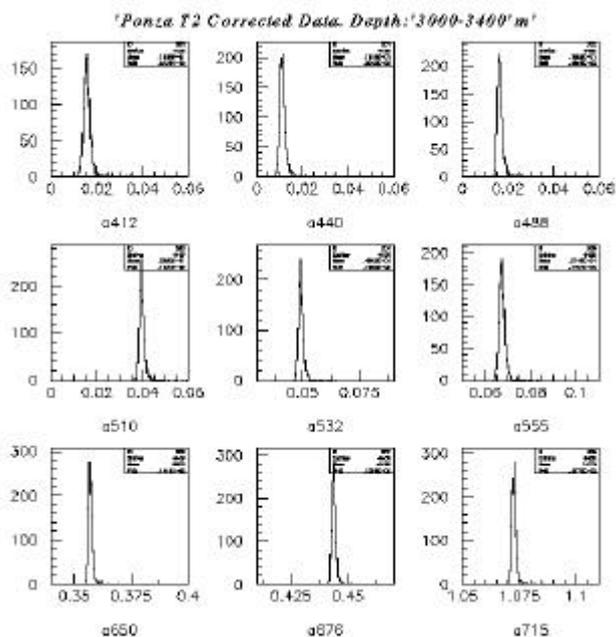
**Fig. IV.7 – Evoluzione del coefficiente c(440) in funzione della profondità (punti blu, scala orizzontale superiore), per ad una misura effettuata in prossimità di Alicudi. In nero è riportiamo la temperatura dell’acqua ed in rosso la salinità.**

evidenza che le proprietà ottiche dell’acqua marina variano in funzione della profondità e che sono fortemente correlate a parametri oceanografici quali la salinità e la temperatura. Nei vari siti i coefficienti di attenuazione e di assorbimento presentano un minimo per luce con 440 nm di lunghezza d’onda.

In figura IV.7 è mostrato come esempio mostriamo il valore fornito dall’AC9, prima delle necessarie correzioni, per il coefficiente di attenuazione misurato a 440 nm, misurato nel sito “c” (Alicudi). Nella stessa figura, per confronto, sono visibili i valori di salinità e di temperatura dell’acqua. La correlazione fra le tre quantità è evidente. Un simile andamento è stato rivelato anche per gli altri siti del Tirreno (Ponza ed Ustica) dove la coesistenza di strati di acqua con diverse proprietà localizzati a diverse profondità è ben nota agli oceanografi [AST00].

La caratterizzazione delle proprietà ottiche dell’acqua marina per i diversi siti investigati è ottenuta in base al valore medio dei coefficienti di assorbimento ed attenuazione, rispettivamente, calcolati nell’intervallo di profondità 2900÷3200 m. A tale profondità infatti potrebbe essere posizionato l’apparato da  $1\text{ km}^3$ . Abbiamo osservato che in tale intervallo le proprietà dell’acqua, sia ottiche che oceanografiche, cambiano lentamente con la profondità e quindi l’intero volume d’acqua può considerarsi omogeneo.

In figura IV.8 sono mostrate le distribuzioni dei valori dei coefficienti di assorbimento ottenuti  $a(I)$  nel sito di Ustica, per l'acqua marina contenuta nell'intervallo di profondità 3000÷3400 m. Distribuzioni analoghe sono state ottenute per i coefficienti di attenuazione  $c(I)$ . I valori medi di tali distribuzioni rappresentano per noi la misura dei coefficienti di assorbimento e di attenuazione, per ogni valore di  $I$ . Gli errori statistici su tali valori sono ottenuti dalle r.m.s. delle stesse distribuzioni.



**Fig. 6 – Distribuzione dei valori  $a(I)$  misurati nel sito di Ustica per profondità comprese nell'intervallo 3000÷3400 m.**

Nel grafico a sinistra della figura IV.9 sono riportati, in funzione della lunghezza d'onda della luce, i valori dei coefficienti di assorbimento (simbolo blu pieno) e di attenuazione (simbolo rosso pieno) misurati nel sito di Capo Passero confrontati con i rispettivi valori dei coefficienti relativi all'acqua pura. Nella stessa figura, nel grafico di destra, sono mostrati i valori delle lunghezze di assorbimento e di attenuazione definite come  $L_a(I)=1/a(I)$  e  $L_c(I)=1/c(I)$  rispettivamente.

Riassumiamo i risultati ottenuti in Tabella 1 dove sono riportati i risultati corretti delle misure delle proprietà ottiche (assorbimento ed attenuazione) per i vari siti studiati per due lunghezze d'onda: 440 and 488 nm. I dati quotati per Ustica (Dicembre 1999), Alicudi (Dicembre 1999) e Ponza (Ottobre 1998) sono calcolati come media di due diverse misure. Nella regione di Capo Passero abbiamo effettuato misure in tre siti diversi (a circa 20 miglia nautiche di distanza relativa) da noi denominati rispettivamente KM2 (120 km a SE dalla costa), KM4 (80 km a SE dalla costa) e KM3 (60 km a SE dalla costa). Per KM3 and KM4 riportiamo due risultati ottenuti in due diversi periodi dell'anno (Dicembre 1999, Marzo 2000). Per il sito KM2 riportiamo il risultato dell'unica misura effettuata (Gennaio 1999). Le proprietà ottiche elencate in tabella 1 si riferiscono all'acqua marina compresa nell'intervallo di profondità 2900 m and 3200 m (1600 m 1900 m per il test-site di Catania).

