

Capitolo II

L'apparato ANTARES

2.1 Introduzione

La Collaborazione internazionale ANTARES¹ (la figura 2-1 mostra la collocazione dei centri di ricerca interessati) è impegnata, dal 1996, nel progetto e nella costruzione di un telescopio per neutrini, da installare in un sito sottomarino a circa 2.400 m di profondità.



Figura 2-1. Collocazione dei centri di ricerca che partecipano al progetto ANTARES.

¹ Partecipano alla Collaborazione ANTARES (acronimo che corrisponde a: Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss enviromental RESerch) ventidue centri di tutta Europa.

L'apparato sarà costituito da circa 1000 fotomoltiplicatori (PMT) collegati da 13 cavi flessibili. Ciascuno di questi cavi, indicato nel seguito come stringa è equipaggiato con 90 PMT. La disposizione di queste stringhe sarà verticale e sarà realizzata su una superficie complessiva di 0.1 km² [12].

Un programma di ricerca e caratterizzazione, durato tre anni, ha permesso di determinare il sito idoneo per l'installazione del rivelatore cioè un sito sottomarino abissale che risponda ai seguenti requisiti:

- profondità sufficiente per ridurre la radiazione atmosferica e vasta regione pianeggiante in cui ospitare il rivelatore;
- vicinanza alla costa per rendere possibile il trasferimento dei segnali dall'apparato al laboratorio su terra-ferma ed il trasferimento di potenza ai rivelatori sommersi tramite un cavo elettro-ottico;
- presenza di ridotte correnti sottomarine, per permettere l'installazione dell'apparato in condizioni di sicurezza e per rendere più semplice la meccanica di sostegno delle singole parti;
- grande trasparenza dell'acqua, per consentire ai deboli segnali luminosi di poter essere rivelati, anche da qualche decina di metri di distanza, in modo da ridurre il numero di sensori ottici necessari;
- ridotta sedimentazione di materiali, organici ed inorganici che potrebbero depositarsi sui sensori ottici riducendone la capacità di rivelazione dei segnali;
- ridotto "rumore ottico" prodotto da organismi biologici e da decadimenti di sostanze radioattive, in particolare l'isotopo del potassio ⁴⁰K. Mentre la quantità di potassio è ragionevolmente identica in tutti i siti del Mediterraneo,

l'emissione di luce da microrganismi, che sembra essere correlata con l'intensità e la variabilità delle correnti sottomarine, può variare da luogo a luogo;

- vicinanza ad infrastrutture già esistenti a terra, quali laboratori di ricerca attrezzati, il che permette notevoli risparmi sull'allestimento delle necessarie infrastrutture [2].

In realtà il sito scelto da ANTARES non possiede, nello stesso grado, tutte le caratteristiche su menzionate [4]. Risulta, infatti, che il miglior compromesso tra profondità e distanza dalla costa trovato è di 2400 m di profondità e 50 km di distanza. Le correnti marine sono relativamente basse, intorno ai 18 cm/s massimi e la trasparenza dell'acqua nel sito scelto è 41 m.

Il tasso di sedimentazione è stato misurato per circa 250 giorni, da un sistema costituito da un led che emette in luce blu (470 nm) e un rivelatore posto ad un angolo variabile. In figura 2-2 se ne può riscontrare l'attenuazione misurata.

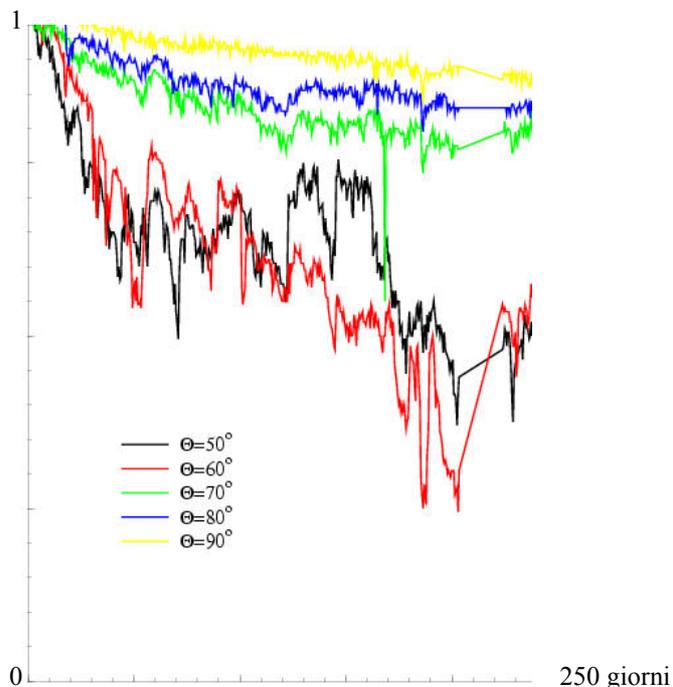


Figura 2-2. Grafico che rappresenta l'attenuazione dell'intensità luminosa al variare del numero dei giorni e dell'angolo di posizionamento del rivelatore rispetto alla verticale.

Tuttavia ciò non costituisce un ostacolo in quanto, come spiegato nel Capitolo I, i fotomoltiplicatori di ANTARES saranno orientati solo verso il basso, in modo da rivelare i neutrini che attraverseranno tutta la Terra, provenienti dalla parte di cielo opposta a quella sovrastante il telescopio. Una sintetica descrizione può essere osservata in figura 2-3.

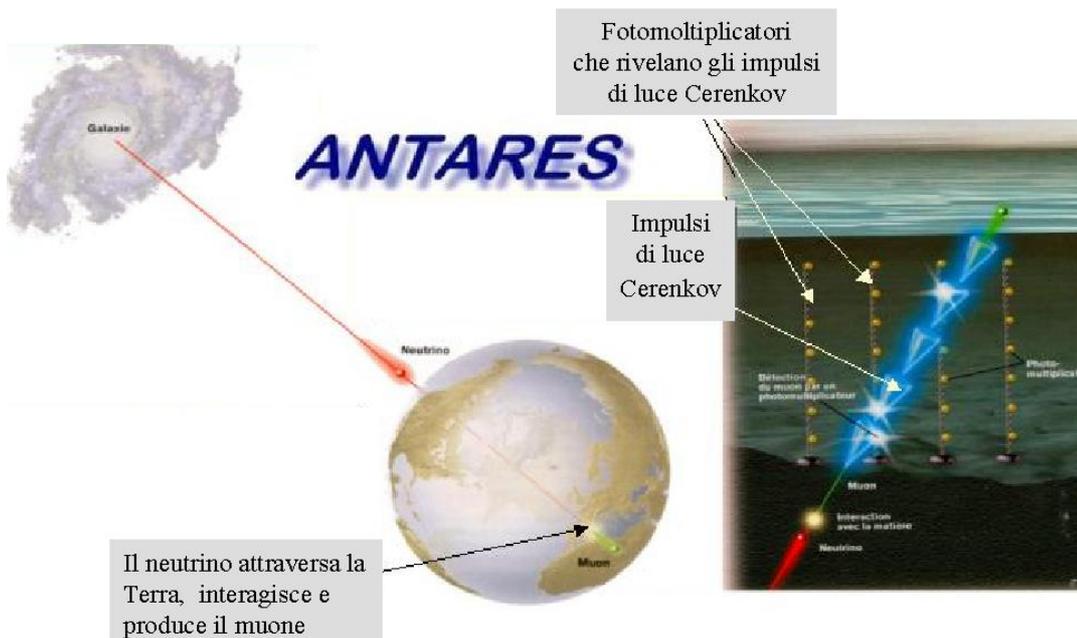


Figura 2-3. Rappresentazione dei principi di rivelazione dei neutrini cosmici dell'apparato ANTARES.

La prima stringa sarà installata agli inizi del 2003, mentre il completamento del progetto è previsto entro la fine dello stesso anno.

2.2 Struttura dell'apparato ANTARES

L'esatta localizzazione del rivelatore, al largo della costa francese di Tolone, è nel punto di coordinate $42^{\circ} 50' N$, $6^{\circ} 10' E$. Come detto, esso sarà composto da 13 stringhe² indipendenti, installate alla profondità di 2400 m. In figura 2-4 è possibile osservare la posizione del sito scelto.

