

**Proposta per la realizzazione  
di un Laboratorio Sottomarino  
Multidisciplinare**

***Progetto NEMO***

*Draft versione 2.1, 5 novembre 2001*

## Istituzioni scientifiche partecipanti

- **Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**

**Laboratori Nazionali del Sud**

*Via S. Sofia 44, 95123 Catania*

**Sezione di Bari**

*Via E. Orabona 4, 70126 Bari*

**Sezione di Bologna**

*Via Imerio 46, 40126 Bologna*

**Sezione di Catania**

*Corso Italia 57, 95129 Catania*

**Sezione di Cagliari**

*Cittadella Universitaria di Monserrato, 09042 Monserrato (CA)*

**Sezione di Genova**

*Via Dodecaneso 33, 16146 Genova*

**Sezione di Roma 1**

*P.le A. Moro 2, 00185 Roma*

**Laboratori Nazionali di Frascati**

*Via E. Fermi 40, 00044 Frascati (Roma)*

**Gruppo Collegato di Messina**

*Sal. Sperone 31, 98166 Vill. S. Agata (ME)*

- **Dipartimento Interateneo di Fisica dell'Università di Bari**

*Via E. Orabona 4, 70126 Bari*

- **Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna**

*Via Imerio 46, 40126 Bologna*

- **Dipartimento di Fisica dell'Università di Cagliari**

*Cittadella Universitaria di Monserrato, 09042 Monserrato (CA)*

- **Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Catania**

*Corso Italia 57, 95129 Catania*

- **Dip. Elettrico, Elettronico e Sistemistico dell'Università di Catania**

*Viale A. Doria 6, 95125 Catania*

- **Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova**  
*Via Dodecaneso 33, 16146 Genova*
- **Dipartimento di Fisica dell'Università di Messina**  
*Sal. Sperone 31, 98166 Vill. S. Agata (ME)*
- **Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali, Università degli Studi di Pavia**  
*Via Taramelli 24, 27100 Pavia*
- **Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza"**  
*P.le A. Moro 2, 00185 Roma*
- **Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**  
**Sezione di Roma 2**  
*Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma*
- **Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale**  
*Borgo Grotta Gigante 42/c, 34016 Sgonico (TS)*
- **Consiglio Nazionale delle Ricerche**  
**Istituto Sperimentale Talassografico, Messina**  
*Spianata S. Raineri 86, 98122 Messina*
- **Rock and Ice Physics Laboratory, University College London**  
*Gower Street, WC1E 6BT London (UK)*

## Imprese coinvolte

- **Nexans Italia S.p.A.**  
*Via del Crocifisso 18, 04100 Borgo Piave (LT)*
- **Consorzio H.B.S. Network**  
*Via Proserpina 1, 95128 Catania*
- **CRIAT Società Consortile a.r.l.**  
*Viale XX Settembre 43, 95128 Catania*
- **Sonsub S.p.A.**  
*Via Galileo Ferraris 14, 30175 Marghera (VE)*
- **Sasp Offshore Engineering S.p.A.**  
*Via Martiri di Cefalonia 67, 20097 San Donato Milanese (MI)*
- **Centro Oceanologico Mediterraneo**  
*Piazzale del Fante 40, 90146 Palermo*
- **Alcatel**  
*Via Trento 30, 20059 Vimercate (MI)*
- **Impresub S.r.l.**  
*Lamar di Gardolo 97, 38014 Trento*
- **Ocean Design Inc.**  
*9 Aviator Way, Ormond Beach, FL 32174 (U.S.A.)*
- **Whitehead Alenia Sistemi Subacquei**  
*Via di Levante 48, 57100 Salviano (LI)*

## Ricercatori proponenti

R. Coniglione, C. DiStefano, P. Finocchiaro, D. Garufi, E. Migneco, M. Musumeci, R. Occhipinti,  
R. Papaleo, P. Piattelli, G. Raia, G. Riccobene, A. Rovelli, P. Sapienza, M. Sedita  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Via S. Sofia 44, 95123 Catania*

R. Bellotti, F. Cafagna, F. Ciacio, M. Circella, C. De Marzo, L. Lamberti, T. Montaruli, C. Pappalettere  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari & Dipartimento di Fisica dell'Università di Bari,  
Via E. Orabona 4, 70126 Bari*

Y. Becherini, S. Cecchini, T. Chiarusi, A. Gabrielli, E. Gandolfi, G. Giacomelli, A. Margiotta,  
M. Masetti, V. Popa, P. Ricci, M. Sioli, M. Spurio, G. Zanmarini  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna & Dipartimento di Fisica dell'Università di  
Bologna, Via Irnerio 46, 40126 Bologna*

R. Habel  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Cagliari & Dipartimento di Fisica dell'Università di  
Cagliari, Cittadella Universitaria di Monserrato, 09042 Monserrato (CA)*

S. Aiello, G. Andronico, F. Burgio, L. Caponnetto, G. Giansiracusa, L. Lo Nigro, D. Lo Presti,  
L. Pappalardo, C. Petta, N. Randazzo, G.V. Russo  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Catania & Dipartimento di Fisica dell'Università di  
Catania, Corso Italia 57, 95129 Catania*

M. Anghinolfi, M. Battaglieri, S. Cuneo, R. De Vita, G. Ricco, M. Ripani, M. Taiuti, S. Zavatarelli  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova & Dipartimento di Fisica dell'Università di  
Genova, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova*

E. Amato, R. Barnà, V. D'Amico, D. De Pasquale, A. Italiano  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Gruppo Collegato di Messina & Dipartimento di Fisica  
dell'Università di Messina,*

M. Cordelli, A. Martini, L. Trasatti, V. Valente  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 40, 00044 Frascati  
(Roma)*

F. Ameli, M. Bonori, A. Capone, F. Massa, R. Masullo, E. Salusti  
*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma 1 & Dipartimento di Fisica dell'Università di  
Roma "La Sapienza", P.le A. Moro 2, 00185 Roma*

A. Cali, R. Cocimano, S. Conti, S. Raiti, G.M. Tina  
*Dipartimento Elettrico, Elettronico e Sistemistico dell'Università di Catania, Viale A. Doria 6, 95125  
Catania*

L. Beranzoli, M. Calcara, G. Etiope, P. Favali, F. Frugoni, L. Graziani, A. Maramai, S. Monna,  
C. Montuori

*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Roma, Via di Vigna Murata 605, 00143 Roma*

R. Mosetti, L. Ursella

*Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante 42/c, 34016 Sgonico  
(TS)*

F. Azzaro, A. Bergamasco, M. Furnari, M. Leonardi, R. Sitran

*Istituto Sperimentale Talassografico, CNR, Spianata S. Raineri 86, 98122 Messina*

S. Boon, P. Meredith

*Rock & Ice Physics Laboratory, University College London, Gower Street, WC1E 6BT London (UK)*

# Indice

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<hr/>		
<b>2</b>	<b>PROGRAMMA SCIENTIFICO</b>	<b>4</b>
<hr/>		
2.1	ASTRONOMIA CON NEUTRINI	4
2.2	MONITORAGGIO GEOFISICO E AMBIENTALE	9
2.3	MONITORAGGIO OCEANOGRAFICO	10
2.4	STUDIO DI PROCESSI DI DEFORMAZIONE E FRATTURAZIONE DI ROCCE	11
2.5	BIOACUSTICA	12
2.6	BIOLOGIA MARINA	13
<b>3</b>	<b>IL SITO DI INSTALLAZIONE</b>	<b>15</b>
<hr/>		
3.1	CRITERI DI SELEZIONE	15
3.2	IL SITO PRESCELTO	17
3.3	CARATTERIZZAZIONE DEL SITO	17
3.3.1	MISURA DELLE PROPRIETÀ OTTICHE DELL'ACQUA	17
3.3.2	CORRENTI	18
3.3.3	SEDIMENTAZIONE	19
<b>4</b>	<b>STRUTTURA DEL LABORATORIO SOTTOMARINO</b>	<b>21</b>
<hr/>		
4.1	STRUMENTAZIONE	22
4.1.1	SENSORI OTTICI	22
	<i>Elettronica</i>	23
4.1.2	STRUMENTAZIONE OCEANOGRAFICA	24
4.2	STRUTTURE MECCANICHE DI SUPPORTO	24
4.2.1	ELEMENTI MECCANICI COMUNI A TORRE E STRINGA	27
	<i>Modulo di controllo locale</i>	27
	<i>Struttura di Base della Stringa</i>	27
	<i>Junction box alla base della stringa</i>	29
	<i>Boa</i>	29
4.2.2	LA STRINGA	30
	<i>Struttura di sostegno per i moduli ottici</i>	30
	<i>Cavo elettro-ottico armato</i>	31
	<i>Analisi delle sollecitazioni</i>	31
4.2.3	LA TORRE	31
	<i>Struttura di sostegno per i moduli ottici</i>	32

	<i>Cavi per la ritenuta meccanica</i>	32
	<i>Cavo elettro-ottico</i>	32
	<i>Analisi delle sollecitazioni</i>	33
<b>4.3</b>	<b>SCELTA DEI MATERIALI</b>	<b>35</b>
	<i>Materiali per le strutture di sostegno</i>	35
	<i>Materiali per i contenitori e le Junction Box</i>	35
	<i>Materiali per le boe di spinta</i>	36
<b>4.4</b>	<b>SISTEMA DI POSIZIONAMENTO</b>	<b>36</b>
<b>4.5</b>	<b>INSTALLAZIONE DELLE STRUTTURE MECCANICHE</b>	<b>36</b>
<b>4.6</b>	<b>TOPOLOGIA DELLA RETE DI DISTRIBUZIONE DI SEGNALI E POTENZA</b>	<b>37</b>
<b>4.7</b>	<b>SISTEMA DI TRASMISSIONE DATI</b>	<b>39</b>
4.7.1	BILANCIO DELLE GRANDEZZE	39
4.7.2	INFRASTRUTTURA PER IL TRASPORTO DEI DATI E CONTROLLI	40
	<i>Canale di temporizzazione</i>	41
4.7.3	SOLUZIONE PROPOSTA	41
<b>4.8</b>	<b>SISTEMA DI TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE DELLA POTENZA</b>	<b>43</b>
	<i>Sistema di trasmissione</i>	43
	<i>Sistema di distribuzione primaria</i>	44
	<i>Sistema di distribuzione secondaria</i>	44
	<i>Sistema di distribuzione sul piano</i>	47
<b>4.9</b>	<b>RETE DI COLLEGAMENTO</b>	<b>47</b>
4.8.1	IL CAVO ELETTRO OTTICO PRINCIPALE	47
	<b>LISTA DEGLI ACRONIMI</b>	<b>50</b>

---



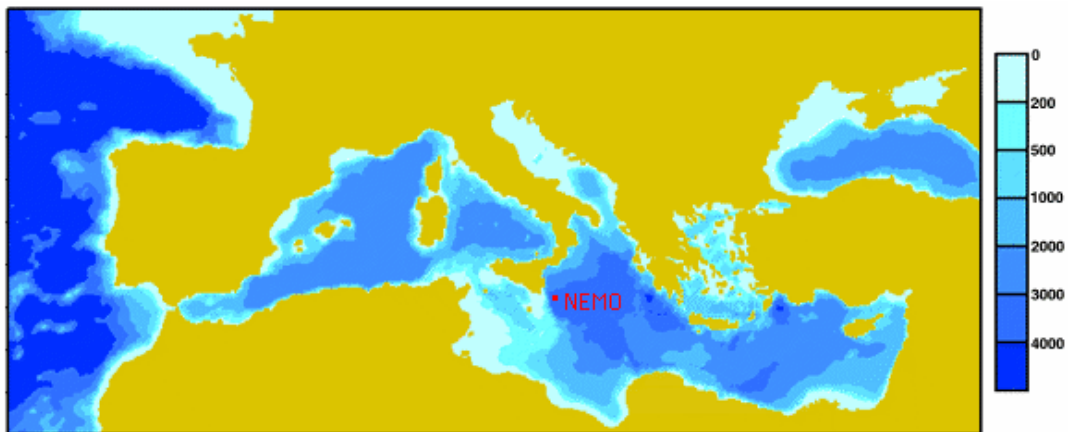
# 1 Introduzione

Le zone marine profonde rimangono a tutt'oggi ampiamente inesplorate e difficilmente accessibili. I fondali marini rivestono un'importanza capitale, poiché contengono una parte considerevole delle risorse minerali del pianeta, svolgono un ruolo fondamentale per le risorse viventi in particolare per la pesca, sono un sito privilegiato del riciclaggio delle acque e condizionano notevolmente la circolazione oceanica, influenzando pertanto in modo considerevole i processi climatici. Inoltre, sono sede di processi che possono comportare grandi rischi naturali (terremoti, instabilità dei pendii sottomarini, tsunamis, etc...) e ospitano intere forme di vita che restano in gran parte sconosciute.

Per questo gli ambienti marini profondi possono essere considerati come una nuova frontiera da esplorare nei prossimi decenni. L'esplorazione e lo studio di queste nuove regioni, le più vaste del pianeta, rappresentano oggi la sfida per un nuovo sviluppo tecnologico e scientifico. Infatti, negli ultimi anni gruppi di scienziati di varie discipline, hanno intrapreso ricerche sulle proprietà del mare, dei suoi fondali e delle sue caratteristiche oceanografiche, fisiche e geofisiche.

I principali problemi presentati dall'esplorazione dei fondali abissali sono legati innanzi tutto alle limitate attrezzature sottomarine, alla difficoltà di comunicare efficacemente attraverso la colonna d'acqua ed alla presenza di un ambiente molto ostile per le tecnologie (alte pressioni, corrosione, etc...). Fino ad oggi, infatti, le ricerche sono state limitate dalla possibilità di accedere agli ambienti profondi solo per periodi relativamente brevi di tempo con spedizioni condotte da navi da ricerca. Queste incursioni consentono di acquisire regolarmente dati sulla fisica e la chimica della massa d'acqua, sulla natura dei fondi oceanici, sulla biodiversità marina, etc..., che ci danno solo un'idea parziale del funzionamento degli oceani. I recenti sviluppi nel campo delle tecnologie delle comunicazioni, della robotica e dei sensori rendono oggi possibile una strategia del tutto differente: realizzare una struttura permanente che permetta un monitoraggio *in situ* continuo ed in tempo reale degli ambienti marini. Le prospettive offerte da questa possibilità nel campo delle ricerche geofisiche, sismologiche, oceanografiche e biologiche sono di enorme portata.

Recentemente sugli abissi marini si è anche rivolta l'attenzione dei ricercatori operanti nel campo dell'astrofisica e della fisica delle particelle di alta energia. Negli ultimi anni, infatti, è stata prospettata la possibilità di utilizzare l'acqua delle profondità marine come rivelatore di particelle cosmiche. Il rivelatore dovrebbe essere costituito da una matrice di sensori ottici disposti su un volume d'acqua dell'ordine di 1 km<sup>3</sup> in grado di rivelare la luce prodotta dal passaggio di tali particelle. L'enorme volume permetterebbe di rivelare la più elusiva delle particelle conosciute: il neutrino. In particolare permetterebbe di osservare i neutrini prodotti nelle più remote e potenti sorgenti d'energia conosciute nell'universo, consentendoci così di "vedere" il cielo in una maniera completamente nuova e di chiarire i processi fisici che danno origine alle sorgenti astrofisiche di alta energia.



*Fig. 1 – Il laboratorio sottomarino NEMO sarà collocato in una zona abissale al centro del Mar Mediterraneo.*

Quello che si propone di realizzare è un grande laboratorio sottomarino, denominato NEMO, collocato ad alta profondità (circa 3500 m) in una zona strategica al centro del Mar Mediterraneo (fig. 1). Questo laboratorio sarà costituito da una rete di circa 200 km di cavi elettro-ottici che consentiranno la connessione di un numero molto elevato di strutture di rivelazione. Questa rete sarà in grado di fornire al sistema di sensori la potenza necessaria e, allo stesso tempo, di trasmettere l'enorme mole di dati raccolta dalle profondità marine ad un laboratorio sulla costa. Inoltre il laboratorio comprenderà anche il sistema di strutture in grado di supportare la rete di sensori necessaria e di consentire il suo recupero.

Negli ultimi anni sono stati installati, nel mondo, alcuni osservatori sottomarini con connessione tramite cavo, ma tutti a bassa profondità. Il laboratorio NEMO sarà la prima installazione fissa di controllo on-line e studio dell'ecosistema sottomarino a grande profondità.

Oltre all'osservatorio per neutrini di alta energia, il laboratorio sottomarino NEMO prevede l'integrazione di diversi altri osservatori mirati allo studio di svariati aspetti del sistema marino. In particolare saranno realizzati: una stazione di monitoraggio sismico ed ambientale; una stazione di monitoraggio oceanografico; una stazione di bioacustica marina; una stazione per studi di biologia marina.

La realizzazione di un osservatorio sismico permetterà il monitoraggio di una vasta area di interesse sismologico, che si estende ad un centinaio di chilometri dalla faglia di Malta. Questa installazione estenderà la rete di monitoraggio sismico POSEIDON che l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha creato in Sicilia e che già prevede l'ancoraggio di una stazione analoga a 2000 metri di profondità a largo di Catania.

L'osservatorio oceanografico consentirà lo studio ed il monitoraggio della dinamica delle acque lungo la colonna d'acqua. Queste analisi potrebbero avere notevole interesse meteorologico per comprendere le mutazioni climatiche nell'area del Mediterraneo. Nel sistema complessivo degli scambi termici l'oceano agisce, infatti, come un enorme termostato ed influenza fortemente il clima. La determinazione quantitativa degli scambi di calore tra l'atmosfera e l'oceano e la conseguente

evaporazione sono eccellenti strumenti per la previsione delle precipitazioni e dei fenomeni atmosferici.

Il laboratorio NEMO verrà anche attrezzato con sensori acustici che permetteranno lo studio dei cetacei. Benché ristretto ad un'area limitata l'esperimento potrebbe fornire informazioni molto dettagliate sul comportamento e sul modo di comunicare di questi mammiferi. L'eventuale espansione della rete di sensori acustici potrebbe anche essere utilizzata per studiare i flussi migratori di estesi banchi di pesci.

Da qualche decennio, inoltre, si assiste ad un costante depauperamento delle risorse marine di bassa profondità, causato dallo sfruttamento intensivo di questo ambiente. La conoscenza del mare profondo diviene oggi indispensabile per razionalizzare lo sfruttamento delle risorse degli oceani. Analisi biochimiche effettuate su vasta scala temporale permetterebbero di identificare i flussi di sostanze nutrienti e microrganismi e, di conseguenza, dare interessanti risposte sui flussi migratori oceanici delle specie ittiche superiori. Inoltre si suppone che almeno 10 milioni di organismi a noi sconosciuti abitino gli oceani. Lo studio di questo ecosistema è l'obiettivo della realizzazione di un osservatorio biomarino.

Le potenzialità del progetto NEMO non si limitano solo alla realizzazione di questi osservatori, ma la disponibilità di una grande infrastruttura nelle profondità del mare apre enormi possibilità, non solo per quanto riguarda la ricerca di base nei campi già menzionati, ma anche per quanto concerne attività di ricerca e sviluppo più direttamente connesse con le tecnologie di interesse per l'industria che opera nel settore sottomarino. La realizzazione stessa del laboratorio rappresenta una sfida tecnologica che richiede un'attività di ricerca industriale in settori quali quelli dei sensori per alta profondità, dei cavi elettro-ottici, dei sistemi di trasmissione dati ad alta velocità ed affidabilità, delle tecnologie dei materiali da utilizzare in ambiente ostile e delle tecnologie dei mezzi sottomarini robotizzati. È pertanto convinzione dei proponenti del progetto che la sfida posta dalla realizzazione di un laboratorio sottomarino può essere vinta solo unendo, con un'intensa e stretta attività di collaborazione, le competenze dei soggetti operanti nel campo della ricerca scientifica e quelle delle imprese operanti nel campo delle tecnologie sottomarine.

