

Introduzione

I Raggi Cosmici (RC) sono particelle e nuclei atomici di altissima energia che, muovendosi a velocità prossime a quella della luce, colpiscono la Terra da ogni direzione.

L'esistenza dei RC fu scoperta dal fisico austriaco Victor Hess agli inizi del ventesimo secolo: all'epoca sembrava che nell'ambiente ci fosse molta più radiazione di quella che poteva essere prodotta dalla radioattività naturale. Nel 1912 Hess fece l'esperimento che diede la soluzione al problema: caricò su un pallone aerostatico un elettroscopio (un dispositivo che serve a misurare la quantità di carica elettrica) e intraprese un viaggio che dimostrò come la quantità di particelle cariche presenti nell'atmosfera aumentava con l'altezza. Questi risultati potevano essere spiegati solo ammettendo che la sorgente della radiazione fosse extraterrestre: per questa scoperta Hess ricevette il premio Nobel nel 1936.

In seguito, l'osservazione di sciami di particelle prodotti in camere a nebbia suggerì che i raggi osservati non potevano essere quelli primari, ovvero gli stessi che provenivano dal cosmo, ma erano il risultato delle interazioni di questi con l'atmosfera terrestre.

Dalla loro scoperta fino all'arrivo degli acceleratori di particelle, negli anni '50, i raggi cosmici sono stati importantissimi per lo studio della fisica delle particelle elementari: essi infatti ne costituiscono una sorgente naturale. Il loro studio portò alla scoperta di nuove particelle. Il muone fu, ad esempio, scoperto da Conversi, Pancini e Piccioni nel 1945 e il positrone da Carl D. Anderson nel 1932.

I raggi cosmici primari sono per lo più costituiti da protoni, particelle alfa, nuclei pesanti e da una piccola percentuale di fotoni, elettroni e neutrini.

Durante il percorso dalla sorgente alla Terra, l'energia e la loro direzione rispetto alla traiettoria originale possono variare per effetto dei campi magnetici galattici e dell'interazione con il mezzo interstellare (ISM).

Lo studio dei RC è attualmente concentrato in gran parte su tre aspetti estremamente interessanti: la determinazione delle sorgenti, i meccanismi di accelerazione nel cosmo e le interazioni fondamentali ad energie talmente elevate da non essere riproducibili a Terra agli acceleratori.

I RC dotati di energie fino a $10^{15} \div 10^{16}$ eV provengono principalmente da sorgenti che si trovano nella nostra galassia, mentre i RC di energie più elevate non possono che provenire da sorgenti extragalattiche: non si conoscono infatti sorgenti galattiche capaci di imprimere ai RC energie $> 10^{16}$ eV.

Molto importante per la ricerca di sorgenti astrofisiche di alta energia è la neutrino-astronomia, che sfrutta le proprietà dei neutrini di essere molto leggeri e neutri (dunque non deviati dai campi magnetici) e debolmente interagenti con il mezzo interstellare: ciò implica che rivelare un neutrino di una certa energia, proveniente da una certa direzione sia equivalente a determinare con sufficiente precisione la zona in cui è stato prodotto e dunque a localizzarne la sorgente.

Lo spettro energetico dei RC, misurato a Terra, è decrescente e va dalle centinaia di eV fino a qualche decina di Joule. Il flusso dei RC primari è fortemente dipendente dalla loro energia: lo spettro è descritto da una legge di potenza del tipo $E^{-\gamma}$, con $\gamma \sim 2,7 \div 3$.

La rivelazione di particelle ad energie molto elevate diviene sempre più difficile a causa dei flussi via via sempre più deboli: al crescere dell'energia si deve disporre di apparati di misura sempre più grandi.

Una delle tecniche usate per rivelare particelle cariche di alta energia (dunque con flussi poco intensi) è quella di sfruttare la radiazione Čerenkov prodotta al passaggio di queste particelle ultrarelativistiche in un mezzo trasparente, in cui la luce si propaga con facilità e con una bassa probabilità di essere diffusa, ad esempio l'acqua (data anche la sua abbondanza in natura).

La radiazione elettromagnetica emessa lungo il percorso ha uno spettro continuo, che copre anche la zona del visibile, in cui l'efficienza di rivelatori come i fotomoltiplicatori è massima.

Per un rivelatore di neutrini astrofisici l'acqua è importante anche per la sua funzione di schermo: volendo rivelare eventi così rari si deve mettere il rivelatore al riparo dalla radiazione atmosferica, che potrebbe impedire la rivelazione di particelle *rare*.

La maggior parte della radiazione che raggiunge il suolo è composta da elettroni e fotoni, ma viene facilmente arrestata da strati di materia. La componente *dura* della radiazione atmosferica è costituita dai muoni, che possono viaggiare anche qualche chilometro nell'atmosfera, prima di perdere tutta l'energia.

Le misure effettuate nei laboratori sotterranei attualmente in uso (Gran Sasso, Frejus, Sudbury...) mostrano che uno strato di materia equivalente a $\sim 3500\text{m}$ di acqua è capace di ridurre il flusso dei muoni atmosferici di un fattore 10^6 , rendendo possibili esperimenti che si prefiggono proprio la ricostruzione delle tracce di muoni prodotti nelle interazioni di ν_μ astrofisici (figura 1).

È fondamentale quindi che l'apparato sia posto ad una profondità tale da minimizzare il fondo di particelle provenienti dall'atmosfera.