**Fig. IV.9 – A sinistra: coefficienti di assorbimento ed attenuazione (simboli blu e rossi pieni) relativi al sito di Ponza in funzione della lunghezza d'onda confrontati ai coefficienti di assorbimento e di attenuazione dell'acqua pura. A destra: lunghezze di attenuazione e di assorbimento per il sito di Ponza e per l'acqua pura, in funzione della lunghezza d'onda della luce.**

Site	Date	c(440) [m <sup>-1</sup> ]	a(440) [m <sup>-1</sup> ]	c(488) [m <sup>-1</sup> ]	a(488) [m <sup>-1</sup> ]
KM2	Jan 99	0.0246±0.0021	0.0136±0.0015	0.0303±0.0021	0.0213±0.0013
KM4	Dec 99	0.0298±0.0015	0.0178±0.0015	0.0331±0.0015	0.0215±0.0015
	Mar 00	0.0244±0.0015	0.0131±0.0015	0.0245±0.0015	0.0227±0.0015
KM3	Feb 99	0.0440±0.0025		0.0432±0.0024	
	Dec 99	0.0340±0.0015	0.0143±0.0015	0.0299±0.0015	0.0206±0.0015
Alicudi	Dec 99	0.0300±0.001	0.0178±0.001	0.0333±0.001	0.0210±0.001
Ustica	Dec 99	0.0306±0.001	0.0195±0.0015	0.0347±0.0015	0.0224±0.001
Ponza	Oct 98	0.0338±0.0021	0.0098±0.0020	0.0365±0.0020	0.0154±0.0018

### Misura delle correnti sottomarine

Fin dal luglio del 1998 sono stati posizionati nel sito di Capo Passero diversi strumenti per la misura dell'intensità e direzione delle correnti sottomarine in funzione del tempo. Tali strumenti sono usualmente fissati su un cavo ancorato al fondo e messo in tensione verticalmente da boe di profondità.

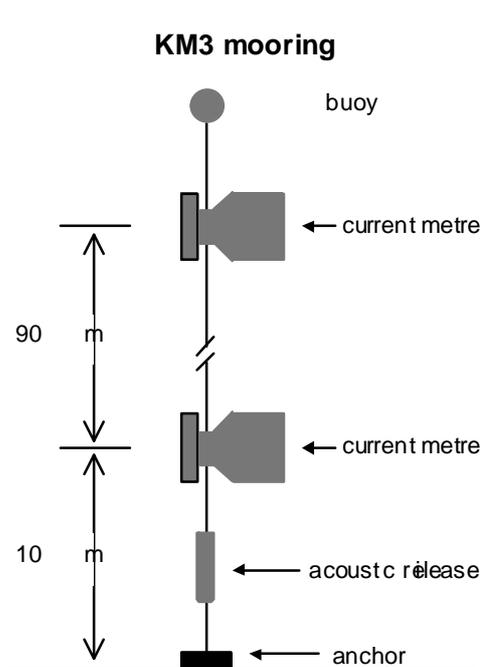


Fig. IV.10 - Schema dell'apparato di misura posizionato nel luglio '98 in KM3 (Capo Passero). Due correntometri Aanderaa RCM8 sono posizionati rispettivamente a 10 e 100 m al di sopra del fondo marino alla profondità di circa 3400 m.

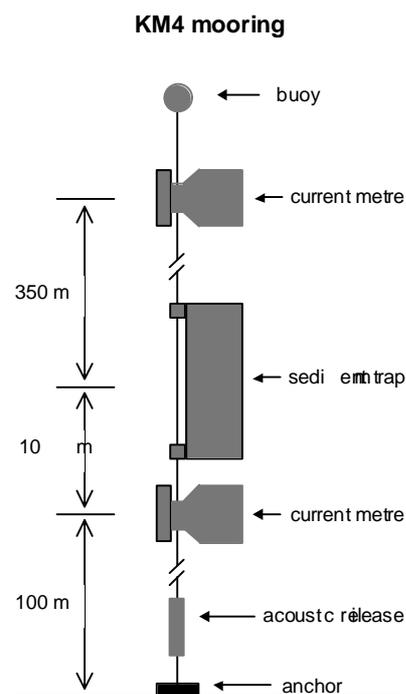
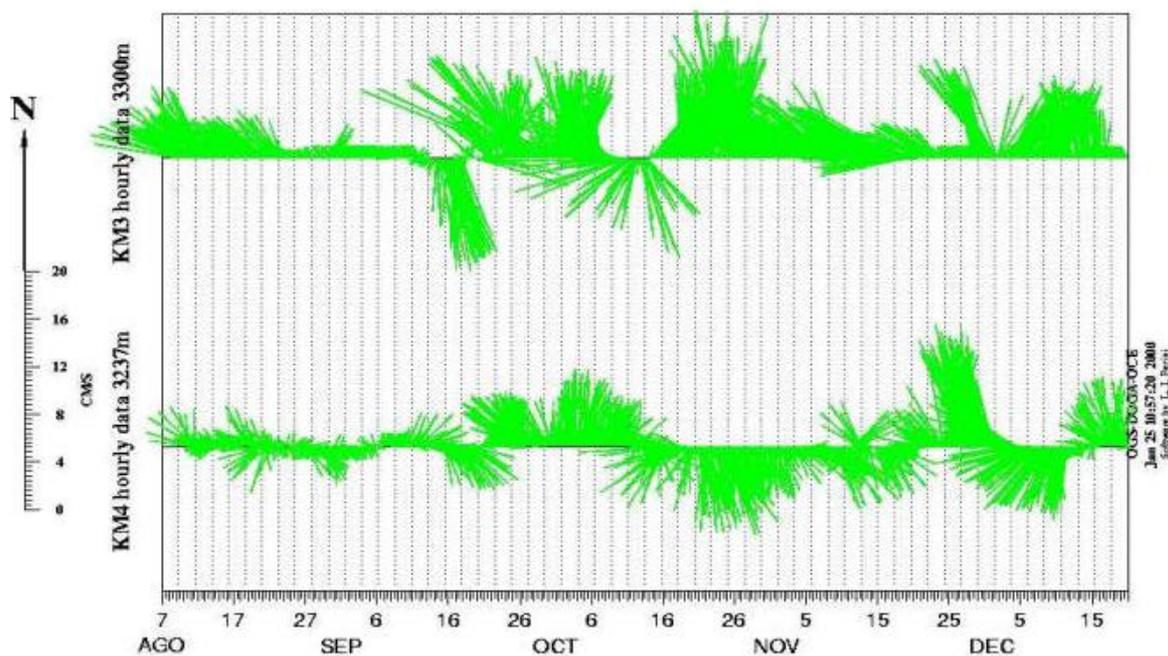


Fig. IV.11 - Schema della linea ancorata in KM4. La linea include due correntometri Aanderaa RCM8 posizionati a 100 and 460 m al di sopra del fondo marino (a 3400m di profondità), ed una trappola per sedimenti, situata a 110 m dal fondo marino.

