

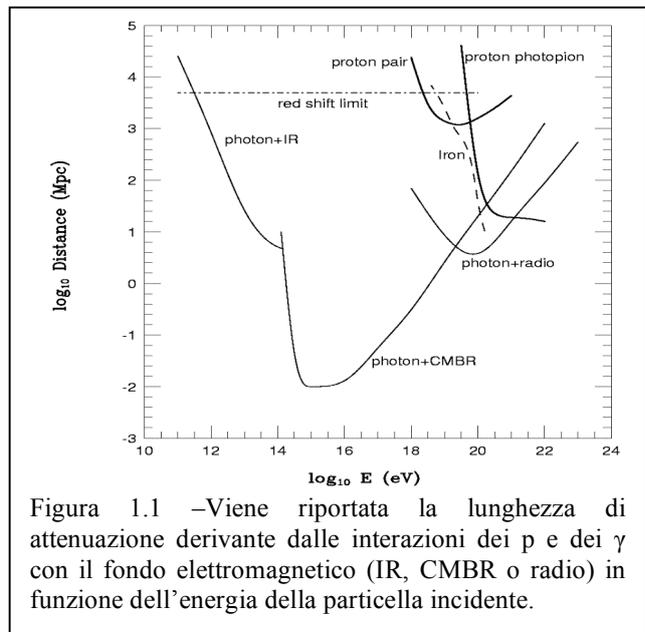
CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

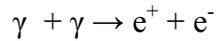
1.1 La fisica dei neutrini

Le nostre conoscenze dell'Universo si basano principalmente sullo studio della radiazione elettromagnetica con la rivelazione di segnali caratterizzati da lunghezze d'onda che vanno dalle onde radio a fotoni di altissima energia. Fotoni di alta o bassa energia, elettricamente neutri e quindi non deviati dai campi magnetici galattici, consentono l'individuazione delle regioni dove sono stati generati ed in generale ne permettono lo studio dettagliato delle proprietà chimiche e fisiche. Tuttavia regioni dense, come il centro delle stelle o i nuclei galattici attivi che vengono attualmente considerati fra i più importanti "motori" di accelerazione delle particelle elementari, sono opachi alla radiazione elettromagnetica e non possono essere studiati con questo strumento. La parte di Universo in cui è possibile lo studio di eventi fisici che portano alla produzione di fotoni di alta energia ($10^2 \text{TeV} < E_\gamma < 10^8 \text{TeV}$) è limitata,

dall'effetto Greisen-Zatsepin-Kuz'min [1] (GZK), a non più di 30Mpc. Con "effetto GZK" si intende una serie di processi di interazione tra protoni (o fotoni) di altissima energia ed il fondo di fotoni (ottici, infrarossi e di microonde) che popolano l'Universo. Tali interazioni hanno l'effetto principale di degradare l'energia delle particelle prodotte nelle "sorgenti". In figura 1.1 riportiamo la

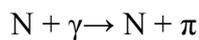


lunghezza di attenuazione, dovuta ai differenti effetti, in funzione dell'energia della particella che si propaga. Per i fotoni l'interazione dominante è con il fondo di microonde (Cosmic MicroWave Background Radiation), tramite la reazione:



Attribuendo al fondo CMBR una energia media pari a 3K ($7 \cdot 10^{-4} \text{eV}$) l'energia di soglia per il fotone che si sta propagando è pari a $E_\gamma \sim 10^4 m_e^2 / 14 \sim 2 \cdot 10^{14} \text{eV}$.

Questo effetto riduce il cammino libero medio dei fotoni a circa 10Kpc per fotoni con $E_\gamma \sim 10^{15} \text{eV}$ rendendo impossibile studiare con i fotoni molto energetici sorgenti extragalattica. Per studiare questi fenomeni non è possibile ricorrere ai neutroni poiché sono particelle instabili con una vita media (misurata nel loro centro di massa) di circa 887s. L'effetto GZK limita l'orizzonte anche di protoni estremamente energetici ($E_p > 10^{20} \text{eV}$) a causa, ad esempio, del meccanismo di fotoproduzione di pioni. I protoni di altissima energia pur se carichi, verrebbero solo debolmente deviati dai campi magnetici galattici e, se non limitati dall'effetto GZK, sarebbero un ottimo strumento di indagini astrofisiche. Limitandoci alla sola reazione di fotoproduzione di pioni singolo nell'interazione di nucleoni (N) su fotoni-bersaglio:



la soglia cinematica per i nucleoni è pari a circa $7 \cdot 10^{19} \text{eV}$. In figura 1.2 si nota che la sezione d'urto del processo, per energie molto superiori a quella di soglia rimane costante e pari a circa $150 \mu\text{barn}$. Risulta quindi limitato a 30 Mpc l'orizzonte per nucleoni con energie maggiori di 10^{20}eV .

