



ALLEGATO TECNICO

I FOTOMOLTIPLICATORI

Rev	DESCRIZIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO	DATA
A	Divulgazione interna				

1 I FOTOMOLTIPLICATORI;

1.1 Il modulo ottico

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

Diversamente dagli esperimenti di superficie, i moduli ottici per il km3 devono essere alloggiati in opportuni contenitori resistenti ad alte pressioni (sfere BENTHOS) collegati tra loro ed a terra da un sistema di cavi e connettori elettro-ottici marinizzati.

Ogni singolo modulo ottico sarà composto da:

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

Un'immagine di un modulo ottico assemblato che potrà essere utilizzato come sensore per il rilevamento della scia di luce emessa dal muone per il laboratorio sottomarino sottomarino km3 è mostrata in figura n.18.

Nell'allegato tecnico "I MODULI OTTICI" verrà descritto in modo più approfondito il sistema.



**Figura 1: Modulo ottico assemblato –
 Foto ANTARES**

1.2 Alloggiamento

Come in simili esperimenti sottomarini il PMT e l'elettronica verranno ospitati all'interno di una sfera in vetro borosilicato dal diametro esterno di 43 cm, e dallo spessore di 15 mm.

La sfera, separata in due semisfere, è garantita per resistere ad una pressione di 700 bar.

All'interno di una semisfera viene posizionato il PMT, un gel a base di silicone garantisce l'accoppiamento meccanico ed ottico del fotocatodo al vetro. Il gel è costituito da una mistura liquida nella quale viene immerso il fotocatodo; la sua composizione è tale che, a temperatura e pressione ambiente, essa vulcanizza in poche ore facendo perfettamente aderire il fotocatodo alla sfera.

La parte interna della seconda semisfera, che ospita l'elettronica, è rivestita da una guaina nera. In questa configurazione il PMT può rivelare la luce proveniente solo da metà angolo solido, nella direzione in cui è stato rivolto il fotocatodo. Viene così mantenuta, almeno in parte, l'informazione sulla direzione del fotone incidente.



Figura 2: Benthos Sfera - Particolare delle due semisfere



Una volta che il PMT e l'elettronica di read-out sono stati posizionati all'interno, il modulo ottico viene chiuso in atmosfera di azoto ad una pressione di circa 0.1 atm. La tenuta meccanica dell'OM è assicurata dal fatto che la pressione interna del modulo è inferiore rispetto a quella esterna (1 atm in aria, 350 atm nel sito a 3500m di profondità).

La regione di accoppiamento delle due semisfere presenta, inoltre, una particolare lappatura che permette la perfetta chiusura e la tenuta della sfera anche in aria. Ulteriori accorgimenti per garantire il vuoto statico consistono nell'applicare tra le parti in contatto un sottile velo di grasso da vuoto otticamente trasparente.

La chiusura del modulo viene completata rivestendo la zona di contatto esterna con speciale nastro adesivo protetto da una guaina di neoprene.

La collaborazione ha progettato e realizzato una opportuna camera da vuoto che permette l'assemblaggio dei moduli ottici con una procedura semi-automatizzata (figura N.2).

Il borosilicato della Benthos-sfera pone un forte filtro ottico a lunghezze d'onda minori di 340 nm (assorbimento ~25%) che, comunque, non vengono trasmesse in maniera efficiente dall'acqua (Labs ~ 1m) e dunque non sono di particolare interesse per il nostro esperimento.

Il gel di silicone, che ricopre completamente il fotocatodo, ha una lunghezza di assorbimento che, nel visibile cresce quasi linearmente in funzione della lunghezza d'onda. Per la luce blu (400nm) Labs vale circa 60 cm.