In fig. IV.10 è schematicamente rappresentato l'ancoraggio posizionato, in agosto '98, nel sito denominato KM3 (36°30'00" N, 15°50'00" E) che utilizzava due correntometri Aanderaa RCM8 collocati rispettivamente a 10 m e 100 m al di sopra del fondo (a circa 3400 m di profondità). Le correnti misurate da questi due strumenti non mostravano dipendenza dalla quota, per tale motivo in tutte le "linee di misura correntometrica" utilizzate successivamente i correntometri sono stati posizionati a ~100m e ~400m dal fondo.

Le misure effettuate fino ad oggi, per un periodo superiore a 18 mesi, mostrano correnti di intensità molto bassa (il valor medio è pari a circa 2.8 cm/s) e con direzione solo lentamente variabile nel tempo (la corrente sottomarina fluisce prevalentemente da SE a NW con un angolo medio di 38° NW).

Nell'agosto del 1999 una seconda linea di misura correntometrica è stata posizionata circa 10 miglia a SE di KM3 (nel sito denominato KM4 con coordinate 36°18'52" N, 16°04'42" E). In tale apparato di misura, oltre ai due correntometri Aanderaa RCM8 (fig. 11), posti a circa 360m di distanza fra di loro, è stato utilizzato anche uno strumento per lo studio dei sedimenti e del tasso di sedimentazione. I dati raccolti nei successivi cinque mesi dalle due "linee correntometriche" mostrano una sostanziale uniformità nelle correnti misurate in KM3 e KM4. In KM4 l'intensità media delle correnti è tuttavia minore che in KM3.



**Fig. IV.12 - Rappresentazione vettoriale delle correnti misurate, a 100m dal fondo, da correntometri posizionati in KM3 e KM4 nel sito di Capo Passero. Le misure sono state effettuate nel periodo Agosto-Dicembre 1999. La lunghezza di ogni vettore rappresenta l'intensità della corrente (la scala in cm/s è riportata sulla sinistra del grafico), la direzione del vettore rappresenta la direzione della corrente (il Nord è indicato sulla sinistra del grafico).**

In figura IV.11 sono rappresentate parte delle misure raccolte fino ad ora: un confronto fra le intensità (rappresentate dalla lunghezza di ogni vettore) e le direzioni (l'angolo rispetto al NORD) delle correnti misurate in KM3 and KM4 in un lungo intervallo di tempo fra Agosto e Dicembre 1999.

## Studio della sedimentazione nel sito di Capo Passero

Oltre ai due correntometri la linea posizionata in KM4 (fig. IV.10), a 3400m di profondità sin dall'Agosto 1999, include anche una "trappola per sedimenti" (Technicap PPS 3/3, alcuni particolari mostrati in fig. IV.13) posizionata 110 m metri al di sopra del fondo marino. La trappola consiste in un tubo conico, con apertura di 0.125 m<sup>2</sup> rivolta verso l'alto, equipaggiato con 12 contenitori per sedimenti posizionati all'estremità inferiore del cono. I contenitori sono montati su un supporto ruotante in modo che ogni contenitore possa raccogliere sedimenti solo per un periodo prefissato di tempo (nel nostro caso 15 giorni).

La trappola è stata immersa nel periodo 13 Agosto-22 Dicembre 1999. L'analisi dei dati comprende la misura del tasso di sedimentazione e lo studio dei sedimenti sia per una caratterizzazione dell'ambiente marino (quantità e quantità dei sedimenti organici ed inorganici) sia per la stima della distribuzione delle dimensioni dei sedimenti stessi. Come abbiamo visto in precedenza la presenza di sedimenti influisce sulle proprietà di trasmissione della luce in acqua: può aumentare l'assorbimento e la diffusione della luce in acqua modificando sia le capacità di osservazione di un Telescopio Cerenkov sottomarino per neutrini (l'area efficace) che la sua risoluzione angolare (e quindi la capacità di identificare sorgenti puntiformi). L'angolo di diffusione, fissata la lunghezza d'onda della luce incidente, è funzione del diametro dell'ostacolo. Per tale motivo una buona conoscenza della distribuzione delle dimensioni dei sedimenti può aiutare a capire le possibili prestazioni del futuro apparato da 1 km<sup>3</sup>.



**Due immagini della trappola per sedimenti, dotata di un'apertura conica di 50 cm: a sinistra durante il recupero nel Dicembre '99, a destra un particolare che mostra l'alloggiamento ruotante dei recipienti di raccolta dei sedimenti**

L'analisi dei dati raccolti indica, per il periodo Agosto-Dicembre 1999, un tasso di sedimentazione media di 20 mg cm<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>. Tale valore del tasso di sedimentazione risulta essere in assoluto molto basso e compatibile con valori già misurati in zone limitrofe. Mostriamo in figura 14 (linea continua) i risultati ottenuti, in funzione del tempo, in KM4

confrontandoli con tassi di sedimentazione ottenuti da altri gruppi di ricerca. La linea tratteggiata grigia rappresenta misure effettuate dalla collaborazione ANTARES nella regione di Tolone a circa 2000m di profondità; i dati di ANTARES, presi nel 1997, sono stati confrontati con i dati di NEMO a parità di periodo dell'anno.

