

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
“LA SAPIENZA”



FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

TESI DI LAUREA IN FISICA

**Dimensionamento e realizzazione di un
apparato autonomo per la misura di
parametri ottici ed ambientali inerenti un
telescopio Čerenkov sottomarino per
neutrini astrofisici di alta energia**

Relatore:

Prof. Antonio Capone

Candidato:

Simone Biagi

Matricola 691026

Anno Accademico 2004-2005

TESINA 1

TERMODINAMICA DELL'AGGREGAZIONE
MICELLARE

Prof. Cesare Cametti

TESINA 2

NUOVA LUCE SULLA "DARK MATTER"

Dott. Paolo Serra

Indice

1	Rivelazione di neutrini astrofisici	6
1.1	Astronomia con raggi cosmici	6
1.2	Perché astronomia con i neutrini?	13
1.3	Le sorgenti astrofisiche	22
1.4	Rivelazione Čerenkov di muoni upgoing	29
1.5	La scelta del sito abissale	37
1.6	Tecniche alternative di rivelazione	46
2	Proprietà ottiche ed oceanografiche di un sito abissale rilevanti per un telescopio a neutrini	48
2.1	Il <i>biofouling</i>	48
2.2	Le correnti	53
2.3	La salinità e la temperatura	56
3	Progetto dell'apparato sperimentale	58
3.1	Strumento autonomo per misure abissali protratte su tempi lunghi	58
3.2	Gli strumenti collegati alla stazione	65
3.2.1	Correntometro Doppler 3820R Aanderaa	65
3.2.2	Multisensore Ocean Seven 316 CTD Idronaut	68
3.2.3	Modem acustico	70
3.3	L'apparato di misura del <i>biofouling</i>	71
3.4	Le misure eseguite: scadenze temporali e medie	82

<i>INDICE</i>	2
4 Circuiti originali	85
4.1 Definizione della strategia di misura	85
4.2 Connessioni dell'apparato	101
4.3 Caratterizzazione dei consumi dell'apparato e stima della durata della presa dati	104
5 Test in laboratorio dell'apparato	116
5.1 Prove effettuate sui singoli strumenti	116
5.2 Verifica del funzionamento globale della stazione	123
6 Conclusioni	132
A Programmi di gestione dell'apparato	135
A.1 Programma di comunicazione su porta seriale	135
A.2 Programma di lettura dell'ADC	140
A.3 Programma di gestione delle linee digitali di output	143

Introduzione

Il lavoro descritto nella presente tesi è stato svolto nell'ambito della collaborazione italiana NEMO (acronimo di *NEutrino Mediterranean Observatory* - Osservatorio di neutrini nel Mar Mediterraneo). L'obiettivo della collaborazione è la realizzazione di un telescopio per neutrini astrofisici di alta energia ($10^{11}eV \leq E_\nu \leq 10^{17}eV$).

L'utilizzo dei neutrini di alta energia nello studio degli oggetti celesti permette di ampliare l'intervallo delle energie accessibili, e quindi studiare il cosmo in modo complementare all'astrofisica tradizionale, estendendone l'orizzonte di osservabilità. Nel caso degli apparati sottomarini, la rivelazione avviene attraverso la raccolta della luce Čerenkov generata dalla propagazione in acqua delle particelle cariche prodotte dall'interazione dei neutrini astrofisici. La luce Čerenkov prodotta viene rivelata attraverso un opportuno reticolo di fotomoltiplicatori installato nelle profondità marine.

Il progetto attuale della collaborazione NEMO prevede l'installazione di circa 6000 fotomoltiplicatori, disposti secondo un reticolo predefinito, in un sito abissale nel Mar Mediterraneo. Sarà strumentato un volume d'acqua dell'ordine del km^3 , rendendo possibile la rivelazione Čerenkov di neutrini astrofisici.

Il volume d'acqua marina, insieme ai fotomoltiplicatori, è parte integrante del rivelatore Čerenkov. È pertanto indispensabile caratterizzare il sito prescelto per l'installazione del telescopio sottomarino, attraverso la stima di alcuni parametri ottici ed ambientali. Grandezze quali la salinità e la temperatura influenzano direttamente la propagazione della luce in acqua; in

particolare ne influenzano la velocità. Batteri ed altre forme di vita presenti nell'ambiente marino possono proliferare sui moduli ottici che contengono i fotomoltiplicatori, provocando un oscuramento delle superfici e diminuendo l'efficienza dell'apparato.

Il nostro lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la realizzazione di un apparato autonomo in grado di compiere misure di parametri ottici ed ambientali in un sito sottomarino. Il nostro apparato, che sarà descritto dettagliatamente in seguito, è stato progettato per la raccolta di dati in maniera completamente autonoma. Un elaboratore centrale gestisce la strumentazione che costituisce l'apparato, definendo le modalità e i tempi di misura; tale elaboratore ha il compito di organizzare i dati raccolti dalle periferiche in un unico formato. Mostriamo gli strumenti che compongono l'apparato e le operazioni di calibrazione, gestione e test effettuate.

Nel primo capitolo, dopo aver mostrato le principali caratteristiche dei raggi cosmici e gli effetti legati alla loro propagazione nello spazio, sono descritti i vantaggi di una astronomia con i neutrini e gli oggetti astrofisici noti che sono candidati ad essere sorgenti di neutrini di alta energia. Si discuterà circa i fenomeni che permettono la rivelazione di neutrini, evidenziando i motivi che hanno spinto alla realizzazione di apparati sottomarini.

Le proprietà ottiche ed oceanografiche che è necessario caratterizzare nel sito prescelto per l'installazione di un telescopio Čerenkov sottomarino sono oggetto del secondo capitolo.

Il terzo capitolo è dedicato alla descrizione dell'apparato realizzato. Sono presentati gli strumenti che fanno parte della stazione autonoma ed i componenti originali che sono stati appositamente realizzati. Sono mostrate la modalità di misura dell'apparato nel suo insieme.

Nel quarto capitolo sono esposti i risultati delle misure di calibrazione effettuate. È mostrata una stima del tempo di attività dell'apparato, a partire dalle misure dei consumi della strumentazione.

Sono state, infine, effettuate alcune prove in laboratorio del funzionamen-

to globale della stazione; i risultati sono presentati nel quinto capitolo.

Nel sesto capitolo sono riportati e discussi i risultati e i possibili sviluppi del presente lavoro.

Capitolo 1

Rivelazione di neutrini astrofisici

La conoscenza che abbiamo dell'Universo proviene dalla rivelazione della radiazione cosmica che raggiunge la Terra. Studiare le proprietà dei raggi cosmici costituisce uno strumento di indagine complementare alle osservazioni compiute con telescopi ottici per investigare intervalli di energia e distanze altrimenti non accessibili con l'ausilio dei fotoni.

Nei primi paragrafi di questo lavoro si giustificherà la scelta del neutrino come particella candidata allo studio di sorgenti astrofisiche di altissima energia; si porrà l'attenzione sugli oggetti astrofisici osservabili con tale tecnica. Si discuterà delle tecniche di rivelazione dei neutrini astrofisici, della scelta del sito più favorevole per la collocazione dell'apparato rivelatore e della sua caratterizzazione.

1.1 Astronomia con raggi cosmici

La conoscenza del cosmo è progredita fino ai giorni nostri basandosi principalmente sulle informazioni portate sulla Terra dalla radiazione elettromagnetica, dalle onde radio agli infrarossi, dalla luce visibile agli ultravioletti, fino ai raggi x e γ . La scelta dei fotoni come vettori di informazione presenta molti vantaggi. Essi sono prodotti in grandissima quantità e per molto tempo

da quasi tutti i corpi celesti: basti pensare ai processi di nucleosintesi nelle stelle. I fotoni sono elettricamente neutri e stabili: l'identificazione della loro direzione di provenienza permette di risalire alla posizione della sorgente, in quanto un flusso di fotoni non subisce significative deflessioni nel corso della sua propagazione fino alla Terra. I fotoni, inoltre, sono facilmente rivelabili ed il loro spettro fornisce informazioni precise sulle proprietà (fisiche e chimiche) delle sorgenti. A partire dal XX secolo l'astrofisica si è arricchita di altri vettori d'informazione: si tratta di particelle nucleari e subnucleari cariche o neutre di origine extra-terrestre. Queste particelle vengono chiamate Raggi Cosmici (RC), e forniscono l'opportunità di studiare l'Universo in modo complementare a quanto fatto con i fotoni.

La radiazione cosmica che sopravvive al viaggio dalle sorgenti verso la Terra è detta componente "primaria", mentre viene detta componente "secondaria" il prodotto di frammentazione della radiazione primaria nell'atmosfera terrestre. I RC primari sono composti per l'85% da nuclei d'idrogeno (protoni), per il 13% da nuclei di elio (particelle α), e per il resto da nuclei più pesanti, di cui si individuano i gruppi più significativi in ordine di abbondanza: C, N, O, Fe, fino agli attinidi. A questi si aggiungono anche i fotoni gamma ed i neutrini di altissima energia che sono supposti essere prodotti nelle stesse sorgenti dei raggi cosmici carichi. Gli elettroni che rientrano nella radiazione cosmica primaria provengono quasi totalmente dal vento solare, mentre quelli di origine extrasolare perdono rapidamente energia per emissione di luce di sincrotrone e rimangono per lo più confinati in regioni prossime alle sorgenti.

L'atmosfera terrestre ha uno spessore medio di circa $1030g \cdot cm^{-2}$ e rappresenta uno schermo pressoché totale per la componente primaria, che si frammenta in sciami elettromagnetici e adronici (si veda la figura 1.1); via via che lo sciame attraversa l'atmosfera terrestre, sono prodotte un gran numero di particelle fino ad un numero massimo legato all'energia ed al tipo di primario. Gran parte di queste non raggiungono la superficie terrestre; le particelle più penetranti (componente "dura") sono i muoni e i neutrini che si contrappongono agli adroni, fotoni ed elettroni di più bassa energia (componente "molle") che vengono assorbiti in maggior numero dall'atmosfera.

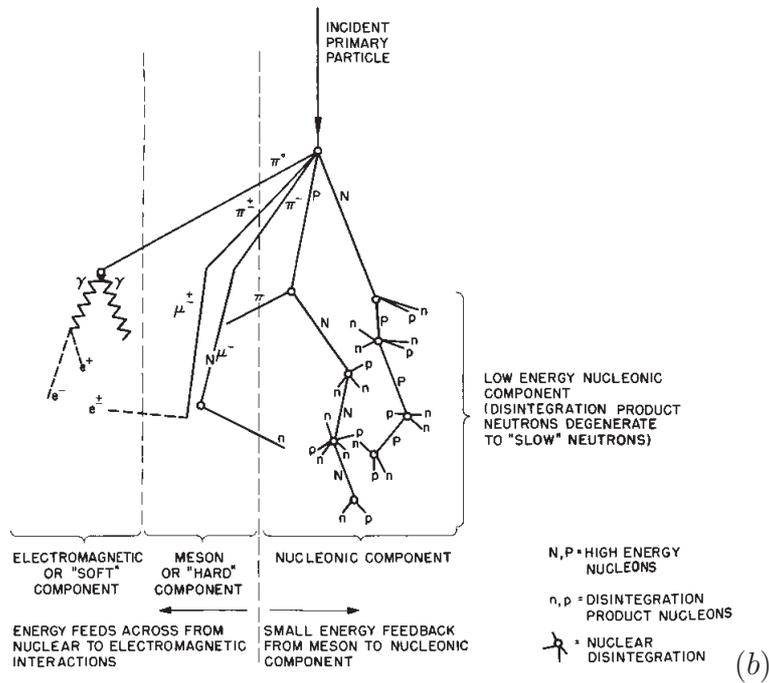
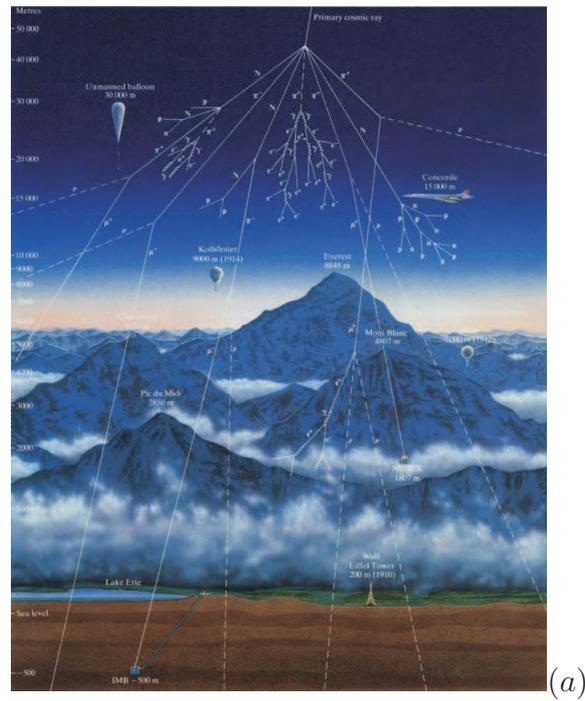


Figura 1.1: (a) Sciame di particelle prodotto dall'interazione dei raggi cosmici primari con gli strati superiori dell'atmosfera terrestre [web1]. (b) Rappresentazione schematica della radiazione cosmica secondaria; si distingue una componenti "dura" (*hard*) e una "molle" (*soft*) [web2].

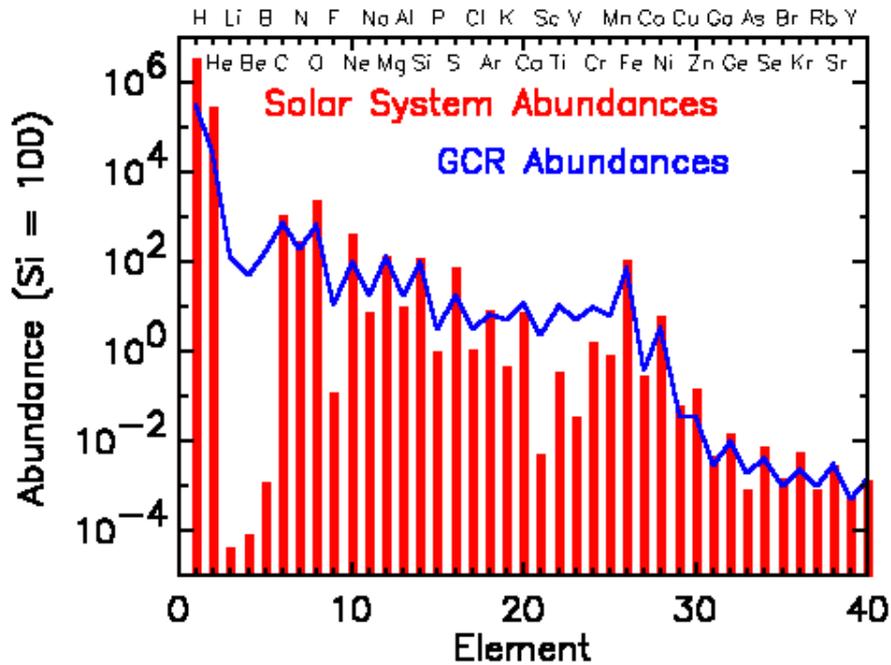


Figura 1.2: Abbondanza relativa degli elementi nei raggi cosmici di origine galattica con $E \approx 100\text{GeV}$ misurata negli strati superiori dell'atmosfera, comparata con l'abbondanza nel Sistema Solare. I dati sono stati entrambi normalizzati ponendo per il silicio $[Si] = 10^2$ [LON92].

Lo studio della composizione dei raggi cosmici e della loro distribuzione in energia rappresenta un importante mezzo per studiare in modo indiretto le sorgenti astrofisiche che li hanno generati, e capire i meccanismi di produzione, iniezione e propagazione nello spazio interstellare o intergalattico.

Ad esempio, il confronto delle abbondanze relative dei RC e della materia del sistema solare mostrato in figura 1.2 mette in luce similitudini e importanti differenze tra i due campioni di materia; una significativa discrepanza tra le rispettive composizioni risiede nella sostanziale abbondanza dei gruppi di nuclei Li, Be e B presenti nella radiazione cosmica come prodotto di spallazione dei primari più pesanti e assenti nella materia del sistema solare perché consumati come catalizzatori nelle reazioni nucleari all'interno del Sole.

Lo spettro in energia dei RC primari segue una legge di potenza del tipo:

$$\frac{dN}{dE} = 1.8E^{-\alpha} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1} \quad (1.1)$$

che viene rispettata in larga misura da tutti i nuclei. Il grafico di figura 1.3(a) riporta i flussi di RC misurati da vari esperimenti sensibili a diversi tipi di nuclei in funzione dell'energia dei nucleoni che li compongono. Come si vede la maggior parte dei RC sono protoni con energia inferiore a 3 GeV (sotto a questa soglia in energia è ben evidente la modulazione solare). Lo spettro in energia complessivo per tutti i nuclei è riportato in figura 1.3(b) in un intervallo molto ampio di energia (da qualche GeV a 10^{21} eV). Esso segue ancora una legge di potenza; nella figura 1.3(b) sono messi in evidenza i tre intervalli energetici corrispondenti a tre valori leggermente, ma significativamente, diversi dell'esponente α . Fino a $E \sim 10^{15} eV$ (=1 PeV), α vale circa 2.7; oltre tale soglia, denominata anche il "ginocchio" dello spettro (*knee*, in inglese) questo diventa più ripido con $\alpha = 3$ per poi ritornare a circa 2.8 oltre $E = 10^{19} eV$, soglia denominata "caviglia" (*ankle*, in inglese) dello spettro.

I cambi di pendenza dello spettro in energia dei RC primari vengono spiegati assumendo che la quasi totalità dei RC con energia sotto a $10^{17} eV$ siano di origine galattica, prodotti ed accelerati in prossimità dei Resti di Supernovae (*Supernova Remnants*, SNR); si ipotizza che questi restino confinati dal campo magnetico galattico ($B \approx 3\mu G$) lungo i bracci della spirale fino a che non sono accelerati tanto da avere un raggio di girazione superiore alle dimensioni della Via Lattea.

La rigidità magnetica per una particella si scrive come $\frac{pc}{Ze}$, pertanto risulta evidente che i protoni, ovvero la componente più abbondante, siano i primi a lasciare la nostra Galassia; il meccanismo di propagazione e di perdita dei protoni (più abbondanti) prima dei nuclei più pesanti (più rari) spiega l'aumento di pendenza attorno al "ginocchio". Il secondo cambio di pendenza dello spettro dei RC primari è in corrispondenza della cosiddetta "caviglia" ($E \sim 10^{19} eV$). I RC che possiedono energie al di sopra di tale soglia vengono denominati raggi cosmici di energie estreme (*Ultra High Energy Cosmic Rays*, in inglese - UHECR). Il cambio di pendenza oltre la caviglia viene

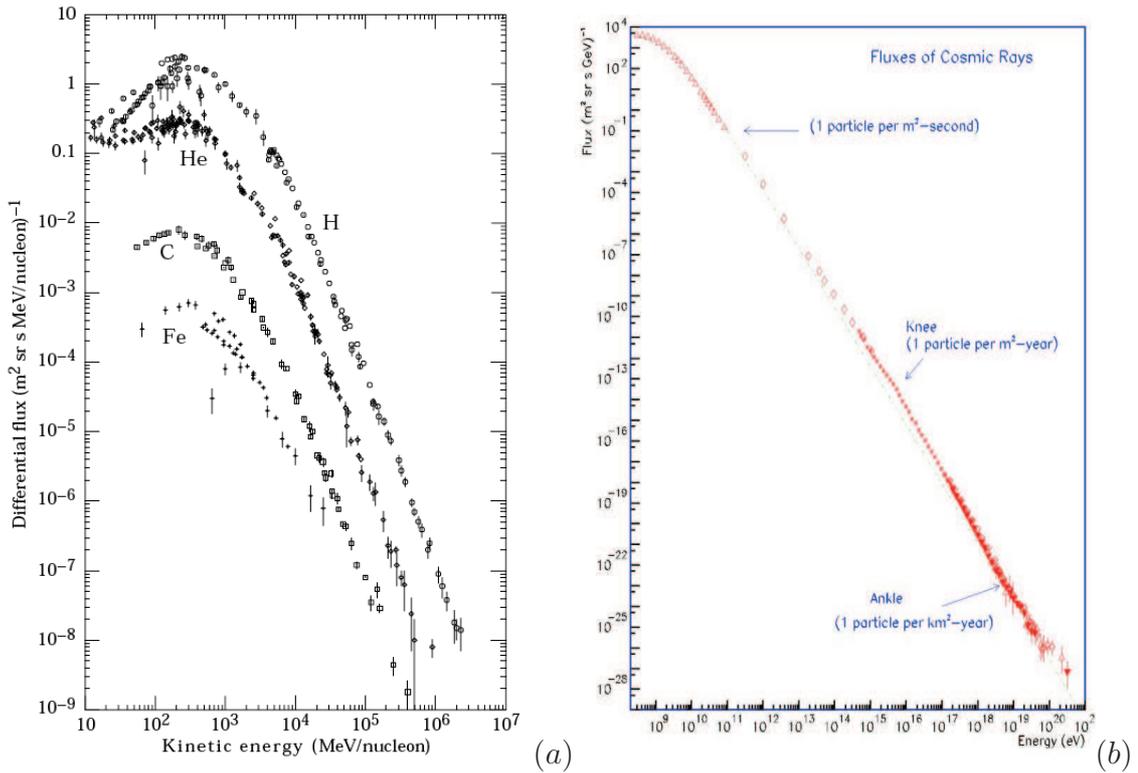


Figura 1.3: (a) Spettro differenziale in energia dei raggi cosmici primari. Sono riportati gli spettri di idrogeno, elio, carbonio e ferro: a basse energie è ben evidente la modulazione solare. Il flusso differenziale è riportato in funzione dell'energia cinetica in MeV per nucleone [LON92]. (b) Spettro complessivo dei RC in funzione dell'energia. L'energia è riportata su scala logaritmica ed espressa in eV ; in ordinata il flusso differenziale è riportato su scala logaritmica, ed è espresso in numero di particelle per intervallo di energia, per unità di area, di angolo solido e di tempo. I valori fra parentesi indicano il flusso integrato alle corrispondenti energie [web3].

spiegato considerando adesso predominante il flusso di origine extragalattica, proveniente da sorgenti estremamente più energetiche di quelle tuttora conosciute nella Via Lattea; tali macchine cosmiche, come i Nuclei Galattici Attivi (*Active Galactic Nuclei* - AGN) o i brillamenti di raggi gamma (*Gamma Ray Burst* - GRB), capaci di accelerare particelle fino ad energie di $1ZeV$ ($=10^{21}eV$), rappresentano sorgenti di gran lunga più efficienti nell'accelerazione alle altissime energie rispetto alle SNR, e determinano la diminuzione della ripidità del flusso dei RC primari.

Le misure dirette dei RC primari vengono effettuate con esperimenti alloggiati su palloni o aerei stratosferici (BESS, HEAT, RUNJOB, CAKE) o su satellite (ARIEL V, HEAO3, AMS) [web4], a quote dove l'atmosfera terrestre è quasi completamente rarefatta. Limitazioni di natura tecnologica obbligano la costruzione di tali rivelatori a dimensioni e peso contenuti. I tempi di esposizione alla radiazione cosmica, inoltre, non possono essere arbitrari, essendo in media di circa 15 giorni il tempo di volo di un pallone stratosferico di lunga durata (*Long Duration Balloon Flight*), di una decina di ore il volo di un aereo di alta quota, ed al massimo di qualche anno la permanenza di un esperimento in orbita sui satelliti.

Per questo motivo si determina necessariamente una soglia in energia per la rivelazione diretta, posta al di sotto del "ginocchio". Oltre tale soglia, le caratteristiche dei RC primari devono essere dedotte in modo indiretto, tramite la misura degli sciami estesi in atmosfera (*Extensive Air Shower*) con rivelatori posizionati direttamente sulla superficie terrestre, senza limitazioni spaziali o temporali dettate da necessità tecnologiche.

Si riporta di seguito una breve panoramica sui vari esperimenti a terra suddivisi per tipologia di rivelazione ed energie dei RC indagati.

$E \approx 10^{12}eV$: rivelatori di luce Čerenkov prodotta dagli sciami in atmosfera (CANGAROO, HEGRA, HESS, MAGIC, VERITAS, WHIPPLE) [web4].

$E \approx 10^{15}eV$: rivelatori estesi di sciami di particelle. Al crescere dell'energia del primario aumentano anche le dimensioni degli sciami prodotti, e sono pertanto necessari apparati molto estesi (AGASA, ARGO, KASKADE, MILAGRO, Auger) [web4].

$E \gtrsim 10^{16}eV$: rivelatori di fluorescenza (EUSO, OWL, HiRes, Auger) [web4].

Ad energie oltre la “caviglia” ($E \geq 10^{19}eV$) le misure sono estremamente poche (dell’ordine di qualche decina); gli esperimenti che hanno pubblicato dei risultati in quest’ultimo intervallo dello spettro energetico dei RC sono HIRES ed AGASA. HIRES sostiene di osservare il taglio dovuto al noto effetto *Greisen Zatsepin Kuz’min* (GZK), che verrà approfondito più in seguito, e che prevede una soppressione del flusso di RC extragalattici dovuto all’interazione di questi con la radiazione di fondo cosmica. AGASA al contrario afferma di osservare un risollevarimento del flusso di RC per $E > 10^{20}eV$, in palese violazione dell’effetto GZK [GAI97, HAL05]. Si tiene a precisare che i metodi di rivelazione dei due esperimenti non sono gli stessi e la determinazione corretta delle sistematiche di ciascuna misura gioca un ruolo cruciale nella determinazione del reale valore assoluto del flusso.

La figura 1.4 riporta un ingrandimento della parte finale dello spettro dei RC. La linea continua rappresenta la predizione teorica del flusso della componente extragalattica.

1.2 Perché astronomia con i neutrini?

Come si è accennato all’inizio, lo studio dell’Universo è stato limitato per secoli alle osservazioni effettuate con i telescopi ottici. Lo spettro dei fotoni fornisce informazioni precise sulle proprietà fisiche e chimiche dei corpi che li producono.

D’altro canto, le regioni centrali della maggior parte delle sorgenti astrofisiche sono più dense di materia e quindi sono opache ai fotoni. Ad esempio, le informazioni che abbiamo sulla natura interna del Sole provengono da osservazioni indirette. La temperatura nel nucleo solare è approssimativamente $15 \cdot 10^6 K$, e la sua densità è circa 150 volte quella dell’acqua. Sotto queste condizioni, i nuclei di idrogeno ionizzato, semplicemente protoni, collidono fra di loro con un’energia sufficiente a vincere la repulsione elettrostatica. I fotoni prodotti in queste reazioni sono estremamente energetici e si trovano nella regione dei raggi gamma dello spettro elettromagnetico, ma interagi-

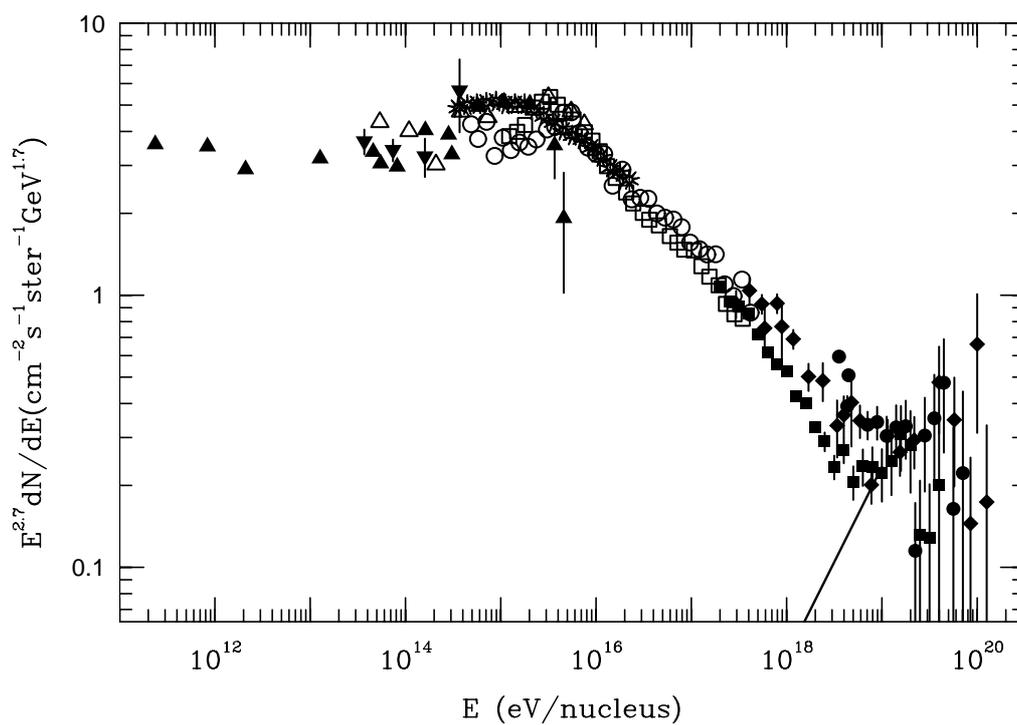


Figura 1.4: Lo spettro dei raggi cosmici altamente energetici. La presunta componente extragalattica è indicata con la linea continua a partire da 10^{18} eV , fittata sopra la zona detta *ankle*. Il taglio GZK è fissato a $5 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ [GAI97].

scono fortemente con la materia stessa del Sole attraverso processi di diffusione, assorbimento e ri-emissione. I fotoni si trovano prevalentemente nella regione del visibile e dell'infrarosso quando giungono sulla superficie del Sole e scappano via nello spazio. L'informazione portata dai fotoni che sono emessi direttamente nello spazio è per lo più correlata alla fotosfera, e solo indirettamente contribuisce alla conoscenza degli strati più interni.¹

La radiazione cosmica di fondo (in inglese *Cosmic Microwave Background Radiation* - CMBR) è la radiazione elettromagnetica con $E \sim 6.6 \cdot 10^{-4} eV$, omogenea e isotropa che riempie tutto l'Universo; è interpretata come una evidenza sperimentale del modello del *Big Bang* in quanto rappresenta il residuo termico dell'esplosione originaria. I fotoni della CMBR hanno un'energia pari allo spettro di emissione di un corpo nero alla temperatura di 2.7 K. I fotoni ad altissima energia prodotti nelle zone più esterne delle sorgenti astrofisiche, se riescono ad allontanarsi dalle sorgenti stesse, possono interagire con i fotoni della radiazione cosmica di fondo per creare coppie elettrone-positrone [GOU66]. L'interazione dei fotoni di alta energia prodotti nelle sorgenti astrofisiche con i γ_{CMBR} elimina la possibilità di sopravvivenza dei fotoni ad altissima energia (>10 TeV) a distanze superiori di 100 Mpc. Quindi il raggio d'indagine dell'Universo con l'ausilio dei fotoni è drasticamente limitato.

Per azione del campo magnetico galattico, i protoni cosmici con $E_p < 10^{18} eV$ subiscono deflessioni che impediscono fortemente il puntamento, tramite la loro traiettoria, della direzione della sorgente. Astronomia con i protoni potrebbe essere possibile ad energie superiori a 50 EeV ($= 5 \cdot 10^{19} eV$): a queste energie il campo magnetico galattico non devierebbe in maniera significativa la direzione dei protoni [HAL03]. I protoni puntano nella direzione della loro sorgente con una accuratezza determinata dal giroradio (o raggio

¹Informazioni sulle proprietà interne del Sole vengono inferite mediante analisi *eliosismografiche*, che deducono la densità e la pressione negli strati sottostanti la fotosfera dallo studio delle onde magnetosoniche che si propagano fino alla superficie del Sole.

di Larmor) nel campo magnetico intergalattico B :

$$\frac{\theta}{0.1^\circ} \cong \frac{\left(\frac{d}{1\text{Mpc}}\right) \cdot \left(\frac{B}{10^{-9}\text{G}}\right)}{\left(\frac{E}{3 \cdot 10^{20}\text{eV}}\right)} \quad (1.2)$$

dove d è la distanza dalla sorgente. Poichè il campo magnetico intergalattico è dell'ordine di $10^{-7} \div 10^{-12}\text{G}$, per distanze di 100 Mpc la risoluzione angolare dovrebbe essere sotto il grado. A tali energie però anche i protoni vedono aumentare la sezione d'urto di interazione con i γ_{CMBR} ; l'effetto GZK limita il cammino libero medio dei protoni ad altissima energia a 50 Mpc.

Astronomia: concetti base

Per fare astronomia con i raggi cosmici è necessario introdurre i concetti di puntamento direzionale e orizzonte di osservabilità. Una volta rilevata la radiazione cosmica, dalle sue proprietà si cerca di ricostruire quelle della sorgente, e, in particolare, di individuare la posizione del corpo che ha prodotto tale radiazione. Il puntamento direzionale è legato all'efficienza di ricostruzione della traiettoria delle particelle rilevate, al fine di costruire una mappa stellare. L'orizzonte di osservabilità è la stima della distanza massima indagabile con l'ausilio di una particolare radiazione scelta, ad un'energia fissata. I fotoni soddisfano molto bene la proprietà del puntamento direzionale, essendo privi di massa e di carica, ma per fotoni gamma di energia $> 10^{13}\text{eV}$ il libero cammino medio è limitato a 10 Mpc (figura 1.5). I protoni invece subiscono deflessioni significative che limitano fortemente il puntamento direzionale.

La figura 1.6 mostra in maniera sintetica i vantaggi di una astronomia di neutrini rispetto a una astronomia di fotoni e protoni.

L'effetto GZK

Poco dopo la scoperta della radiazione cosmica di fondo ad opera di Penzias e Wilson nel 1965 [PEN65], Greisen e indipendentemente Zatsepin e Kuzmin ipotizzarono che ad energie molto alte l'universo sarebbe divenuto opaco

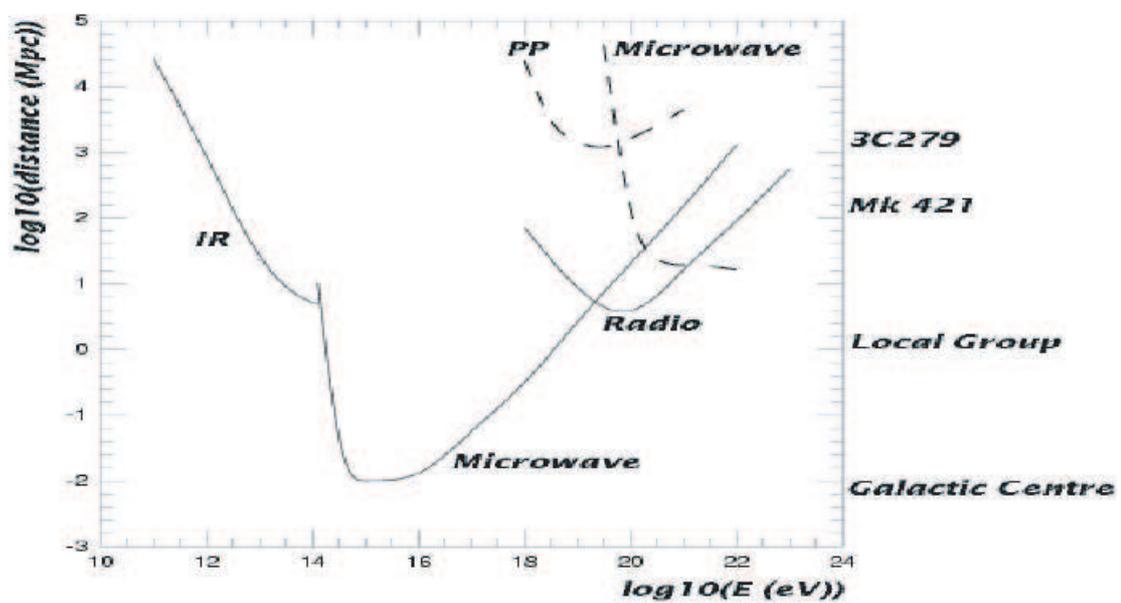


Figura 1.5: Libero cammino medio dei fotoni e dei protoni in funzione della loro energia. Sull'asse delle ordinate sono mostrate alcune dimensioni indicative: la prima dal basso è la distanza della Terra dal centro galattico e la seconda la distanza dal gruppo locale di galassie [ANTA].

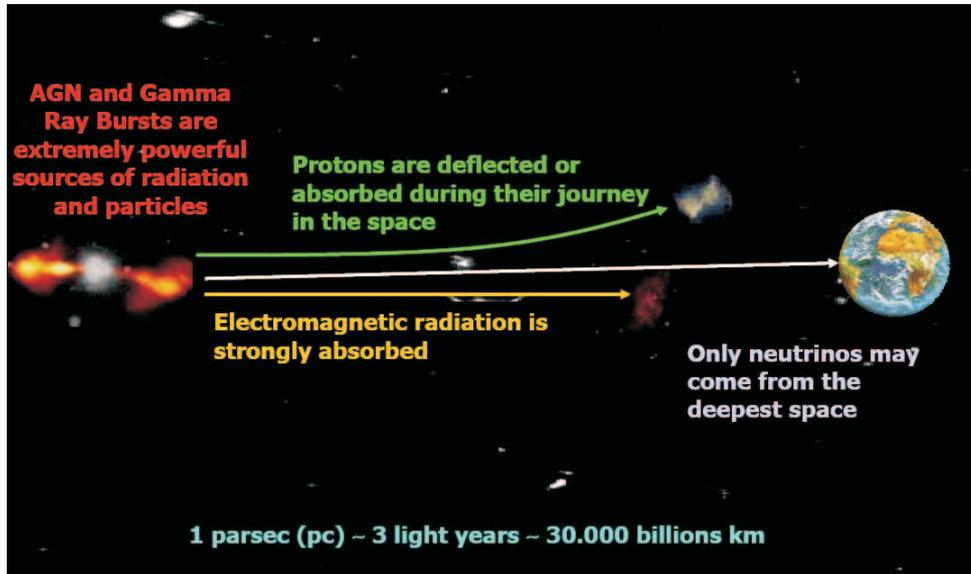


Figura 1.6: Motivazioni per una astronomia di neutrini [NEMO].

ai nuclei leggeri e pesanti [GRE66, ZAT66]. Questo effetto, di cui abbiamo dato un accenno nel primo paragrafo di questo capitolo, non contiene nulla di sconosciuto ed è facilmente riproducibile in laboratorio. Inviando un fotone di alcune centinaia di MeV su un bersaglio di protoni fermi si raggiunge l'energia di soglia per la fotoproduzione di pioni, attraverso ad esempio la produzione ed il successivo decadimento della risonanza Δ^+ . Analogamente, anche i fotoni della CMBR entrando in collisione con protoni di circa 50 EeV raggiungono l'energia di soglia nel centro di massa per la produzione della medesima risonanza.

Ad esempio, considerando il processo $p + \gamma_{CMBR} \rightarrow \pi^+ + n$ (indipendentemente dalla creazione della risonanza) si ricava un'energia di soglia per il protone E_p data da:

$$E_p > \frac{m_\pi^2 + 2m_\pi m_n}{4\epsilon} \quad (1.3)$$

ove $\epsilon = 2.3 \cdot 10^{-4} eV$ è l'energia della radiazione di fondo, $m_\pi = 140 MeV$ è la massa del π^+ e $m_n = 940 MeV$ è la massa del neutrone. La fotoproduzione di pioni è la causa principale della perdita di energia dei protoni altamente

energetici. Il mezzo interstellare è opaco a tali raggi cosmici e si può stimare la lunghezza di assorbimento per i protoni con $E_p > 50 EeV$ conoscendo la densità dei fotoni della CMBR, $n_{CMBR} = 400 cm^{-3}$, e la sezione d'urto protone su fotone, $\sigma_{p+\gamma_{CMBR}} = 10^{-28} cm^2$:

$$\lambda_{\gamma p} = \frac{1}{n_{CMBR} \cdot \sigma_{p+\gamma_{CMBR}}} \cong 10 Mpc. \quad (1.4)$$

L'effetto GZK limita la propagazione anche dei nuclei pesanti, che si frammentano per spallazione con i fotoni della CMBR.

L'effetto GZK è dunque responsabile di una rapida diminuzione del flusso di raggi cosmici di origine extragalattica, generando il cosiddetto GZK *cut-off*. Tale *cut-off* diventa importante ad energie $> 10^{19} eV$. Nella figura 1.7 sono mostrati i dati di HIRES, che presentano la variazione della pendenza dello spettro dei raggi cosmici secondo il GZK *cut-off*, confrontati con i dati di AGASA, che sembrano essere in netto contrasto con le previsioni dell'effetto GZK.

Come già detto nel paragrafo 1.1, l'esperimento AGASA è l'unico ad avere registrato eventi in contraddizione con le previsioni legate al GZK *cut-off*. I raggi cosmici ultra-energetici sono quelli con un'energia $E > 10^{20} eV$ e attualmente non se ne conosce la composizione. I fotoni e i neutrini, poiché sono particelle di carica nulla, non possono essere accelerati secondo i meccanismi elettromagnetici canonici: sono il prodotto dell'interazione di particelle cariche ancora più energetiche. Dunque, le particelle candidate ad essere identificate come UHECR sono solo i protoni e i nuclei atomici.

