

CAPITOLO 5

Stima della frequenza dei segnali dovuta al ^{40}K

5.1 Simulazione dei segnali registrabili con i fotomoltiplicatori.

Nei capitoli precedenti, dopo aver illustrato brevemente la motivazione per un apparato Čerenkov sottomarino dedicato all'astronomia per neutrini, abbiamo affermato che tale apparato sarebbe limitato da un "rumore ottico" ambientale prodotto da bioluminescenza e da luce Čerenkov conseguente a decadimenti radioattivi del ^{40}K . Abbiamo quindi motivato l'interesse a realizzare una misura diretta, *in situ*, di tale rumore, della sua frequenza e della intensità dei segnali.

Per realizzare nel miglior modo tale strumento di misura abbiamo lavorato su due fronti: da un lato abbiamo progettato la stazione di misura e studiato tutti i componenti che saranno necessari per la sua realizzazione pratica, dall'altro abbiamo cercato di simulare la radiazione luminosa che può derivare dai processi conseguenti il decadimento del ^{40}K e la propagazione di tali fotoni fino alla superficie dei fotocatodi.

Sulla base di tutto ciò che abbiamo studiato, e che è stato oggetto dei capitoli precedenti di questo lavoro, siamo ora in grado di valutare il comportamento di un modulo ottico, quale quello utilizzato dalla collaborazione NEMO, immerso in un volume di acqua marina. Ci prefiggiamo, in particolare, di stimare la frequenza dei segnali registrabili con i PMT, la loro ampiezza, quante volte ci aspettiamo di misurare singoli fotoelettroni, quante volte segnali più intensi. Vogliamo inoltre valutare se ci dobbiamo aspettare, con due PMT in opportune configurazioni geometriche, segnali in coincidenza o scorrelati.

Il segnale misurabile con i fotomoltiplicatori, inseriti nei moduli ottici, avviene tramite il seguente procedimento:

- per un elevato numero di processi di decadimento del ^{40}K (50.000), tutti generati nell'origine di un sistema di riferimento, con il procedimento di simulazione descritto nel capitolo 2, vengono registrate tutte le informazioni cinematiche relative a tutti i fotoni Čerenkov generati;
- in un volume d'acqua marina che circonda l'origine viene posizionato, con coordinate ed orientamento casuale, uno o due fototubi, nella configurazione geometrica necessaria. Per ogni evento di ^{40}K generiamo 10.000 "posizioni" ottenendo una buona rappresentazione casuale anche delle configurazioni più rare.
- vengono calcolate tutte le eventuali intersezioni tra le traiettorie dei fotoni Čerenkov, di cui è già stata correttamente simulata la propagazione in acqua, ed i fotocatodi
- per ogni punto di intersezione viene calcolata la probabilità che il fotone giunga effettivamente sul fotocatodo considerando la trasparenza, sia del gel ottico che della sfera di vetro, con le semplificazioni discusse nel capitolo 3
- viene calcolata la probabilità che un fotone incidente in quel particolare punto del fotocatodo generi un fotoelettrone che giunga al primo dinodo, così come descritto nel capitolo 4.
- infine viene calcolato il tempo di formazione del segnale, rispetto al tempo assoluto segnato dall'istante in cui il ^{40}K è decaduto, in base alla velocità di propagazione della luce in acqua ed al percorso totale effettuato dai fotoni prima di giungere sul fotocatodo. Nel calcolare questo tempo abbiamo assunto che tutti i fotoni Čerenkov fossero prodotti nel medesimo punto ed inoltre abbiamo considerato il percorso all'interno del modulo ottico come se fosse avvenuto in acqua. Vedremo che queste approssimazioni, che comportano un errore di circa 2 ns nella stima del tempo di formazione del segnale, non modificano apprezzabilmente i risultati.

