

Introduzione

La fondazione di un'astronomia dei neutrini cosmici di alta energia costituisce oggi una delle frontiere della ricerca in Astrofisica. Dopo i successi dell'astronomia dei gamma ottenuti con apparati sia al suolo che su piattaforme spaziali, le previsioni teoriche di sorgenti astrofisiche (galattiche e extragalattiche) di neutrini di alta energia hanno acquisito un fondamento osservativo significativo, sebbene indiretto. Inoltre i dati dell'astronomia gamma hanno permesso l'elaborazione di modelli della produzione di questi neutrini da cui si ricavano le valutazioni quantitative dei flussi attesi sulla Terra.

Il fatto che la sezione d'urto di interazione dei neutrini che attraversano la materia sia molti ordini di grandezza più bassa di quella dei gamma, fa sì che con l'astronomia dei neutrini si possano osservare regioni dell'Universo altrimenti inaccessibili.

Le comuni sonde astronomiche, ovvero i fotoni, non possono essere utilizzati per questo studio. Infatti i gamma di altissima energia vengono assorbiti dalla radiazione cosmica e dalla materia interstellare entro distanze minori di una diecina di milioni di anni luce. Anche i protoni di altissima energia, che sarebbero solo leggermente deviati dai campi magnetici galattici, vengono assorbiti dalla radiazione diffusa di bassa energia. Le nostre osservazioni di particelle di altissima energia (superiore al TeV) sono quindi troppo limitate per osservare eventi a distanze cosmologiche.

Numerosi modelli prevedono che in queste sorgenti cosmiche siano prodotti, con la stessa abbondanza dei fotoni, anche neutrini. Poiché i neutrini non interagiscono con la radiazione di fondo e con la materia hanno solo interazioni deboli (la costante di accoppiamento delle interazioni deboli è 10^{13} volte minore di quella elettromagnetica), possono trasportare un'informazione originata in sorgenti remotissime nello spazio, a tempi prossimi al Big Bang. L'analisi del flusso di neutrini permetterebbe di caratterizzare l'emissione di alta energie delle sorgenti ed identificarne la posizione sul piano galattico, informazione essenziale che consentirebbe di approfondire l'indagine con i telescopi per fotoni.

Come già detto i neutrini si propagano nello spazio in linea retta per enormi distanze. Tanto maggiore, però, è la distanza della sorgente dalla Terra tanto minore è, per fattori meramente geometrici, il flusso di neutrini che attraversa la sezione di un ipotetico rivelatore terrestre. Si è dimostrato, sulla base di ipotesi "conservative" di emissione di neutrini, che, per poter registrare un campione statisticamente significativo di eventi in tempi dell'ordine di un anno, l'apparato deve avere una superficie approssimativa di un chilometro quadrato. Un rivelatore per neutrini di così grandi dimensioni potrebbe anche rendere possibile lo studio di esplosioni di supernova all'interno della nostra galassia.

La rivelazione di particolari segnali di eventi da neutrini è altresì il modo per indagare possibili forme di materia oscura. Modelli teorici sostengono che una larga componente della materia oscura potrebbe essere costituita da particelle neutre, pesanti e interagenti solo debolmente (Weakly Interacting Massive Particles: WIMP). Queste particelle, catturate per gravità nel centro del Sole o della Terra, annichirebbero tra loro dando luogo ad un flusso di neutrini di alta energia direzionale e sufficientemente intenso per essere identificato. La rivelazione di questi flussi fornirebbe informazioni sulla natura della materia oscura complementari a quelle accessibili con gli esperimenti agli acceleratori.

Telescopi per neutrini

Nel 1960 fu proposta alla comunità scientifica internazionale per la prima volta l'idea di realizzare enormi apparati per neutrini cosmici, capaci di rivelare tali particelle e di scoprirne la direzione di provenienza. Questi apparati vennero definiti "telescopi per neutrini". La proposta prevedeva di equipaggiare, con sensori opportuni (ottici, acustici,...), grandi volumi di acqua (o di ghiaccio) per rivelare i segnali caratteristici della avvenuta interazione di neutrini di altissima energia. Il requisito delle grandi dimensioni è dovuto sia alla bassa intensità degli attesi flussi di neutrini che alla piccola probabilità di interazione dei neutrini con la materia.