Per giungere sulla Terra, gli UHECR che risentono dell'effetto GZK devono essere necessariamente prodotti entro una distanza di circa 50 Mpc. Questi, in virtù della loro rigidità magnetica $\frac{pc}{Ze}$ così elevata, non risentono dei campi magnetici di bassissima intensità ($\sim \mu G$) presenti nel mezzo intergalattico. Pertanto, la direzione misurata dagli eventi candidati ad essere identificati come UHECR dovrebbe puntare direttamente alle sorgenti, con un'accuratezza inferiore al grado. Sinora nessuna sorgente così energetica in grado di produrre UHECR è stata mai osservata entro la nostra galassia né entro 100 Mpc dalla stessa con strumenti d'indagine dell'astronomia

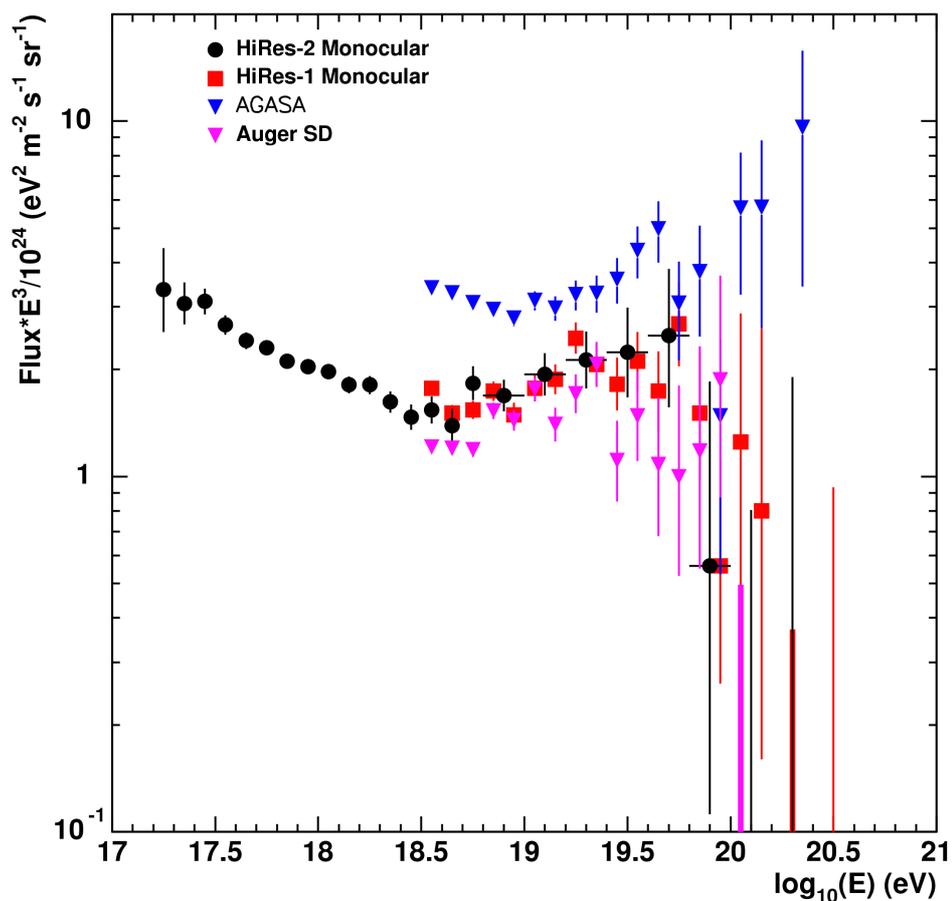


Figura 1.7: Dati dell'esperimento AGASA confrontati con i dati di HIRES e Auger. In ordinata lo spettro dei raggi cosmici è moltiplicato per E^3 per mettere meglio in evidenza variazioni della pendenza. HIRES mostra il taglio dovuto all'effetto GZK, mentre AGASA è in disaccordo con tale previsione [web3].



Figura 1.8: Uno dei rivelatori dell'Osservatorio Auger in Argentina (sullo sfondo le Ande). L'esperimento completo richiederà l'installazione di 1600 stazioni su una superficie di 3000Km^2 . Le stazioni contengono ognuna 12 tonnellate di acqua pura e il passaggio di particelle cariche produce luce Čerenkov. La misura degli sciami estesi in atmosfera (*Extensive Air Shower* - EAS) permette la ricostruzione dell'energia e della direzione del raggio cosmico primario [web9].

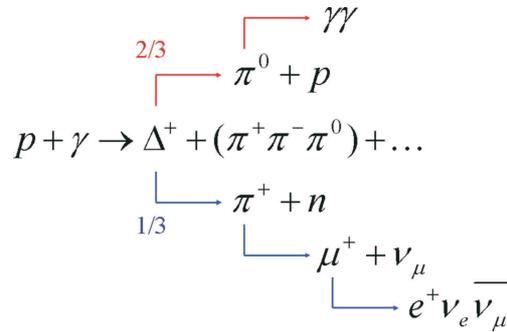
tradizionale.

È fondamentale realizzare a breve un esperimento che permetta, con tecniche alternative a quelle di AGASA, di indagare ad energie pari a $E_{GZK} \simeq 10^{20}\text{eV}$. Le attese sono per il momento legate alla realizzazione dell'esperimento Auger, in Argentina (vedi figura 1.8) [web4].

La realizzazione di un telescopio sottomarino a neutrini di volume pari al km^3 potrebbe permettere di rilevare i neutrini prodotti dall'interazione degli UHECR con l'atmosfera terrestre.

1.3 Le sorgenti astrofisiche

Il meccanismo principale di produzione di neutrini altamente energetici è legato all'evoluzione di protoni, in sorgenti astrofisiche, fino ad energie $\gtrsim 10^{18} eV$. Le interazioni dei protoni con la radiazione (o anche con la materia che circonda le sorgenti) producono mesoni (essenzialmente pioni) e attraverso i decadimenti leptonici si ottengono neutrini. In particolare i protoni, interagendo con la radiazione presente attorno alla sorgente (ad esempio i fotoni emessi dalle particelle cariche accelerate: radiazione di sincrotrone), possono dar luogo alla reazione mostrata nell'equazione 1.5. Da tale reazione ci possiamo aspettare che ν e γ , alla sorgente, siano prodotti con lo stesso indice spettrale. Conoscendo la probabilità di decadimento (*Branching Ratio* - BR) del Δ^+ nei due canali, si può aggiungere, inoltre, che il flusso aspettato di neutrini e di fotoni è quantitativamente lo stesso: infatti si ha che $BR(\Delta^+ \rightarrow \pi^0 p) = \frac{2}{3}$ e $BR(\Delta^+ \rightarrow \pi^+ n) = \frac{1}{3}$, dunque $\Phi(\gamma) \sim \Phi(\nu)$.



(1.5)

Si candidano dunque a sorgenti astrofisiche di neutrini i siti noti ove avviene accelerazione di protoni ed emissione di raggi γ . Si passeranno ora in rassegna le probabili sorgenti astrofisiche di neutrini.

Binarie X

Le binarie X, o *X-ray binaries*, sono le sorgenti astrofisiche di raggi X più luminose. Sono formate da un oggetto compatto, un buco nero o una stella

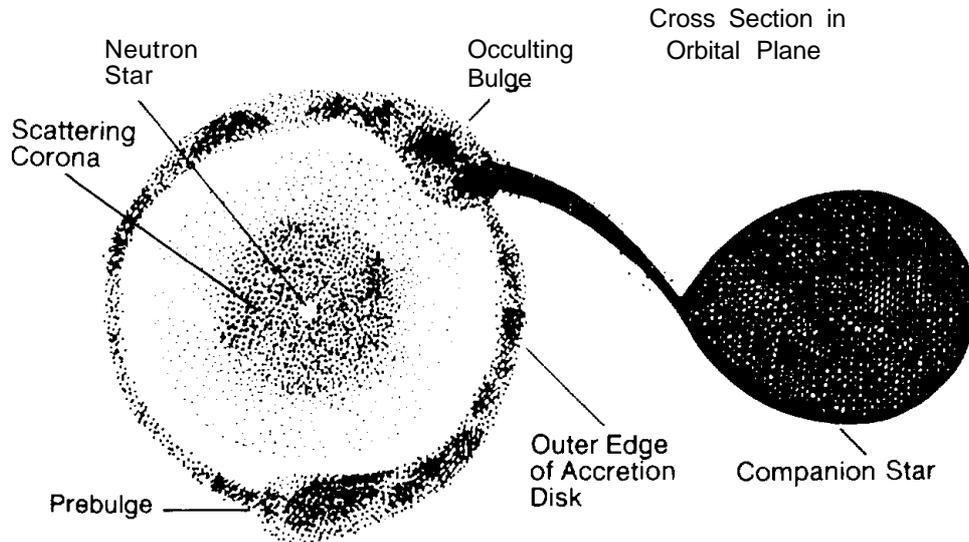


Figura 1.9: Sistema binario X formato da una stella di neutroni e da una stella compagna. È mostrato il disco di accrescimento della stella di neutroni e la corona dove il campo magnetico è altissimo ed è responsabile dei processi di accelerazione [COR86].

di neutroni, che incrementa la propria massa a discapito di una stella non degenera sua compagna che perde materia (si veda la figura 1.9). Il gas in caduta verso la stella compatta genera un'onda d'urto (*shock*) magnetosonica. Poiché i campi magnetici tra le due stelle d'un tale sistema binario possono essere anche molto intensi ($\sim 10^{10}G$), diventa possibile l'accelerazione di particelle cariche fino ad energie molto elevate. Questi sistemi binari sono caratterizzati da una netta emissione nelle frequenze X. Gli e^- accelerati nelle regioni dello *shock* emettono luce di sincrotrone che, attraverso interazioni di tipo Compton inverso con la materia di accrescimento, generano tali raggi X. È lecito supporre che tale contesto così ricco di particelle ad alta energia sia una probabile sorgente di neutrini generati nelle interazioni tra le particelle cariche accelerate ed i fotoni.

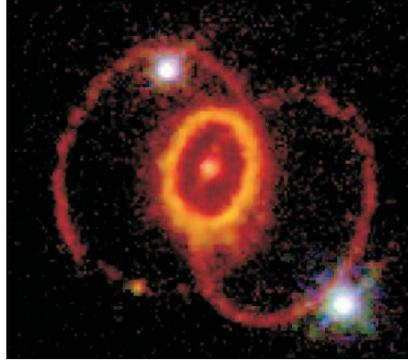


Figura 1.10: SN1987A.

Supernova remnants

I resti di supernovae galattiche (*Supernova Remnants* - SNR) sono altri candidati per la produzione di flussi osservabili di neutrini. Le esplosioni di stelle massive (o supernovae) producono fronti di *shock* di materiale in espansione che accelerano le particelle di alta energia. L'accelerazione dei raggi cosmici all'interno di questi oggetti astrofisici è prevista dal meccanismo di Fermi del primo ordine. Le onde di *shock* che seguono l'esplosione di una supernova sono generate da successive e ripetute espansioni e compressioni di materia. Le particelle cariche risultano accelerate quando attraversano il fronte di *shock*, il quale viaggia ad una velocità $u \sim 0.1c$. Il processo di accelerazione è molto lungo, in quanto l'energia aumenta gradualmente quando la particella carica attraversa in avanti e all'indietro il fronte di *shock*. La vita dello *shock* limita l'energia massima raggiungibile dai raggi cosmici.

L'aumento dell'energia può essere stimato mediante la formula [GAI95]:

$$\frac{dE}{dt} \simeq K \frac{u^2}{c} ZeB \quad (1.6)$$

e quindi

$$E_{max} < K \frac{u}{c} ZeBL \sim 10^{14} eV \cdot Z \quad (1.7)$$

ove u è la velocità dello *shock*, Ze è la carica della particella accelerata, $B \simeq 3\mu G$ è il campo magnetico galattico medio, $K \sim 0.1$ è una costante numerica

legata all'efficienza del meccanismo di accelerazione, e infine $L = uT$, dove $T \sim 10^3 \text{anni}$ è la durata del processo. Nel caso di *supernova remnants* giovani, come ad esempio SN1987A (figura 1.10), il campo magnetico nella regione di *shock* è dell'ordine dei mG e $t \sim 10 \text{anni}$: potrebbero pertanto essere prodotti raggi cosmici con energia molto maggiore, fino a $E_{max} \sim 10^{17} eV$.

Le interazioni di questi protoni di alta energia con la materia dei fronti d'onda produce neutrini e fotoni, rispettivamente dal decadimento di pioni carichi e neutri. I neutrini prodotti in tali interazioni raggiungono un'energia massima di $\sim 10^{13} eV$; a tali energie, il flusso di neutrini atteso è molto basso: qualche neutrino per chilometro quadrato per anno. Nel caso di *supernova remnants* giovani il flusso atteso aumenta fino a circa 500 eventi per km^2 per anno per $E_\nu > 100 GeV$.

Nuclei attivi galattici

I nuclei attivi galattici, AGN dall'acronimo anglosassone di *Active Galactic Nuclei*, sono gli oggetti estesi noti più energetici dell'Universo. La loro luminosità media può variare da $10^{35} \div 10^{41} W$. I nuclei attivi galattici sono considerati come le sorgenti più probabili di neutrini di altissima energia, $E_\nu > 100 TeV$ [GAI95].

Secondo diversi modelli teorici, la luminosità così elevata degli AGN è dovuta all'accrescimento di materia di un buco nero super-massivo collocato al centro di una galassia, che avviene al ritmo di qualche massa solare per anno. La massa del buco nero centrale è dell'ordine di $10^6 \div 10^{10}$ masse solari, e l'accrescimento è dovuto ad un disco di gas e materia proveniente da stelle vicine e da un toro di materia che circonda il buco nero. Nella maggior parte dei casi, perpendicolarmente al disco di accrescimento vengono emessi due *jet* relativistici che trasportano radiazione e materia (figura 1.11). Le parti terminali dei *jet* sembrano essere siti ottimali per l'accelerazione di raggi cosmici di alta energia, grazie al basso livello di perdite di energia e ai valori ridotti del campo magnetico. I *jet* terminano in superfici di *shock* di grandi dimensioni, circa $10^5 \div 10^6 pc$, dove i protoni possono essere accelerati

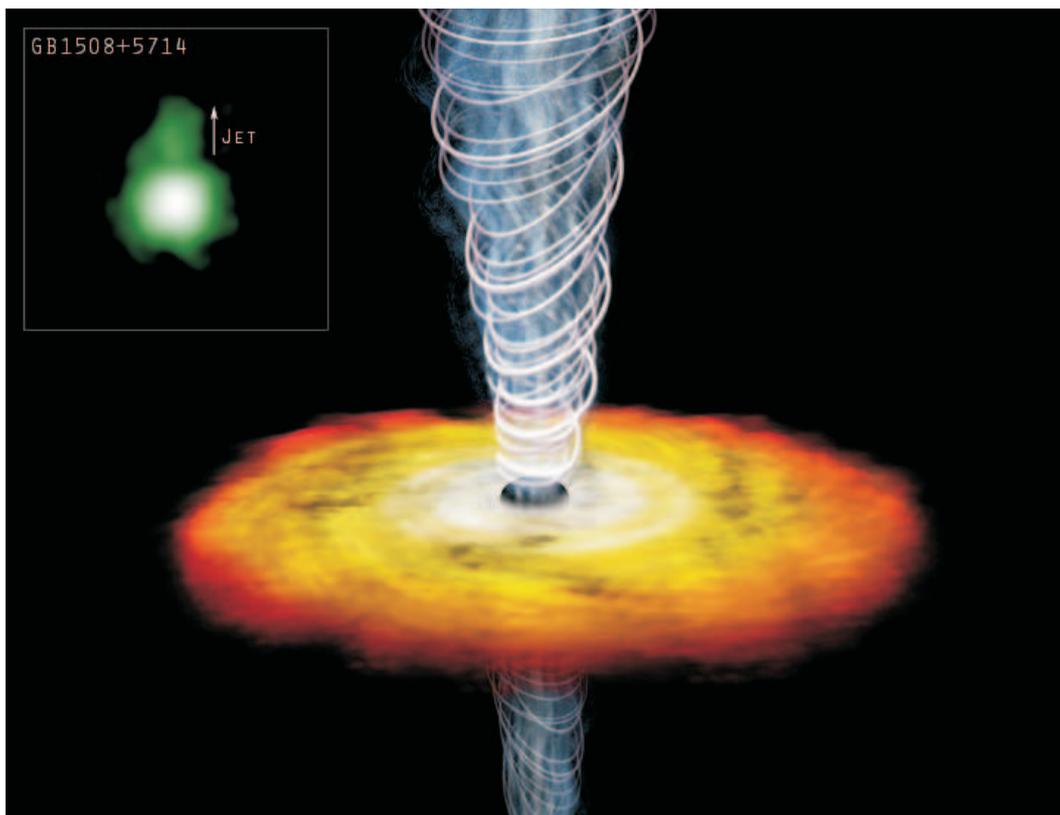


Figura 1.11: GB1508+5714 in un'immagine del telescopio Chandra (riquadro in alto a sinistra). Si osserva un *jet* di particelle altamente energetiche che si estende per più di 10^5 anni luce al di sopra del buco nero centrale. Distanti 12 miliardi di anni luce dalla terra è il *jet* più distante finora scoperto. Il processo di accrescimento del buco nero, a spese del gas e della materia che compone le stelle vicine, è accompagnato da *jet* di altissima energia, come è mostrato nella visione artistica [web5].

grazie al meccanismo di Fermi fino ad energie pari a $10^{20}eV$. L'emissione di radiazione compensa la pressione dovuta all'accrescimento di materia del buco nero.

Nei modelli generici di AGN, che non implicano necessariamente l'esistenza dei *jet*, i protoni sono accelerati dalle onde di *shock* associate con l'accrescimento del buco nero. Questi protoni interagiscono con la materia del disco di accrescimento o con la radiazione presente. Alcuni modelli producono neutrini senza i raggi gamma associati (cfr. equazione 1.5), poiché i fotoni non riescono a fuggire dal nucleo dell'AGN per via della densità di energia assai elevata. Solo l'astronomia con i neutrini permetterà di conoscere approfonditamente il nucleo e i fenomeni che avvengono all'interno di un AGN.

Gamma ray burst

I *Gamma Ray Burst* (GRB), o lampi gamma, sono i fenomeni più violenti e spettacolari noti attualmente che avvengono nell'Universo. Sono eventi con una luminosità elevatissima, dell'ordine di $10^{50} \div 10^{54} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, che avvengono in un intervallo molto breve, $0.1 \div 100s$. Fino a qualche anno fa, erano considerati dei veri misteri per la moderna astrofisica; a partire dal 1997, il satellite italo-tedesco Beppo-SAX ha permesso di individuare qualche residuo di radiazione dopo i GRB, consentendo di localizzare in quali galassie avvenisse tale esplosione. Da allora sono stati rivelati circa una dozzina di GRB, di cui si sono misurate la distanza e l'intensità dell'energia emessa durante questi lampi.

L'oggetto astrofisico che determina tale esplosione non è ancora noto; data l'elevata luminosità misurata, potrebbe trattarsi della fusione di due buchi neri molto massivi o di un buco nero e una stella di neutroni, con la deposizione sul buco nero di qualche massa solare al secondo in un raggio di circa $100km$. L'energia contenuta in tale esplosione deve realizzare una cosiddetta "palla di fuoco" (dall'inglese *fireball*), un oggetto di grandissima massa ed energia, che si espande relativisticamente con fattori di Lorentz

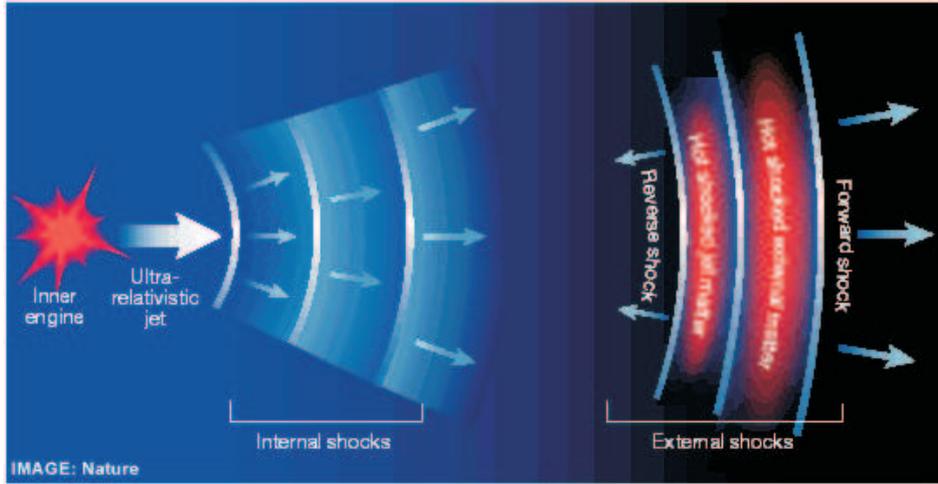


Figura 1.12: Modello di evoluzione di un *Gamma Ray Burst*. Si distinguono le due fasi di *internal shocks* e *external shocks* durante le quali può avvenire la produzione di neutrini [web6].

$\gamma \gtrsim 300$. Il materiale espulso assomiglia a quello di una supernova, con la notevole differenza che raggiunge velocità relativistiche.

Il meccanismo di evoluzione della *fireball* sembra ben compreso e in accordo con le osservazioni [WAX97]. Il materiale espulso è delimitato da una superficie di *shock* relativistica, in corrispondenza della quale protoni di alta energia possono essere accelerati mediante il meccanismo di Fermi del prim'ordine, nelle collisioni con i fronti interni all'onda d'urto (*internal shocks*). Nella fase successiva, il gas si espande fino a distanze dell'ordine di $10^{11} km$, riscaldando improvvisamente il mezzo interstellare. Questo riscaldamento genera onde di *shock* termico che si propagano sia verso l'esterno (*forward shocks*) che verso l'interno (*reverse shocks*) (figura 1.12).

Le interazioni $p - \gamma$ che avvengono nella fase degli *internal shock* durante la collisione con i fronti d'onda in espansione possono produrre neutrini con energie $E_\nu \simeq 10^{14} eV$. Durante la fase degli *external shock*, le interazioni dei protoni ad altissima energia possono generare neutrini con energia ancora maggiore, $E_\nu \simeq 10^{20} eV$. Rilevare un flusso di neutrini dovuto a un GRB consentirebbe di ridurre fortemente il rumore, effettuando misure in coincidenza spaziale e temporale con un flusso di fotoni provenienti dallo stesso

oggetto. La finestra temporale molto stretta, qualche secondo o frazione, offre un'opportunità unica per un rivelatore a neutrini di osservare neutrini associati ad un'unica esplosione.

1.4 Rivelazione Čerenkov di muoni upgoing

Nei paragrafi precedenti si è parlato dei vantaggi di una astronomia a neutrini e sono state mostrate alcune delle sorgenti candidate alla produzione di neutrini altamente energetici. In questo paragrafo si scenderà più nel dettaglio sulla rivelazione propria dei neutrini e sul principio di funzionamento di un telescopio Čerenkov sottomarino.

Interazione neutrino-nucleone

I neutrini di altissima energia possono essere rivelati osservando la luce Čerenkov prodotta in un dato mezzo dai muoni generati nell'interazione di corrente carica (CC) neutrino-nucleone. Per ridurre il fondo dei muoni prodotti nell'atmosfera terrestre, è vantaggioso situare il telescopio a neutrini a diversi chilometri di profondità (sotto il ghiaccio, acqua, ecc.) e osservare i neutrini proveniente dal basso (*upward-going*). In generale, è utile calcolare il valore della sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone nei due casi di interazione da corrente carica (equazione 1.8) e di interazione da corrente neutra (NC) (equazione 1.9) [GAN96]:

$$\begin{array}{c} (-) \\ \nu_l + N \rightarrow l^\pm + X \end{array} \quad (1.8)$$

$$\begin{array}{c} (-) \quad \quad (-) \\ \nu_l + N \rightarrow \nu_l + X \end{array} \quad (1.9)$$

ove l indica il sapore del neutrino, N è il nucleone bersaglio, X rappresenta qualsiasi altro prodotto dell'interazione (tipicamente adroni).

La sezione d'urto si scrive in funzione degli invarianti di Bjorken:

$$x = \frac{Q^2}{2M\varepsilon} \quad (1.10)$$

$$y = \frac{\varepsilon}{E_\nu} \quad (1.11)$$

ove $\varepsilon = E_\nu - E_l$ è l'energia trasferita nel sistema del laboratorio, E_ν è l'energia del neutrino incidente, E_l è l'energia del leptone prodotto, Q^2 è il momento invariante trasferito dal neutrino al leptone, M è la massa del nucleone bersaglio. I due parametri x e y sono adimensionali e compresi tra $0 \leq (x \div y) \leq 1$; x rappresenta la frazione del momento del nucleone posseduta dal quark interessato dall'interazione col neutrino, y rappresenta la frazione di impulso trasferita allo sciame adronico.

La sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone si scrive [GAN96]:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{2G_F^2 M E_\nu}{\pi} \left(\frac{M_{W,Z}^2}{Q^2 + M_{W,Z}^2} \right)^2 [xq(x, Q^2) + x\bar{q}(x, Q^2) (1-y)^2] \quad (1.12)$$

ove $M_{W,Z}$ è la massa del bosone intermedio di scambio (W^\pm per interazione da corrente carica, Z_0 per corrente neutra), M è la massa del nucleone bersaglio, $G_F \cong 10^{-5} GeV^{-2}$ è la costante di Fermi, $q(x, Q^2)$ e $\bar{q}(x, Q^2)$ sono le funzioni di distribuzione dei quark e antiquark nel nucleone [GAN96].

Gli andamenti delle sezioni d'urto sono mostrati in figura 1.13 in funzione dell'energia del neutrino, nell'intervallo di energia $10 \div 10^{12} GeV$. La sezione d'urto aumenta al crescere dell'energia e dalla figura si può ricavare schematicamente che $\sigma \propto E_\nu$ per $E_\nu \lesssim 10^{12} eV$ e che $\sigma \propto E_\nu^{0.4}$ per $E_\nu \gtrsim 10^{15} eV$.

A causa della piccola massa dell'elettrone, l'interazione neutrino-elettrone può essere generalmente trascurata rispetto all'interazione neutrino-nucleone: la sezione d'urto dipende, infatti, dalla massa del bersaglio. C'è però un'eccezione: la formazione della risonanza del bosone intermedio W^- nell'intera-

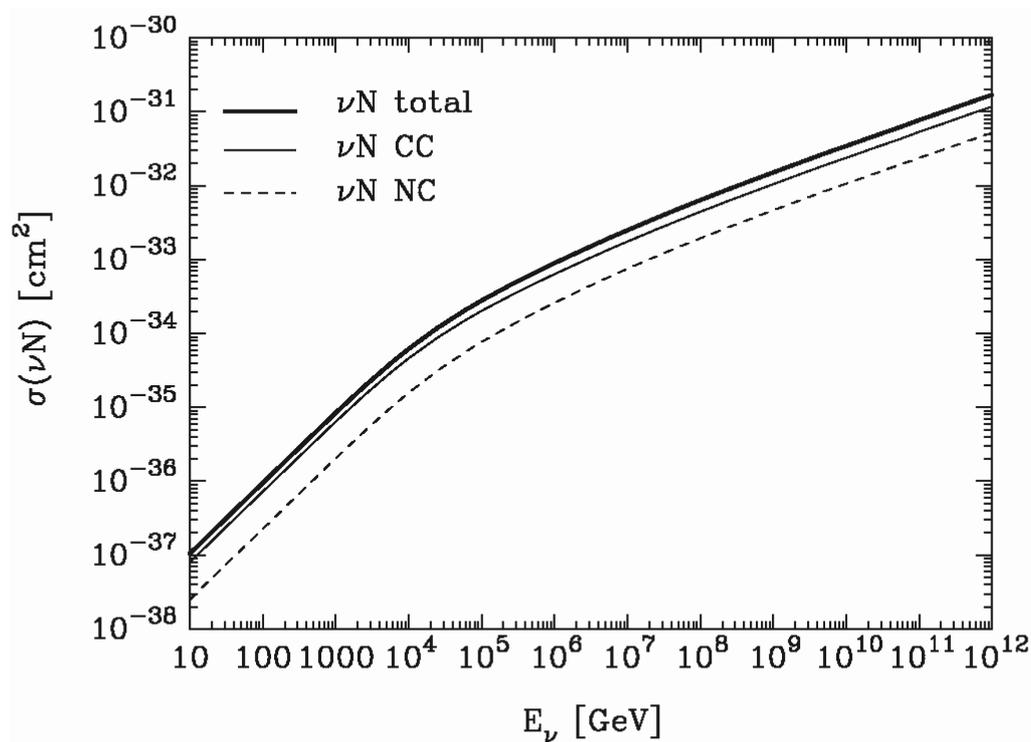


Figura 1.13: Sezione d'urto dell'interazione νN ad alte energie: linea tratteggiata $\sigma(\nu N \rightarrow \nu + X)$, linea continua $\sigma(\nu N \rightarrow l + X)$, linea spessa sezione d'urto totale (corrente neutra piú corrente carica) [GAN96].

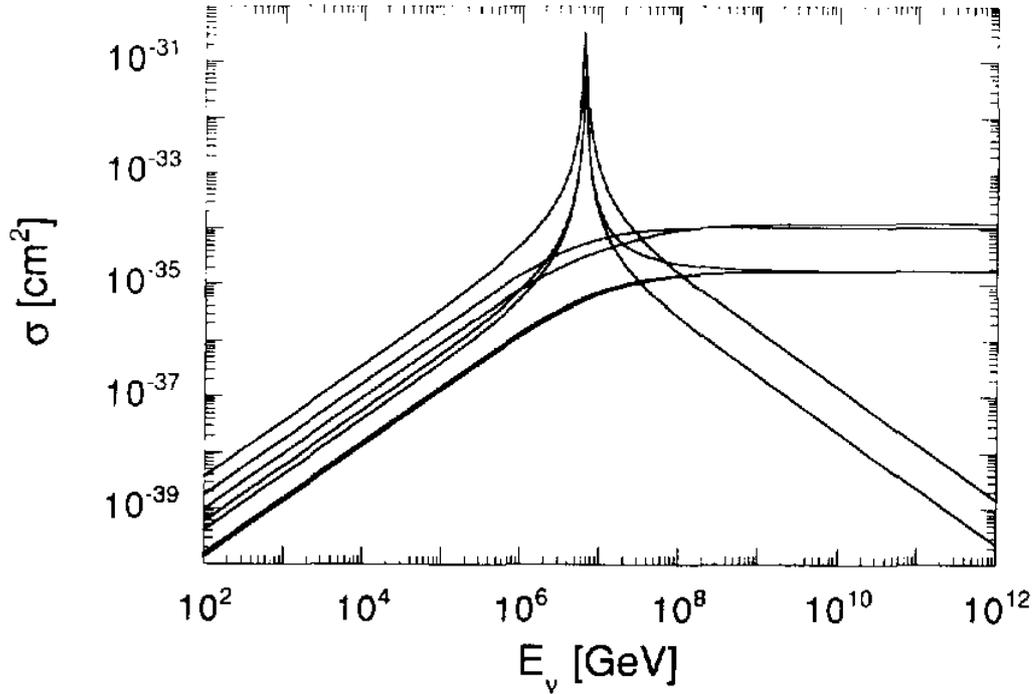


Figura 1.14: Sezione d'urto dell'interazione dei neutrini su un bersaglio di elettroni. Sono mostrate le sezioni d'urto su elettrone di neutrini e anti-neutrini di tipo e e μ . Solo le interazioni di $\bar{\nu}_e$ danno luogo alla risonanza [GAN96].

zione $\bar{\nu}_e e$ all'energia:

$$E_{\nu}^{ris} = \frac{M_W^2}{2m_e} = \frac{(80.22 \frac{GeV}{c^2})^2}{2 \cdot 0.511 \frac{MeV}{c^2}} = 6.3 PeV \quad (1.13)$$

A tale energia per il $\bar{\nu}_e$, la sezione d'urto di risonanza antineutrino-elettrone assume un valore più alto della sezione d'urto neutrino-nucleone (si veda la figura 1.14). La presenza della risonanza deve essere tenuta in considerazione quando si trattano dati provenienti da un telescopio a neutrini, e può essere utilizzata per una calibrazione in energia dell'apparato.

Considerando il basso valore della sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone e considerando che ad alte energie il flusso di neutrini aspettati è

molto piccolo, un telescopio astronomico a neutrini deve avere un volume di rivelazione dell'ordine del km^3 , in modo tale da garantire, su un tempo di presa dati dell'ordine di qualche anno, un numero di eventi statisticamente significativo.

La rivelazione Čerenkov

Particelle cariche emettono luce sotto un angolo caratteristico quando passano attraverso un mezzo con una velocità superiore a quella della luce nel mezzo stesso. L'obiettivo principale dei telescopi sottomarini a neutrini è quello di rivelare la radiazione Čerenkov emessa da un muone prodotto dall'interazione di corrente debole di un neutrino con un nucleone. Ricostruendo la traccia del muone è possibile risalire alla direzione del neutrino astrofisico che ha generato il muone.

Una particella carica che attraversa un mezzo ad una velocità superiore a quella della luce in quel mezzo polarizza gli atomi lungo la direzione del suo moto. Gli atomi polarizzati emettono fotoni in modo da creare un fronte d'onda coerente (si veda la figura 1.15) caratterizzato da un angolo θ Čerenkov dato da [LON92]:

$$\cos \theta = \frac{1}{n \cdot \beta} \quad (1.14)$$

ove $\beta = \frac{v}{c}$ è il rapporto fra la velocità della particella e la velocità della luce, e $n = \frac{c}{c_{mezzo}}$ è l'indice di rifrazione del mezzo considerato.

L'angolo α fra la direzione del muone prodotto e quella del neutrino diminuisce al crescere dell'energia del neutrino secondo la relazione sperimentale [LEA00]:

$$\langle \alpha \rangle \approx \frac{1.5^\circ}{\sqrt{E_\nu [TeV]}} \quad (1.15)$$

con l'energia espressa in TeV . È evidente, quindi, che ad energie superiori a $10^{12}eV$ ricostruire la traccia del muone corrisponde a ricostruire la direzione del neutrino.

Nell'intervallo di energia di interesse per un telescopio a neutrini, $E_\nu >$

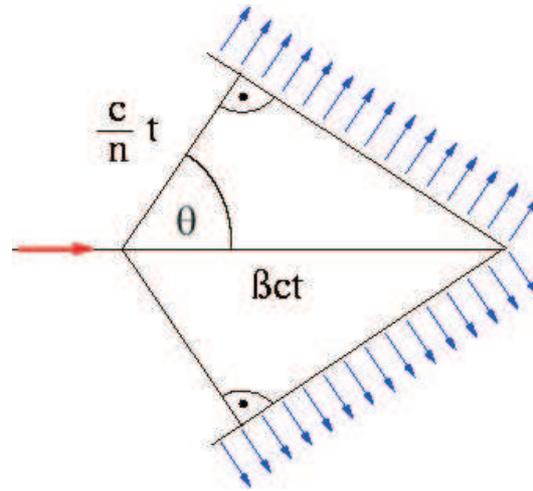


Figura 1.15: Ricotruzione della direzione di propagazione del fronte d'onda della radiazione Čerenkov. La freccia rossa indica la direzione della particella carica (muone), le frecce blu rappresentano i fotoni emessi dagli atomi polarizzati [web7].

10GeV , le particelle possono essere considerate ultra-relativistiche con $\beta = 1$. Questo introduce una semplificazione: indipendentemente dall'energia del neutrino, l'angolo Čerenkov dipende solo dall'indice di rifrazione del mezzo. Nel caso di telescopi sottomarini, grandi volumi d'acqua vengono utilizzati come parte di "rivelatori Čerenkov" insieme a griglie di fotomoltiplicatori (in inglese *Photo-Multiplier Tube*, PMT) che, disposti secondo una geometria predefinita, raccolgono la luce Čerenkov prodotta. L'indice di rifrazione dell'acqua di mare è $n = 1.35$ per luce con lunghezza d'onda $\lambda = 450\text{nm}$; dunque la luce Čerenkov viene emessa sotto un angolo di $\sim 42^\circ$ per questa lunghezza d'onda. Questa caratteristica permette la ricostruzione della traccia del muone a partire dai segnali rivelati da un reticolo di fotomoltiplicatori. In figura 1.16 è mostrata la schematizzazione della rivelazione della luce Čerenkov di un muone *up-going* dal reticolo di fotomoltiplicatori dell'apparato ANTARES (*Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch*).

La collaborazione russa Baikal è stata la prima che ha installato un apparato in grado di rivelare radiazione Čerenkov sottacqua, in Siberia nel lago

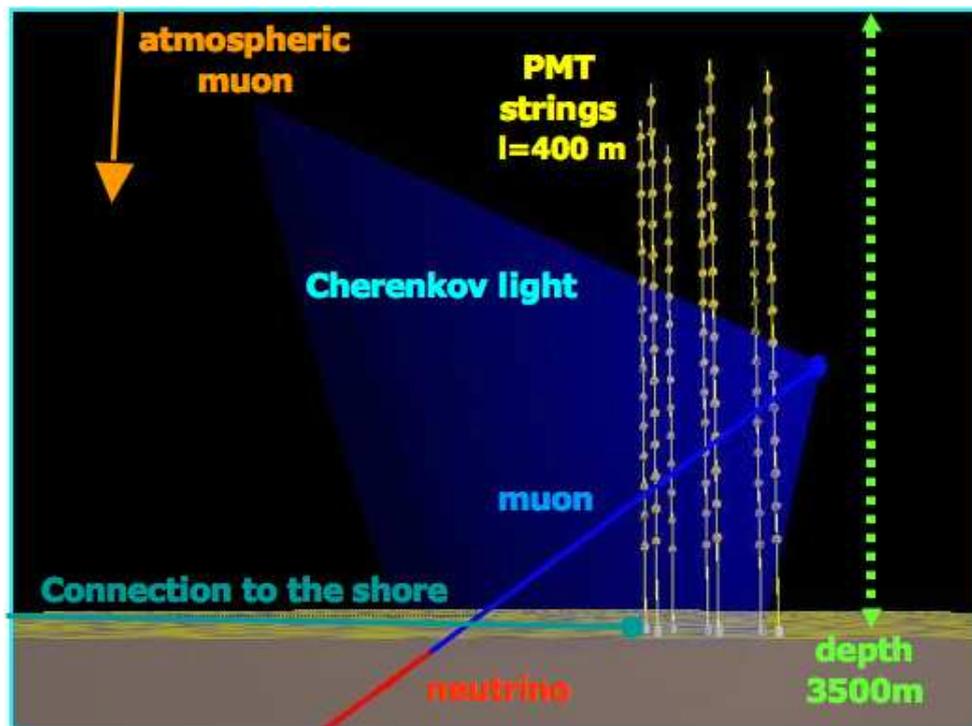


Figura 1.16: Rappresentazione schematica del telescopio sottomarino ANTARES. Situato nel mar Mediterraneo a 3500 m, rivela i muoni provenienti dal basso (scartando il fondo dovuto ai muoni atmosferici) generati da neutrini che hanno interagito nelle vicinanze dell'apparato [ANTARES].

omonimo a una profondità fra i 900 e i 1100 metri [web4].

In Antartide, la collaborazione internazionale AMANDA (*Antarctic Muon And Neutrino Detector Array*) ha installato un rivelatore di luce Čerenkov per neutrini altamente energetici nel ghiaccio [web4]. Il rivelatore attuale, AMANDA-II, ha una superficie di rivelazione di circa $10^4 m^2$ ed è posizionato ad una profondità di $1500 \div 2000 m$. È attualmente in fase di realizzazione l'estensione di AMANDA-II al km^3 : il progetto ICECUBE. La realizzazione di ICECUBE terminerà nel 2008, ed estenderà le dimensioni dell'apparato fino a coprire un volume di ghiaccio dell'ordine del km^3 . Anche il telescopio ICECUBE è un rivelatore di neutrini *up-going*; il suo scopo, quindi, sarà quello di indagare la porzione di Universo visibile dall'emisfero boreale. Diviene così indispensabile installare, entro breve tempo, un telescopio a neutrini nell'emisfero settentrionale in modo tale da osservare la porzione di cielo non accessibile ad ICECUBE.

Il lavoro svolto inizialmente da NESTOR (*Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research*) [NEST], e successivamente da ANTARES [ANTA] e NEMO (*NEutrino Mediterranean Observatory*) [NEMO], è stato quello di progettare l'installazione nel Mar Mediterraneo di un telescopio sottomarino per neutrini astrofisici. La sede dell'apparato NESTOR è presso l'isola di Pylos in Grecia, ad una profondità di circa 4000 metri; ANTARES sarà situato a circa 40 km dalle coste francesi a largo di Tolone; il sito prescelto dalla collaborazione NEMO è localizzato a circa 100 km di distanza dalle coste siciliane a largo di Capo Passero, ad una profondità di 3300 metri. Il lavoro delle tre collaborazioni europee sta convergendo verso la realizzazione di un unico telescopio sottomarino nel Mar Mediterraneo, che svolgerà un lavoro complementare a quello svolto da ICECUBE (figura 1.17 [ANTA]).

Da tutte le considerazioni espresse finora, si possono dedurre le motivazioni principali che hanno spinto la collaborazione NEMO verso la realizzazione di un apparato rivelatore di neutrini astrofisici di altissima energia:

- il neutrino permette di estendere l'orizzonte di osservabilità dell'Universo ad energie elevate in quanto non risente del GZK *cutoff*;

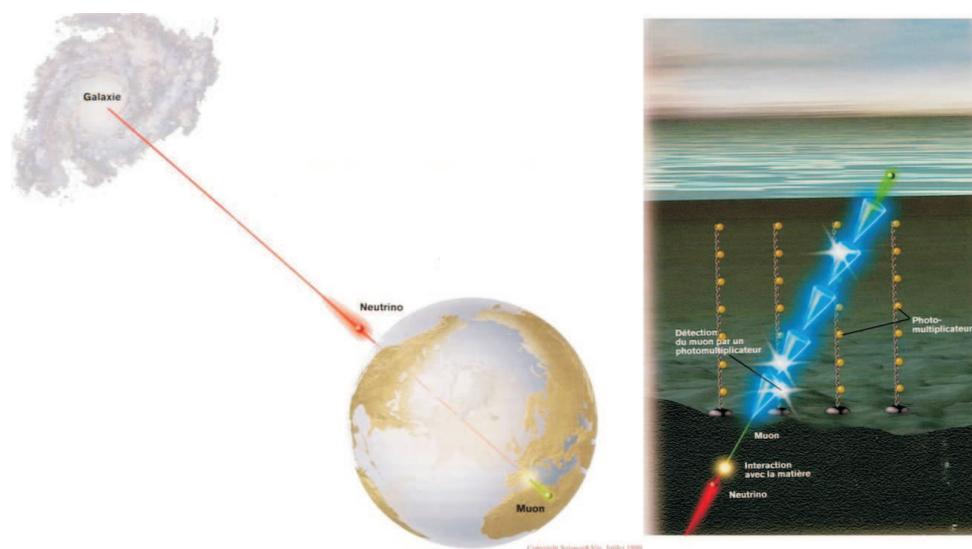


Figura 1.17: Rappresentazione artistica di un rivelatore sottomarino di neutrini astrofisici [ANTA].

