

Capitolo I

Motivazioni scientifiche

alla base dei rivelatori di neutrini cosmici

Premessa

Il lavoro di progettazione a cui è dedicata questa tesi riguarda la realizzazione di un apparato per l'Astronomia dei neutrini. Da antica data l'Astronomia è basata sulla rivelazione di onde elettromagnetiche, sia nella banda del visibile e sia, molto più recentemente nelle bande invisibili di detta radiazione (spettro dell'ultravioletto, l'infrarosso, segnali radio, raggi X e gamma). I risultati di queste ricerche hanno già profondamente cambiato la visione dell'Universo, rivelando la presenza di stelle di neutroni e buchi neri – stadi finali dell'evoluzione stellare – oltre che i violenti fenomeni delle galassie in formazione, delle Quasar e dei Nuclei Galattici Attivi [1].

Va però ricordato che tali siti astrofisici sono anche sorgenti di particelle. Il Sole, ad esempio, genera vento solare che soffia continuamente sulla magnetosfera dei pianeti e in particolare su quella della Terra. Anche il Sole, come tutte le stelle e le galassie, produce raggi cosmici che permeano lo spazio. Lo studio dei raggi cosmici infatti è un capitolo a parte dell'astrofisica. Poiché è stata dimostrata l'esistenza di particelle ad energie estremamente elevate (fino a

10^{20} eV), i raggi cosmici indicano la presenza nel cosmo di fenomeni molto energetici. Da queste regioni dell'Universo giungono sulla Terra particelle di energia elevatissima il cui studio sistematico permetterebbe il chiarimento di diversi problemi dell'Astrofisica contemporanea. Una componente di grande interesse della radiazione di origine extra-galattica che arriva sulla Terra è costituita da raggi gamma (fotoni di energia elevata). Vari modelli interpretativi delle sorgenti della radiazione gamma di più alta energia prevedono altresì la produzione di neutrini con flussi confrontabili con quelli dei gamma. Ciò prefigura la possibilità di una 'Astronomia dei neutrini' purché si riescano a costruire gli strumenti (telescopi) capaci di rivelarli.

Il potenziale conoscitivo di una Astronomia dei neutrini appare enorme, dato che, per le loro proprietà, i neutrini possono trasportare informazioni da regioni dell'Universo inaccessibili alla radiazione elettromagnetica [2].

1.1 Tipi di neutrini

La Fisica, attualmente, spiega le leggi dell'Universo all'interno di un'unica teoria, il Modello Standard, che considera tutta la materia formata da 12 particelle fondamentali suddivise in tre famiglie o sapori, ciascuna costituita da quattro tipi di particelle: due leptoni¹ e due quark, come mostra la tabella 1-1. La prima famiglia è formata dall'elettrone e dal neutrino elettronico e dai quark up e down. Quark up e

¹ Un termine greco che significa 'particella leggera'.

down, combinandosi tra loro, formano i protoni e i neutroni che costituiscono la gran parte della materia di cui sono fatti gli atomi. Il protone e il neutrone sono chiamati collettivamente nucleoni in quanto sono i costituenti dei nuclei atomici. La figura 1-1 dà l'idea della costituzione di un nucleo formato da 1 protone ed 1 neutrone.



Figura 1-1. Schematizzazione di un nucleo formato da un protone (in basso) ed un neutrone (in alto), nelle rispettive combinazioni di quark up e down.

La seconda famiglia di particelle è formata dalla particella μ o muone, dal neutrino muonico e dai quark strange e charm. La terza famiglia, a sua volta, è formata dal leptone tau, dal neutrino tauonico e dai quark top e bottom [3].

	Leptoni		Quark	
Famiglia 1	Elettrone	Neutrino elettronico	Quark up	Quark down
Famiglia 2	Muone	Neutrino muonico	Quark charm	Quark strange
Famiglia 3	Tau	Neutrino tauonico	Quark top	Quark bottom

Tabella 1-1: Le 12 particelle fondamentali suddivise in leptoni e quark.