Nonostante l'indice di rifrazione del gel di silicone ($n = 1.40$) non permetta un accoppiamento assoluto con il vetro della sfera ($n = 1.48$), esso è comunque maggiore di quello dell'acqua ($n \sim 1.35$ alla profondità di 3000m) e la perdita di luce è, dunque, piccola. E' stato misurato che l'accoppiamento tra il vetro della sfera ed il gel è pressoché trasparente alla luce blu (attenuazione <2%).



1.3 Schermaggio magnetico

E' ben noto che il campo magnetico della Terra peggiora l'efficienza di raccolta dei fotoelettroni nei PMT. Infatti il campo B_{Terra} devia in maniera significativa le traiettorie dei fotoelettroni tra il fotocatodo ed il primo dinodo, in funzione della loro posizione relativa al Nord magnetico terrestre.

Tale effetto è notevolmente amplificato per i fotomoltiplicatori di grande area, quali quelli che la collaborazione intende utilizzare.

Lo schermaggio del PMT dalle linee del campo magnetico viene effettuato rivestendo il fototubo con una gabbia di mu-metal, materiale con alta permittività magnetica. La gabbia consiste di una rete (filo di mu-metal, diametro 0.1mm), sagomata attorno al PMT, le cui maglie sono opportunamente distanziate per ottimizzare il rapporto tra la qualità dello schermaggio magnetico e la perdita di fotoni dovuta alla copertura del fotocatodo.

Caratteristiche dei PMT

E' già stato messo in evidenza che il costo complessivo del progetto limita il numero di moduli ottici utilizzabili a circa 10.000, cosicché la parte strumentata dei telescopi Cherenkov sottomarini è una frazione trascurabile del volume di interazione dell'intero rivelatore (circa 1/108).

Dunque la efficienza di raccolta ed amplificazione del segnale luminoso è un parametro di qualità molto importante per effettuare la scelta dei sensori ottici.

La maggior parte delle collaborazioni impegnate nello stesso settore (DUMAND, AMANDA, NESTOR, ANTARES) ha individuato nei fotomoltiplicatori di larga area i sensori ottici più affidabili. L'esperimento NT-200 Baikal è l'unico ad utilizzare fototubi ibridi Philips XP-2600 e Quasar-370 aventi, comunque, aree di raccolta confrontabili.



Figura 3: schermo in u metal
Foto Antares

I PMT scelti per questi esperimenti hanno un fotocatodo emisferico dalla caratteristica forma “a fungo” che permette di ottimizzare le caratteristiche temporali dei segnali generati da fotoni incidenti in parti differenti del fotocatodo.

I differenti PMT utilizzati hanno un diametro variabile da 8” (AMANDA) a 14” (NESTOR). Il rivestimento del fotocatodo è di bialkali (tipicamente SbKCs) che ha un’alta efficienza quantica ed una bassa emissione termoionica.

La collaborazione NEMO è attualmente impegnata nel caratterizzare alcuni modelli di PMT EMI (diametro 8”) e Hamamatsu (diametro 10”) presenti sul mercato ed un nuovo prototipo di fototubo da 13”, realizzato dalla Hamamatsu su nostre specifiche.



Il programma dei lavori prevede la caratterizzazione di fototubi di prossima generazione, per i quali i tempi di produzione siano compatibili con i tempi di realizzazione del km3.

Il test del fototubo è effettuato ponendo lo stesso in una “camera oscura”, ed illuminandolo con una sorgente puntiforme di luce blu.

Poiché la banda visibile blu-verde (420-480 nm) è l'unica che si trasmette per lunghe distanze in acqua (Labs>10m) le misure vengono condotte tutte con sorgenti piccate in questa regione spettrale.

La collaborazione ha realizzato un'ampia camera oscura (3.4 m³) dotata di un sistema di acquisizione dati per l'esecuzione delle misure di caratterizzazione dei fototubi (figura N.3).

Nella camera è posizionato un sistema di scansione per l'analisi puntuale della superficie del PMT. Una fibra ottica, connessa ad una sorgente laser (480 nm, 50 psec FWHM), è posta sul sistema di movimentazione controllato da un PC.