- non risente affatto di deflessioni dovute alla presenza di campi magnetici: il neutrino è una particella stabile e di carica elettrica nulla;
- il neutrino possiede una bassa sezione d'urto che cresce in funzione dell'energia: permette di indagare le zone più interne delle sorgenti astrofisiche;
- potrebbe aprire alla scoperta di oggetti astrofisici non ancora noti, non rilevabili con altre tecniche.

1.5 La scelta del sito abissale

La rivelazione Čerenkov dei muoni prodotti da neutrini astrofisici avviene in acqua per mezzo di opportuni fotomoltiplicatori. I PMT danno un segnale di carica nell'istante in cui uno o più fotoni investono la superficie sensibile del PMT: il fotocatodo. La rivelazione su diversi PMT di un segnale di carica permette, nota la posizione di tutti i PMT, la ricostruzione della traccia del muone che ha prodotto la luce Čerenkov. La struttura di un telescopio

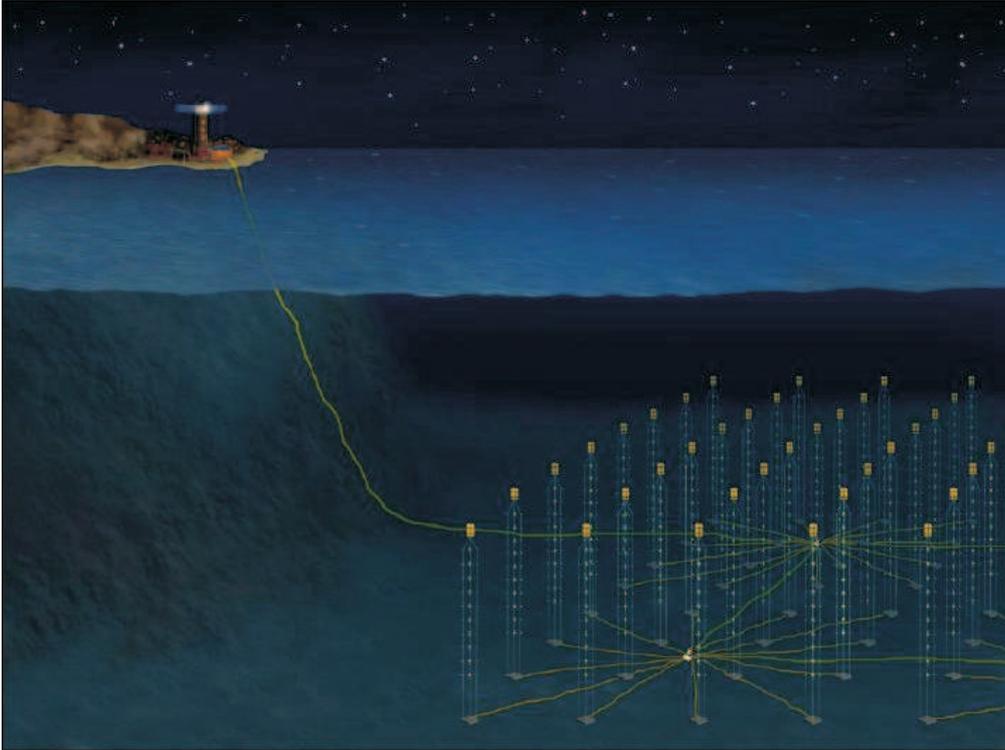


Figura 1.18: Modello del telescopio sottomarino di NEMO. Sono visibili le torri in cui alloggianno i fotomoltiplicatori, i cavi che connettono fra loro le varie torri e il cavo che connette tutto l'apparato a terra [NEMO].

sottomarino Čerenkov deve essere dunque di tipo modulare tridimensionale, e i PMT vengono disposti in modo tale da formare un reticolo regolare. Una configurazione spesso utilizzata è quella in cui i fotomoltiplicatori vengono posizionati lungo stringhe oppure su torri semirigide ancorate al fondo sottomarino e tenute in posizione verticale da boe (si veda la figura 1.18).

In particolare, la collaborazione NEMO ha progettato un telescopio sottomarino con un volume dell'ordine del km^3 , formato da 81 "torri" disposte su un reticolo quadrato 9×9 . Ogni torre è costituita da 18 "piani", e su ogni piano sono collocate 4 sfere per l'alloggiamento di altrettanti PMT (si veda la figura 1.19). Il numero totale di PMT risulta essere di 5832: la tecnologia richiesta dall'ambiente sottomarino e gli elevati costi di operazione sono fra i principali problemi della realizzazione di tale apparato.

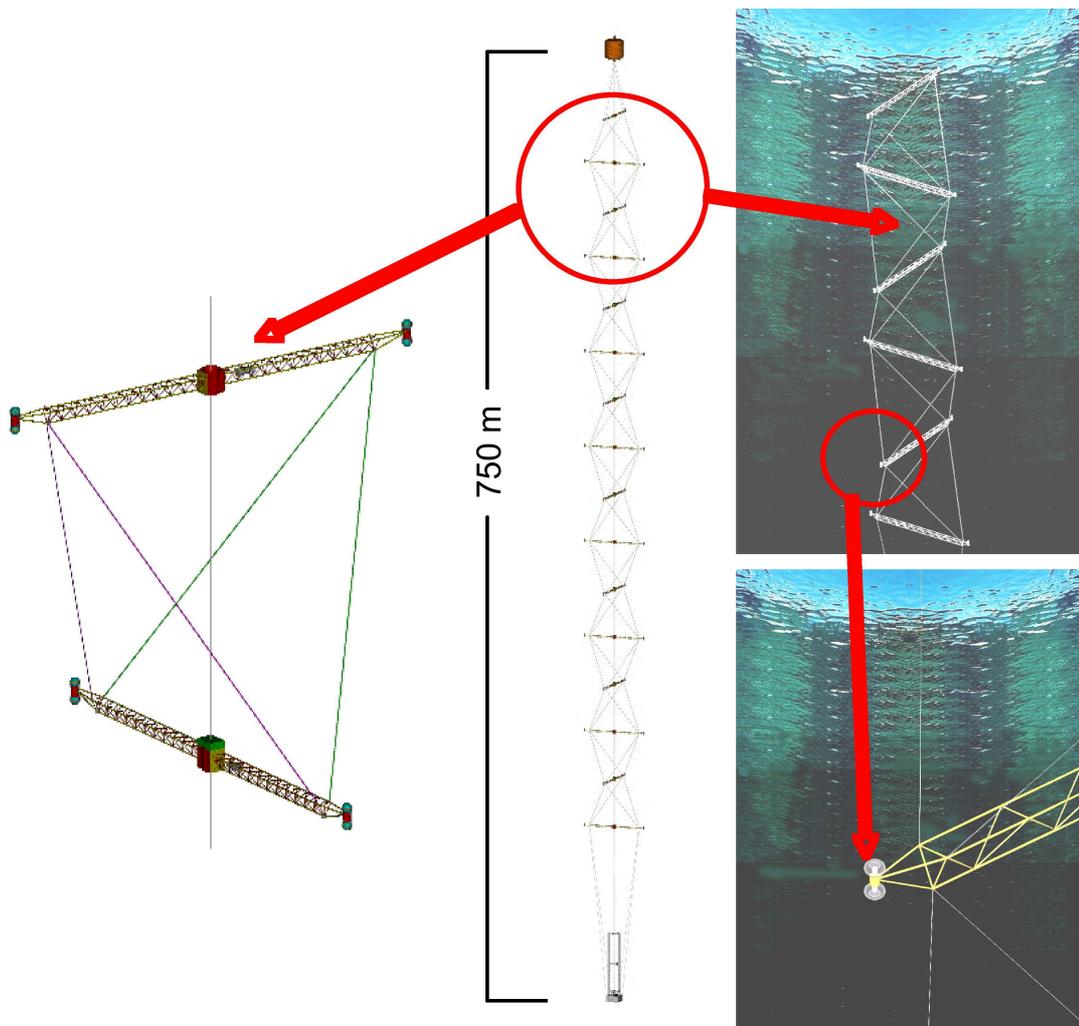


Figura 1.19: Struttura di una singola torre di NEMO. I piani che formano la torre sono costituiti da un braccio metallico. Alle due estremità di ogni piano sono collocati due PMT, per un totale di 4 PMT per piano [NEMO].

Propagazione della luce in acqua marina

La rivelazione della luce Čerenkov prodotta dai muoni generati da neutrini astrofisici è legata fortemente alla trasparenza dell'acqua utilizzata come parte del rivelatore. Muoni relativistici che si propagano in acqua producono, nell'intervallo di lunghezza d'onda in cui i PMT sono sensibili, circa 200 fotoni Čerenkov per ogni cm di traccia [NEMO]; i fotoni devono avere una probabilità non nulla di raggiungere i PMT e di produrre un segnale di carica.

Esistono principalmente due fenomeni che limitano la propagazione della luce in acqua: l'*assorbimento* e la *diffusione*. L'assorbimento di luce riduce direttamente il numero di fotoni che raggiunge il rivelatore; la diffusione influenza la misura del tempo di arrivo del fotone sul rivelatore, cioè altera un parametro fondamentale per la ricostruzione della traccia del muone.

Si può caratterizzare la trasparenza dell'acqua attraverso due parametri quantitativi: la lunghezza di assorbimento L_a e la lunghezza di diffusione L_b . Ogni lunghezza rappresenta il cammino dopo il quale un fascio di fotoni di intensità I_0 , che viaggia lungo la direzione di emissione, è ridotto di un fattore $\frac{1}{e}$ da fenomeni di assorbimento o diffusione. In formule [MOB94]:

$$I_a(x) = I_0 e^{-\frac{x}{L_a}} \quad (1.16)$$

$$I_b(x) = I_0 e^{-\frac{x}{L_b}} \quad (1.17)$$

ove x è il cammino ottico dei fotoni e $I_{a,b}(x)$ è l'intensità del fascio ad una distanza x dalla sua generazione. Si possono definire il coefficiente di assorbimento $a = \frac{1}{L_a}$ e il coefficiente di diffusione $b = \frac{1}{L_b}$; la somma di questi due parametri è chiamata *attenuazione* $c = a + b$. Questi coefficienti sono fortemente dipendenti dalla lunghezza d'onda dei fotoni [MOB94]:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1.18)$$

In figura 1.20 è mostrato l'andamento del coefficiente di assorbimento dell'acqua pura (linea continua) e dell'acqua marina pura (linea tratteggiata) in funzione della lunghezza d'onda. È interessante notare la presenza di un

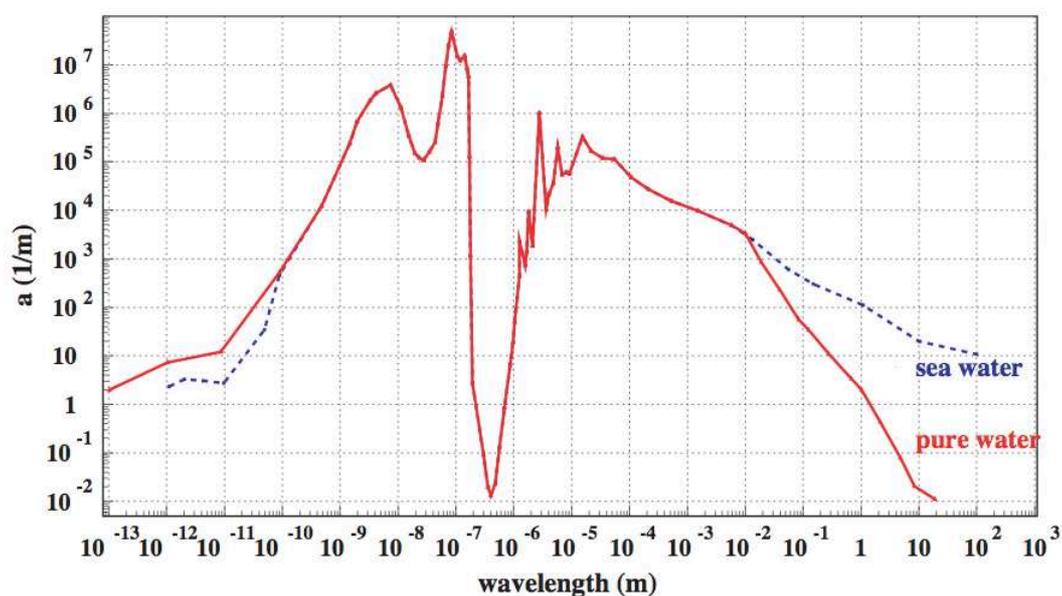


Figura 1.20: Coefficiente di assorbimento dell'acqua pura (linea continua) e dell'acqua marina pura (linea tratteggiata) in funzione della lunghezza d'onda [MOB94].

minimo nell'andamento del coefficiente di assorbimento proprio in corrispondenza della radiazione visibile, che è dunque quella che meglio si propaga in acqua.

La collaborazione NEMO ha eseguito misure dei coefficienti di assorbimento e attenuazione nel sito prescelto per l'installazione del telescopio, a varie profondità e in diversi periodi dell'anno. Si può notare dalla figura 1.21 che sotto i 2500m di profondità i coefficienti hanno un valore pressoché costante e indipendente dalle stagioni.

In figura 1.22 sono mostrate le lunghezze di assorbimento e di attenuazione misurate nell'intervallo della radiazione visibile nel sito di Capo Passero a 3100 metri di profondità, comparate con l'andamento delle stesse grandezze in acqua pura (si confronti la figura 1.20 che mostra l'andamento del coefficiente di assorbimento in acqua pura). Da tali dati risulta molto chiaramente che le proprietà ottiche dell'ambiente sottomarino analizzato sono ottimali per la rivelazione di luce Čerenkov.

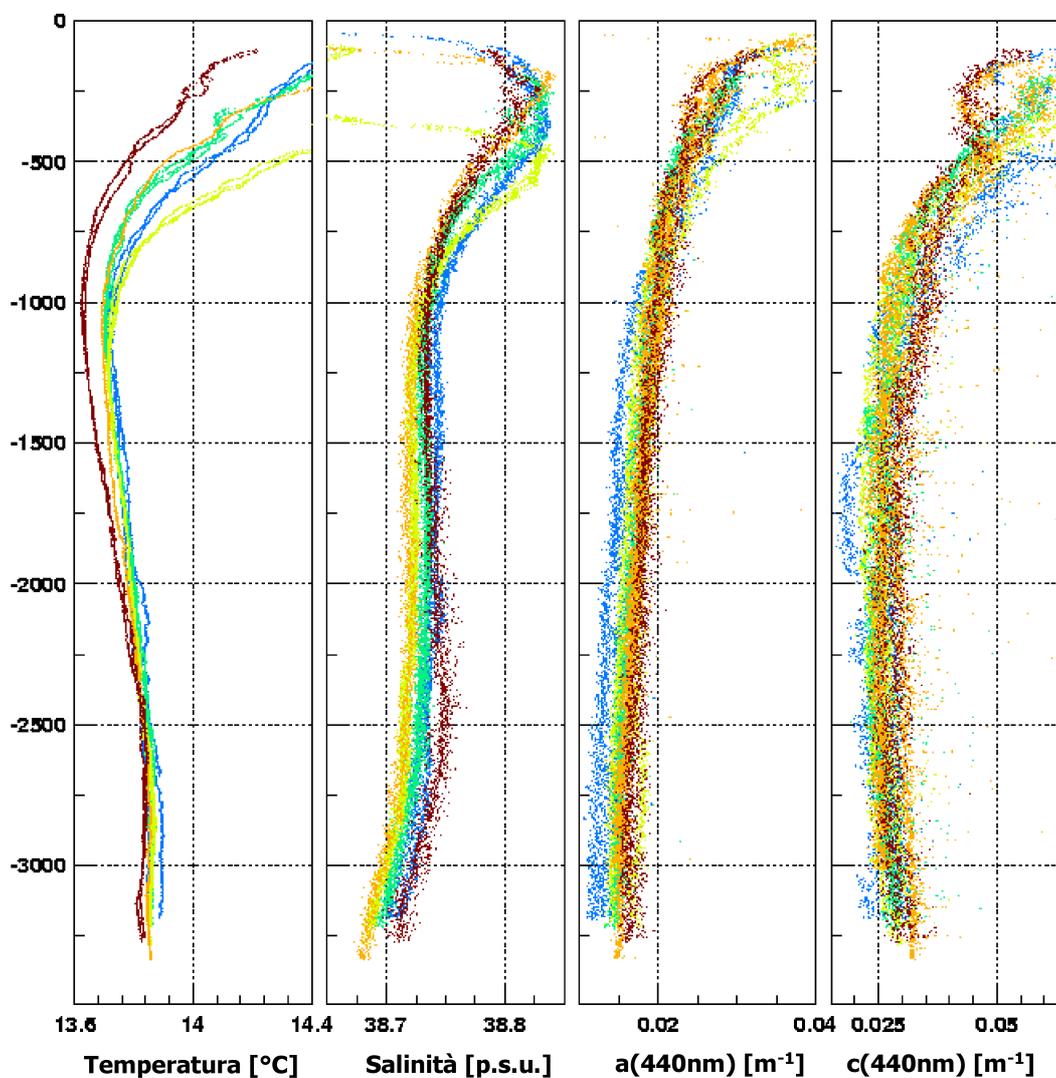


Figura 1.21: Coefficienti di assorbimento, $a(\lambda)$, e di attenuazione, $c(\lambda)$, nel sito di Capo Passero in funzione della profondità per $\lambda = 440\text{nm}$, comparati con i dati della temperatura e della salinità. I diversi colori rappresentano misure acquisite in diversi periodi dell'anno [NEMO].

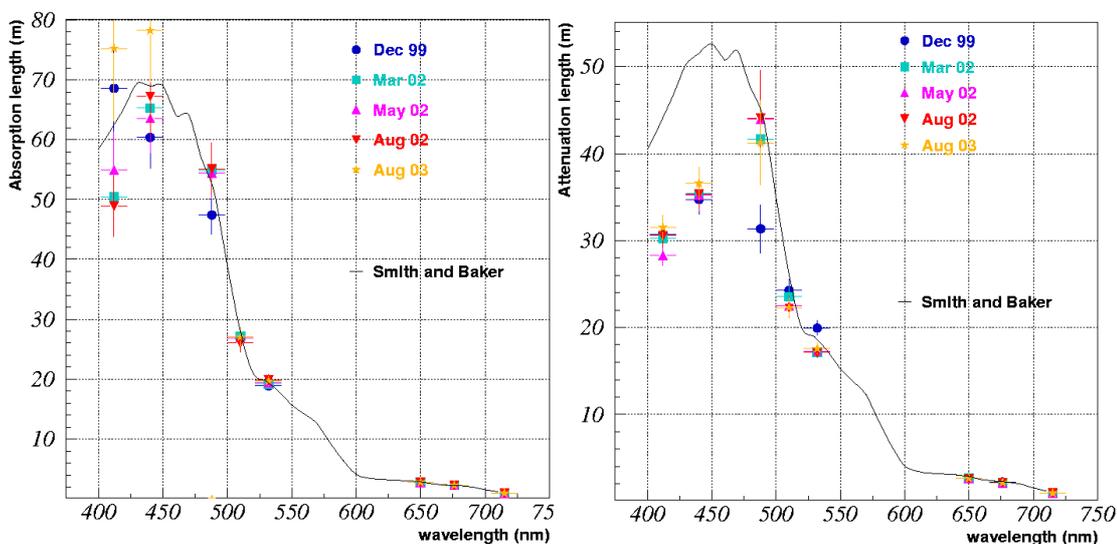


Figura 1.22: Lunghezza di assorbimento e lunghezza di attenuazione misurate nel sito di Capo Passero nell'intervallo della radiazione visibile. Tali lunghezze sperimentali sono confrontate con quelle dell'acqua pura [NEMO].

La lunghezza di assorbimento dell'acqua di mare è di circa 70 metri per la radiazione visibile: i moduli ottici di un telescopio Čerenkov sottomarino devono essere posti ad una distanza reciproca inferiore, o al massimo dello stesso ordine di grandezza, al fine di garantire la ricostruzione della traccia dei muoni generati da neutrini astrofisici.

Caratteristiche del sito

Il sito sottomarino più adatto al posizionamento del telescopio di NEMO deve essere conforme ad una serie di requisiti che migliorano l'efficacia di rivelazione del telescopio stesso e limitano i costi di realizzazione e di installazione. La collaborazione ha scelto una zona sottomarina nei pressi di *Capo Passero*, sulla costa siciliana, nel Mar Ionio meridionale ad una profondità di 3350 m; le coordinate geografiche di tale sito sono $35^{\circ}50'N$, $16^{\circ}10'E$ (vedi figura 1.23).

Le proprietà del sito di Capo Passero possono essere riassunte nei seguenti punti:

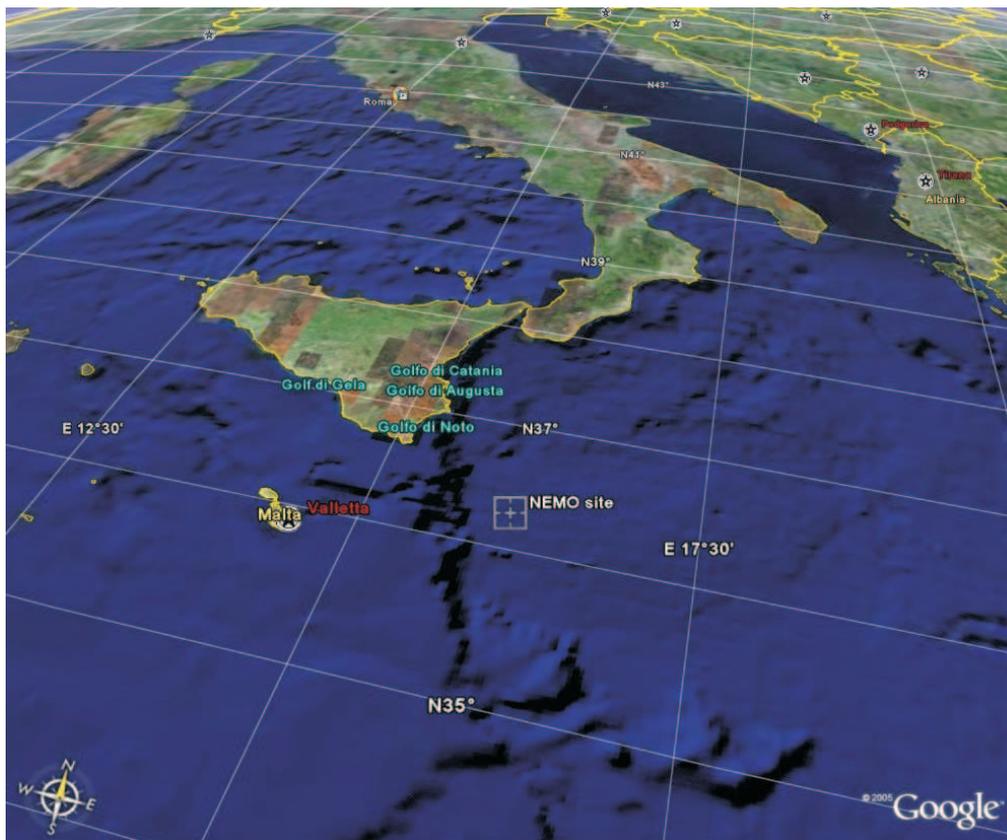


Figura 1.23: Sito sottomarino selezionato dalla collaborazione NEMO per il posizionamento del telescopio sottomarino. Il sito è posizionato lontano dalla scarpata di Malta, in una zona piana a 3350 m di profondità, a $35^{\circ}50'N$ e $16^{\circ}10'E$ [web8].

- La profondità a cui viene installato l'apparato permette di ridurre fortemente la presenza dei muoni atmosferici, meno energetici di quelli di interesse astrofisico, prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre. La colonna d'acqua che sovrasta l'apparato (circa 3 km) riduce di un fattore $\sim 10^6$ il numero dei muoni atmosferici rispetto a quelli osservati al livello del mare [GAI95]. Se il telescopio fosse posto ad una minore profondità, rimarrebbe "accecato" dai muoni atmosferici e più difficilmente potrebbe osservare i neutrini.
- La distanza dalla costa è relativamente piccola (circa 80 km); questo limita fortemente i costi di costruzione, operazione e manutenzione.
- Il profilo batimetrico del sito è piatto su una superficie di più di 10km^2 . È lontano dalla scarpata di Malta: ciò garantisce l'assenza di "valanghe" sottomarine, più sicurezza nella fase di installazione e di ancoraggio delle strutture meccaniche.
- Le correnti sottomarine sono piuttosto deboli: il valor medio del modulo della corrente è $\sim 3\text{cm/s}$ e il valor massimo, osservato in una sola occasione in cinque anni di misure continue, è $\sim 15\text{cm/s}$ [NEMO]. Il telescopio non subisce eccessive sollecitazioni meccaniche.
- La trasparenza del mare è prossima a quella dell'acqua pura: la lunghezza di attenuazione è $\sim 35\text{m}$ e la lunghezza di assorbimento è $\sim 70\text{m}$, ideale per la ricostruzione delle tracce.
- L'attività biologica è limitata: il valore della bioluminescenza, dovuto alla presenza di batteri e che introduce rumore ottico, è molto basso.
- Il flusso di sedimenti ed il fenomeno di crescita di film sottili di batteri semi-trasparenti (detto *bio-fouling*) sulle superfici "sensibili" dell'apparato sono ridotti: dovendo operare in profondità e per parecchi anni, è importante che le superfici ottiche attive del telescopio non vengano oscurate né dalla presenza di particolato organico e inorganico né dalla crescita di film biologico.

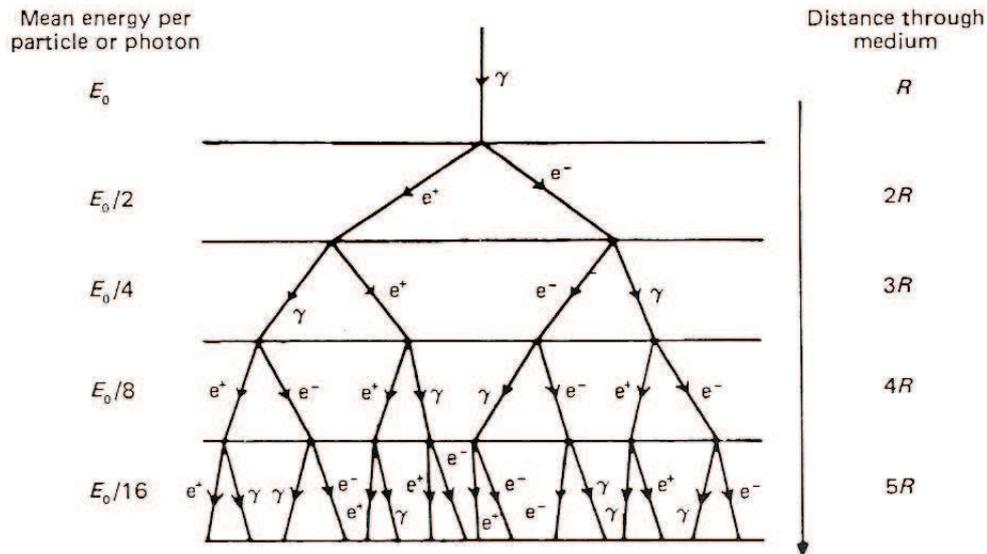


Figura 1.24: Evoluzione di uno sciame elettromagnetico [LON92].

1.6 Tecniche alternative di rivelazione

Si accenna brevemente in questo paragrafo alle tecniche di rivelazione radio e acustica di neutrini, alternative alla rivelazione della luce Čerenkov.

La rivelazione radio

Un neutrino altamente energetico ($E \gtrsim 10^{15} eV$) di tipo elettronico che interagisce con la materia può dare luogo ad una cascata elettromagnetica, costituita da elettroni, positroni e fotoni (si veda la figura 1.24). In virtù della diffusione Compton dei fotoni della cascata sugli elettroni del mezzo in cui si propaga, e per via dell'annichilazione dei positroni, si verifica un eccesso di carica negativa che si propaga con lo sciame elettromagnetico. Alla cascata può, dunque, essere associata una carica negativa in moto ad una velocità prossima a quella della luce. Si osserva l'emissione di un segnale radio Čerenkov coerente [ASK62].

La rivelazione acustica

Le interazioni dei neutrini in un mezzo, con conseguente produzione di sciame, sono tali da prevedere la formazione di un segnale acustico misurabile. L'energia del neutrino viene dissipata attraverso un meccanismo termo-acustico: l'energia cinetica del neutrino altamente energetico viene trasferita alle molecole del mezzo; la deposizione di energia nel mezzo produce un riscaldamento locale con conseguente espansione termica e creazione di un'onda di pressione.

Un rivelatore acustico di neutrini può essere formato da un reticolo tridimensionale di idrofoni. Il valore della lunghezza di attenuazione del suono in acqua è molto elevato ($\sim 1km$ per frequenze di $10kHz$): ciò consente di posizionare i rivelatori acustici a grande distanza fra loro, senza perdere significativamente informazione sul segnale. A differenza della rivelazione di luce Čerenkov, si potrebbe estendere attraverso degli idrofoni il volume di rivelazione utilizzando un minor numero di rivelatori disposti a maggior distanza tra loro, rendendo accessibili eventi di neutrini cosmici con $E_\nu \sim 10^{18}eV$ [LEA03, NEMO].

Capitolo 2

Proprietà ottiche ed oceanografiche di un sito abissale rilevanti per un telescopio a neutrini

Come si è già detto, la collaborazione NEMO sta realizzando un telescopio sottomarino per la rivelazione di neutrini astrofisici. Risulta di fondamentale importanza caratterizzare i parametri ottici ed ambientali che rendono un sito abissale idoneo all'installazione della strumentazione necessaria. In questo capitolo si mostreranno le grandezze che si intende analizzare e misurare con l'apparato, descritto nel capitolo successivo, realizzato durante il lavoro di tesi.

2.1 Il *biofouling*

Uno degli aspetti principali che deve essere indagato quando si caratterizzano le proprietà di un ambiente sottomarino è lo studio dell'oscuramento delle superfici dei Moduli Ottici (MO), utilizzati per la rivelazione della luce Čerenkov, a causa del depositarsi di materiale biologico, di sedimenti organici

e inorganici. Col termine *biofouling* si intende proprio la contaminazione di oggetti, nel nostro caso le superfici “ottiche” dei fotomoltiplicatori, da parte di batteri e di altre forme di vita nelle profondità marine.

Una qualsiasi superficie immersa in un ambiente acquatico viene immediatamente ricoperta da un limo biologico o *biofilm*. Il primo passo che avviene entro pochi minuti dall’immersione è l’adesione di macromolecole organiche (carboidrati e aminoacidi) e inorganiche già presenti nell’ambiente o prodotte da microorganismi. Queste macromolecole aderenti alla superficie formano il film primario: la loro presenza è alla base del fenomeno del *biofouling* in quanto modificano le proprietà della superficie sulla quale sono presenti permettendo la successiva adesione di microorganismi come batteri, funghi ed alghe.

Dopo alcune ore dall’immersione comincia a verificarsi l’adesione batterica vera e propria. Inizialmente questa adesione batterica al substrato è reversibile, ma successivamente diviene irreversibile a causa delle secrezioni di polimeri da parte dei microorganismi presenti. Si sviluppano così dei legami colloidali fra le cellule e il substrato molecolare.

Una volta che si è stabilita l’adesione dei microorganismi sulla superficie e le condizioni fisico-chimiche divengono adeguate, i batteri possono proliferare sulla superficie creando delle microcolonie. Le colonie batteriche e le loro secrezioni extracellulari formano il *biofilm*. La formazione e la crescita del *biofilm* sono influenzati da diversi fattori; come si discuterà più in seguito, è importante mettere in relazione parametri ambientali quali le correnti sottomarine, la temperatura e la salinità con il fenomeno del *biofouling*.

L’esempio di ANTARES

Le collaborazioni Baikal [BAG99] e ANTARES [AMR03] hanno eseguito studi sul *biofouling* mostrando che la presenza di tale fenomeno può creare problemi alle sfere di vetro che alloggiano i tubi fotomoltiplicatori utilizzati per la rivelazione di luce Čerenkov. In particolare ANTARES ha stimato la variazione della capacità di rivelazione di luce di rivelatori di fotoni posizionati all’interno di sfere Benthos. In figura 2.1, è mostrato il sistema utilizzato

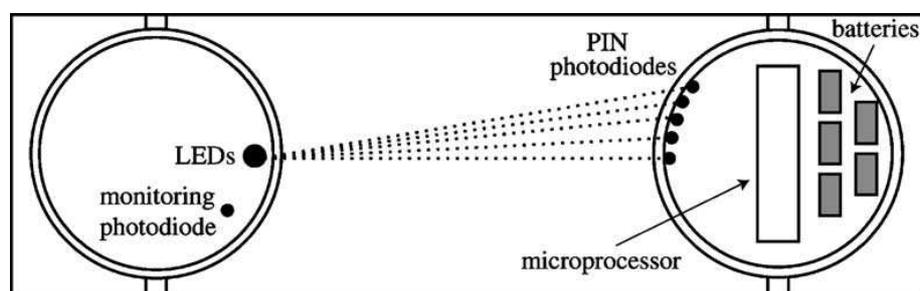


Figura 2.1: Schema dell'apparato di rivelazione del *biofouling* di ANTARES [AMR03].

per tale misura, formato da due sfere di vetro simili a quelle che alloggiavano i PMT del rivelatore di ANTARES. La prima sfera contiene due diodi emettitori di luce blu (in inglese *Light Emitting Diode*, LED), ciascuno monitorato da un fotorivelatore. Tutti i componenti sono incollati tramite dei supporti sulla superficie interna della sfera. La seconda sfera contiene cinque fotorivelatori applicati sulla superficie interna della sfera in posizioni diverse. Ogni fotorivelatore è formato da un fotodiode di silicio e da un amplificatore operativo integrato. Il flusso di fotoni che raggiunge la superficie di ogni fotodiode è misurato per valutare l'effetto del *biofouling* sulle superfici delle due sfere, in corrispondenza dei LED e dei fotorivelatori.

La seconda sfera contiene inoltre l'elettronica necessaria a pilotare i LED ed a gestire l'acquisizione e la memorizzazione dei dati digitali relativi ai segnali rivelati dai fotodiodi. Le misure della trasmissione della luce attraverso le due sfere sono state eseguite ad intervalli regolari di dodici ore; ogni acquisizione è data dalla media di dieci letture. I fotodiodi sono stati incollati lungo lo stesso meridiano orientato verso la sorgente luminosa, ad un angolo di zenit compreso fra 50° e 90° ; la convenzione usata è quella di considerare 0° l'angolo orientato verso l'alto e 90° l'angolo orientato lungo l'orizzontale.

In figura 2.2, sono mostrati i risultati ottenuti nel sito di ANTARES dopo sei mesi di immersione; i valori della trasparenza quotati da ANTARES, rappresentati come variazione rispetto al giorno dell'immersione, sono mostrati in funzione del tempo e dell'angolo zenitale θ a cui è posto il rivelatore di luce

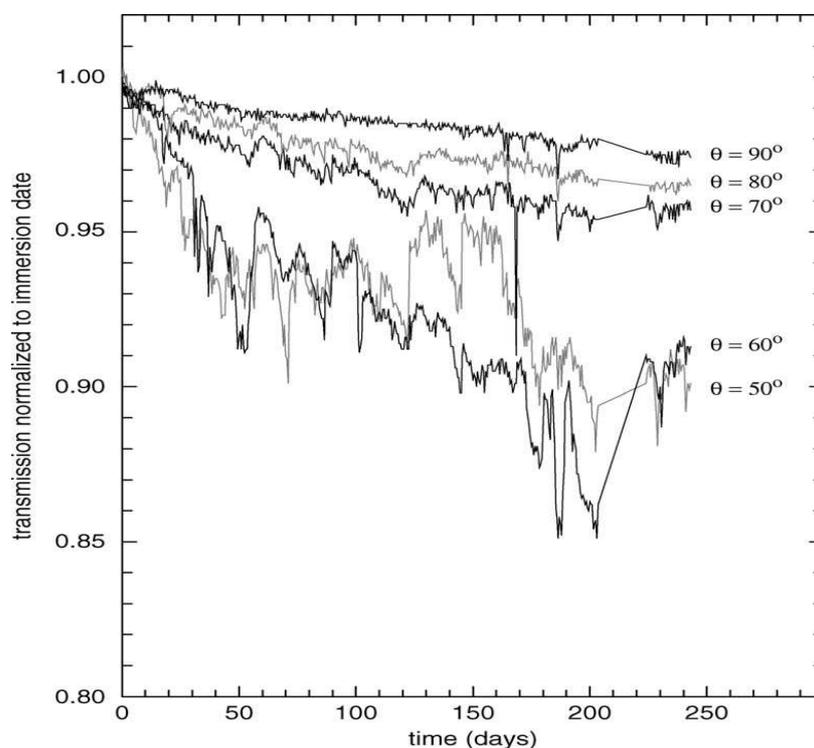


Figura 2.2: Trasmissione di luce in funzione del tempo e dell'angolo a cui sono posti i fotodiodi nel sito di ANTARES. I valori sono normalizzati al giorno dell'immersione. Per convenzione scelta da ANTARES, $\theta = 0^\circ$ corrisponde a superfici orientate verso l'alto, $\theta = 90^\circ$ corrisponde a superfici con normale orizzontale [AMR03].

all'interno della sfera di vetro utilizzata. Si osserva che la variazione della trasparenza del vetro è più pronunciata ad angoli θ piccoli, cioè vicino alla verticale, mentre sull'orizzontale l'effetto del *biofouling* è minore. Si evidenzia che le superfici più soggette all'*oscuramento* sono quelle su cui è favorito il deposito di particolato sia organico che inorganico per via dell'orientamento della superficie stessa.

Per studiare le colonie batteriche che si sviluppano su superfici immerse in un ambiente sottomarino, la collaborazione ANTARES ha utilizzato il sistema di raccolta di *biofilm* rappresentato in sezione in figura 2.3(a). Sulla superficie laterale di un cilindro assicurato in posizione orizzontale sono

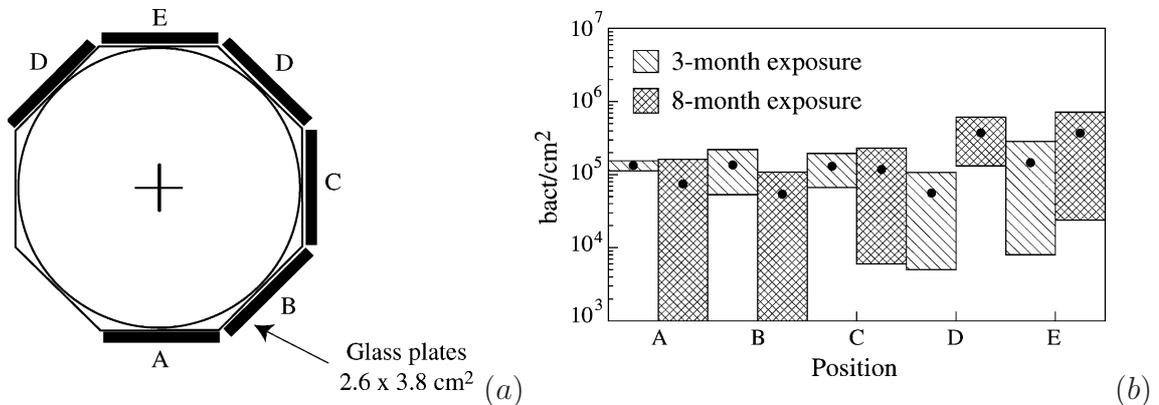


Figura 2.3: (a) Sezione dell'apparato di cattura del *biofilm*. (b) Numero di batteri per cm^2 presenti sulle placche di vetro dopo tre e otto mesi di immersione nel sito di ANTARES in funzione dell'orientamento. I punti rappresentano il valore medio e i riquadri l'errore sulla misura. La placca A è rivolta verso il basso e la placca E è rivolta verso l'alto [AMR03].

montate sei placche di vetro di dimensioni $2.6 \times 3.8 cm^2$. Un sistema di copertura assicura la protezione delle placche durante la fase di discesa in acqua dell'apparato e, successivamente, durante la fase di recupero. Osservazioni effettuate con il microscopio elettronico a scansione hanno dato i risultati mostrati in figura 2.3(b). Si evidenzia, anche in questo caso, che la crescita di colonie batteriche è favorita sulle superfici orizzontali rivolte verso l'alto (placche D ed E), mentre è ridotta sulle superfici verticali e su quelle rivolte verso il basso (placche A, B e C). In figura 2.4 sono mostrate foto eseguite con il microscopio elettronico a scansione delle superfici C (sinistra) ed E (destra).