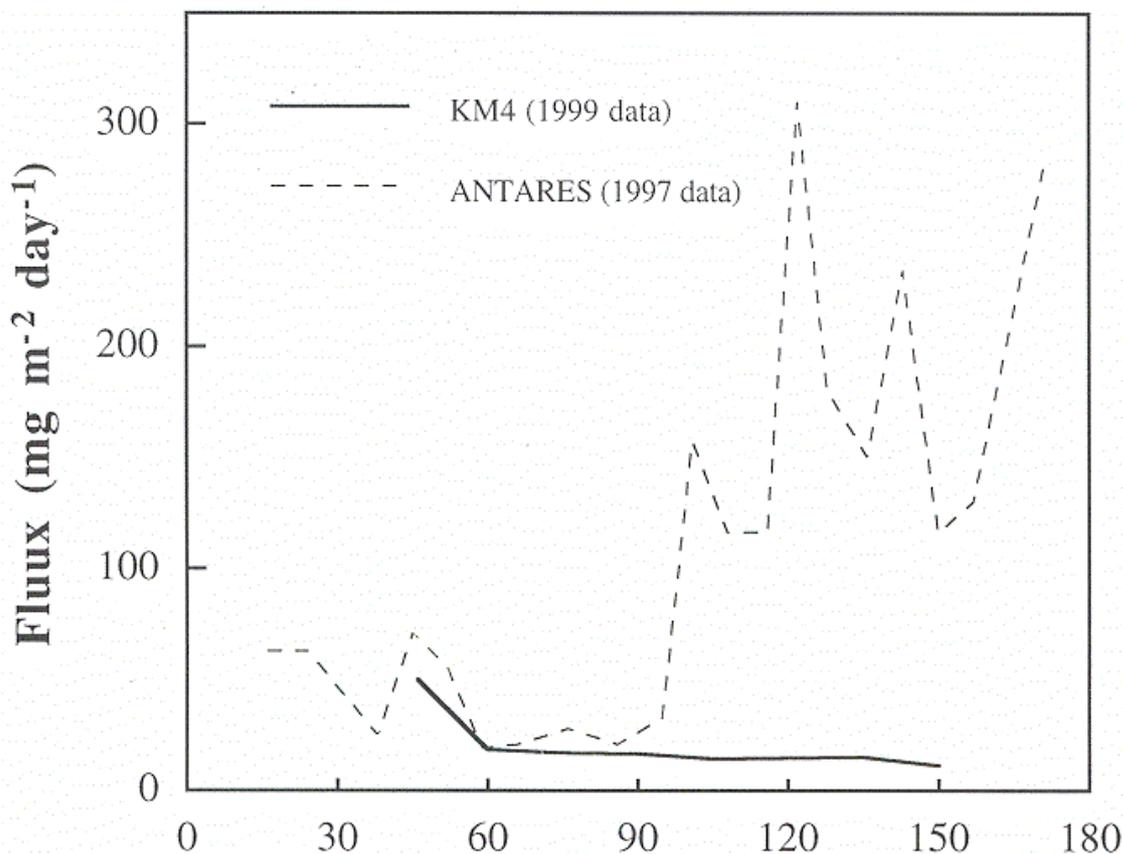


Fig. IV.14 - Confronto fra il tasso di sedimentazione misurato dalla Collaborazione NEMO in Capo Passero (linea continua: KM4, 3300m di profondità) nel 1999, dalla Collaborazione ANTARES nella regione di Tolone a 2000m di profondità nel 1997 (linea tratteggiata grigia) e dall'Istituto Biologia del Mare circa 200Km a Nord di KM4 a 2000m di profondità (linea tratteggiata rossa) nel 1997.

Altri risultati sperimentali (linea tratteggiata rossa), ottenuti ad esempio dall'Istituto di Biologia del Mare del CNR (Venezia), relativi a stazioni di misura posizionate a 2000m di profondità in una regione dello Ionio circa 200Km a Nord di Capo Passero mostrano un sostanziale accordo con i valori ottenuti per KM4.

### **Crescita di film biologici su superfici immerse**

Oggetti immersi in ambienti marini per lunghi periodi possono essere sede di crescita di sottili strati di organismi biologici (batteri) ed all'insediamento di organismi marini. Tale fenomeno, detto anche *bio-fouling*, può dipendere dall'ambiente marino, dalla natura e qualità della superficie in esame, dalla sua orientazione. È evidente che la crescita anche di una sottile

pellicola di materiale biologico sui sensori ottici del Telescopio per Neutrini avrebbe come effetto la riduzione della loro trasparenza e quindi un inevitabile degrado delle prestazioni nel suo complesso. Tale sottile pellicola potrebbe altresì avere l'effetto di raccogliere dell'apparato sperimentale e trattenere eventuali sedimenti depositatisi sulla superficie dei moduli ottici. La degradazione, dovuta al bio-fouling, delle proprietà di trasmissione della luce per le sfere di vetro che sono normalmente utilizzate per proteggere i sensori ottici è un parametro importante che va studiato per stimare le caratteristiche dell'apparato in funzione del tempo.