Per poter indagare le regioni più interne delle sorgenti astrofisiche così come i fenomeni

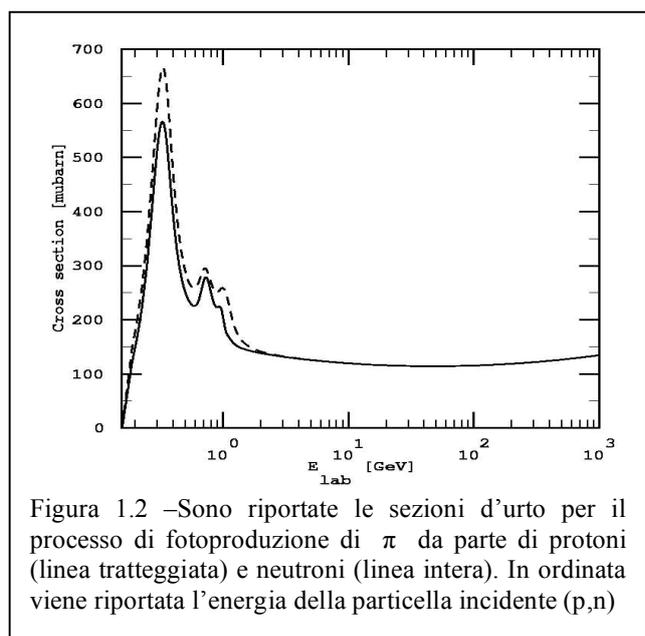
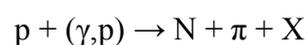


Figura 1.2 – Sono riportate le sezioni d'urto per il processo di fotoproduzione di π da parte di protoni (linea tratteggiata) e neutroni (linea intera). In ordinata viene riportata l'energia della particella incidente (p,n)

altamente energetici e distanti bisogna utilizzare una sonda, neutra e scarsamente interagente, differente da quelle prese in considerazione finora. Il neutrino ha le corrette proprietà per questi studi. Data la sua debole interazione con la materia il neutrino, stabile ed elettricamente neutro, attraversa facilmente le regioni dense dell'Universo, altrimenti inaccessibili ai fotoni, e si propaga per grandi distanze, anche in presenza di campi magnetici, senza deviare dalla sua traiettoria. Lo studio dei neutrini di altissima energia e di origine extragalattica sarà lo strumento principale per l'indagine dei fenomeni più energetici dell'Universo. Rivelare flussi di neutrini di alta energia provenienti da nuclei galattici attivi (AGN) o dai gamma ray burst (GRB) permetterà di avere importanti informazioni sui processi di accelerazione delle particelle che avvengono in prossimità di queste sorgenti ed innanzi tutto di chiarire se la natura di questi processi sia adronica o elettromagnetica. I modelli che tentano di spiegare l'emissione di fotoni di altissima energia in "sorgenti" astrofisiche concordano nel descrivere l'accelerazione delle particelle cariche (essenzialmente protoni ed elettroni) mediante un meccanismo di Fermi del primo e secondo tipo (cioè mediate urti con i fronti d'onda generati dalla sorgente) che porta a spettri in energia proporzionali a E^{-2} . Tuttavia non si è formato ancora un accordo diffuso sulla natura del meccanismo di produzione dei fotoni di alta energia. Questi fotoni potrebbero essere generati, tramite interazioni puramente elettromagnetiche, nell'interazione, tipo Compton inverso, fra gli elettroni accelerati alla "sorgente" ed i fotoni-bersaglio (di bassa energia) che circondano la "sorgente" stessa. Altri modelli prevedono la possibilità di generare fotoni di alta energia tramite la produzione, e successivo decadimento, di π^0 mediante la reazione:

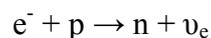


denominata spesso "Astrophysical Beam Dump"