Come si è detto nel capitolo 1, il telescopio di NEMO sarà costituito da un reticolo di circa 6000 PMT alloggiati in sfere di vetro. Il fenomeno del *biofouling* potrebbe ridurre inevitabilmente, col passare del tempo, la trasparenza delle superfici ottiche dei fotomoltiplicatori. È necessario, dunque, quantificare tale oscuramento delle superfici per avere una stima della diminuzione delle prestazioni dell'apparato in funzione del tempo.

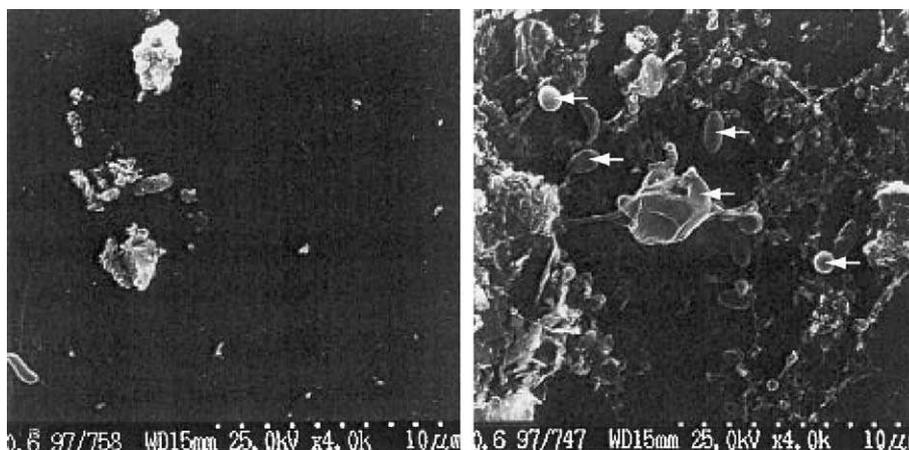


Figura 2.4: Foto eseguite con il microscopio elettronico a scansione. A sinistra è mostrata la superficie verticale; a destra quella orizzontale (orientata verso l'alto). Le piccole frecce nella figura di destra indicano i batteri aderenti alla superficie [AMR03].

2.2 Le correnti

Le correnti sottomarine giocano un ruolo fondamentale nella progettazione della struttura meccanica di un apparato sottomarino. Il telescopio sottomarino di NEMO sarà formato da torri (si veda la figura 1.19) ancorate al fondale marino attraverso un peso e tenute in posizione verticale da boe. Le strutture meccaniche rigide vengono fortemente stressate dalla presenza di correnti sottomarine molto intense o repentinamente variabili, mentre le strutture semi-rigide possono perdere la posizione iniziale fissata durante l'installazione. È dunque importante che le correnti marine siano limitate in intensità e che siano sufficientemente stabili in direzione per evitare la necessità di speciali e costosi accorgimenti in fase di realizzazione delle componenti meccaniche dell'apparato.

Dall'agosto 1998 ad oggi, la collaborazione NEMO ha eseguito con continuità misure delle correnti sottomarine nel sito di Capo Passero a 3250 m e 3100 m di profondità. In figura 2.5 è mostrato un esempio dei risultati di tali misure. Nella figura 2.5 ogni misura della corrente sottomarina

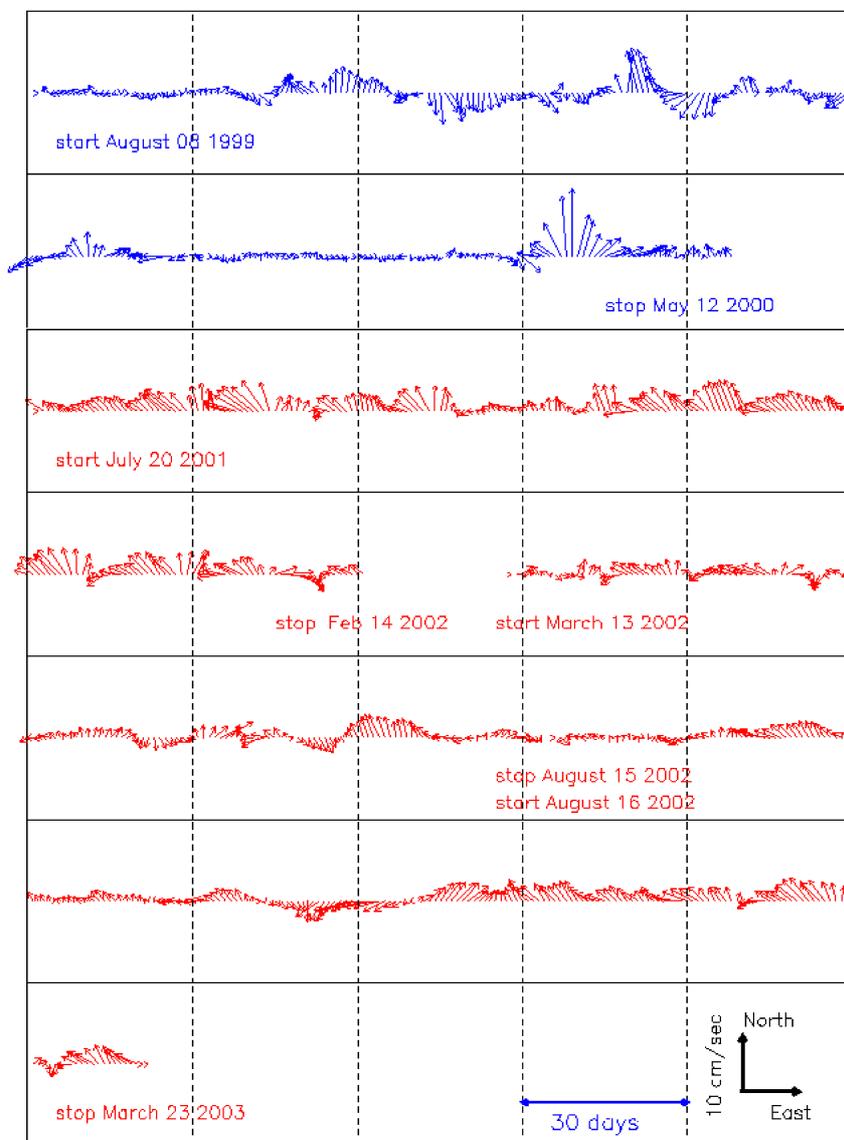


Figura 2.5: L'evoluzione delle correnti sottomarine nel sito di Capo Passero in funzione del tempo. Ogni misura di corrente è rappresentata graficamente da un vettore: il modulo indica l'intensità della corrente, l'orientamento la direzione della corrente (con la convenzione che un vettore orientato verso l'alto indica una corrente diretta verso il Nord). Il grafico mostra i dati raccolti, con qualche interruzione, da agosto 1999 a marzo 2003 [CAP99, NEMO].

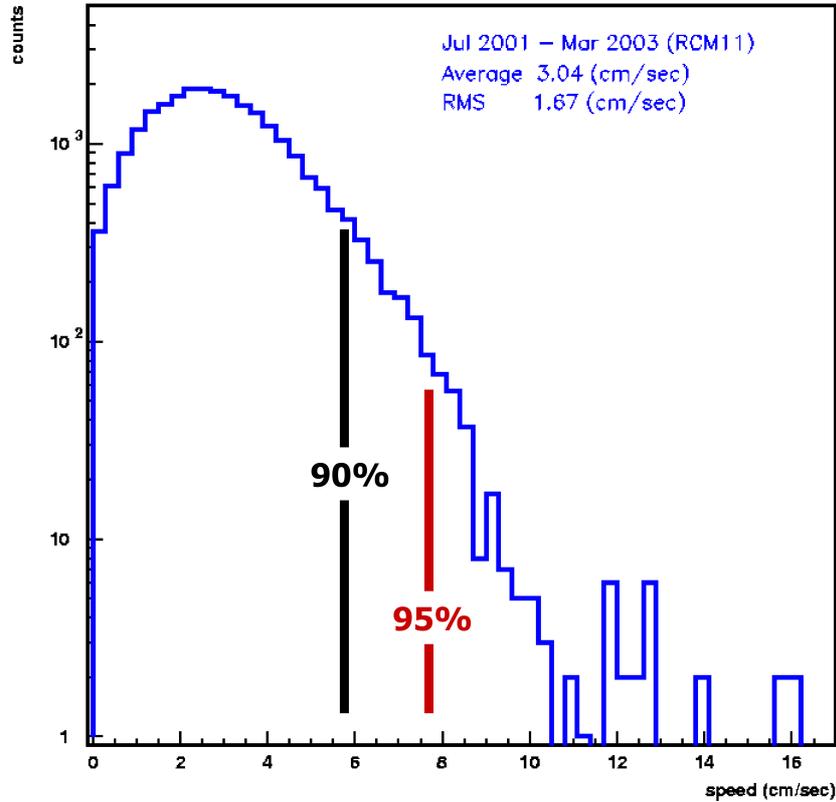


Figura 2.6: Distribuzione del modulo della corrente sottomarina in scala logaritmica. Dati acquisiti fra luglio 2001 e marzo 2003 [NEMO].

è rappresentata da un vettore: la lunghezza di tale vettore è proporzionale all'intensità della corrente mentre l'orientamento indica la direzione della corrente misurata. I vettori hanno origine su una retta orizzontale e sono dunque rappresentati in funzione del tempo.

Bisogna evidenziare che l'intensità delle correnti è praticamente $\lesssim 10$ cm/s; inoltre il valor medio delle correnti è ~ 3 cm/s [CAP99]. In figura 2.6 è mostrata, su scala logaritmica, la distribuzione del valore assoluto della corrente: nel 90% dei casi la corrente è inferiore a 6 cm/s. Tali caratteristiche rendono idoneo il sito di Capo Passero per la realizzazione del telescopio Čerenkov sottomarino per neutrini, semplificando le operazioni di costruzione e installazione dell'apparato.

È fondamentale associare misure di correnti sottomarine con le misure di biofouling. Le correnti danno indicazioni sulla qualità dell'acqua marina che può raggiungere l'apparato sottomarino. Il fenomeno del biofouling è fortemente dipendente dalle proprietà chimico-fisiche dell'acqua; è fisicamente interessante correlare i dati relativi ad incrementi o ad eventuali diminuzioni dell'oscuramento di moduli ottici dovuto al biofouling con i dati delle correnti sottomarine. Inoltre, poiché l'oscuramento di moduli ottici è legato anche ad una deposizione di sedimenti organici e inorganici oltre che alla crescita di film biologico, bisogna considerare che la presenza di correnti sufficientemente intense può agire come fattore rilevante nella diminuzione dell'oscuramento di MO, in quanto i sedimenti possono essere trasportati via da tali correnti.

2.3 La salinità e la temperatura

Per caratterizzare al meglio il comportamento di un rivelatore di luce Čerenkov sottomarino, è necessario eseguire misure di salinità e temperatura nel sito scelto per l'installazione. Temperatura e salinità, infatti, influenzano la velocità della luce in acqua e quindi la loro conoscenza è essenziale per la "ricostruzione delle tracce" dei muoni a partire dai segnali Čerenkov raccolti dai moduli ottici. La figura 2.7 mostra l'andamento della temperatura e della salinità in funzione della profondità nel sito di Capo Passero. È ben evidente una correlazione tra questi due parametri ambientali e i coefficienti di attenuazione e di assorbimento. Come esposto nel paragrafo 1.5, il dimensionamento dell'apparato sottomarino è legato alla lunghezza di assorbimento, che impone una distanza massima fra i PMT (≤ 70 m).

Tali parametri ambientali sono, inoltre, indicatori diretti del tipo di acque in cui è immerso l'apparato. Come è stato accennato nel paragrafo 2.1, è interessante correlare il fenomeno del biofouling con la qualità delle acque. Variazioni della salinità e della temperatura possono influenzare la crescita di microorganismi e l'accumulo di film biologico sulle superfici. Acque diverse possono trasportare, inoltre, sedimenti organici e inorganici di varia natura, alterando la trasparenza delle superfici dei moduli ottici.

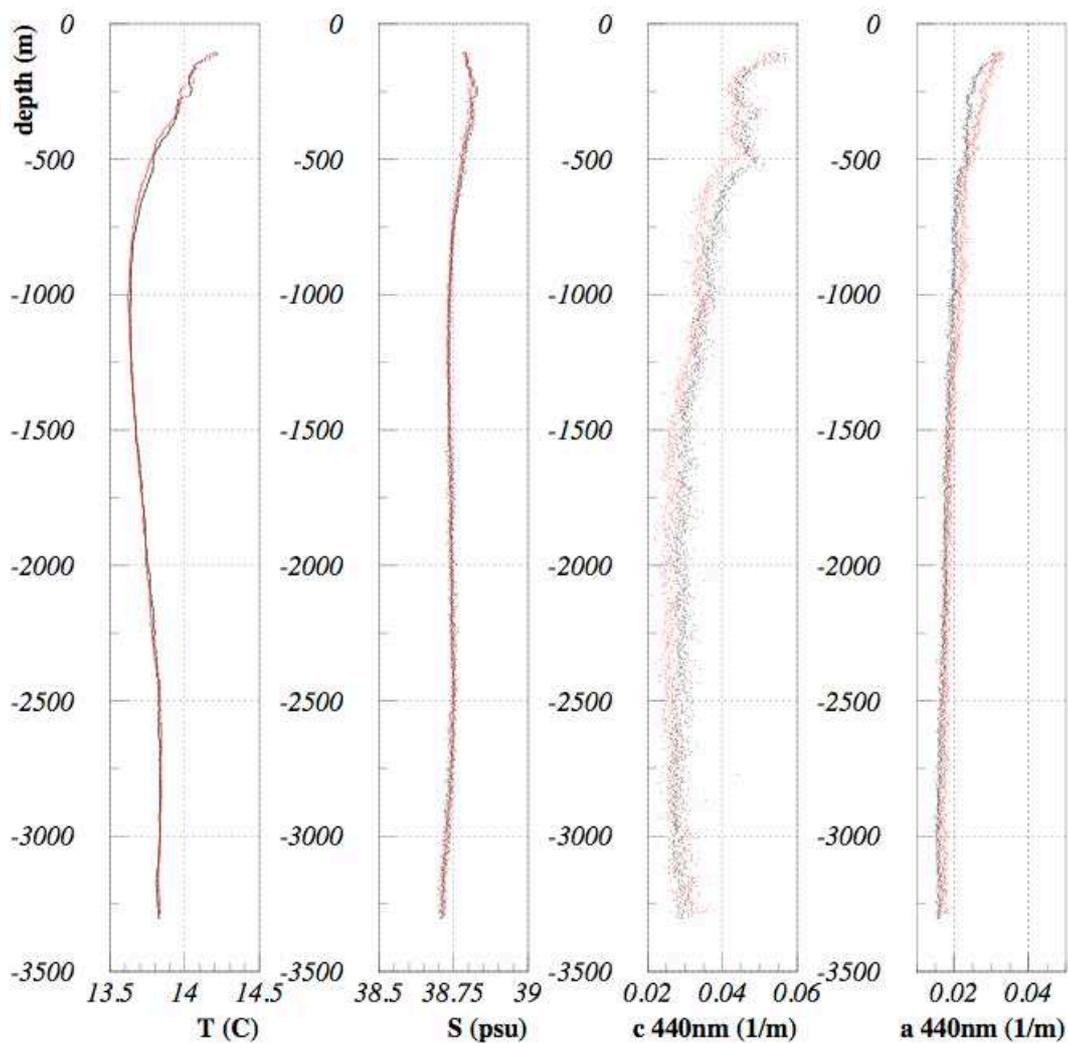


Figura 2.7: Temperatura e salinità comparate con i coefficienti di attenuazione e di assorbimento nel sito di Capo Passero in funzione della profondità. La propagazione della luce in acqua marina è influenzata da parametri ambientali [NEMO].

Capitolo 3

Progetto dell'apparato sperimentale

Come è stato detto nel capitolo precedente, è necessario caratterizzare il sito scelto dalla collaborazione NEMO per l'installazione di un telescopio Čerenkov sottomarino attraverso diversi parametri ottici ed ambientali. In questo capitolo si descriverà l'apparato che è stato realizzato durante il lavoro di tesi, discutendo delle scelte che sono state fatte in fase di progetto. Si descriveranno gli strumenti che costituiscono l'apparato e il loro funzionamento.

3.1 Strumento autonomo per misure abissali protratte su tempi lunghi

Con il lavoro di tesi si è realizzato un apparato autonomo sottomarino che eseguirà, entro breve termine, misure nel sito sottomarino di Capo Passero, a 3000 metri di profondità. Tale apparato rimarrà in profondità per tempi lunghi - dell'ordine di un anno - acquisendo dati di *biofouling*, correnti sottomarine, temperatura, conducibilità e pressione.

L'obiettivo fissato all'inizio del lavoro è stato la realizzazione di un apparato in grado di funzionare autonomamente (in inglese *stand-alone*), capace

di compiere misure e memorizzare dati a intervalli regolari per un lungo lasso di tempo. Nel capitolo precedente si è parlato dei parametri ottici e ambientali che è necessario caratterizzare con opportune misure in situ per il corretto funzionamento di un telescopio Čerenkov sottomarino. Per realizzare tali misurazioni vengono utilizzate diverse apparecchiature, ciascuna dedicata ad una particolare misura. Tutta la strumentazione che costituisce l'apparato viene gestita da un unico elaboratore elettronico centrale. Tale elaboratore ha il compito di pilotare le funzioni svolte dalle apparecchiature connesse e di gestire il salvataggio dei dati su un supporto idoneo.

Lo schema a blocchi di figura 3.1 mostra gli elementi che costituiscono l'apparato e la tipologia delle connessioni fra i diversi blocchi. Nel paragrafo successivo saranno descritti in maniera dettagliata gli strumenti che eseguono le misure di *biofouling*, di correnti sottomarine, di conducibilità elettrica, di pressione e di temperatura; sarà descritto anche il modem acustico, un'interfaccia per comunicare con l'apparato, dalla superficie del mare, quando questo è in funzione in profondità.

Single Board Computer VIPER-400-M64-F32 Arcom

Dalla figura 3.1, si osserva che tutto l'apparato viene gestito da un calcolatore, opportunamente scelto, che comunica con la strumentazione attraverso porte seriali, linee digitali di uscita e utilizzando il bus standard PC/104. Il calcolatore utilizzato è il modello VIPER-400-M64-F32 della ditta ARCOM [web10]. L'unità centrale di elaborazione VIPER è un *Single Board Computer* (SBC) compatibile con lo standard PC/104 basato su un processore a 400 MHz della Intel (si veda la figura 3.2). È stato sviluppato per funzionare in condizioni di disponibilità limitata di energia, in ambienti con spazi molto ridotti, per applicazioni nel settore delle comunicazioni. Le caratteristiche principali della scheda VIPER, rilevanti per la nostra applicazione, sono le seguenti:

- è basata su un processore a 400 MHz;
- è fornita di cinque porte seriali;

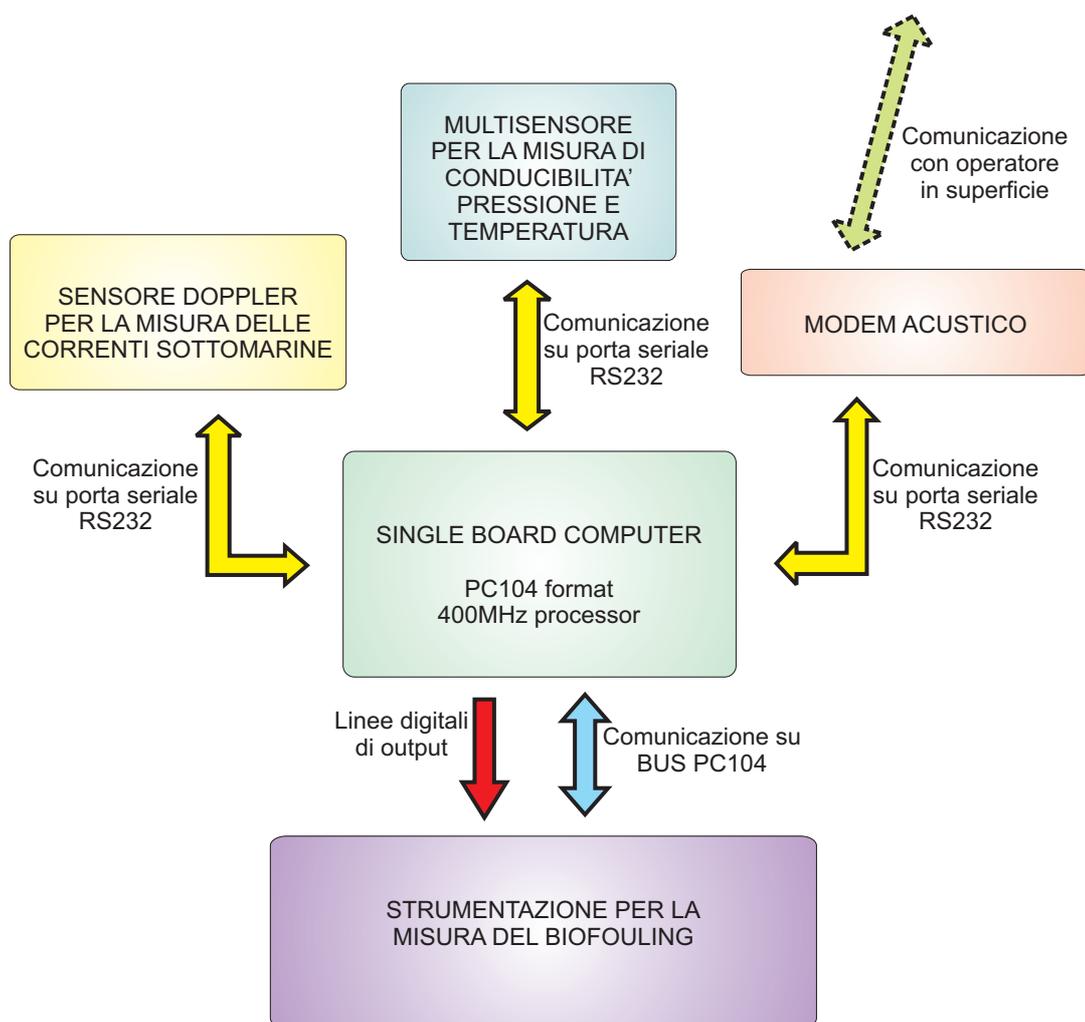


Figura 3.1: Schema a blocchi dell'apparato autonomo di misura del *biofouling* e di altri parametri ambientali.

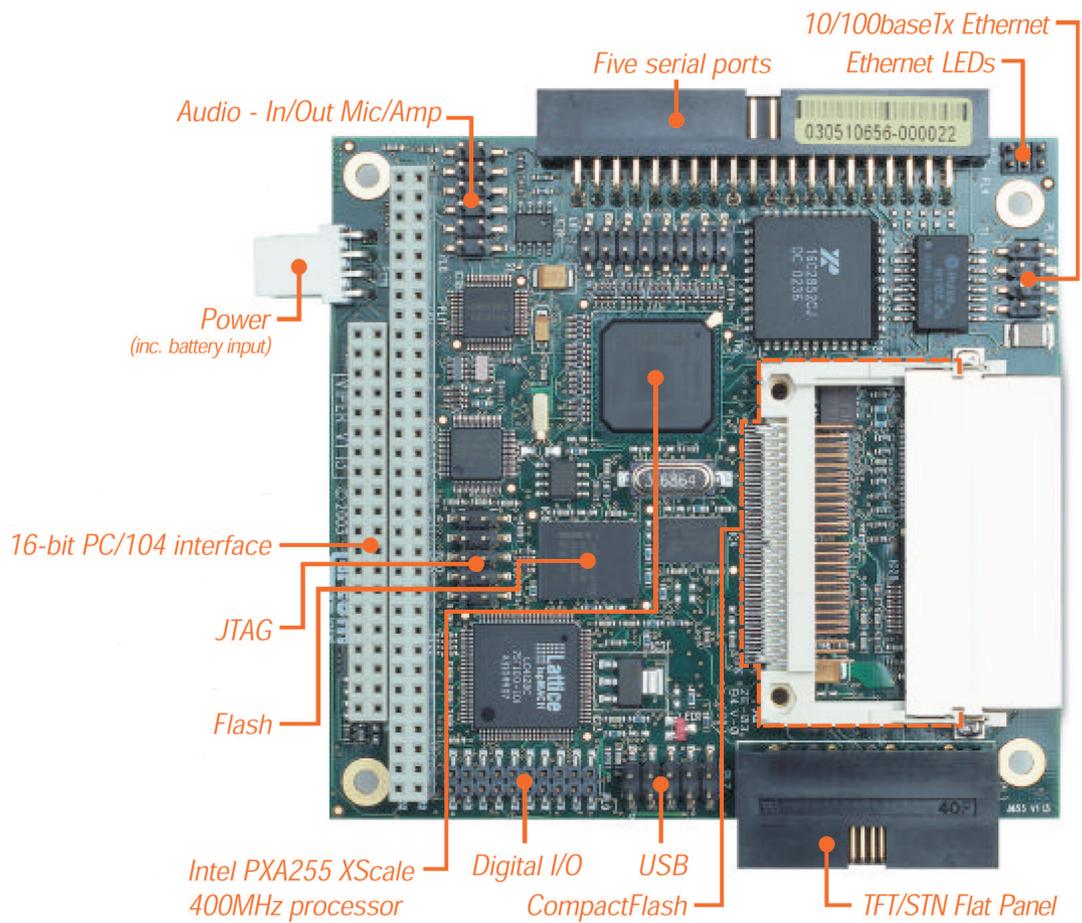


Figura 3.2: Scheda VIPER-400-M64-F32 della ARCOM, dimensioni 96 mm×91 mm. Sono evidenziati i componenti principali.

- è dotata di una porta *Ethernet*;
- rende disponibili all'utente otto linee digitali di ingresso e altrettante linee di uscita (*General Purpose I/O* - GPIO);
- supporta le memorie *Compact Flash* (CF);
- permette espansioni attraverso il bus dello standard PC/104;
- monta un sistema operativo *Linux*;
- ha dimensioni e peso contenuti: 96 mm × 91 mm per 96 grammi;
- i suoi consumi sono assai ridotti: 320 mA a 5 V (1.6 W) quando è accesa, 40 mA a 5 V (200 mW) in pausa (o *stand-by*, in inglese).

I consumi molto ridotti e il buon numero di connessioni disponibili rendono idonea la scheda VIPER ad essere utilizzata per la gestione di un apparato che deve funzionare in maniera autonoma e in condizioni di permanenza prolungata in un ambiente dove la disponibilità di energia elettrica è limitata in quantità. L'apparato sarà alimentato, durante il periodo di presa dati nel sito sottomarino, da batterie; in queste condizioni, è fondamentale limitare l'energia richiesta da ogni singolo componente per il proprio funzionamento, e altresì stimare accuratamente l'energia necessaria.

Escludendo la strumentazione per la misura del biofouling di cui si parlerà nel dettaglio in seguito, il *Single Board Computer* gestisce le periferiche attraverso la comunicazione bidirezionale su porta seriale RS232, come mostrato in figura 3.1. È stato necessario sviluppare un'opportuna applicazione software che, eseguita in un ambiente Linux, permettesse lo svolgimento di tale comunicazione. È stato utilizzato il linguaggio di programmazione C per sviluppare tutte le applicazioni necessarie.

L'interfaccia seriale RS-232

L'interfaccia seriale RS232 permette lo scambio di dati tra dispositivi digitali, utilizzando un protocollo seriale di tipo asincrono. Per *seriale* si intende che i

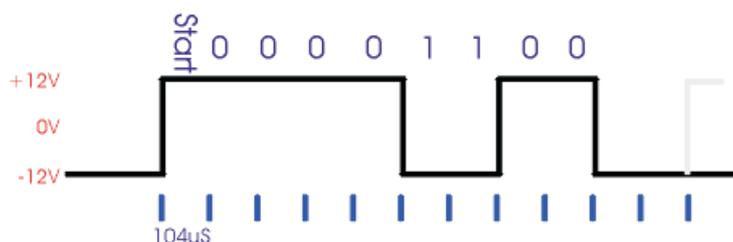


Figura 3.3: Rappresentazione idealizzata del segnale trasmesso su una linea RS232. Baud rate = 9600, viene trasmesso il valore binario 00001100.

bit che costituiscono l'informazione sono trasmessi uno alla volta su una sola linea elettrica; *asincrono* significa che i dati sono trasmessi senza l'aggiunta di un segnale di clock, il segnale comune che permette di sincronizzare la trasmissione con la ricezione.

L'unità di misura della velocità di trasmissione è il *baud rate*. Il baud rate indica il numero di transizioni al secondo che avvengono sulla linea; nel caso di trasmissione binaria, ed è tale la trasmissione seriale RS232, il baud rate coincide col numero di bit trasmessi al secondo sulla linea. Lo standard RS232 permette una trasmissione *full-duplex*: tale termine indica che la trasmissione è bidirezionale e contemporanea. Ciò implica l'utilizzo di due linee distinte per la trasmissione contemporanea dell'informazione digitale nei due sensi: una dedicata alla ricezione del segnale (*Rx*) e una alla trasmissione (*Tx*). In aggiunta alle linee Rx e Tx è necessaria una linea di massa (*GND*) a cui sono riferite le tensioni presenti.

La tensione di uscita per un trasmettitore RS232 è compresa, in valore assoluto, tra 5 e 25 V. Un segnale positivo, tipicamente +12 V, rappresenta lo "0" logico; un segnale negativo, -12 V, rappresenta l'"1" logico. In figura 3.3 è mostrato un esempio di trasmissione seriale a 9600 baud rate: ogni bit è trasmesso attraverso un valore positivo o negativo di tensione di durata $T = \frac{1}{9600}s = 104\mu s$.

Lo standard di comunicazione seriale RS232 prevede anche altre linee, oltre alle già citate Rx, Tx e GND, utilizzate per il controllo hardware della comunicazione. Nel nostro caso, tutte le connessioni agli strumenti dell'apparato sono gestite senza utilizzare controlli di tipo hardware del flusso dati.

Tutte le connessioni RS232 si intenderanno formate dalle sole linee Rx, Tx e GND.

In appendice A è mostrato come esempio il codice di un programma che gestisce le comunicazioni su porta seriale. Tramite tale applicazione è possibile pilotare una predefinita porta seriale, settando le impostazioni di porta in maniera compatibile con la strumentazione collegata (velocità di Baud rate, controllo di flusso dati, bit di stop, controllo parità). Il programma definisce dei codici di errore che vengono utilizzati per verificare l'avvenuta comunicazione con la periferica connessa. Viene definito, inoltre, un tempo di attesa massima per la lettura su porta seriale (in inglese *time-out*): tramite tale parametro è possibile gestire correttamente le situazioni di mancata trasmissione dati. Il programma in appendice A utilizza due sotto-programmi (o *routine*) per eseguire la scrittura e la lettura su porta seriale. La routine "scrittura_seriale" invia sulla porta seriale, indirizzata da un opportuno puntatore, una stringa di caratteri di lunghezza fissata, che la routine riceve dal programma principale (*main*); la routine "lettura_seriale" attende, per un tempo fissato dal *time-out*, un flusso di caratteri di lunghezza variabile e restituisce al programma principale la stringa letta su porta seriale e la lunghezza di tale stringa. Tramite queste due routine e attraverso il settaggio di tutti i parametri è possibile gestire le comunicazioni della scheda VIPER con tutte le periferiche connesse su porte seriali.

Il programma in appendice A è un esempio di comunicazione sulla porta seriale COM3: vengono settate inizialmente le impostazioni di porta (baud rate = 4800, 2 bit di stop, controllo di flusso disabilitato, 2 secondi di *time-out*); successivamente viene inviato un carattere su porta seriale (routine "scrittura_seriale") e in risposta si attende la ricezione di una stringa formata da tre caratteri (routine "lettura_seriale"). Come si mostrerà più in seguito, attraverso tale applicazione è possibile eseguire tutte le operazioni indispensabili alla comunicazione con le periferiche connesse tramite porta seriale.

3.2 Gli strumenti collegati alla stazione

Gli strumenti connessi tramite porta seriale al *Single Board Computer* sono un correntometro doppler, un multisensore di temperatura, pressione e conducibilità ed un modem acustico. Essi sono stati assemblati e testati singolarmente presso i laboratori del Dipartimento di Fisica; è stata verificata la funzionalità della loro gestione tramite l'elaboratore centrale SBC. In questo paragrafo ogni strumento è descritto nei suoi dettagli.

3.2.1 Correntometro Doppler 3820R Aanderaa

Per misurare le correnti sottomarine viene usato il correntometro doppler (*Doppler Current Sensor - DCS*) 3820R della Aanderaa mostrato in figura 3.4 [web11].

Il correntometro in questione, che può funzionare fino ad una profondità di 6000 metri, utilizza il principio dello spostamento Doppler come base per le sue misure. Il DCS 3820R trasmette impulsi acustici di una frequenza fissata (2 MHz) nell'acqua in cui è immerso. Propagandosi nel mezzo, i pacchetti acustici possono incontrare del particolato o piccole bolle d'aria presenti nel mezzo che riflettono una porzione dell'energia acustica. I trasduttori presenti sul correntometro rivelano l'energia diffusa all'indietro da una massa d'acqua localizzata in una regione compresa fra 0.4 e 2.2 metri di distanza e analizzano tali pacchetti acustici per trovare eventuali variazioni nella frequenza (si veda la figura 3.5). La rivelazione di un aumento della frequenza viene interpretato come un movimento del particolato verso il sensore; viceversa, una diminuzione della frequenza indica che il particolato si allontana dal sensore (effetto Doppler).

Il DCS viene utilizzato in posizione verticale; emette i pacchetti acustici nel piano ortogonale alla verticale, lungo due direzioni ortogonali tra loro in entrambi i versi: il correntometro emette, dunque, quattro serie di pacchetti acustici nel piano parallelo all'orizzontale. Dopo aver eseguito la lettura di una bussola interna allo strumento, il correntometro è in grado di determinare la direzione e il modulo della velocità della corrente, avendo misurato le componenti lungo due direzioni orizzontali ortogonali fra loro. Il correntome-



Figura 3.4: Correntometro Doppler 3820R della Aanderaa. Sono mostrate le dimensioni principali.

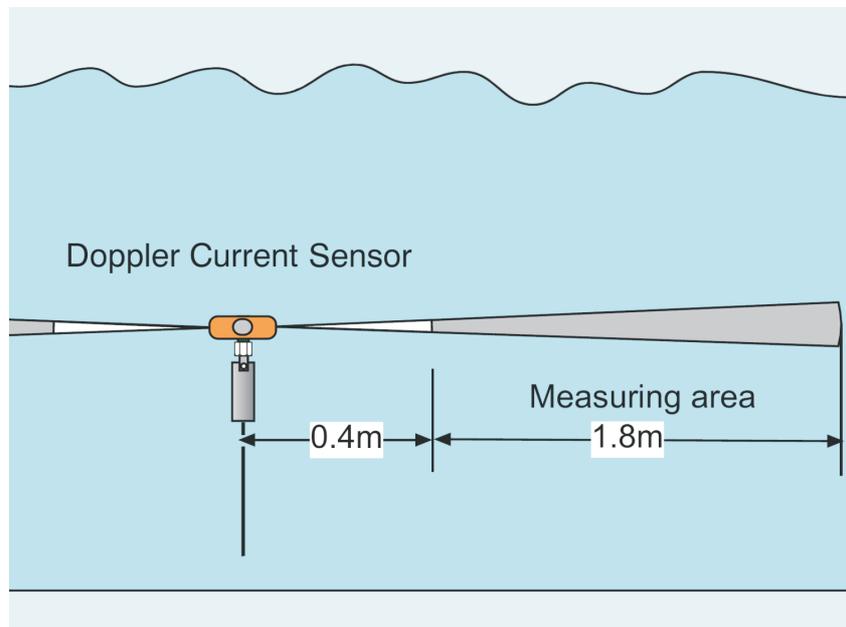


Figura 3.5: Il DCS 3820R della Aanderaa rivela l'energia acustica diffusa all'indietro in un raggio compreso fra 0.4 e 2.2 metri di distanza.

tro utilizzato non misura la componente verticale delle correnti sottomarine, ma tale aspetto è trascurabile in quanto le correnti sottomarine sono sempre quasi-orizzontali: la componente verticale è, almeno per il nostro studio, quasi sempre trascurabile.

Il DCS è dotato di un inclinometro interno, che misura l'inclinazione rispetto alla verticale: la presenza di correnti sottomarine può spostare lo strumento dalla sua posizione originaria. In tal caso, è necessario conoscere l'inclinazione al fine di ricostruire correttamente la componente orizzontale della corrente sottomarina.

Si elencano di seguito le proprietà principali del correntometro 3820R:

- l'intervallo del modulo delle correnti misurabili è compreso fra 0 e 300 cm/s;
- la deviazione standard sulla misura del modulo della velocità è di 0.55 cm/s;

- la direzione della corrente è data rispetto al nord nell'intervallo tra 0 e 360°, con un'accuratezza di 5° per un'inclinazione compresa tra 0 e 15°, con un'accuratezza di 7.5° per un'inclinazione compresa tra 15 e 35°;
- l'inclinazione rispetto alla verticale è misurata nell'intervallo tra -35 e 45°, con un'accuratezza di 1.5°;
- emette pacchetti acustici della durata di 1 ms, di frequenza 2 MHz, con un consumo durante la fase di trasmissione pari a 25 W;
- deve essere alimentato con tensione continua tra 7 e 14 V;
- interfaccia seriale standard RS232.

Il correntometro comunica su porta seriale i dati acquisiti in due modalità: solo se interrogato (*Polled Output*) oppure ad una fissata frequenza di misura (*non Polled Output*) senza necessità di inviare una richiesta dati. Questa seconda modalità viene utilizzata, ad esempio, quando si vuole tenere sotto controllo la corrente sottomarina con continuità, avendo a disposizione un'alimentazione esterna. Il nostro caso è invece quello di un apparato stand-alone alimentato da un pacco batterie che deve acquisire dati per tempi dell'ordine di un anno. Come già detto, è necessario limitare i consumi di tutte le apparecchiature connesse. A tal fine, si utilizzerà la modalità *Polled Output*: si acquisiranno i dati ad intervalli regolari per tempi brevi, ad esempio ogni ora, solo dopo una previa richiesta da parte del *Single Board Computer*; il correntometro rimarrà in una modalità di basso consumo (o *stand-by*) senza emettere pacchetti acustici per la maggior parte del tempo. Nel capitolo 4 si descriverà in dettaglio il ciclo di acquisizione dati del DCS e nel capitolo 5 si mostrerà la stima dei consumi di tale strumento.

3.2.2 Multisensore Ocean Seven 316 CTD Idronaut

Il multisensore Ocean Seven 316 CTD mostrato in figura 3.6 della Idronaut viene utilizzato per le misure di conducibilità, temperatura e pressione (in inglese *Conductivity Temperature Depth* - CTD). Per maggiori informazioni

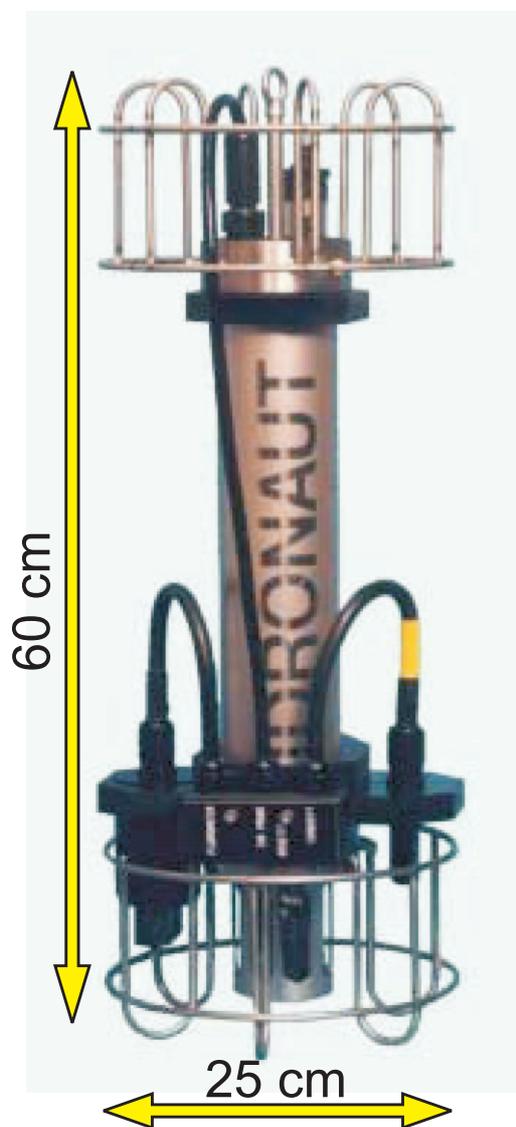


Figura 3.6: CTD Ocean Seven 316 della Idronaut. Si mostrano le dimensioni principali.

si può consultare [web12]. La comunicazione con il CTD avviene tramite porta seriale RS232. Si descrivono brevemente i sensori di cui è dotato lo strumento.

Il sensore di pressione è un manometro capace di generare un segnale lineare d'uscita, con una risoluzione di 2 dbar su un intervallo di misura di $0 \div 7000$ dbar.

Il sensore di temperatura è un termometro costituito da una resistenza di platino, inserita in un alloggiamento d'acciaio. L'intervallo di misura è di $-3 \div +50$ °C, con risoluzione di 0.0007 °C; il tempo di risposta è molto basso, ~ 50 ms.

Il sensore di conducibilità è una cella unica con sette anelli di platino posti nelle aperture di un tubo di quarzo. L'anello centrale è eccitato con una corrente alternata che fluisce verso entrambi gli anelli più esterni. Le due coppie di anelli adiacenti rivelano la differenza di tensione dovuta alla conducibilità elettrica dell'acqua. La conducibilità è misurata nell'intervallo di $0 \div 64$ mS/cm, con una risoluzione di 0.001 mS/cm.