Esistono numerose combinazioni di particelle quark le più semplici delle

quali, sono i pioni che appartengono alla famiglia dei mesoni². Essi sono produttori di neutrini, infatti un pione decade velocemente in un muone ed un neutrino. I pioni a loro volta sono principalmente generati dalla collisione tra due protoni. Dunque un tipico processo di generazione di neutrini vede coinvolti protoni accelerati che urtano contro degli atomi o dei protoni isolati, questo urto produce leptoni e mesoni i cui modi di decadimento renderanno neutrini [4]. Questo processo avviene comunemente nell'atmosfera della Terra a causa dei raggi cosmici. Essi, infatti, sono costituiti principalmente da protoni che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce e investono la Terra con un flusso medio di 30 particelle al secondo su una superficie di 3 cm^2 negli strati esterni dell'atmosfera [5].

I raggi cosmici sono oggetto di studio da diversi anni. La loro scoperta risale al 1912 ad opera del fisico austriaco Victor Hess, anche se le ricerche sulla loro natura si svilupparono in particolare grazie a Bruno Rossi, il quale nel suo laboratorio di Firenze, negli anni trenta, inventò nuove tecniche sperimentali a ciò adeguate. Si inaugurò quindi un nuovo metodo d'indagine per lo studio della materia, in un periodo in cui gli acceleratori erano in grado di scalfire soltanto la superficie dei nuclei atomici. Fino alla fine degli anni '50 i raggi cosmici rimasero il principale strumento per lo studio della materia su scala subnucleare e da essa sono derivati fondamentali progressi nel campo della Fisica moderna [6].

² Sono quelle particelle che sono composte da un numero pari di quark.

1.2 Obiettivi dei rivelatori di neutrini cosmici: Sorgenti astrofisiche

Le sorgenti astrofisiche da indagare con un possibile telescopio per neutrini sono: le stelle binarie a raggi X, i resti di supernovae, i Nuclei Galattici Attivi (Active Galactic Nuclei, AGN) e lampi di raggi gamma (Gamma Ray Burst, GRB) [4].

Le stelle binarie a raggi X sono sistemi nei quali una stella ruota intorno ad un oggetto collassato come una stella a neutroni, o un buco nero. In questa particolare condizione, la stella di neutroni cattura materia dalla compagna in un disco di accrescimento che si muove ruotandogli intorno [5]. La figura 1-2 schematizza questo stato.