Lo stesso PC controlla l'acquisizione dei dati e il timing di emissione della sorgente. Misure bolometriche della radiazione incidente permettono la determinazione assoluta della efficienza quantica del fotocatodo.

Il confronto tra i differenti modelli di fotomoltiplicatori viene eseguito sulla base dei seguenti parametri: l'area efficace, la risoluzione in energia e la risoluzione temporale.

Area efficace del PMT

L'area efficace è definita come il prodotto tra l'area del fotocatodo e l'efficienza di raccolta della luce. In generale l'efficienza del PMT è una funzione del punto di incidenza della luce sul fotocatodo e dell'angolo di incidenza della luce.

Si è potuto verificare che la distribuzione del biakali è pressoché omogenea su tutto il fotocatodo, mentre la efficienza di raccolta decresce muovendosi dal polo verso la regione equatoriale del fototubo.



E' stato inoltre dimostrato che la efficienza di raccolta aumenta sensibilmente per la luce incidente ad un angolo prossimo a 90° poiché il fotone può essere convertito da due parti opposte del fotocatodo.

1.4 Studio dell'ampiezza del segnale del PMT

In condizioni di operatività il PMT presenta una differenza di potenziale tra fotocatodo ed anodo, dell'ordine del kV. I fotoelettroni prodotti sul fotocatodo vengono accelerati e moltiplicati da un sistema di dinodi che amplificano il segnale primario e producono in uscita un segnale formato ed analizzabile.

In prima approssimazione maggiore è la differenza di potenziale tra anodo e catodo migliore è l'amplificazione del segnale.

Poiché, però, dai dinodi vengono amplificati sia i segnali di fotoni sia il rumore elettronico (corrente oscura), bisogna identificare un PMT poco rumoroso e scegliere la opportuna tensione di alimentazione. Il maggior problema causato da una "rate" alta di corrente oscura è, in fase di analisi, la identificazione di false coincidenze temporali tra PMT che simulano il passaggio di un muone.

Il rumore anodico, che ha un andamento pressoché esponenziale, è generato da diverse cause: i segnali di ampiezza minore di quelli prodotti da un singolo fotoelettrone (PE) sono causati dalla moltiplicazione di elettroni prodotti all'interno dei dinodi; segnali di ampiezza di maggiore o uguale ad 1 PE sono dovuti prevalentemente da elettroni termoionici emessi dal fotocatodo.

La tensione di alimentazione viene fissata in modo che vi sia circa un fattore 10 tra l'ampiezza dell'impulso medio dovuto ad un singolo PE ed il fondo elettronico. Questo corrisponde ad un guadagno (gain) di almeno $5 \cdot 10^7$. Poiché è previsto un peggioramento delle prestazioni del PMT con il tempo, si richiede che il PMT abbia un gain di 108.

La grandezza studiata per la caratterizzazione della risposta in energia del PMT è il rapporto picco/valle misurato dallo spettro di carica osservato per segnali di singolo PE. Si



richiede, per la tensione di alimentazione fissata, che il rapporto picco/valle sia maggiore di 2.

E' stato verificato per vari modelli di PMT che, in queste condizioni, la larghezza del segnale di singolo PE varia dal 45% al 70% (FWHM). Una buona risoluzione in energia è importante perché può permettere di discriminare segnali prodotti da tracce di muoni (segnali _ 1 PE) dal fondo prodotto dal 40K (1 PE) e dalla corrente oscura.

In questa fase è importante anche verificare la linearità della risposta del fototubo. La luce Cherenkov rivelata dai moduli ottici dei telescopi per neutrini può variare in ampiezza da 1 PE fino a migliaia di PE, in funzione dell'energia della particella e della distanza della traccia.