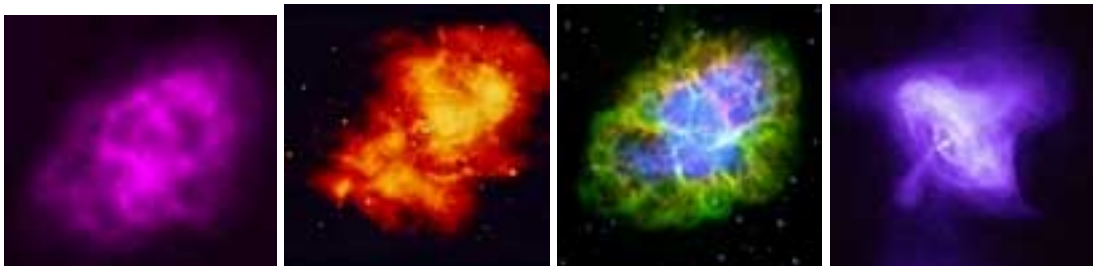
I risultati delle ricerche che si intende condurre non solo saranno un formidabile strumento per la comprensione del Mar Mediterraneo e degli ambienti oceanici in generale ma potrebbero anche essere utilizzati in previsione di un più razionale sfruttamento delle risorse nei limiti della tutela ambientale.

## 2 Programma scientifico

Il laboratorio sottomarino proposto rappresenterà un'infrastruttura unica nel Mar Mediterraneo per lo sviluppo di attività interdisciplinari in ambiente marino profondo. Numerosi sono i temi di ricerca che potranno essere affrontati con un tale laboratorio. Essi spaziano dall'oceanografia, alla sismologia, alla biologia fino all'astrofisica ed alla fisica delle particelle. In questo capitolo daremo una breve descrizione dei principali temi di ricerca che potranno essere affrontati.

### 2.1 Astronomia con neutrini

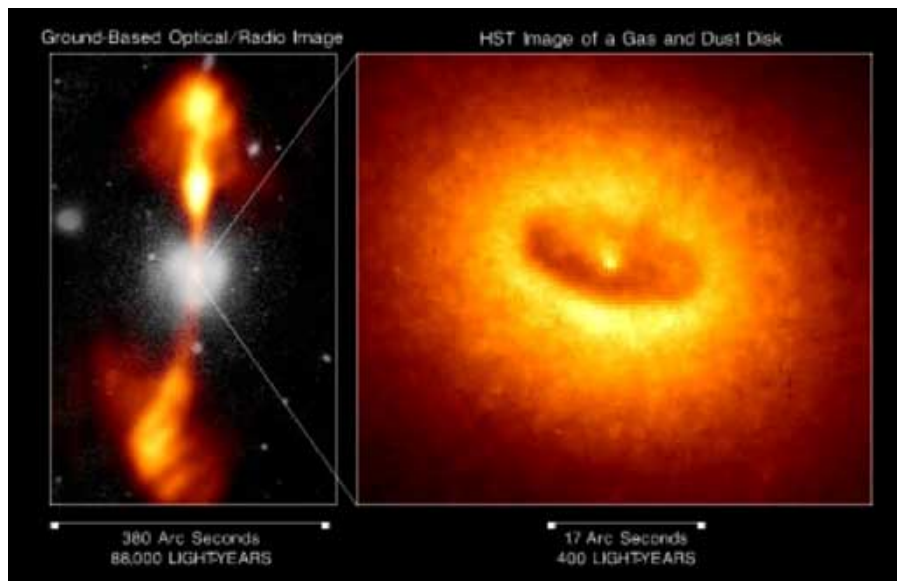
Quasi tutto ciò che oggi conosciamo dell'Universo deriva dall'osservazione per mezzo di onde elettromagnetiche. La radiazione elettromagnetica ha molti vantaggi dal punto di vista osservativo, soprattutto perché è insensibile all'azione dei campi magnetici ed è rivelabile su un intervallo di energie enormemente esteso: dalle onde radio, alla radiazione infrarossa, alla luce visibile, all'ultravioletto, ai raggi-X e ai gamma (fig. 2). Lo svantaggio è rappresentato dal fatto che le regioni interne degli oggetti cosmici, dove avviene la produzione di energia, sono opache alla radiazione elettromagnetica e



*Fig. 2 - La Nebulosa del Granchio, resto di una Supernova esplosa nel 1054, osservata in diverse lunghezze d'onda: radio, infrarosso, visibile e X.*

pertanto inaccessibili all'osservazione diretta. Ad esempio la luce che ci arriva dal Sole viene solo dalla sua superficie, la "fotosfera", mentre il nucleo centrale, all'interno del quale avvengono le reazioni nucleari di produzione di energia, non è osservabile ed i meccanismi che lo fanno funzionare possono essere dedotti solo per via indiretta.

Recentemente l'osservazione mediante luce visibile, onde radio e radiazione di alta energia (gamma e X) ci ha permesso di scoprire sorgenti estremamente potenti, probabilmente azionate dalla presenza di un buco nero di massa circa un milione di volte la massa del Sole, che sono localizzate ai limiti dell'Universo osservabile (fig. 3). Sfortunatamente l'osservazione di queste sorgenti per mezzo di raggi gamma, che potrebbe forse svelarci il meccanismo di funzionamento di questi sistemi, ci è preclusa in quanto la radiazione elettromagnetica di alta energia non riesce a giungere fino a noi a causa dell'assorbimento causato dalla presenza della radiazione cosmica di fondo che



*Fig. 3– La galassia attiva NGC 4261 vista con lo Hubble Space Telescope. Il nucleo della galassia, visibile nella foto a destra, mostra un disco di materia riscaldata dalla caduta verso il buco nero che presumibilmente si trova al centro. Il meccanismo produce anche l’espulsione dei due getti di gas che sono visibili nell’immagine a sinistra.*

permea l’intero Universo. Questo assorbimento limita l’orizzonte osservabile con gamma di alta energia a circa 500 milioni di anni luce.

Qualche altra informazione ci giunge per mezzo dei raggi cosmici: protoni o nuclei atomici più pesanti. Queste particelle però sono cariche e subiscono l’effetto dei campi magnetici presenti nella galassia e negli spazi intergalattici che ne deflettono le traiettorie impedendoci di identificare il loro punto di origine.

Quello che è necessario per sondare le profondità dell’universo è uno strumento che sia in grado di vedere particelle che non sono influenzate dal gas, dalle polveri, dalla radiazione elettromagnetica di fondo e dai campi magnetici che incontrano nel loro viaggio verso di noi. L’unico candidato conosciuto che risponda a tutti questi requisiti è il neutrino. Questa particella neutra interagisce solo debolmente con la materia e può così arrivare indisturbata direttamente dalla sorgente a noi viaggiando ad una velocità prossima a quella della luce.

Diversi rivelatori di neutrini sono oggi in funzione per osservare i neutrini di bassa energia provenienti dal Sole, permettendoci così l’osservazione diretta delle reazioni nucleari che avvengono all’interno del Sole che è altrimenti inaccessibile all’osservazione ottica. Questi “telescopi” sono anche sensibili ai neutrini prodotti dall’esplosione di Supernovae nella nostra galassia o nelle immediate vicinanze. In effetti due di questi esperimenti, l’americano IMB ed il giapponese Kamiokande, registrarono un breve lampo di neutrini in coincidenza con la Supernova 1987A (fig. 4) che è stata l’ultima esplosione di Supernova avvenuta a distanza relativamente piccola da noi.

La realizzazione di un telescopio per neutrini di alta energia ci permetterebbe di estendere la distanza accessibile all’osservazione di svariati ordini di grandezza,

permettendo di studiare oggetti e fenomeni ai limiti dell'universo, prodotti a tempi prossimi al Big Bang.

A causa della bassa probabilità di interazione del neutrino con la materia, la rivelazione dei neutrini è estremamente difficile e richiede rivelatori di grande volume. Rivelatori da migliaia di tonnellate sono necessari per rivelare i neutrini di bassa energia provenienti dall'interno del Sole. Con questi dispositivi, però, la rivelazione di neutrini di bassa energia da sorgenti a distanze cosmologiche è impossibile a causa del volume insufficiente del rivelatore. La situazione cambia quando si prendono in considerazione i neutrini d'alta energia, essenzialmente perché la probabilità di interazione cresce all'aumentare dell'energia e perché i prodotti dell'interazione del neutrino con il rivelatore diventano più facilmente rivelabili quando l'energia rilasciata è maggiore.

Le stime dei flussi di neutrini attesi stabiliscono che per poter affrontare il problema dell'astronomia con neutrini d'alta energia è necessario un rivelatore con un'area sensibile di almeno un km<sup>2</sup>. Un rivelatore per neutrini di così grandi dimensioni potrebbe anche rendere possibile lo studio di esplosioni di supernova all'interno della nostra galassia.

La rivelazione di particolari segnali di eventi da neutrini è altresì il modo per indagare possibili forme di materia oscura. Oggi è un fatto accettato dalla comunità scientifica che la gran parte della materia che costituisce l'Universo sia non luminosa e quindi non osservabile direttamente. L'evidenza più chiara di questo è data dall'osservazione del moto di rotazione delle galassie che implica la presenza di una massa che eccede di molto quella delle stelle costituenti. Modelli teorici sostengono che una larga componente della materia oscura potrebbe essere costituita da particelle neutre, pesanti e interagenti solo debolmente (Weakly Interacting Massive Particles: WIMP). Queste particelle, catturate per gravità nel centro del Sole o della Terra, annichilirebbero tra loro dando luogo ad un flusso di neutrini di alta energia direzionale e sufficientemente intenso per essere identificato. La rivelazione di questi flussi fornirebbe informazioni sulla natura della materia oscura complementari a quelle accessibili con gli esperimenti agli acceleratori.

Il metodo che sembra più promettente per la rivelazione dei neutrini è l'identificazione dei muoni prodotti dall'interazione dei neutrini nel rivelatore. I muoni sono particelle cariche molto penetranti e sufficientemente pesanti (200 volte la massa di un elettrone) da non perdere tutta la loro energia per via di emissioni elettromagnetiche. Se il muone prodotto si propaga a velocità superiore a quella della luce in acqua esso genera, con un



*Fig. 4 - Le nubi di gas in espansione che si vedono in questa foto presa dallo Hubble Space Telescope è ciò che resta della Supernova 1987A, una stella esplosa nel febbraio 1987 nella Grande Nube di Magellano.*

meccanismo detto effetto Cherenkov simile a quello che porta al “bang” caratteristico di un jet che supera la velocità del suono, un fronte luminoso con un angolo ben determinato rispetto alla sua direzione di moto. L’angolo Cherenkov in acqua è di circa  $42^\circ$  per la radiazione visibile. Equipaggiando grandi volumi d’acqua (o ghiaccio) con sensori capaci di rivelare segnali luminosi anche debolissimi, si può identificare la traccia del muone. Poiché i muoni di altissima energia si propagano per distanze dell’ordine del km con direzione prossima a quella del neutrino che li ha generati, e ne trasportano in media il 50-60% dell’energia, identificare una traccia di muone permette di risalire alle informazioni sul neutrino incidente.

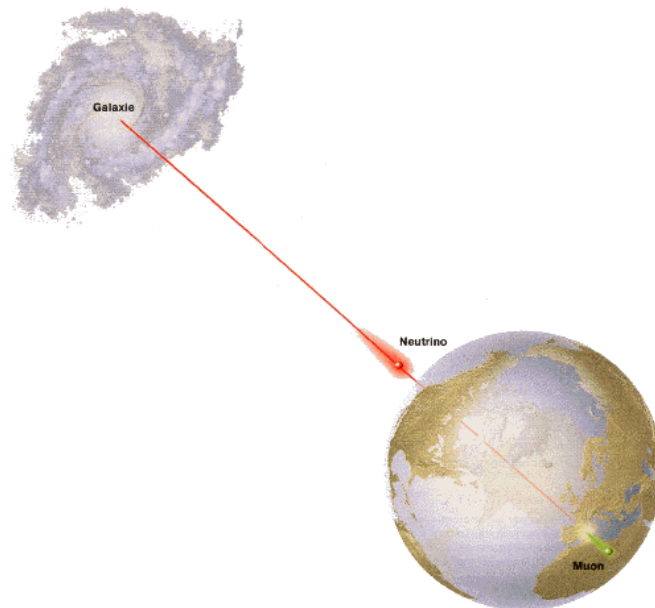
La necessità di ricostruire la traccia del muone, unita a quella di avere un’area sensibile dell’ordine di un  $\text{km}^2$ , impone di avere una struttura “tridimensionale” con lato di circa un km: da qui il nome  $\text{km}^3$  o “chilometro cubo” con qui questo rivelatore viene convenzionalmente nominato.

Una difficoltà costruttiva dei rivelatori di neutrini è rappresentata dal fatto che essi devono essere schermati dalla “pioggia” dei muoni “atmosferici”, prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici adronici (protoni e nuclei) con l’atmosfera. Il flusso dei muoni atmosferici è cento miliardi di volte ( $10^{11}$ ) più intenso di quello atteso dai muoni prodotti da neutrini astrofisici. Un rivelatore, posto per esempio al livello del mare, non schermato dal flusso di muoni atmosferici, sarebbe “accecato” da queste particelle e non potrebbe distinguere i segnali di interesse astrofisico. Questa è la ragione per cui i rivelatori per neutrini devono essere collocati a grandi profondità sotto terra dove gli spessi strati di roccia sovrastanti riducono fortemente l’intensità del flusso di muoni atmosferici.

Questa soluzione è ovviamente improponibile per un rivelatore delle dimensioni di un “chilometro cubo”. Il modo più efficace per ovviare al problema è costruire il rivelatore nelle profondità delle fosse marine abissali. L’acqua che circonda il rivelatore assolverebbe così ad una triplice funzione: schermo per gran parte della radiazione atmosferica (a 3500 metri ne riduce il flusso di un milione di volte); “bersaglio” su cui i neutrini interagiscono producendo muoni; mezzo trasparente in cui si produce e propaga il segnale Cherenkov.

Nonostante l’enorme spessore d’acqua che lo scherma, alcuni dei muoni atmosferici possono ancora raggiungere il rivelatore, dando origine ad un segnale indistinguibile da quello generato da un neutrino. La soluzione a questo problema sta nel cercare quei segnali che provengono dalla direzione che è schermata dall’intero spessore della Terra. Solo i neutrini, infatti, possono attraversare indisturbati un tale spessore di materia e interagire in prossimità del rivelatore. La peculiarità di un siffatto telescopio per neutrini è quindi che esso invece di guardare verso “l’alto”, come gli strumenti astronomici a cui siamo abituati, guarderà solo verso il “basso” (fig. 5). Pertanto solo una parte della volta celeste sarà accessibile ad un telescopio collocato nell’emisfero boreale, ed un’esplorazione completa del cielo sarà possibile solo se questo strumento sarà complementato da uno analogo nell’altro emisfero. Il vantaggio di essere collocato nell’emisfero nord è che esso potrà guardare alla parte di cielo che contiene la maggior parte delle sorgenti più interessanti tra cui il centro della nostra galassia.

In apparati così realizzati si prevede che il numero di eventi prodotto da neutrini astrofisici con energie superiori a 10 TeV, sia maggiore del rumore di fondo. In



*Fig. 5 – Un telescopio sottomarino per neutrini utilizza la schermatura della terra per identificare i neutrini, guardando i neutrini provenienti “dal basso” (immagine ANTARES).*

particolare, l'identificazione di muoni con traiettorie dirette dal fondo del mare verso la superficie, è un chiaro segnale di un evento prodotto da un'interazione di neutrino avvenuta in prossimità del rivelatore.

Lo schema costruttivo del telescopio è, nel principio, semplice: si devono disporre in acqua profonda (3000÷4000 m) i sensori ottici secondo una geometria tale da rendere possibile la ricostruzione delle tracce dei muoni. La distanza fra le coppie di moduli ottici è funzione delle proprietà di propagazione della luce nell'acqua circostante: minore è l'assorbimento della luce, maggiore potrà essere la distanza fra i moduli ottici. Il numero di moduli ottici necessari alla misura, e quindi il costo del rivelatore stesso, è tanto minore quanto migliore è la trasparenza dell'acqua. I moduli ottici hanno il compito di generare una risposta elettronica che è funzione del numero dei fotoni Cherenkov rivelati e del loro tempo di arrivo. Occorre poi trasmettere i segnali elettronici ad un laboratorio a terra dove sono concentrati i mezzi di calcolo necessari ad analizzarli e decodificarli per estrarne le informazioni fisiche rilevanti.

Nonostante l'idea di realizzare un telescopio sottomarino per neutrini risalga agli anni '60 solo oggi le tecnologie necessarie per l'impresa sono disponibili ed il progetto risulta realizzabile. Dopo l'esperienza pionieristica dell'esperimento DUMAND (ora chiuso) nei pressi delle isole Hawaii, quattro collaborazioni internazionali, oltre alla collaborazione NEMO, sono oggi attive con programmi di Ricerca & Sviluppo e di realizzazione di prototipi dimostratori. In Russia l'esperimento BAIKAL ha già installato a circa 1000 m di profondità nel lago Baikal (Siberia) 200 rivelatori. L'apparato AMANDA ha invece optato per la soluzione alternativa di installare i rivelatori nelle profondità del ghiaccio al Polo Sud. Al momento è composto da circa



700 rivelatori, ma con il progetto ICECUBE ne è prevista l'espansione alle dimensioni del km<sup>3</sup> che ne farà il telescopio per neutrini cosmici dell'emisfero australe. Nel Mediterraneo è in corso un'attività di Ricerca & Sviluppo da parte della collaborazione NESTOR in Grecia, mentre la collaborazione ANTARES, che coinvolge ricercatori di Francia, Italia, Olanda, Spagna, Gran Bretagna e Russia è attualmente impegnata nella realizzazione di un apparato dimostratore da un decimo di km<sup>2</sup>, che sarà immerso al largo di Tolone ad una profondità di 2400 m. I ricercatori di ANTARES e NEMO collaborano inoltre ad un'attività di caratterizzazione dei siti e di Ricerca & Sviluppo in vista della realizzazione del rivelatore km<sup>3</sup>.

## 2.2 Monitoraggio geofisico e ambientale

La comunità scientifica internazionale ha recentemente definito prioritaria, nella ricerca geofisica avanzata, l'acquisizione di dati in aree del globo terrestre finora prive di punti di osservazione. In generale l'osservazione di dati geofisici-ambientali in ambiente marino in alcune aree chiave del pianeta, per cui ancora non esistono dati sufficienti, rappresenta il passo necessario per lo sviluppo di modelli relativi alla dinamica della geosfera e alle sue interazioni con gli oceani e l'atmosfera.