5.2 Risultati della simulazione

Per conseguire dei risultati attendibili con questo procedimento è necessario simulare una “adeguata porzione di mare” intorno al modulo ottico per un tempo “sufficientemente” lungo. Per “adeguata” si intende una sfera il cui raggio sia molto maggiore della lunghezza di interazione dei fotoni, mediata sulle lunghezze d’onda rilevanti, che risulta essere pari a circa 37m (capitolo 2). Supponiamo quindi che il “rumore ottico” misurabile con un PMT possa essere generato in un qualsiasi punto interno ad un volume d’acqua contenuto in una sfera, di raggio ~200m, attorno al PMT stesso. Inoltre, considerando il fatto che ci aspettiamo di misurare una frequenza di segnale, dovuta ai singoli fotoelettroni, dell’ordine dei 10KHz, è opportuno che questa sfera sia simulata per un tempo dell’ordine del secondo. In questo caso, infatti, otterremmo circa 10^4 segnali e quindi potremmo stimare la frequenza di conteggio per segnali dovuti ai singoli fotoni, con un errore statistico relativo dell’1%. Questo errore è un ordine di grandezza inferiore rispetto alle altre incertezze introdotte con la simulazione semplificata del modulo ottico, (si veda il capitolo 3) che comporta un errore relativo dell’ordine del 12%. Tale quindi sarà l’errore relativo finale sul valore della frequenza di conteggi aspettati. Simulare il fondo ottico, generato, in un secondo, in una sfera di raggio ~200m, significa far decadere $\sim 10^{12}$ atomi di ^{40}K e quindi tracciare $\sim 10^{14}$ fotoni. Va dimostrato però che tutto il volume d’acqua contenuto nella sfera con 300m di raggio contribuisca effettivamente al “rumore”. Per far ciò abbiamo effettuato delle simulazioni con sfere di raggio crescente, da 5m a 100m.

I dati riportati in figura 5.1 rappresentano la frequenza di conteggio aspettata per ogni PMT, in funzione del raggio, assumendo per l’acqua marina le proprietà ottiche misurate nel sito di

Figura 5.1 –

??

Capo Passero ad una profondità di circa 3500m. I flussi di fotoni sono stati stimati seguendo una procedura molto simile a quella descritta nel paragrafo 5.1. I dati relativi ai differenti volumi di acqua simulati sono stati utilizzati per estrapolare il flusso in un mezzo infinito (Φ_∞) il cui valore aspettato risulta pari a $425 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Sebbene l'errore statistico sia dell'ordine dell'1%, le incertezze introdotte dall'interpolazione lineare effettuata sui coefficienti di assorbimento e di attenuazione così come le incertezze sull'attività del ^{40}K introducono degli errori maggiori da noi stimati, in modo conservativo, pari al 10%.

In conclusione la nostra stima del flusso di fotoni Čerenkov in un volume d'acqua infinito, con le proprietà ottiche tipiche del sito di Capo Passero, è pari a

$$\Phi_\infty = 425 \pm 43 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

La stima della frequenza di segnali aspettata dei nostri due PMT è stata ottenuta con il procedimento descritto nel paragrafo 5.1 e il risultato ottenuto è pari a

$$F_\infty^{8''} = 33.6 \pm 3.5 \text{ kHz}$$

per il modulo ottico con il fotomoltiplicatore numero seriale 874. Con il medesimo procedimento, nella stessa simulazione, abbiamo stimato la frequenze dei conteggi per segnali corrispondenti a 2 o più fotoelettroni; i risultati ottenuti per il PMT numero seriale 874 sono riassunti della tabella 5.1.

Tabella 5.1.

	$N_{pe} = 1$	$N_{pe} = 1$	$N_{pe} = 1$
Frequenza aspettata [Hz]			

Un'altro parametro importante nella caratterizzazione del rumore ottico di fondo sono le coincidenze temporali misurabili tra due PMTs vicino, in intervalli di tempo dell'ordine del tempo di formazione del segnale Čerenkov stesso.

Queste frequenze di segnale sono state stimate in tre differenti configurazioni geometriche riportate in figura 5.2 ed i risultati sono stati riassunti nella tabella 5.2. Le configurazioni A e B sono quelle previste per la stazione di misura da noi progettata (descritta successivamente nel capitolo 6) mentre la C rappresenta la condizione sperimentale di ANTARES[1] con i cui dati vogliamo effettuare un confronto.