E' necessario che il PMT sia capace di coprire un range dinamico quanto più ampio possibile mantenendo le caratteristiche di linearità della risposta. Studio della risposta temporale del PMT

La risoluzione temporale del fototubo è un fattore di qualità importantissimo perché è proprio sulla risposta temporale del PMT al segnale Cherenkov che si basano gli algoritmi di ricostruzione della traccia.

Il segnale elettrico prodotto da un fototubo è ritardato, rispetto a quello del fotone incidente, dal "transit time" (TT) del foto-elettrone tra il fotocatodo ed il primo dinodo e dal tempo di amplificazione del segnale all'interno dei dinodi. In entrambi questi processi fluttuazioni statistiche e sistematiche contribuiscono a peggiorare la risoluzione temporale del fototubo (Transit Time Spread: TTS).

Le amplificazioni del segnale nei dinodi producono un time jitter del segnale. Il time jitter si riduce all'aumentare dell'ampiezza del segnale. Nei PMT di larga area, comunque, queste fluttuazioni sono trascurabili rispetto a quelle provocate dalle imperfezioni dell'ottica elettrica e della geometria del fotocatodo.

Ne risulta che il tempo di transito tra fotocatodo e primo dinodo non è uguale per fotoelettroni prodotti in parti differenti del fotocatodo.

Il TTS definisce la risoluzione temporale del PMT, che si richiede sia minore rispetto alla indeterminazione di 1.3 nsec, non eliminabile, dovuta alla indeterminazione nella determinazione della posizione del PMT (ricavata per via acustica). La misura del TTS è fatta operando ad un gain di $5 \cdot 10^7$.

Lo studio del PMT prevede anche lo studio delle emissioni dette di "pre-pulse" e "after-pulse" causate, le prime, da fotoelettroni che "saltano" il primo dinodo, le seconde da emissioni successive all'interno dei dinodi. Pre-pulses e after-pulses sopra la soglia di rivelazione possono simulare eventi di muon-bundles.

1.5 Primi risultati

Le prime misure mostrano che fototubi da 8" (Hamamtsu R5912, Hamamatsu R5912-02, EMI 9353KB, EMI 9355KB) pur avendo un'area efficace molto minore (vedi tabella N.1), mostrano caratteristiche migliori rispetto ai fototubi con diametro maggiore.

In particolare è stata verificata una bassa corrente oscura ($< 1\text{KHz} @ 1\text{PE}$) una buona efficienza e omogeneità del fotocatodo, una buona risoluzione di segnali da 1 PE (circa 30%), una buona risoluzione temporale ($< 3\text{nsec FWHM}$), bassa dipendenza dal campo magnetico terrestre (dopo la schermatura).

Fototubi EMI da 8" verranno usati dalla collaborazione per instrumentare il test site di Catania a 2000m di profondità.

Tutti i PMT del modello selezionato per il km³, dovranno essere caratterizzati con le misure sopra descritte. Questo permetterà sia la ottimizzazione dei programmi di ricostruzione Montecarlo, sia un costante controllo di qualità sulla fornitura dei fototubi.

1.6 R&D di sensori ottici non convenzionali

La collaborazione sta analizzando l'opportunità di sostituire i PMT di larga area con sistemi integrati costituiti da grandi collettori di luce (coni di Winston, lenti di Fresnel) e fotomoltiplicatori di piccole dimensioni (2").

Il sistema permetterebbe di aumentare la superficie e l'angolo solido di raccolta, di migliorare la risoluzione temporale del rivelatore e di ridurre la potenza di alimentazione



PROGETTO NEMO
Allegato: I FOTOMOLTIPLICATORI

Data creazione 25-10-2001 15:26
Pagina 12 di 12
ALL-Moduli_Ottici-Rev-A.doc
REV: A

del modulo ottico. Le simulazioni vengono condotte con un software di Ray Tracing, ed è in fase di studio anche la marinizzazione dei moduli ottici. Il completamento della fase di R&D è prevista nel 2002.