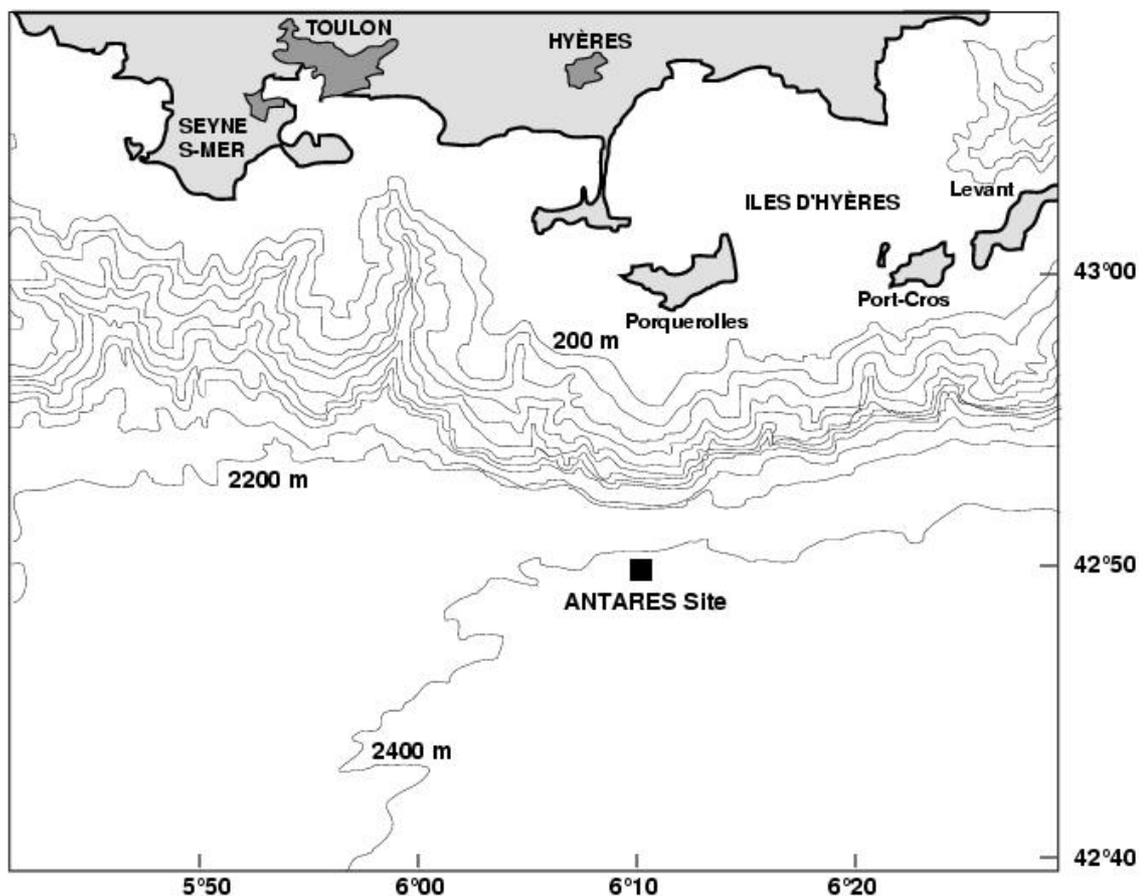


Figura 2-4. Sito scelto per la collocazione del telescopio per neutrini ANTARES al largo della costa di Tolone (Francia).

La stazione di controllo, connessa al rivelatore da 50 km di cavo, è

² In realtà il sistema è stato progettato per 16 stringhe in modo da averne 3 di riserva. La ridondanza è richiesta dalla opportunità di ovviare a eventuali malfunzionamenti.

indicata con il nome di shore station [12].

Ciascuna stringa sarà ancorata al fondo del mare attraverso un corpo morto inserito in un contenitore che costituisce la base della stringa come mostra la figura 2-5. Questo contenitore prende il nome di BSS (Bottom String Socket). L'altra estremità della stringa è assicurata ad un corpo galleggiante che fornisce la necessaria tensione che consente alla stringa di mantenere un assetto più o meno verticale. Il BSS può essere sganciato con un comando acustico per consentire il recupero della stringa, senza alcun intervento diretto che sarebbe certamente difficoltoso a tale profondità. Dopo lo sgancio, le proprietà di galleggiamento della stringa la riportano in superficie.

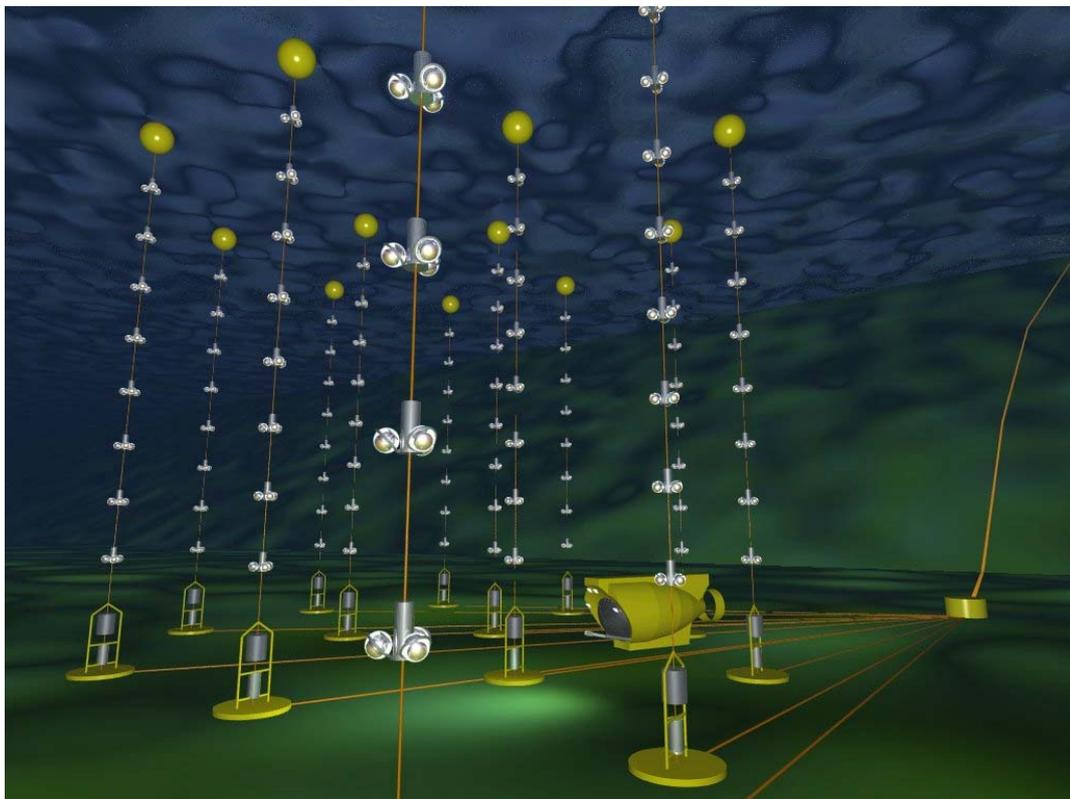


Figura 2-5. Disegno che mostra l'organizzazione del telescopio per neutrini ANTARES al fondo del mare.

I PMT portati da ciascuna stringa sono organizzati in ‘piani’ di 3 PMT ciascuno, distanti 12 m [12]. La parte sensibile è perciò alta 348 m e il piano più basso dista 100 m dal fondo del mare, mentre l’ultimo piano dista dal galleggiante 52 m. Dunque la lunghezza complessiva di una stringa è di circa 500 m. Ogni stringa dista dall’altra tra i 60 e gli 80 m ed è stata proposta una disposizione delle stringhe a forma spiralicca per evitare delle simmetrie che potrebbero generare alcune ambiguità [4]. La figura 2-6 riassume sinteticamente la composizione e la disposizione del rivelatore descritto.