L'area al largo di Capo Passero è parte di una zona più ampia di particolare interesse geofisico e ambientale, che si estende dalla Scarpata di Malta alla Tunisia orientale e comprende la Piattaforma di Ragusa fino al continente africano. Lo studio delle strutture crostali e litosferiche che compongono questa regione appaiono fondamentali per la comprensione dell'evoluzione geodinamica dell'intero Mediterraneo. Queste strutture geologiche offrono una grande opportunità di sviluppo delle conoscenze nel campo della sismologia e della vulcanologia, rappresentando dei "laboratori naturali" unici. La loro attività, al contempo, comporta l'esigenza di un continuo controllo del territorio, per affrontare anche le problematiche di protezione civile che scaturiscono dall'ingente antropizzazione dell'area. L'area risulta avere anche un'importanza dal punto di vista oceanografico, in quanto rappresenta una zona chiave nella circolazione delle correnti provenienti dai bacini mediterranei orientali.



Fig. 6 – L'osservatorio oceanografico GEOSTAR.

Il monitoraggio multidisciplinare attraverso un osservatorio abissale,

integrato nel laboratorio NEMO, permetterà di caratterizzare le condizioni ambientali e geofisiche in cui opererà il sistema di rilevazione di neutrini e di evidenziare, pertanto, eventuali fattori che condizionano il suo funzionamento e le misure effettuate. In particolare si potranno definire le variazioni (stagionali o casuali) dei fenomeni che hanno luogo nell'ambiente marino interessato: direzione e intensità delle correnti, variazioni di temperatura, torbidità, salinità, e conducibilità dell'acqua marina, monitoraggio di fenomeni geofisici quali l'attività sismica, le variazioni del campo geomagnetico e gravitazionale.

Un passo avanti fondamentale nell'esplorazione degli ambienti marini profondi è stato ottenuto recentemente con la realizzazione della stazione sottomarina GEOSTAR (Geophysical and Oceanographic STation for Abyssal Research) (fig. 6) da parte di una collaborazione internazionale coordinata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. GEOSTAR è un osservatorio sottomarino multidisciplinare, ad impatto ambientale nullo sia in fase di installazione che in fase operativa, progettato per essere funzionante in un ampio intervallo di profondità così da essere utilizzato sia in aree costiere sia a profondità abissali (fino a 6000 m) ed è rapidamente integrabile con reti di monitoraggio ambientale già esistenti a terra.

Dall'esperienza di GEOSTAR potranno essere derivate le tecnologie per sviluppare altre stazioni sottomarine da integrare nel laboratorio sottomarino NEMO.

## 2.3 Monitoraggio oceanografico

Numerosi studi recenti basati sia sull'analisi di dati idrologici e correntometrici e sia su simulazioni mediante modelli idrodinamici, hanno dimostrato variazioni di tipo climatico della circolazione profonda del Mediterraneo Orientale.

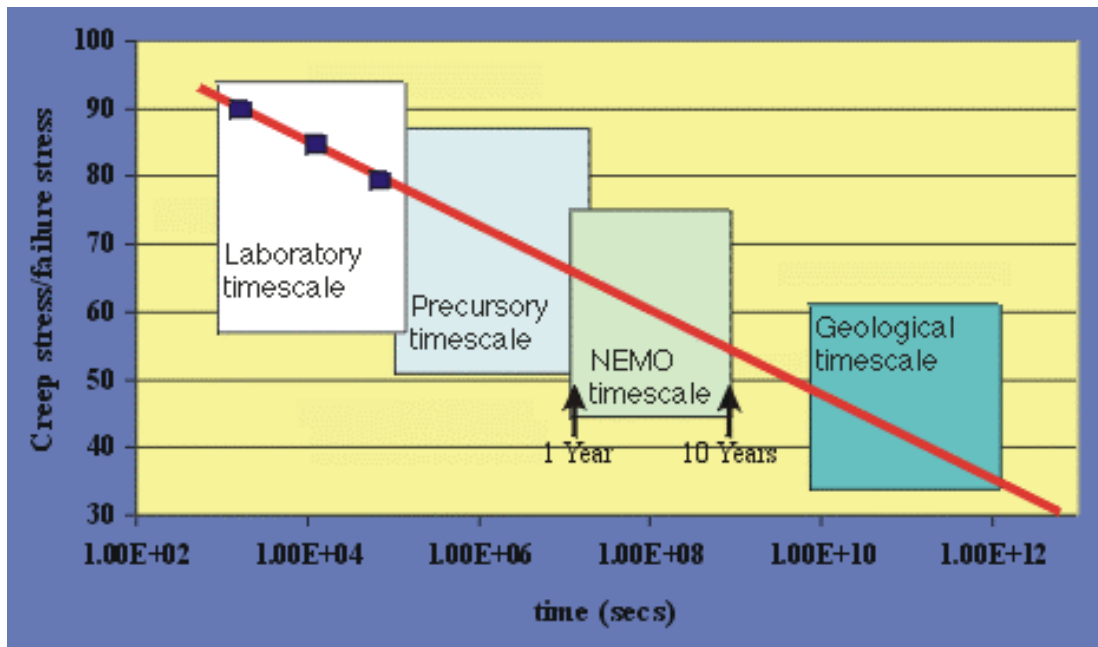
In particolare, intensive campagne di misura iniziate all'inizio degli anni 80 nell'ambito del Progetto Internazionale denominato "POEM" (Physical Oceanography of the Eastern Mediterranean) avevano dimostrato l'esistenza di uno strato omogeneo di acqua sotto la profondità di 1200 m che riempiva tutto il Mediterraneo orientale. Il tempo di ricambio di questa massa d'acqua era stato stimato in circa 126 anni. L'origine di tali acque profonde era principalmente dovuta alla formazione di acqua densa in Adriatico che fuoriusciva dallo Stretto di Otranto. Negli anni 90, si è evidenziato un secondo nucleo di acqua densa proveniente dall'Egeo. La situazione attuale quindi presenta due sorgenti di acqua densa: l'Adriatico e l'Egeo. Anzi quella di provenienza dall'Egeo è molto più significativa di quella derivante dall'Adriatico.

Non è ancora chiara del tutto l'origine di queste variazioni, anche se sembra ormai evidente che il ruolo del forzante atmosferico e della sua variabilità climatica ne è il principale artefice. Il Mar Ionio è un sito estremamente sensibile a queste variazioni delle acque di fondo in quanto riceve sia le acque di fondo provenienti dall'Adriatico sia quelle "nuove" provenienti dall'Egeo. In tale contesto, le misure già effettuate nell'ambito del progetto NEMO, sono significative e, al fine di valutare scenari climatologici, è importante che continuino ad essere acquisite per un lungo periodo.

## 2.4 Studio di processi di deformazione e fratturazione di rocce

La prevenzione dei fenomeni sismici e vulcanici richiede, oltre al monitoraggio del territorio, anche la comprensione dei meccanismi che ne sono all'origine. A questo scopo lo studio in laboratorio delle proprietà di rocce sottoposte a deformazione è indispensabile allo scopo di definire parametri cruciali per una corretta interpretazione della fisica dei processi di deformazione e fratturazione che determinano terremoti ed eruzioni vulcaniche. Lo sforzo principale è attualmente rivolto alla comprensione dei fenomeni precursori, che si sviluppano sulla scale dei mesi o degli anni, che precedono gli eventi catastrofici.

Le alte pressioni delle profondità marine possono costituire anche uno strumento unico per lo studio e la comprensione dei processi di deformazione e fratturazione delle rocce.



*Fig. 7 - Realazione tra lo stress applicato ed il tempo di fratturazione delle rocce. L'affidabilità dell'estrapolazione dei dati di laboratorio, sulla scala dei giorni, ai tempi di interesse geofisico sarebbe fortemente rafforzata da misure su scale di tempo tra uno e dieci anni.*

A tale scopo è necessario studiare le relazioni che intercorrono tra l'aumento degli stress tettonici nel tempo e i precursori a medio e breve termine (anni e mesi). Lo studio di questi processi è irrealizzabile sul terreno, dove le misure di stress sono ricavate indirettamente da misure di deformazione a grande scala (dalle decine alle centinaia di chilometri), ma è effettuabile mediante esperimenti controllati di deformazione e fratturazione su campioni di rocce di alcune decine di centimetri in laboratorio. La calibrazione di opportune leggi di scala consente di estrapolare le misure alla scala reale.

La tecnica di laboratorio consiste nel sottoporre a pressione dei campioni di roccia in maniera da simulare il carico a cui sono soggetti in natura. La deformazione viene quindi monitorata come funzione del tempo necessario a generare la rottura. Per ottenere misure

temporali comparabili con i precursori geofisici misurati sul terreno (da anni a mesi) bisognerebbe operare misure sulla stessa scala di tempo (fig. 7). In laboratorio, per ragioni esclusivamente tecniche non sono effettuabili misure attendibili oltre alle 24 ore, in quanto non è possibile mantenere costante la pressione confinante per lunghi periodi di tempo. Un'alternativa è offerta dalla possibilità di utilizzare le alte pressioni delle profondità marine per lunghi periodi di tempo. Un progetto proposto da ricercatori del Rock and Ice Physics Laboratory dello University College of London prevede la realizzazione di una piattaforma per ospitare alcune decine di campioni di roccia equipaggiati con i trasduttori necessari a monitorare la deformazione e le emissioni acustiche generate nel tempo.

Il laboratorio sottomarino NEMO possiede quattro requisiti indispensabili per operare un siffatto studio di dipendenza temporale della deformazione di rocce cristalline:

- la scala temporale del progetto NEMO è ideale per lo studio a lungo termine illustrato;
- la pressione idrostatica naturale generata dal mare consente di mantenere lo stress costante per l'intera durata degli esperimenti;
- la profondità del sito, che permette di applicare le pressioni necessarie alla simulazione degli stress cristalline che interessano gli strati sismogenetici superficiali ( $\approx 1.5$  Km di profondità) dove avvengono gli eventi sismici e vulcanici importanti in termini di rischio sismico;
- il supporto infrastrutturale necessario per la messa in posto dei sistemi deformativi e per l'acquisizione dati.

## 2.5 Bioacustica

Il Mar Mediterraneo ospita 19 specie di cetacei, otto dei quali sono da considerarsi comuni e diffusi, quattro occasionali e sei accidentali, solo occasionalmente avvistati o spiaggiati negli ultimi 120 anni.

Bioacustica marina e oceanografia acustica sono particolarmente importanti per studiare questi animali che fanno del suono uno strumento fondamentale di sopravvivenza. Fra le specie comuni, costantemente presenti in Mediterraneo, le due specie di maggiori dimensioni, il capodoglio (*Physeter macrocephalus*) e la balenottera (*Balaenoptera physalus*), compiono movimenti stagionali che li portano nei mesi estivi nelle acque italiane più produttive e soprattutto in Mar Ligure. In primavera gli animali si muovono dal bacino orientale del Mediterraneo per raggiungere il basso Tirreno e poi il Mar Ligure e compiono il percorso inverso a fine estate e in autunno.

Individuare tempi e rotte di questi movimenti stagionali, nonché le variazioni annuali e le possibili cause di tali variazioni (climatiche, biologiche o antropiche) porterà un notevole contributo per la conoscenza di questi mammiferi marini e del loro ruolo ecologico nonché per la messa a punto di strategie di tutela.

Poiché si tratta di animali che in immersione emettono segnali acustici caratteristici, suoni a bassa frequenza le balenottere e sequenze di segnali impulsivi a banda larga i capodogli, i ricercatori usano la bioacustica come strumento per rilevarne la presenza e i movimenti anche a grande distanza.

Per la collocazione geografica e il collegamento a terra in fibra ottica, il laboratorio sottomarino NEMO rappresenta un'eccellente postazione per installare una stazione di ascolto subacqueo per lo studio dei mammiferi marini e del rumore ambientale. Questa opportunità è estremamente importante per lo sviluppo di un sistema di ascolto a banda larga con possibilità di localizzazione e tracciamento delle sorgenti acustiche di interesse.

La realizzazione di questa stazione rappresenterà un significativo sviluppo delle ricerche sugli ecosistemi marini del Mediterraneo, sull'uso degli ecosistemi stessi da parte dei mammiferi marini, sulle loro strategie di comunicazione e sull'inquinamento acustico. Fra le specie del Mediterraneo, balenottere e capodogli sono i soggetti ideali per tale progetto, per le loro caratteristiche acustiche e perché rappresentano una componente biologica importante sulla quale le conoscenze scientifiche relative a spostamenti, habitat critici, cicli biologici, consistenza numerica, sono ancora insufficienti. Un progetto pilota di questo tipo sarà inoltre il banco di prova per estendere l'applicazione di strumenti di rilevamento remoti – autonomi e non – alle ricerche di bioacustica subacquea e di oceanografia acustica. Direzione nella quale si stanno già orientando diversi gruppi di ricerca.

La realizzazione del progetto NEMO rappresenterà un significativo sviluppo delle ricerche sugli ecosistemi marini del Mediterraneo, sull'uso degli ecosistemi stessi da parte dei mammiferi marini, sulle loro strategie di comunicazione e sull'inquinamento acustico. Balenottere e capodogli sono i soggetti ideali per tale progetto, per le loro caratteristiche acustiche e perché rappresentano una componente biologica importante sulla quale le conoscenze scientifiche relative a spostamenti, habitat critici, cicli biologici, consistenza numerica, sono ancora insufficienti.

Cortine di idrofoni disposti in sequenze orizzontali e verticali, attraverso tecniche di "beamforming" potranno dare una precisa localizzazione spaziale, con precisione anche di 3-5 gradi, delle sorgenti acustiche ed estendere la distanza di rilevamento a diverse decine di chilometri. In questo modo sarà possibile contare gli animali che vocalizzano e descriverne le traiettorie. Questa capacità analitica potrà anche essere utilizzata per esperimenti sull'effetto che il rumore può avere sugli animali: tali esperimenti si basano sull'emissione in acqua di rumore o segnali determinati per osservare le reazioni degli animali. Potendo controllare posizione e movimenti di animali in un ampio raggio si potranno effettuare esperimenti di esposizione controllata al rumore.

## 2.6 Biologia marina

Gli ambienti marini profondi sono storicamente considerati delle entità stabili, non soggette quindi alle rapide modificazioni ambientali che caratterizzano invece la fascia litorale in relazione all'interferenza antropica. Le caratteristiche oceanografiche delle zone abissali erano considerate fino a poco tempo fa pressoché immutabili, o per lo meno soggette a variazioni molto lente, riferibili ad una scala temporale geologica.

Recenti studi hanno invece dimostrato che i fondali oceanici sono soggetti a variazioni del tasso trofico-sedimentario, rilevabili addirittura su scala stagionale. Il processo di affondamento del particolato organico, derivato dalle biomasse planctoniche degli strati superficiali, può essere molto rapido e creare un considerevole strato di detrito anche su

fondali di oltre 4000 m. La sedimentazione del detrito organico a sua volta veicola lo spostamento dei batteri associati verso gli strati più profondi della massa d'acqua. Qui s'instaura un'intensa attività biologica, sostenuta dal comparto batterico, la cui densità può evolvere con andamento anche stagionale, determinando sostanziali variazioni nelle caratteristiche chimico-fisiche e trofiche delle acque profonde.

Nell'ambito degli studi sull'evoluzione globale del pianeta, acquista quindi un ruolo di primaria importanza il monitoraggio biologico dei mari profondi in una scala temporale a medio e lungo termine. Parallelamente all'opportunità di acquisire misure in continuo, ancor più interessante appare l'ipotesi di costruire una stazione fissa di rilevamento contestuale ed interdisciplinare on-line, in grado di inviare immagini ed informazioni sulla funzionalità della comparto biologico, in tempo reale.

A tale scopo sembra opportuno ipotizzare una struttura in grado di affrontare il monitoraggio degli ambienti marini profondi attraverso l'acquisizione in situ di parametri biologici, chimici e fisici, e la valutazione di elementi inquinanti. La stazione dovrebbe essere dotata di una telecamera per alta profondità, di un coulter counter, di un sensore per nutrienti e di un apparato per il prelievo e lo stoccaggio dei campioni d'acqua. I parametri oceanografici (correnti, temperatura, salinità) saranno monitorati con continuità dai sensori del laboratorio. Particolare interesse riveste anche la misura in linea della bioluminescenza che sarà ottenibile dai dati dei sensori ottici del telescopio sottomarino.

## 3 Il sito di installazione

Nel periodo 1998-2001 la collaborazione NEMO ha condotto un'intensa attività per la ricerca e caratterizzazione di un sito adatto all'installazione del laboratorio sottomarino. Diversi siti abissali nelle acque del Mediterraneo prossime alle coste italiane sono stati esaminati prima di arrivare alla scelta della regione al largo di Capo Passero nel sud della Sicilia. Le considerazioni che hanno portato a questa scelta sono molteplici. In questo capitolo presenteremo i criteri generali adottati per la selezione del sito e daremo una breve descrizione delle attività di studio condotte e dei risultati ad oggi conseguiti per la completa caratterizzazione del sito prescelto.

### 3.1 Criteri di selezione

I criteri considerati per la scelta del sito abissale sono i seguenti:

- profondità;
- vicinanza alla costa;
- qualità di trasparenza dell'acqua;
- bassa attività di sedimentazione;
- condizioni stabili di correnti sottomarine.

#### ***Profondità***

L'intenzione di installare nel laboratorio sottomarino un apparato di rivelazione per neutrini impone di dover avere al di sopra dell'apparato uno spessore d'acqua sufficiente per schermarlo dal flusso di muoni atmosferici. *Questo impone di dover installare il rivelatore ad una profondità superiore a 3000 m.*

#### ***Vicinanza alla costa***

La trasmissione dei dati dal rivelatore al laboratorio a terra, così come la trasmissione dell'energia necessaria all'apparato sottomarino, necessita 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. 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. *È pertanto opportuno che il sito sia localizzato ad una distanza non superiore a 100 km dalla costa.*

#### ***Trasparenza dell'acqua***

Il principio di funzionamento del telescopio per neutrini si basa sulla rivelazione della debolissima luce Cherenkov emessa dal muone che si propaga nel volume sensibile del rivelatore. La sensibilità del rivelatore è determinata non solo dall'estensione

geometrica del volume strumentato, ma dipende anche delle proprietà di trasmissione della luce nell'acqua. *Il sito deve avere ottime proprietà di propagazione per la luce Cherenkov che si situa nella regione blu dello spettro visibile.*

#### ***Attività di sedimentazione***

Il deposito di sedimenti sui sensori installati nel laboratorio, in particolare sui sistemi di rivelazione ottica, ne riduce l'efficienza. *Pertanto il tasso con cui il sedimento si deposita al fondo deve essere il più basso possibile.*

#### ***Stabilità ed intensità delle correnti sottomarine***

Le correnti sottomarine nelle regioni abissali sono solitamente di bassa intensità (dell'ordine di qualche cm/s) con picchi non superiori a 10-20 cm/s. Correnti di questa intensità non rappresentano un problema per il funzionamento delle strutture che si intendono installare. È stato però dimostrato che l'intensità del fondo luminoso dovuto a bioluminescenza è fortemente dipendente dalla velocità della corrente; gli organismi bioluminescenti sono, infatti, stimolati dal moto della massa d'acqua. *È pertanto opportuno che le correnti abbiano la più bassa intensità possibile e siano stabili in direzione.*

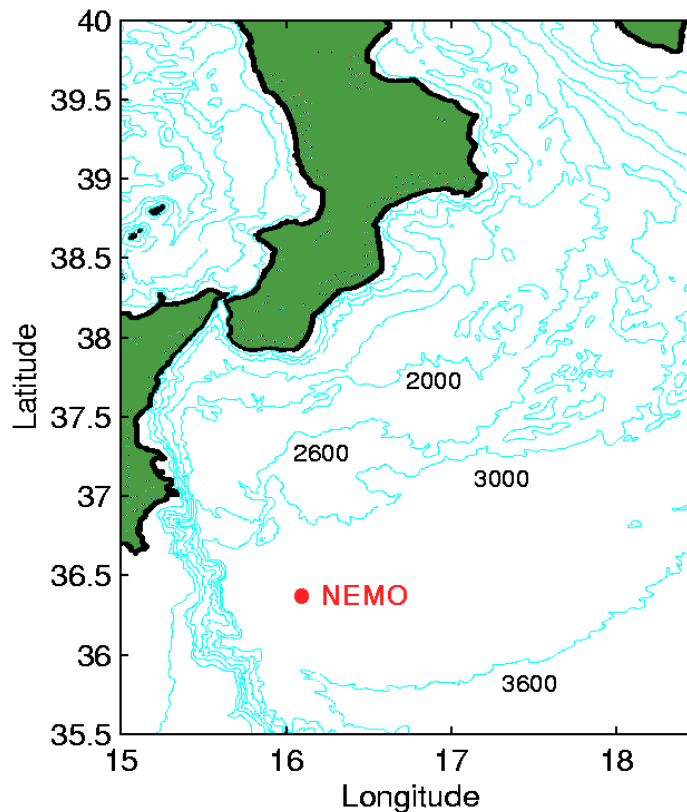


Fig. 8 – IL sito di installazione del laboratorio sottomarino NEMO.