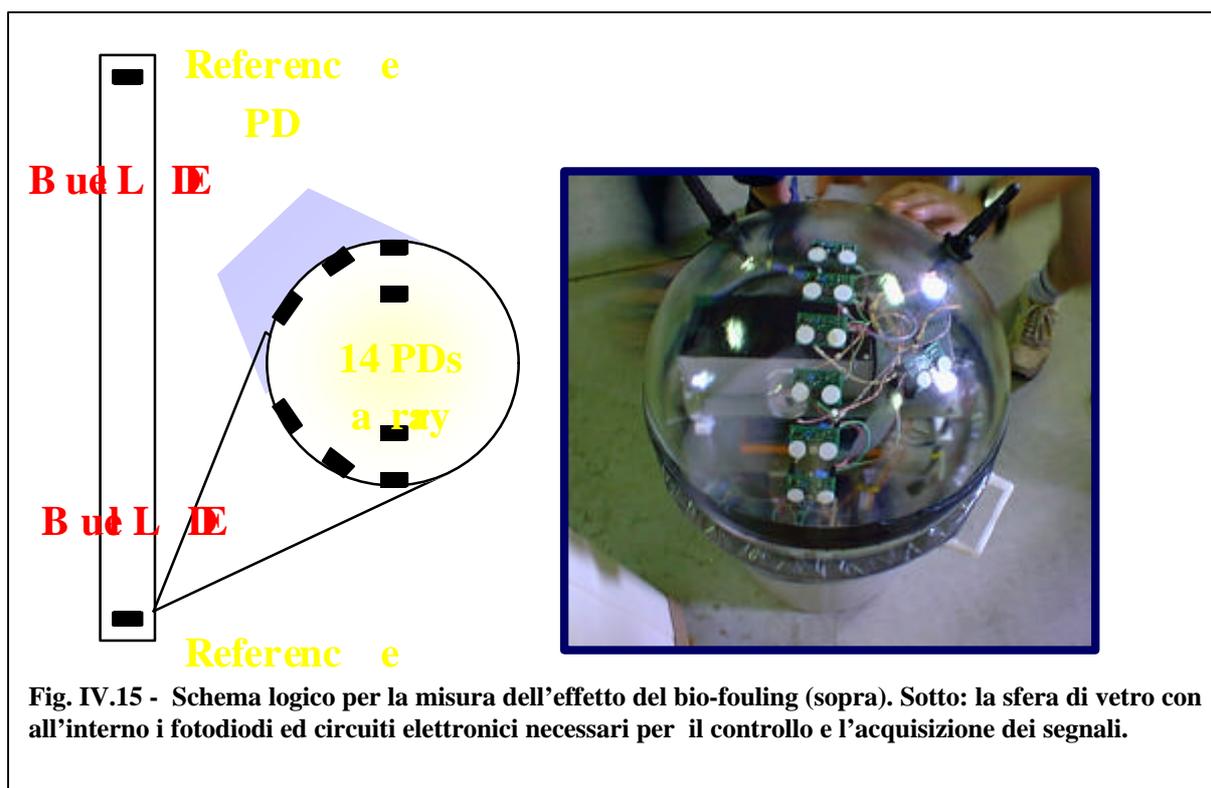


Fig. IV.15 - Schema logico per la misura dell'effetto del bio-fouling (sopra). Sotto: la sfera di vetro con all'interno i fotodiodi ed circuiti elettronici necessari per il controllo e l'acquisizione dei segnali.

Per studiare tale fenomeno la Collaborazione NEMO ha realizzato un'opportuna stazione sottomarina per la misura della variazione, nel tempo, della trasparenza di una sfera di vetro Benthos con diametro pari a 43 cm. Sulla superficie interna della sfera (fig. 15) sono stati posizionati 14 fotodiodi (Hamamatsu S1337-66BR), rivolti verso l'esterno, ognuno con superficie sensibile pari a 36 mm<sup>2</sup>. I fotodiodi sono disposti su un meridiano della sfera a diversi angoli rispetto alla verticale, da 0° (sulla verticale rivolto verso l'alto) a 180° (sulla verticale rivolto verso il basso). In un opportuno contenitore esterno alla sfera sono posizionati due LED blu (460nm) ad alta luminosità e due fotodiodi. Tali fotodiodi, accoppiati otticamente in aria con i LED, permettono una misura dell'intensità dei LED e servono di riferimento alle misure dei fotodiodi interni alla sfera. Si vuole studiare infatti, in funzione del tempo, il rapporto tra l'intensità della luce misurata dai fotodiodi interni alla sfera e quella misurata dai fotodiodi di riferimento. Il fenomeno del bio-fouling dovrebbe ridurre tale rapporto con il passare del tempo. La crescita di materiale biologico e l'eventuale quantità di sedimento depositato può variare in funzione di parametri marini quali la

temperatura, la salinità e l'intensità della corrente. Per tale motivo all'apparato prettamente ottico già descritto abbiamo affiancato un CTD (IDRONAUT MK-317) ed un correntometro (Aandera RCM8). L'acquisizione dei dati, così come il controllo dei LED, è basato su un micro-controllore che registra i risultati delle misure sulla memoria di un modem acustico sottomarino (Datasonics ATM-877) che, a comando, può ritrasmetterli in superficie. In tal modo è possibile raccogliere dati per lungo tempo e, senza spostare la stazione di misura, analizzarli quasi in tempo reale. La stazione di misura così realizzata è stata posizionata a 3400 m di profondità nel sito KM4 di Capo Passero nel Dicembre del 1999.

Misure analoghe effettuate dalla collaborazione ANTARES nel sito di Tolone a poco più di 2000 m di profondità, ha mostrato una riduzione di trasparenza di circa il 50% in prossimità della parte superiore della sfera stessa (a 0 rispetto



Fig. IV.16 - La stazione di misura sottomarina per la misura dell'effetto del bio-fouling su pareti di vetro. Sono visibili da sinistra a destra il CTD, il Modem Acustico, la sfera, il Correntometro ed, in secondo piano, il Pacco Batterie.