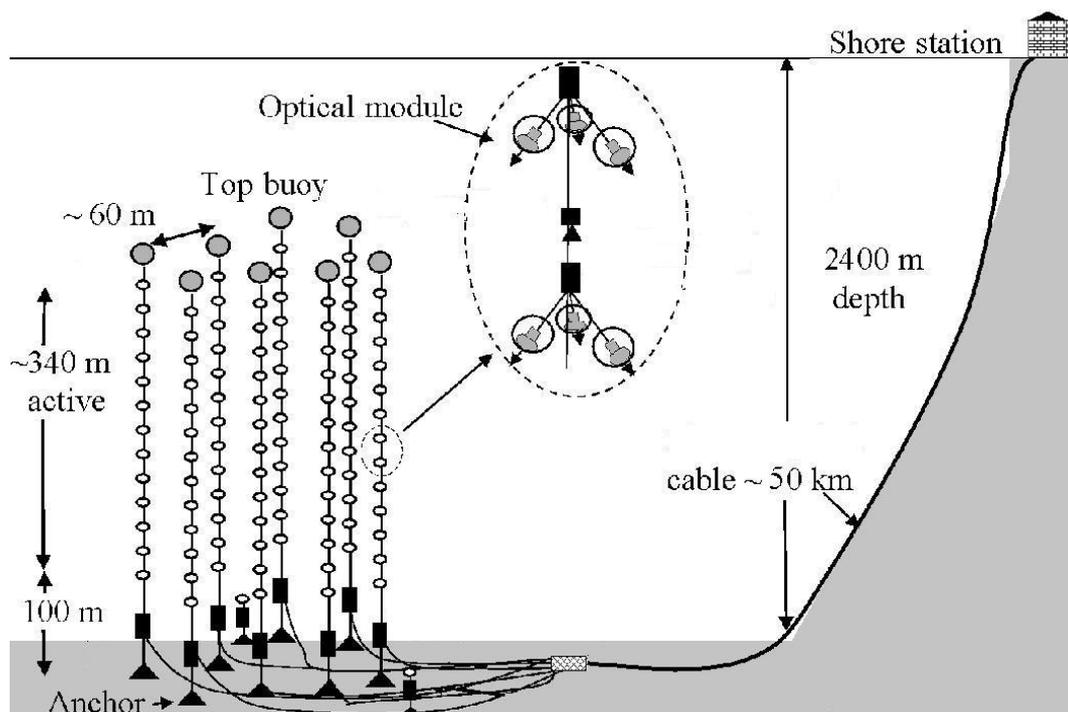


Figura 2-6. Schematizzazione del rivelatore.

2.3 Acquisizione dati

2.3.1 Rivelazione

I fotomoltiplicatori sono dei trasduttori che permettono la trasformazione dei lampi di luce Cerenkov in segnali analogici contenenti la forma dell'impulso rivelato. I fotomoltiplicatori saranno alloggiati in involucri sferici di vetro, del diametro di 17 pollici (esempi sono mostrati nelle figure 2-7 e 2-8), capaci di resistere a pressioni di oltre 250 bar. Tali moduli sono indicati comunemente con la sigla OM (Optical Module).



Figura 2-7. in alto e Figura 2-8. in basso. Fotografie di un OM rispettivamente completo e aperto.

La tecnologia costruttiva di questo modulo è sofisticata e se ne può osservare una schematizzazione nella figura 2-9. Il modulo, oltre a resistere alla pressione idrostatica, deve permettere una trasmissione ottimale della luce, e per questo il fotomoltiplicatore è immerso in un gel con indice di rifrazione tale da accoppiare otticamente il PMT all'acqua. Inoltre il PMT deve essere schermato dai campi magnetici prodotti dai dispositivi circostanti così come dal campo magnetico terrestre, utilizzando supporti con permittività magnetica elevata. Il modulo inoltre deve evitare possibili raggi riflessi e permettere una conforme alimentazione elettrica.

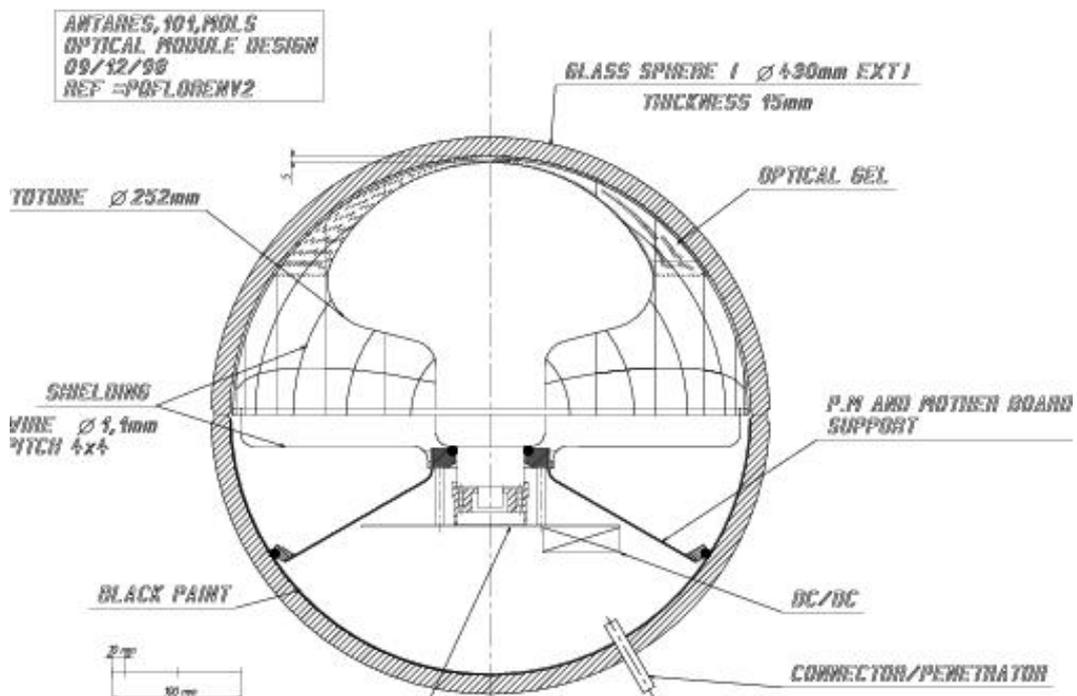


Figura 2-9. Contenuto di un modulo ottico

Gruppi di 3 OM sono riuniti insieme attraverso una resistente struttura meccanica chiamata OMF (Optical Module Frame) rappresentata in figura 2-10,

tale da orientare gli OM a 45° rispetto alla verticale.

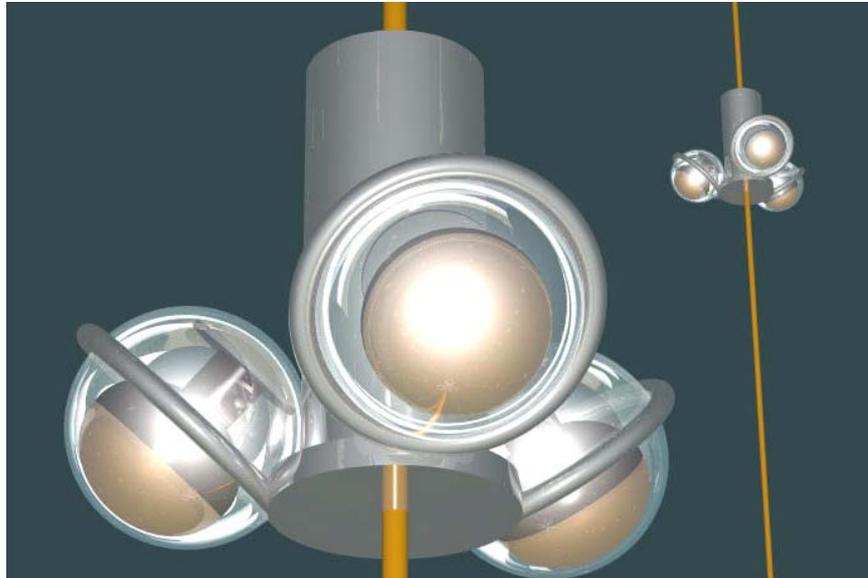


Figura 2-10. Disegno di un intero piano, dove si può osservare la resistente struttura realizzata in lega di titanio che costituisce l'OMF.

2.3.2 Elaborazione

L'obiettivo del rivelatore, come già anticipato, è quello di misurare con sufficiente accuratezza le caratteristiche del segnale impulsivo e del suo tempo di arrivo, al fine di ricostruire la traccia del muone e quindi quella del neutrino che l'ha prodotto. Questa ricostruzione sarà eseguita in una seconda fase a terra dove sarà approntata una potenza di calcolo sufficiente per tale elaborazione. Quindi i segnali analogici dei PMT, così ottenuti, devono essere (nell'ordine) amplificati, digitalizzati, codificati, trasmessi, memorizzati e analizzati. Le prime quattro operazioni saranno realizzate 'off shore' cioè dai dispositivi elettronici posti sul sito scelto, mentre le ultime due saranno realizzate 'on shore' cioè dagli apparati approntati nella shore station.

I PMT amplificano i deboli segnali di conversione della luce incidente mediante un dispositivo interno di moltiplicazione a valanga [13]. L'acquisizione del segnale analogico raccolto dal PMT e la trasformazione in segnale digitale è realizzata attraverso un circuito integrato ASIC (Application Specific Integrated Circuit) opportunamente progettato chiamato ARS1 (Analogue Ring Sampler) [14]. Naturalmente la conversione del segnale analogico nel corrispondente digitale avviene attraverso un campionamento e poiché è richiesta una soddisfacente precisione e la frequenza media degli impulsi è stimata intorno a 100 kHz, ne deriva una frequenza di campionamento molto elevata (1 GHz).

