

Introduzione

The planetary system is a gigantic laboratory where nature has been performing an extensive high-energy physics experiment for billion of years.

T. A. Kirsten
O. A. Schaeffer

The marriage between elementary particle physics and astrophysics is still fairly new. What will be born from this continued intimacy, while not foreseeable, is likely to be lively, entertaining, and perhaps even beautiful.

M. A. Ruderman
W. A. Fowler

L'esistenza dei raggi cosmici, il flusso continuo di radiazione che investe la Terra da tutte le direzioni dello spazio, fu dimostrata sperimentalmente da V. Hess nel 1911. Questa scoperta segnò l'inizio della fisica delle particelle. All'inizio del '900, quando già si ipotizzava una struttura subatomica della materia e quando ancora non si poteva contare sul valido e importante supporto delle macchine acceleratrici, i raggi cosmici rappresentarono la principale fonte di particelle di alta energia. Esperimenti sui raggi cosmici permisero il conseguimento di importanti risultati, tra cui, ad esempio, la conferma dell'esistenza di antimateria (C. D. Anderson, 1932, scoperta del positrone) e la scoperta del muone (M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, 1945). Lo studio dei raggi cosmici nell'ambito di programmi di ricerca in fisica delle particelle è diventato marginale a partire dagli anni '60, con il progressivo sviluppo delle macchine acceleratrici. Gli acceleratori permettono, infatti, uno studio più esteso e sistematico dello "zoo subatomico" e delle interazioni che regolano il comportamento dei

componenti della materia, rendendo possibile la verifica delle teorie e lo sviluppo di nuovi modelli. Se la fisica delle particelle riconosce nella sperimentazione agli acceleratori il principale canale di indagine, altre tematiche concentrano l'attenzione sui raggi cosmici. La rivelazione delle astroparticelle, infatti, offre un contenuto sperimentale alle teorie che si rivolgono verso argomenti di interesse astrofisico e cosmologico. Si delinea così, attraverso lo studio delle astroparticelle, il legame tra la fisica delle particelle e l'astrofisica. Le conoscenze ottenute dalla fisica delle particelle suggeriscono nuove tecniche per la rivelazione dei raggi cosmici; nello stesso tempo, lo studio delle astroparticelle consente di raccogliere informazioni sull'origine, la struttura e i meccanismi di evoluzione dell'universo, fornendo un contributo importante anche alla fisica delle particelle. Alcuni fenomeni, infatti, osservati in regioni remote dell'universo e non riproducibili in laboratorio con le attuali tecnologie, possono offrire informazioni sui costituenti della materia, suggerendo formulazioni alternative e/o complementari al Modello Standard. La radiazione cosmica, non più strumento di conoscenza dell'infinitamente piccolo, diventa così importante tecnica di indagine sull'infinitamente grande. I rivelatori di raggi cosmici sono usati come "telescopi", nell'originario significato di dispositivi capaci di "guardare lontano" (dal greco $\tau\eta\lambda\epsilon$, *lontano* e $\sigma\kappa\omicron\pi\acute{\epsilon}\omega$, *osservare*): lontano nello spazio, oltre i confini della galassia, ma anche, contemporaneamente, lontano nel tempo, alla ricerca di indizi, provenienti dal passato, utili alla formulazione di modelli cosmologici per ricostruire la storia dell'universo.

La grande varietà nella composizione della radiazione cosmica (leptoni, fotoni, nucleoni, nuclei) implica una altrettanto grande varietà di tecniche di rivelazione. Le modalità di rivelazione si differenziano, inoltre, anche a seconda dell'intervallo di energia (Figura 1.5) che si intende studiare. I rivelatori sottomarini, descritti nel seguito, permettono l'osservazione di neutrini cosmici con energia compresa nell'intervallo (10^{13} - 10^{17}) eV. La tecnica più utilizzata per la rivelazione di neutrini in ambiente sottomarino consiste nella raccolta, attraverso un reticolo di fotomoltiplicatori, della luce Cherenkov prodotta dalla propagazione in acqua delle particelle cariche generate