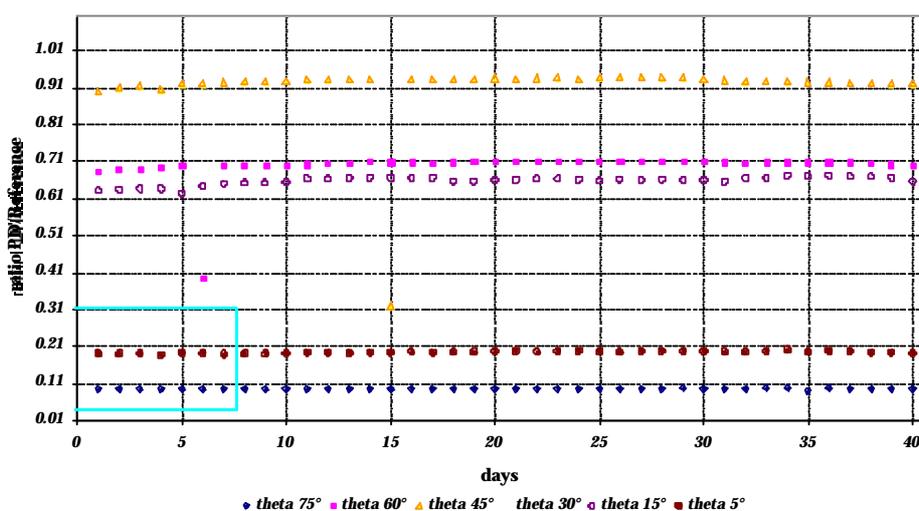


Fig. IV.17 - KM4, misura dell'effetto del bio-fouling: dipendenza dal tempo della trasparenza del rapporto fra la luce vista dai fotodiodi interni ed esterni alla sfera di vetro.

alla verticale) [DEB97].

Ciò ha comportato la scelta, effettuata da ANTARES per la costruzione del rivelatore con area efficace da 0.1 km<sup>2</sup> che sarà realizzato al largo di Tolone, di non posizionare sensori ottici verso l'alto. Si è rinunciato in tal modo ad una buona efficienza di rivelazione per quelle tracce dovute a muoni atmosferici verticali che possono costituire un importante fondo per i neutrini cosmici.

Un'analisi dei dati raccolti, nei primi 40 giorni di permanenza in profondità, dalla stazione di NEMO per la misura del bio-fouling della stazione di misura non mostra percettibili variazioni di trasparenza del vetro (fig. IV.17).

### **Misure di rumore ottico dovuto a <sup>40</sup>K ed a bioluminescenza.**

Un altro parametro importante per il futuro telescopio di neutrini, capace di condizionare pesantemente l'elettronica di acquisizione dei dati sperimentali, è il "fondo" di segnali luminosi rivelabili dai sensori ottici e non dovuti al segnale cercato. Tale fondo è dovuto a cause naturali ineludibili: la luce Cerenkov prodotta dagli elettroni generati nel decadimento radioattivo del <sup>40</sup>K naturalmente contenuto in acqua marina. Misure preliminari compiute dalla Collaborazione NEMO nel sito di Capo Passero alla profondità di ~3000m indicano che il fondo atteso è pari a circa 60 eventi per secondo e per cm<sup>2</sup> di area sensibile del sensore ottico. Il decadimento radioattivo del <sup>40</sup>K produce un fondo ottico costante nel tempo. Sperimentalmente si è osservato, sovrapposto al rumore dovuto al <sup>40</sup>K, un ulteriore contributo, attribuito all'emissione spontanea e/o stimolata di fotoni (nell'intervallo di lunghezze d'onda 400÷500nm) da parte di batteri ed organismi viventi. Tali organismi possono produrre rumore ottico anche molto intenso (milioni di eventi per cm<sup>2</sup> e per secondo) "accecando" i sensori ottici per intervalli di tempo che vanno dal ms fino a qualche secondo. Mentre il fondo dovuto al <sup>40</sup>K non dovrebbe dipendere dal sito prescelto la "bioluminescenza" può fortemente dipendere dalla profondità a cui sono localizzati i rivelatori, alla temperatura, salinità dell'acqua ed alla quantità di ossigeno in essa disciolto.

### **Programma di misure future**

Il sito KM4, nella regione di Capo Passero, per i risultati fino ad oggi ottenuti sembra essere il più adatto per la realizzazione del Telescopio per Neutrini. Sarà necessario proseguire le misure dell'effetto del bio-fouling, della sedimentazione, delle correnti, della trasmissione della luce e del rumore ottico per caratterizzare le varie proprietà dell'acqua e la loro dipendenza stagionale. Altre misure sono state programmate dalla Collaborazione NEMO per lo studio delle proprietà di trasporto della luce Cerenkov in acqua.

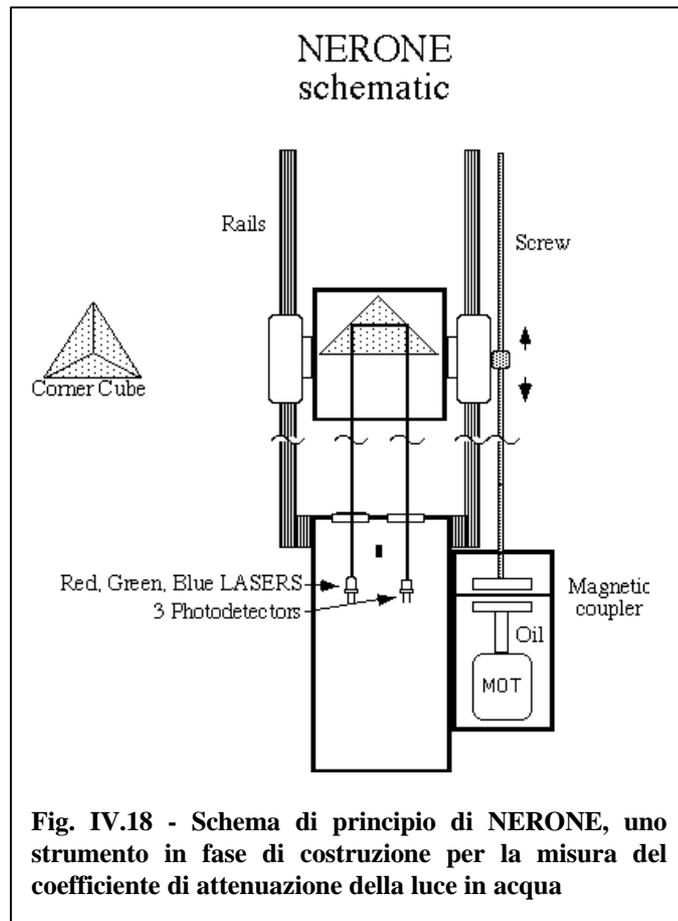
Presso i Laboratori Nazionali di Frascati è in fase di ultimazione uno strumento per la misura diretta del coefficiente di attenuazione della luce tramite il campionamento della *legge di Lambert* (eq. 1) per cammini ottici variabili tra 0 e 3 m. Luce prodotta da tre sorgenti laser (nel rosso, verde e blu), dopo aver attraversato un'opportuna finestra ottica, si propaga in acqua e viene riflessa da un "corner cube" parallelamente a se stessa fino ad essere rivelata da tre separati fotodiodi (fig. 18). La posizione del "corner cube", rispetto alle finestre ottiche