È stato inoltre stimato che la maggior parte (~ 98%) dei segnali è relativo alla conversione di un singolo fotoelettrone, o SPE (Single Photo Electron), mentre la restante parte, costituita da una forma d'onda più complessa (per esempio derivata dalla sovrapposizione di più SPE) è indicata con WF (Waveform). Pertanto è risultato più conveniente non campionare i segnali SPE ma prendere solamente nota di alcune informazioni, tra le quali il tempo di arrivo. Nonostante questa scelta, la mole di dati da trattare è ingente. Questa considerazione è dovuta, come detto, alla presenza di altre sorgenti luminose, oltre a quelle prodotte dalle interazioni dovute ai neutrini cosmici (segnale cercato) e ai neutrini atmosferici (più abbondanti dei primi a causa della relativa bassa profondità del rivelatore). Queste sorgenti, ostacolano la ricerca dei segnali desiderati e sono gli effetti di bioluminescenza e il decadimento dell'isotopo del potassio (^{40}K) presenti nelle acque marine.

Lo svantaggio della presenza di queste ulteriori sorgenti può essere

mitigato dalla osservazione che il loro effetto è locale, mentre la scia luminosa prodotta dal muone interessa generalmente un volume più ampio del rivelatore. Dunque, è possibile scartare i segnali prodotti da queste sorgenti di disturbo prelevando solamente i segnali che interessano più OM, attraverso un meccanismo chiamato trigger descritto più avanti nel corrente paragrafo.

Poiché i sensori possono essere molto distanti tra loro, l'ARS1 deve immediatamente campionare tutti i segnali ricevuti, in quanto i ritardi potrebbero compromettere la raccolta dei dati. Anche i segnali di tipo SPE dapprima devono essere campionati, fintanto che un dispositivo chiamato PSD (Pulse Shape Discriminator), contenuto nell'ARS1, non abbia discriminato il tipo di segnale ricevuto.

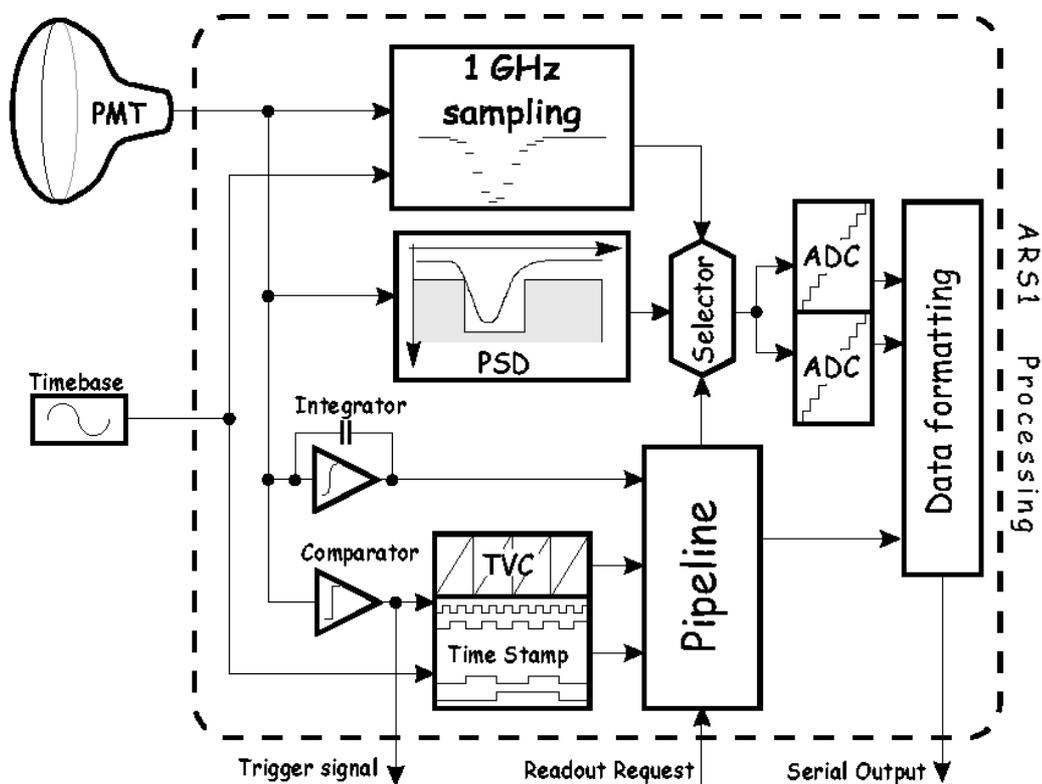


Figura 2-11. Schema a blocchi del circuito ARS1.

Per esaminare il funzionamento del circuito ARS1, ci si può aiutare con la sua rappresentazione a blocchi mostrata in figura 2-11. Dunque, quando il segnale analogico è inviato all'ARS1, si avvia il campionamento e un comparatore verifica il superamento di una determinata soglia. Nello stesso tempo il segnale è integrato e il PSD verifica che l'impulso rientri nei limiti predefiniti. Un convertitore tempo-tensione fornisce il valore analogico associato alla durata dell'impulso. Alla fine della finestra di integrazione, il PSD fornisce il risultato binario in base alla forma dell'impulso: SPE o WF. In entrambi i casi, l'informazione temporale, fornita da un segnale di clock descritto nel seguito, è memorizzata con il valore analogico della carica fornita dall'integratore e il valore analogico del convertitore tempo-tensione, in una memoria organizzata a 'pipeline'. La pipeline è di ordine 16, cioè può contenere fino a 16 impulsi SPE. Ogni cella può memorizzare 2 valori analogici e uno digitale, lungo 26 bit, per fissare l'istante di arrivo. Dopo un tempo stabilito, se nessun segnale di trigger arriva all'ARS1, la cella è cancellata, altrimenti è letta. In quest'ultimo caso, i valori analogici sono convertiti in formato digitale. Se il segnale è di tipo SPE questi 3 dati sono trasmessi in un pacchetto contenente l'indirizzo del fotomoltiplicatore interessato, se è di tipo WF, di cui la figura 2-12 mostra un esempio, vengono aggiunti 128 valori ottenuti dal campionatore e ancora inviati in modo simile a quello dei segnali SPE [14]. Il carico di dati per un segnale SPE è di 6 byte, per uno WF di 263 byte.

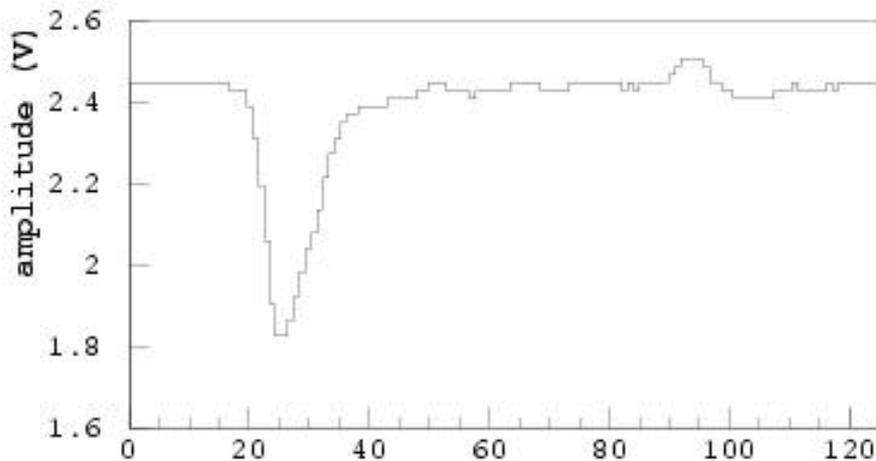


Figura 2-12. Segnale campionato di tipo WF costituito da 128 campioni.

Si può notare che è possibile accettare più eventi SPE in rapida successione, ma non è possibile fare altrettanto per eventi di tipo WF. Infatti, mentre un evento WF è accettato, si realizza un tempo morto nel quale non è più possibile accettarne altri. Per ridurre questo tempo morto si utilizzano 2 circuiti ARS1 nell'architettura 'token ring' [14]. Dunque per ogni storey (piano) occorrono almeno 6 circuiti ARS1.