dall'interazione dei neutrini. Un'alternativa, o meglio un complemento, alla tradizionale tecnica ottica¹ è la rivelazione acustica. La rivelazione acustica, come si vedrà nel seguito, può infatti estendere la sensibilità degli apparati sottomarini fino ad energie dei neutrini superiori a 10^{18} eV. Lo scopo del presente lavoro di tesi è descrivere i principi della tecnica di rivelazione acustica e le motivazioni che ne suggeriscono l'impiego, parallelamente alla tecnica Cherenkov, in un rivelatore sottomarino. Sono presentati, inoltre, alcuni risultati sperimentali, ottenuti con il lavoro di tesi, che confermano l'ipotesi su cui è basata la "rivelazione acustica" e cioè che l'interazione di particelle cariche in acqua sia associata ad un segnale acustico rivelabile. L'analisi dei risultati sperimentali ci ha permesso di definire le caratteristiche del segnale; ciò costituisce un primo passo nella direzione di una formalizzazione della tecnica di rivelazione acustica.

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto NEMO, il cui scopo ultimo è la realizzazione di un gigantesco rivelatore sottomarino per neutrini. Attualmente il disegno del rivelatore prevede di instrumentare con fotomoltiplicatori circa un km³ d'acqua, in un sito abissale del Mediterraneo a 3400 m di profondità, rendendo possibile la rivelazione Cherenkov di neutrini di altissima energia. Affiancando ai fotomoltiplicatori un opportuno insieme di "idrofon" sarà possibile confermare, per $10^{14} \text{ eV} \leq E_\nu \leq 10^{17} \text{ eV}$, la rivelazione "Cherenkov" con quella "acustica" ed estendere, con la sola rivelazione "acustica", la sensibilità del "Telescopio per Neutrini" ad energie $E_\nu \geq 10^{18} \text{ eV}$.

¹ La tecnica di rivelazione "Cherenkov" viene indicata anche come "tecnica ottica", con riferimento al fatto che la radiazione di lunghezza d'onda $320 \text{ nm} < \lambda < 500 \text{ nm}$ (banda "ottica") è quella che meglio si propaga in acqua.

Nel seguito, dopo una breve caratterizzazione dei raggi cosmici, del loro spettro di energia, della loro composizione di massa, dei meccanismi di generazione e accelerazione e degli effetti legati alla loro propagazione nello spazio (effetto GZK), si descrive lo stato attuale della astronomia con raggi cosmici di alta energia, facendo una rapida rassegna delle tecniche sperimentali e degli esperimenti in corso e considerando, in particolare, astronomia con fotoni e con neutrini. Tale è il contenuto del primo capitolo.

Il secondo capitolo descrive, sinteticamente, la propagazione del suono in acqua e, in particolare, la propagazione acustica in ambiente sottomarino. Si fa riferimento, inoltre, allo studio del rumore acustico ambientale in mare.

Nel terzo capitolo si considera la problematica legata alla rivelazione “acustica” sottomarina di neutrini astrofisici: la formazione di un segnale acustico indotto da interazione di particelle e la descrizione del segnale acustico aspettato, in particolare, dall’interazione di neutrini. Si considera, inoltre, l’attività sperimentale connessa con l’argomento (esperimenti in mare, esperimenti con fasci di particelle).

Nel quarto capitolo si comincia a descrivere l’attività sperimentale svolta nell’ambito del lavoro di tesi e si definiscono le caratteristiche degli idrofoni e del sistema di acquisizione sviluppato per la loro calibrazione.

La calibrazione degli idrofoni è stata realizzata sia con una sorgente acustica nota (Capitolo 5) che tramite l’acquisizione di segnali acustici generati in acqua da un fascio di particelle di intensità ed energia nota (Capitolo 6).

La tecnica di rivelazione acustica, come argomentato nel settimo capitolo, ci sembra perseguibile e sicuramente capace di permettere l’osservazione di eventi da interazione di particelle di altissima energia: i risultati del Capitolo 6, infatti, verificano la produzione di un segnale acustico rivelabile. Le nostre conoscenze sulla formazione del

segnale, sulla sua propagazione e sulle tecniche di rivelazione e ricostruzione dell'evento sono, però, ancora limitate, lasciandoci prevedere la necessità di un intenso lavoro di studio e di sviluppo tecnologico.