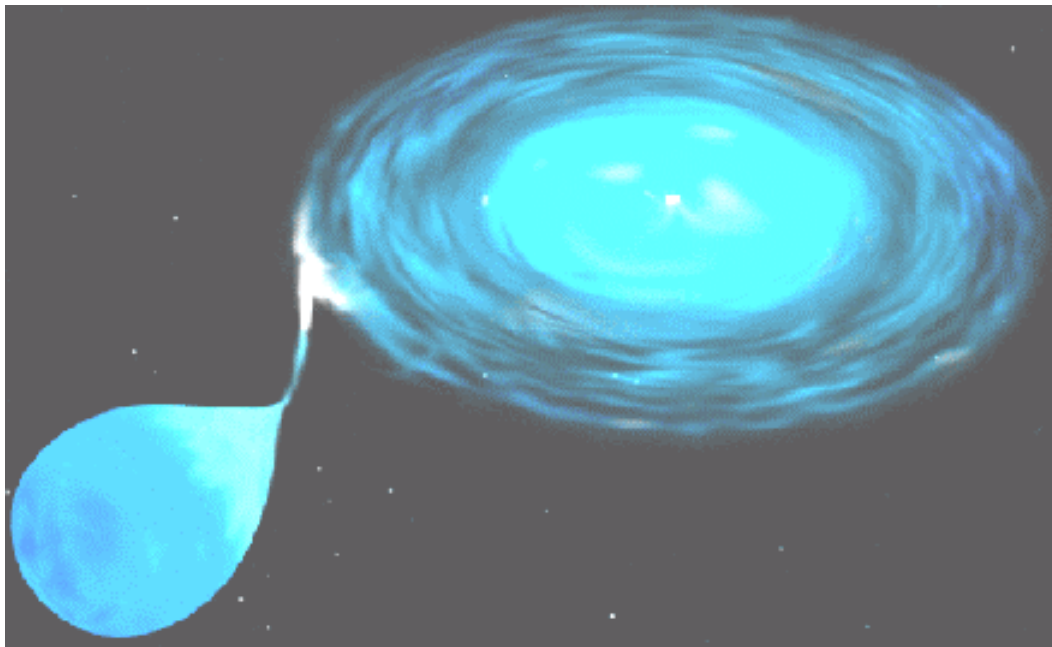


Figura 1-2. Schematizzazione di un sistema binario dove è ben visibile il disco di accrescimento.

Le supernovae, i resti di supernovae e i buchi neri rappresentano le ultime fasi della vita di stelle molto grandi, nelle quali vi è una esplosione seguita da una catastrofica contrazione gravitazionale del nucleo stellare. Si forma allora un buco nero, un oggetto con una forza di gravità talmente grande da non permettere neppure alla luce di uscirne. L'esplosione genera una fortissima onda d'urto che avanza nel gas interstellare comprimendolo e riscaldandolo. In queste condizioni, il gas comincia ad emettere radiazioni visibili, ultraviolette e raggi X. L'onda d'urto, quindi, ha l'effetto di rendere visibile il gas interstellare, creando delle gigantesche bolle di gas, cioè i resti di supernova [7].

Gli AGN sono fra le più potenti sorgenti astrofisiche. Si ipotizza che contengano buchi neri di grande massa al loro centro, che risucchiano stelle e gas dalle parti circostanti della galassia. In realtà si sospetta che molte galassie abbiano un buco nero nel loro centro, ma negli AGN questa presenza appare particolarmente vivace. Questo processo è chiamato accrescimento. In taluni casi, il materiale è successivamente espulso come mostra la figura 1-3, talvolta con velocità elevatissime, prossime a quella della luce. Questi flussi di materiale sono noti come getti [8].

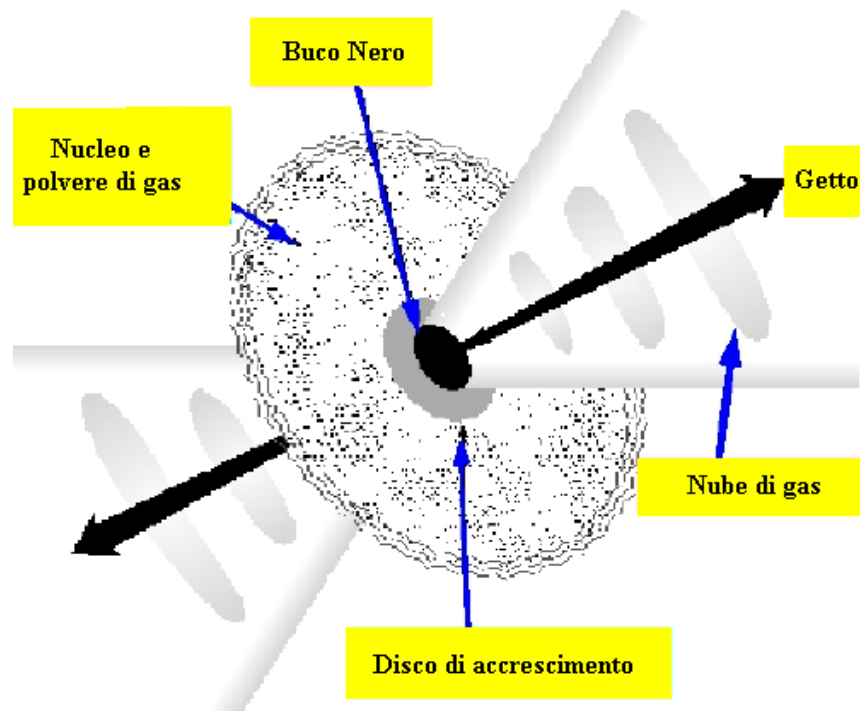


Figura 1-3. Rappresentazione di un AGN.