La salinità è stata storicamente definita come la quantità di sali, misurata in grammi, contenuta in un chilogrammo di acqua. La determinazione diretta della salinità di un'acqua naturale, effettuata attraverso la misura della concentrazione di tutti i sali in essa disciolti, non può essere considerata come un metodo analitico pratico. Si ricorre ad un metodo indiretto basato sulla misura della conducibilità, della pressione e della temperatura, e sul confronto di tali parametri con quelli di una soluzione di riferimento. La salinità si ricava utilizzando l'algoritmo di calcolo, qui non riportato per brevità, definito in [FOF83].

3.2.3 Modem acustico

Il *Single Board Computer* viene connesso, tramite porta seriale RS232, al modem acustico ATM-877 della Datasonic, mostrato in figura 3.7. Il modem acustico sottomarino permette la comunicazione fra la strumentazione installata in profondità e una base operativa in superficie, permettendo una trasmissione di dati bidirezionale con un baud rate massimo di 2400 bit al



Figura 3.7: Modem acustico sottomarino ATM-877 Datasonic.

secondo, senza dover ricorrere ad una connessione via cavo. Il modem acustico è dotato di un trasduttore direzionale che è progettato per applicazioni in fondali marini, fino a 6000 metri di profondità.

Il SBC, che gestisce tutte le periferiche e riceve i dati relativi alle misure eseguite, trasferisce tali dati sulla memoria interna del modem. Periodicamente, un operatore che si porta nel punto in cui è installato l'apparato autonomo sottomarino può richiedere, tramite un opportuno modem di superficie, i dati raccolti dal modem. Si crea una comunicazione, attraverso la trasmissione di pacchetti acustici, tra il modem di profondità, connesso all'apparato, e un modem di superficie. Ad intervalli regolari, per esempio ogni mese, sarà possibile dunque interrogare il modem di profondità per avere i dati relativi alle misure effettuate dall'ultima comunicazione.

Esistono molti fattori che limitano le comunicazioni acustiche sottomarine. Attenuazioni del segnale sono dovute principalmente all'assorbimento del suono in acqua e alle interferenze legate alle riflessioni sul fondale marino e sulla superficie. Il modem acustico ATM-877 utilizza in fase di trasmissione delle tecniche di ridondanza, attraverso le quali è possibile eliminare gli errori dai dati trasmessi, a discapito della velocità effettiva di trasmissione.

Il modem acustico utilizza un'alimentazione esterna a +21 V (per la trasmissione e ricezione attraverso trasduttore acustico) e un'alimentazione a +6 V da batterie interne (per la gestione della comunicazione su porta seriale).

3.3 L'apparato di misura del *biofouling*

Per stimare l'andamento del *biofouling* nel sito sottomarino di Capo Passero è stato realizzato un apparato originale. Tale apparato intende rivelare la

variazione di trasparenza di una sfera Benthos simile a quelle utilizzate per contenere i PMT rivelatori di luce Čerenkov del telescopio di NEMO. Si vuole stimare tale variazione di trasparenza attraverso la misura della quantità di luce, proveniente da una sorgente nota esterna alla sfera Benthos, che riesca ad illuminare dei sensori posti all'interno della sfera stessa. L'apparato sarà dunque costituito essenzialmente da due parti: una sorgente luminosa controllata e una serie di rivelatori di luce posti all'interno di una sfera di vetro Benthos.

La figura 3.8 mostra schematicamente l'apparato di misura del *biofouling*. La sorgente luminosa è costituita da due LED blu, montati in un tubo di materiale plastico. All'interno di questa struttura, i LED sono alloggiati frontalmente a due "finestre" di vetro, due aperture nel cilindro di materiale plastico poste in corrispondenza della sfera di vetro, che consentono alla luce emessa dai LED di raggiungere la superficie della sfera Benthos. All'interno della sfera Benthos sono alloggiati 14 circuiti stampati fotorivelatori (*Photodiode Amplifier* - PHD), costituiti da un fotodiodo di silicio e da un amplificatore operazionale. I fotorivelatori sono applicati, tramite dei supporti adesivi, alla superficie interna della sfera e, attraverso del gel di silicone, sono accoppiati otticamente con la superficie interna della sfera. Sono posizionati inoltre due PHD di riferimento in prossimità dei due LED. La figura 3.9 mostra un dettaglio della superficie interna della sfera; i fotorivelatori sono stati fissati saldamente e la superficie dei fotodiodi è orientata verso l'esterno della sfera.

I 14 fotorivelatori applicati all'interno della sfera sono posti a differenti angoli rispetto alla verticale. La posizione di ogni PHD può essere identificata univocamente utilizzando le coordinate sferiche θ e ϕ (la terza coordinata r è superflua in quanto tutti i rivelatori sono posti su una superficie sferica). L'angolo θ , come è mostrato in figura 3.8, è stato fissato con la convenzione di porre $\theta = +90^\circ$ per il fotorivelatore rivolto verso l'alto, $\theta = 0^\circ$ per il PHD posto sull'orizzontale (o all' "equatore" della sfera), $\theta = -90^\circ$ per il fotorivelatore rivolto verso il basso. Dieci dei quattordici fotorivelatori sono stati posti sull'arco di cerchio meridiano individuato dal piano che contiene anche la sorgente luminosa ($\phi = 0^\circ$ per convenzione), equispaziati in angolo

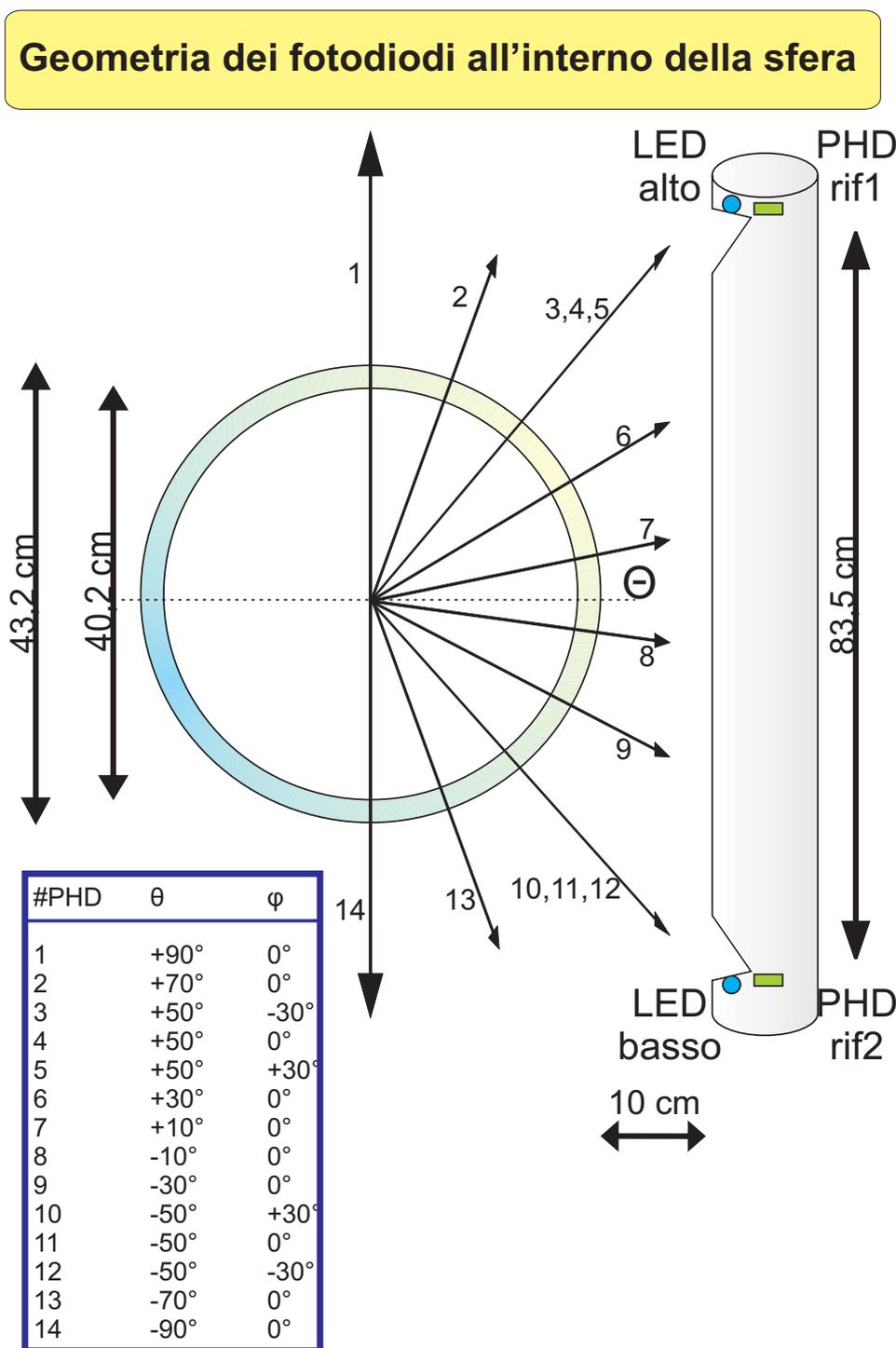


Figura 3.8: Schematizzazione dell'apparato di misura del *biofouling*. I fotorivelatori sono numerati ed è mostrata la loro posizione in coordinate polari.

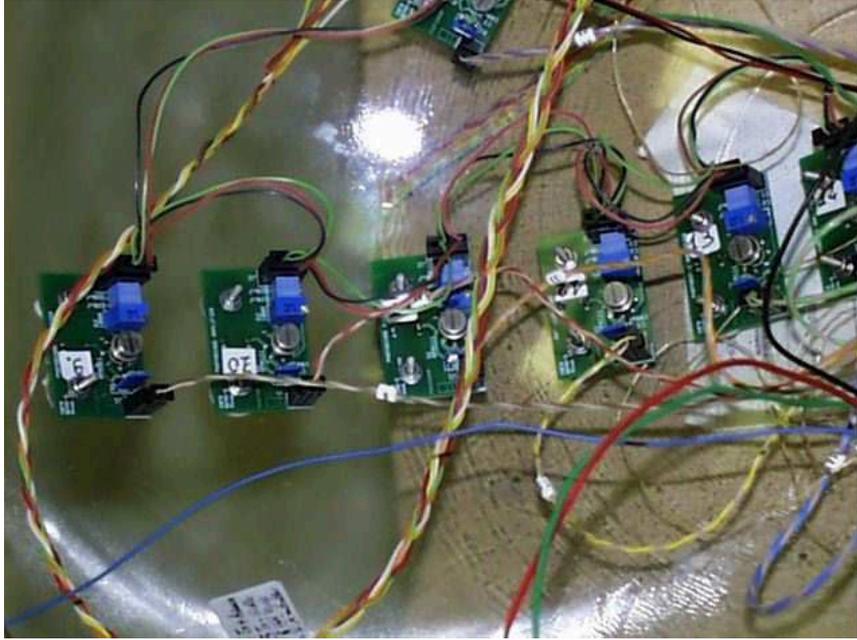
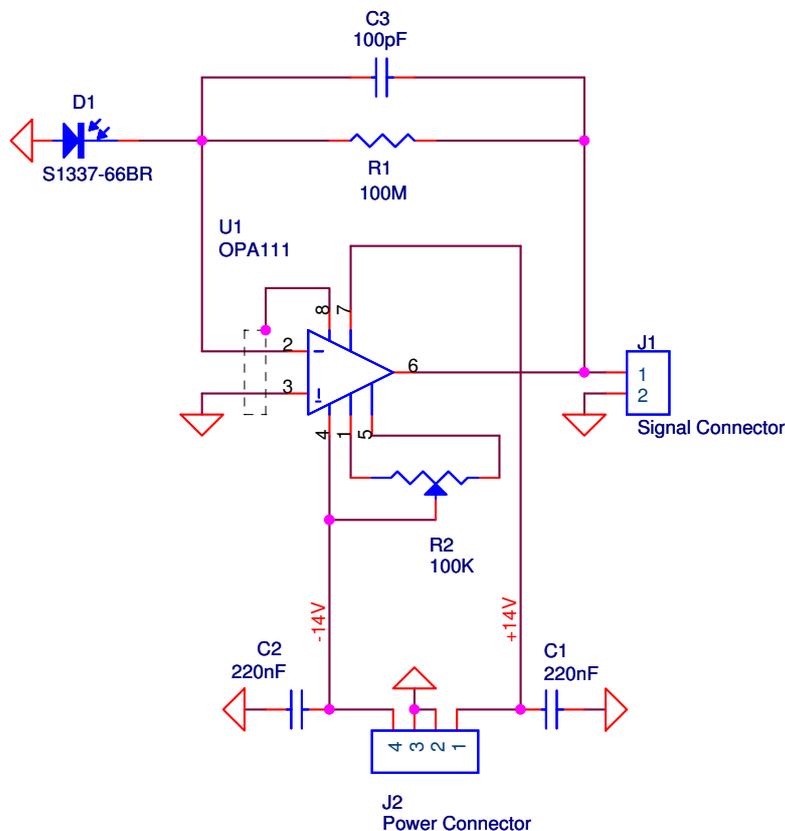


Figura 3.9: In foto sono mostrati i PHD, con i cavi di alimentazione e di segnale, contenuti internamente alla sfera.

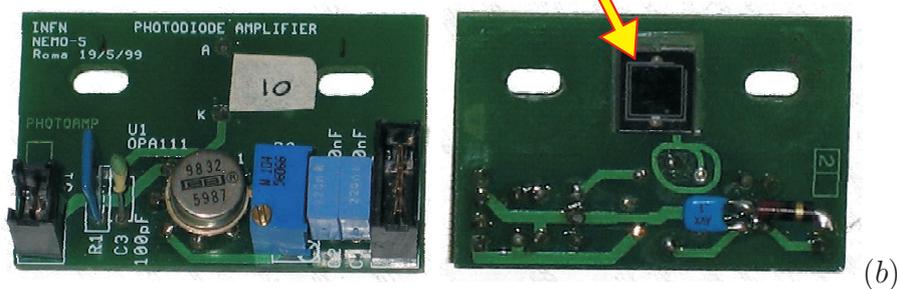
zenitale $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. I fotorivelatori posti a $\theta = +50^\circ$ e $\theta = -50^\circ$ sono in posizione privilegiata, poiché risultano meglio illuminati dai due LED blu. A tali angoli θ , si è deciso di posizionare ulteriori fotorivelatori agli angoli azimutali $\phi = +30^\circ$ e $\phi = -30^\circ$.

Come si è spiegato nel paragrafo 2.1, il fenomeno del *biofouling* è dato dalla somma di due effetti: il primo dovuto alla crescita del *biofilm* (stratificazione irreversibile di macromolecole organiche) e il secondo legato alla presenza di sedimenti organici e inorganici (accumulo reversibile che provoca cambiamenti veloci nella trasparenza). Questo secondo effetto potrebbe oscurare in maniera significativa, per brevi periodi di tempo, alcuni fotorivelatori, nel caso in cui un sedimento di dimensioni macroscopiche si disponesse proprio in corrispondenza della superficie rivelatrice dei fotodiodi. Per questo motivo sono stati posti tre fotorivelatori agli angoli θ privilegiati, per stimare il *biofouling* medio sulla superficie, non legato ad eventi casuali come la presenza di un singolo sedimento.



(a)

Superficie del fotodiode



(b)

Figura 3.10: (a) Schema elettrico e (b) aspetto di entrambi i lati del circuito stampato dei fotorivelatori. I PHD sono costituiti da un fotodiode di silicio che genera una corrente proporzionale alla luce che l'investe e da un amplificatore operazionale che fornisce un segnale di tensione proporzionale alla corrente generata dal fotodiode.

In figura 3.10 sono mostrati lo schema elettrico e l'aspetto dei circuiti fotorivelatori utilizzati. I PHD utilizzano due distinte alimentazioni, a +14 V ed a -14 V, e forniscono un segnale di tensione continua proporzionale alla luce che investe il fotodiodo di cui sono dotati. Sperimentalmente si nota che, in condizioni di misura, il segnale dei PHD è contenuto nella dinamica $0 \leq V_{PHD} \leq 3V$. Attraverso un potenziometro (o *trimmer*) è possibile minimizzare la tensione di *offset* e le correnti di *bias* degli amplificatori operazionali. Tale operazione è stata eseguita in una "scatola nera": oscurando completamente il fotodiodo si può regolare un segnale d'uscita di tensione nullo.

La tensione misurata a tempi diversi su ogni singolo fotorivelatore può essere scritta come una funzione del *biofouling* e della quantità di luce emessa dal LED che in quel momento è acceso:

$$V_{PHD}^i(t) = f^{biof}(t) \cdot luce(t) \quad (3.1)$$

dove $V_{PHD}^i(t)$ è la tensione misurata sul fotorivelatore *i*-esimo al tempo t , $f^{biof}(t)$ è la funzione che determina l'andamento del *biofouling* nel tempo e $luce(t)$ è la quantità di luce emessa dal LED. La tensione misurata sul fotorivelatore di riferimento in prossimità del LED può essere scritta:

$$V_{PHD}^r(t) = k \cdot luce(t) \quad (3.2)$$

dove k è una costante (i PHD di riferimento non risentono dell'effetto del *biofouling*). Si può eliminare la dipendenza legata alla sorgente luminosa definendo la funzione *i*-esima $f_{PHD}^i(t)$ come il rapporto fra la tensione d'uscita del PHD *i*-esimo e la tensione del PHD di riferimento. Si ottiene:

$$f_{PHD}^i(t) = \frac{V_{PHD}^i(t)}{V_{PHD}^r(t)} = \frac{f^{biof}(t)}{k} \quad (3.3)$$

che è una funzione indipendente dalla quantità di luce emessa dal LED. Tale funzione *i*-esima dipende esclusivamente dall'effetto dovuto al *biofouling*, a meno di una costante. Normalizzando tale funzione al valore che essa stessa assume nell'istante iniziale, si può definire la funzione *Trasparenza i*-esima

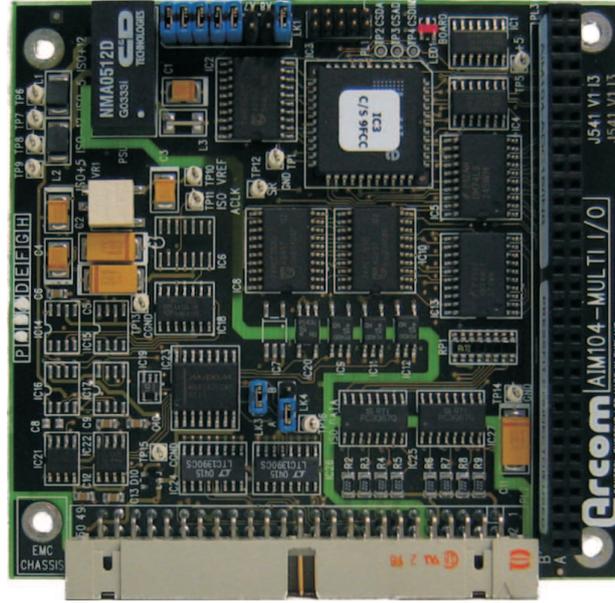


Figura 3.11: AIM104-ADC16/IN8 della Arcom. Il convertitore è compatibile con il bus standard PC/104.

$T^i(t)$ come:

$$T^i(t) = \frac{f_{PHD}^i(t)}{f_{PHD}^i(t=0)} = \frac{f^{biof}(t)}{f^{biof}(t=0)} \leq 1 \quad (3.4)$$

La funzione mostrata nell'equazione 3.4 dà una stima diretta della trasparenza della superficie del modulo ottico. Si quantifica in questo modo l'influenza del *biofouling* sull'oscuramento della luce raccolta dai moduli ottici. Al tempo iniziale si ha che $T^i(0) = 1$, in condizioni iniziali di biofouling completamente assente; in condizioni di oscuramento totale la funzione assume valore nullo. La *Trasparenza* assume valori sempre compresi tra $0 < T(t) \leq 1$.

Per ricavare l'andamento della *Trasparenza* in funzione del tempo, è necessario misurare con accuratezza i valori delle tensioni su tutti i fotorivelatori. Viene utilizzato, a tal scopo, il convertitore analogico digitale (in inglese *Analog to Digital Converter - ADC*) AIM104-ADC16/IN8 della Arcom, una scheda compatibile con il bus standard PC/104 che possiede 16 linee analogiche di ingresso. Una scheda ADC viene utilizzata per convertire un valore analogico di tensione in un valore numerico. L'ADC, mostrato in figura 3.11,

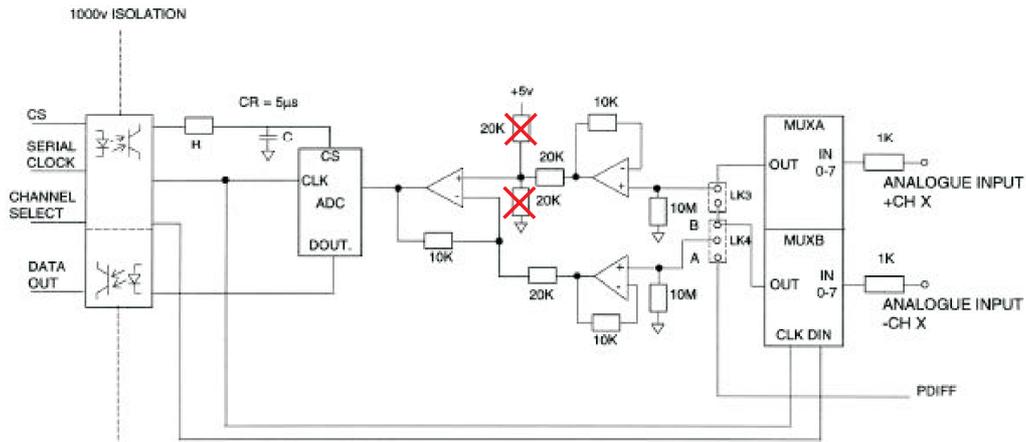


Figura 3.12: Schema elettrico semplificato del convertitore ADC, che mostra la modifica necessaria ad alterare la dinamica di ingresso.

comunica attraverso il bus PC/104 con il *Single Board Computer*. Le tensioni di uscita dei 14 fotorivelatori posti dentro la sfera e le tensioni di uscita dei due PHD di riferimento posti in prossimità dei due LED sono portate, attraverso un cablaggio opportuno, agli ingressi del convertitore. L'ADC gestisce una conversione a 12 bit ($2^{12} = 4096$) ed è progettata per convertire segnali in un intervallo bipolare tra -5 V e $+5\text{ V}$.

In precedenza si è accennato al fatto che $0 \leq V_{PHD} \leq 3\text{V}$: il circuito di campionamento a nostra disposizione non è, quindi, ottimizzato per tali segnali. L'ADC utilizzato è, infatti, un convertitore di segnali bipolari e non può essere configurato per funzionare in modalità monopolare, cioè convertire segnali positivi. Per poter sfruttare in maniera ottimale la dinamica del convertitore ne abbiamo modificato il circuito elettrico, rimuovendo due resistenze all'ingresso di un amplificatore operazionale (le due resistenze cancellate in figura 3.12). Con tale modifica, è stato possibile alterare la dinamica dei segnali di ingresso sui canali dell'ADC, passando da una dinamica di $-5\text{V} \div +5\text{V}$ ad una di $0\text{V} \div +3.3\text{V}$.

È stato necessario scrivere un opportuno programma in C per comunicare con l'ADC. Tale codice permette di accedere ad alcuni indirizzi di memoria specifici della periferica per avviare la conversione e successivamente leggere

il valore numerico convertito. In appendice A è riportato il codice del programma che esegue la scansione dei 16 canali dell'ADC e stampa su schermo il valore numerico letto. Viene richiamata la routine "read_ADC" con la quale si avvia la conversione di un canale specifico, si attende la fine della conversione e si legge il valore numerico; la routine restituisce il valore convertito della tensione su quella linea e un codice di controllo.

La sorgente luminosa costituita dai due LED viene pilotata da un circuito generatore di corrente. Il diodo non è un componente lineare: non esiste una relazione di linearità tra la tensione ai suoi capi e la corrente che l'attraversa. Dunque, per avere una sorgente luminosa controllata, è necessario iniettare nel LED una corrente stabile e fissata. Tale funzione è svolta dal circuito mostrato in figura 3.13. Il generatore di corrente, indipendentemente dai carichi connessi sulle sue due uscite, fornisce una corrente elettrica stabile e di valore fissato¹.

Ciascun LED utilizzato è posizionato in modo tale da illuminare metà sfera di vetro: la luce emessa viene rivelata dalla metà dei PHD posti all'interno della sfera. Per stimare la variazione della *Trasparenza*, i LED vengono accesi con due diverse intensità di corrente (10 mA e 20 mA), in modo tale da avere due diverse misure di luce e poter confrontare l'effetto del *biofouling* rivelato nei due casi. Come mostrato in figura 3.13, il generatore di corrente viene pilotato attraverso tre linee di ingresso logiche. Settando a 0 V o a 3.3 V ("0" logico e "1" logico) le tre linee è possibile accendere e spegnere il generatore, selezionare il LED acceso (alto o basso) e la corrente fra i due valori possibili. Nella tabella 3.1 sono riassunte le configurazioni possibili per pilotare il generatore con l'ausilio delle tre linee di ingresso.

I due livelli di corrente che il generatore inietta nei LED possono essere agevolmente regolati attraverso due potenziometri. Si mostreranno nel prossimo capitolo i motivi che hanno spinto ad impostare le correnti sui valori di 10 mA e 20 mA.

Le misure delle tensioni ai capi dei PHD vengono eseguite attraverso il

¹Tale affermazione non risulta vera quando si collegano degli oggetti con una resistenza molto grande: la tensione che può fornire il circuito, ovviamente, non può mai essere superiore alla tensione di alimentazione.

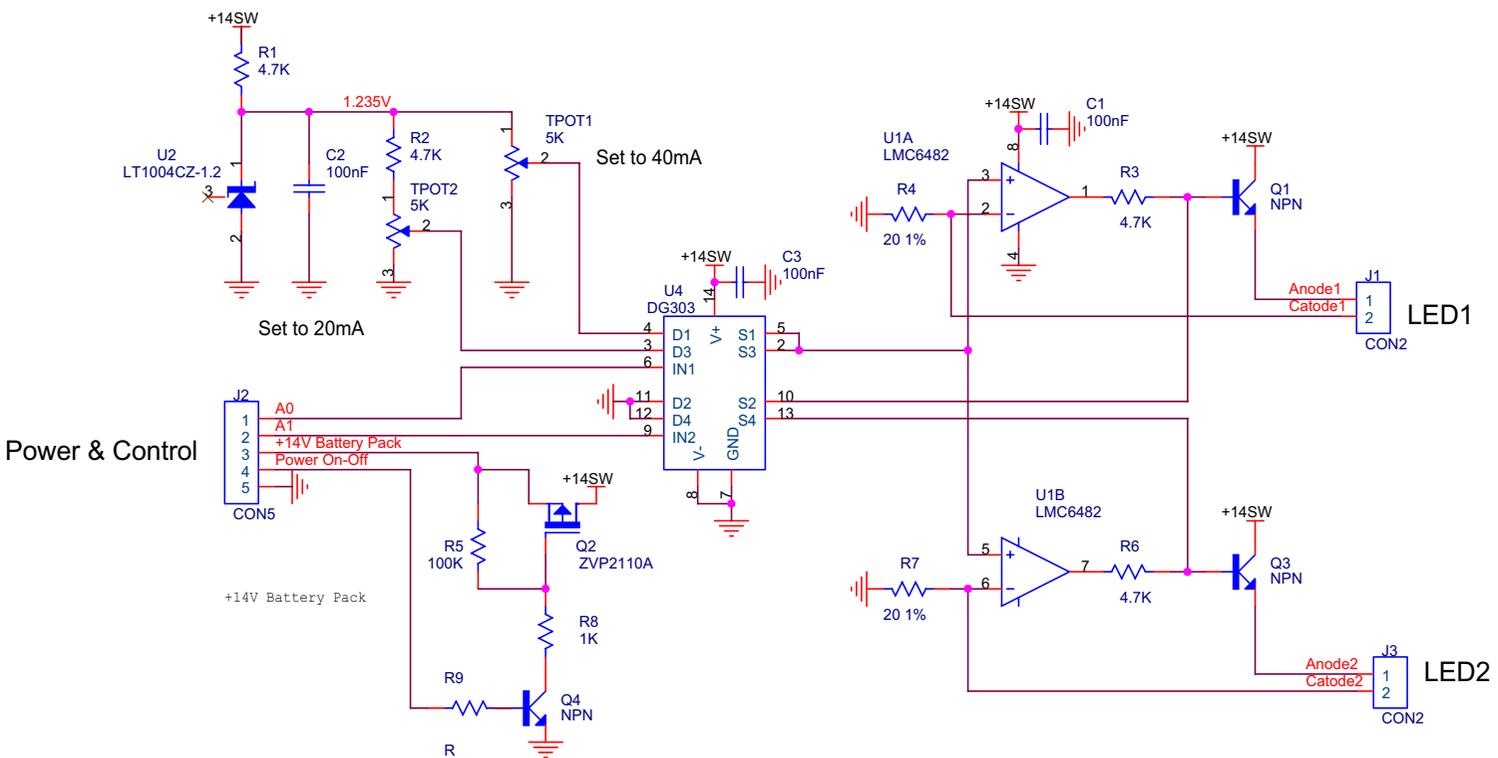


Figura 3.13: Generatore di corrente utilizzato per pilotare le due sorgenti luminose costituite da due LED blu.

Power	A0	A1	Configurazione LED
0	-	-	entrambi i LED spenti
1	0	1	LED alto acceso a 10 mA
1	1	1	LED alto acceso a 20 mA
1	0	0	LED basso acceso a 10 mA
1	1	0	LED basso acceso a 20 mA

Tabella 3.1: Configurazioni utilizzate per l'accensione dei due LED con due diversi valori di corrente. Le tre linee digitali sono indicate con la stessa denominazione mostrata in figura 3.13.

Power	A0	A1	Configurazione LED	Misura eseguita
0	0	0	entrambi i LED spenti	misura del buio (<i>pedistallo 1</i>)
1	0	1	LED alto @ 10 mA	misura di luce (<i>livello basso</i>)
1	1	1	LED alto @ 20 mA	misura di luce (<i>livello alto</i>)
0	0	0	entrambi i LED spenti	misura del buio (<i>pedistallo 2</i>)
1	0	0	LED basso @ 10 mA	misura di luce (<i>livello basso</i>)
1	1	0	LED basso @ 20 mA	misura di luce (<i>livello alto</i>)
0	0	0	entrambi i LED spenti	misura del buio (<i>pedistallo 3</i>)

Tabella 3.2: Ciclo di misure relative al *biofouling*.

ciclo di acquisizione mostrato nella tabella 3.2. Prima e dopo l'accensione di ciascun LED, viene eseguita una misura della tensione emessa dai PHD in condizioni di "buio", denominata anche "pedistallo". Tali valori, mediati, saranno sottratti alle misure eseguite durante l'accensione dei LED. In tal modo, si ottiene un andamento indipendente da eventuale bioluminescenza presente nell'ambiente sottomarino; si minimizzano, inoltre, gli effetti dovuti a variazioni della temperatura che modificano le correnti di bias dei PHD. L'intensità della luce rivelata su ogni PHD durante l'accensione del LED alto, ad esempio, viene sottratta del valor medio del *pedistallo 1* e *pedistallo 2*, misurato per ciascun PHD.

Il generatore di corrente viene pilotato dal *Single Board Computer* attraverso le linee digitali di output presenti sulla scheda (si veda la figura 3.2). Le linee digitali della scheda VIPER sono gestite attraverso il programma scritto in C mostrato in appendice A.

3.4 Le misure eseguite: scadenze temporali e medie

Sono stati mostrati, nei paragrafi precedenti, gli strumenti che compongono l'apparato per misure abissali. Come si è già detto in precedenza, tutti gli strumenti rimarranno in modalità di basso consumo per la maggior parte del tempo in cui l'apparato sarà operativo. L'alimentazione, fornita attraverso batterie, non consente una presa dati continua; in alternativa, saranno eseguite misure ad intervalli regolari.

Il compito del *Single Board Computer* è quello di gestire il funzionamento della strumentazione connessa, ricevere i dati delle misure ed infine organizzare tali dati in un formato standard. Ogni strumento restituisce, dopo essere stato interrogato, le misure che ha eseguito attraverso dei dati che hanno formati diversi. È necessario, dunque, stabilire un formato univoco dei dati, che comprenda le misure di tutte le periferiche.

Gli strumenti connessi su porta seriale, il correntometro e il CTD, trasmettono i dati come stringhe alfanumeriche in formato ASCII. Poiché in tali stringhe sono presenti informazioni ridondanti (modello dello strumento, caratteri di controllo, eccetera), il SBC, attraverso un'opportuna applicazione, seleziona e salva su disco solo i dati legati alle misure. I dati del correntometro si possono esprimere mediante una stringa costituita da otto parole:

1	modulo della velocità della corrente, in cm/s	(0 ÷ 300)
2	direzione della corrente rispetto al Nord, in gradi	(0 ÷ 360)
3	temperatura, in °C	(-10 ÷ 43)
4	intensità del segnale, in dB	(-∞ ÷ 0)
5	direzione della bussola, in gradi	(0 ÷ 360)
6	inclinazione lungo Nord, in gradi	(-35 ÷ 45)
7	inclinazione lungo Est, in gradi	(-35 ÷ 45)
8	numero dei pacchetti acustici mediati	(0 ÷ 300)

I dati del CTD sono contenuti in una stringa formata da tre parole:

- | | | |
|---|-------------------------|-----------|
| 1 | temperatura, in °C | (−3 ÷ 50) |
| 2 | conducibilità, in mS/cm | (0 ÷ 64) |
| 3 | salinità, in ppm | (0 ÷ 64) |

Il blocco relativo alla stima del *biofouling* restituisce dati attraverso l'ADC, che converte il valore della tensione ai capi dei PHD. L'ADC esegue varie conversioni sui 16 canali di ingresso, durante ciascuna delle sette fasi del ciclo di misura del *biofouling* (tabella 3.2). Attraverso più conversioni per ogni i -esimo PHD, è possibile avere delle misure con un errore statistico stimabile con la deviazione standard della distribuzione. Si assume che la distribuzione delle misure di tensione ai capi dei PHD abbia una forma gaussiana, centrata intorno al valor medio \bar{x}_i e di larghezza pari alla deviazione standard σ_i . Eseguendo N misure, il valore e l'errore da associare alla grandezza misurata sul PHDi sono $X_i = \bar{x}_i \pm \frac{\sigma_i}{\sqrt{N}}$. Il programma di gestione del ciclo di misura delle tensioni sui PHD calcola valor medio e deviazione standard per i 16 fotorivelatori, per le sette fasi del ciclo. La stringa dei dati relativi al *biofouling* contiene 16 medie e 16 deviazioni standard per le 7 fasi del ciclo: complessivamente 224 parole, ordinate come segue

pedistallo 1	\bar{x}_1	σ_1	\bar{x}_2	σ_2	\bar{x}_3	σ_3	...	...	\bar{x}_{16}	σ_{16}
LED 1 @ 10 mA	\bar{x}_1	σ_1	\bar{x}_2	σ_2	\bar{x}_3	σ_3	...	...	\bar{x}_{16}	σ_{16}
LED 1 @ 20 mA	\bar{x}_1	σ_1	\bar{x}_2	σ_2	\bar{x}_3	σ_3	...	...	\bar{x}_{16}	σ_{16}
...
pedistallo 3	\bar{x}_1	σ_1	\bar{x}_2	σ_2	\bar{x}_3	σ_3	...	...	\bar{x}_{16}	σ_{16}

Gli strumenti connessi eseguono misure a diversi intervalli di tempo. La struttura dei dati complessivi deve contenere un'indicazione della data e dell'ora in cui una misura è stata eseguita. La struttura dei dati è mostrata in tabella 3.3. Ogni volta che è eseguito il ciclo di misure relativo al *biofouling*, viene aperto il file dei dati e appesa una riga con i dati acquisiti dal salvataggio precedente. Tale riga ha un indicatore di inizio (*header*), formato da una parola scelta convenzionalmente (1000) e da un'altra che indica il numero totale di parole che costituisce la misura. Segue l'*header* del correntometro, formato dalla parola 2000 seguita dal numero di parole dei dati del correntometro. Seguono i dati del correntometro, preceduti da due parole

HEADER misura	1000	<i># parole_totali</i>	
HEADER correntometro	2000	<i># parole_corr</i>	
DATI correntometro	<i>data</i>	<i>ora</i>	<i>dati_corr ...</i>
HEADER CTD	3000	<i># parole_CTD</i>	
DATI CTD	<i>data</i>	<i>ora</i>	<i>dati_CTD ...</i>
HEADER biofouling	4000	<i># parole_biof</i>	
DATI biofouling	<i>data</i>	<i>ora</i>	<i>dati_biof ...</i>
FINE misura	99999<LF>		

Tabella 3.3: Struttura del file di dati.

che indicano la data e l'ora. Analogamente, seguono gli *header* e i dati del CTD e del *biofouling*. La riga è terminata dalla parola 99999, seguita dal carattere ASCII <LF> (*Line Feed*, nuova linea).²

²Il *biofouling* è un processo lento e le misure possono essere eseguite ogni 10-12 ore, mentre è interessante rilevare più frequentemente i valori delle correnti sottomarine, della temperatura, della salinità. Il formato dei dati consente che fra un ciclo di *biofouling* e il successivo vengano eseguite diverse misure con il correntometro e con il CTD.

Capitolo 4

Circuiti originali

Nel capitolo 3 è stato descritto l'apparato strumentale progettato per determinare le proprietà del sito abissale e la forma dei dati che vengono prodotti. In questo capitolo si definiranno nel dettaglio le modalità di misura. A partire da alcune misure preliminari eseguite con la strumentazione del *biofouling*, si giustificheranno le scelte fatte nella gestione del ciclo di acquisizione, e le calibrazioni effettuate. Si mostreranno i dati dei consumi degli strumenti per ricavare il tempo massimo di attività dell'apparato e la frequenza nella presa dati.

4.1 Definizione della strategia di misura

Come già descritto nel paragrafo 3.3, i fotorivelatori vengono illuminati da una sorgente luminosa (LED), stimolata da una corrente controllata da un apposito circuito. Il generatore (figura 3.13) realizzato per tale scopo fornisce una corrente costante nel tempo, la cui intensità può essere regolata per mezzo di semplici potenziometri. Abbiamo scelto di misurare la luce che arriva sui vari PHD in diverse condizioni d'illuminazione: i LED vengono fatti percorrere da una corrente la cui intensità può assumere due valori prefissati (nominalmente 10 e 20 mA).

Come già detto, la stima della *Trasparenza* della superficie del modulo ottico, essendo ottenuta come rapporto fra i valori di tensione misurati su

fotorivelatori illuminati dalla stessa sorgente, non deve dipendere dall'intensità di luce emessa dai LED: è stato deciso di effettuare due misure della *Trasparenza* con LED eccitati da diverse correnti, proprio per verificare tale assunzione e per avere due stime (ovviamente non del tutto indipendenti) della stessa quantità. Le misure dei segnali forniti da ogni PHD in condizioni di illuminazione devono essere corredate con misure del segnale (sullo stesso PHD) in assenza di illuminazione.¹

In generale, una sorgente luminosa più intensa permette di effettuare misure che risentano meno del rumore ottico di fondo. Una sorgente più intensa permette, quindi, di realizzare uno strumento più "sensibile" a minime variazioni di *Trasparenza* del modulo ottico, ma richiede una quantità maggiore di energia; l'apparato autonomo che si vuole realizzare può misurare per tempi lunghi solo se la potenza richiesta è limitata. Siamo costretti a trovare, pertanto, un compromesso tra la sensibilità richiesta e i consumi possibili.

Dimensionamento del sistema di misura del *biofouling*

Vogliamo definire le condizioni di illuminazione dei LED che garantiscono la migliore misura della variazione di *Trasparenza*, con il minor dispendio di energia. Ciò comporta lo studio della linearità della misura di luce, da parte dei PHD, al variare della corrente di eccitazione dei LED.

Come già detto, vogliamo massimizzare la risposta dei PHD, rendendola molto superiore al rumore, valutabile in qualche mV all'ingresso del convertitore analogico-digitale, per ottenere la miglior risoluzione nella misura della *Trasparenza*. Abbiamo quindi studiato il segnale registrato dai PHD, posizionati all'interno della sfera nella configurazione geometrica finale, con i LED (anch'essi posizionati come saranno nelle condizioni di misura sottomarina) alimentati con diversi valori di corrente. Per ogni condizione di eccitazione si è studiata, inoltre, la risposta dei PHD in funzione del tempo. Innanzi tutto abbiamo notato che alcuni PHD erano, per questioni geometriche, molto meno illuminati di altri. Questo ha permesso di distinguere eventuali fenomeni

¹Tale valore, legato alla tensione presente ai capi del fotorivelatore anche se non illuminato, è detta "pedistallo" e va sottratta al segnale registrato in condizioni di misura.

di non linearità dovuti ai PHD da quelli dovuti ai LED. Si osserva inoltre, qualitativamente, che è necessario attendere un certo tempo, dell'ordine delle decine di secondi, affinché il segnale registrato dai PHD si stabilizzi. Dall'analisi di queste misure preliminari vogliamo avere indicazioni sulla scelta dei valori di corrente dei LED e sulla modalità ottimale per effettuare il ciclo di misura della tensione dei PHD.

In figura 4.1 è mostrata la struttura meccanica in cui sono alloggiati gli strumenti che compongono la stazione autonoma per misure abissali. Tale "gabbia" è costituita da acciaio AISI-316, un acciaio molto resistente alla corrosione; al centro della struttura è posizionata la sfera di vetro, che contiene i fotorivelatori per la misura del *biofouling* e l'elettronica di gestione dell'apparato; sulle staffe forate visibili in foto sono stati collocati il tubo contenente i LED e i PHD di riferimento, il correntometro, il CTD, il modem acustico e un pacco batterie.