2.3.3 Trigger

Il funzionamento di moltissimi sistemi di acquisizione dati si basano sulla costruzione di un segnale chiamato trigger. La funzione di questo segnale è quella di abilitare l'acquisizione solo nel caso in cui si verificano determinate condizioni che si materializzano nella generazione di un segnale logico. Il concetto di trigger è molto generale: un esempio efficace è dato dalla fotografia, dove la pressione del pulsante di scatto permette alla luce di impressionare una pellicola fotosensibile (acquisizione) dove è rappresentata l'immagine desiderata

(dati). La necessità di questo segnale è evidente come è evidente nell'esempio fotografico. Infatti, nell'assenza di alcun pulsante di scatto, una pellicola lasciata all'esposizione non contiene l'immagine desiderata (ammesso che la sensibilità duri all'infinito) ma contiene un guazzabuglio di immagini che non danno alcuna informazione. Come nella fotografia anche nel rivelatore il segnale di trigger è limitato da una finestra temporale. La durata di questa finestra deve essere sufficiente per consentire l'acquisizione ma non troppo a causa della limitatezza delle capacità di memorizzazione (pellicola) dei dispositivi off shore.

Un'altra importante funzione assolta dal trigger è evidentemente quella di filtro dei segnali di disturbo rivelati a causa delle emissioni di radiazioni luminose emesse dagli organismi o dall' ^{40}K disciolto nell'acqua. Ciò si realizza costruendo segnali di trigger a partire da opportune coincidenze tra OM.

In ANTARES il trigger è basato sulla trasmissione di opportuni segnali da uno storey all'altro. In particolare esistono 3 livelli di trigger associati ad altrettanti eventi, i cui segnali relativi sono denotati L0, L1 e L2.

Poiché al variare delle condizioni che definiscono i segnali di trigger, varia la quantità dei dati trasmessi alla shore station, il principio che accompagna la scelta dei segnali di trigger è basato sulla minimizzazione del numero di decisioni fatte in modo automatico, per permettere che la grande quantità di dati ottenuti sia elaborata a terra dove le scelte e le elaborazioni possibili sono più avvedute [12].

L0 è un segnale generato internamente all'ARS1, quando il segnale analogico ottenuto dal fotomoltiplicatore supera una determinata soglia. L1 è

generato dalla combinazione di segnali L0 degli OM relativi allo stesso piano. Nel momento in cui L1 viene generato, vengono inviati a terra i dati relativi. L2 è creato quando 2 o più piani producono coincidenze. Condizioni di tipo simile o superiore determinano un ulteriore segnale, che si propaga attraverso tutte le stringhe del rivelatore e determina l'invio dei dati raccolti da tutti i sensori verso la base shore station. Questo segnale è chiamato RoR (Read on Request).

2.3.4 Temporizzazione corretta

Uno degli aspetti fondamentali per una corretta ricostruzione della traccia del neutrino è la conoscenza esatta dell'istante in cui avviene la rivelazione da parte del PMT. Naturalmente non è importante il valore assoluto dell'istante di rivelazione, ma è fondamentale che, per tutta la durata di funzionamento del rivelatore, tutti gli ARS1 effettuino la stessa misurazione di tempo in ogni istante. Per far ciò idealmente basterebbe sincronizzare tutti gli oscillatori che producono i segnali di clock una volta per tutte, ma ciò in realtà non è sufficiente. Infatti, occorre un tempo relativamente breve perché gli oscillatori perdano la fase o addirittura presentino valori diversi del numero di impulsi contati. Ciò accade perché i dispositivi presentano sempre margini di tolleranza sui valori nominali. L'unico modo, dunque, per agganciare tutti i segnali di clock fra loro è quello di fornire un segnale di riferimento, costituito da una serie di impulsi digitali, che abbia frequenza sufficiente ad evitare ogni sfasamento. Per questo motivo è stato deciso di distribuire a tutti gli OM un segnale di sincronizzazione comune. Il segnale scelto è in particolare lo Standard Telecom ASIC Serial Clock 155.52 MHz.

Poiché il progetto ANTARES si propone di cooperare con gli altri apparati all'esplorazione del cielo, è inoltre importante che la misura del tempo sia in accordo con quella degli altri rivelatori. Pertanto è stato scelto di agganciare il segnale di clock di tutto il rivelatore con un segnale, con frequenza di 1 Hz, trasmesso da un satellite attraverso un dispositivo GPS (Global Position System) allocato nella shore station.

2.4 Trasmissione dati

Il trasporto dei segnali dei trigger e di clock, il trasporto dei dati fino alla shore station e l'erogazione dell'alimentazione elettrica necessaria per il funzionamento dei fotomoltiplicatori avviene tramite opportuni cavi. Per semplicità è stata adottata una struttura di connessione ad albero. La struttura ad albero nasce da un cavo principale, chiamato EOC (ElectroOptical Cable) che assicura la comunicazione tra la shore station e l'apparato. L'EOC si collega ad un modulo chiamato JB (Junction Box descritto nello schema della figura 2-13) posto nei pressi del sito in cui sarà installato il rivelatore.

Da questo modulo si diramano 13 cavi, uno per ciascuna stringa. Il compito di ognuno di questi cavi, che prendono il nome di Interconnecting Cable, è quello di collegare la JB con le basi delle stringhe. Per connettere ogni base di una stringa agli OMF appartenenti alla stringa stessa, si utilizza un unico cavo, chiamato EMC (ElectroMechanical Cable), diviso in spezzoni corrispondenti ad altrettanti piani.

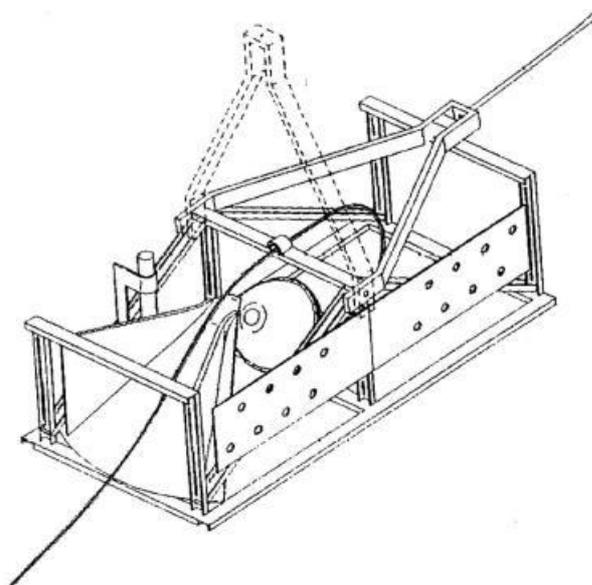


Figura 2-13. Disegno del modulo JB.

L'EMC ha funzione di trasporto (di energia, segnali e dati) e insieme di sostegno, perché il cavo fornisce la rigidità necessaria per sostenere le stringhe in acqua. Poiché la distanza tra la shore station e il rivelatore è di quasi 50 km, è stato scelto di adoperare la trasmissione su fibra ottica lungo tutto il rivelatore, al fine di garantire una maggiore velocità di trasporto dei dati e dei segnali e insieme più sicurezza e affidabilità [4].

2.4.1 Local Control Module

Poiché i dati e i segnali sono impulsi luminosi che viaggiano su fibra ottica, è necessario dotare ogni piano di un modulo che permetta la conversione da segnali elettrici (i dati da trasmettere) in segnali ottici, da inviare alla shore station. Il compito di questo modulo è anche quello di ricevere i segnali di trigger provenienti dagli altri OM, operando la conversione da segnali ottici a segnali

elettrici, costruire dei propri segnali di trigger e inviarli verso gli altri OM, ricevere e distribuire il segnale di clock e distribuire la potenza elettrica necessaria al funzionamento. Il disegno di questo modulo, che prende il nome di LCM (Local Control Module), può essere osservato nella figura 2-14.

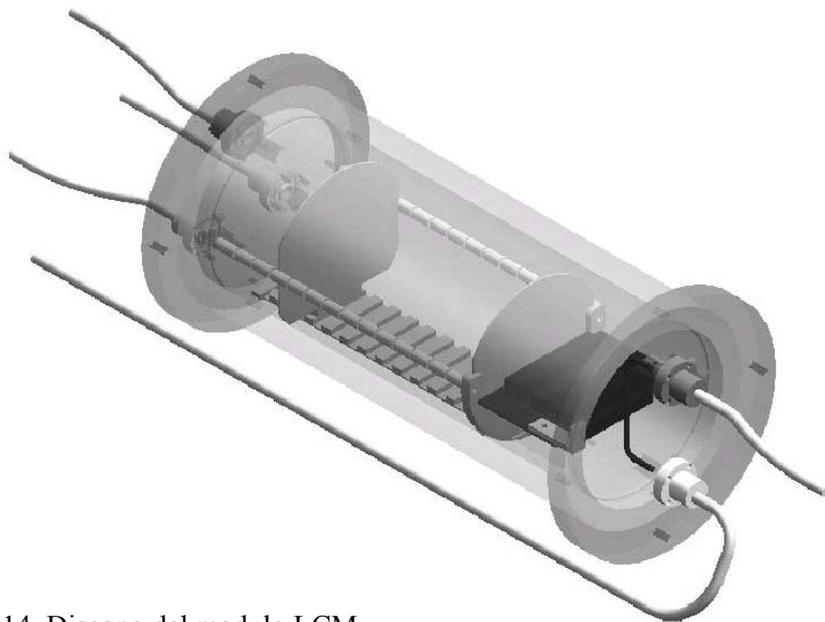


Figura 2-14. Disegno del modulo LCM.