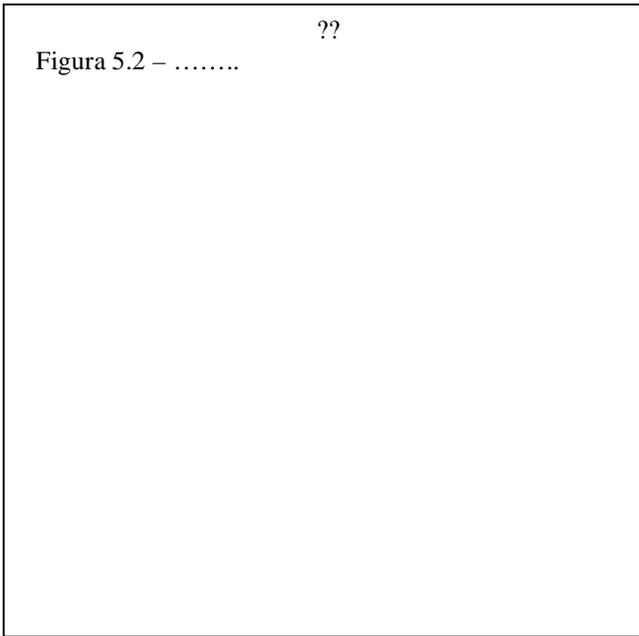
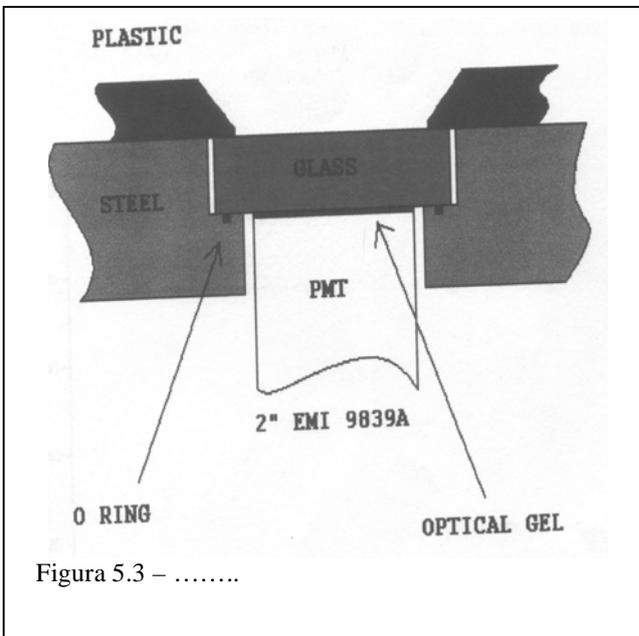


Tabella 5.2

Sempre per confrontare i risultati della simulazione con dati sperimentali abbiamo valutato la frequenza di conteggi per un PMT da 2” nella configurazione geometrica mostrata in figura 5.3 che rappresenta la misura del “rumore ottico” da ⁴⁰K effettuata da NEMO[2]. Per tale misura, supponendo una efficienza di conversione $\eta^{2''} = 16\%$ la simulazione prevede una frequenza di conteggi pari a

$$F_{\infty}^{2''} = 532 \pm 54 \text{ Hz.}$$



5.3 Confronto simulazione-dati sperimentali

Come già discusso nel capitolo 2 i risultati sperimentali con cui è possibile un confronto sono quelli conseguiti dalle collaborazioni NEMO[3], ANTARES[4], DUMAND[5] e NESTOR[6]. DUMAND, al termine del suo esperimento, ha stimato che il flusso di fotoni Čerenkov, dovuto a ^{40}K , a circa 5000m di profondità dell'Oceano Pacifico è pari a $\Phi_{\text{DUMAND}} \sim 500\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, superiore al valore da noi stimato per un volume d'acqua con le proprietà ottiche misurate a Capo Passero. La migliore trasparenza dell'acqua a 5000m può giustificare tale differenza. La collaborazione ANTARES, utilizzando dei PMT emisferici da 8" ha misurato un rumore ottico variabile nel tempo, il cui limite inferiore, assunto come il contributo da ^{40}K , è pari a $\sim 18\text{KHz}$; da questo risultato ha calcolato un flusso di fotoni Čerenkov, da tale sorgente, pari a $\Phi_{\text{ANTARES}} \sim 450\text{cm}^{-2}$. Tale ultimo risultato è in ottimo accordo con il risultato della nostra simulazione. A causa della mancanza di dati precisi sul PMT utilizzato da ANTARES nella misura (principalmente della QE e della efficienza di raccolta sul primo dinodo in funzione della posizione di incidenza della luce sul fotocatodo) non è stato possibile stimare correttamente la loro frequenza di conteggi. Tuttavia assumendo una efficienza di formazione del segnale, mediata sulla posizione del fotocatodo e sull'angolo di incidenza del fotone, pari al 18% abbiamo stimato che la frequenza di segnali aspettata per un apparato sperimentale quale quello utilizzato da ANTARES è pari a $19.1 \pm 2.1\text{kHz}$. Il confronto tra la simulazione ed i risultati sperimentali ottenuti da NEMO con il PMT da 2" è meno soddisfacente. NEMO ha misurato una frequenza di conteggi pari a $407 \pm 4\text{Hz}$ valore molto più basso ($\sim 3\sigma$) di quello previsto. L'accordo tra la nostra simulazione ed i dati sperimentali a disposizione non è quindi completo: l'incertezza nella stima del flusso di fotoni di fondo da ^{40}K che deriva dal non riuscire a riprodurre tutti i risultati sperimentali esistenti giustifica la necessità della costruzione di un opportuno apparato di misura dalle caratteristiche ben note. Nel prossimo capitolo descriveremo dettagliatamente l'apparato di misura utilizzato e le principali caratteristiche dell'elettronica necessaria all'acquisizione dei dati.