Per effettuare le misure preliminari di cui si è accennato sopra, abbiamo attivato solo il ciclo di operazioni relative ai LED ed ai PHD, cioè alla strumentazione per la stima del *biofouling*, mostrata schematicamente in figura 3.1. È necessario che tali acquisizioni vengano eseguite in condizioni di rumore ottico minimo. Tutto l'apparato, pertanto, è stato schermato otticamente con una copertura nera, come mostrato in figura 4.2. Anche piccole quantità di luce potrebbero essere rivelate dai PHD e costituirebbero un "rumore"; solo la luce dei due LED deve poter raggiungere la sfera e i fotorivelatori in essa contenuti.

Regolando i potenziometri del generatore di corrente (TPOT1 e TPOT2 in figura 3.13), sono state eseguite misure accendendo i due LED con correnti pari a 1, 5, 10, 15, 20, 25 e 30mA. L'ADC converte le tensioni dei 16 PHD in condizioni di buio, per stimare il "pedistallo"; dopo l'accensione di un LED, sono state effettuate acquisizioni ogni 11 secondi. Dopo lo spegnimento del LED, viene effettuata una nuova misura del buio. Per ciascun fotorivelatore, il valor medio dei due pedistalli viene sottratto alle misure di luce. Tali acquisizioni permettono di caratterizzare il funzionamento del blocco di misura (2 LED + 16 PHD) in funzione del tempo e della corrente. Per via della simmetria del problema (ciascun LED illumina direttamente



Figura 4.1: Alloggiamento meccanico della strumentazione che compone l'apparato per misure abissali.



Figura 4.2: Con l'ausilio di un panno nero plastificato, si riduce fortemente il rumore ottico rilevato dalla strumentazione di misura del *biofouling*.

solo la metà dei PHD), vengono mostrati i risultati relativi all'accensione del LED alto che illumina i PHD1÷PHD7 e il suo PHD di riferimento (cfr. figura 3.8). I risultati relativi ai PHD8÷PHD14 sono del tutto compatibili con quelli mostrati.

I grafici di figura 4.3 mostrano la luce per varie correnti, in funzione del tempo, rivelata dal PHD di riferimento (PHDrif1) e dai PHD più (PHD4) e meno (PHD7) illuminati. Si osserva, qualitativamente, che l'andamento è di tipo decrescente nel tempo, tendente ad un valore limite. Per correnti superiori a 20 mA, inoltre, il segnale misurato ai capi dei PHD non aumenta oltre un valore massimo.

Tale effetto è evidente nei grafici di figura 4.4, che mostrano il segnale degli stessi PHD, ai vari tempi, in funzione della corrente che alimenta il LED. Vengono mostrati i dati del PHD di riferimento e dei PHD più e meno illuminati. In tutti i casi si osserva una saturazione del segnale dei PHD quando la corrente supera ~ 20 mA; non esiste una relazione di linearità fra la corrente che alimenta il LED e la luce rivelata. Poiché i PHD considerati lavorano in regioni della loro dinamica molto differenti, si deduce che la suddetta "saturazione" dipende esclusivamente dalle caratteristiche di emissione dei LED. Se dipendesse dai PHD, sarebbe stata osservata solo su quelli maggiormente illuminati, mentre dal confronto fra i due grafici si osserva che l'andamento è pressoché lo stesso, a meno di un fattore di scala. Con i LED utilizzati nel nostro apparato, risulta quindi inutile, ed anche dispendioso dal punto di vista energetico, alimentarli con una corrente superiore a 20 mA, in quanto l'efficienza luminosa non migliora significativamente.

Dalle considerazioni espresse finora, si può ricavare che l'andamento nel tempo della luce rivelata dall'apparato di misura del *biofouling* dipende esclusivamente dall'evoluzione temporale della luce emessa dai LED. I grafici in figura 4.5 mostrano tale andamento, per i sette PHD direttamente illuminati e dal PHD di riferimento. Con l'eccezione dei casi relativi ai valori più bassi di corrente iniettata nel LED (1 mA e 5 mA), si può osservare un andamento di tipo esponenziale decrescente, tendente a valori costanti di illuminazione.

Si può parametrizzare l'andamento temporale del segnale di tensione ai capi dei PHD, in condizioni di corrente ai LED $I_{LED} = costante$, con la

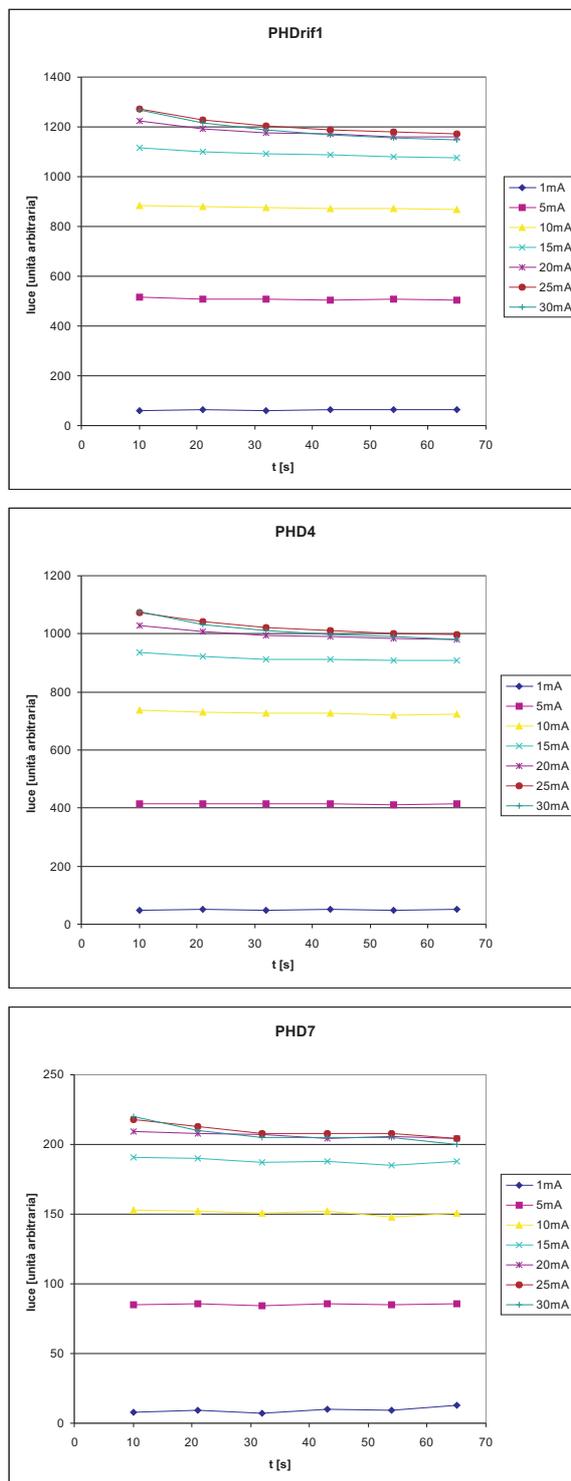


Figura 4.3: Andamento temporale del segnale di tensione misurato ai capi dei PHD per varie correnti. Confronto fra il segnale luminoso misurato sul PHD di riferimento e sui PHD4 e PHD7.

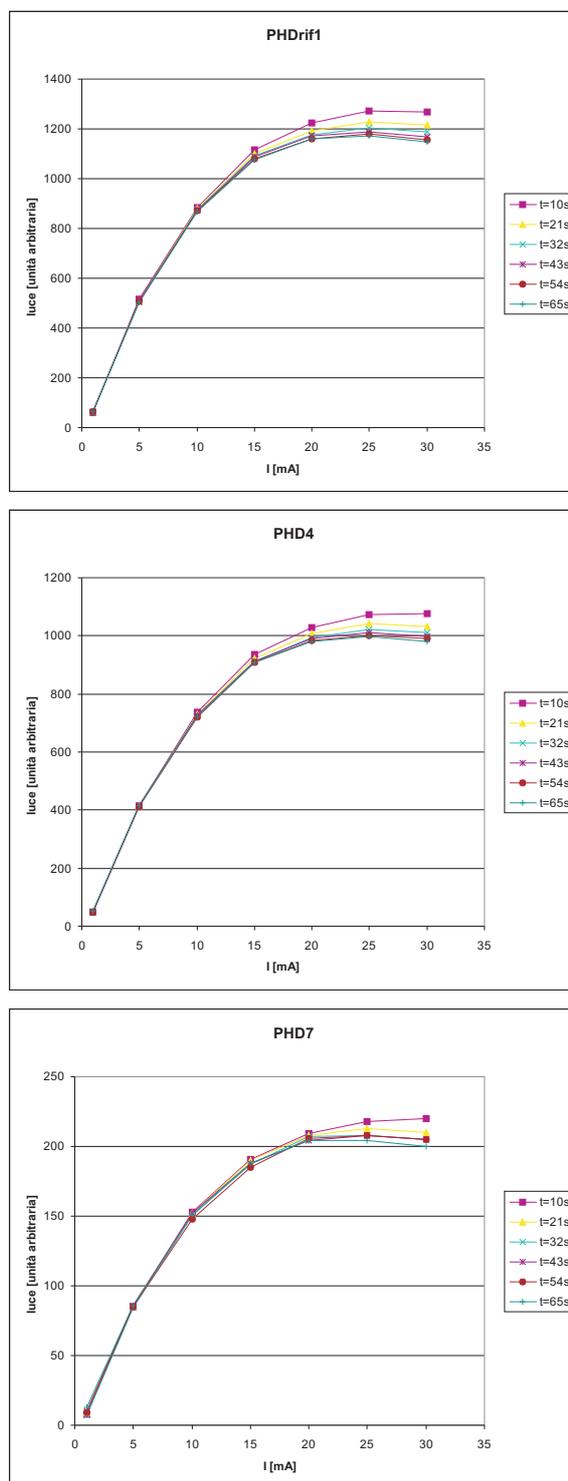


Figura 4.4: Segnale misurato ai diversi tempi in funzione della corrente. Confronto fra il segnale luminoso misurato sul PHD di riferimento e sui PHD4 e PHD7.

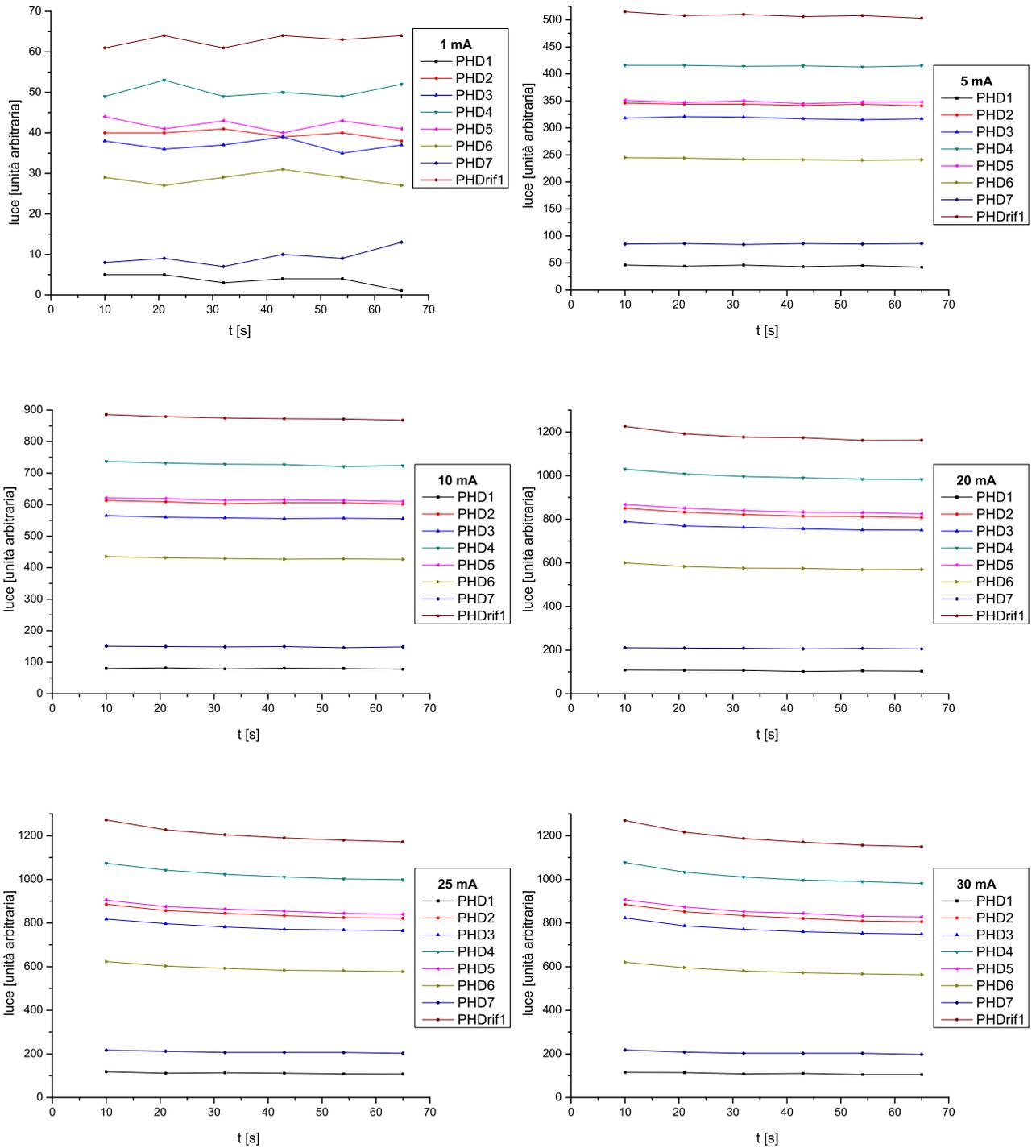


Figura 4.5: Segnale misurato sui i PHD illuminati dal LED alto in funzione del tempo. Si noti che analoghi risultati sono stati ottenuti per i PHD illuminati dal LED basso.

funzione

$$V^{PHD_i}(t) = V_0^{PHD_i} + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.1)$$

con $V_0^{PHD_i}$ ed A espressi in volt (o in canali di campionamento dell'ADC). In tal modo possiamo verificare quantitativamente se l'evoluzione nel tempo dei segnali dei PHD è descritto dalla stessa funzione (e quindi se può essere imputata al funzionamento del LED). I grafici in figura 4.6 mostrano i risultati della parametrizzazione per il PHD di riferimento, utilizzando dati ottenuti con diversi valori di I_{LED} . Tali grafici sono del tutto analoghi a quelli ottenuti per gli altri fotorivelatori, che quindi non vengono mostrati. Da tale analisi, è interessante ricavare il valore della costante di tempo, indicata nell'equazione 4.1 con τ , e il valore del rapporto tra il coefficiente dell'esponenziale e il termine indipendente dal tempo, $\frac{A}{V_0^{PHD_i}}$. La costante di tempo τ individua l'ordine di grandezza del tempo che è necessario attendere, dopo l'accensione dei LED, per eseguire una misura di luce che sia stabile; il rapporto $\frac{A}{V_0^{PHD_i}}$ dà una stima dell'energia dissipata dal LED in forme diverse dall'energia luminosa.

Nella tabella 4.1 sono riportati i valori numerici ricavati da tale parametrizzazione esponenziale. Si osserva che, per $I_{LED} = costante$, i valori di τ e $\frac{A}{V_0^{PHD_i}}$ sono compatibili, entro gli errori, per tutti i PHD. Per ogni valore di corrente che alimenta i LED possiamo, dunque, calcolare i valori medi dei due parametri (τ e $\frac{A}{V_0^{PHD}}$) per riscontrare una loro eventuale dipendenza dalla corrente I_{LED} .

In figura 4.7 è mostrato l'andamento della costante di tempo media, ottenuta mediando i valori riportati in tabella 4.1 per ogni valore di I_{LED} , in funzione della corrente. Si evince dal grafico che la costante di tempo è indipendente da I_{LED} . La figura 4.8 mostra il rapporto $\frac{A}{V_0^{PHD}}$, medio per ogni I_{LED} , in funzione della corrente. Tale parametro cresce all'aumentare della corrente nell'intervallo misurato.

In base all'osservazione della "saturazione" dell'emissione di luce da parte dei LED, è ragionevole fissare i livelli di corrente per l'accensione dei LED a 10 mA e 20 mA. Correnti $I_{LED} < 10mA$ genererebbero sui PHD segnali troppo bassi, molto sensibili al rumore elettronico; correnti $I_{LED} > 20mA$

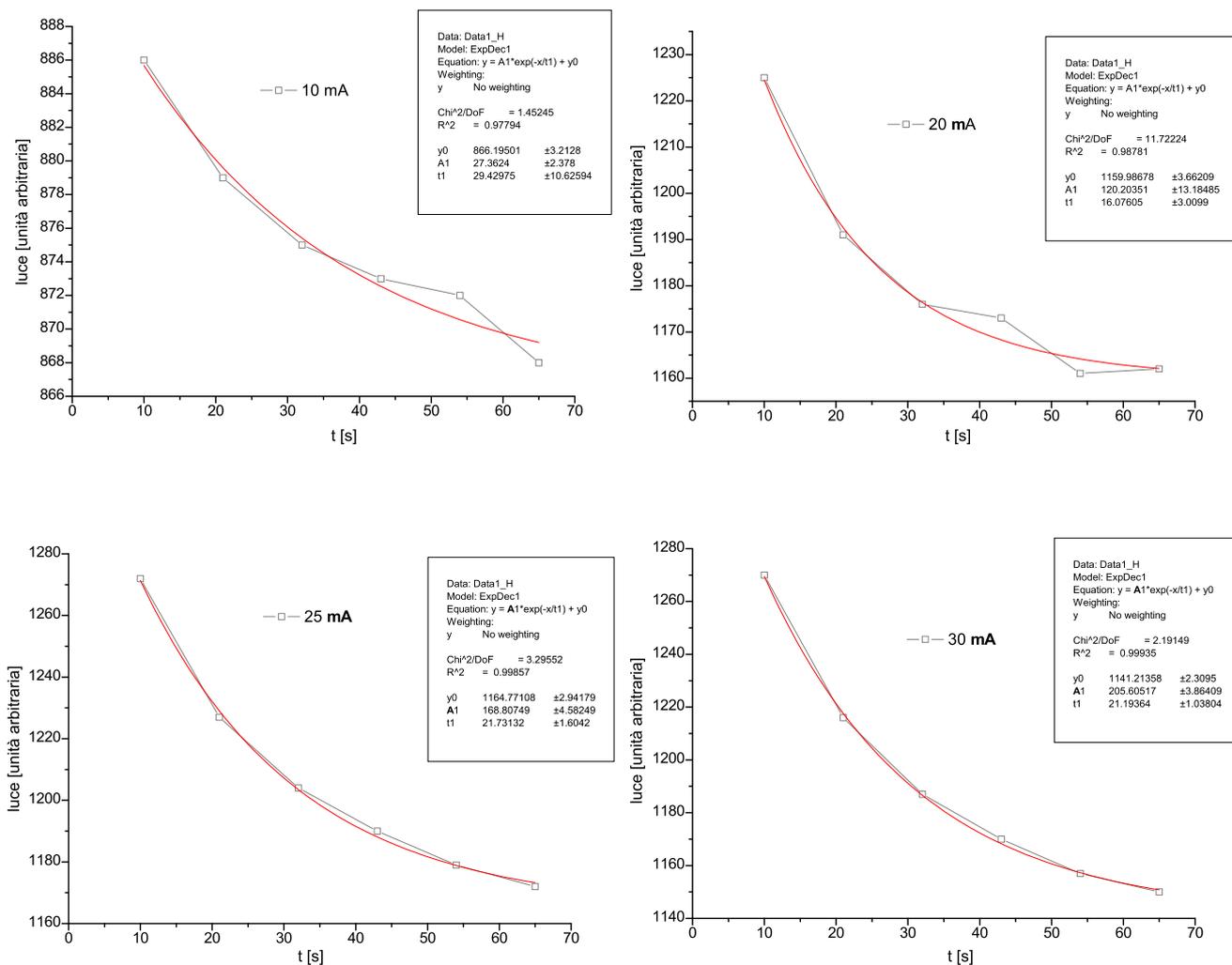


Figura 4.6: Confronto tra la curva di luce misurata sperimentalmente (quadrati uniti da linee) e quella parametrizzata per il PHD di riferimento.

$I_{LED} = 10mA$			$I_{LED} = 15mA$		
	τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]		τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]
<i>PHDrif1</i>	29±10	0,031±0,003	<i>PHDrif1</i>	32±10	0,058±0,004
<i>PHD1</i>	-	-	<i>PHD1</i>	-	-
<i>PHD2</i>	14±11	0,032±0,019	<i>PHD2</i>	28±9	0,058±0,004
<i>PHD3</i>	16±5	0,032±0,005	<i>PHD3</i>	25±3	0,061±0,002
<i>PHD4</i>	30±21	0,034±0,005	<i>PHD4</i>	17±2	0,057±0,003
<i>PHD5</i>	76±124	0,038±0,035	<i>PHD5</i>	32±13	0,058±0,005
<i>PHD6</i>	19±6	0,035±0,006	<i>PHD6</i>	23±6	0,065±0,005
<i>PHD7</i>	32±90	0,035±0,023	<i>PHD7</i>	18±23	0,044±0,027
valor medio	30,9±8,0	0,0341±0,0008	valor medio	25,1±2,2	0,057±0,002

$I_{LED} = 20mA$			$I_{LED} = 25mA$		
	τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]		τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]
<i>PHDrif1</i>	16±3	0,10±0,01	<i>PHDrif1</i>	22±2	0,145±0,004
<i>PHD1</i>	43±87	0,11±0,07	<i>PHD1</i>	37±50	0,15±0,06
<i>PHD2</i>	23±3	0,088±0,003	<i>PHD2</i>	23±3	0,131±0,005
<i>PHD3</i>	20±3	0,090±0,007	<i>PHD3</i>	24±2	0,122±0,004
<i>PHD4</i>	21±1	0,083±0,002	<i>PHD4</i>	23,5±0,8	0,130±0,001
<i>PHD5</i>	23±3	0,087±0,003	<i>PHD5</i>	25±4	0,127±0,007
<i>PHD6</i>	15±3	0,10±0,01	<i>PHD6</i>	22±2	0,137±0,005
<i>PHD7</i>	45±78	0,043±0,026	<i>PHD7</i>	22±11	0,10±0,02
valor medio	26,0±4,2	0,089±0,007	valor medio	24,9±1,9	0,131±0,005

 $I_{LED} = 30mA$

	τ [s]	$\frac{A}{V_0^{PHD}}$ [num.puro]
<i>PHDrif1</i>	21±1	0,180±0,003
<i>PHD1</i>	77±170	0,25±0,33
<i>PHD2</i>	26±2	0,167±0,005
<i>PHD3</i>	19±1	0,174±0,006
<i>PHD4</i>	20±2	0,168±0,006
<i>PHD5</i>	24±3	0,161±0,006
<i>PHD6</i>	21±0,7	0,175±0,002
<i>PHD7</i>	14±6	0,18±0,05
valor medio	27,8±7,2	0,18±0,01

Tabella 4.1: Parametri τ e $\frac{A}{V_0^{PHD}}$ ricavati dall'andamento nel tempo del segnale misurato sui PHD, alle diverse correnti.

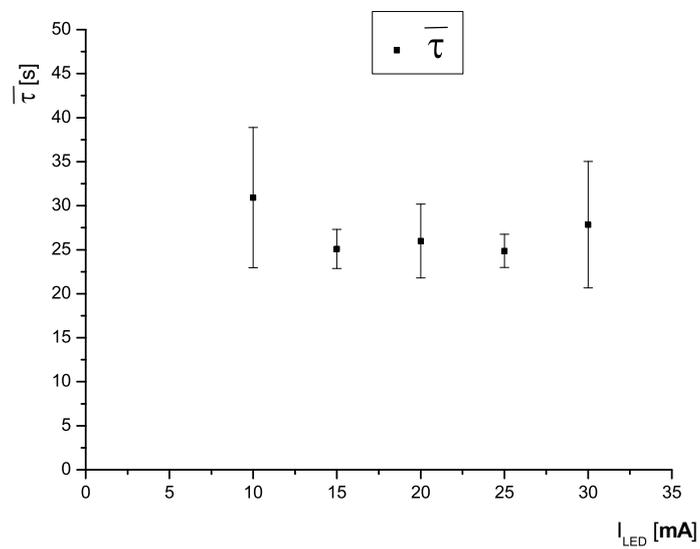


Figura 4.7: Costante di tempo caratteristica del segnale registrato dai PHD, in funzione della corrente che attraversa il LED.

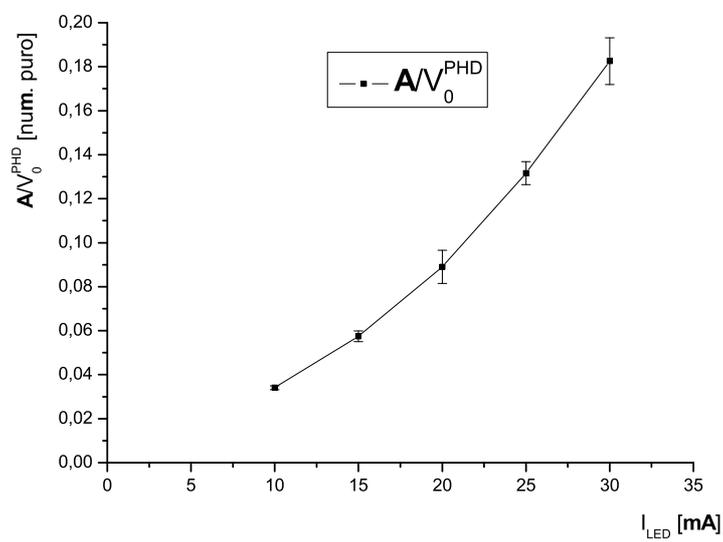


Figura 4.8: Rapporto $\frac{A}{V_0^{PHD}}$ del segnale rivelato dai PHD, in funzione della corrente.

porterebbero i LED al di fuori della linearità rendendo poco efficiente la misura.

Poiché l'emissione di luce è lentamente variabile nel tempo con una legge esponenziale descritta da un $\bar{\tau} \cong 20s$, conviene eseguire l'acquisizione dei segnali dei PHD dopo ~ 30 secondi dall'accensione dei LED. In tal modo, il contributo "residuo" al tempo $t \cong 30s$ del termine esponenziale alla luce emessa dal LED ammonta, per $I_{LED} = 20mA$, a circa il 2%: per $t = 30s$ e $\bar{\tau} = 20s$ si ha $\frac{A}{V_0^{PHD}} e^{-t/\bar{\tau}} \simeq 0.02$. Per $I_{LED} = 10mA$, tale contributo è inferiore all'1%. Dunque è ragionevole far iniziare le acquisizioni delle tensioni ai capi dei PHD 30 secondi dopo l'accensione dei LED, per avere un'intensità luminosa sufficientemente stabile, senza un eccessivo dispendio energetico.²

Misure dell'effetto del *biofouling* in ambiente marino hanno mostrato che l'effetto di oscuramento è maggiore sulle superfici rivolte verso l'alto (cfr. figura 2.2). Sull'orizzontale, $\theta = 90^\circ$ in figura 2.2 per la convenzione scelta dagli autori³, ci si aspetta un effetto dell'ordine dell'1% annuo [AMR03]. Vogliamo dimensionare il nostro apparato in modo tale da renderlo sensibile a variazioni di trasparenza dell'ordine del ‰, per osservare le variazioni aspettate.

Diminuire l'errore statistico di una misura equivale ad aumentare il numero di acquisizioni. Con le impostazioni per il ciclo di misura del *biofouling*, appena discusse, sono state eseguite alcune acquisizioni di test, variando il numero di acquisizioni per ogni canale di ingresso dell'ADC. Effettuando una presa dati con N acquisizioni per canale, si calcolano i valori medi \bar{x}_i e le deviazioni standard σ_i per l' i -esimo PHD, e si associa un errore statistico

²La funzione utilizzata per lo studio del *biofouling* è la Trasparenza, definita nell'equazione 3.4. Tale funzione eliminerebbe la dipendenza da eventuali fluttuazioni nella luminosità emessa dalle sorgenti se tutte le misure di $V^{PHD_i}(t)$ fossero contemporanee. Poiché l'acquisizione digitale sui 16 canali dell'ADC non può essere contemporanea (il nostro ADC funziona in "multiplexing" acquisendo di volta in volta la tensione di un PHD differente), è necessario ridurre tali fluttuazioni inserendo dei tempi di attesa.

³Si tiene a precisare che la convenzione scelta dagli autori di [AMR03] per l'angolo θ è diversa dalla nostra.

sulla misura pari a $\frac{\sigma_i}{\sqrt{N}}$. L'errore relativo è sicuramente maggiore sui PHD meno illuminati dai LED. Prendendo in considerazione i fotorivelatori 1, 7, 8 e 14 (quelli meno illuminati, cfr. figura 3.8), con $N = 100$ acquisizioni si ottengono i seguenti valori per il ciclo completo di misura:

	$\overline{x_1}$	σ_1	$\overline{x_7}$	σ_7	$\overline{x_8}$	σ_8	$\overline{x_{14}}$	σ_{14}
<i>pedistallo 1</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED alto @ 10 mA</i>	385.70	17.66	416.95	17.76	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED alto @ 20 mA</i>	556.76	16.86	585.68	17.59	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>pedistallo 2</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED basso @ 10 mA</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	252.47	18.41	559.81	17.69
<i>LED basso @ 20 mA</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	388.59	17.03	821.63	16.92
<i>pedistallo 3</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tenendo conto che sono state effettuate $N = 100$ misure, gli errori relativi, calcolabili con $\frac{\sigma_i/\sqrt{N}}{\overline{x_i}}$, risultano essere dell'ordine del 3‰; per gli altri fotorivelatori, l'errore relativo è ancora minore (sui PHD di riferimento, l'errore relativo vale $\simeq 5 \cdot 10^{-4}$). È ragionevole effettuare, quindi, per ogni PHD 100 acquisizioni per avere un errore accettabile col compromesso del risparmio energetico.

Il ciclo di misura sarà eseguito due volte al giorno, ad intervalli di 12 ore, in quanto il processo di oscuramento è molto lento nel tempo e acquisizioni più frequenti comporterebbero un elevato dispendio energetico. È importante, però, acquisire dati due volte al giorno per avere misure indipendenti dall'alternanza del giorno e della notte.

Impostazioni degli strumenti per la misura degli altri parametri ambientali

Le correnti sottomarine aspettate, nel sito abissale di Capo Passero, hanno un valore medio di ~ 3 cm/s. Vogliamo associare alle misure di corrente un errore statistico che sia inferiore a ~ 0.1 cm/s, per poter apprezzare variazioni significative delle correnti sottomarine.

Come accennato nel capitolo 3, il correntometro viene utilizzato in modalità *Polled*, cioè esegue misure di corrente solo se viene richiesto, con opportuni comandi, tramite porta seriale. Il ciclo per acquisire dati di corrente, gestito con un opportuno programma dal *Single Board Computer*, può essere schematizzato nel modo seguente:

	comandi inviati dal SBC	risposta del correntometro al SBC
1	<i>Attivazione loop seriale</i>	<i>Carattere di controllo</i>
2	<i>Esecuzione N misure</i>	<i>Carattere di controllo</i>
3	<i>Richiesta dati</i>	<i>Dati mediati su N misure</i>
4	<i>Disattivazione loop seriale</i>	<i>Carattere di controllo</i>

Lo strumento, in modalità di basso consumo, viene “risvegliato” e posto in attesa di ricevere comandi su porta seriale. Successivamente, si comanda allo strumento di eseguire un numero preciso di misure e, quindi, vengono richiesti i dati mediati. Viene, infine, disattivato il *loop* di attesa sulla porta seriale e il correntometro, dopo 30 secondi, si pone in modalità di *stand-by*.

La risoluzione dichiarata nelle specifiche del correntometro è pari a $\sigma = 0.5$ cm/s. Per ogni ciclo d’acquisizione, vengono eseguite 50 misure di corrente marina (il correntometro emette cioè 50 serie di impulsi acustici); l’errore statistico da associare al valor medio diviene compatibile con la nostra richiesta espressa sopra. Numericamente si trova che l’errore statistico vale $\frac{\sigma}{\sqrt{50}} = 0.07$ cm/s, dove si è assunto $\sigma = 0.5$ cm/s.

Il CTD viene interrogato con una serie di comandi, inviati su porta seriale, molto simile a quella utilizzata per il correntometro; differisce la sintassi delle istruzioni (specifica di ogni strumento), le impostazioni di porta e la gestione dei dati. La comunicazione fra il *Single Board Computer* e il CTD può essere così schematizzata:

	comandi inviati dal SBC	risposta del CTD al SBC
1	<i>Accensione strumento</i>	<i>Menù di avvio</i>
2	<i>Esecuzione N misure</i>	<i>Dati acquisiti</i>
3	<i>Spegnimento strumento</i>	<i>Stringa di controllo</i>

Il CTD viene acceso, il *Single Board Computer* attende l’esecuzione di tutti i processi di avvio e di test dello strumento, vengono eseguite 10 misure

di temperatura, conducibilità e pressione per avere una statistica accettabile, e il CTD restituisce i valori dei parametri ambientali. Al termine del ciclo, il CTD viene riportato in modalità di *stand-by*.

Il ciclo di presa dati del correntometro e del CTD sarà eseguito ogni ora, perché è importante monitorare con continuità i parametri ambientali. Durante il ciclo di misura del *biofouling* (ogni 12 ore), saranno eseguite anche le misure di corrente, temperatura e salinità; inoltre, durante tale ciclo, saranno aggiunti al file di dati (cfr. tabella 3.3) le misure acquisite dal ciclo di *biofouling* precedente. Ogni salvataggio su disco, dunque, comprenderà i dati di acquisizione di un ciclo di *biofouling* e degli ultimi 12 cicli di misure eseguiti dal correntometro e dal CTD.

4.2 Connessioni dell'apparato

La strumentazione utilizzata per il nostro apparato autonomo è stata fissata sulla struttura meccanica mostrata in figura 4.1. Al centro della struttura è visibile l'alloggiamento circolare della sfera utilizzata per le misure dell'andamento della *Trasparenza*. All'interno di tale sfera di vetro, oltre ai PHD applicati sulla superficie interna, è stata alloggiata anche l'elettronica di gestione dell'apparato, composta dal *Single Board Computer*, dalla scheda di conversione analogico-digitale e dal circuito generatore di corrente per i LED. Sulle staffe radiali della struttura meccanica sono alloggiati il tubo contenente i due LED e i due PHD di riferimento, il correntometro, il CTD, il modem acustico e un pacco batterie che fornisce tre distinte alimentazioni (+14 V, +21 V, -14 V). I blocchi costituenti la stazione devono essere connessi in modo tale da garantire la corretta alimentazione per ogni strumento e la gestione delle periferiche da parte del SBC, alloggiato all'interno della sfera. Tutti i blocchi costituenti l'apparato devono ricevere l'alimentazione dal pacco batterie; opportune linee di porta seriale devono connettere i tre strumenti (correntometro, CTD e modem acustico) con il SBC; i LED e i PHD di riferimento, posti all'esterno della sfera, devono essere connessi con l'elettronica di gestione posta all'interno della sfera.

Per semplificare il numero delle connessioni necessarie, si è deciso di ri-

correre ad un nodo intermedio di distribuzione di tutte le linee elettriche necessarie alle connessioni dell'apparato. Tale "scatola di distribuzione" (o *Junction Box*) riceve tutte le linee elettriche di ingresso e di uscita degli strumenti. Tutti i blocchi costituenti l'apparato sono connessi fisicamente con la *Junction Box*; all'interno della *Junction Box* sono definite le opportune connessioni. La figura 4.9 mostra, utilizzando colori diversi, le connessioni realizzate all'interno della *Junction Box*.

La sfera di vetro riceve due distinte tensioni (+14 V e -14 V), necessarie all'alimentazione del *Single Board Computer*, dell'ADC, del generatore e dei 14 PHD; il SBC deve poter comunicare con gli strumenti esterni alla sfera attraverso le linee di porta seriale (ogni porta seriale è dedicata alla comunicazione bidirezionale con un singolo strumento); l'ADC deve ricevere i segnali di tensione dei due PHD di riferimento posti all'esterno della sfera; il generatore di corrente deve poter pilotare i due LED alloggiati all'esterno del modulo ottico; inoltre una porta seriale (COM1) e una linea di RESET del SBC sono necessarie all'esterno durante le operazioni di accensione dell'intero sistema (utilizzando un PC come terminale). Il CTD ed il modem acustico ricevono, attraverso due distinti connettori, le alimentazioni necessarie e le linee di porta seriale (porta seriale COM4 per il CTD, COM2 per il modem acustico). Il correntometro è dotato di un unico connettore "ibrido", attraverso il quale riceve le linee di alimentazione e di porta seriale (COM3). I LED alloggiati nel tubo esterno alla sfera sono connessi alle uscite del generatore di corrente; i PHD di riferimento ricevono le opportune alimentazioni e devono rendere disponibili le loro tensioni d'uscita. Il pacco batterie fornisce le tre alimentazioni di cui è dotato.

Dalla *Junction Box* partono cavi, di lunghezza opportuna, che terminano con uno specifico connettore, in funzione del blocco a cui questo deve essere connesso. Poiché all'interno della modulo ottico di vetro sono contenuti strumenti che necessitano di essere connessi con tutti i blocchi esterni, l'uso della *Junction Box* diviene indispensabile per evitare di utilizzare cavi che connettano la sfera a tutte le periferiche. Per connettere la sfera con l'esterno, si utilizzano degli opportuni connettori di profondità, fissati in fori, creati nella sfera stessa, di 1.75 cm di diametro. Utilizzare molti connettori per il

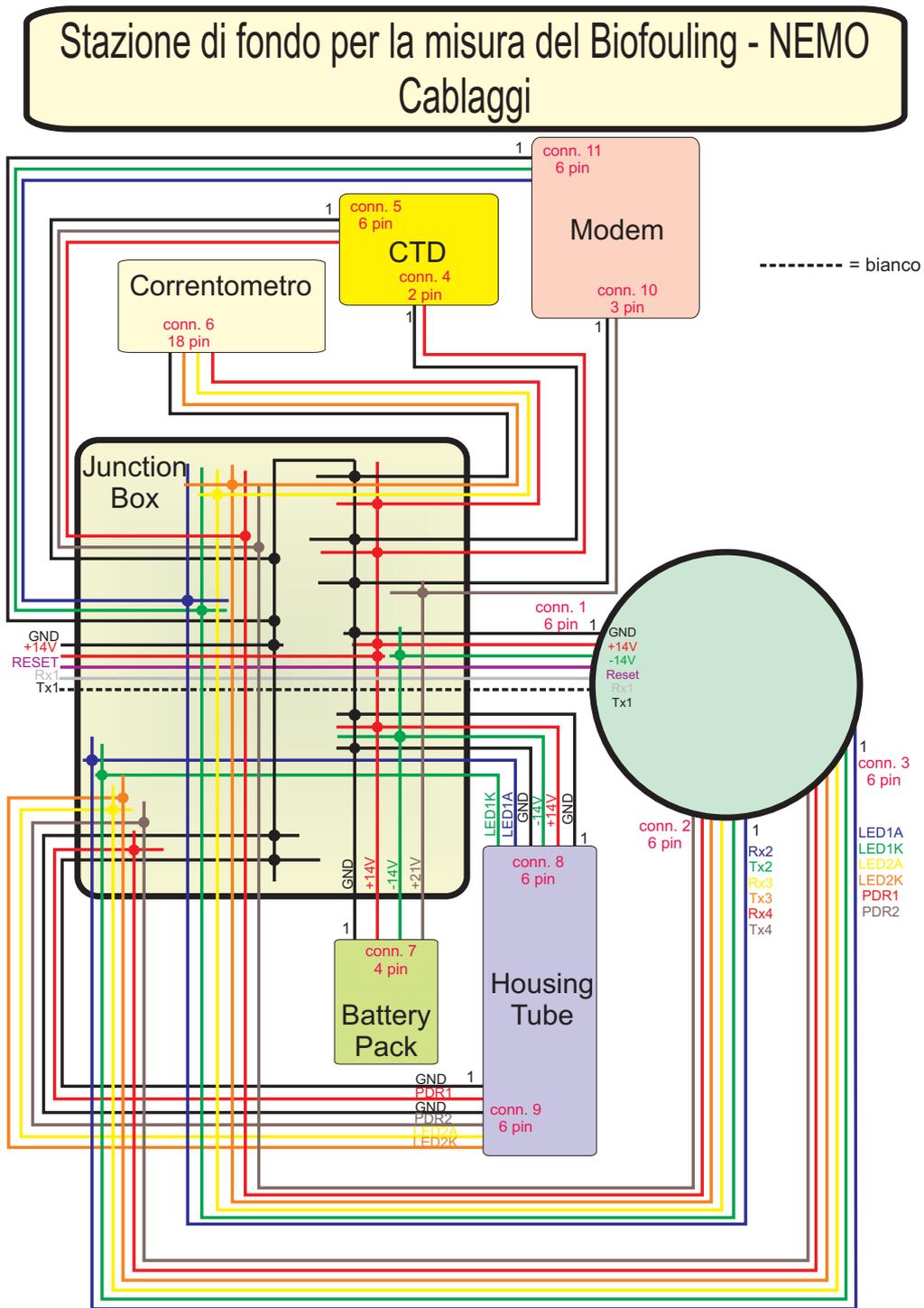


Figura 4.9: Schema elettrico dei cablaggi della stazione autonoma per misure sottomarine. I connettori dei diversi blocchi sono numerati in maniera univoca e per ognuno di essi è riportato il numero di linee elettriche di cui sono dotati.

modulo ottico (ad esempio volendo connettere direttamente le periferiche con la sfera di vetro) significa dover creare più fori sulla superficie del modulo ottico, rendendo fragile la struttura. La soluzione proposta evita l'insorgere di tali problemi.

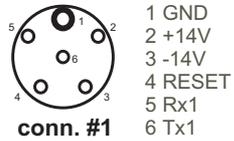
Per comprendere meglio il cablaggio dell'apparato autonomo sottomarino, vengono mostrati in figura 4.10 tutti i connettori dei cavi che escono dalla *Junction Box*, con vista dal lato dei blocchi a cui sono connessi. La numerazione è coerente con quella definita in figura 4.9. Per ogni linea elettrica presente sui connettori viene mostrata la funzione svolta.

4.3 Caratterizzazione dei consumi dell'apparato e stima della durata della presa dati

L'apparato autonomo sottomarino per la misura di parametri ottici e ambientali è stato realizzato e dimensionato come descritto nel capitolo 3 e nei precedenti paragrafi. Sono state organizzate le operazioni di gestione dei blocchi funzionali che compongono l'apparato, gestite dal *Single Board Computer*, la periodicità con la quale devono essere eseguite ed è stato deciso uno standard per la memorizzazione dei dati raccolti. È necessario, a questo punto, stimare il consumo energetico degli strumenti connessi, per valutare il tempo massimo di operatività in funzione della potenza richiesta dall'apparato. Si ricorda che l'apparato opera in maniera autonoma e che l'alimentazione è fornita da un pacco batterie connesso alla strumentazione stessa.

Il "pacco batterie" (figura 4.11) è composto da batterie al litio *Thionyl Chloride* (size D), che forniscono ognuna 3.5 V ed una capacità pari a 16.5 Ah. La massima corrente erogabile da ogni batteria è pari a 300 mA. La figura 4.11 mostra in che modo sono state connesse le varie batterie per ottenere +14 V, -14 V e +21 V. Ad esempio, per ottenere +14 V sono stati messi in parallelo otto gruppi di 4 batterie connesse in serie (ogni gruppo capace di fornire 14 V e 300 mA di corrente massima): in tal modo si è ottenuto un generatore con 14 V, $16.5Ah \cdot 8 = 132Ah$ di capacità e 2.4 A

Biofouling Sphere



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 -14V
- 4 RESET
- 5 Rx1
- 6 Tx1

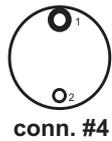


- 1 Rx2
- 2 Tx2
- 3 Rx3
- 4 Tx3
- 5 Rx4
- 6 Tx4



- 1 LED1a
- 2 LED1k
- 3 LED2a
- 4 LED2k
- 5 PDR1
- 6 PDR2

CTD

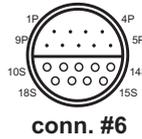


- 1 GND
- 2 +14V



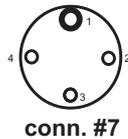
- 1 GND
- 2 Rx4
- 3 Tx4
- 4 n.c.
- 5 n.c.
- 6 n.c.

Current-metre



- 10S Rx3
- 11S Tx3
- 17S +14V
- 18S GND

Battery Pack



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 -14V
- 4 +21V

LED Housing



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 -14V
- 4 GND
- 5 LED1a
- 6 LED1k



- 1 GND
- 2 PDR1
- 3 GND
- 4 PDR2
- 5 LED2a
- 6 LED2k

Modem



- 1 GND
- 2 +21V
- 3 n.c.



- 1 GND
- 2 Rx2
- 3 n.c.
- 4 Tx2
- 5 n.c.
- 6 n.c.

Pig-tail



- 1 GND
- 2 +14V
- 3 RESET
- 4 Rx1
- 5 Tx1
- 6 GND

Figura 4.10: Descrizione delle linee elettriche disponibili su ogni connettore. La numerazione segue la vista dal lato femmina.

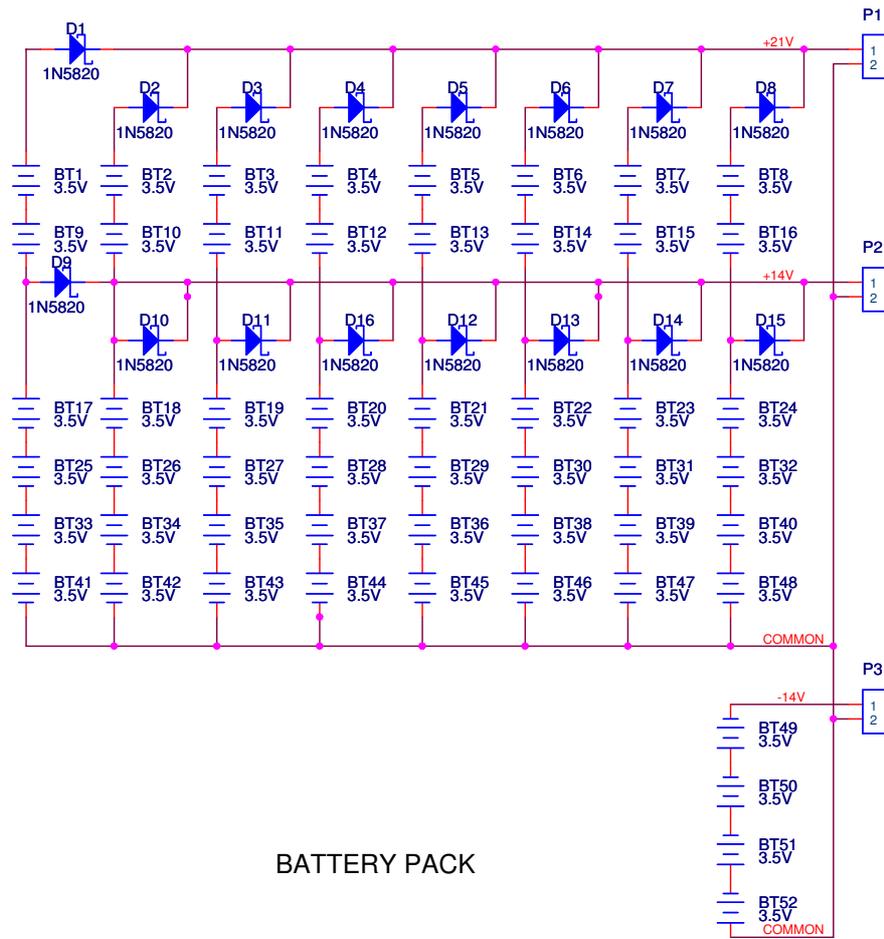


Figura 4.11: Schema elettrico del “pacco batterie”. Fornisce tensioni a +14 V, -14 V e +21V.

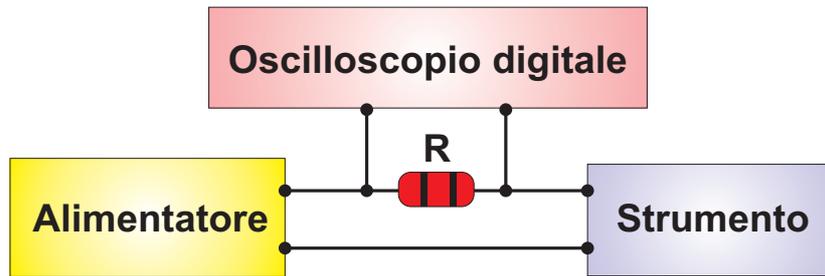


Figura 4.12: Metodo di misura dei consumi degli strumenti che compongono la stazione autonoma.

di corrente massima. Egualmente si è operato per ottenere i -14 V ed i $+21\text{ V}$. Ogni elemento di 4 batterie in serie è protetto da un diodo che impedisce l'eventuale scarica di tutte le batterie in un "ramo" che presenti una batteria in corto circuito. Tutte le batterie sono organizzate meccanicamente in un cilindro di titanio le cui misure interne sono: diametro 99 mm, altezza 1100 mm.

Si mostreranno ora i risultati delle misure dei consumi degli strumenti che compongono l'apparato autonomo.

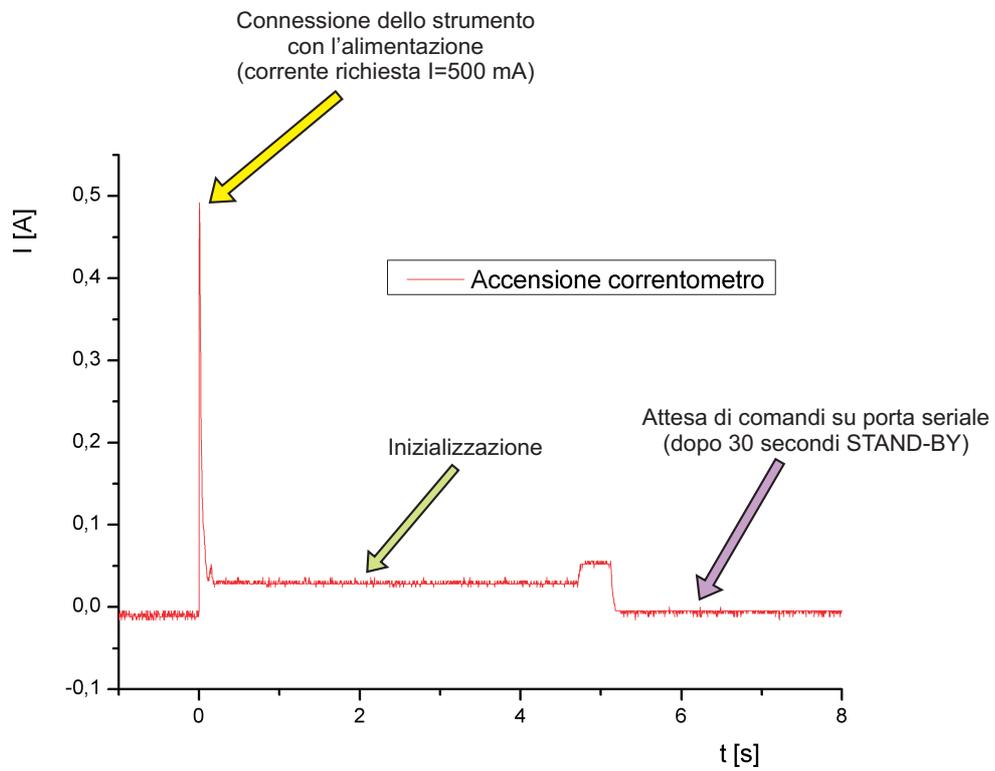
Le misure dei consumi dei vari strumenti sono state eseguite con una modalità tale da evidenziare i consumi in tutte le diverse fasi di accensione, misura e quiescenza dei vari strumenti. In particolare si è utilizzato un oscilloscopio digitale, registrando le tensioni ai capi di una resistenza, di valore $\sim 1\Omega$, posta in serie al circuito di alimentazione dello strumento in esame (figura 4.12).

Gli strumenti sono stati attivati singolarmente, con le istruzioni stabilite in precedenza per l'acquisizione di dati come in configurazione finale di misura. In tal modo, possiamo stimare il consumo e la durata dei cicli di attività di ogni singolo componente dell'apparato. Misurando la corrente richiesta dai singoli blocchi durante la fase di *stand-by*, si può stimare il consumo totale giornaliero dell'apparato autonomo (fissata la frequenza di presa dati e di operatività dei diversi blocchi funzionali). Nota la capacità totale del pacco

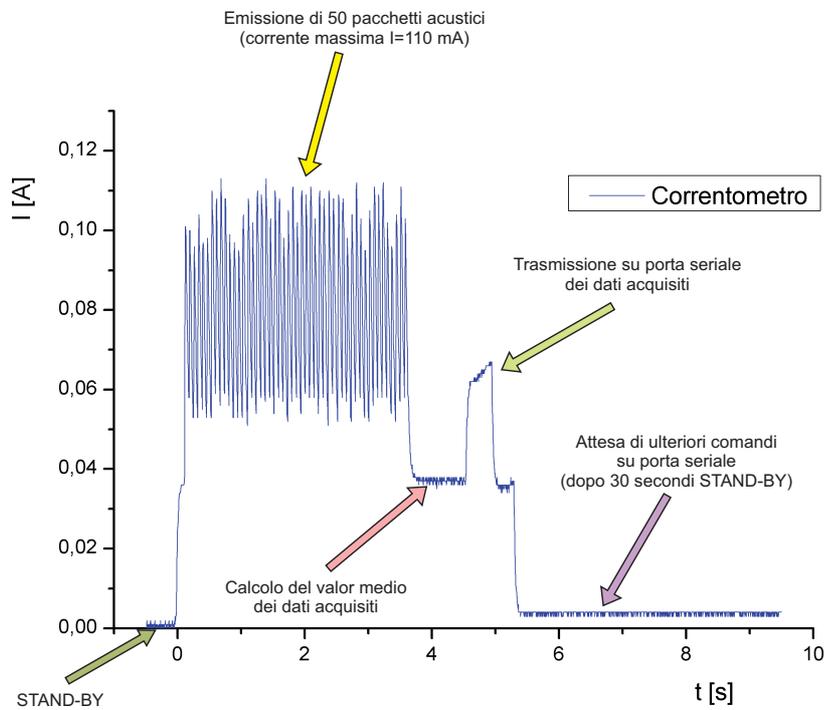
batterie che alimenta il nostro apparato, siamo in grado di ricavare il tempo aspettato di operazione.

Si mostrano nelle figure seguenti gli andamenti nel tempo della corrente richiesta dal correntometro, dal CTD, dal modem acustico e dal blocco composto dai LED più i PHD, necessaria ad eseguire un ciclo completo di presa dati. Integrando le curve di corrente nel tempo per la durata di un ciclo di acquisizione e moltiplicando per la tensione di alimentazione dello strumento otteniamo l'energia richiesta dallo strumento (in $W \cdot h$). È altresì importante stimare l'energia massima richiesta dagli strumenti per confrontarla con la corrente erogabile dal pacco batterie.

La figura 4.13(a) mostra l'andamento della corrente richiesta dal correntometro nella fase di accensione, che avviene nel momento in cui lo strumento viene connesso con l'alimentazione. In tale istante si osserva un picco di corrente ($I \simeq 500mA$), seguito da una fase di inizializzazione della durata di $\sim 5s$, trascorsa la quale lo strumento è in grado di ricevere comandi su porta seriale. Dopo 30 s di attesa, lo strumento si pone automaticamente in modalità di basso consumo. Questo andamento di corrente non si ripeterà mai durante tutto il periodo di presa dati dell'apparato, in quanto gli strumenti non vengono mai disconnessi dall'alimentazione. Questa figura viene mostrata per verificare se il pacco batterie, definito in precedenza, possa fornire la corrente massima richiesta dall'apparato nel suo insieme. La figura 4.13(b) mostra la corrente richiesta dal correntometro, con una tensione di alimentazione di 14 V, per l'esecuzione di un ciclo completo di misura. Si distinguono le diverse fasi durante le quali lo strumento esegue le differenti operazioni. Dopo aver ricevuto, tramite porta seriale, il comando opportuno, il correntometro si risveglia ed inizia l'acquisizione delle misure di corrente sottomarina attraverso l'emissione di una serie di 50 impulsi acustici, richiedendo, per ogni impulso, una corrente istantanea di $\sim 110mA$. Successivamente, si osserva una fase di consumo costante in cui il correntometro calcola il valor medio dei parametri misurati, seguita dalla trasmissione su porta seriale dei dati raccolti. Il correntometro rimane in attesa di ricevere ulteriori comandi per 30



(a)



(b)

Figura 4.13: Corrente espressa in Ampère richiesta dal correntometro durante la fase di accensione (a) e durante l'esecuzione di un ciclo completo di misura (b). L'accensione viene eseguita solo una volta in tutto il periodo di operatività; si ricava la corrente massima richiesta dallo strumento per confrontarla con la corrente massima erogabile dal pacco batterie.

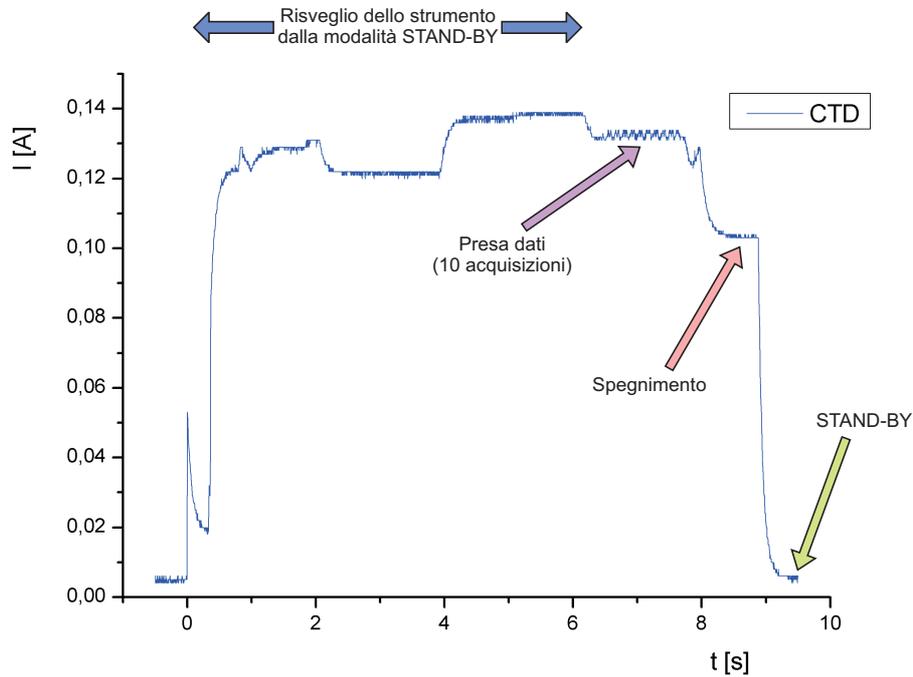


Figura 4.14: Corrente in Ampère richiesta dal CTD durante l'esecuzione di un ciclo completo di misura. Il livello di *stand-by* è visibile sia prima che dopo l'esecuzione del ciclo.

secondi; trascorso tale tempo, lo strumento si pone in modalità di *stand-by*. La durata totale di un ciclo di misure del correntometro è di $\simeq 36\text{s}$; il correntometro viene attivato dal SBC ad intervalli regolari di sessanta minuti: il tempo di attività giornaliero è di 864 s.

Il CTD è alimentato, come il correntometro, a 14 V. In figura 4.14 è mostrato l'andamento della corrente durante il ciclo di acquisizione del CTD; sono evidenziate le varie fasi del ciclo. A differenza di quanto accade con il correntometro, non si osserva un andamento diverso per l'istante in cui lo strumento è connesso con l'alimentazione. Inviando un comando tramite porta seriale, lo strumento esce dalla modalità di *stand-by* ed inizia la fase di "accensione", durante la quale avvia un'applicazione per la gestione delle

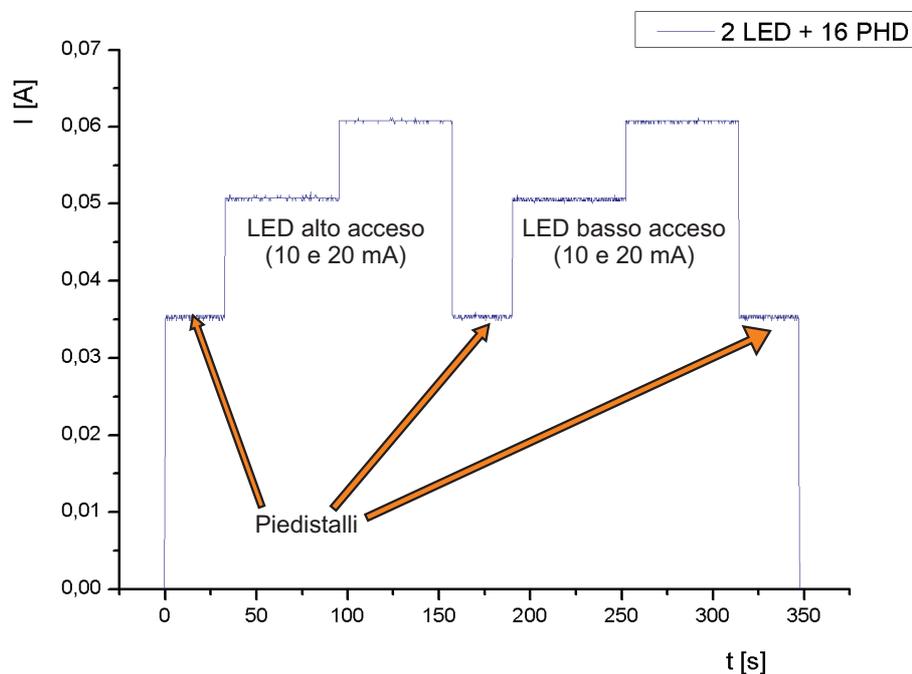


Figura 4.15: Corrente richiesta dal blocco 2 LED più 16 PHD, sull'alimentazione a +14 V, per l'esecuzione di un ciclo completo per la stima della trasparenza del modulo ottico.

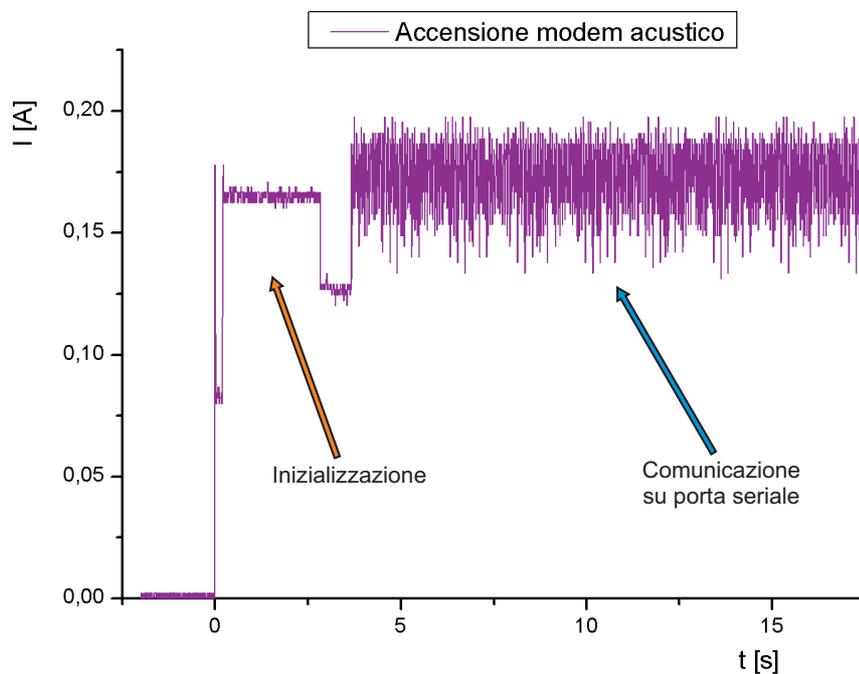
acquisizioni ed esegue alcuni processi di auto-test. Il SBC interroga allora lo strumento richiedendo l'esecuzione di dieci misure, ricevendo immediatamente i valori di temperatura, conducibilità e salinità. Al termine delle acquisizioni, il SBC ordina l'arresto di tutti i processi ed il CTD si riporta in modalità di basso consumo. Il ciclo di misura del CTD ha una durata di ~ 10 secondi.

La misura dei consumi della strumentazione per la stima del *biofouling* è stata eseguita considerando complessivamente la corrente richiesta dai 16 PHD più i due LED. I due LED sono alimentati dal generatore di corrente, pilotato attraverso linee digitali di output del SBC ed alimentato a +14

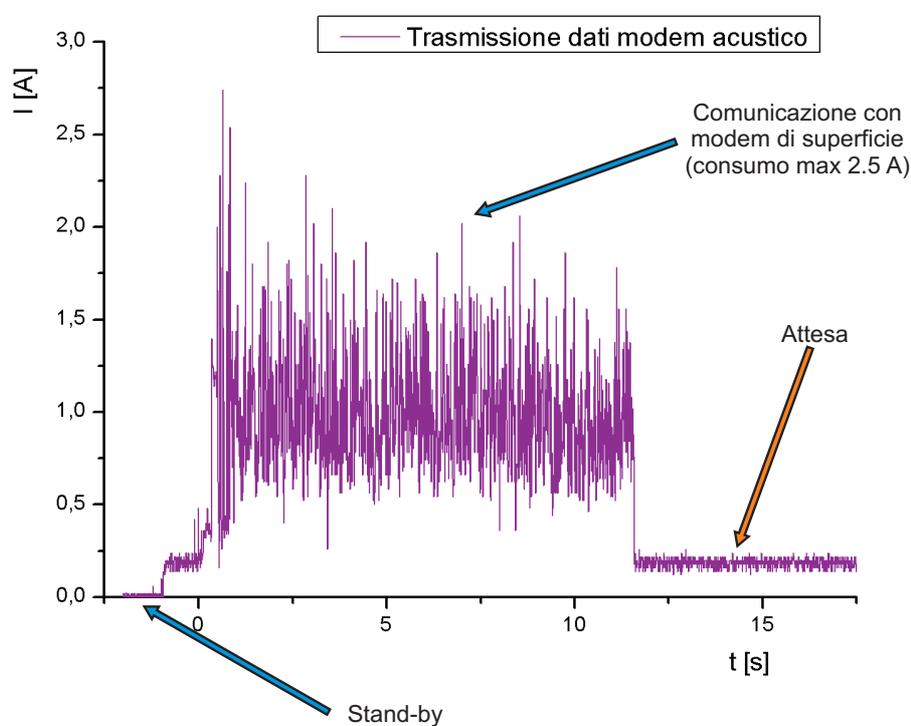
V. I 16 PHD sono alimentati solo durante l'esecuzione dei cicli di misura con due distinte tensioni, a +14 V e a -14 V; un opportuno interruttore, pilotato con le linee digitali di output del SBC, esclude le tensioni ai capi dei PHD durante i periodi di attesa tra un ciclo e il successivo. La figura 4.15 mostra l'andamento della corrente richiesta dai PHD e dai LED, misurata sull'alimentazione a 14 V. Sono visibili le tre fasi di "piedistallo", prima e dopo l'accensione di ciascun LED, e i due livelli di corrente a cui vengono accesi i LED. Il tempo necessario alla conversione del segnale analogico di tensione ai capi dei 16 PHD da parte dell'ADC è di $\sim 32s$ (100 conversioni per i 16 canali d'ingresso della scheda). L'inizio della conversione del segnale di tensione avviene 30 secondi dopo l'accensione dei LED; l'acquisizione del segnale di buio (i "piedistalli") viene eseguita, invece, inserendo un'attesa molto minore (1 s) dallo spegnimento dei LED. Complessivamente, il ciclo di acquisizione delle tensioni ai capi dei PHD per varie illuminazioni del modulo ottico ha una durata di $\sim 345s$. La corrente richiesta dai PHD sull'alimentazione a -14 V è costante per tutto il ciclo di misura e vale 35 mA.

Il modem acustico viene alimentato con una tensione pari a +21 V. In figura 4.16 sono mostrati gli andamenti del consumo di corrente da parte del modem. In 4.16(a) è riportato l'andamento del consumo del modem quando viene risvegliato dal SBC con un opportuno comando su porta seriale, con un successivo trasferimento di dati dal SBC al modem acustico. In 4.16(b) è mostrata la fase di comunicazione del modem con un operatore di superficie: i picchi di corrente corrispondono alla trasmissione di pacchetti acustici in acqua. In questa fase, la corrente istantanea richiesta raggiunge dei valori vicini a 2.5 A. Tale fase di trasmissione dati avviene solo nel momento in cui il modem acustico viene interrogato da superficie tramite un altro modem: per la stima dei consumi si assumerà che tale trasmissione avviene una volta al mese, con una durata media di 15 minuti.

Il *Single Board Computer* e l'ADC sono alimentati a +5 V. Tale tensione viene generata all'interno della sfera Benthos con l'ausilio di un convertito-



(a)



(b)

Figura 4.16: (a) Accensione del modem acustico e trasmissione su porta seriale di un pacchetto di dati. (b) Trasmissione di dati per via acustica ad un modem di superficie. In questa fase di trasmissione si osservano dei picchi di corrente istantanea pari a 2.5 A.

		alim. [V]	corr. [mA]	tempo [h]	energia [W·h]
Correntometro	ON	+14	12.8	7.2	1.3
	ST.BY	+14	0.195	712.8	1.9
CTD	ON	+14	110	2	3.1
	ST.BY	+14	5	718	50.2
2LED + 16PHD	ON	+14	55	5.75	4.4
	ST.BY	+14	10^{-3}	714.25	0.01
	ON	-14	35	5.75	2.8
	ST.BY	-14	10^{-3}	714.25	0.01
SBC + ADC	ON	+14	250	16.7	58.4
	ST.BY	+14	14.3	703.3	140.6
Modem acustico	ON	+21	1000	0.25	5.2
	ST.BY	+21	11	719.75	160

Tabella 4.2: Stima dei consumi dell'apparato sottomarino. Il tempo di attività, espresso in ore, è stato calcolato considerando il numero di cicli di misura previsti in un mese di 30 giorni. L'energia richiesta è calcolata su base mensile.

re di tensione, a partire dai +14 V. Il consumo misurato tiene conto della potenza dissipata dal regolatore.

La tabella 4.2 mostra schematicamente i risultati delle misure effettuate. Il tempo riportato in ore è stimato su un periodo di trenta giorni; la corrente di attività delle periferiche è il valor medio sull'intervallo considerato; l'energia in W·h è stimata su base mensile.

La corrente massima e l'energia che può fornire il pacco batterie sono le seguenti:

alimentazione [V]	corrente massima [mA]	energia [W·h]
+14 V e +21 V	2400	2772
-14 V	300	231

L'energia richiesta in un mese per le tensioni a +14 ed a +21 V risulta essere complessivamente 425 W·h, mentre per la tensione a -14 V ammonta a 2.8 W·h. Il tempo massimo di attività del nostro apparato autonomo

può essere facilmente stimato in ~ 6 mesi e mezzo, durante il quale saranno eseguite circa 400 acquisizioni per la stima della variazione della *Trasparenza* ed oltre 4500 acquisizioni di correnti, temperatura e salinità.

Capitolo 5

Test in laboratorio dell'apparato

Dopo aver discusso circa le scelte fatte e il funzionamento dell'apparato autonomo per misure abissali, si mostrano in questo capitolo i risultati di alcuni test compiuti in laboratorio.

5.1 Prove effettuate sui singoli strumenti

L'apparato di misura del biofouling è stato testato in laboratorio, simulando una variazione progressiva della trasparenza della sfera di vetro, contenente i fotorivelatori. L'analisi dei dati raccolti è finalizzata alla stima della funzione *Trasparenza*, così come definita nell'equazione 3.4.

Nella foto di figura 5.1 sono mostrati alcuni degli strumenti che compongono l'apparato, nella configurazione finale di misura. Sono visibili il tubo di alloggiamento dei due LED e parte della sfera di vetro contenente i fotorivelatori. L'elettronica di gestione dell'apparato, durante questa fase di test, è posta all'esterno della sfera, per semplificare le operazioni di acquisizione dati.¹ In figura 5.2 è mostrato il modulo ottico, dal punto di vista del LED alto. Per simulare l'oscuramento della superficie della sfera di vetro, il modulo ottico è stato ricoperto da strati di plastica semi-trasparente. Abbiamo attivato la strumentazione eseguendo cicli completi di acquisizione (così

¹I cavi utilizzati durante le prove effettuate saranno sostituiti da cavi di profondità per resistere alle pressioni del sito sottomarino, opportunamente inseriti nel corpo della gabbia di acciaio.

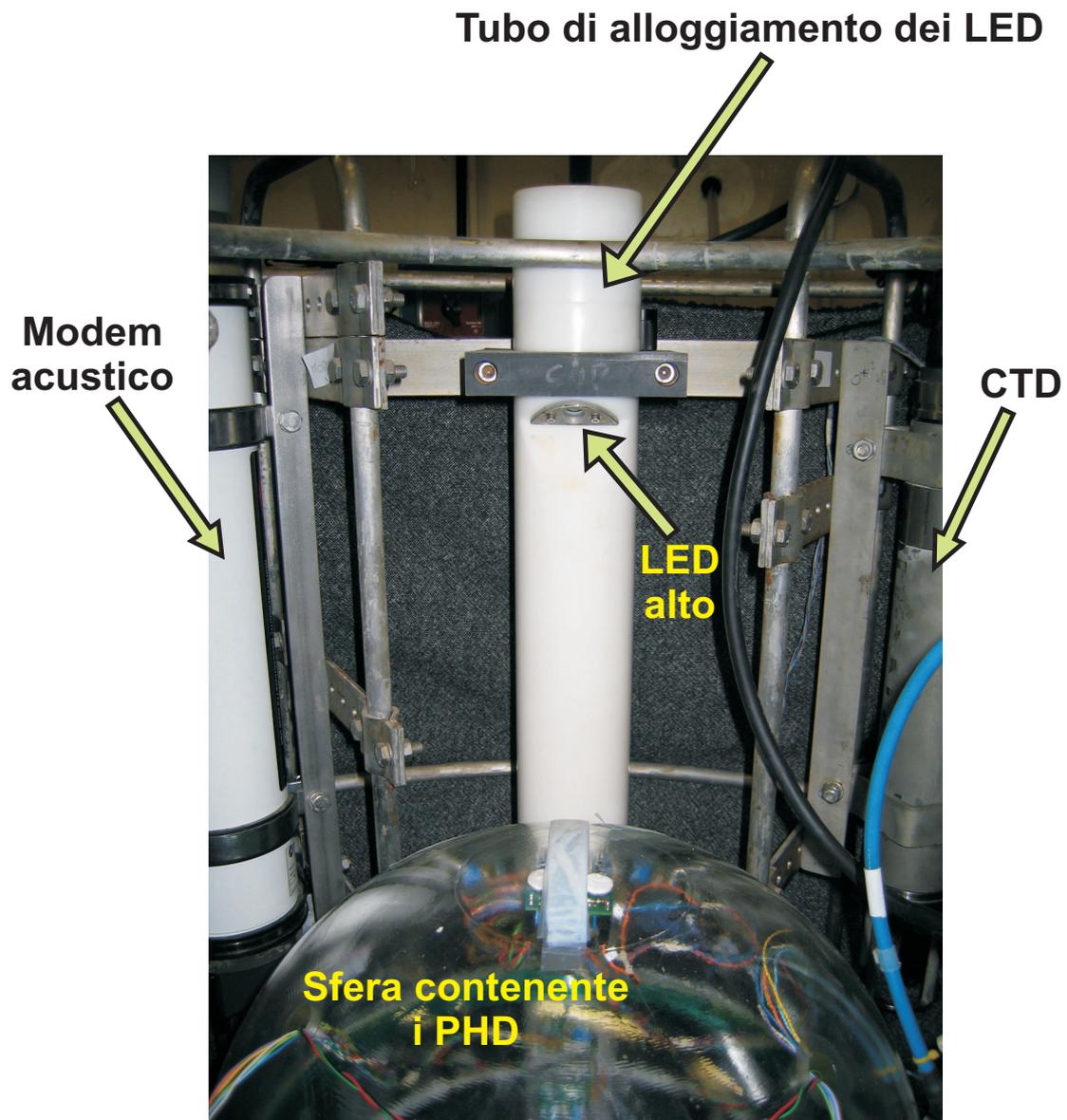


Figura 5.1: Particolare dell'apparato progettato per le misure di *Trasparenza*. Tra gli altri rivelatori utilizzati per le misure ambientali si notano il LED alto e la semisfera superiore della sfera Benthos che contiene i fotorivelatori.

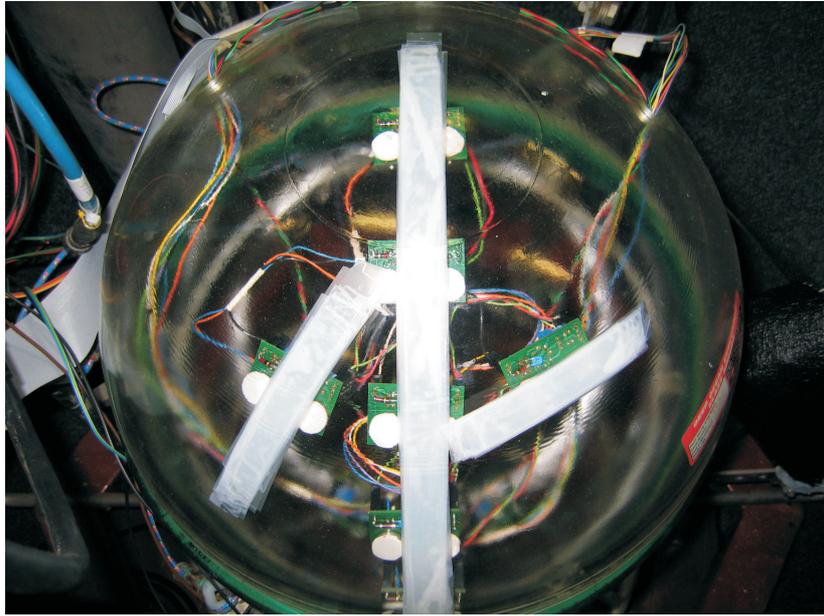


Figura 5.2: Particolare della sfera per la misura della *Trasparenza*. Sono visibili gli strati di plastica semi-trasparente posti in corrispondenza dei PHD, per simulare l'effetto del *biofouling* sulla superficie del modulo ottico.

come definiti nei precedenti capitoli) per strati sempre maggiori di plastica semi-trasparente. In tal modo, è stata simulata artificialmente una crescita costante del biofilm sulla superficie del modulo ottico.

Come già detto, partendo dalle misure di tensione ai capi dei fotorivelatori a due diverse intensità luminose dei LED, siamo interessati a ricostruire la funzione *Trasparenza* T , definita in 3.4. Ci aspettiamo che tale funzione sia indipendente dal valore della corrente che attraversa i LED: dunque presenteremo un confronto fra $T(I_{LED} = 10mA)$ e $T(I_{LED} = 20mA)$. La bontà del nostro apparato può essere stimata, ad esempio, confrontando l'andamento della funzione *Trasparenza* calcolata per i diversi PHD. Apponendo sulla superficie della sfera, in prossimità dei PHD, varie strisce di plastica semi-trasparente, abbiamo simulato una variazione della *Trasparenza* uniforme su tutta la sfera; ci aspettiamo quindi che i valori di T calcolati siano compatibili, nell'ambito degli errori sperimentali.

La *Trasparenza*, per come è stata introdotta nel paragrafo 3.3, è una funzione del tempo, calcolata normalizzando il rapporto fra la tensione ai capi

Siamo interessati alle variazioni del rapporto delle tensioni dei PHD sulle tensioni dei PHD di riferimento, all'accensione del rispettivo LED. Si mostrano, a titolo di esempio, le misure di tensione ai capi dei PHD1÷PHD7 e del PHD1 di riferimento quando la sfera è stata ricoperta, in corrispondenza dei sette PHD, da uno strato di plastica semi-trasparente:

	\bar{V}_1	σ_1	\bar{V}_2	σ_2	\bar{V}_3	σ_3	\bar{V}_4	σ_4	\bar{V}_5	σ_5	\bar{V}_6	σ_6	\bar{V}_7	σ_7	\bar{V}_{fir1}	σ_{rif1}
<i>pedistallo1</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED alto 10 mA</i>	180.31	16.12	1263.00	18.35	1214.39	16.95	1620.78	17.51	1333.70	16.24	816.34	17.65	125.29	16.96	2585.57	17.26
<i>LED alto 20 mA</i>	274.72	16.60	1767.02	17.07	1703.64	17.39	2279.75	17.48	1868.50	17.97	1144.22	19.79	201.76	18.25	3514.88	18.41
<i>pedistallo2</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED basso 10 mA</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>LED basso 20 mA</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>pedistallo3</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Per via della completa simmetria alto-basso della geometria dell'apparato di misura (figura 3.8), abbiamo acquisito dati ricoprendo solo la semisfera superiore del modulo ottico, in corrispondenza dei PHD1÷PHD7. Per questi fotorivelatori, dobbiamo osservare una variazione della *Trasparenza* che sia compatibile (per tutti e sette i PHD) con l'assunzione di aver realizzato un oscuramento uniforme.

La semisfera inferiore del modulo ottico, contenente gli altri PHD (8÷14), non è stata ricoperta dalla pellicola: a meno di fenomeni di riflessione di luce all'interno della sfera, dovuti alla presenza degli strati di plastica semi-trasparente, la funzione *Trasparenza* deve rimanere costante: $T \simeq 1$ (*biofouling* assente).

I grafici delle figure 5.3 e 5.4 mostrano l'andamento della *Trasparenza* per i PHD soggetti all'oscuramento della superficie del modulo ottico. Sono mostrati i valori calcolati per le due diverse intensità di corrente che percorre il LED, 10 e 20 mA. Le differenze fra gli andamenti ricavati per i due valori di corrente sono compatibili all'interno degli errori statistici. Rappresentano un'eccezione i PHD1 e PHD7: confrontando la geometria dell'apparato

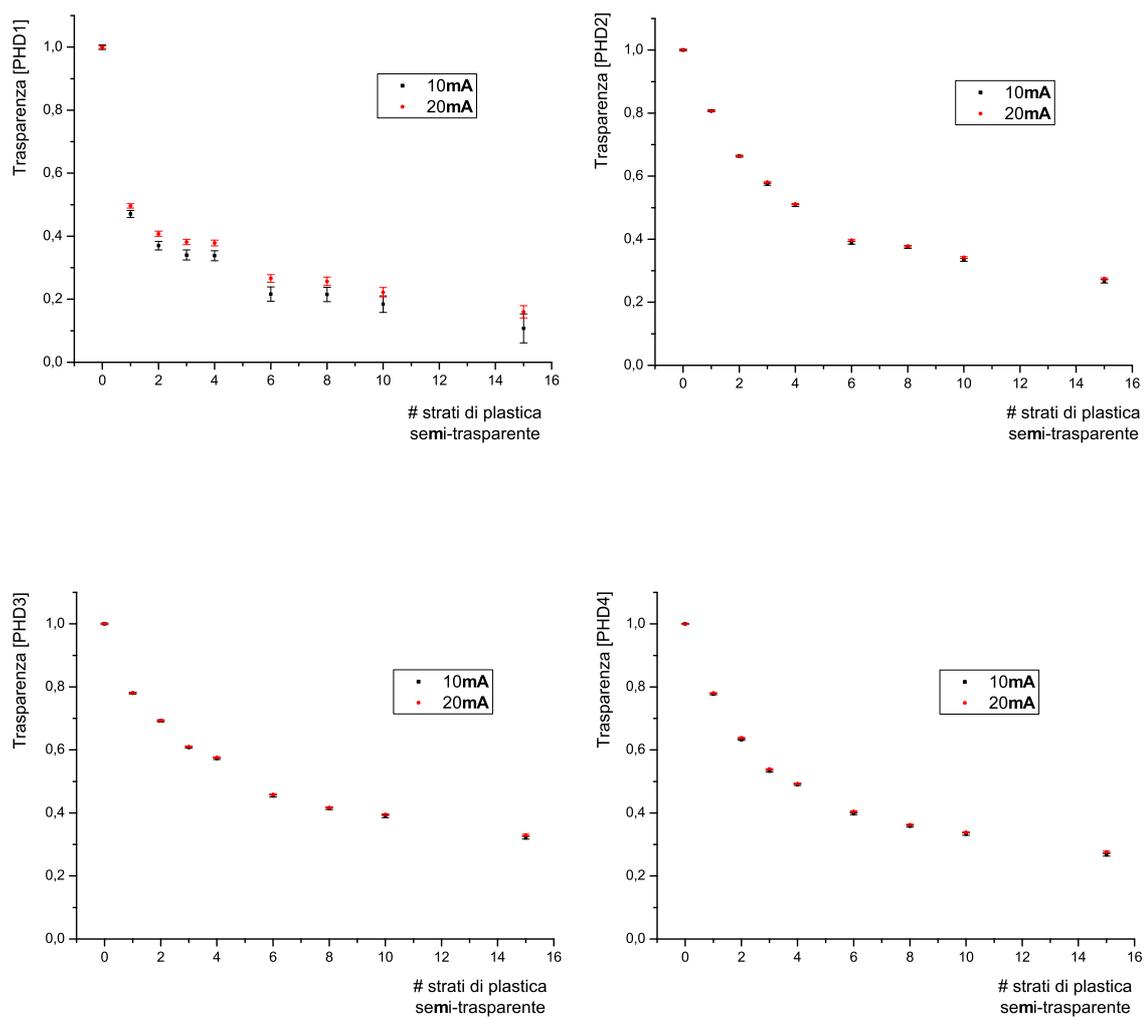


Figura 5.3: Andamento della *Trasparenza* per i PHD1÷PHD4 in funzione degli strati di *biofouling* artificiale.

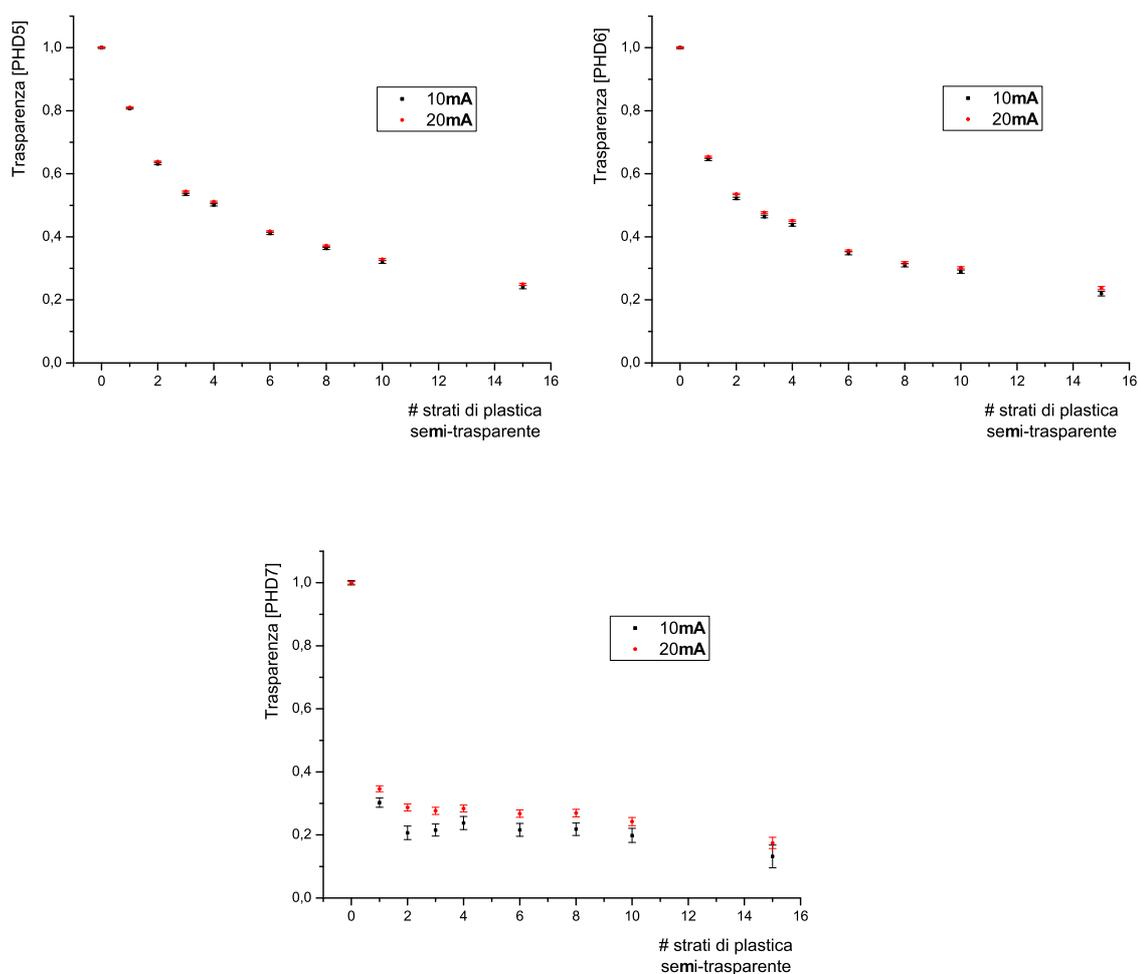


Figura 5.4: Andamento della *Trasparenza* per i PHD5÷PHD7 in funzione degli strati di *biofouling* artificiale. Il PHD7 non è confrontabile con gli altri: per via della geometria dell'apparato risulta scarsamente illuminato ed è più soggetto al rumore elettronico.

(figura 3.8) risultano essere i PHD più scarsamente illuminati dal LED alto e dunque il segnale di tensione generato risente maggiormente del rumore elettronico.

I dati relativi ai PHD8÷PHD14 sono stati trattati nello stesso modo, per avere una stima della misura in condizioni di trasparenza costante (nessuna variazione rispetto alle condizioni iniziali). I grafici delle figure 5.5 e 5.6 mostrano l'andamento della *Trasparenza* in funzione degli strati di *biofouling* artificiale (applicati in corrispondenza degli altri PHD). Si osserva che la funzione si mantiene costante, entro l'intervallo degli errori. Anche in questo caso, un fotorivelatore ha un comportamento non del tutto confrontabile con quello degli altri. Il PHD8 è meno illuminato dal LED basso (figura 3.8): si possono attribuire alla geometria dell'apparato tali differenze nella risposta all'illuminazione dei PHD.

Questo test ci ha permesso di valutare la funzionalità del nostro apparato, che risulta idoneo ad eseguire le operazioni per cui è stato realizzato. Abbiamo inoltre avuto, in tal modo, la possibilità di provare l'insieme dei programmi di acquisizione, scrittura, lettura ed analisi dei dati dell'elettronica della stazione autonoma nel formato finale di misura.

5.2 Verifica del funzionamento globale della stazione

Al fine di verificare il corretto funzionamento dell'apparato autonomo per misure abissali, abbiamo avviato l'applicazione di gestione della strumentazione eseguendo più volte cicli di misura. Il programma di gestione delle periferiche, opportunamente sviluppato, è stato eseguito modificando alcuni parametri (frequenza nei cicli di misura di ogni periferica, gestione degli errori e dei *time-out*) ed utilizzando l'apparato con tutti gli strumenti completamente funzionanti. Sono state simulate alcune situazioni di errore (improvvisa interruzione della comunicazione, disconnessione delle periferiche) per verificare la corretta gestione degli errori e dei *time-out* che le periferiche

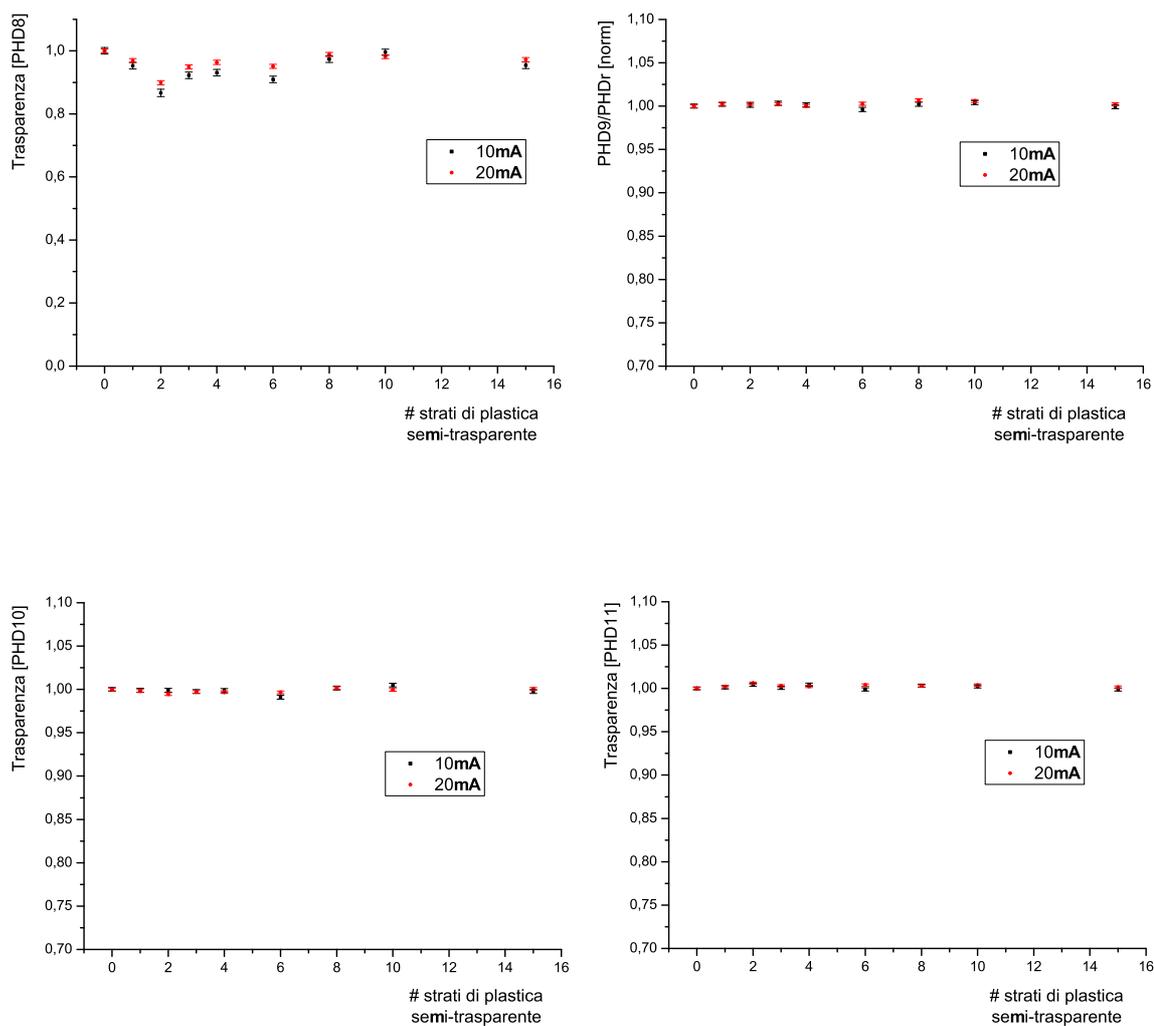


Figura 5.5: *Trasparenza* dei PHD8÷PHD11. Su questi PHD **non** sono stati applicati strati di *biofouling* artificiale.

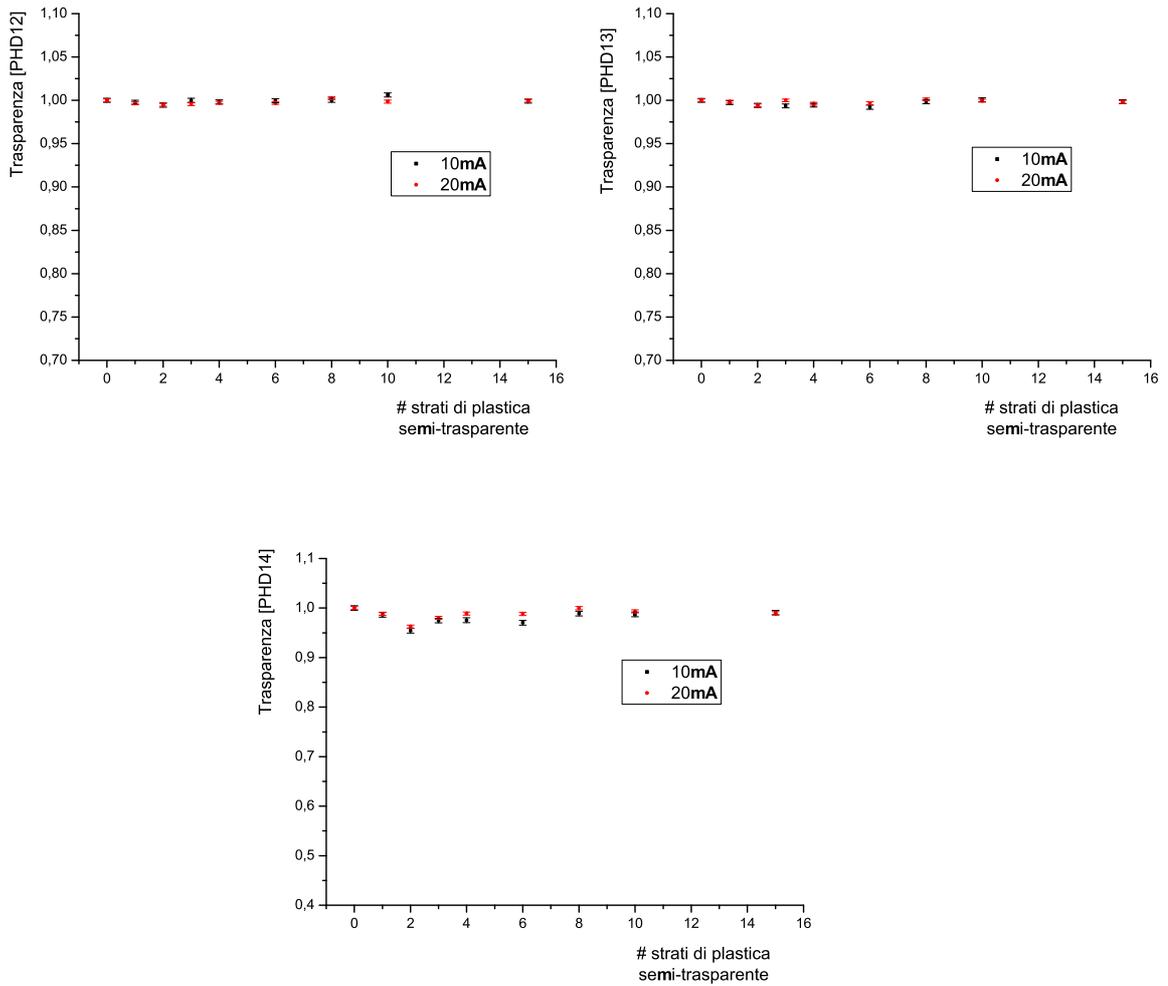


Figura 5.6: *Trasparenza* dei PHD12÷PHD14. Su questi PHD **non** sono stati applicati strati di *biofouling* artificiale.

possono presentare sul Single Board Computer. Descriviamo di seguito le operazioni di test che sono state eseguite.

Il ciclo di funzionamento dell'apparato autonomo è strutturato in modo da organizzare fasi di *stand-by* alternate con fasi in cui il SBC, comunicando con le periferiche, richiede l'acquisizione di determinate misure. Durante i periodi di attività non tutte le periferiche sono interrogate: come mostrato nel capitolo 4, le misure di corrente, temperatura e salinità saranno eseguite più frequentemente del ciclo relativo al *biofouling*.

Per semplificare la gestione delle operazioni, sono state organizzate delle funzioni specifiche (routine) che gestiscono ogni periferica. Il programma principale di gestione della stazione richiama, di volta in volta, la routine opportuna per ottenere la misura da una specifica periferica. Dal punto di vista software, le routine di presa dati (che gestiscono il correntometro, il CTD e la strumentazione relativa alla misura di tensione dei PHD) sono richiamate, all'interno del programma principale, con una semplice istruzione; tali routine, dopo aver interrogato le periferiche, appendono in coda ad un file temporaneo i dati relativi alla misura effettuata. Abbiamo definito un file temporaneo per ogni periferica connessa; ogni routine scrive i dati acquisiti in coda al file corrispondente (se il file non esiste, viene creato dalla routine). Operando in questo modo, si ottengono tre file temporanei (definiti *corr.txt*, *ctd.txt*, *biof.txt*) salvati nella memoria interna del SBC, che contengono ognuno i dati delle misure di ogni periferica. I dati acquisiti per ogni periferica devono essere riuniti in un opportuno spazio di memoria del SBC (*buffer* di memoria), così come è stato già mostrato in tabella 3.3, ed essere successivamente salvati su un supporto idoneo. Il SBC è dotato di un supporto per memorie del tipo *Compact Flash*: su un supporto di questo tipo viene creato il file contenente i dati acquisiti dall'apparato nel suo insieme. Abbiamo sviluppato, dunque, una routine dedicata all'organizzazione dei dati e al loro salvataggio in un unico file. Tale routine di salvataggio dati viene richiamata al termine dell'esecuzione della routine relativa alla stima del *biofouling*. La routine di salvataggio apre i file temporanei creati in precedenza, conta le

parole presenti in ogni file (per poter creare correttamente gli *header* così come definiti in tabella 3.3), scrive in coda al file di dati (*dati.dat*), memorizzato sul supporto *Compact Flash*, gli *header* e i valori relativi alle misure effettuate dalle periferiche; infine la routine elimina, infine, i file temporanei.

Aver organizzato in questo modo la gestione delle operazioni presenta diversi vantaggi. La routine di organizzazione e salvataggio dei dati è indipendente dalla frequenza con la quale vengono effettuate le prese dati con ogni periferica. Abbiamo scelto di eseguire per convenzione tale routine dopo quella di acquisizione dati per il *biofouling*. Ogni riga del file di dati che viene creata dalla routine contiene una sola acquisizione di dati relativi al *biofouling*, mentre può contenere un numero di acquisizioni arbitrario relativo al correntometro e al CTD. Gli *header* presenti nel file *dati.dat* permettono di interpretare facilmente la forma dei dati. Il programma di gestione dell'apparato può essere agevolmente configurato al fine di modificare la frequenza di presa dati, senza per questo alterare il formato del file di dati.

La tempistica delle operazioni gestite dal SBC in un giorno solare di 24 ore può essere schematizzata nel modo seguente:

<u>orario</u>	<u>operazione eseguita</u>
h.00	<i>routine correntometro</i> <i>routine CTD</i> <i>routine biofouling</i> <i>routine salvataggio</i> <i>stand-by (~1 ora)</i>
h.01	<i>routine correntometro</i> <i>routine CTD</i> <i>stand-by (~1 ora)</i>
h.02	<i>routine correntometro</i> <i>routine CTD</i> <i>stand-by (~1 ora)</i>
h.03	...
...	...
h.12	<i>routine correntometro</i> <i>routine CTD</i> <i>routine biofouling</i> <i>routine salvataggio</i> <i>stand-by (~1 ora)</i>
h.13	<i>routine correntometro</i> <i>routine CTD</i> <i>stand-by (~1 ora)</i>
h.14	...
...	...
h.23	<i>routine correntometro</i> <i>routine CTD</i> <i>stand-by (~1 ora)</i>
h.24≡h.00	...

La sequenza mostra esplicitamente gli orari a cui vengono eseguite le routine già definite sopra. Le misure del correntometro e del CTD sono eseguite ogni ora, mentre ogni dodici ore vengono eseguite anche le routine di stima del *biofouling* e di salvataggio dati. Come abbiamo mostrato nel paragrafo 3.4, ogni misura del correntometro è costituita da otto parole, ogni misura del CTD da tre, ogni misura di tensione ai capi dei PHD è formata da 224 parole. Ogni routine di gestione delle periferiche aggiunge due parole, contenenti la data e l'ora, nei file temporanei che contengono separatamente i dati prima della loro organizzazione nel formato finale. Il numero di parole totali per ogni misura è dunque aumentato di due. Abbiamo ridotto i tempi di *stand-by* durante le acquisizioni di test (*stand-by* = 10 minuti) per poter avere una mole di dati maggiore con qualche ora di attività.

Mostriamo in pagina seguente parte di un file di dati raccolto durante una di tali prove, evidenziando con diversi colori gli header, le parole di data e ora, i dati di diversi strumenti. Abbiamo scelto di avviare l'acquisizione del correntometro e del CTD ogni dieci minuti, mentre l'acquisizione delle tensioni ai capi dei PHD viene eseguita ogni 120 minuti. Operando in tal modo, possiamo generare in 240 minuti (4 ore) la stessa mole di dati che genererà l'apparato in un giorno nella configurazione finale di misura (24 cicli di acquisizioni di correnti, di temperatura e salinità e 2 cicli per la strumentazione relativa al *biofouling*).

La prima riga del file (dall'*header* iniziale "1000" fino alla parola "99999 <LF>") contiene dati relativi ad una acquisizione per ogni blocco dell'apparato; tutte le altre righe contengono dati di 12 acquisizioni di correnti, temperatura e salinità (nel paragrafo 3.4 è esplicitato il significato di ogni parola del *buffer*) ed una serie di misure della tensione ai capi dei PHD. Si ricorda che tali misure vengono eseguite sui 16 PHD durante le sette fasi in cui è stato organizzato il ciclo di accensione dei LED; nel file sono memorizzati i valori medi e le deviazioni standard delle tensioni misurate.

Il sistema sviluppato è in grado di gestire correttamente eventuali malfunzionamenti di alcune parti del sistema. Il software sviluppato è stato provato nelle situazioni in cui un blocco funzionale non risponde oppure risponde in maniera non corretta. Scollegando singolarmente ogni periferica (anche durante l'esecuzione di un ciclo di misura!) abbiamo verificato che il sistema prosegue correttamente il ciclo di misura. Sono stati impostati dei tempi massimi di risposta, trascorsi i quali il SBC prosegue con le altre operazioni programmate. Quando si verificano queste situazioni di mancata risposta o di mancata esecuzione di un preciso comando da parte di una periferica, non vengono rivelati alcuni dati. Il formato dei dati prevede anche questa eventualità. Ad esempio, in caso di malfunzionamento da parte del correntometro (e quindi di mancata acquisizione di misure di corrente) all'interno dell'*header* del correntometro (tabella 3.3) sarà specificato che il numero di parole relative ai dati del correntometro è zero.

Capitolo 6

Conclusioni

Il lavoro descritto in questa tesi è stato finalizzato alla realizzazione di un apparato autonomo per misure di parametri ottici e ambientali in un sito abissale. All’inizio del nostro studio, sono stati fissati degli obiettivi e si è discusso circa le proprietà che il nostro apparato avrebbe dovuto possedere. In particolare, volevamo realizzare un apparato sensibile a variazioni della *Trasparenza* del modulo ottico dell’ordine del ‰, capace di misurare le correnti sottomarine con una precisione superiore a ~ 0.1 cm/s e in grado di prendere dati di parametri ambientali ad intervalli regolari di 1 ora.

Durante le fasi di progettazione e realizzazione abbiamo operato delle scelte in funzione delle proprietà richieste: possiamo sintetizzare nei seguenti punti le caratteristiche principali della stazione autonoma.

- Autonomia. L’apparato opererà a 3500 m di profondità, in un sito abissale del Mar Mediterraneo, in maniera autonoma. Il sistema non sarà connesso con operatori che possano gestirne il funzionamento. Le periferiche e gli strumenti connessi all’apparato sono gestiti da un calcolatore centrale (SBC), che si occupa di comunicare con tutta la strumentazione. Il calcolatore gestisce le acquisizioni delle periferiche, stabilendo i tempi e le modalità di misura; il SBC riceve i dati eterogenei dai diversi strumenti e li organizza in un formato unico, salvandoli su un’opportuna memoria. Il sistema non esegue misure continue, ma effettua dei “campionamenti” nel tempo dei parametri oggetto di stu-

dio: il SBC organizza dei cicli di acquisizione alternati con periodi di *stand-by*, in cui viene limitato il consumo energetico.

- Risparmio energetico. Il sistema è dotato di un pacco batterie che fornisce l'alimentazione necessaria al funzionamento di tutta la strumentazione. I cicli di misura sono stati organizzati in modo tale da poter apprezzare variazioni sensibili dei parametri oggetto di studio, limitando i consumi. Il calcolatore centrale interroga periodicamente le periferiche: viene garantita la sopravvivenza dell'apparato per tempi lunghi (> sei mesi), condizione necessaria per caratterizzare al meglio il sito sottomarino, monitorando eventuali variazioni stagionali.
- Misure marine. L'apparato utilizza un correntometro doppler per la misura di correnti sottomarine; utilizza un multisensore per la misura di temperatura, conducibilità e pressione; è dotato di una strumentazione originale realizzata per stimare quantitativamente l'oscuramento di un modulo ottico immerso in un ambiente marino. Siamo interessati ad ottenere una stima degli effetti di *biofouling* in ambiente marino, in quanto tale processo può alterare la sensibilità di rivelazione di un telescopio Čerenkov sottomarino su tempi lunghi di attività.

Abbiamo realizzato, in modo originale, alcune parti dell'apparato elettronico dedicato allo studio dell'andamento del *biofouling* sulla superficie di una sfera di vetro Benthos. Tali circuiti sono stati realizzati ed assemblati nei laboratori del Dipartimento. Abbiamo condotto misure di calibrazione sui componenti scelti per migliorare l'efficienza del nostro apparato.

Abbiamo organizzato la gestione delle operazioni di misura, attraverso la programmazione in C del SBC. Abbiamo verificato singolarmente la comunicazione con tutte le periferiche con delle prove opportune.

Sono stati eseguiti dei test simulando un oscuramento della superficie del modulo ottico e ricavando, successivamente, l'andamento della funzione della *Trasparenza*. La stazione è stata provata in laboratorio nel suo funzionamento globale; abbiamo ottenuto quindi dei file di dati nel formato finale di misura.

Per stimare i tempi di operatività dell'apparato autonomo abbiamo eseguite misure dettagliate dei consumi degli strumenti, mostrando i tempi necessari all'esecuzione dei cicli di misura e ricavando l'energia richiesta.

Tutti i rivelatori integrati nella stazione autonoma sono stati accuratamente caratterizzati e predisposti per ottenere la sensibilità richiesta da ciascuna delle misure ambientali.

Attraverso le prove compiute, abbiamo potuto verificare l'efficienza e la funzionalità del nostro apparato autonomo, dell'insieme dei vari programmi di gestione delle operazioni e ricavare la forma dei dati acquisiti. L'interfaccia tra il software pilota e tutti i rivelatori connessi al SBC è stata collaudata con successo; la struttura dei dati acquisiti è stata pianificata in modo ottimale curando la compattezza e la completezza delle informazioni registrate. L'apparato autonomo realizzato per questo lavoro di tesi verrà depositato nel sito di Capo Passero entro qualche mese. In quell'occasione, contestualmente all'analisi dei dati raccolti dalla stazione, avremo modo di verificarne l'effettiva funzionalità in acqua marina ed alle alte pressioni caratteristiche del sito abissale.

Appendice A

Programmi di gestione dell'apparato

A.1 Programma di comunicazione su porta seriale

```
/* INCLUDE */
#include <termios.h>
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <fcntl.h>
#include <sys/signal.h>
#include <sys/types.h>
#include <string.h>

/* DEFINE */
#define _POSIX_SOURCE 1 /* POSIX compliant source */
#define FALSE 0
#define TRUE 1
#define OK 137
#define TIMEOUT 147
#define ERROR 157
```

```

/* ROUTINE */
int scrittura_seriale (int fd, char buf[255], int nbyte);
int lettura_seriale (int fd, char *dato, int *nbyte);

int main()
{
/* le impostazioni di BAUDRATE sono definite in <termios.h>*/
#define BAUDRATE B4800
/* cambiare questa variabile in funzione della porta seriale usata */
#define MODEMDEVICE "/dev/ttyS2" /* COM3 */

int fd, nbyte, ndato, verifica;
int i, j;
char dato[511];
volatile int STOP=FALSE;
/* contengono le impostazioni della porta prima e durante l'utilizzo */
struct termios oldtio,newtio;

/* attiva la porta */
fd = open(MODEMDEVICE, O_RDWR | O_NOCTTY );
if (fd <0) { perror(MODEMDEVICE); exit(-1); }

tcgetattr(fd,&oldtio); /* salva le impostazioni correnti della porta */

bzero(&newtio, sizeof(newtio));
/* setta le nuove impostazioni di porta
 * BAUDRATE imposta bps rate
 * CRTSCTS controllo di flusso hardware (usare solo se il cavo seriale ha
 * tutte le linee necessarie)
 * CS8 8n1 (8 bit, no parita, 1 bit di stop)
 * CLOCAL connessione locale
 * CREAD abilita la ricezione dei caratteri */
newtio.c_cflag = BAUDRATE | CSTOPB | CS8 | CLOCAL | CREAD; /* CONTROL */

```

```

/* IGNPAR ignora i byte con errori di parita
 * ICRNL associa CR con NL (altrimenti l'invio di CR non terminerebbe
 * l'input) */
newtio.c_iflag = IGNPAR; /* INPUT */
newtio.c_oflag &= ~OPOST; /* OUTPUT */
/* senza ICANON disabilita l'input canonico e disabilita l'eco */
newtio.c_lflag &= ~(ICANON | ECHO | ECHOE | ISIG); /* RAW DATA */
/* inizializza i caratteri di controllo */
newtio.c_cc[VMIN]=0; /* CONTR-CHAR */
newtio.c_cc[VTIME]=20; /* timeout 2 secondi */
/* abilita le impostazioni per la porta */
tcflush(fd,TCIFLUSH);
tcsetattr(fd,TCSANOW,&newtio);
/* rende asincrono il descrittore di file
 * (the manual page says only O_APPEND and O_NONBLOCK,
 * will work with F_SETFL...) */
fcntl(fd, F_SETFL, FASYNC);

verifica = FALSE;
verifica = scrittura_seriale (fd, "a", 1);
if (verifica==OK)
printf("inviato correttamente il carattere\n");

ndato = 0; // inizializzo il
dato[ndato] = 0; // buffer di lettura
STOP=FALSE;

while(STOP==FALSE) {
verifica = FALSE;
verifica = lettura_seriale (fd, &dato[ndato], &nbyte);
if (verifica==TIMEOUT) {
printf("timeout\n");
STOP=TRUE;
}
}

```

```

}
else if (verifica==ERROR) {
printf("errore\n");
STOP=TRUE;
}
else {
printf("\ndat= %c", dato[ndato]);
ndato = ndato + nbyte;

if (dato[ndato-1]=='\n') // la stringa deve essere "#\r\n"
if (dato[ndato-2]=='\r')
if (dato[ndato-3]=='#') {
printf("lunghezza dato= %d\n",ndato);
STOP=TRUE; // controlla la fine della stringa
}
}
}

/* ripristina le vecchie impostazioni di porta */
tcsetattr(fd,TCSANOW,&oldtio);

return OK;
} /* FINE DEL MAIN */

/*****
 * scrittura seriale invia sulla porta seriale il comando opportuno *
 *****/
int scrittura_seriale (int fd, char buf[255], int nbyte)
{
write(fd, buf, nbyte);
printf("%s", buf);
return OK;
}

```

```
/*
 * lettura seriale aspetta il numero fissato di caratteri *
 */
int lettura_seriale (int fd, char *dato, int *nbyte)
{
char buf[255];
int res, i;
int indice=0;

res = read (fd,buf,255);

if (res==0) {
return TIMEOUT;
}

else if (res==-1) {
return ERROR;
}

else {
buf[res]=0;

for (i=0; i<=res; i++) {
*(dato+indice) = buf[i];
indice++;
}

*nbyte=res;
printf("\nBuf= %s", buf);

return OK;
}
}
```

A.2 Programma di lettura dell'ADC

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <sys/ioctl.h>
#include <errno.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <fcntl.h>
#include <libdevmem.h>

#define MAP_SIZE 4096UL

#define TRUE 1

static short int read_ADC(unsigned int channel, unsigned short *valore);

int main()
{
    unsigned short input;
    unsigned int canale;
    int ritorno;
    int i;

    for (i=0; i<=15; i++) { // scansione di tutti i canali
        ritorno=read_ADC(i, &input);
        printf( "canale %d = %d", i, input);
    }
    return 0;
}
```

```
static short int read_ADC(unsigned int channel, unsigned short *valore)
{
/* Lettura dei valori digitali convertiti dall'ADC dei 16 fotodiodi
*
* base=0x30000180 e' l'indirizzo mappato in memoria della scheda
*
* val imposta il canale che deve essere letto nel seguente modo:
*
* ch 0 1 2 3 4 5 6 7 *
* byte 08 80 09 90 0A A0 0B B0 *
* ch 8 9 10 11 12 13 14 15 *
* byte 0C C0 0D D0 0E E0 0F F0 */

#define OK 0 /* Codice di ritorno quando non ci sono errori */
#define Time_Out 1 /* Codice di ritorno quando c'e' time-out */
#define No_Channel 2 /* Codice di ritorno quando non esiste il canale */
#define TIMEOUT 1000 /* Valore del time-out in decine di us */
#define base 0x30000180 /* indirizzo ADC */

unsigned int Canale[16];
unsigned char byl,byh;
unsigned int TO=0;

/* codici dei canali */
Canale[0]=0x08;
Canale[1]=0x80;
Canale[2]=0x09;
Canale[3]=0x90;
Canale[4]=0x0a;
Canale[5]=0xa0;
Canale[6]=0x0b;
Canale[7]=0xb0;
Canale[8]=0x0c;
```

```
Canale[9]=0xc0;
Canale[10]=0xd0;
Canale[11]=0xd0;
Canale[12]=0xe0;
Canale[13]=0xe0;
Canale[14]=0xf0;
Canale[15]=0xf0;

if (channel>15) return No_Channel;

off_t target;
libdevmem_handle h;
target = base;
h = libdevmem_open(target, MAP_SIZE);

libdevmem_write_uint8(h, 1, Canale[channel]); /* selezione del canale */
while(!(libdevmem_read_uint8(h,1)&0x01)) /* aspetto la conversione */
{
usleep(10);
if(TO++>TIMEOUT) return Time_Out;
}

byl = libdevmem_read_uint8(h, 2); /* 8 bit meno significativi */
byh = libdevmem_read_uint8(h, 3); /* 4 bit piu' significativi */
byh = byh & 0x0f;
*valore = (0x100*byh + byl);

libdevmem_close(h);

return OK;
}
```

A.3 Programma di gestione delle linee digitali di output

```

/* Con l'ausilio di tre linee di output della scheda viper si vuole pilotare
 * il generatore di corrente collegato ai due led. La sequenza dei valori da
 * associare alle linee è la seguente:
 * 1. 0-0-0 generatore spento, entrambi i led spenti
 * 2. 1-0-1 generatore acceso, corrente 20mA, led alto acceso
 * 3. 1-1-1 generatore acceso, corrente 40mA, led alto acceso
 * 4. 0-0-0 generatore spento, entrambi i led spenti
 * 5. 1-0-0 generatore acceso, corrente 20mA, led basso acceso
 * 6. 1-1-0 generatore acceso, corrente 40mA, led basso acceso
 * 7. 0-0-0 generatore spento, entrambi i led spenti
 * All'accensione della scheda viper le linee di output 0,1,2 sono settate
 * su 0, le linee 3,4,5,6,7 sono settate su 1. Utilizzo le linee 0,1,3. */

```

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <libdevmem.h>

#define MAP_SIZE 4096UL
#define acceso 0x00100000 /* bit 0 */
#define corrente 0x00200000 /* bit 1 */
#define altobasso 0x00800000 /* bit 3 */
#define set0 0x40E00024 /* set low */
#define set1 0x40E00018 /* set high */

int main() {
    unsigned long writeval;
    off_t target;
    libdevmem_handle h;
    h = libdevmem_open(target, MAP_SIZE);

```

```
/* 1. LED SPENTI 0-0-0 */
target = set0;
writeval = acceso | corrente | altobasso;
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED SPENTI 0-0-0\n" );

/* 2. LED ALTO ACCESO 20 mA 1-0-1 */
target = set1;
writeval = acceso | altobasso;
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED ALTO ACCESO 20 mA 1-0-1\n" );

/* 3. LED ALTO ACCESO 40 mA 1-1-1 */
target = set1;
writeval = acceso | corrente | altobasso;
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED ALTO ACCESO 40 mA 1-1-1\n" );

/* 4. LED SPENTI 0-0-0 */
target = set0;
writeval = acceso | corrente | altobasso;
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED SPENTI 0-0-0\n" );

/* 5. LED BASSO ACCESO 20 mA 1-0-0 */
target = set1;
writeval = acceso;
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED BASSO ACCESO 20 mA 1-0-0\n" );

/* 6. LED BASSO ACCESO 40 mA 1-1-0 */
target = set1;
writeval = acceso | corrente;
```

```
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED BASSO ACCESO 40 mA 1-1-0\n" );

/* 7. LED SPENTI 0-0-0 */
target = set0;
writeval = acceso | corrente | altobasso;
libdevmem_write_uint32(h, 0, writeval);
printf( "LED SPENTI 0-0-0\n" );

libdevmem_close(h);
return 0;
}
```

Bibliografia

- [AMR03] P. Amram et al., *Astrop. Phys.* 19 (2003), 253.
- [ANTA] ANTARES proposal (1999). ANTARES web page: <http://www.antaes.in2p3.fr/antaes/>.
- [ASK62] G. A. Askar'yan, *Sov. Phys. JETP* 14 (1962), 441.
- [BAG99] R. I. Bagduev et al., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* 420 (1999), 138.
- [CAP99] A. Capone and G. Riccobene, NEMO internal memo "Measurement in Capo Passero and Matapan" (1999).
- [CAP99b] A. Capone et al., NEMO internal memo "Deep Sea Monitoring Station" (1999).
- [COR86] F. A. Cordova, *Los Alamos Science Spring* (1986), 55.
- [DUN99] P. Dunne, *Phys. Educ.* 34 (1999), 19.
- [FOF83] N. P. Fofonoff and R. C. Millard Jr., *UNESCO Techn. Pap. In Mar. Sci.*, 44 (1983).
- [GAI95] T. Gaisser, F. Halzen, T. Stanev, *Phys. Rep.* 258 (1995), 173.
- [GAI97] T. Gaisser, *astro-ph/9707283* (1997).
- [GAN96] R. Gandhi et al., *Astropart. Phys.* 5 (1996), 81.
- [GOU66] R. J. Gould and G. Schröder, *Phys. Rev. Lett.* 16 (1966), 252.

- [GRE66] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1996), 748.
- [HAL03] F. Halzen, astro-ph/0301143 (2003).
- [HAL05] F. Halzen, astro-ph/0501593 (2005).
- [LEA00] J. G. Learned and K. Mannheim, Ann. Rev. Nucl. Part. Sc. 50 (2000), 679.
- [LEA03] J. G. Learned, Nucl. Phys. B 118 (2003), 405.
- [LON92] M. Longair, High Energy Astrophysics, Cambridge University Press (1992).
- [MOB94] C. D. Mobley, Light and Water, Academic Press (1994).
- [NEMO] NEMO web page: <http://nemoweb.lns.infn.it/>.
- [NEST] NESTOR web page: <http://www.nestor.org.gr>.
- [PEN65] A. A. Penzias and R. W. Wilson, Astrophys. J. 142 (1965), 405.
- [WAX97] E. Waxman and J. Bahcall, Phys. Rev. Lett. 78 (1997), 2292.
- [web1] http://scienzapertutti.lnf.infn.it/Quark/a_index.html.
- [web2] http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/COSMIC_RAYS/cosmic.html.
- [web3] <http://www.europhysicsnews.com/full/17/article2/article2.html>.
- [web4] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html>.
- [web5] <http://chandra.harvard.edu/photo/2003/gb1508>.
- [web6] http://www.space.com/scienceastronomy/blackhole_birth_030319.html.
- [web7] http://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_effect.
- [web8] <http://earth.google.com>.
- [web9] <http://www.auger.org>.

[web10] <http://www.arcom.com>.

[web11] <http://www.aanderaa.com>.

[web12] <http://www.idronaut.it>.

[ZAT66] G. Zatsepin and V. Kuz'min, JETP Lett. 4 (1966), 78.