I GRB sono delle forti esplosioni di raggi gamma, rilevabili dalla moderna strumentazione. Nel mese di maggio del 1969, un razzo decollò dalla base aeronautica di Vandenberg nella California, su una missione ultra segreta [9]. A bordo c'erano due satelliti spia chiamati con il nome in codice Vela, dotati dei rilevatori destinati per scoprire se i Sovietici stessero effettuando prove nucleari segrete nello spazio. I segnali irradiati dai due satelliti verso la base stordirono gli strumenti dei militari. Essi infatti rivelarono delle esplosioni di radiazione gamma che ora sappiamo provenire dalle profondità di spazio. Dopo mesi di lavoro, gli esperti di spionaggio hanno concluso che le esplosioni non avevano niente a che fare con i Sovietici. Ma che cosa realmente erano era un mistero. Nel 1973, il Pentagono decise, quindi, di declassificare i risultati e lasciò agli scienziati civili il compito di spiegarli.

Un significativo passo avanti nella comprensione di questi fenomeni si ebbe anni fa grazie alle misure del satellite BeppoSAX, adatto per la rivelazione di raggi gamma, costruito da una Collaborazione Italo-Tedesca: attualmente secondo le ipotesi più accreditate questi eventi accadono all'interno di galassie lontanissime e sono dovute alle emissioni di elettroni dotati di altissime energie in campi magnetici estremamente forti (fenomeno della 'radiazione di sincrotrone') [10].

1.3 Principi di rivelazione dei neutrini

Nel 1960 fu per la prima volta proposta alla comunità scientifica internazionale l'idea di realizzare enormi apparati rivelatori di neutrini cosmici capaci di determinare la direzione di provenienza, cioè di farne Astronomia³. La proposta prevedeva di dotare grandi volumi di acqua (o di ghiaccio) con sensori opportuni, per rivelare segnali luminosi caratteristici della avvenuta interazione di neutrini con il mezzo circostante. I segnali ottici sono generati dal propagarsi nell'acqua di alcune particelle prodotte caratteristiche dell'interazione dei neutrini: i muoni.

I muoni, infatti, propagandosi nell'acqua (o nel ghiaccio⁴) a velocità superiore a quella della luce nel mezzo, producono impulsi luminosi per effetto Cerenkov con spettro centrato sulla riga del blu (440 nm). Equipaggiando, quindi,

³ Viene indicato in Fisica con il termine generico di 'telescopio' ogni strumento capace di determinare la direzione di provenienza del segnale.

⁴ In generale di un mezzo trasparente alla luce e con indice di rifrazione maggiore di 1.

grandi volumi d'acqua o di ghiaccio con sensori capaci di rivelare tali (debolissimi) impulsi luminosi si possono identificare le “direzioni di volo” dei muoni che, a loro volta, sono prossime a quelle dei neutrini tanto maggiore è l'energia di questi ultimi. Seguendo la traccia dei muoni per centinaia di metri se ne può ricostruire la direzione di propagazione derivandone, di conseguenza, la direzione di provenienza dei neutrini.

La relazione che lega l'angolo di emissione dell'impulso luminoso emesso rispetto alla traiettoria del muone, detto angolo di Cerenkov, in funzione delle caratteristiche del mezzo di propagazione è data da:

$$\cos \theta = \frac{1}{n \cdot \beta}$$

dove θ è l'angolo di Cerenkov, n è l'indice di rifrazione del mezzo, β è la velocità relativa della particella rispetto alla velocità della luce. Adattando la relazione alle profondità marine risulta: $n = 1.35$, $\beta \sim 1$ e pertanto $\theta \sim 42^\circ$ [4].