La tecnica proposta consiste nel rivelare i segnali ottici generati dal propagarsi in acqua di un particolare prodotto dell'interazione di neutrino: il muone. Queste particelle, di carica elettrica unitaria, sono molto penetranti e sufficientemente massive (200 volte la massa di un elettrone) da non perdere tutta la loro energia per via di emissioni elettromagnetiche. Se il muone prodotto si propaga a velocità superiore a quella della luce in acqua esso genera, con un meccanismo (detto effetto Cherenkov) simile a quello che porta al "bang" caratteristico di un jet che supera la velocità del suono, un fronte luminoso con un angolo ben determinato rispetto alla sua direzione di moto. L'angolo Cherenkov in acqua è circa 42° per la radiazione visibile. Equipaggiando grandi volumi d'acqua (o ghiaccio) con sensori capaci di rivelare segnali luminosi anche debolissimi, si può identificare la traccia del muone. Poiché i muoni si propagano (ad altissima energia) per distanze dell'ordine di un km lungo la direzione del neutrino e ne trasportano in media il 50-60% dell'energia, identificare una traccia di muone permette di avere informazioni del neutrino incidente.

Lo schema costruttivo del telescopio è, nel principio, semplice: si devono disporre in acqua profonda (3000-4000 m) i sensori ottici secondo una geometria tale da rendere possibile la ricostruzione delle tracce dei muoni. I moduli ottici dovranno consentire l'osservazione dei segnali provenienti da tutto l'angolo solido; si pensa, pertanto, a fotomoltiplicatori emisferici di grandi dimensioni (diametro dell'ordine di 40 cm) orientati verso il basso e verso l'alto. La distanza fra le coppie di moduli ottici è funzione delle proprietà di propagazione della luce nell'acqua circostante: minore è l'assorbimento della luce, maggiore potrà essere la distanza fra i moduli ottici. Il numero di moduli ottici necessari alla misura, e quindi il costo del rivelatore stesso, è tanto minore quanto migliore è la trasparenza dell'acqua. I moduli ottici

hanno il compito di generare una risposta elettronica che è funzione del numero dei fotoni Cherenkov rivelati ed del loro tempo di arrivo. Occorre poi trasmettere i segnali elettronici ad un laboratorio a terra dove sono concentrati i mezzi di calcolo necessari ad analizzarli e decodificarli per estrarne le informazioni fisiche rilevanti.

Un simile apparato dovrebbe permettere di identificare, nel piano delle coordinate celesti, la direzione di provenienza di un eventuale flusso di neutrini, fare cioè “astronomia con neutrini”. Per questo motivo gli apparati rivelatori di neutrini astrofisici vengono comunemente denominati “telescopi per neutrini”.

Poiché l’area richiesta per rivelare il flusso di neutrini è dell’ordine di 1 km^2 e la geometria del rivelatore richiede che la lunghezza di traccia necessaria per operare la ricostruzione del muone sia circa 1 km, la dimensione caratteristica di questi rivelatori è dell’ordine del km^3 . Ciò garantisce inoltre una accettazione angolare isotropa.

Una grande difficoltà costruttiva del “telescopio km^3 ” è posta dal fatto che esso deve essere schermato dalla “pioggia” dei muoni “atmosferici”, prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici adronici (protoni e nuclei) con l’atmosfera. Il flusso dei muoni atmosferici è (ad energie dell’ordine del GeV) cento miliardi di volte (10^{11}) più intenso di quello atteso dai muoni prodotti da neutrini astrofisici. Un rivelatore, posto per esempio al livello del mare, non schermato dal flusso di muoni atmosferici, sarebbe “accecato” da queste particelle e non potrebbe distinguere i segnali di interesse astrofisico. Il modo più efficace per ridurre il flusso di muoni atmosferici è costruire il rivelatore “chilometro cubo” nelle profondità delle fosse marine abissali. L’acqua che circonda il rivelatore ha una triplice funzione: agisce da schermo per gran parte della radiazione atmosferica (a 3500 metri ne riduce il flusso di un milione di volte); è, assieme alle rocce del fondo marino, il “bersaglio” su cui i neutrini interagiscono producendo muoni; costituisce il mezzo trasparente in cui si produce e propaga il segnale Cherenkov. In apparati così realizzati si prevede che il numero di eventi prodotto da neutrini astrofisici con energie superiori a 10 TeV, sia maggiore del rumore di fondo. In particolare, l’identificazione di muoni con traiettorie dirette dal fondo del mare verso la superficie, è un chiaro segnale di un evento prodotto da una interazione di neutrino avvenuta in prossimità del rivelatore.