## 3.2 Il sito prescelto

Il sito prescelto (fig. 8) si trova nel basso Ionio a circa 60 miglia ad Est di Capo Passero, in una regione centrata intorno al punto di coordinate  $36^{\circ} 19' N$ ,  $16^{\circ} 05' E$ . In questa regione il fondale è sostanzialmente piatto su un'estensione di svariate miglia quadrate, con una profondità di 3400 m. La collocazione definitiva del laboratorio sottomarino sarà possibile solo dopo un'accurata campagna di rilevamenti geologici sul fondale che permetteranno di stabilire con esattezza il punto più idoneo.

## 3.3 Caratterizzazione del sito

L'intensa attività di studio condotta sul sito di Capo Passero ha permesso di caratterizzare completamente la regione per quanto riguarda le proprietà ottiche dell'acqua, delle correnti e del tasso di deposizione di sedimenti al fondo, dimostrando che tutti questi parametri rispondono ai requisiti richiesti.

### 3.3.1 Misura delle proprietà ottiche dell'acqua

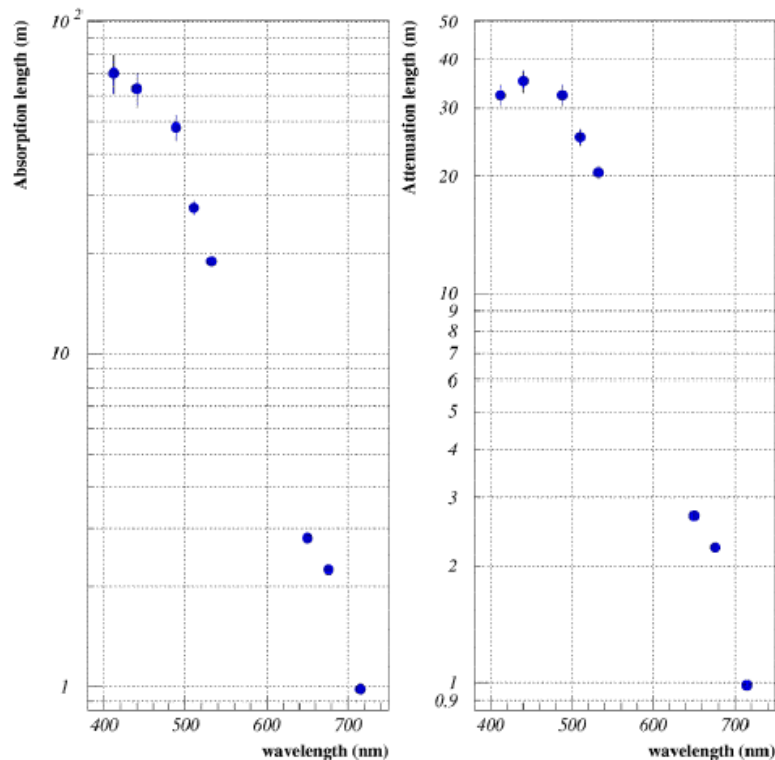
I fenomeni che influenzano la propagazione della luce nell'acqua, determinandone le sue proprietà di trasparenza, sono due: l'assorbimento e la diffusione. L'assorbimento è un fenomeno in cui l'energia del fotone è interamente rilasciata nel mezzo attraversato. Nel processo di diffusione, che può avvenire sulle molecole d'acqua o sul particolato disciolto, la direzione del fotone viene modificata ma la sua lunghezza d'onda rimane inalterata.

In acqua otticamente pura (cioè priva di particolato disciolto), l'assorbimento e la diffusione della luce visibile sono fortemente dipendenti dalla lunghezza d'onda, e presentano un minimo a circa 420 nm (per tale motivo l'acqua marina ha un colore blu-verde). 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.

La riduzione dell'intensità della luce in funzione della distanza percorsa nel mezzo a causa di fenomeni di assorbimento e diffusione è parametrizzabile in termini di lunghezza di assorbimento e diffusione,  $L_a$  e  $L_b$  rispettivamente, o dei loro inversi: i cosiddetti coefficienti di attenuazione  $a = 1/L_a$  e di assorbimento  $b = 1/L_b$ . Si definisce attenuazione la riduzione dell'intensità del fascio luminoso dovuta all'effetto combinato di assorbimento o diffusione. Il relativo coefficiente di attenuazione  $c$  è definito come somma dei coefficienti di assorbimento  $a$  e di diffusione  $b$ .

Il valore dei coefficienti di attenuazione e assorbimento è stato misurato nel sito di Capo Passero utilizzando uno strumento che permette la misura dei coefficienti per nove lunghezze d'onda che coprono tutto l'intervallo della luce visibile: da 412 nm a 715 nm.

La caratterizzazione delle proprietà ottiche dell'acqua marina è ottenuta in base al valore medio dei coefficienti di assorbimento ed attenuazione, rispettivamente, misurati alla profondità di circa 3000 m. L'osservazione ha dimostrato che in questo intervallo le proprietà dell'acqua, sia ottiche che oceanografiche, cambiano lentamente con la profondità e quindi l'intero volume d'acqua può considerarsi omogeneo.



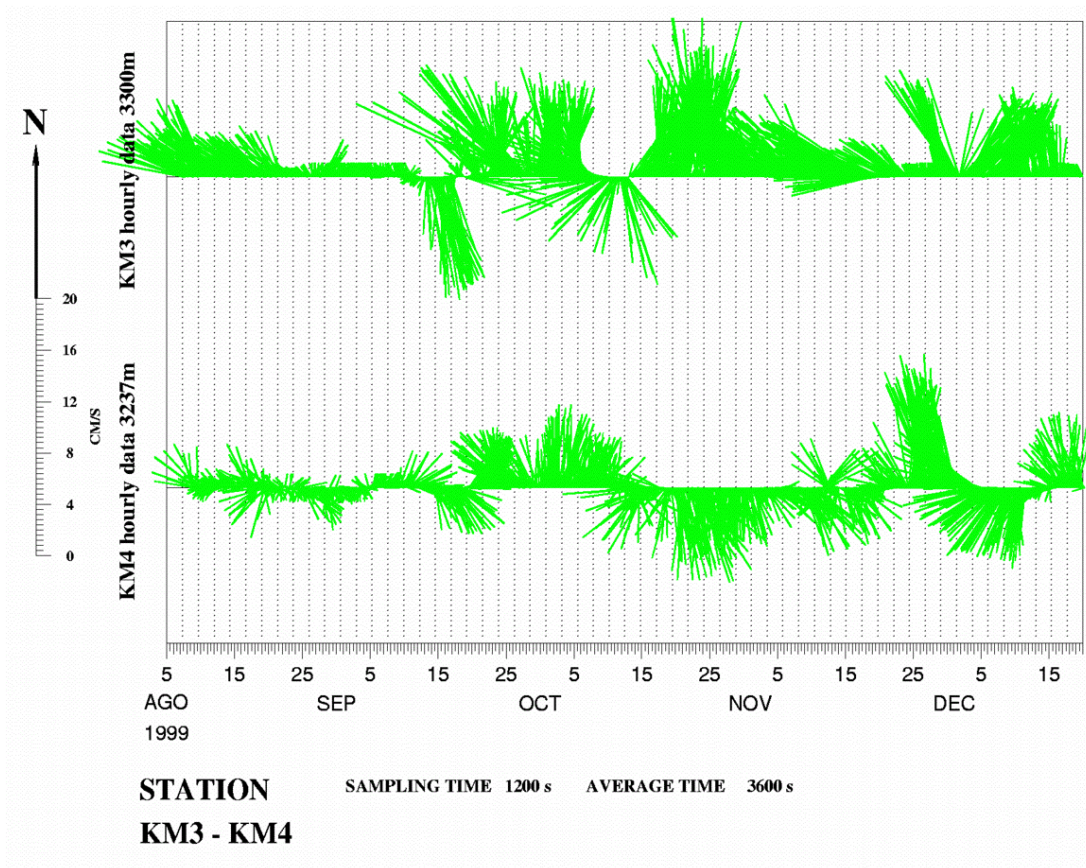
*Fig. 9 – Lunghezze di assorbimento (pannello di sinistra) e attenuazione (pannello di destra) misurati sul sito di Capo Passero.*

I risultati ottenuti sono eccellenti (fig. 9). La lunghezza di assorbimento misurata, per luce di lunghezza d'onda di 440 nm, è di circa 70 m, superiore a quella misurata negli altri siti abissali che sono stati indagati.

### 3.3.2 Correnti

L'intensità e la direzione delle correnti sottomarine nel sito di Capo Passero è stata monitorata dal luglio 1998 ad oggi per mezzo di correntometri collocati su una catena di strumentazione ancorata al fondo.

La figura 10 mostra i valori misurati per un periodo di circa 5 mesi rappresentati in forma di "stick diagram". In questa rappresentazione vettoriale la lunghezza di ogni vettore rappresenta l'intensità della corrente mentre la direzione rappresenta la direzione della corrente. Dall'analisi dei dati acquisiti emerge che la corrente di fondo sul sito (nella figura è individuato come KM4) ha una velocità media di 2-3 cm/s e presenta dei picchi di velocità di 10 cm/s. La direzione prevalente è verso Nord-Ovest. Per confronto nella figura è riportata anche la serie di dati acquisita nello stesso periodo in un sito della stessa area ma collocato più vicino alla scarpata continentale (individuato come KM3). L'intensità qui risulta essere leggermente maggiore e con direzione media Nord. posto a circa 10 miglia Per quanto concerne la KM4, la corrente ha una intensità minore e la direzione media è verso Nord-Ovest.



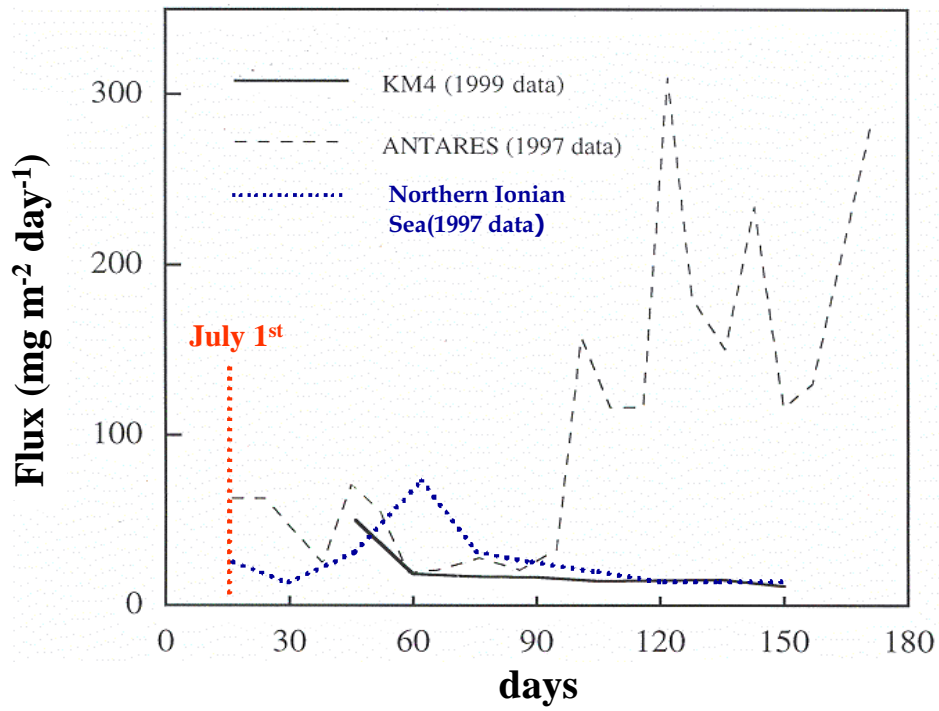
*Fig. 10 – Intensità e direzione delle correnti misurate in due stazioni nell’area di Capo Passero nel periodo agosto – dicembre 1999.*

### 3.3.3 Sedimentazione

I sedimenti che si depositano sulla superficie dei moduli ottici ne diminuiscono la trasparenza, riducendo l’efficienza dell’apparato di rivelazione per neutrini. Inoltre, la presenza di sedimenti nell’acqua influisce sulle proprietà di trasmissione della luce: può aumentare l’assorbimento e la diffusione della luce in acqua modificando sia le capacità di osservazione di un Telescopio Cherenkov sottomarino per neutrini (l’area efficace) che la sua risoluzione angolare (e quindi la capacità di identificare sorgenti puntiformi).

Il flusso di sedimento che si deposita al fondo è stato misurato utilizzando una “trappola per sedimenti”, posizionata 110 m metri al di sopra del fondo, che permette di raccogliere i depositi in una serie di bottiglie.

L’analisi dei dati raccolti nel il periodo Agosto-Dicembre 1999 indica un tasso di sedimentazione media di  $20 \text{ mg cm}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$  (fig. 11). Tale valore risulta essere in assoluto molto basso e compatibile con valori già misurati in zone limitrofe.



*Fig. 11 – Flusso dei sedimenti che si depositano al fondo sul sito di Capo Passero. I valori misurati sono confrontabili con quanto misurato in un altro sito nell'alto Ionio (al largo di Crotona) e nel sito dell'esperimento ANTARES nell'alto Tirreno (al largo di Tolone).*

## 4 Struttura del laboratorio sottomarino

Il laboratorio sottomarino NEMO è un'infrastruttura destinata a funzionare da supporto a una varietà di possibili utenze, tra cui:

- un osservatorio per la ricerca di particelle cosmiche di altissima energia;
- stazioni sottomarine di monitoraggio sismico collegate alla rete di superficie POSEIDON;
- stazioni sottomarine per il monitoraggio continuo dei parametri oceanografici e ambientali;
- una stazione per rilievi chimici e geodinamici all'interfaccia acqua-sedimento;
- una stazione per il monitoraggio permanente dei parametri biologici;
- una stazione di rilievo acustica per studi di oceanografia acustica e bioacustica, dedicata al rilevamento acustico di cetacei.

Schematicamente il Laboratorio Sottomarino, illustrato in figura 8, che si propone di realizzare consiste di:

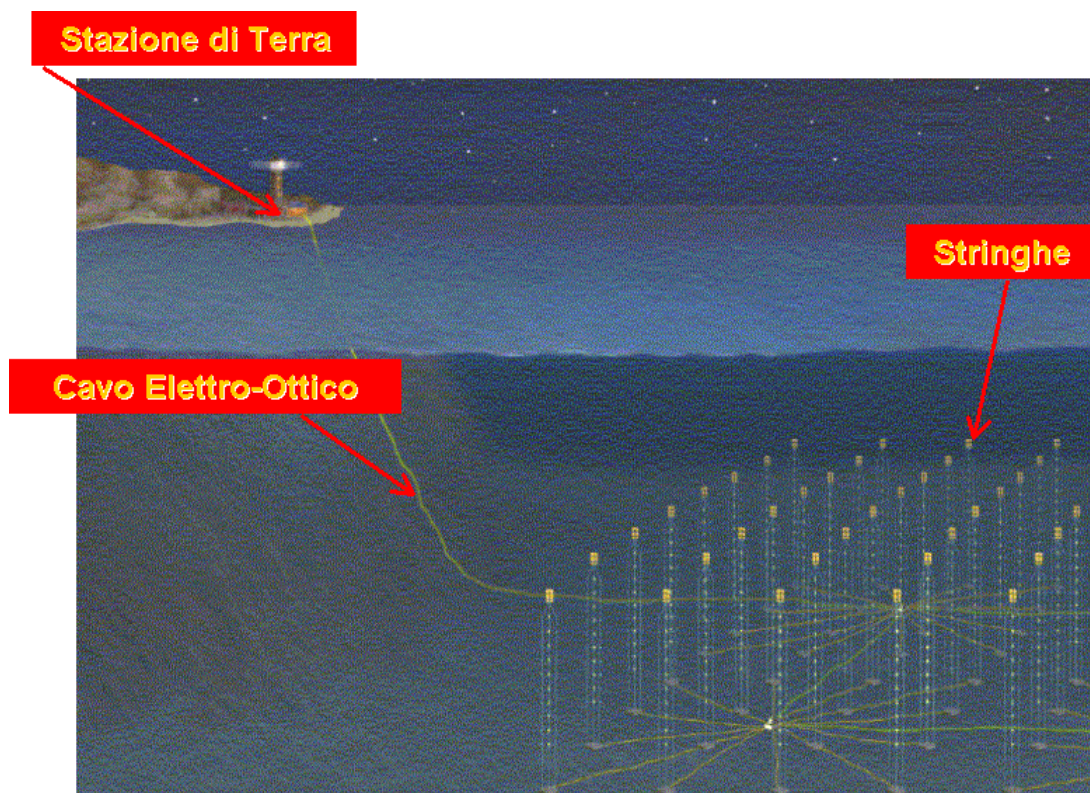


Fig. 12 - Visione artistica schematica del laboratorio sottomarino.

- una stazione a terra, collocata nei pressi di Porto Palo di Capo Passero (Sicilia), che ospita i sistemi per fornire l'energia al laboratorio di terra ed al laboratorio sottomarino, il sistema per il controllo e gestione della strumentazione ed il sistema per la raccolta dei dati;
- un rete di cavi sottomarini elettro-ottici, a sua volta costituita da un cavo principale della lunghezza di 100 km, per connettere la stazione a terra con la struttura del laboratorio ad alta profondità, e da una serie di cavi secondari, che si diramano a partire da opportune scatole di diramazione, disposti in modo da formare una maglia coprente una superficie di circa  $1.6 \times 1.6 \text{ km}^2$  del fondale marino;
- il laboratorio sottomarino propriamente detto composto da una rete di 64 strutture meccaniche, ciascuna dell'altezza di circa 700 m, ancorate al fondo e ospitanti la strumentazione di ricerca.

## 4.1 Strumentazione

La struttura descritta ospiterà in tutto il suo volume utile un notevole numero di sensori di vario tipo, che possono essere schematicamente raggruppati in sue tipologie:

- sensori ottici per la rivelazione delle tracce di particelle cosmiche;
- sensori oceanografici per la misura dei parametri ambientali dell'acqua.