L'acqua è un ambiente ideale per la realizzazione di apparati di rivelazione di neutrini astrofisici: è un mezzo trasparente che si trova in natura in grande quantità e nel quale si produce e si propaga il segnale Čerenkov; nei siti abissali può inoltre offrire uno schermo naturale per la radiazione atmosferica e costituisce un bersaglio su cui i neutrini possono interagire.

Il mare a grandi profondità può quindi ospitare un **Telescopio per Neutrini**, ma è anche un mezzo, in moto, in cui avvengono fenomeni naturali di luminescenza ed in cui si sviluppano organismi biologici. Nella progettazione di un qualsiasi apparato sperimentale bisogna considerare l'esistenza di questi fenomeni ambientali.

Il presente lavoro di tesi è stato svolto all'interno della collaborazione **NEMO** (NEutrino Mediterranean Observatory), che si pone come obiettivo lo studio, per mezzo della rivelazione di luce Čerenkov, di neutrini di altissima energia al fine di individuarne le sorgenti.

Il lavoro ha avuto lo scopo ultimo di stimare la diminuzione di efficienza dei rivelatori di cui si compone l'intero apparato, per effetto della deposizione di sedimenti e della crescita di colonie

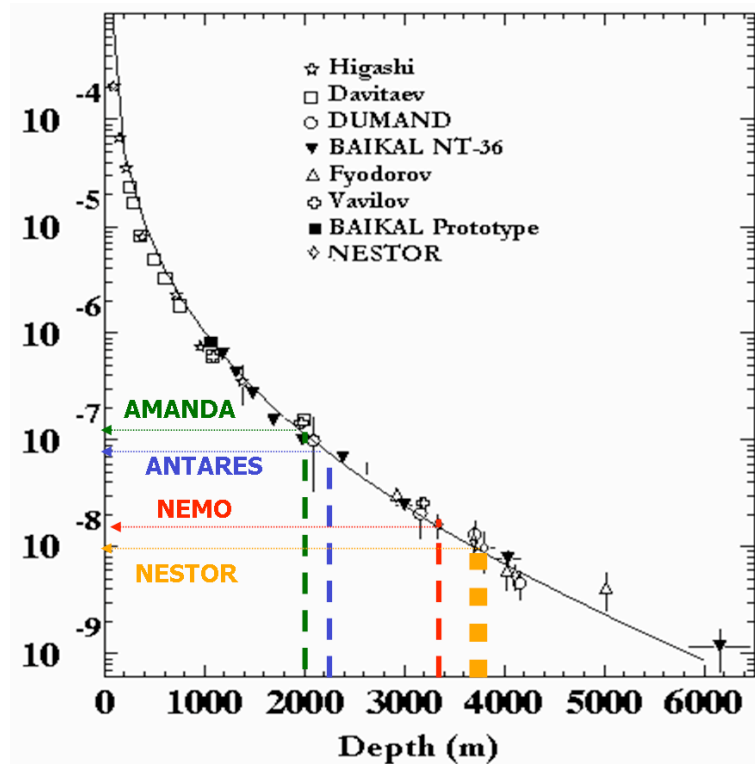


Figura 1: Flusso di μ atmosferici in funzione dello spessore di materiale attraversato [23].

di batteri sulla superficie sensibile dei fotomoltiplicatori che si usano per rivelare la luce Čerenkov.

Il primo capitolo sarà dedicato ad un'introduzione alla fisica dei RC, sottolineando le questioni ancora aperte. Si parlerà della loro *composizione chimica*, riconducendola ai meccanismi di produzione e propagazione nel mezzo interstellare (ISM).

Verrà discusso lo spettro energetico dei RC misurato sperimentalmente, le problematiche legate alla loro origine e alla riduzione del flusso ad energie maggiori di 10^{19} eV (effetto GZK). Verranno inoltre passate in rassegna le varie tecniche di rivelazione a seconda della finestra di energia che si vuole rivelare, citando alcuni esperimenti rilevanti (alcuni dei quali ancora in costruzione).

Il secondo capitolo descriverà in modo più dettagliato l'esperimento NEMO, spiegandone la struttura in relazione alle proprietà fisiche dell'acqua e al suo scopo finale. Nel terzo e nel quar-

to capitolo verranno presentati i risultati dell'analisi dei dati sull'oscuramento dei moduli ottici (*biofouling*), dati presi per circa 19 mesi nel sito abissale di Capo Passero. Utilizzando questi risultati sarà possibile sia stabilire in modo ottimale la disposizione interna dei moduli ottici, in particolare la posizione dei fotomoltiplicatori (PMT) rispetto all'angolo di zenith, sia stimare una percentuale annua di oscuramento dovuto alla crescita del film biologico sulla superficie dei PMT.

I risultati discussi nel terzo e quarto capitolo sono stati poi inseriti nel programma (OPNEMO) che simula gli eventi all'interno e in prossimità del rivelatore, per stimare l'effetto della variazione di trasparenza sulla ricostruzione delle tracce simulate. La prima parte del quinto capitolo sarà dunque dedicata ad una breve introduzione sull'architettura del programma OPNEMO e del programma che ricostruisce le tracce simulate. Verranno poi discussi i risultati ottenuti considerando, nella simulazione dell'apparato, anche l'effetto di *biofouling* sulla superficie dei moduli ottici. In questo modo la ricostruzione delle tracce di muone potrà essere fatta tenendo conto delle reali caratteristiche del mezzo con cui esso interagisce e della progressiva diminuzione dell'efficienza dell'apparato.