La difficoltà scientifica, tecnologica e costruttiva è tale che, prima di affrontare l’impresa della costruzione del “chilometro cubo”, molte collaborazioni hanno deciso di realizzare degli apparati “dimostratori” di minori dimensioni.

La situazione internazionale

Negli anni ’80, 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 di Hawaii (USA). L’apparato prevedeva circa 200 fototubi (sensori ottici di forma emisferica, con diametro pari a circa 15") disposti su nove lunghe stringhe verticali parallele. La superficie di rivelazione del rivelatore per muoni con energia maggiore di 1000 GeV, era stimata pari a

~20.000 m². La collaborazione DUMAND ha affrontato e superato molte difficoltà logistiche e tecnologiche ma non ha potuto concludere il lavoro per mancanza di un adeguato supporto tecnologico e di finanziamenti.

Due apparati sperimentali analoghi a quello proposto da DUMAND sono invece in funzione (BAIKAL ed AMANDA) ed altre collaborazioni (NESTOR, ANTARES) sono impegnate nella progettazione di apparati che possano raggiungere dimensioni tali (~0.1 km²) da poter rivelare flussi diffusi di neutrini di origine cosmica, mentre difficilmente potranno individuare sorgenti extragalattiche puntiformi.

Il rivelatore BAIKAL, costruito in Siberia, a circa 1 km di profondità nel lago Baikal, è stato realizzato con stringhe verticali di fotomoltiplicatori orientati sia verso il basso che verso l'alto. Dal 1993 l'apparato è divenuto operativo, con successive implementazioni del numero di fotomoltiplicatori: 36 inizialmente, 192 dal 1999, quando ha raggiunto le dimensioni finali (circa 4000 m² di area di rivelazione per muoni da 1 TeV). Il fondo dei muoni atmosferici, che ad 1 km di profondità è per molti ordini di grandezza maggiore del segnale, e le limitate proprietà ottiche delle acque del lago riducono le possibilità di scoperta dell'apparato.

L'apparato AMANDA è, oramai, in via di completamento. E' costituito da stringhe verticali di fototubi puntati verso il basso e disposti in fori praticati nel ghiaccio del Polo Sud a profondità compresa fra 1300 e 2400 m. La collaborazione AMANDA ha accuratamente studiato le proprietà di trasporto della luce nel ghiaccio polare misurando che in tale mezzo la propagazione della luce è caratterizzata da un bassissimo coefficiente di assorbimento e da un alto coefficiente di diffusione. Quest'ultimo effetto altera la direzione originaria della luce Cherenkov e rende, in molti casi, difficoltosa la ricostruzione della direzione del muone. La lunghezza di diffusione della luce nei ghiacci polari, è stata misurata essere pochi metri; in mare a circa 3500m di profondità la stessa quantità è circa 70 m. AMANDA ha attualmente un'area di rivelazione superiore a 10.000 m² per muoni con energia superiore ad 1 TeV ma la collaborazione propone di corredare l'apparato con altre stringhe di fototubi fino al completamento del rivelatore ICECUBE, che dovrebbe un'area efficace sufficiente alla rivelazione di neutrini da sorgenti extragalattiche.

AMANDA e BAIKAL hanno segnato una svolta decisiva per la costruzione del telescopio km³, dimostrando la possibilità di rivelare neutrini con questi apparati. Infatti entrambi hanno misurato, con buona accuratezza, il flusso dei neutrini atmosferici, ed hanno sviluppato interessantissime tecniche di rivelazione con sensori acustici (BAIKAL) e radio (RICE-AMANDA) complementari a quella ottica.

Le altre collaborazioni, attualmente in fase di ricerca e sviluppo, hanno individuato nel Mar Mediterraneo un'area geografica ideale per la realizzazione del km³.

La Collaborazione NESTOR propone la costruzione di un rivelatore "modulare" posto a circa 3800 m di profondità al largo delle coste del Peloponneso (Grecia). 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 ~55m) nel sito prescelto fanno prevedere per ogni torre una superficie di rivelazione di ~10.000 m² (per muoni con energia maggiore di 10 TeV).

La Collaborazione ANTARES è impegnata nella costruzione di un dimostratore avente superficie di 0.1 km² in un sito sottomarino prossimo a Tolone (Francia) a circa 2300 m di profondità. Una lunghezza di trasmissione della luce di ~41 m, caratterizza le proprietà ottiche dell'acqua marina nel sito prescelto. L'apparato sperimentale proposto è costituito da stringhe verticali di fotomoltiplicatori orientati verso il basso, a 45° rispetto alla verticale. Ciò è dovuto all'alto tasso di crescita biologica e di sedimentazione misurato, nel sito, sui moduli ottici orientati verso l'alto.

Il progetto NEMO

Il ruolo di questi "apparati dimostratori" con aree efficaci dell'ordine di 10⁴-10⁵ m² è di primaria importanza. Altrettanto importante è lo sviluppo delle tecnologie necessarie per la costruzione del "telescopio per neutrini km³" e l'identificazione di un sito sottomarino ideale. Da circa due anni un gruppo di fisici italiani finanziati dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, in collaborazione con istituti scientifici specializzati in Oceanografia, Geofisica e Biologia marina (Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste, Istituto per l'Oceanografia Fisica del CNR di La Spezia, Istituto Talassografico del CNR di Messina, Istituto Biologia Marina del CNR di Venezia) ha iniziato un programma di ricerche (denominato NEMO) teso fra l'altro ad identificare un sito marino abissale prossimo alle coste italiane atto alla installazione del "km³" ed a studiarne le proprietà oceanografiche ed ottiche. Il gruppo si è anche avvalso di una fattiva collaborazione della Marina Militare Italiana ed è in contatto con il SACLANTCEN, il centro di ricerche scientifiche marine della NATO.

La Collaborazione ha individuato le caratteristiche fondamentali per la scelta del sito abissale idoneo all'installazione del telescopio per neutrini. Esse sono:

- profondità superiore a 3000 m ed una larga regione pianeggiante in cui ospitare il rivelatore;
- prossimità alla costa: per rendere possibile il trasferimento dei segnali dall'apparato al laboratorio su terra ferma ed il trasferimento di potenza ai rivelatori sommersi tramite un cavo elettro-ottico la distanza non deve essere superiore a 150 km;
- bassa intensità delle correnti sottomarine, con valori (minori di 10 cm/s) che permettano il dispiegamento dell'apparato in condizioni di sicurezza e che rendano meno complessa la meccanica di sostegno delle singole parti;
- acqua marina con le migliori caratteristiche di trasparenza; cosicché i segnali luminosi possano essere trasmessi in acqua e rivelati anche da moduli ottici distanti decine di metri;
- basso tasso di sedimentazione e crescita biologica;
- minimo "rumore ottico": a più di 3000 metri di profondità l'unica sorgente naturale di luce è rappresentata dalla bioluminescenza e dai prodotti dei decadimenti radioattivi del

^{40}K (un particolare isotopo del potassio). Mentre la quantità di potassio è sostanzialmente simile in tutti i siti del Mediterraneo, l'emissione di luce da microrganismi è correlata alle particolari condizioni ambientali e può essere molto differente da sito a sito;

- vicinanza ad infrastrutture a terra già esistenti: è necessaria la presenza di laboratori di ricerca attrezzati che operino da appoggio al progetto così come la presenza di infrastrutture marine (porti, cantieri);

La Collaborazione NEMO ha inizialmente selezionato quattro siti prossimi alle coste italiane:

Capo Passero (Mar Ionio, 35° 50' N, 16° 10' E)

Ustica (Mar Tirreno, 39° 05' N, 13° 20' E)

Alicudi (Mar Tirreno, 39° 05' N, 14° 20' E)

Ponza (Mar Tirreno, 40° 40' N, 12° 45' E)

In tutti questi siti sono state effettuate misure ottiche di trasmissione della luce in acqua, determinando i coefficienti di assorbimento e di attenuazione della luce per lunghezze d'onda comprese fra 412 nm e 715 nm. I risultati mostrano che un'ampia regione a circa 80 km a SE di Capo Passero sembra essere ottimale per la realizzazione del km³: essa presenta nel blu (440nm) una lunghezza di assorbimento della luce di circa 70m.

Nella stessa area sono state studiate, continuamente per un periodo superiore a 18 mesi, le correnti marine. I valori ottenuti mostrano un valor medio di ~3 cm/s e valori di picco mai superiori ai 20 cm/s. Anche il tasso di sedimentazione è estremamente basso (20 mg m⁻² giorno⁻¹), in estate persino 100 volte inferiore a quello misurato a Tolone.

Altre misure sono ancora necessarie per verificare l'eventuale dipendenza stagionale dei vari parametri misurati, ma è evidente che il sito abissale al largo di Capo Passero presenta caratteristiche di eccellenza per la installazione del telescopio per neutrini.