che chiudono il recipiente in cui sono contenuti lasers e fotodiodi, può essere variata con continuità tramite un motore controllato dal processore preposto alla acquisizione dei dati. NERONE è stato realizzato, sotto forma di prototipo, ed è attualmente in prova in laboratorio. L'acquisizione dei dati durante le campagne di misura oceanografiche future sarà sostituendo NERONE all'AC9 nell'apparato descritto nel paragrafo 3.2.

Presso la Sezione INFN di Catania è in fase di sviluppo uno strumento che permetterà di completare lo studio delle proprietà ottiche dell'acqua tramite la caratterizzazione della distribuzione angolare della luce

diffusa. La misura dei coefficienti di attenuazione e di assorbimento permette di calcolare il coefficiente di diffusione senza fornire però alcuna informazione sull'angolo di diffusione. Le caratteristiche dei processi di diffusione della luce in acqua sono di estrema rilevanza per un Telescopio per Neutrini sottomarino in quanto influiscono in maniera diretta sulla risoluzione angolare nella ricostruzione della direzione delle tracce cariche.

In Fig. 19 si mostra lo schema di principio dello strumento. Quattro LED (430, 470, 525 e 590 nm) sono usati per inviare un fascetto luminoso, fortemente collimato, in un volume d'acqua marina libera di fluire in un cilindro di vetro con diametro interno pari a 20mm. Un rivelatore a fotomoltiplicatore, posto dopo un opportuno sistema ottico di collimazione e posizionato ad un angolo variabile rispetto alla direzione iniziale della luce, è usato per lo studio dell'intensità della luce diffusa. Misure preliminari di laboratorio hanno mostrato che l'apparato è in grado di rivelare intensità di luce in almeno 4 ordini di grandezza e di fornire la risoluzione angolare aspettata ( $<0.5$ ). L'apparato è in fase di ultimazione e sarà presto impiegato in campagne marine.



**Fig. IV.18 - Schema di principio di NERONE, uno strumento in fase di costruzione per la misura del coefficiente di attenuazione della luce in acqua**



Trigger. Per essere certi di catturare il segnale proveniente dal PM esso è appositamente ritardato del tempo necessario al T&SPC per prendere le decisioni del caso. Quando un segnale è stato interamente campionato la memoria nella quale è avvenuto il campionamento commuta in lettura e l'altra si mette pronta per essere scritta.

La lettura avviene ad alta velocità (10 MHz) e si esegue soltanto per le celle che sono state scritte nel canale. In effetti si legge e si passa all'ADC soltanto uno dei due segnali campionati dal PM (sotto il controllo del segnale Dyn). Il segnale campionato nel canale del tempo fine non va ad un ADC, ma, dato che è un segnale a livelli, viene immesso in un opportuna logica per dare informazioni fini relativi all'istante in cui il segnale è arrivato rispetto al MC. Una volta che il contenuto di una memoria è stato travasato e l'ADC ha finito la conversione quest'ultimo viene messo in uno stato di Power Down (PwD). Così può aversi un notevole risparmio di potenza. Pochi colpi di clock, forniti prima di riprendere la lettura, mettono l'ADC in grado di riprendere correttamente il suo lavoro.

Tutti i dati raccolti vengono organizzati e serializzati da una unità Data Package & Transer Unit (DPTU) che provvede alla loro organizzazione per la trasmissione seriale fuori dal OM.

Lo slow-control è effettuato nell'Unità di controllo. Essa esegue, a richiesta remota le seguenti regolazioni necessario per il corretto funzionamento del rivelatore

Nel modulo ottico bisogna progettare e realizzare numerosi dispositivi ASIC full-custom a basso consumo e cioè: la Memoria Analogica per catturare il segnale (LIRA); il modulo di Trigger e che classifica i segnali T&SPC; un moltiplicatore di frequenza sincro (PLL); il sistema di controllo; un blocco che si occupa dell'impaccamento e del trasferimento di informazioni (DPTU). Anche altri dispositivi debbono essere studiati e ottimizzati: il sistema di conversioni DC/DC per le alimentazioni; l'alimentazione a bassa potenza dell'anodo e dei dinodi del PMT; il sistema di ricezione e trasmissione in full duplex su linea singola.

## TJB

La TJB contiene un organo fondamentale ai fini della banda di trasmissione ed in definitiva del numero dei cavi elettro-ottici e dei transceiver da impiegare: il sistema di compressione dati che impacchetta il flusso dei dati di mezza torre. È possibile ottenere fattori di compressione anche di un ordine di grandezza che porterebbero il flusso fino a 50 Mbit/s. Una unità nella TJB fornisce anche i 56 canali TX/RX codificati sincroni ed autosincroni ai rispettivi OM ed opera la tramatura temporale dei segnali per fornire lo stream finale. Un DSP permette di gestire il canale di slow-control e fornisce anche un canale di test dal quale è possibile prelevare i segnali provenienti da uno qualunque degli OM ed inviarlo ad un organo di presentazione consentendo la dimostrazione della parte più difficile e complessa di tutta l'elettronica d'acquisizione.