Poiché i neutrini si propagano nello spazio sostanzialmente in linea retta per enormi distanze, in quanto hanno una bassa probabilità d'interazione con la radiazione e con la materia, tanto maggiore è la distanza dalla Terra della sorgente tanto minore il flusso di neutrini, e quindi tanto minore è il numero di particelle che interagirà con il volume di un ipotetico rivelatore terrestre. Occorre pertanto predisporre rivelatori di dimensioni molto grandi. Infatti, per poter rivelare alcune centinaia di particelle in un anno, l'apparato rivelatore deve avere approssimativamente un'estensione minima di 1 km^3 .

Ma non è questa l'unica difficoltà per la realizzazione di un "telescopio

nell'atmosfera hanno la possibilità di attraversare la Terra e giungere fino al rivelatore (come anche mostrato in figura 1-4), poiché la loro lunghezza di interazione è più molto grande di quella dei muoni. Dunque, questi neutrini possono interagire con la materia circostante il telescopio e produrre muoni che saranno rivelati.

L'energia dei neutrini atmosferici può variare da qualche GeV alle centinaia di TeV con un flusso che diminuisce velocemente al crescere dell'energia. Viceversa il flusso dei neutrini cosmici ad energie molto alte diminuisce solo debolmente al crescere dell'energia, perciò con una selezione in energia è possibile distinguere gli uni dagli altri.

Un'altra possibile fonte di distinzione deriva dalla constatazione che gli eventi attribuiti ai neutrini atmosferici sono singoli mentre gli eventi multipli sono attribuiti ai neutrini cosmici, in quanto nelle esplosioni cosmiche i neutrini sono emessi ad ondate. In definitiva, gli eventi più desiderati (ma anche più rari) sono quelli più energetici e multipli.

In definitiva lo schema costruttivo di principio di un rivelatore di neutrini astrofisici è semplice: si devono disporre in acqua dei sensori ottici in posizioni note, raccoglierne i segnali (l'ampiezza del segnale luminoso ed il tempo di arrivo) e trasmetterli ad un laboratorio dove siano concentrati i mezzi di calcolo necessari ad estrarre le informazioni fisiche cercate [2]. Nelle figure 1-5 e 1-6 è possibile vedere una ragionevole rappresentazione.

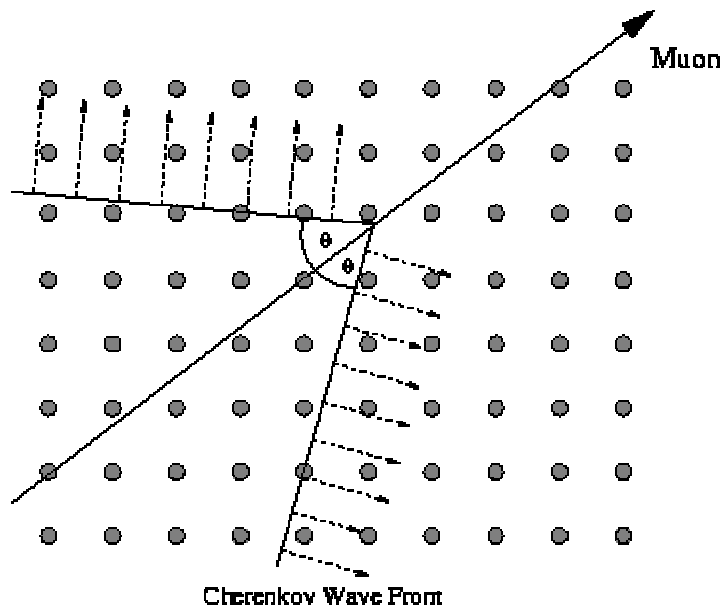
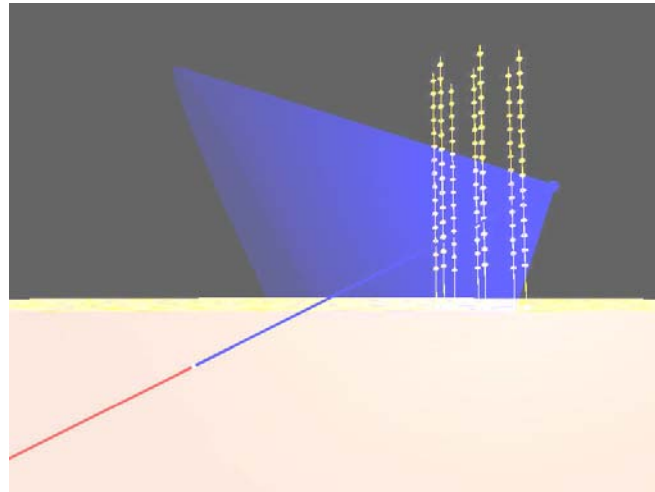


Figura 1-5 (in alto) e Figura 1-6 (in basso). Rappresentazioni schematiche differenti del principio di rivelazione dei neutrini.

1.4. Rivelatori di neutrini

I sensori ottici utilizzati sono generalmente dei fotomoltiplicatori emisferici che in seguito ad impulso luminoso, forniscono un segnale analogico

opportuno. L'area efficace che si desidera rivelare e le caratteristiche del sito scelto nel quale disporre il telescopio per neutrini cosmici influenzano notevolmente il numero di fotomoltiplicatori necessari per la rivelazione e dunque ne influenzano il costo complessivo. Per disporre un'estensione di rivelazione di circa 1 km^3 , come suggerito, occorrono decine di migliaia di fotomoltiplicatori disposti a notevoli profondità marine, pertanto, vista la difficoltà scientifica, tecnologica e costruttiva, la comunità internazionale ha deciso di realizzare degli apparati "dimostratori" di minori dimensioni. Vari gruppi sperimentali si sono cimentati in un'attività pionieristica che, in alcuni casi, ha portato alla realizzazione di apparati persino in grado di raccogliere dati.

L'esperimento DUMAND è stato il progenitore di questa generazione di "telescopi per neutrini". La collaborazione si era proposta di posizionare un apparato sperimentale a 4800 m di profondità nell'Oceano Pacifico in prossimità dell'isola Hawaii. L'apparato doveva essere composto da circa 200 fototubi (sensori ottici di forma emisferica, con diametro pari a circa 15 cm, capaci di rivelare segnali luminosi debolissimi costituiti da singoli fotoni) disposti su nove lunghe stringhe parallele verticali in modo da offrire, per muoni con energia maggiore di 1000 GeV, un'area efficace di rivelazione pari a 20.000 m^2 . La collaborazione DUMAND ha brillantemente affrontato e superato molte difficoltà logistiche e tecnologiche ma infine si è arenata per mancanza di finanziamenti.

Il rivelatore BAIKAL, localizzato in Siberia, a circa 1 km di profondità nel lago Baikal, è stato realizzato con stringhe verticali di fotomoltiplicatori orientati alternativamente verso il basso e verso l'alto. Dal 1993 l'apparato è

operativo con un numero crescente di fotomoltiplicatori: si è passati dai 36 iniziali, ai 192 dello scorso anno, che costituiscono le dimensioni finali (per un totale di circa 4000 m² di area efficace). Il fondo dei muoni atmosferici, che ad 1 km di profondità è per molti ordini di grandezza maggiore del segnale, e la piccola lunghezza di assorbimento della luce (circa 20 m) riducono le possibilità di scoperta dell'apparato.

La Collaborazione NESTOR propone la costruzione di un detector "modulare" posto a circa 3800 m di profondità al largo delle coste del Peloponneso. Ogni modulo dovrebbe essere costituito da una struttura semirigida, "torre", composta da circa 150 fotomoltiplicatori disposti su piani orizzontali ed orientati alternativamente verso l'alto e verso il basso. Le proprietà di trasporto della luce (è stata misurata una lunghezza di trasmissione della luce pari a 55 m) nel sito prescelto fanno sì che ogni "torre" abbia, per muoni con energia maggiore di 1000 GeV, una superficie efficace pari a 10.000 m². La mancanza di una dimensione internazionale dell'impresa ed una serie di difficoltà tecnologiche ed organizzative, hanno finora impedito la realizzazione del primo "modulo" dimostratore [2].