### 4.1.1 Sensori ottici

Il modulo ottico (OM) è la parte fondamentale dell'apparato di misura: è questo dispositivo che rivela i fotoni Cherenkov prodotti in acqua dalle tracce dei muoni.

Diversamente dagli esperimenti di superficie, i moduli ottici per il  $\text{km}^3$  devono essere alloggiati in opportuni contenitori resistenti ad alte pressioni collegati tra loro ed a terra da un sistema di cavi e connettori elettro-ottici marinizzati.

Ogni singolo modulo ottico sarà composto da:

- un fotomoltiplicatore (PMT) di larga area: diametro 8" o maggiore;
- uno schermo di mu-metal per PMT;
- moduli di elettronica veloce per la lettura e digitizzazione dei segnali;
- moduli di elettronica lenta (slow control) per il controllo di parametri essenziali del modulo stesso (tensioni di alimentazione del PMT, delle schede, ...);
- convertitori DC-DC per la trasformazione della potenza elettrica per l'alimentazione delle schede e del PMT.

Come in simili esperimenti sottomarini il PMT e l'elettronica saranno alloggiati all'interno di una sfera in vetro borosilicato di diametro esterno di 43 cm e di spessore 15 mm. La sfera, separata in due semisfere, è garantita per resistere ad una pressione di 700 bar.

All'interno di una semisfera viene posizionato il PMT. Un gel a base di silicone garantisce l'accoppiamento meccanico ed ottico del fotocatodo al vetro. Il gel si



*Fig. 13 - Un modulo ottico assemblato (foto ANTARES).*

presenta come un liquido nel quale viene immerso il fotocatodo; la sua composizione è tale che, a temperatura e pressione ambiente, esso vulcanizza in poche ore facendo aderire perfettamente il fotocatodo alla sfera.

La parte interna della seconda semisfera, che ospita l'elettronica, è oscurata da un rivestimento nero. In questa configurazione il PMT può rivelare la luce proveniente solo dalla direzione in cui è stato rivolto il fotocatodo. Viene così mantenuta, almeno in parte, l'informazione sulla direzione della luce incidente.

Un'immagine di un modulo ottico assemblato che potrà essere utilizzato come sensore per il rilevamento della scia di luce emessa dal muone per il laboratorio sottomarino km<sup>3</sup> è mostrata in figura 13.

### ***Elettronica***

La sfera conterrà anche la parte di elettronica necessaria per la conversione analogico-digitale dei segnali. Per acquisire correttamente gli impulsi in uscita dal PMT è necessario campionarli con un ADC a 200 Msample/s a 8 bit, dopo un'opportuna compressione della loro dinamica. I dati vengono passati ad una logica programmabile che effettua una prima soppressione degli zeri ed alimenta una lunga memoria tampone che all'uscita ripropone i dati alla loro frequenza media, cioè di 50 kHz.

Poiché vengono trasmessi con protocollo seriale, i dati, per poter essere recuperati ordinatamente, devono essere identificabili con chiarezza. A questo provvede la giustapposizione ai dati della struttura di controllo, solitamente una testa ed una coda facilmente identificabili. I dati vengono completati con l'aggiunta dell'informazione relativa al tempo in cui sono stati acquisiti.

#### 4.1.2 Strumentazione oceanografica

Un osservatorio bentico multidisciplinare potrà essere derivato dal prototipo GEOSTAR. Esso sarà composto da 2 sistemi principali: l'osservatorio sottomarino (Bottom Station) e il veicolo di deposizione e recupero (Mobile Docker).

L'osservatorio ospita i sensori, i sistemi di comunicazione, l'elettronica di acquisizione e gestione dati.

I sensori ospitati in GEOSTAR sono:

- un sismometro larga banda tre componenti per la rilevazione del segnale sismico,
- un idrofono per la registrazione dei segnali sismici in banda acustica;
- due magnetometri di cui uno scalare per la misura del campo magnetico terrestre totale e uno vettoriale per la misura delle 3 componenti del campo;
- un gravimetro per la misura dell'accelerazione di gravità;
- un correntometro Doppler, per la misura dell'intensità e della direzione della corrente marina a differenti strati al di sopra della Bottom Station;
- uno strumento geochimico per la misura di pH e H<sub>2</sub>S, estensibile alla misurazione di altri parametri.
- un sensore per la misura puntuale della Conductività, Temperatura e pressione ,
- un trasmissometro per la misura della torbidità dell'acqua
- un campionatore di acqua automatico per analisi di laboratorio.

Il Mobile Docker rappresenta un sistema originale per la deposizione e il recupero dell'Osservatorio, in grado di posizionarlo sul fondo marino con una precisione lineare di circa 10m e angolare minore di un grado. Il veicolo è pilotato da un operatore che a bordo di una nave comunica con il veicolo attraverso un cavo ombelicale; nelle operazioni di aggancio/sgancio si avvale di sistemi acustici e video ed è in grado di muoversi orizzontalmente e verticalmente con 2 coppie di motori.

## 4.2 Strutture meccaniche di supporto

La strumentazione di ricerca sarà montata su strutture di supporto di altezza circa 700 m disposte sul fondo secondo un reticolo regolare con passo di circa 200 m. Ognuna porterà 64 moduli ottici più varia strumentazione.

Durante la fase di studio preliminare sono state considerate diverse configurazioni del rivelatore, che sono state prese in esame sia dal punto di vista tecnico-realizzativo, verificandone la fattibilità meccanica e i costi, sia dal punto di vista funzionale, verificandone per mezzo di opportune simulazioni numeriche le prestazioni in termini di risposta ai segnali attesi. Due tipi di struttura sono stati ritenuti dopo questo studio iniziale: quella denominata "stringa" e quella denominata "torre". Da un punto di vista logico entrambe le strutture possono essere considerate come una sequenza di "piani", ciascuno dei quali fa da supporto a un certo numero di sensori, collegati tra loro per mezzo di cavi. L'intero sistema è ancorato al fondo tramite una zavorra posta alla base e mantenuto in tensione da un opportuno galleggiante posto al suo vertice. Entrambe le



strutture sono modulari: il numero di piani può essere variato così come la distanza tra i piani. Per entrambe le strutture selezionate, in base ai risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, il numero di piani è stato fissato a 16. Sempre in base ai risultati delle simulazioni, la separazione tra piani successivi è stata fissata a 40 m. Considerando che il primo dei piani è posto ad un'altezza di circa 150 m dal fondo, risulta che ciascuna struttura sarà alta circa 750 m.

La struttura a “stringa” (fig.14) è essenzialmente una struttura monodimensionale che prevede l’installazione di 4 moduli ottici per piano, 3 rivolti verso il basso con angolo di 45° ed uno verso l’alto, a distanza ravvicinata. Ogni piano è costituito da un telaio a tre

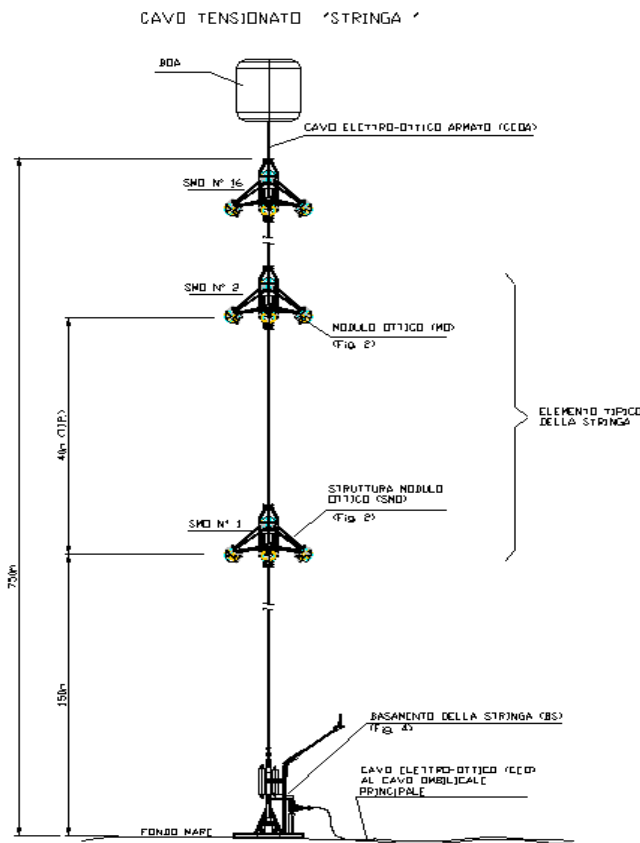


Fig. 15 - Struttura della stringa.



Fig. 14 - Struttura della torre

bracci dell'ordine del metro, con i rivelatori collocati alle estremità dei bracci ed in alto al centro. I telai sono collegati tra loro da un solo cavo elettro ottico armato che funge sia da cavo di sostegno sia da cavo per il trasporto dei segnali (su fibra ottica) e delle alimentazioni (su conduttori in rame).

La seconda configurazione – quella denominata “torre” – vuole avvicinarsi il più possibile alla semplicità costruttiva e di posa di una struttura a stringa, mantenendo i vantaggi offerti dalla configurazione a torre per ciò che riguarda la sensibilità. Come visibile in fig 15 essa è composta da 16 travi, una per piano, lunghe 20 m, con due rivelatori ad ogni estremità, rivolti uno verso il basso ed uno verso l'alto. Le travi sono spaziate verticalmente di 40 m ed ognuna è ruotata sul piano orizzontale di 90° rispetto alla precedente. Le 16 travi sono mantenute in tensione da 4 cavi di sospensione: due per ogni lato della trave, collegati come mostrato in figura 15.

I vantaggi della struttura a stringa risiedono essenzialmente nella maggiore semplicità della meccanica di supporto e delle operazioni necessarie per la posa sottomarina. La torre presenta invece notevoli vantaggi dal punto di vista della risposta complessiva del rivelatore ai segnali attesi. Le due strutture sono comunque simili in molte parti (numero e ripartizione di moduli ottici per piano, basi di supporto, distanze tra i piani), differendo solo nel tipo di traliccio usato nei piani. Questo consente innanzitutto di utilizzare la stessa logica per quanto riguarda l'interconnessione tra i rivelatori, l'elettronica e la trasmissione dati. Pertanto tutte le considerazioni che saranno sviluppate in seguito per quanto riguarda le alimentazioni, l'elettronica e la trasmissione dei dati sono applicabili ad entrambe le strutture. Questo permette di lasciare libera la scelta della configurazione finale del rivelatore che potrà, qualora i risultati di simulazioni più sofisticate ne evidenziassero la necessità, anche essere realizzato con una soluzione mista di torri e stringhe.

Le principali caratteristiche geometriche della struttura, sia stringa che piano, sono riassunte in Tab. 1.

<b>Tab. 1 Caratteristiche geometriche di stringa e torre</b>	
<b>Altezza complessiva</b>	<b>750 m</b>
<b>Distanza tra il primo piano e la base</b>	<b>150 m</b>
<b>Distanza tra piani</b>	<b>40 m</b>
<b>Numero totale di piani</b>	<b>16</b>
<b>Altezza utile</b>	<b>600</b>
<b>Moduli ottici per piano</b>	<b>4</b>
<b>Numero totale di moduli ottici</b>	<b>64</b>

Nel seguito descriveremo in maggiore dettaglio prima alcuni elementi meccanici che sono a comune alle due soluzioni, poi gli elementi distintivi della stringa e dalla torre.

#### **4.2.1 Elementi meccanici comuni a Torre e Stringa**

Alcune parti della struttura meccanica di sostegno sono indipendenti dalla soluzione scelta. In particolare si tratta dei contenitori per l'elettronica locale del piano, delle junction boxes che ospiteranno l'elettronica della stringa o torre, del basamento della struttura e delle boe di spinta.

##### ***Modulo di controllo locale***

Il Modulo di Controllo Locale (MCL) è un contenitore cilindrico destinato ad alloggiare quei componenti di elettronica e trasmissione dati che per ragioni di funzionalità devono essere collocati ad una distanza dai sensori non superiore alla decina di metri.

Il modulo di controllo locale verrà montato all'interno del supporto per i moduli ottici. Le sue funzioni sono quelle di:

- permettere la connessione del cavo elettro-ottico con il piano della struttura;
- permettere la raccolta dei dati rilevati dai moduli ottici e dai sensori presenti in ognuno dei piani;
- permettere il trasferimento dei dati raccolti verso la base della struttura;
- permettere il controllo e la diagnostica dell'elettronica presente su un piano.

Il contenitore sarà realizzato tramite un tubo e due flange in Titanio. Le flange saranno opportunamente forate per permettere l'inserimento dei connettori elettro ottici sottomarini.

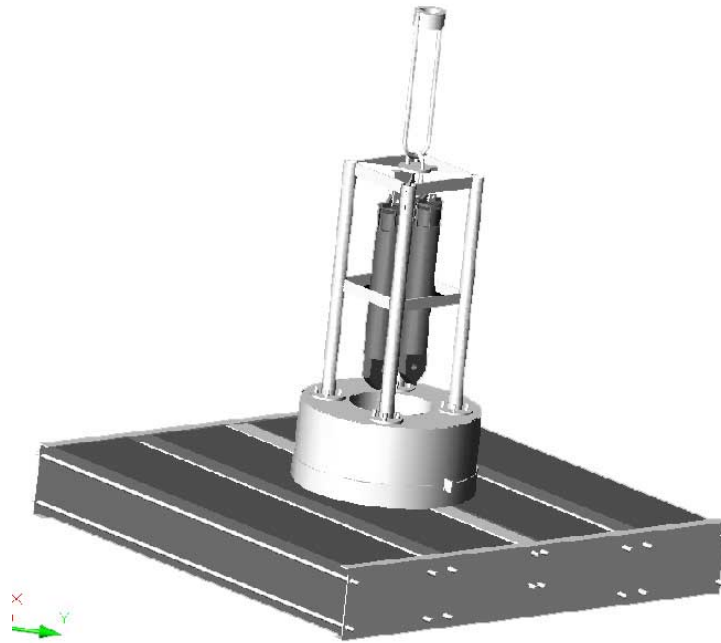
Le specifiche realizzative che sono state tenute in considerazione in fase di progettazione sono:

- l'elettronica, contenuta internamente al modulo, non deve raggiungere elevate temperature, allo scopo di garantire la maggior vita utile possibile;
- il materiale utilizzato deve essere amagnetico, al fine di evitare interferenze con la strumentazione elettronica necessaria per rilevare il posizionamento delle strutture in acqua.

##### ***Struttura di Base della Stringa***

La Struttura di Base della Stringa (SBS) è la struttura che serve ad ancorare la stringa o la torre al fondo (fig. 16). Le sue funzioni sono di:

- consentire una stabile interazione tra la stringa strumentata e il fondo del mare, è necessario infatti che la struttura sia il più possibile stabile sul fondo del terreno per non avere delle derive della stessa con conseguenti deformazioni della geometria del rivelatore e problemi durante le operazioni di aggancio e sgancio dei connettori per il collegamento della stringa con la junction box.



*Fig. 16 - La Struttura di Base della Stringa (SBS).*

- supportare il sistema di connessione con la stringa strumentata; il basamento sarà dotato di un sistema meccanico per l'aggancio e lo sgancio del connettore elettro ottico, questo permetterà il recupero della stringa nel caso di operazioni di manutenzione della stessa ed il collegamento della stringa sia in fase di prima installazione del laboratorio sottomarino, sia in fase di sostituzione della stessa.
- agevolare, per gravità, l'installazione della stringa stessa, durante la fase di deployment della stringa la stessa deve poter essere filata sino alla quota di installazione del laboratorio sottomarino mantenendo la struttura quanto più possibile rigida, questo è necessario per garantire un buon posizionamento del basamento della stringa nel punto prestabilito per il deployment ed inoltre per evitare che in qualche modo la stringa durante il deployment possa andare ad interferire con le altre strutture preventivamente installate.
- permettere il posizionamento della stringa strumentata sul fondo del mare relativamente alle altre stringhe.
- Mantenere in posizione stabile la strumentazione elettronica di acquisizione e trasmissione dei dati ricevuti da tutti i sensori presenti sulla stringa.

La struttura del basamento è modulare ed è composta di due parti principali:

- parte recuperabile;
- ancora o peso morto.

Le due parti sono tenute collegate insieme mediante un sistema ridondante realizzato tramite due sganciatori acustici ed una catena in titanio. In caso di recupero gli sganciatori vengono attivati tramite un segnale acustico codificato. Dopo il rilascio della catena la stringa, alleggerita del peso morto, risale in superficie. La ridondanza degli

sganciatori acustici permette di effettuare lo sgancio della catena utilizzando il secondo sistema nel caso in cui il primo risultasse malfunzionante.

Alla base di ogni stringa verrà inoltre installato un sistema di sgancio d'emergenza operabile tramite veicoli subacquei come ROV o AUV, questo nel caso in cui entrambi gli sganciatori mostrassero problemi di malfunzionamento.

Il peso morto o ancora ha la funzione di permettere il deployment della struttura e la stabilità nel mantenimento della posizione una volta posata la stringa sul fondo del mare. La struttura è realizzata con dei blocchi di pietra lavica opportunamente assemblati mediante l'utilizzo di profilati di titanio fissati tra di loro mediante un insieme di barre filettate, realizzate con lo stesso materiale. Questa soluzione permette di realizzare un peso morto a basso costo, con materiale facilmente reperibile ed a basso impatto ambientale. I blocchi di pietra lavica sono distanziati in modo tale da evitare un effetto paracadute durante le operazioni di deployment della stringa che potrebbe provocare una deriva eccessiva della stringa stessa con conseguenti danni alle strutture vicine.

### ***Junction box alla base della stringa***

Sulla base di ogni stringa troverà posto una junction box che avrà le seguenti funzioni:

- contenere in sicurezza il modulo del sistema di trasmissione dati che raccoglie e trasmette i dati provenienti dai vari piani della stringa;
- contenere l'elettronica per la gestione ed il controllo dei vari componenti elettronici presenti nella stringa: inclinometri, transponder acustici, ect.
- permettere il collegamento del cavo elettro ottico meccanico che trasporta tutti i dati da e per la stringa con il cavo elettro ottico proveniente dalla junction box presente nella dorsale.

La junction box consiste di due semisfere di titanio connesse ad un distanziale anch'esso realizzato in titanio.

Sul distanziale verranno realizzati i fori per:

- Connessione con il connettore del cavo elettro ottico proveniente dalla junction box.
- Connessione con il cavo o i cavi elettro ottici che alimentano e acquisiscono i dati provenienti dai diversi piani della struttura.

La junction box verrà fissata alla parte recuperabile del basamento della stringa mediante appositi supporti in grado di mantenere il sistema stabile ed in sicurezza durante le fasi di funzionamento del dispositivo e durante le fasi più critiche di deployment e di eventuale recupero della stessa.

### ***Boa***

L'elemento che consente di mantenere tesa la struttura (stringa o torre) è una boa posta all'estremità superiore del cavo. Il dimensionamento è fatto in funzione del peso della struttura e delle correnti marine affinché la struttura stessa non oscilli a tal punto da pregiudicare il sistema di rilevamento per la posizione relativa dei moduli ottici.

La boa per le stringhe e/o torri di NEMO dovrà avere una spinta di circa 1.5 tonnellate.