## Studio di fattibilità per la meccanica ed il deployment del rivelatore

La progettazione meccanica di un rivelatore delle dimensioni del km<sup>3</sup> e la sua installazione (“deployment”) e messa in funzione a più di 3000 m di profondità nel Mar Ionio pongono problemi ingegneristici assolutamente inediti ed ardui. Problemi vieppiù rinforzati dagli ovvi requisiti di affidabilità funzionale che l’apparato deve soddisfare, posto che, sia per esigenze scientifiche che per l’entità dell’investimento, si richiede che esso debba funzionare e prendere dati per un periodo dell’ordine dei venti anni.

Queste ragioni hanno fatto riconoscere, già nelle prime fasi dell’attività di progettazione, l’opportunità di cercare le competenze e l’esperienza operativa necessarie ad affrontare i problemi di ingegneria marina posti dalla progettazione delle strutture meccaniche di NEMO nell’industria dell’estrazione petrolifera italiana, dove esse sono notoriamente presenti. Le esigenze dello sfruttamento di campi petroliferi sul fondo del mare incoraggia lo sviluppo di capacità operative a profondità crescenti ed oggi profondità dell’ordine dei tremila metri costituiscono una sorta di “frontiera” per queste attività. Questa situazione ha costituito il presupposto per un’alleanza molto proficua tra ricercatori ed industria. Infatti, se dal lato scientifico questa alleanza pone su basi sicure la prospettiva di vedere avviati a soluzione i problemi costruttivi grandemente complessi posti dal telescopio per neutrini, dal lato industriale la possibilità di cimentarsi con i detti problemi di progettazione e costruzione di NEMO costituisce un’occasione unica per un ulteriore sviluppo delle competenze e dell’esperienza operativa a grandi profondità. Tutto ciò è evidentemente suscettibile di rafforzare la posizione di prestigio a livello internazionale che questo settore industriale italiano già occupa.

In linea con queste considerazioni l’INFN – a seguito di una gara d’appalto – ha affidato ad un consorzio di imprese del gruppo Saipem lo studio della fattibilità costruttiva, per quel che riguarda la struttura meccanica e l’installazione, dell’apparato NEMO. Tale studio è in fase avanzata ne riportaremo qui le linee generali, che si considerano ormai assodate nel progetto, il che peraltro dà un’idea della messe di esperienze e nuove tecnologie che risulteranno dalla costruzione di NEMO.

Nel suddetto studio di fattibilità si assume che il volume di acqua delimitato dal reticolo dei moduli ottici (OM) abbia la forma di un parallelepipedo a base quadrata le cui dimensioni sono indicativamente 1.9 x 1.9 km<sup>2</sup> e altezza 300 m. La base inferiore di questo volume dista almeno 150 m dal fondo e questo sta alla profondità di circa 3500 m.

Per la progettazione della struttura meccanica che fungerà da supporto al reticolo di moduli ottici si fa riferimento alle seguenti norme tecniche:

9. API RP 2A Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – July 1993
10. AISC Manual of Steel Structures – Ninth Edition
11. DNV Fixed Offshore Installation – Pt 3, Ch 1, Sect 9

12. 0014/NDI/JR Noble Denton, General Guideline for Marine Transportation

13. DNV Rules for Planning and Execution of Marine Operation

Parallelamente all'analisi di simulazione al computer è stato condotto uno studio di fattibilità tecnologica di possibili configurazioni dell'impianto. La comparazione delle varie configurazioni è stata condotta in base ai seguenti criteri:

- d) *costo*: materiali, strumentazione, qualifica della componentistica;
- e) *affidabilità di progetto*: possibilità di soddisfare i requisiti di progetto, disponibilità di un know-how consolidato o quanto meno adattabile al progetto in esame, disponibilità di mezzi per la realizzazione e la posa in opera dell'apparato;
- f) *operabilità*: probabilità di guasti nell'apparato, accessibilità alle strutture per interventi sottomarini di manutenzione, eventuale sviluppo di spares;
- g) *flessibilità del progetto*: estendibilità e sviluppo modulare dell'apparato, pianificazione e razionalizzazione delle varie attività;
- h) *operazioni in campo*: installazione ed eventuale recupero delle strutture.

Un sistema di punteggi relativi alle varie sottovoci indicate, atto a quantificare il merito relativo delle varie ipotesi progettuali o la probabilità che i requisiti di progetto siano verificati, permette di orientarsi verso le configurazioni preferibili. Tre classi di strutture sono da considerare in generale:

- e) struttura a torri realizzata con colonne flessibili,
- f) struttura a torri realizzata con strutture rigide,
- g) strutture costituite da singole stringhe flessibili da disporsi su un reticolo regolare o mediante una struttura a torri.

Dal punto di vista generale, la struttura a torri presenta due sostanziali vantaggi nei confronti della struttura a reticolo:

- ogni unità contiene un maggior numero di moduli ottici e quindi le procedure di deployment sono meno impegnative, dato il numero ridotto di unità da installare;
- la spaziatura tra le varie unità aumenta, il che facilita le operazioni sottomarine dal punto di vista logistico.

È facilmente intuibile che un aumento di rigidità della struttura aumenta l'affidabilità rispetto al corretto posizionamento dei moduli ottici in condizioni operative. Questo vantaggio è però controbilanciato e addirittura superato dall'aumento dei costi di costruzione, installazione, manutenzione ed eventuale recupero di parti dell'apparato che la struttura a torri rigide comporta. Si può allora concepire un compromesso tra l'estremo di una struttura i cui elementi sono rigidamente collegati tra loro e l'altro estremo di una struttura completamente flessibile. Risulta allora che l'adozione di una struttura semi-rigida ha costi significativamente minori di una struttura assolutamente rigida. La contropartita è che per controllare l'assetto di una struttura non completamente rigida occorre sviluppare un sistema di posizionamento

acustico dei moduli ottici sebbene in misura minore di quanto occorra nel caso di una struttura completamente flessibile. Questa soluzione appare praticabile sulla base delle conoscenze attuali, ma evidentemente costituisce una realizzazione originale su cui è necessario un certo investimento in R&D.