2.4.2 Slow Control

Si può notare come la complessità dell'apparato ANTARES, sia concretamente aumentata, insieme all'assolvimento dei specifici bisogni di funzionalità del rivelatore. Pertanto, si è reso necessario un monitoraggio costante dei parametri e delle caratteristiche dei vari apparati, costituenti il rivelatore, che operano in fondo al mare, a 50 km di distanza dalla shore station, e sono poco accessibili. Questo monitoraggio prende il nome di SC (Slow Control) e si realizza, tramite l'interrogazione periodica dei dispositivi più critici e nella relativa trasmissione dei risultati verso il centro di comando, situato nella shore

station. Naturalmente, è altrettanto necessario che all'invio dei dati che permettono di osservare la situazione del rivelatore corrisponda la possibilità di inviare comandi e di intraprendere azioni che mirano alla tutela della sicurezza e alla ottimizzazione del funzionamento dell'intero rivelatore. Per realizzare questo controllo remoto, dunque, si è reso necessario l'introduzione di canali di trasporto dell'informazione dal rivelatore verso la shore station e viceversa.

Il modo più economico e semplice per realizzare il trasporto dei dati di SC è quello di inviarli insieme ai dati fisici trasmessi dai circuiti ARS1. È possibile ottenere questa trasmissione, senza creare equivoci tra i due tipi di dati, attraverso l'adozione di una tipica rete LAN (Local Array Network) commerciale, i cui nodi utilizzano schede Ethernet che trasmettono i dati attraverso il protocollo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)³. Il meccanismo si basa sulla trasmissione di pacchetti di dati, che vengono confezionati e inviati in istanti differenti dal programma gestore del protocollo. Poiché il flusso dei dati di SC costituisce una piccola percentuale (~ 1%) [12] del flusso complessivo, i dati di SC arrivano alla shore station con lentezza rispetto ai dati fisici, da ciò deriva il nome del meccanismo.

2.4.3 Rete di moduli

A dispetto del fatto che i dati di SC costituiscono una piccola parte dei dati inviati complessivamente, è stato calcolato che il flusso complessivo previsto di dati trasmessi da ogni LCM è di 120 Mbit/s massimi, mentre il suo valore

³ Protocollo su cui si basa la connessione della rete mondiale Internet.

medio è ~ 35 Mbit/s [15]. Questa quantità di dati moltiplicata per il numero di piani presenti in una stringa determina un flusso enorme, pari a 3600 Mbit/s massimi per stringa.

Un'ovvia considerazione economica prevede l'utilizzo di un numero minimo di fibre ottiche per la connessione dei vari moduli, a partire dal cavo EOC di 50 km. È stato calcolato che il numero minimo di fibre che l'EOC deve contenere è 33, suddivise nel seguente modo:

- 32^4 per dati e SC (due per ogni stringa, 1 in una direzione + 1 nella direzione opposta);
- 1 per il segnale di clock.

Infatti, i segnali di trigger sono di pertinenza solo dell'apparato in fondo al mare e pertanto non occorre propagarli fino alla shore station.

Il numero minimo di fibre necessarie per l'Interconnecting Cable, lungo circa 200 m, è 4:

- 2 per dati e SC (1 in una direzione + 1 nella direzione opposta);
- 1 per il segnale di clock;
- 1 per il segnale di trigger.

Per ridurre al minimo il numero di fibre necessarie per l'EMC è stata fatta un'ulteriore suddivisione, e sono stati individuati 6 settori formati da 5 piani l'uno, in modo che la trasmissione dei dati, dei segnali di clock e di trigger avvenga solo attraverso questi 6 settori e non attraverso tutti i 30 piani. Dunque i dati provenienti

⁴ È stata studiata la possibilità di utilizzare un'unica fibra per trasmettere e ricevere da ogni stringa ma l'effetto di cross-talk generava un numero di errori troppo elevato.

da 5 LCM sono riuniti insieme e sono trasmessi globalmente verso la shore station. Una rappresentazione schematica è mostrata in figura 2-15. L'ottimizzazione del numero di settori per stringa e del numero di piani per settore deriva dalla tecnologia consolidata disponibile per le schede Ethernet, che attualmente possono garantire una trasmissione con un flusso massimo di dati di ~ 1 Gbit/s.

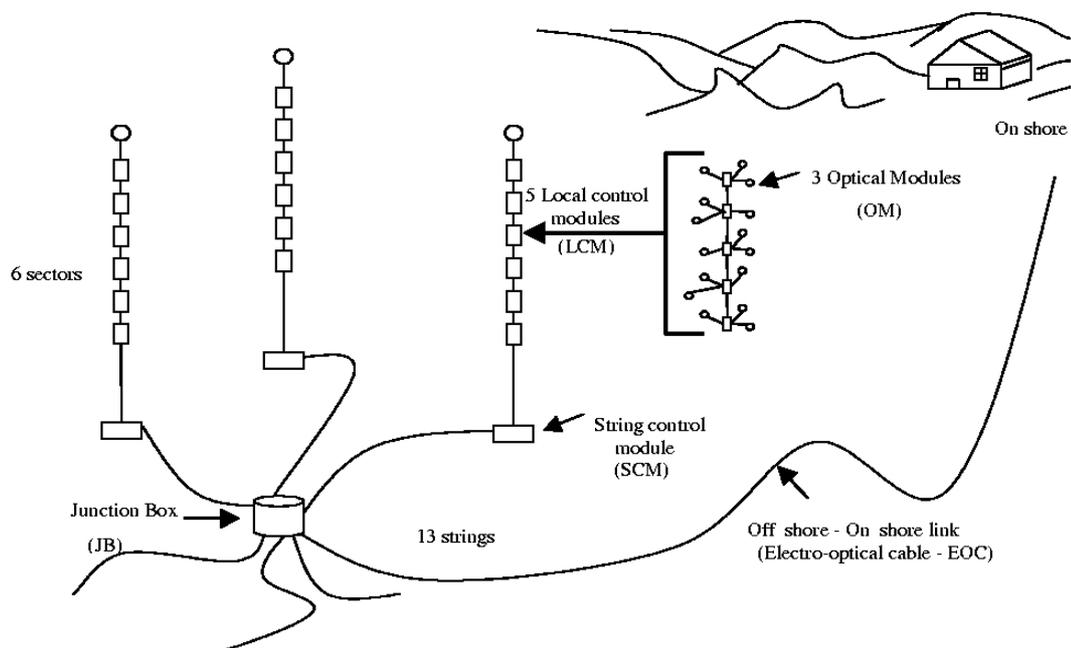


Figura 2-15. Rappresentazione del rivelatore suddiviso in stringhe, settori e piani.

Dunque tra i 5 LCM che servono un settore se ne individua uno, che per motivi di opportunità deve essere centrale. Questo modulo deve raccogliere i dati del suo piano e aggiungerli a quelli degli altri 4 piani (2 sopra e 2 sotto come mostra la figura 2-16) e deve trasmetterli verso la shore station. Per indicare il compito particolare di questo modulo gli si attribuisce il nome di MLCM (Master LCM).