#### 4.2.2 La stringa

Una singola stringa, vedi fig. 14, può fondamentalmente considerarsi costituita dalle seguenti parti:

- 16 piani costituiti ognuno da una intelaiatura avente dimensioni dell'ordine di qualche metro, alle cui estremità sono vincolati i 4 moduli ottici. I piani sono collegati tra loro con un cavo ottico - elettromeccanico;
- un sistema di boe, che dà la spinta verticale necessaria ad assicurare l'equilibrio idrostatico della stringa, garantendo al contempo un certo grado di rigidità;
- una base da cui parte il cavo elettromeccanico di collegamento tra i piani. Sulla base trovano posto un contenitore con l'elettronica di comunicazione ed il sistema di connessione del cavo elettro ottico con la junction box.
- un corpo morto per ancorare al fondo la torre stessa.

I telai della stringa (fig. 17) saranno realizzati in lega di titanio. Essi sono costituiti da elementi tubolari e dovranno garantire la rigidità necessaria al sostentamento dei moduli ottici e dell'altra strumentazione (trasmissione dati, sistemi di controllo, ect).

I telai sono collegati tra loro con un cavo elettromeccanico in modo da avere una distanza di 40 m tra un piano e l'altro. Questo cavo avrà le funzioni di:

- tenuta meccanica;
- distribuzione dell'alimentazione;
- collegamento su fibra ottica.

Variazioni di configurazione rispetto a quella teorica sono dovute in gran parte alle correnti marine presenti nella zona interessata dal rivelatore.

Come verrà evidenziato anche nel caso delle torri esiste un valore di volume ottimale delle boe che minimizza gli spostamenti della stringa rispetto all'asse verticale.

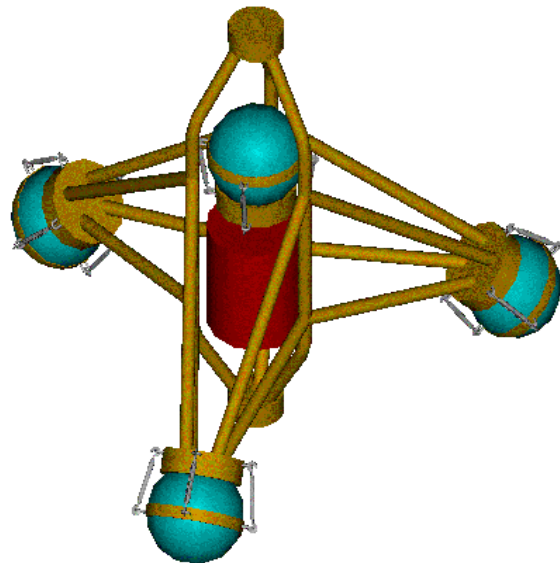


Fig. 17 - Struttura del piano della stringa.

#### *Struttura di sostegno per i moduli ottici*

La struttura di supporto dei moduli ottici è costituita da un telaio che raggruppa 4 moduli ottici disposti a 120° l'uno dall'altro e con la superficie sensibile della sfera rivolta verso il fondo del mare. La quarta sfera è posta leggermente più in alto in posizione simmetrica rispetto le altre tre e rivolta verso la superficie del mare (fig. 13).

Sono previste 16 strutture disposte lungo il cavo tensionato. La struttura verrà realizzata interamente in titanio, utilizzando tubi di tipo commerciale che permetteranno di ridurre i costi di produzione su grande scala.

Nella parte superiore ed inferiore della struttura troverà posto un sistema di aggancio della parte armata del cavo elettro ottico meccanico, per evitare che i carichi meccanici vengano applicati sui connettori e sulle fibre ottiche che potrebbero subire danni.

### ***Cavo elettro-ottico armato***

I piani della stringa sono collegati tra loro per mezzo di un cavo elettro-ottico armato che assolve le seguenti funzioni:

- fornire la potenza elettrica per il funzionamento dei moduli ottici e della strumentazione elettronica presente sulla stringa;
- consentire la trasmissione delle informazioni elaborate dai moduli ottici alla stazione di raccolta dati a terra;
- costituire la struttura portante della stringa strumentata e in particolare supportare le strutture dei moduli ottici, dei moduli di controllo locale e del sistema di posizionamento;
- consentire la connessione del basamento e della boa di estremità.

### ***Analisi delle sollecitazioni***

L'analisi delle forze evidenzia che le stringhe sono soggette:

- al peso proprio;
- al peso dei moduli ottici e delle altre strumentazioni;
- all'azione statica della massa d'acqua in cui sono immerse;
- all'azione dinamica esercitata dalle correnti marine.

Le varie parti della struttura contribuiscono perciò in maniera diversa alla risposta alle forze agenti.

I movimenti di rotazione attorno all'asse verticale sono per la stringa molto più accentuati a causa della minore resistenza torsionale offerta dal cavo elettromeccanico. Nel caso della stringa questa rotazione non costituisce un problema, perché la posizione spaziale dei rivelatori, soprattutto quella angolare, può essere ben ricostruita mediante bussole integrate a strumentazione elettronica, mentre lo scostamento rispetto alla verticale può essere ricostruito per mezzo di un sistema di posizionamento acustico.

### **4.2.3 La torre**

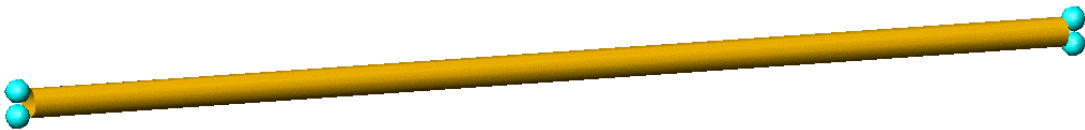
Così come la stringa, anche la torre può essere scomposta in sottoinsiemi:

- 16 piani, costituiti ognuno da tubi di grosso diametro giuntati tra di loro. I piani sono collegati tra loro tramite cavi in fibre sintetiche per la ritenuta meccanica e tramite cavi elettro-ottici per la trasmissione dei segnali e della potenza elettrica;

- un sistema di boe, che dà la spinta verticale necessaria ad assicurare l'equilibrio idrostatico della stringa;
- una base da cui partono il primo gruppo di cavi in fibra sintetica ed il cavo elettro-ottico. La base è dotata inoltre di un contenitore che ha la funzione di alloggiare l'elettronica per lo scambio di dati ed i convertitori di tensione atti ad assicurare la corretta alimentazione della strumentazione posta sulla torre;
- un corpo morto necessario ad sul fondo la torre stessa.

### ***Struttura di sostegno per i moduli ottici***

Nel caso della torre la struttura di sostegno sarà costituita essenzialmente da tubi in vetroresina di grosso diametro ( $\approx 600$  mm), per una lunghezza totale di 20 m. I tubi dovranno essere opportunamente lavorati e giuntati tra loro per raggiungere la lunghezza totale desiderata senza pregiudicare la trasportabilità e la maneggevolezza dei componenti. In fig.18 si può osservare una rappresentazione schematica della disposizione delle sfere contenenti i fotomoltiplicatori. Tali sfere verranno poste alle estremità dei singoli piani, il resto della strumentazione andrà invece allocata all'interno dei tubi.



*Fig. 18 - La struttura di sostegno della torre.*

### ***Cavi per la ritenuta meccanica***

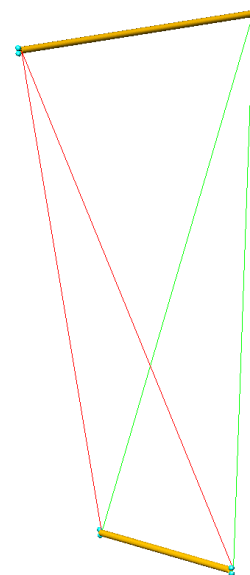
Il collegamento tra due piani successivi della torre è effettuato per mezzo di due cavi di ritenuta, secondo lo schema mostrato in fig. 19.

I cavi per la ritenuta meccanica svolgono le seguenti funzioni:

### ***Cavo elettro-ottico***

Il cavo elettro-ottico svolge le seguenti funzioni:

- fornire la potenza elettrica per il funzionamento dei singoli moduli ottici;
- consentire la trasmissione delle informazioni elaborate dai moduli ottici alla stazione di raccolta dati a terra.



*Fig. 19 - Schema di collegamento tra i piani della torre.*



- collegare la parte superiore della torre con la base da fissare sul fondo del mare;
- assicurare la corretta spaziatura tra i piani che costituiscono la torre;
- assicurare il corretto orientamento spaziale dei piani della torre.

### *Analisi delle sollecitazioni*

La prima distinzione che si deve fare quando si analizzano gli stress cui sono sottoposte le strutture dell'esperimento NEMO è quella relativa alla differenza tra:

- il comportamento durante la vita operativa a 3500 m di profondità sotto il livello del mare;
- il comportamento durante il trasporto fuori dall'acqua.

Le varie parti di cui è composta la struttura contribuiscono in maniera diversa alla risposta alle forze agenti. A tal fine si può suddividere la torre in due sottoinsiemi principali:

- parte rigida;
- parte flessibile.

La parte rigida ha il compito di sostenere la strumentazione nelle posizioni adatte ad effettuare le misure. La parte flessibile, costituita da cavi in fibra sintetica ad altissima resistenza, serve invece per mantenere costante la distanza e la disposizione spaziale dei piani di cui è composta la struttura.

Una volta posizionata la torre alla profondità operativa, i piani di cui essa è costituita sono soggetti alle seguenti sollecitazioni:

- peso proprio;
- peso dei moduli ottici e delle altre strumentazioni;
- azione idrostatica della massa d'acqua in cui sono immersi;
- tiro dei cavi per la ritenuta meccanica;
- azione dinamica esercitata dalle correnti marine;

Per via della disposizione spaziale che devono avere i cavi per la ritenuta meccanica, la spinta della boa posta in cima alla torre causa uno sforzo di compressione lungo l'asse principale dei singoli piani. Un tale tipo di sollecitazione ha implicato un dimensionamento dei tubi al fine di evitare il rischio dell'instabilità elastica. Tali tubi sono inoltre sottoposti ad una sollecitazione di flessione dovuta all'azione idrodinamica dell'acqua. La flessione diminuisce ulteriormente il carico massimo di compressione assiale che si può applicare sui tubi senza correre il rischio che essi collassino. Di conseguenza il dimensionamento delle strutture è stato fatto tenendo conto anche di tali sforzi.

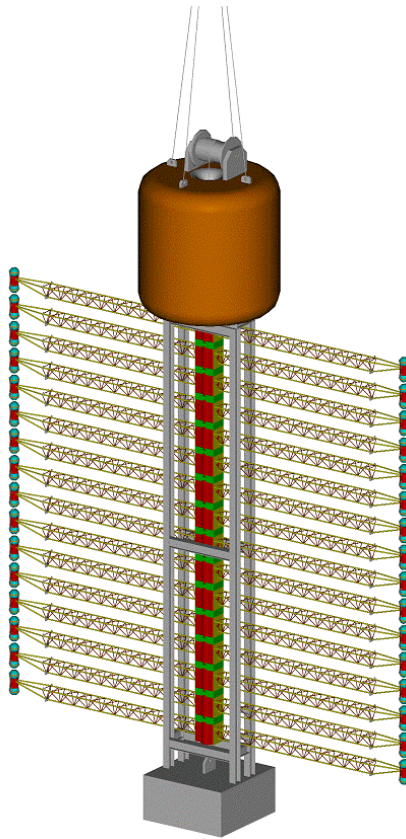
Quando la torre si trova ancora fuori dall'acqua i carichi meccanici prevalenti sono invece:

- il peso proprio del tubo;

- il peso delle sfere che contengono i fotomoltiplicatori.

La sollecitazione che ne deriva è una flessione retta applicata su tutta la lunghezza del tubo. Risulta trascurabile, ai fini dei calcoli, il peso dei contenitori per la strumentazione in quanto questi ultimi andranno posizionati al centro dei piani. Si è provveduto quindi ad un dimensionamento delle strutture in modo da farle resistere anche durante la movimentazione fuori dall'acqua.

Un discorso diverso è quello relativo alle sollecitazioni cui sono sottoposti i cavi di ritenuta meccanica. Nel corso della vita utile del rivelatore cavi assumeranno una configurazione tridimensionale come quella mostrata in figura 19. Il particolare di due piani, riportato per maggiore chiarezza di rappresentazione, va pensato moltiplicato per il numero totale di livelli che costituiscono la torre. In tale figura si può notare come, grazie all'angolazione che assumono i cavi in fibra sintetica, i piani non hanno la possibilità di compiere delle rotazioni relative attorno all'asse verticale. Tale



*Fig. 20 – La torre configurata per lo stoccaggio ed il trasporto.*

configurazione è stata scelta al fine di assicurare un sufficiente rigidità torsionale a tutto l'insieme pur sfruttando la capacità che ha un qualunque cavo di resistere alla sola trazione.

Durante il trasporto e lo stoccaggio fuori dall'acqua, come si può vedere in figura 20, la torre viene "impacchettata" al fine di ridurne le dimensioni e le possibilità di danneggiamento della strumentazione che vi è montata. In una tale situazione

ovviamente i cavi non sono tensionati e non sono sottoposti ad alcun tipo di stress. Il problema consiste nel disporre tali elementi strutturali con un layout tale da non causare problemi durante il deployment della torre.

### 4.3 Scelta dei materiali

Una notevole attività di Ricerca & Sviluppo è stata effettuata per determinare quale fossero le caratteristiche chimiche e meccaniche dei materiali da utilizzare per la realizzazione del laboratorio sottomarino.

In questa attività di R&D si sono tenuti in considerazione alcuni parametri fondamentali come:

- la necessità del laboratorio sottomarino di avere una vita utile dell'ordine di almeno 10 anni;
- l'aggressività dell'ambiente in cui verrà installato il laboratorio sottomarino;
- la necessità di realizzare strutture con basso impatto ambientale.

#### *Materiali per le strutture di sostegno*

La soluzione che teneva in considerazione l'utilizzo dell'acciaio per la realizzazione delle strutture meccaniche è stata scartata dal momento che non garantiva le specifiche minime di vita utile delle strutture a meno di utilizzare delle soluzioni tecniche particolari per la riduzione dei fenomeni corrosivi come la protezione catodica.

Questa soluzione implicava l'utilizzo di una notevole quantità di anodi di zinco o di leghe particolari è stata scartata per diversi motivi:

- Possibili inquinamenti delle zone circostanti il laboratorio sottomarino;
- Necessità di sostituire gli anodi periodicamente con conseguenti aumenti dei costi di manutenzione della struttura;
- Aumento del peso e delle dimensioni della struttura dovuti alla presenza degli anodi;
- Difficoltà a realizzare una protezione catodica che garantisca la vita utile richiesta.

Per tale motivo, l'analisi e la ricerca sui materiali ha portato alla scelta di due soluzioni possibili ed attuabili sia dal punto di vista della realizzazione tecnica che dal punto di vista della fattibilità economica, i materiali prescelti sono:

- **Titanio**
- **Vetroresina**

#### *Materiali per i contenitori e le Junction Box*

Il titanio sarà sicuramente utilizzato per realizzare tutti i contenitori dell'elettronica presenti nel dispositivo dal momento che è l'unico materiale, in particolare il grado 5, in grado di garantire la realizzabilità degli oggetti con dimensioni ragionevoli e costi non eccessivamente elevati.

### *Materiali per le boe di spinta*

Le boe di profondità sono realizzate inserendo all'interno dell'involucro principale realizzato in materiale composito delle microsfere di vetro che garantiscono la galleggiabilità richiesta.

Questa soluzione permette di realizzare delle strutture ad elevata affidabilità che non necessitano di manutenzione periodica.

## **4.4 Sistema di posizionamento**

Lo scopo della strumentazione di posizionamento è duplice.

- consentire l'installazione e quindi il posizionamento della singola stringa in accordo alla griglia  $8 \times 8$  nominale prevista;
- consentire la ricostruzione spaziale della posizione di ogni singolo modulo ottico della stringa nel rispetto delle tolleranze da definire.

Il primo obiettivo è ottenuto mediante una rete di transponder acustici (equipaggiati con batteria di alimentazione) installata sul fondo del mare prima della sequenza di installazione delle stringhe. Queste ultime saranno dotate di un trasduttore acustico montato sul basamento della stringa stessa.

Il secondo obiettivo è ottenuto mediante una ridondante combinazione di due sistemi: acustico e inerziale. Il sistema di posizionamento acustico prevede la presenza di un trasduttore su ogni struttura per i moduli ottici progettata lungo la stringa (8), all'interno del modulo di controllo. Il secondo si basa sull'utilizzo di inclinometri. Il primo inclinometro è installato in prossimità della connessione del cavo elettro-ottico con il basamento. I restanti 4 sono installati sulle strutture per moduli ottici a piani alterni. In questo modo è possibile ricostruire la deformata assunta dalla stringa in condizioni operative e da essa la posizione dei singoli moduli ottici.

La posizione esatta dei moduli ottici è completata mediante l'utilizzo su ogni struttura per modulo ottico di una girobussola che consente di definire l'orientazione spaziale di tutti i moduli ottici presenti nella stringa.

## **4.5 Installazione delle strutture meccaniche**

L'installazione delle stringhe avverrà con l'ausilio di una nave con posizionamento dinamico (Dynamic Positioning, DP) e con robot teleguidati (Remotely Operated Vehicles, ROV) per le operazioni sottomarine<sup>1</sup>. Queste comprendono la guida per il posizionamento delle stringhe entro le tolleranze previste e la connessione della stringa appena installata al resto dell'apparato.

---

<sup>1</sup> Una descrizione completa delle operazioni sottomarine si trova nel documento "Deployment del Laboratorio Sottomarino".

## 4.6 Topologia della rete di distribuzione di segnali e potenza

Il collegamento tra il laboratorio sottomarino e la stazione di terra deve essere in grado di assicurare il trasporto di tutte le informazioni da e verso la strumentazione ed il trasporto dell'energia verso gli apparati sommersi. La tecnologia attuale delle telecomunicazioni è già in grado di fornire tale collegamento con i necessari requisiti di affidabilità, costo e manutenibilità tanto da poter scegliere con un notevole grado di sicurezza il collegamento con un singolo cavo.

Le tecniche adottate delle società di telecomunicazione per i collegamenti transoceanici suggeriscono e consentono di scegliere la soluzione monocavo: un singolo cavo elettro-ottico conterà quindi la stazione di terra con il laboratorio su una distanza di circa 100 km.

Dal punto di arrivo del cavo elettro-ottico principale una rete di cavi consentirà la distribuzione di dati ed energia a tutto l'apparato. Tale distribuzione deve ubbidire al fondamentale requisito dell'affidabilità e ad alcune limitazioni imposte dai dispositivi attualmente disponibili sul mercato. Ad esempio, non sono possibili soluzioni che prevedono una sola scatola di derivazione con un numero troppo elevato di connettori, nè un luogo dove un singolo alimentatore dia energia a tutto l'apparato, o connessioni con un numero troppo elevato di fibre e conduttori.