In reazioni analoghe possono essere generati pioni carichi dal cui decadimento verrebbero originati neutrini di altissima energia. L'osservazione di un flusso di neutrini, associato o no a fotoni di alta energia, da una sorgente localizzata nell'Universo indica l'esistenza di meccanismi di produzione di

tipo adronico. La rivelazione di “sorgenti di neutrini di altissima energia” porterebbe un contributo importantissimo alla soluzione del problema legato alla osservazione sperimentale compiuta negli ultimi decenni di sciame iniziati da raggi cosmici con $E > 10^{20}$ eV. Non si riesce ad ipotizzare un “motore” galattico capace di accelerare tali particelle fino ad energie così elevate nello spazio ristretto della nostra galassia caratterizzata da un campo magnetico medio limitato. I neutrini potrebbero provenire da “sorgenti” esterne alla nostra galassia, interagire sulla materia ai bordi della stessa e fornire i raggi cosmici di altissima energia osservati.

Anche lo studio di neutrini con energia molto inferiore (\sim MeV) può essere di grande interesse astrofisico. In un evento di Supernovae, infatti, si ha la produzione di un flusso di neutrini di bassa energia ma molto intenso. Un evento di Supernovae si verifica quando una stella, a seguito della fotodisintegrazione del silicio, si arricchisce di elementi pesanti come nichel e ferro. Questi elementi vanno a formare il nucleo della stella mentre il restante combustibile nucleare si stratifica a gusci intorno al nucleo. Questi elementi non possono essere utilizzati come combustibile nella fusione poiché le loro energia di legame per nucleone rende la reazione endotermica. Dunque il nucleo della stella, senza una pressione di radiazione che controbilanci l’attrazione gravitazionale, collassa finché diviene energeticamente vantaggioso per gli elettroni reagire con i protoni del nucleo per cattura elettronica formando elementi più ricchi di neutroni. La reazione



raffredda il nucleo, poiché i neutrini sfuggono facilmente alla gravità della stella, e questo alimenta il processo di collasso del nucleo fino alla formazione di una stella di neutroni. Il restante combustibile degli strati più esterni della stella, in seguito al collasso del suo nucleo, cade velocemente verso il centro aumentando rapidamente di temperatura; questo processo porta il restante combustibile a bruciare velocemente in un processo esplosivo noto come Supernovae.

L’energia dei singoli neutrini è molto bassa (< 60 MeV) e la singola interazione non sarebbe distinguibile da interazioni di fondo (si veda più oltre lo studio del fondo da decadimento del ^{40}K ,

argomento principe di questa tesi) tuttavia il flusso di neutrini da un evento di SN è talmente intenso da rendere l'evento stesso facilmente rivelabile (l'argomento è descritto con maggiore dettaglio nel paragrafo 1.3).

Lo studio della fisica dei neutrini consentirà notevoli progressi sia in campo cosmologico che nel campo della fisica delle particelle elementari. Diversi modelli prevedono l'esistenza di flussi di neutrini di alta energia con origine extraterrestre. Vari modelli cosmologici tentando di spiegare il fenomeno della materia oscura dell'Universo (la quantità di materia di cui abbiamo potuto percepire l'esistenza tramite osservazioni sperimentali dirette è solo il 10% della materia di cui dobbiamo supporre l'esistenza per spiegare la dinamica delle galassie) ipotizzando l'esistenza di particelle neutre particolarmente energetiche (i neutrini possono essere candidati); modelli supersimmetrici, che ampliano il modello standard prevedendo una simmetria fra bosoni e fermioni rotta durante le prime fasi di evoluzione dell'Universo, prevedono l'esistenza di particelle neutre e massive, interagenti solo debolmente i WIMPs (weakly interacting massive particles) dalle cui annichilazioni potrebbero essere prodotti neutrini di alta energia. I WIMPs, presenti ovunque nell'Universo, attratti dalla forza di gravità potrebbero accumularsi nel centro della Terra o del Sole ed ivi, per elevati valori di densità potrebbero cominciare ad annichilare a due a due. Nel processo di annichilazione si formerebbero particelle con quarks pesanti (charm, bottom) dal cui decadimento sarebbero originati neutrini la cui energia in media potrebbe essere pari ad una frazione rilevante (30%) della massa dei WIMPs. Gli attuali limiti sperimentali diretti sulle particelle supersimmetriche (LEP) e lo stato attuale della teoria ci permette di prevedere flussi misurabili di neutrini da WIMPs, provenienti dal centro della Terra o dal Sole, per $E_\nu > 100 \text{ GeV}$ (referenza Bottino, Moscoso).

Neutrini di energia compresa fra frazioni di GeV e decine di TeV sono anche prodotti negli sciami adronici originati nell'atmosfera dall'interazione di particelle primarie di alta energia, ad esempio tramite la reazione:

$$p, n \rightarrow \pi^\pm (K^\pm) \rightarrow \mu + \nu_\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \nu_\mu + \nu_e$$

Lo studio di tali flussi di neutrini può portare un contributo rilevante alla definizione del puzzle legato alle eventuali “oscillazioni di neutrino”: un neutrino prodotto in un definito autostato di flavour delle interazioni deboli (muonico, elettronico, tauonico) dopo una opportuna propagazione nello spazio potrebbe essere rivelato in uno autostato di flavour (delle Interazioni Deboli). I neutrini atmosferici possono giungere un apparato di misura terrestre dopo aver attraversato o la sola atmosfera ($L \sim 10\text{Km}$ per i neutrini provenienti “dall’alto”) o tutta la Terra ($L \sim 13000\text{Km}$ per i neutrini provenienti “dal basso”). Lo studio dei flussi di neutrini atmosferici osservabili in funzione dell’angolo rispetto alla verticale può permettere di indagare il problema delle “oscillazioni di neutrino” in modo competitivo rispetto ad esperimenti agli acceleratori (CHORUS, NOMAD, KAMIOKANDE, etc). La teoria che prevede il fenomeno di “oscillazioni di neutrino” (ref. Pontecorvo....) prevede che il neutrino, autostato della interazione debole $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$, sia una combinazione lineare di neutrini autostati di massa $\nu_1 \nu_2 \nu_3$. I parametri che regolano la probabilità di oscillazione, fissata l’energia del neutrino e la distanza di propagazione dopo sul quale si vuole rivelare un’eventuale oscillazione, sono la differenza tra i quadrati delle masse (δm^2) dei neutrini $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ (che a sua volta dipende dal “mixing” fra $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ e $\nu_1 \nu_2 \nu_3$) e gli “angoli di mixing” (θ) fra coppie di neutrini. In generale, la probabilità di osservare un neutrino di energia E (misurata in GeV), autostato delle interazioni deboli, di tipo l' se il neutrino iniziale è di tipo l , dopo un percorso L (misurato in Km) è data dalla relazione:

$$P(\nu_l \leftrightarrow \nu_{l'}) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \cdot \delta m^2 \cdot \frac{L}{E} \right)$$

dove, con le scelte effettuate per le unità di misura di E ed L δm^2 è dato in eV^2

Tale formula semplificata è valida nel caso in cui al fenomeno di “oscillazioni” contribuiscono solo due tipi di neutrino.

Nel caso dei neutrini atmosferici considerando i valori possibili per i percorsi (10 o 13000Km) ed i valori possibili per le energie dei neutrini ($0.1\text{GeV} < E_\nu < 1000\text{Gev}$) può essere possibile verificare una eventuale oscillazione con $10^{-4}\text{eV}^2 < \delta m^2 < 10^{-1}\text{eV}^2$.

Da questa breve introduzione risulta chiaro che avere a disposizione un “telescopio” per neutrini permetterebbe studi di notevole importanza sia in campo astrofisico che nel campo delle particelle elementari.

1.2 L'apparato sperimentale NEMO

La rivelazione dei neutrini si basa sulla misura delle caratteristiche cinematiche dei muoni originati nella loro interazione con il volume sensibile dell'apparato o, più comunemente, con la materia sotto l'apparato (la Terra).

La scarsa probabilità di interazione dei neutrini con la materia e l'esiguo flusso aspettato dalle sorgenti astrofisiche implica la necessità di utilizzare, per la loro rivelazione, enormi volumi “sensibili” in cui farli interagire. I muoni prodotti nelle interazione di corrente carica di ν_μ hanno la caratteristica di perdere energia essenzialmente per ionizzazione e quindi di potersi propagare per “lunghi percorsi” nel “volume sensibile” di un eventuale detector. A titolo di esempio il percorso medio di un muone di 10 GeV in acqua è pari a circa 40m. Un elettrone della stessa energia, originato nell'interazione di ν_e , darebbe luogo ad uno sciame elettromagnetico che propagherebbe solo per qualche metro. Volendo ricostruire la “direzione” di provenienza dei neutrini astrofisici tramite lo studio delle caratteristiche cinematiche dei leptoni da essi originati, è evidente che le migliori condizioni sperimentali sono possibili per i ν_μ .

I muoni originati dai ν_μ vanno però distinti da quelli, molto più numerosi, originati negli sciami elettromagnetici. Un apparato sottomarino realizzato a grande profondità permette di risolvere efficacemente ed elegantemente buona parte dei problemi sperimentali per l'astronomia con neutrini:

- con l'acqua marina è possibile realizzare un ottimo, ed economico, rivelatore Čerenkov per particelle cariche relativistiche
- il rivelatore può assumere la geometria più opportuna per la rivelazione delle tracce raggiungendo facilmente "volumi ed aree sensibili" di enormi proporzioni (km^3 , $10^4 \div 10^6 \text{ m}^2$)
- un rivelatore sottomarino a $\sim 3500\text{m}$ di profondità è naturalmente schermato rispetto alla radiazione di origine atmosferica: il flusso di muoni si riduce di circa 6 ordini di grandezza rispetto a quello presente alla superficie del mare.

L'apparato sperimentale NEMO sarà costruito a più di 3000m di profondità nel Mediterraneo, nella zona a circa 80km a SE di Capo Passero, vicino alle coste della Sicilia.

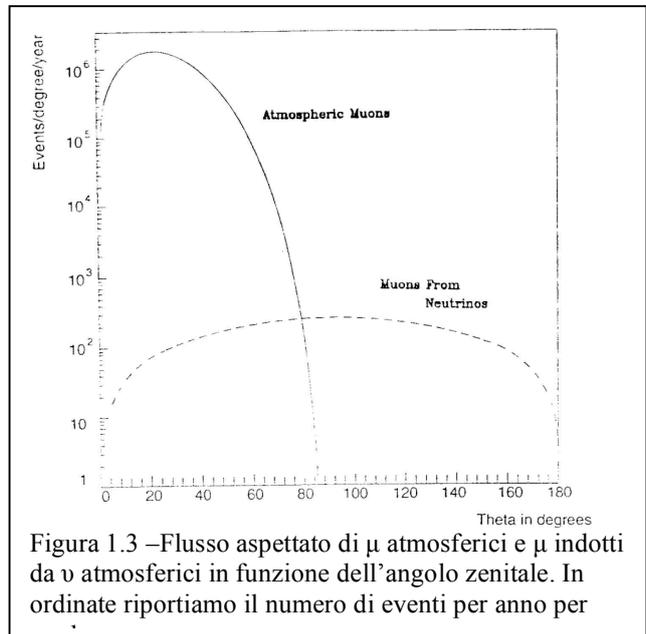
Come già detto il processo fisico utilizzato per tracciare il muone è basato sull'effetto Čerenkov. Un muone, di energia superiore a $\sim 51\text{MeV}$, che attraversi il rivelatore emetterà lungo la sua traiettoria dei fotoni lungo un cono (cono di luce Čerenkov) la cui apertura è, in prima approssimazione, solo funzione dell'indice di rifrazione del mezzo. Misurando con un array di fototubi la posizione ed il tempo di arrivo dei fotoni Čerenkov sarà possibile ricostruire la traccia del muone (almeno 5 informazioni sono necessarie per risolvere univocamente il problema della ricostruzione della traccia del muone). Dopo una lunga fase di studio delle prestazioni del "telescopio per neutrini" come funzione della geometria di posizionamento dei fotomoltiplicatori (PMT), la Collaborazione NEMO propone attualmente di realizzare un apparato sperimentale costituito da 64 torri, ciascuna alta circa 600m, formate da 20 moduli elementari distanziati di 30m. In ciascun modulo sono presenti 4 PMT, disposti ai vertici di una struttura tetraedrica. In ogni vertice del triangolo di base i

fototubi sono orientati verso il basso, il restante PMT è rivolto verso l'alto in modo da rendere l'apparato sensibile a tutto l'angolo solido. Ogni fototubo è protetto dalla pressione esterna, che a 3000m è pari a circa 300 atmosfere, da una sfera di vetro trasparente (BENTHOS) in cui è alloggiato insieme all'elettronica necessaria per la sua alimentazione e quella utilizzata per campionare i suoi segnali analogici. Un cavo elettro-ottico, lungo circa 80Km, conetterà l'apparato alla stazione di ricezione sulla costa. Questo cavo provvederà sia ad alimentare l'apparato sia, tramite delle fibre ottiche, al trasporto dei dati opportunamente messi in forma digitale. L'utilizzo delle fibre ottiche per l'invio dei dati consentirà di trasportare in tempo reale tutti i segnali acquisiti dall'apparato con l'ovvio vantaggio di non dover implementare alcun tipo di selezione dei dati ("trigger hardware") ancora in acqua, con un'elettronica posizionata in prossimità dei PMT stessi. Con uno strumento di questo tipo saranno sufficienti pochi segnali, generati in differenti fotomoltiplicatori, di cui si conoscano con precisione la posizione ed il tempo di formazione per ricostruire la traccia del muone. La stima dell'energia dei muoni (e quindi dei neutrini che li avranno generati) sarà più difficoltosa e richiederà tecniche differenti a seconda delle caratteristiche della traccia misurata. Nel caso in cui la traccia del muone sarà interamente compresa nell'apparato sarà possibile una misura accurata (entro il 20%) della sua energia. In caso contrario sarà sempre possibile stimare un limite inferiore per la sua energia e, mediante alcune caratteristiche degli sciame elettromagnetici prodotti dal muone, anche la sua energia totale con un errore dell'ordine del 100%.

1.3 Possibili fonti di rumore in un apparato Čerenkov sottomarino

Le possibili fonti di rumore in un apparato come quello descritto nel paragrafo precedente sono da ricercare in quei fenomeni fisici differenti dalle interazioni dei neutrini, astrofisici o atmosferici, che generino fotoni nel campo di sensibilità dei fotomoltiplicatori utilizzati (300-650nm). Un'enorme

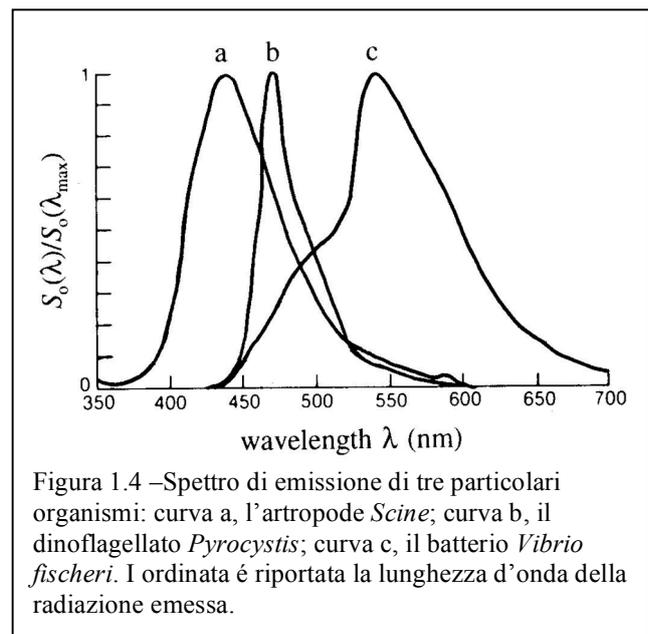
sorgente di “rumore” è costituita dal flusso di muoni atmosferici che, nonostante l’effetto di schermo assicurato da circa 3500m di mare, giungono ugualmente nell’apparato. Il flusso di muoni al livello del mare è circa 11 ordini di grandezza maggiore di quello indotto dai neutrini e, anche a 3500m di profondità, rimane superiore per 6 ordini di grandezza (confronta la figura 1.3). Questi muoni derivano dai decadimenti dei π^\pm e dei K^\pm prodotti negli sciami adronici nell’atmosfera e provengono quindi tutti dal settore di angolo solido che sovrasta l’apparato. Da ciò risulta



evidente l’importanza di una corretta distinzione, in fase di ricostruzione della traccia, tra muoni provenienti da sopra o da sotto l’apparato; anche una piccola percentuale di errore nel discriminare questi due casi porterebbe il segnale fisicamente interessante (le tracce provenienti “dal basso”) ad essere indistinguibile dal fondo. Infatti un telescopio per neutrini deve poter individuare con certezza i muoni provenienti da sotto l’apparato poiché questi sono gli unici muoni derivanti sicuramente da una interazione dei neutrini (astrofisici o atmosferici) in virtù delle proprietà di schermo offerte dalla Terra contro tutti gli altri tipi di particelle. Nel caso dei neutrini astrofisici bisogna considerare come rumore anche i segnali indotti dai neutrini atmosferici. A questo proposito ricordiamo che nel grafico 1.3 è riportato il numero di eventi attesi, alla profondità di circa 3500m, integrando tutto lo spettro energetico dei muoni. Limitandoci al caso di muoni molto energetici ($E_\mu > 10\text{TeV}$) il fondo di neutrini atmosferici risulta diminuito di circa ????. Un apparato Čerenkov sottomarino é inoltre soggetto a due tipi di “rumore” di origine completamente differente: i decadimenti delle sostanze radioattive disciolte nell’acqua marina e la bioluminescenza. I decadimenti delle sostanze radioattive, di cui il maggior contributo é dovuto al ^{40}K , generano

particelle cariche (elettroni) che , se sopra soglia, producono luce Čerenkov. Sebbene questi decadimenti siano sostanzialmente puntiformi e quindi non rischiano di essere identificati come tracce “lunghe” dovute a muoni energetici, sono nondimeno diffusi in tutto l’apparato ed hanno una frequenza molto maggiore dei segnali che ci aspettiamo di misurare. L’importanza di questo fondo ottico diminuisce notevolmente considerando che per ricostruire le tracce delle particelle cariche estremamente energetiche si impongono coincidenze temporali tra i segnali dei vari fotomoltiplicatori; ciò diminuisce considerevolmente la probabilità di “allineamenti temporali” casuali fra segnali di diversi PMT dovuti a questo tipo di fondo. La conoscenza di questo rumore rimane in ogni caso di primaria importanza sia nella fase di simulazione e test delle varie tecniche di ricostruzione delle tracce sia nella rivelazione di Supernovae galattiche. In questo caso infatti i neutrini sono troppo poco energetici per essere tracciati ed il loro passaggio viene evidenziato da un aumento della frequenza di segnali misurata da ciascun fotomoltiplicatore. La bioluminescenza viene prodotta da alcuni tipi di batteri presenti alle profondità dell’apparato che emettono luce con una intensità compatibile a quella di una sorgente di singoli fotoni ma con una frequenza che può essere anche più di due ordini di grandezza superiore a quella dovuta ai decadimenti delle sostanze radioattive. Data la notevole intensità della radiazione emessa da alcuni organismi come la

Euaugaptilus magnus [x1], che risulta essere anche di 4 ordini di grandezza maggiore di quella rilevabile dai pesci, si suppone che i microrganismi utilizzino l’emissione di luce non solo per comunicare ma anche per fuggire dai predatori. Sebbene lo studio della bioluminescenza sia solo agli inizi sono disponibili in letteratura [x] informazioni quantitative sullo spettro di emissione di circa



70 specie tra batteri e pesci. In figura 1.4 riportiamo, a titolo di esempio, alcuni di questi spettri. Come si può notare il picco dei loro spettri di emissione cade proprio nella regione di lunghezze d'onda, tra i 400nm ed i 600nm, in cui la trasparenza dell'acqua é maggiore. Il meccanismo più comune di eccitazione della bioluminescenza é la stimolazione meccanica: il microrganismo emette luce quando è investito da un'onda di pressione (che potrebbe essere generata da un pesce in avvicinamento). Tuttavia sono stati appurati anche altri meccanismi di eccitazione indotti da campi elettrici, da alcune sostanze chimiche e dall'emissione stessa di luce [x2]. Il tipo di segnale generato da questi batteri su di un singolo fotomoltiplicatore é indistinguibile, per forma e spettro in ampiezza, da quello generato dai fotoni Čerenkov. Non è ancora chiaro se sia un effetto originato in una zona spazialmente piccola, rispetto alla distanza media dei fotomoltiplicatori né quali siano le sue variazioni nell'arco dell'anno. Il suo effetto su di un apparato come quello che si intende costruire per l'esperimento NEMO é quello di rendere inutilizzabile per un periodo di tempo (che può variare da μ s ad alcuni secondi) la parte dell'apparato interessata dal fenomeno. Di questo effetto bisogna ovviamente tenere conto nel calcolo del tempo morto dell'apparato. Nel prossimo capitolo discuteremo dettagliatamente il “rumore ottico” indotto dai decadimenti delle sostanze radioattive disciolte in acqua marina.