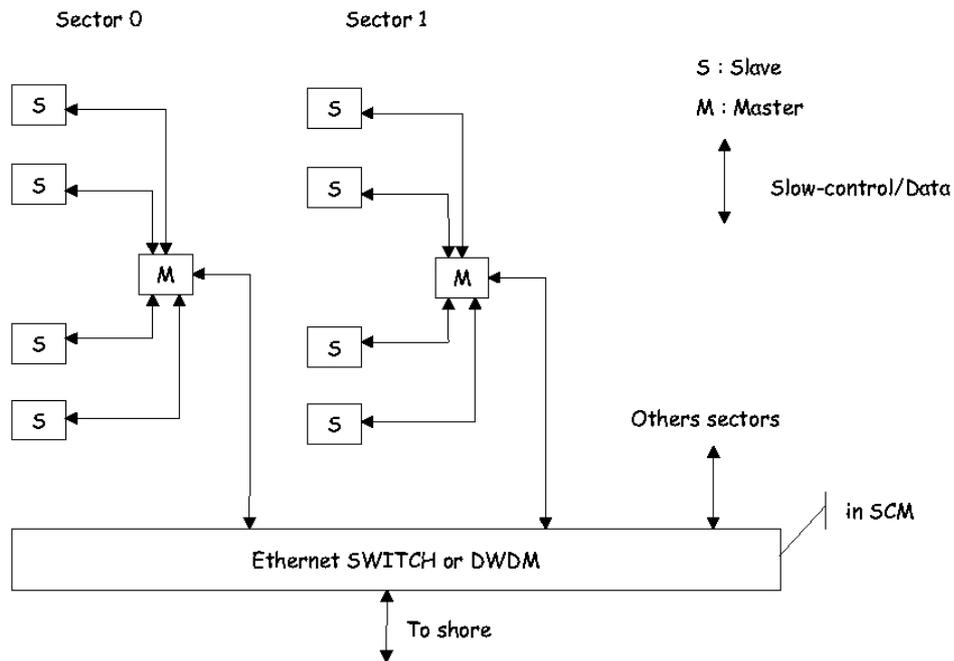


Figura 2-16. Disposizione dei moduli LCM slave e master in un settore.

Dunque il numero di fibre contenute nell'EMC sarà di 21, così suddivise:

- 8 per i dati e l'SC di cui:
 - 6 per l'invio dei dati relativi a ciascun settore
 - 2 per distribuire i dati dagli SLCM(Slave LCM) agli MLCM e viceversa
- 7 per i segnali di trigger di cui:
 - 6 per l'invio del segnale di trigger a ciascun settore
 - 1 per organizzare una struttura daisy chain (vedi figura 2-17)
- 6 per distribuire i segnali di clock a ciascun settore

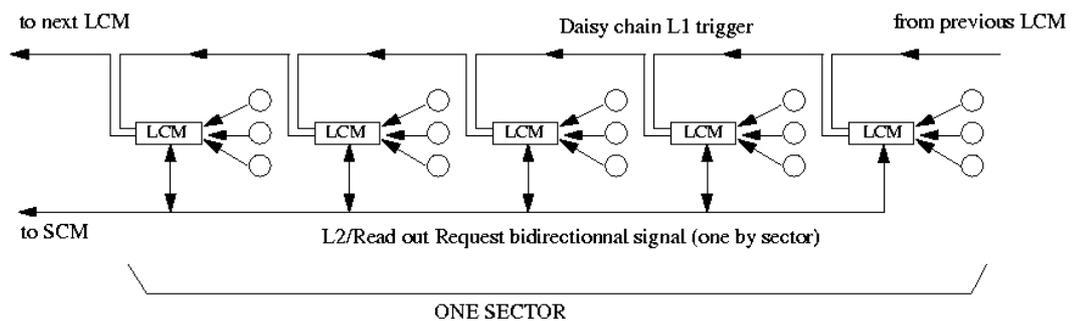


Figura 2-17. Struttura daisy chain del segnale di trigger L1 tra moduli LCM.

Per l'EMC, a differenza di quel che avviene per l'Interconnecting Cable e per l'EOC, si utilizza un'unica fibra per la trasmissione dei dati, da/verso un settore in ambedue le direzioni, in quanto le distanze in gioco sono minori e gli effetti di cross-talk sono trascurabili.

Il metodo che permette di convogliare lungo un'unica fibra ottica due flussi di informazioni (per brevi percorsi) che viaggiano in direzioni opposte, evitando ogni sovrapposizione dei segnali e quindi errori di dati, si basa sull'utilizzo di due differenti lunghezze d'onda, che viaggiano sullo stesso mezzo senza interferenze dell'una con l'altra.

Poiché ai fini della trasmissione dei dati ciascuna stringa è collegata alla shore station con due sole fibre mentre ce ne sono 6 che trasportano i dati di tutta la stringa, si impone la presenza di un modulo che permetta di convogliare i 6 flussi di dati che viaggiano lungo le 6 fibre differenti in una sola verso la shore station. Naturalmente il flusso opposto di segnali provenienti su un'unica fibra deve essere indirizzato sulle 6 fibre dell'EMC. Un tipo di soluzione adottato che permette questa divisione e riunificazione dei flussi di dati, è chiamato DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) e si basa sul concetto proposto in precedenza, cioè ad ogni flusso è associata una lunghezza d'onda differente. Il dispositivo che realizza questa funzione, il DWDM Mux/Demux [16], si trova nell'SCM (String Control Module) che verrà illustrato nel prossimo capitolo.

2.5 Calibrazione

2.5.1 Calibrazione temporale

Sebbene siano state prese delle precauzioni circa la correttezza nella misura del tempo, è possibile provare che ciò non è sufficiente: infatti il sistema di misura del tempo descritto è un sistema aperto, dal momento che non vi è alcun controllo che i fotomoltiplicatori rivelino impulsi luminosi in istanti noti di tempo.

È ragionevole pensare che, passando dalla condizione atmosferica alle profondità marine, molte caratteristiche possano variare, quindi è probabile che una calibrazione fatta prima di collocare il rivelatore non sia valida dopo l'installazione. Inoltre, è difficile tenere conto di tutti i possibili ritardi introdotti dai collegamenti interni ed esterni ai vari moduli e dalla necessaria elaborazione, dal momento che, un modello matematico, per quanto dettagliato, è sempre differente dalla realtà.

Dunque, a causa della criticità della misura di tempo, è stato deciso di utilizzare una calibrazione permanente [17] formata da 3 sistemi indipendenti [18]. Il vantaggio ulteriore di questa scelta è quello di permettere una diagnostica sul funzionamento effettivo degli OM.

Il primo sistema di calibrazione permette di misurare gli sfasamenti relativi dei segnali di clock di ogni LCM attraverso la restituzione del segnale da parte dell'LCM alla shore station. In questa sede è possibile, dunque, misurare il ritardo di propagazione e predisporre la correzione. Quindi, per il funzionamento di questo sistema, occorre prevedere l'invio di un segnale attraverso la stessa fibra in cui viaggia il segnale di clock, pertanto questa fibra deve essere usata in

ambidue le direzioni. Inoltre, occorre tenere in conto che le fibre che trasportano i segnali di clock si riunificano fino a diventare una sola a livello della JB. Dunque occorre implementare un meccanismo che permetta la trasmissione di un solo modulo LCM per volta. Un semplice sistema che soddisfi queste richieste si basa sulla possibilità di trasmettere un basso flusso di dati, in modo seriale, attraverso il segnale di clock. Il meccanismo si basa su una piccola alterazione della successione regolare della sequenza di impulsi caratteristici del segnale di clock, trasmettendo a distanza di diversi impulsi un bit che rappresenta la presenza dell'impulso e determina la trasmissione di un 1, mentre l'assenza causa la trasmissione di uno 0 o viceversa. Naturalmente questo provoca l'aumento del disturbo di jitter, ma utilizzando opportune attenzioni si può rendere tollerabile questo aumento [19].

I dati così trasmessi possono essere interpretati come comandi o richieste di dati in base ad un opportuno protocollo, per cui questo sistema diventa un vero e proprio SC alternativo, molto utile soprattutto in presenza di guasti del canale principale di acquisizione e controllo. Dunque, la trasmissione del segnale di clock da parte di un LCM verso la shore station, ai fini della calibrazione temporale, potrebbe avvenire a causa di un comando inviato sul segnale di clock stesso, con la partecipazione del sistema SC, il quale regola l'ordine che gli LCM devono rispettare nell'invio del segnale di ritorno.

Il secondo sistema di calibrazione temporale si basa sulla misura del tempo di arrivo dei fotoni per mezzo dell'ARS1, con l'accensione di un led collocato dentro ogni OM. I led potrebbero essere accesi tutti insieme, in modo da

trasmettere i dati alla shore station e trarre i risultati sulla calibrazione temporale [17].

Il terzo sistema si basa sulla misura dei tempi di arrivo su più OM dei fotoni, provenienti da sorgenti esterne chiamate OB (Optical Beacon). I vantaggi di questo tipo di calibrazione sono le informazioni ottenute circa l'attenuazione della luce nell'acqua e la sua velocità che in base alle informazioni disponibili come la temperatura, la salinità, la distanza possono fornire i dati per un modello matematico efficiente. Questo sistema di calibrazione consiste di 6 OB per stringa di cui 5 costituiti da emisferi, contenenti led che emettono luce blu chiamati Led Beacon (vedi figura 2-18), e un laser che emette luce verde, chiamato Laser Beacon. I 5 Led Beacon saranno distribuiti lungo la stringa, posizionati sulla sommità di OMF opportuni, mentre il Laser Beacon sarà sistemato alla base della stringa.

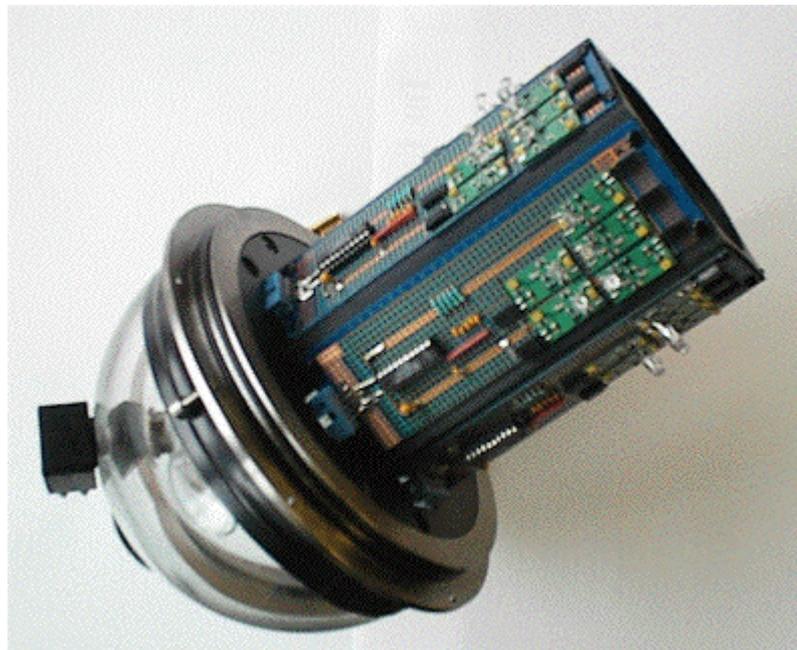


Figura 2-18. Fotografia di un prototipo di Led Beacon.

2.5.2 Calibrazione spaziale

In realtà, la precisione sul calcolo della traccia del muone e quindi del neutrino, non dipende solo dalla precisione dei tempi di rivelazione ma anche dalla precisa conoscenza della posizione del fotomoltiplicatore. È infatti impensabile che le stringhe essendo flessibili rimangano sempre nella stessa posizione iniziale. Si può immaginare che le correnti, che sono variabili nel tempo in direzione e in intensità, modifichino la forma rettilinea delle stringhe in forme più o meno arcuate, ma sempre vincolate dalla base al fondo attraverso il peso morto contenuto nel BSS. Neppure si può pensare ad un sistema che le raddrizzi a 2400 metri di profondità. È stato dunque adottato un sistema che, permettendo la localizzazione di alcuni punti della stringa, insieme ad altre informazioni, riesca a ricavarne la forma assunta dal cavo EMC e quindi la posizione dei fotomoltiplicatori rispetto ad esso.

La localizzazione dei punti della stringa avviene attraverso l'uso di segnali sonori che si propagano in acqua. Infatti, attraverso un sistema di triangolazione, dalla conoscenza della velocità del suono nell'acqua e dalla misura del tempo trascorso, è possibile risalire alla posizione tridimensionale del punto. In particolare, è sistemato un transponder in posizione fissa alla base della stringa, che emette impulsi sonori alla frequenza di 40-60 kHz mentre 3 idrofoni sono sistemati lungo la stringa presso alcuni OMF come mostra la figura 2-19. Il sistema è molto utile anche per localizzare le stringhe durante l'installazione e il recupero.

La descrizione di un piano è dunque completa ed è possibile osservarne la struttura che la descrive in figura 2-20.

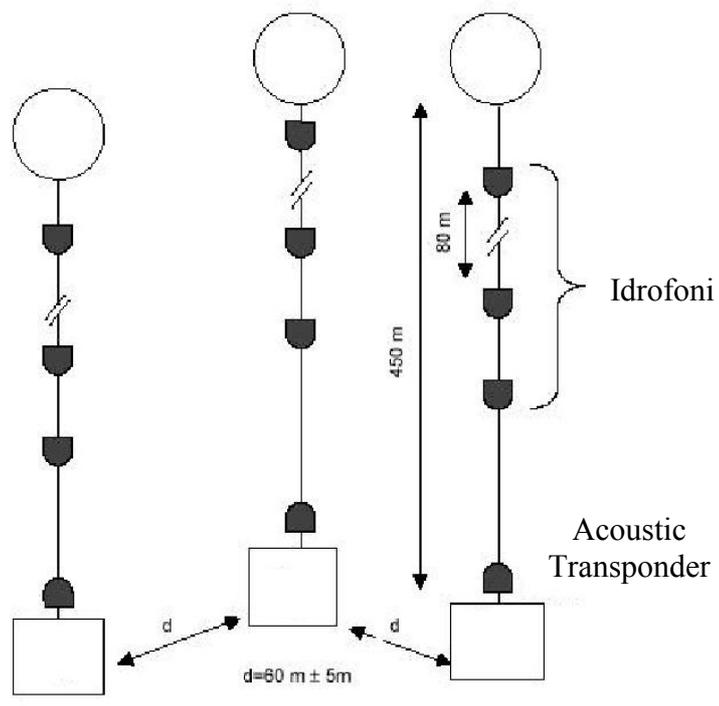


Figura 2-19. Distribuzione dei dispositivi Idrofoni e Acoustic Transponder.

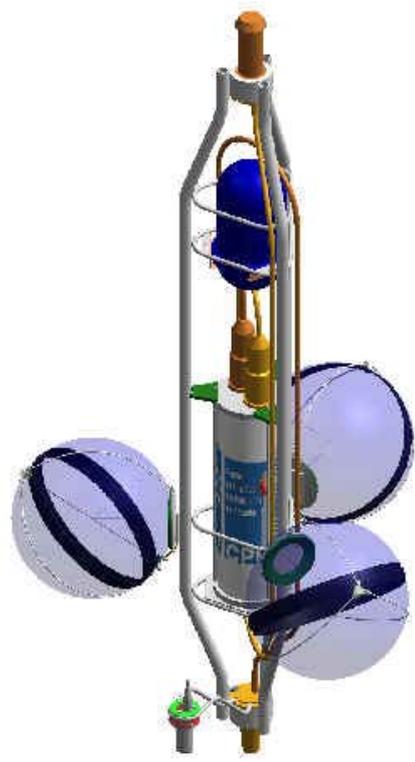


Figura 2-20. Distribuzione dei vari moduli in uno storey.

Le altre informazioni disponibili sono: la pendenza e l'angolazione rispetto al nord misurate rispettivamente da un inclinometro e una bussola (nel seguito indicati con la terminologia ufficiale di ANTARES Tiltmeter e Compass) che sono presenti in ogni LCM e SCM. Ancora altre informazioni disponibili attraverso dispositivi commerciali sono: la velocità del suono nell'acqua, la pressione e la salinità (attraverso una misura di conducibilità). Tutte queste informazioni correlate permettono una ricostruzione abbastanza precisa delle posizioni cercate. Poiché il movimento delle stringhe causato dalle correnti marine è limitato dalla rigidità del cavo EMC, si pensa che i transitori siano decisamente lenti. Pertanto si possono inviare le informazioni con frequenza non eccessiva (~ 0.1 Hz), commettendo errori trascurabili. Quindi, il carico informativo non appesantisce significativamente la trasmissione dei dati verso la shore station attraverso lo SC.

2.6 Alimentazione

La distribuzione di energia elettrica, necessaria per il funzionamento dei vari dispositivi e sensori, avverrà, logicamente, attraverso la rete di cavi descritti in precedenza, secondo la suddivisione indicata in stringhe e settori, fino a giungere a ciascun LCM.

A causa della lontananza della shore station, risulta più efficiente l'utilizzo dell'alta tensione in corrente alternata. Dunque la shore station fornisce, attraverso l'EOC, energia elettrica a 4500 V 50 Hz AC (Alternating Current) al

modulo JB. In questo modulo avviene una prima trasformazione verso 1000 V AC e distribuita lungo le 16 connessioni con gli Interconnective Cable a ogni stringa. Un modulo comandato dall'SCM e posto in vicinanza ad esso, si occupa della riduzione a 400 V AC, della conversione in corrente continua (400 V DC - Direct Current) e della distribuzione verso i 6 settori della stringa e verso l'SCM. Il nome di questo modulo è SPM (String Power Module). Ogni settore, infine, distribuisce l'alimentazione verso tutti gli LCM, che a loro volta si occupano della riduzione della tensione dai 400 V DC alle basse tensioni, necessarie per l'alimentazione di tutti i dispositivi attivi presenti in ogni piano. La potenza dissipata da ciascuna stringa sarà dell'ordine di 1 kW [12].