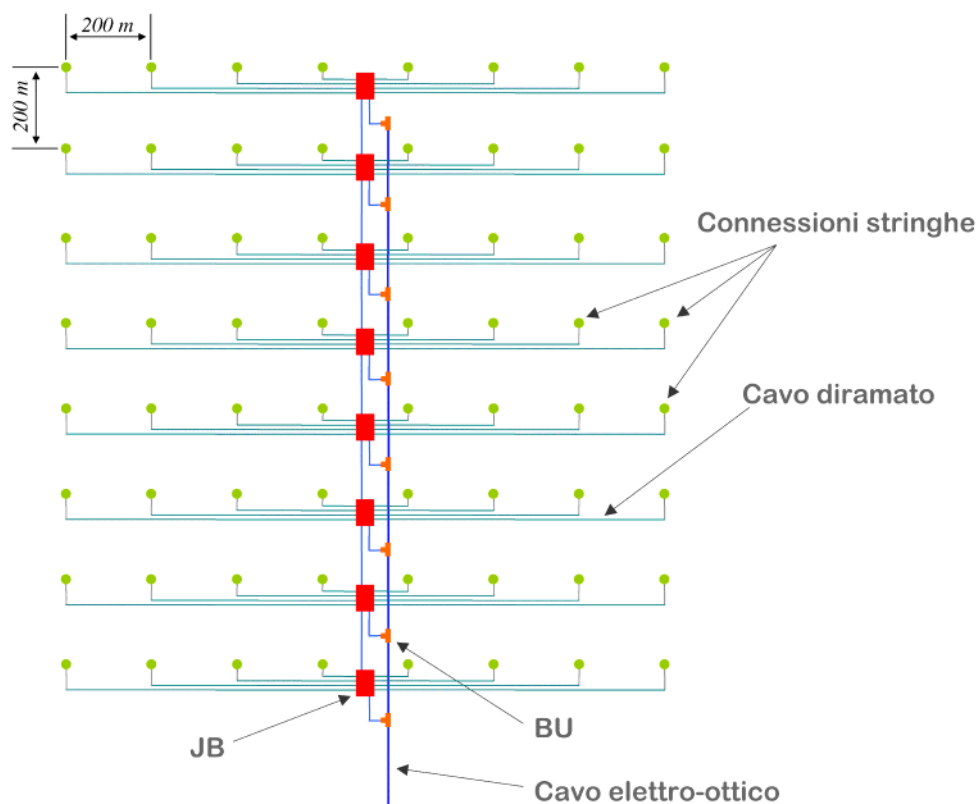


Fig. 21 – Schema della rete dei cavi di distribuzione dell'energia e trasmissione segnali.

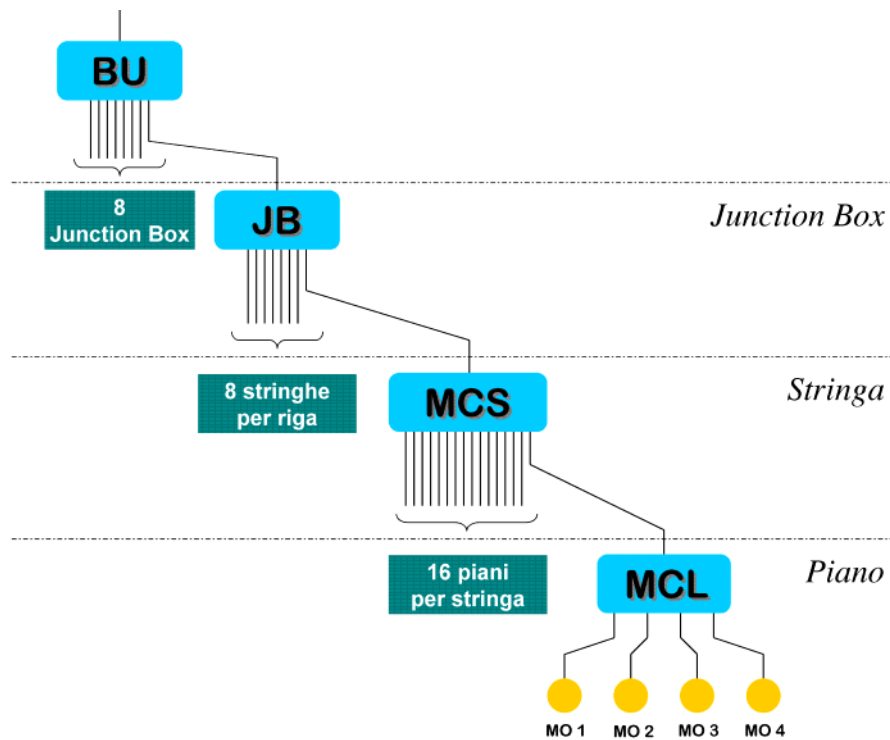


Fig. 22 – Distribuzione ad albero delle connessioni del laboratorio.

È necessario, pertanto, suddividere l'apparato in tante sotto unità ognuna delle quali sia capace di auto escludersi in caso di malfunzionamento.

La partizione segue naturalmente la logica di distribuzione delle strutture del rivelatore. La disposizione delle strutture di rivelazione è un reticolo  $8 \times 8$  (fig. 21), pertanto è organizzabile in otto righe, ciascuna contenente otto torri. Ogni torre è a sua volta costituita da sedici piani ed ogni piano ospita quattro fotomoltiplicatori. In totale si

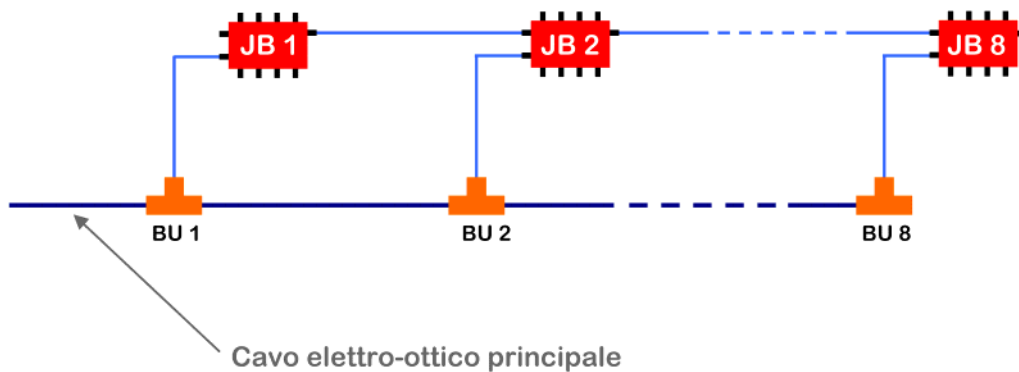


Fig. 23 – Schema delle connessioni tra Branching Units (BU) e Junction Boxes (JB) lungo la dorsale principale del laboratorio.

hanno perciò  $8 \times 8 \times 16 \times 4 = 4096$  canali. In questa ipotesi scaturisce una distribuzione ad albero come quella riportata in fig. 22.

La prima partizione del cavo principale in otto sottoparti, è certamente la più critica, in quanto un suo malfunzionamento condizionerebbe l'intero apparato. È per questo motivo che la sua complessità dovrà essere molto bassa per minimizzare i possibili guasti. La soluzione proposta è di farla passiva: il suo compito sarà semplicemente quello di suddividere il cavo principale in un numero pari a quello delle righe, cioè otto.

Lungo il cavo principale saranno disposte otto Branching Unit (BU) spaziate di 200 m (fig. 23). L'uscita della BU servirà una *Junction Box* (JB) attiva contenente una prima serie di alimentatori e dispositivi elettro ottici ed elettronici. Per ragioni di ridondanza le JB saranno connesse tra di loro da un ulteriore cavo elettro-ottico. In questo modo, in caso di interruzione delle comunicazioni lungo il cavo principale, sarà sempre possibile reindirizzare le connessioni attraverso le JB.

Da ciascuna JB si dipartono otto cavi che connettono la JB con ogni torre. Alla base della torre sarà collocato un *Modulo di Controllo di Stringa* (MCS) che alloggerà un alimentatore e i dispositivi necessari a raccogliere i dati provenienti da ogni singolo piano. Ogni piano avrà a sua volta un organo di gestione dei dati da e per i singoli sensori che sarà alloggiato nel *Modulo di Controllo Locale* (MLC) presente in ogni piano (fig. 24).

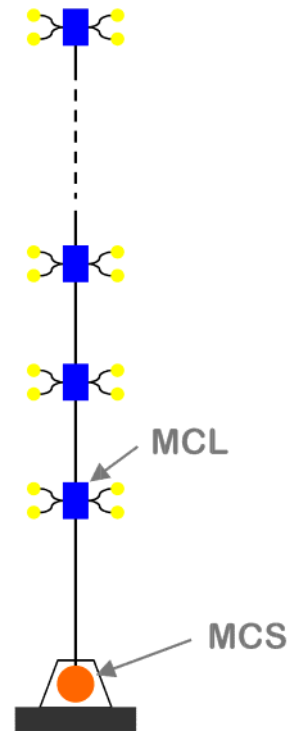


Fig. 24 – Disposizione dei Moduli di Controllo Locali (MCL) e del Modulo di Controllo di Stringa (MCS) lungo la stringa

## 4.7 Sistema di trasmissione dati

I requisiti più stringenti in termini di banda necessaria per la trasmissione dei dati sono quelli richiesti dai 4096 moduli ottici presenti nell'apparato. Pertanto svilupperemo le considerazioni e le valutazioni numeriche che seguono esclusivamente per quanto riguarda questa parte della sensoristica. Resta sottointeso che le necessità in termini di banda richieste dall'altra sensoristica presente nell'apparato (posizionamento acustico, bussole, inclinometri, strumentazione oceanografica, strumentazione sismologica, ...) è molto limitata e troverà largamente spazio nel sistema proposto.

### 4.7.1 Bilancio delle grandezze

L'elettronica inserita in ogni modulo ottico include un convertitore analogico digitale (ADC) che campiona i segnali provenienti dal fotomoltiplicatore. Questi segnali hanno tipicamente una durata di  $\sim 50$  ns e per descriverli fedelmente è necessario campionarli

ad una frequenza di  $\sim 200$  MHz (un campionamento ogni 5 ns) con una conversione logaritmica (a precisione percentuale costante) ad 8 bit. Se si dovesse decidere di trasmettere tutti i risultati dei campionamenti, sia che sia effettivamente presente un impulso sia che il risultato sia zero, la necessità di banda per ogni singolo canale sarà di  $8 \times 200 \times 10^6 = 1.6$  Gb/s. In questo caso la necessità di banda totale per i 4096 rivelatori sarebbe di  $1.6 \text{ Gb/s} \times 4 \times 10^3 = 6.4$  Tb/s, carico trasmissivo molto impegnativo.

Se si decide invece di trasmettere i campioni solo quando è effettivamente presente un segnale dobbiamo tener conto del rateo di conteggio medio su ogni singolo modulo ottico, rateo che è dovuto essenzialmente al rumore di fondo generato dalla disintegrazione spontanea del  $^{40}\text{K}$  presente nel sale marino. Questo fondo è stato misurato intorno ai 50 keventi/s per fotomoltiplicatore. Considerando che per descrivere un singolo impulso sono necessari circa 100 bit, in questa soluzione necessiteranno circa  $100 \times 50 \times 10^3 = 5$  Mb/s per canale. Poichè il numero di canali dell'intero apparato è  $\sim 4000$ , il rateo totale sarà di  $\sim 20$  Gb/s, un numero perfettamente compatibile per le moderne tecnologie che permettono già ora  $\sim 1$  Tb/s per fibra.

Come vedremo nel seguito, per ragioni di affidabilità e ridondanza sarà opportuno utilizzare più fibre per la trasmissione dei dati. Pertanto la banda disponibile sarà largamente sufficiente per accomodare sia le necessità di altri sensori lenti sia future espansioni del sistema.

#### 4.7.2 Infrastruttura per il trasporto dei dati e controlli

Le necessità di comunicazione del laboratorio si possono dividere in tre parti: canale di trasmissione dati, canale dei controlli, canale di temporizzazione.

##### *Canale di trasmissione dati*

Per i motivi sopra esposti è auspicabile adottare una fibra dedicata al trasporto dei dati per ognuna delle otto righe che compongono il telescopio. Questo canale dovrà supportare un rateo di  $(20 \text{ Gb/s}) / 8 = 2.5$  Gb/s. Da questa prima partizione passiva in su fino ai singoli PMT, le richieste di banda ovviamente si rilassano e quindi i collegamenti elettro ottici avranno caratteristiche sempre meno stringenti. Nel caso di elettronica convenzionale le necessità sono quelle mostrate in fig. 25.

Volendo adottare la nomenclatura riportata in Fig. 2 tutti i concentratori di piano nei MCL, i MCS e le Junction Box sono attive ed impiegheranno dei multiplexer elettro-ottici ed ogni collegamento avverrà su di una singola fibra, mentre la BU è passiva e mette a passaggio le fibre per i dati che giungono da terra verso le otto righe costituenti l'intero apparato.

##### *Canale dei controlli*

I controlli elettronici ed ambientali di tutto il telescopio non richiedono un'eccessiva larghezza di banda poichè tutti i parametri fisici da controllare come temperatura, pressione, posizione angolare, velocità dell'acqua, velocità del suono in acqua, assorbimento ottico, solo per citarne alcuni, variano molto lentamente nel tempo e sarà possibile il loro campionamento su tempi maggiori dei secondi.



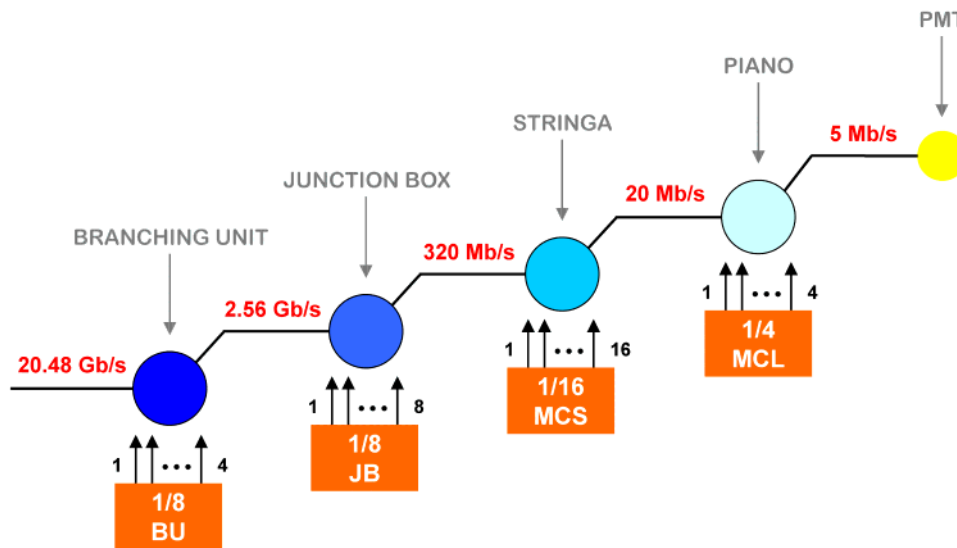


Fig. 25 – Flusso dei dati nell'apparato.

Se si associa ad ogni canale di dati un canale di “Slow Control” con un rateo di 10 kb/s, certamente si ottempera alle esigenze dei controlli.

Si vede così che tutto lo strumento è controllabile bidirezionalmente con un rateo di  $10 \text{ kb/s} \times 4 \times 10^3 = 100 \text{ Mb/s}$ . Poichè è essenziale che l'apparato abbia un alto grado di affidabilità, sia sezionabile all'occorrenza, sia costruibile a tappe parziali e sia servito da una BU passiva, allora è necessario fornire ad ogni riga una coppia di fibre (per la comunicazione bidirezionale) proveniente direttamente da terra. Questa soluzione porterebbe il numero di fibre per riga a due e quindi ad un totale di  $2 \times 8 = 16$  fibre.

### Canale di temporizzazione

Nell'ipotesi illustrata tutti i convertitori associati ai PMT devono essere sincroni tra loro e sincroni con gli apparati di terra. Questa necessità impone la trasmissione da terra di un clock di sincronizzazione ma, poichè già esiste un canale di controllo da terra verso mare, è essenziale che questo veicoli anche il segnale di temporizzazione. Tale richiesta è facilmente ottemperabile a patto di scegliere un opportuno codice di trasmissione autosincronizzato.

### 4.7.3 Soluzione proposta

Per quanto riguarda i dati si è visto che l'intero apparato, nonostante il numero cospicuo di canali, non esige canali di trasmissione che non siano reperibili già ora; considerazione questa che permette una notevole flessibilità nell'esecuzione dei trigger dei primi livelli, sarà possibile eseguirli sia localmente (apparecchiature sommerse) che spostare integralmente il problema sulla terraferma. Il numero di fibre necessario e la potenza necessaria alle apparecchiature in acqua rimarrebbero praticamente le stesse.

Per quanto riguarda il canale bidirezionale di “Slow Control”, si è visto che una fibra è più che sufficiente dando ampio margine anche ad utenze attualmente non ipotizzabili.

Il canale di controllo offre anche il vantaggio di supportare la sincronizzazione dell'intero apparato.

Tutti i collegamenti avverrebbero su fibra, tranne sui piani dove ogni fotomoltiplicatore verrebbe connesso al concentratore di piano attraverso un cavo coassiale necessario al trasporto (anche) della alimentazione del PMT.

Una soluzione realizzativa che ottempera a tutte le richieste sopra esposte è di utilizzare un sistema commerciale prodotto da ALCATEL che utilizza apparecchiature di provata affidabilità.

Ogni piano delle stringhe di NEMO sarà equipaggiato con un modulo ottico S-1.1 che fungerà da interfaccia tra i segnali elettrici generati dai sensori di piano (4 PMT più slow control) e la fibra ottica che porterà questi dati fino alla JB ai piedi della stringa. Contemporaneamente prenderà i dati che giungeranno dalla medesima JB di stringa, attraverso una seconda fibra ottica, e fornirà al piano i segnali elettrici decodificati, inoltre estrarrà il segnale di temporizzazione inviato da terra. Riassumendo, ogni piano sarà servito da un modulo S-1.1 che verrà allacciato alla JB di torre per mezzo di due fibre ottiche; questa soluzione mette a disposizione del piano 140 Mb/s di traffico bidirezionale.

Alla base di ogni stringa è previsto un apparato di nodo 1660SM (STM-4/16 Node Equipment) equipaggiato con 16 schede STM-1 (ogni STM-1 serve un piano). Questo insieme fornisce una protezione EPS 1+1 ovvero, per ogni canale che si dovesse rompere ve ne è pronto un secondo in sostituzione. Il 1660SM è anche equipaggiato con due interfacce ottiche STM-16 (STM-16 Colored). Ogni interfaccia STM-16 riassume tutto il traffico scambiato con le 16 STM-1 e lo instrada su di una singola coppia (poiché il traffico è bidirezionale) di fibre. Di STM-16 ve ne sono due sempre per motivi di ridondanza. Riassumendo, alla base di ogni stringa trova posto un apparato 1660SM con ridondanza 1+1 (Equipment Protection: EPS 1+1) che gestisce 16 coppie di fibre ottiche dal lato mare e 2 coppie di fibre ottiche dal lato terra.

In totale, considerando 64 stringhe, è necessario gestire ora 256 fibre ottiche (128 primarie e 128 dedicate alla ridondanza); essendo questo numero molto elevato, si impone un ulteriore livello di concentrazione.

Lo strumento 1686WM provvede a questo ulteriore livello di compressione; esso riceve dal lato mare 16 coppie di fibre, provenienti da altrettante stringhe, ed instrada tutto il traffico, con la tecnica del wavelength-multiplexing, verso una sola coppia di fibre. Poiché ogni 1686WM serve due stringhe, ne saranno necessari quattro per il traffico primario e altri quattro per la ridondanza.

Le otto coppie di fibre in uscita dagli otto 1686WM verranno raccolte nella Splitting Box ed inviate a terra.

Tutto quanto è stato descritto fin'ora viene replicato (scambiando i versi) a terra.

Dal cavo elettro-ottico emergeranno otto coppie di fibre che verranno attestate ad altrettanti 1686WM, questi serviranno 64 strumenti 1660SM equipaggiati, ciascuno, con 16 schede STM-1 le quali scambieranno dati con 1024 interfacce S-1.1. Ora il flusso dati, bidirezionale, in forma elettrica è totalmente disponibile a terra.

Tutta questa rete di comunicazione è gestita nella configurazione e nella manutenzione da due stazioni di terra: la 1353SH e la 1354RM.

La 1353SH realizza il cosiddetto EML (Element Management Layer) gestisce, cioè, la strumentazione hard-ware, mentre la 1354RM è l'NML (Network Manager Layer), il gestore ad alto livello dell'intera rete.

Concludendo, tutto l'apparato di ricetrasmisione è composto da :

2048 X S-1.1

128 X 1660SM equipaggiate, ciascuna, con 16 X STM-1 e 2 X STM-16

16 X 1686WM

1 X 1353SH

1 X 1354RM

Il consumo complessivo del sistema è circa di 32 kW (16 kW in mare e 16 kW a terra).

## 4.8 Sistema di trasmissione e distribuzione della potenza

Per l'alimentazione dell'intero laboratorio sottomarino, a causa di vincoli tecnologici (per esempio la tensione massima imposta alla rete dai connettori sottomarini, cavi di sezioni ridotte, ecc.), nasce l'esigenza di utilizzare più livelli di tensione al fine di ridurre il più possibile le perdite. Considerazioni di affidabilità e rendimento suggeriscono di usare trasformatori per ottenere le tensioni richieste e di lavorare in corrente alternata.

Il rivelatore verrà alimentato grazie ad un cavo elettro-ottico principale che da terra giunge sino al sito sottomarino. La rete elettrica del laboratorio sottomarino può essere suddivisa in tre sottosistemi, tenendo conto sia della dislocazione dei carichi sia delle loro caratteristiche elettriche:

- sistema di trasmissione (da terra al sito del laboratorio);
- sistema di distribuzione primaria (dal cavo principale alle Junction Box);
- sistema di distribuzione secondaria (dalle Junction Box ai piani della torre);
- sistema di distribuzione sul piano.

### *Sistema di trasmissione*

La trasmissione sarà effettuata in corrente alternata trifase attraverso un cavo elettro-ottico, lungo 100 km, che da terra giunge sino al sito sottomarino in cui sarà posizionato il rivelatore. Tale cavo sarà costituito da 3 conduttori da 50 mm<sup>2</sup> con isolamento in materiale plastico. In loco sarà presente un trasformatore che porterà la tensione ad un valore inferiore a 1000 V che rappresenta il massimo valore sopportabile dai connettori sottomarini situati a valle delle BU.

### *Sistema di distribuzione primaria*

Tale sottosistema rappresenta la parte di impianto elettrico dedicata all'alimentazione delle JB, e pertanto include sia i cavi che consentono la connessione delle JB con il cavo principale sia i cavi di interconnessione tra due JB consecutive, necessari per aumentare l'affidabilità del sistema. Si osserva che la potenza installata in ciascuna JB è data dalla somma della potenza assorbita dalle apparecchiature che si trovano all'interno della JB (pari a circa 300 W con una tensione di alimentazione di 48 Vdc) e della potenza necessaria all'alimentazione delle 8 torri alimentate dalla JB, incluse le perdite di potenza lungo la linea di trasmissione.

### *Sistema di distribuzione secondaria*

Questo sottosistema rappresenta la porzione di rete elettrica, in corrente alternata monofase, relativa all'alimentazione delle 8 torri a partire da una JB. Lo studio per il suo dimensionamento è stato effettuato considerando che:

- da ogni JB partono i cavi di alimentazione di 8 torri: 4 dal lato destro della JB e 4 dal lato sinistro, tali torri hanno distanze dalla JB variabili da 100÷700 m;
- ogni torre, dal punto di vista dell'assorbimento elettrico, è costituita da
  - un contenitore, posto alla base della torre, all'interno del quale sono presenti una centralina di raccolta dati alimentata a 48 Vdc con un assorbimento di 210 W ed il relativo alimentatore;
  - da 16 piani ciascuno con un carico di potenza pari a 18 W ed il relativo alimentatore da 48 Vdc.

Sono state prese in esame quattro possibili realizzazioni del sistema di distribuzione.

#### Caso 1JB-1PT

- distribuzione monocavo JB - base torre;
- distribuzione monocavo base torre - piani torre.

Dove 1JB indica la presenza di un solo cavo che dalla JB giunge alla base della torre, e 1PT indica la presenza di un solo cavo che dalla base della torre alimenta i piani della stessa;

#### Caso 1JB-TR-1PT

- distribuzione monocavo JB - base torre;
- trasformatore di potenza presente alla base delle torri;
- distribuzione monocavo base torre - piani torre.

Dove TR indica la presenza del trasformatore in corrispondenza della base della torre.

#### Caso 1JB-16PT

- distribuzione monocavo JB - base torre;
- distribuzione multicavo base torre - piani torre

Dove 16PT indica la presenza di 16 cavi che partendo dalla base della torre alimentano ciascuno un piano.

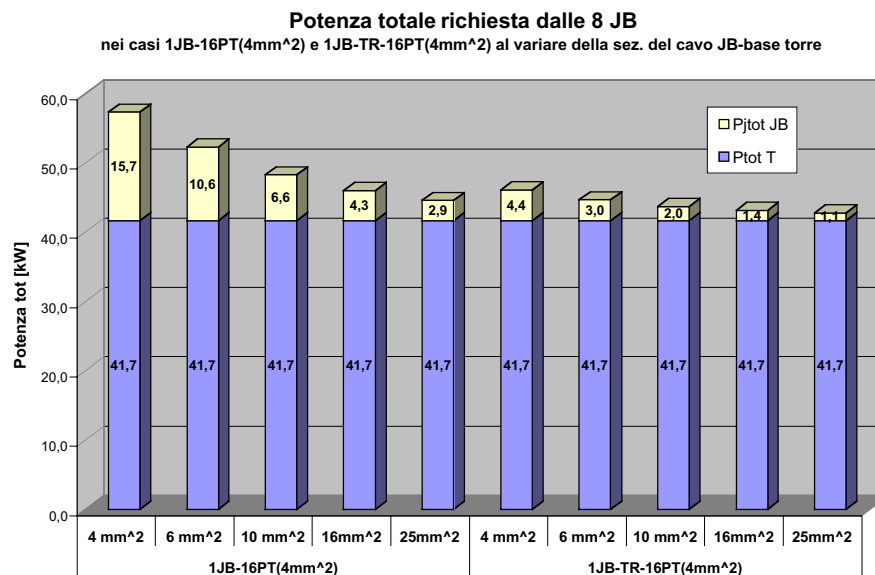
Caso 1JB-TR-16PT

- distribuzione monocavo JB - base torre;
- trasformatore di potenza presente alla base delle torri;
- distribuzione multicavo base torre - piani torre.

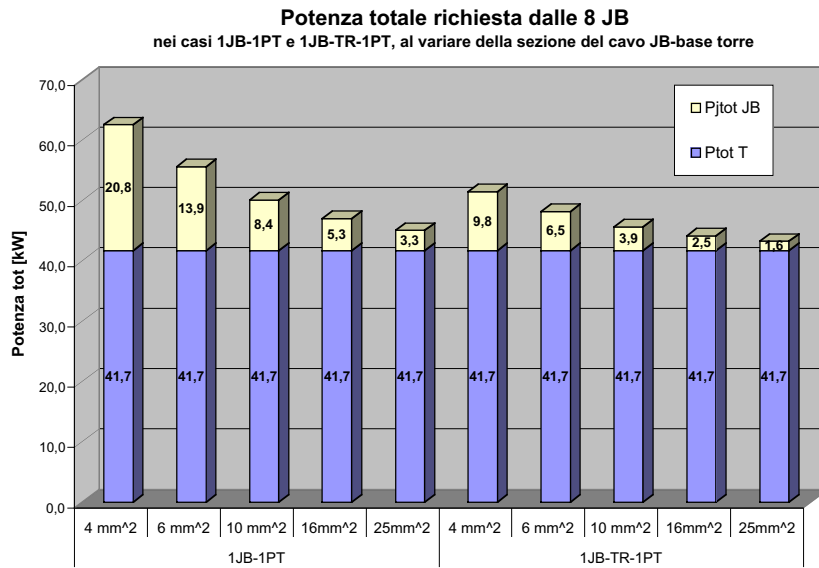
Nei suddetti casi sono stati valutati i valori delle tensioni in corrispondenza dei connettori di ciascuna JB e le perdite di potenza relative a ciascuna JB. I calcoli sono stati svolti considerando sezioni dei conduttori variabili tra 1.5 e 25 mm<sup>2</sup>. Le potenze richieste dalle 8 JB sono mostrate nella tabella seguente.

Potenza tot relative alle 8 JB [kW]					
Sez. 1JB	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>	16mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>
caso 1JB-1PT	62,6	13,9	50,1	47,0	45,0
caso 1JB-16PT (1,5mm <sup>2</sup> )	58,1	53,1	49,0	46,8	45,4
caso 1JB-16PT (4mm <sup>2</sup> )	57,4	10,6	48,3	46,0	44,6
caso 1JB-TR-1PT	51,5	48,2	45,6	44,2	43,3
caso 1JB-TR-16PT (1,5mm <sup>2</sup> )	46,7	42,3	44,5	43,9	43,5
caso 1JB-TR-16PT (4mm <sup>2</sup> )	46,1	44,7	43,7	43,1	42,8

Le figg. 26 e 27 mostrano il valore delle potenze totali richieste dalle 8 JB nei 4 casi presi in esame. Tali potenze sono date dalla somma:



*Fig. 26 – Potenze totali necessarie, al variare della sezione del cavo JB-Base Torre, nel caso di distribuzione monocavo JB-Base Torre e distribuzione multicavo Base Torre-Piani Torre.*

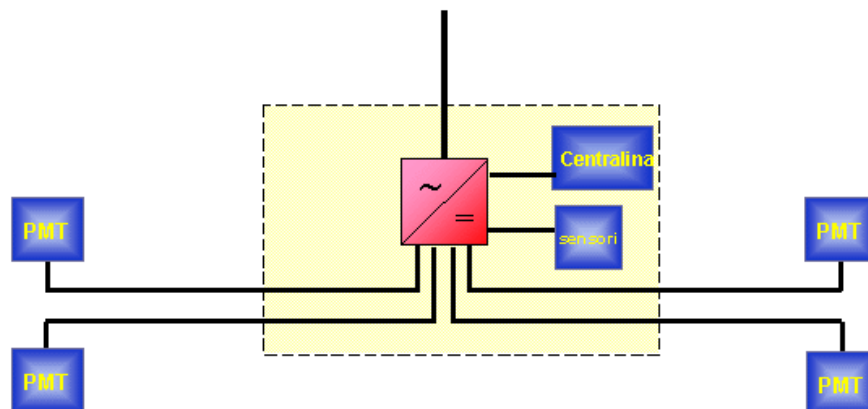


*Fig. 27 - Potenze totali necessarie, al variare della sezione del cavo, nel caso di distribuzione monocavo JB-Base Torre e distribuzione monocavo Base Torre-Piani Torre.*

- della potenza installata in ciascuna JB, dovuta alla presenza di una centralina ed altre apparecchiature che assorbono una potenza complessiva di 300 W;
- della potenza necessaria all'alimentazione delle 8 torri.

A sua volta quest'ultima risulta dalla somma della potenza installata nelle torri e delle perdite di potenza per effetto Joule.

Dai grafici si evince che il caso 1JB-TR-16PT presenta perdite di potenza per effetto Joule minori rispetto a tutti gli altri casi. Si osserva inoltre che in questo caso aumentare la sezione da 1.5 mm<sup>2</sup> a 4 mm<sup>2</sup> non determina un notevole decremento delle perdite.



*Fig. 28 - Schema della distribuzione elettrica sul piano.*

Confrontando i casi 1JB-TR-1PT e 1JB-TR-16PT, che sono quelli che presentano perdite più basse, si può notare che l'utilizzo di 16 cavi piuttosto che 1 solo cavo consente una riduzione delle perdite all'incirca del 50%.

### *Sistema di distribuzione sul piano*

Ciascun piano della torre, da un punto di vista elettrico, può essere schematizzato come in figura 28.

L'assorbimento di potenza di ogni piano sarà pari a circa 18 W ad una tensione di 48 Vdc. Poiché si è supposto di effettuare il sistema di distribuzione in corrente alternata monofase l'alimentatore in figura sarà costituito da un convertitore AC/DC.

## 4.9 Rete di collegamento

I collegamenti tra le torri e le Junction Box e verso il laboratorio a terra verranno effettuati con una rete di cavi elettro-ottici.

### 4.8.1 Il cavo elettro ottico principale

La progettazione e la realizzazione del cavo principale per il progetto NEMO rappresenta sicuramente una sfida tecnologica ad alto livello. L'attività di R&D e di progettazione del cavo principale è stata svolta dalla NEXANS la quale ha attualmente proposto diverse soluzioni applicabili al progetto.

Nel caso di un sistema in AC è preferibile l'uso di polietilene come materiale di isolamento elettrico. La ragione consiste nel fatto che il PE è un materiale in cui le caratteristiche di isolamento sono ormai ben collaudate e le cui proprietà nel lungo tempo sono ben conosciute.

Sotto sono riportati due differenti soluzioni progettuali rispetto alle perdite e alla caduta di tensione sul cavo; la prima dove la sezione del conduttore è considerata la più bassa possibile e l'altra dove le perdite sono ridotte al minimo. Bisogna considerare che queste simulazioni non tengono conto dell'intero sistema di potenza che potrebbero modificare i risultati.

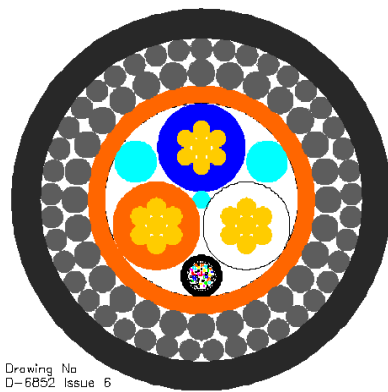
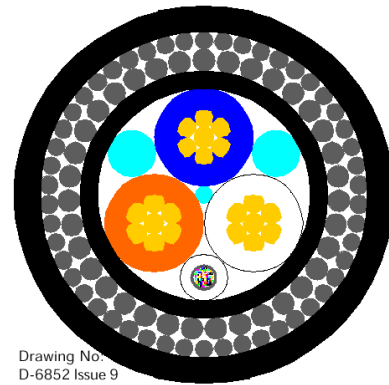
#### *Ipotesi 1: cavo 3x25mm<sup>2</sup>*

Questo cavo è equipaggiato da 3 conduttori da 25mm<sup>2</sup> con un isolamento di spessore di 2.15mm (PE). Lo schema è mostrato in Fig. 29.

#### *Ipotesi 2: cavo 3x50mm<sup>2</sup>*

In questa ipotesi viene considerato l'effetto dell'incremento dei conduttori da 3x50mm<sup>2</sup>. In questo caso lo spessore dell'isolamento è di 2.5 mm (PE). Lo schema del cavo in questione è mostrato in Fig. 30.

Il cavo elettro ottico principale termina, negli ultimi due chilometri con una serie di 8 branching unit equidistanziate di 200 metri l'una dall'altra. Le branching unit sono dei

Fig. 29 - Cavo AC 3x25 mm<sup>2</sup>.Fig. 30 - Cavo AC 3x50 mm<sup>2</sup>.

contenitori in titanio di tipo passivo, non contenendo all'interno alcuna elettronica o logica di gestione, che hanno lo scopo di permettere lo sfioccamento del cavo elettro ottico principale. La branching unit, rappresentata schematicamente nella figura sottostante, è equipaggiata con due penetratori che permettono l'ingresso e l'uscita del cavo elettro ottico, garantendo la tenuta stagna della giunzione e la tenuta meccanica necessaria durante le operazioni di deployment o durante un'eventuale operazione di recupero del cavo. Oltre ai due penetratori sopra citati le branching unit saranno dotate di un cavo elettro ottico dotato di un penetratore collegato alla branching unit e nell'altra estremità di un connettore del tipo operabile tramite ROV che consente il collegamento tra la branching unit e la rispettiva junction box.

Il cavo elettro ottico sfioccato internamente alla branching unit verrà collegato tramite il jumper alla rispettiva junction box.

La junction box è un contenitore di forma sferica che ha lo scopo di contenere al suo interno:

- L'elettronica per la trasmissione dei dati, in particolare ogni junction box conterrà al suo interno un modulo DWDM per la raccolta ed il concentramento dei dati provenienti da una riga del laboratorio;
- L'elettronica per la gestione delle stringhe e/o torri collegate alla junction box;
- L'elettronica per la gestione della distribuzione della potenza

La junction Box della dorsale principale sarà realizzata mediante due semisfere in titanio grado 5 ed un distanziale intermedio realizzato con lo stesso materiale, sul quale saranno realizzati dei fori per l'inserimento dei penetratori per:

- Collegamento con la branching unit
- Collegamento con la junction box precedente e successiva
- Collegamento con le stringhe della riga

I collegamenti verranno realizzati tramite dei cavi elettro ottici ai capi dei quali si troveranno dei connettori sottomarini del tipo ROV operated <sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Le specifiche dei connettori sottomarini sono riportate nel documento "Connettori elettro-ottici".



La connessione diretta tra ogni junction box permette nel caso in cui si verifica un problema in un componente della dorsale principale (branching unit, jumper o junction box) la possibilità, di creare tramite un'apposita logica elettronica, un percorso diverso per trasferire i segnali di potenza ed i dati tra la stazione di terra e le stringhe e bypassare il malfunzionamento, evitando in questo modo un intervento immediato ed un conseguente blocco del laboratorio sottomarino o una riduzione della sua efficienza.

La junction box sarà contenuta internamente ad un telaio (frame) che avrà lo scopo di:

- permettere il deployment della junction box in piena sicurezza;
- permettere il recupero della junction box nel caso in cui sia necessario effettuare operazioni di manutenzione;
- permettere le operazioni di collegamento della junction box: con i penetratori provenienti dalla junction box finiranno su due pannelli posti lungo le pareti laterali del frame (come visibile nel telaio realizzato per il progetto ANTARES in figura 31), su questi pannelli il ROV effettuerà le connessioni con i connettori dei jumper di collegamento della Branching unit, delle junction box e delle stringhe.

Le principali caratteristiche tecniche del telaio sono:

- Il telaio verrà realizzato in titanio grade 2 e grade 5, verranno utilizzati profili commerciali ove possibile al fine di ridurre i costi realizzativi della struttura;
- I pannelli per i connettori verranno realizzati in materiale composito e saranno avvitati alla struttura;
- Dimensioni 2 x 2 x 2.5 metri;
- Peso inferiore ai 200 Kg

## Lista degli acronimi

MO	Modulo ottico
PMT	Tubo Fotomoltiplicatore (PhotoMultiplier Tube)
MCL	Modulo di Controllo Locale
MCS	Modulo di Controllo della Stringa
SBS	Struttura di Base della Stringa
JB	Junction Box
BU	Branching Unit
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
ROV	Remotely Operated Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle