

---

# I neutrini in astrofisica

Vincenzo Flaminio

Dipartimento di Fisica ed INFN, Università di Pisa, Pisa

---

**L**a nostra comprensione degli eventi di altissima energia che hanno luogo in oggetti astrofisici, quali le esplosioni di Supernovae, i Gamma Ray Bursts, i Nuclei Galattici Attivi ed altri, è drasticamente migliorata negli ultimi decenni, grazie soprattutto al notevole progresso tecnologico nel campo dell'astronomia gamma ed X. L'osservazione dei neutrini solari, e poi di quelli emessi nell'esplosione della supernova 1987A, ha inoltre risposto ad alcuni interrogativi riguardanti i processi che hanno luogo all'interno di oggetti stellari ed hanno ravvivato l'interesse verso i neutrini di alta energia emessi da sorgenti cosmiche. A ciò si è aggiunta ancor più recentemente l'osservazione di neutrini di altissima energia nell'esperimento IceCube, situato sotto i ghiacci dell'Antartide. In quest'articolo ci proponiamo di illustrare il ruolo che i neutrini hanno avuto e continuano ad avere nel campo dell'astrofisica, con particolare riguardo a quella che è nota come *astrofisica delle alte energie*.

## Una brevissima rassegna dell'astronomia moderna

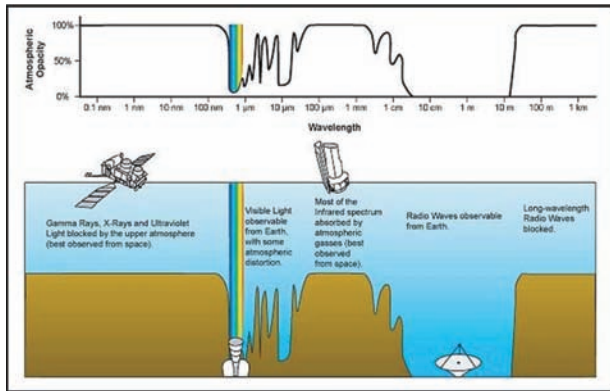
Le prime osservazioni astronomiche ed i primi record storici di eventi astronomici risalgono ai Babilonesi, agli Egiziani, ai Cinesi, ai Greci e, in tempi più recenti, agli Arabi arrivati nel sud del-

l'Europa. Tuttavia fu solo con Copernico e poi con Galileo ed il suo telescopio a rifrazione che nacque la moderna astronomia. Dopo la prima dimostrazione del funzionamento del suo telescopio, che ebbe luogo a Venezia nel 1609, Galileo riuscì ad utilizzarlo per effettuare un gran numero di osservazioni, quali quella delle montagne e crateri della Luna, delle Lune di Giove, degli anelli di Saturno, delle fasi di Venere.

Da allora importanti sviluppi hanno avuto luogo nel campo dell'astronomia ottica e, più in generale, dell'astronomia basata sulla rivelazione dell'emissione elettromagnetica da parte di sorgenti cosmiche. Le limitazioni dei telescopi ottici situati sulla Terra, dovute all'assorbimento e diffusione della radiazione da parte dell'atmosfera, sono state superate mediante l'utilizzo di telescopi basati su satellite, quali lo Hubble Space Telescope, nonché con l'utilizzo di telescopi situati ad alte quote e con l'utilizzo di ottiche adattive per correggere le distorsioni dei fronti d'onda dovute all'atmosfera.

Importanti progressi nel campo dell'astronomia elettromagnetica si sono avuti con lo sviluppo dell'astronomia infrarossa, dovuta a Charles Piazzi Smyth, che nel 1896 effettuò uno studio dettagliato del calore emesso dalla luna, utilizzando una termocoppia. Uno dei vantaggi delle osservazioni effettuate nell'infrarosso deriva dal fatto che tale radiazione è poco assorbita dalle nubi di gas situate tra la Terra e le parti centrali della Galassia.

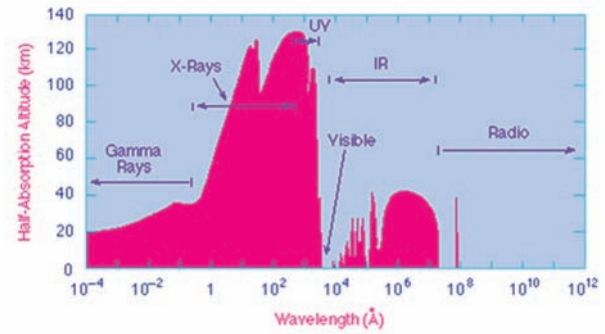
Nei primi anni '30 un'ulteriore importante sviluppo si ebbe grazie a Karl Jansky, che osservò per la prima volta l'emissione radio da una zona situata al centro della via lattea. Questa fu



**Figura 1:** Altezza di dimezzamento della radiazione nell'atmosfera in funzione della lunghezza d'onda (su scala logaritmica). Come si può vedere dal grafico, le regioni di maggior trasparenza sono quelle del visibile e del radio. Raggi X ed ultravioletti sono fortemente assorbiti. Notevolmente assorbiti sono anche i raggi  $\gamma$  e la radiazione infrarossa.

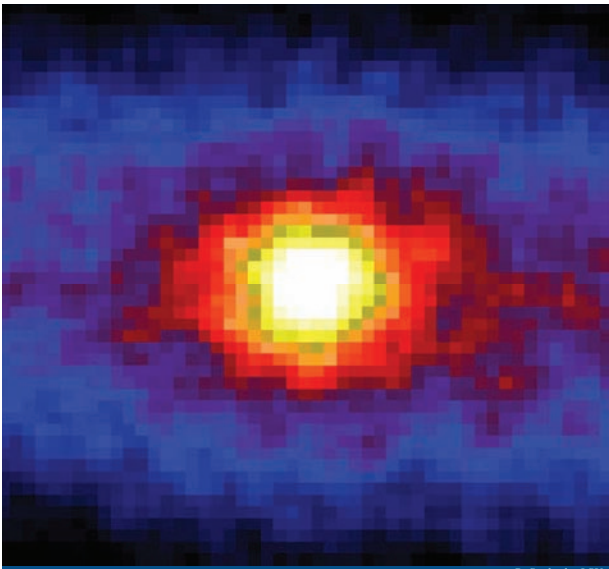
successivamente identificata con Sagittarius A. La risoluzione angolare dei radio telescopi così sviluppati subì un drammatico miglioramento con l'interferometria radio, sviluppata nel 1946 da Martin Ryle ed altri. La risoluzione passò in tal modo da qualche decina di minuti d'arco ai millesimi d'arco ottenibili con la moderna "Very Long Baseline Interferometry". L'avvento della radioastronomia portò un ulteriore vantaggio, legato al ridotto assorbimento della radiazione nella regione di lunghezze d'onda comprese tra qualche centimetro e qualche metro, come mostrato nelle Figure 1 e 2. Ciò in contrasto con l'elevato assorbimento da parte dell'atmosfera della luce visibile, della radiazione infrarossa (con l'eccezione di poche "finestre" nella regione dei micron) e delle onde radio di grande lunghezza d'onda. Un gran numero di importanti scoperte astronomiche vennero proprio con l'avvento della radioastronomia. Tra queste occorre ricordare quella delle radio galassie alimentate da buchi neri supermassivi, il lensing gravitazionale [1] e, particolarmente importante, la radiazione di fondo.

La trasparenza del mezzo interstellare a lunghezze d'onda situate nella zona delle onde radio consente di vedere attraverso il disco della nostra galassia e di osservare oggetti altrimenti nascosti. Ciò ha consentito in particolare lo studio del buco nero supermassivo (Sgr A\*) posto al centro della nostra Galassia, di cui vedremo in seguito.



**Figura 2:** Opacità atmosferica in funzione della lunghezza d'onda (su scala logaritmica). Il grafico è simile a quello della figura 1, ma mostra in aggiunta il campo delle lunghezze d'onda possibilmente rivelabili.

Come mostrato in figura 2 la rivelazione di raggi X e  $\gamma$  da parte di sorgenti astrofisiche è fortemente limitata, per rivelatori collocati sulla superficie terrestre, dall'assorbimento atmosferico. Ciò è particolarmente vero per i raggi X, il che ha richiesto l'utilizzo di rivelatori collocati su satelliti quali il rivelatore Italo-Olandese BeppoSax [2] e successivamente CHANDRA [3]. Per ciò che concerne le osservazioni di raggi  $\gamma$  queste si sono basate per molti anni su rivelatori collocati a terra. Questi sfruttano la radiazione Cherenkov generata da sciame elettromagnetici originati da raggi  $\gamma$  di alta energia che investono l'atmosfera. La radiazione viene in questo caso rivelata attraverso grandi specchi parabolici o sferici che la focalizzano su appositi sensori. Tra questi val la pena di menzionare il rivelatore HESS [4], installato in Namibia, MAGIC [5] installato alle isole canarie e VERITAS [6] in Arizona. In fase di realizzazione è infine il rivelatore CTA [7], che fornirà una veduta completa del cielo sud come di quello nord. Più di recente, per ottenere una visione globale del cielo e per liberarsi degli effetti dovuti all'assorbimento atmosferico, si è fatto ricorso a rivelatori di  $\gamma$  posti su satelliti, quali EGRET [8] e, più di recente, FERMI [9]. Val la pena menzionare il fatto che i rivelatori di  $\gamma$  posti a terra e quelli che operano su satellite sono complementari. Ciò è legato al fatto che il flusso dei  $\gamma$  decresce rapidamente all'aumentare dell'energia. Ciò richiede rivelatori di grande superficie, difficili da installare su satelliti. Ricordiamo in effetti che quest'ultimo tipo di rivelatori riesce a coprire un range di energie che non supera i 100



**Figura 3:** L'immagine del Sole ottenuta attraverso la rivelazione dei neutrini che ne provengono, rivelati dall'esperimento SuperKamiokande. L'immagine, centrata sul Sole, copre un'ampia regione angolare, di  $90^\circ \times 90^\circ$  sia in ascensione retta che in declinazione.

GeV, mentre i rivelatori Cherenkov posti a terra coprono energie da circa 50 GeV in su.

Oggi sappiamo che la fonte d'energia che alimenta il Sole e le altre stelle sono i processi di fusione nucleare che hanno luogo al loro interno. In questi vengono emessi enormi flussi di neutrini. I primi calcoli al riguardo risalgono al 1938-39, ad opera di Bethe e di Critchfield [10, 11]. È interessante notare come nei lavori di questi autori non vi sia alcuna menzione del fatto che la rivelazione dei neutrini emessi in tali processi avrebbe potuto fornire un'importante verifica della teoria. Si dovette aspettare alcuni decenni ed il paziente lavoro di Raymond Davis [12] e successivamente di Masatoshi Koshiba [13] perché l'osservazione dei neutrini solari fornisse una prova inequivocabile della teoria. Per queste scoperte a Raymond Davis e Masatoshi Koshiba venne attribuito, nel 2002, il premio Nobel. In aggiunta, l'esperimento Kamiokande, condotto dallo stesso Koshiba, osservò per la prima volta i neutrini emessi nell'esplosione di una Supernova, la SN1987A [14]. Con questi esperimenti l'Astrofisica usciva dal campo delle osservazioni limitate alla radiazione elettromagnetica, ed apriva una nuova importante finestra, l'Astrofisica dei neutrini. La figura 3 mostra l'immagine del sole ottenuta osservando i neutrini solari rivelati

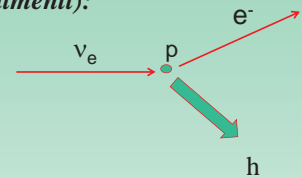
## Conservazione numero leptonico

Nelle collisioni (o decadimenti):

$$\nu_e \rightarrow e^- \quad (511 \text{ KeV})$$

$$\nu_\mu \rightarrow \mu^- \quad (106 \text{ MeV})$$

$$\nu_\tau \rightarrow \tau^- \quad (1.776 \text{ GeV})$$



Ma violato dal fenomeno delle «oscillazioni» dei neutrini

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

$$\nu_e \rightarrow \nu_\tau$$

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  (Nati come tali al CERN osservati come  $\nu_\tau$  al Gran Sasso. Esperimento OPERA)

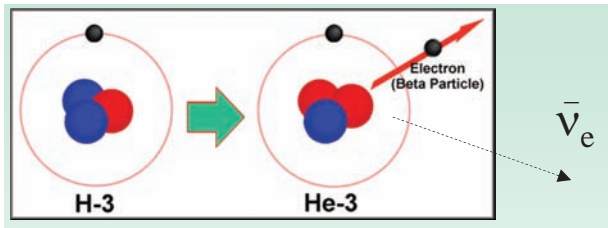
**Figura 4:** Neutrini e corrispondenti "leptoni". In basso: le transizioni legate ad alcune tipiche "oscillazioni" dei neutrini.

nell'esperimento SuperKamiokande [15].

Quelli emessi dal Sole e Stelle simili, nonché quelli che hanno origine nell'esplosione delle Supernovae, hanno energie relativamente basse. Molti dettagli dei relativi fenomeni sono, almeno in parte, compresi. Si ritiene d'altronde che neutrini aventi energie incomparabilmente maggiori siano emessi in processi astrofisici di vario tipo. È di questi che si occupa l'astrofisica dei neutrini di alte energie, che è l'oggetto di questo lavoro.

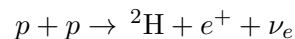
## Cosa sono i neutrini? Da Pauli ai giorni nostri

L'esistenza del neutrino fu ipotizzata negli anni '30 da Pauli e successivamente posta su solide basi da Fermi. Dei neutrini altri diranno in questo numero di *Ithaca*. Io mi limiterò a ricordare che esistono tre tipi o "flavour" di neutrini: il neutrino elettronico  $\nu_e$ , il neutrino muonico  $\nu_\mu$  ed il neutrino associato al mesone  $\tau$ ,  $\nu_\tau$  (vedasi anche la Figura 4). Per ciascuno di questi esiste la corrispondente antiparticella, indicata con una barra sopra il simbolo ( $\bar{\nu}_e$ ...). Il primo di questi ad essere stato osservato è stato il  $\nu_e$  (più precisamente la sua antiparticella  $\bar{\nu}_e$ , emessa nei decadimenti radioattivi ed in particolare in enormi quantità nei reattori nucleari). Un esempio è il decadimento del trizio,  $^3\text{H}$ , in  $^3\text{He}$  mostrato in figura 5. Qui uno dei neutroni presenti nel nucleo del trizio si trasforma in un protone con la simultanea emissione di un elettrone ed un antineutrino elettronico.



**Figura 5:** Decadimento beta del trizio in  ${}^3\text{He}$ , con produzione di un  $\bar{\nu}_e$  e di un elettrone. La vita media per questo decadimento è pari a circa 17.8 anni.

Il motivo dell'associazione di ciascuno dei tre neutrini ad uno dei tre leptoni quali l'elettrone, il  $\mu$  ed il  $\tau$ , è legato, come schematicamente mostrato in Figura 4, al fatto che nell'interazione di un  $\nu_e$  con la materia viene in genere prodotto un elettrone e mai un  $\mu$  o un  $\tau$  ed analogamente per gli altri due neutrini. Tale associazione del  $\nu_e$  con l'elettrone, del  $\nu_\mu$  con il  $\mu$ , e via dicendo, continua a valere, con i relativi cambiamenti di segno, per le corrispondenti antiparticelle. Così, se un  $\bar{\nu}_e$  interagisce con la materia esso darà luogo ad un elettrone positivo  $e^+$ ; analoga cosa si verifica per il  $\bar{\nu}_\mu$  e  $\bar{\nu}_\tau$ , che daranno origine rispettivamente ad un  $\mu^+$  ed un  $\tau^+$ . Tale "legge di conservazione del numero leptonico" è tuttavia in un certo senso violata nel fenomeno delle cosiddette "oscillazioni dei neutrini". Se un neutrino  $\nu_e$  è prodotto in un'interazione noi potremo in alcuni casi osservare dopo un certo tempo (o equivalentemente un certo tratto percorso) che esso si è trasformato in un neutrino di diverso flavour, cioè un  $\nu_\mu$  o un  $\nu_\tau$ . Un esempio di cui la stampa ha parlato negli ultimi tempi è quello dell'osservazione nell'esperimento OPERA (realizzato al Gran Sasso) di  $\nu_\tau$  a partire da un fascio di  $\nu_\mu$  prodotti al CERN di Ginevra [16]. Dobbiamo affrettarci ad aggiungere che la probabilità di una tale conversione (o oscillazione come viene comunemente chiamata) è estremamente piccola, ma misurabile con grande precisione. Un secondo esempio che val la pena menzionare è quello dei neutrini elettronici  $\nu_e$  emessi nel corso dei processi di fusione nucleare che hanno luogo nel sole. Il sole produce energia attraverso la conversione di protoni in nuclei di He (fusione nucleare). Circa 600 milioni di tonnellate di protoni vengono "bruciati" ogni secondo per alimentare la luminosità del sole. Il processo che è alla base della catena di reazioni di "fusione nucleare" è:



Questo è un processo "debole", quindi lento. Le successive reazioni, che comportano la fusione di nuclei di  ${}^2\text{H}$  con protoni o con altri nuclei di  ${}^2\text{H}$ , sono molto più veloci. Tuttavia la velocità del processo complessivo è determinata da quella della prima delle reazioni, quella debole appunto. Si è trovato che, dei  $\nu_e$  emessi, solo una frazione di circa il 30% arriva sulla terra come  $\nu_e$ , mentre il resto subisce, nel tragitto verso la terra, una conversione in  $\nu_\mu$  o  $\nu_\tau$ . Questa osservazione ha costituito storicamente la prima evidenza delle oscillazioni dei neutrini negli esperimenti di Davis e Koshiba già citati.

## Particelle elementari e rivelatori di particelle

Iniziamo col dire cosa significhi "vedere" una particella elementare. Ciò che in realtà vediamo è la "traccia" che la particella lascia nell'attraversare un mezzo materiale. Un'analogia è quella della traccia lasciata da un aereo che viaggi ad alta quota, come mostrato in Figura 6.

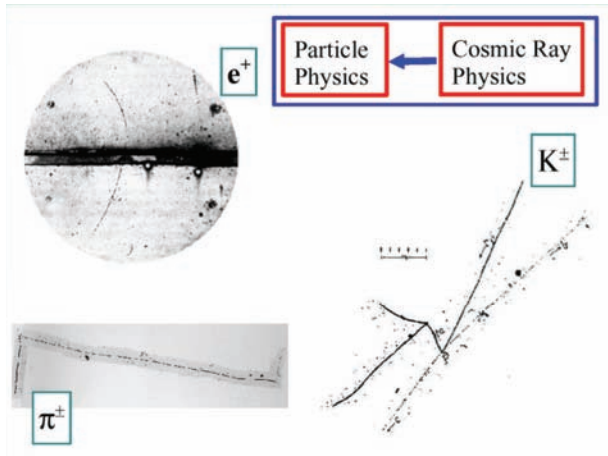


**Figura 6:** Traccia lasciata da un aereo in volo ad alta quota

Anche se a volte noi non riusciamo a vedere l'aereo, ne deduciamo il passaggio dalla scia che esso lascia. Ciò è facilmente esemplificato nei casi in cui la particella abbia una carica elettrica (positiva o negativa). Tra queste ricordiamo quelle di cui il nostro mondo (e noi stessi) è costituito: protoni ed elettroni. Altre particelle cariche sono quelle che ci piovono incessantemente addosso dallo spazio: quelli che conosciamo come *raggi cosmici* tra cui particolarmente abbondanti so-

## Unità di misura dell'energia adoperata nella fisica delle particelle.

Unità	keV	MeV	GeV	TeV	PeV	EeV
Valore	1000 eV	1000 keV	1000 MeV	1000 GeV	1000 TeV	1000 PeV
..	$10^3$ eV	$10^6$ eV	$10^9$ eV	$10^{12}$ eV	$10^{15}$ eV	$10^{18}$ eV

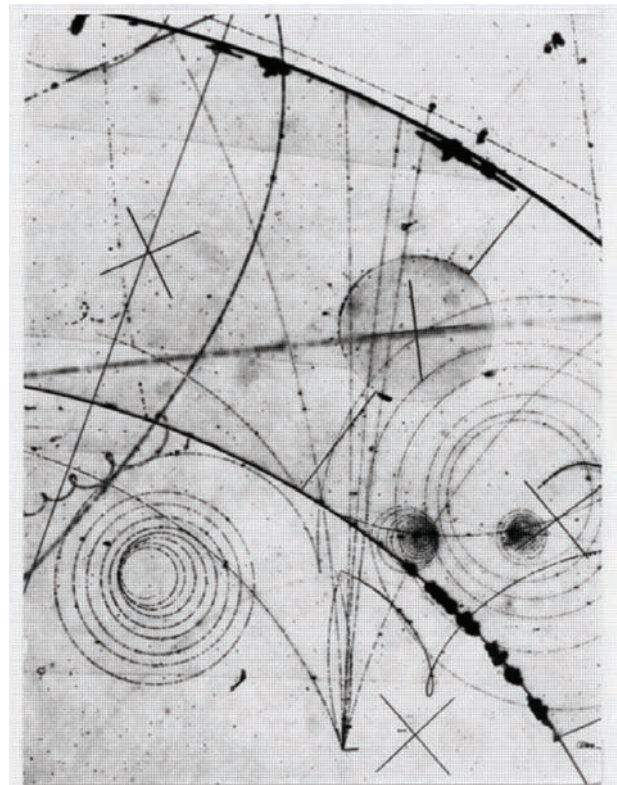


**Figura 7:** Tracce lasciate da particelle cariche in un'emulsione fotografica

no i  $\mu$ , i mesoni  $\pi$  ed altri. Le masse di tutte le particelle elementari sono enormemente piccole. I fisici, memori dell'equivalenza tra massa ed energia, preferiscono esprimere le masse delle particelle in unità di energia: l'elettrone volt o semplicemente eV. Questa è l'energia cinetica che un elettrone acquista quando venga accelerato da una differenza di potenziale di un Volt<sup>1</sup>. Tale unità è molto piccola e quindi vengono comunemente adoperati i multipli di questa grandezza, come indicato nel riquadro. Così la massa dell'elettrone è all'incirca 511 eV, quella del  $\mu$  106 MeV, quella del protone 938 MeV e via dicendo. I valori di alcune di queste masse sono indicati in Figura 4.

Tornando alla traccia che una particella lascia al proprio passaggio in un rivelatore, un esempio classico è quello della traccia lasciata nell'attraversare un'emulsione fotografica. Alcuni esempi sono mostrati nella Figura 7. Se una particella carica di alta energia (nei casi di Figura 7 si parla di energie dell'ordine delle centinaia di MeV o di qualche GeV) attraversa un'emulsione fotografica, essa "danneggia" gli atomi/molecole

<sup>1</sup>1 eV =  $1.60217733 \times 10^{-19}$  J.



Interazione  $\nu_{\mu} D_2$  in BEBC  
Esperimento WA25

**Figura 8:** Tracce lasciate da particelle cariche in una camera a bolle.

nella regione attraversata. Una volta che l'emulsione sia trattata chimicamente (sviluppata) la sequenza di atomi interessati risulterà più scura rispetto al resto dell'immagine. Questo è il caso degli esempi mostrati in figura. Questi sono degli eventi storici che non discuteremo, ma che hanno rappresentato importanti scoperte nella fisica delle particelle.

Un ulteriore esempio di visualizzazione di particelle è quello mostrato in Figura 8. Qui vediamo le tracce lasciate da alcune particelle in quella che è una camera a bolle. In questo caso, delle particelle cariche, attraversando un mezzo liquido tra-

sparente, in opportune condizioni di pressione e temperatura, provocano la formazione lungo la traiettoria percorsa, di minuscole bollicine, la cui sequenza indica la traiettoria delle particelle. Nell'esempio mostrato le traiettorie delle varie particelle sono curve, poichè il rivelatore contenente il liquido era collocato in una zona in cui era presente un intenso campo magnetico.

Le particelle positive vengono incurvate in un verso, quelle negative nel verso opposto. Nell'esempio mostrato notiamo che tutte le particelle appaiono provenire da un'unica origine posta nella parte bassa dell'immagine. Nel caso specifico le particelle nascevano dalla collisione di un neutrino con un nucleo. I prodotti della collisione sono le particelle positive e negative le cui traiettorie sono evidenti. Il neutrino d'altronde, non avendo carica elettrica, non lascia alcuna traccia.

Nell'esempio di Figura abbiamo un chiaro caso di rivelazione di una particella priva di carica elettrica, appunto il neutrino. Una particella neutra non interagisce con gli elettroni degli atomi e di conseguenza non lascia alcuna traccia come quelle che abbiamo visto. Per rivelare la presenza di una particella neutra dobbiamo sperare che essa collida con un nucleo o atomo, dando luogo ad una o più particelle cariche e quindi rivelabili. In altre parole dobbiamo aspettare che la particella neutra "muoia".

Nella Figura notiamo in aggiunta una coppia di particelle di segno opposto che appaiono provenire dalle vicinanze del medesimo punto in cui il neutrino ha interagito. Questa è una coppia elettrone-positrone ( $e^- e^+$ ) nata dalla "conversione" di un fotone ( $\gamma$ ) di alta energia generato nella medesima collisione che ha dato origine alle particelle cariche. Il  $\gamma$ , essendo privo di carica elettrica, non lascia alcuna traccia visibile, al pari del neutrino.

La probabilità che una particella collida e quindi "muoia" lasciando in tal modo traccia del proprio passaggio, dipende dall'energia della particella, ma dipende soprattutto dal tipo di particella. Tale probabilità è legata a quella che è nota come "sezione d'urto". Essa è estremamente piccola nel caso dei neutrini. Se prendiamo come riferimento tale probabilità per un protone avente energia pari a 10 GeV, essa è 200 miliardi di volte più piccola nel caso di un neutrino

della medesima energia. Ciò spiega come mai i neutrini provenienti dallo spazio attraversino liberamente la terra senza subire collisioni se non in rarissimi casi. Particolarmente elevato è il flusso dei neutrini provenienti dal Sole. Si calcola che all'incirca 70 miliardi di neutrini al secondo arrivano su ciascun  $\text{cm}^2$  di superficie terrestre. Ciò sia di giorno che di notte!

Tale probabilità cresce tuttavia molto all'aumentare dell'energia del neutrino. Per un neutrino di  $10^{20}\text{eV}$  (100 milioni di TeV) tale probabilità è un cento milioni di volte più grande che per un neutrino di 10 GeV. Si tratta comunque di probabilità estremamente basse, almeno per energie non troppo elevate.<sup>2</sup>

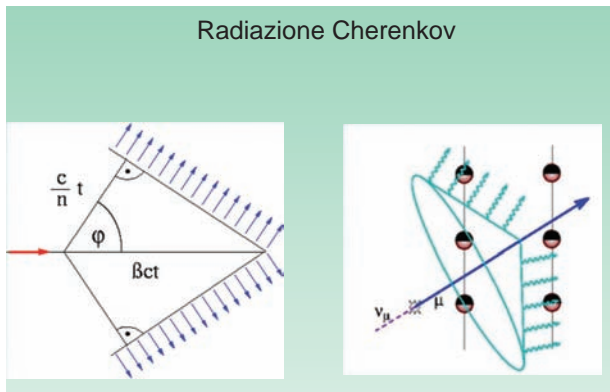
Un terzo tipo di rivelatori di particelle di cui dobbiamo parlare è quello basato sulla "radiazione Cherenkov". Ancora una volta ci baseremo sull'esempio di un aereo. Se questo viaggia a velocità superiore alla velocità del suono nell'atmosfera, viene generato un fronte d'onda sonoro note come "shock". Questo è mostrato nella parte superiore della Figura 9.



**Figura 9:** Immagine in alto: shock acustico generato da un aereo che viaggia a velocità supersonica. In basso: shock elettromagnetico generato da una particella che viaggia a velocità superiore a quella della luce nel mezzo.

Analogamente, se una particella carica viaggia in un mezzo trasparente (ad esempio l'acqua) ad una velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo, viene a generarsi una sorta di shock elettromagnetico (cioè luce - ovvero fotoni) come mostrato nella parte inferiore della medesi-

<sup>2</sup>Se l'energia dei neutrini è molto elevata, questi cominciano ad esser assorbiti nell'attraversarla.



**Figura 10:** A sinistra: schematizzazione del cono cherenkov di emissione della luce. A destra: visualizzazione tridimensionale del medesimo cono e dei fotoni emessi. È anche mostrata schematicamente una matrice di rivelatori della luce emessa.

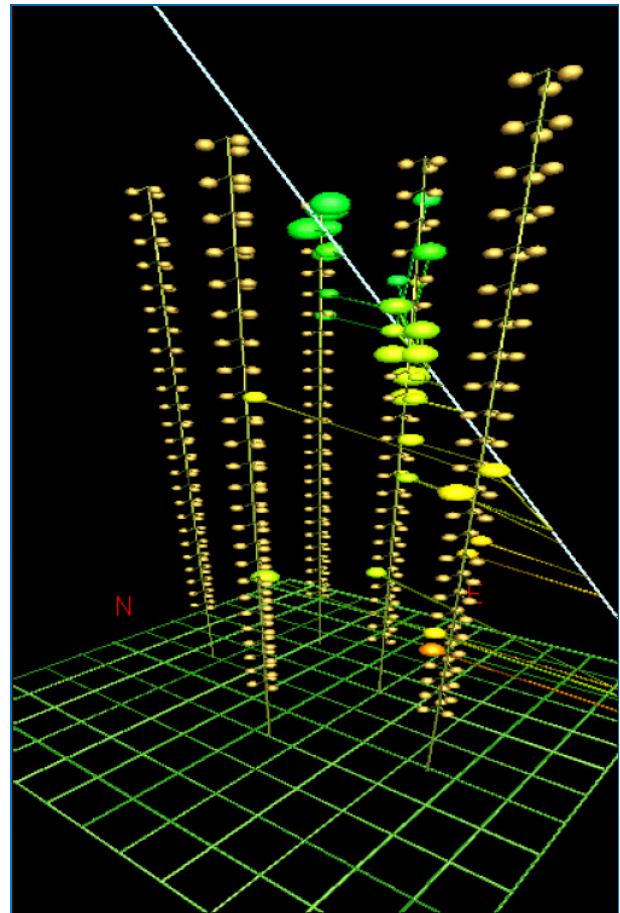
ma figura. Ciò che accade è illustrato in modo schematico in Figura 10.

A partire dalla superficie del cono mostrato viene emessa luce (ovvero fotoni). L'asse del cono coincide con la direzione della particella. Se ora noi avremo disposto nella regione di liquido attraversata dalla particella una serie di rivelatori di luce che registrino con grande precisione l'esatto istante d'arrivo della luce su ciascuno, conoscendo anche la posizione esatta di ciascun sensore, saremo in grado di ricostruire con grande precisione l'asse del cono e quindi la traiettoria della particella. I rivelatori di luce normalmente adoperati sono i fotomoltiplicatori (PMT). Un ulteriore esempio è mostrato in Figura 11.

I primi rivelatori che abbiamo descritto (emulsione fotografica, camera a bolle) sono oramai poco adoperati se non in casi eccezionali. Altri rivelatori sono in uso, quali le *camere proporzionali*, le *camere a "drift"*, le TPC (*Camere a proiezione temporale*), i *rivelatori a microstrip/micropad di silicio*, i *calorimetri*, etc. [17]. Negli esperimenti che discuteremo si fa esclusivamente uso dei rivelatori di radiazione Cherenkov.

## Interazione dei neutrini con la materia

Le collisioni cui siamo qui interessati sono quelle relative a neutrini di alta energia: diverse centinaia di GeV almeno. Nella collisione di un neutrino di questa energia con la materia (nella più



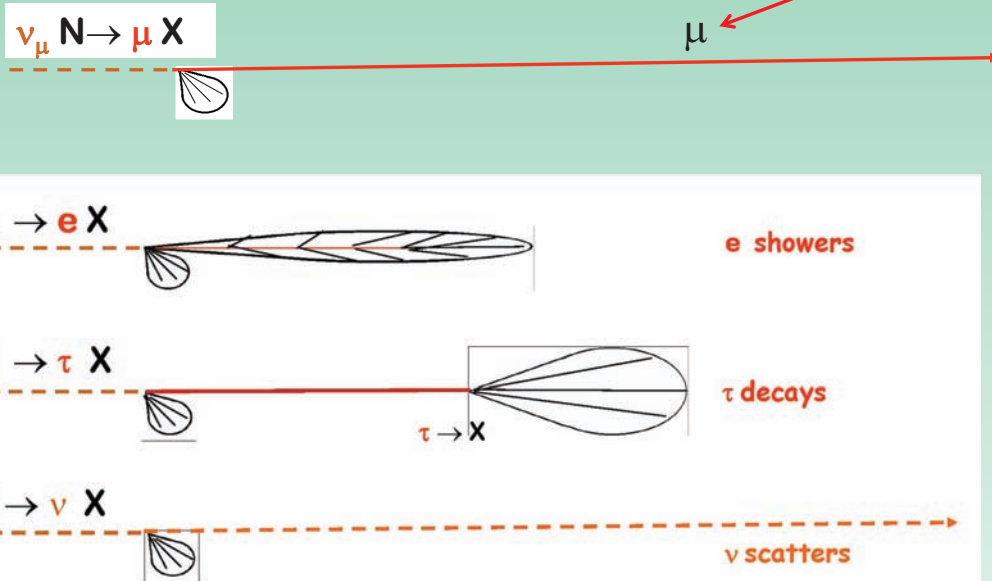
**Figura 11:** Un esempio di rivelatore di  $\mu$  che utilizza la luce Cherenkov emessa dalla particella nell'attraversare l'acqua. Nella Figura il colore indica i tempi relativi di arrivo dei segnali Cherenkov sui PMT: il giallo prima del verde. Sono anche indicate, a tratto sottile, le traiettorie (ricostruite) dei fotoni Cherenkov.

gran parte dei casi un nucleo atomico) possono aversi prodotti diversi a seconda del tipo di neutrino ( $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$  o corrispondenti antineutrini) come mostrato in Figura 12.

Il processo più rilevante per la rivelazione dei neutrini di origine cosmica è il primo nella figura. In tale processo viene prodotto un  $\mu$  di alta energia, che ha mediamente il 50% dell'energia del neutrino (75% nel caso di un antineutrino) insieme ad un certo numero di protoni, neutroni, mesoni  $\pi$  e  $k$  etc.. Questi ultimi si dividono il resto dell'energia. Queste ultime particelle perdono rapidamente energia, attraverso numerose collisioni nell'attraversare il mezzo; collisioni a catena nel corso delle quali nuove particelle, di energia via via più bassa, vengono prodotte. In tale processo a catena si ha in definitiva la formazione di un cosiddetto *sciame adronico*, mostrato

# La morte del neutrino

50% (75%) dell'energia del neutrino (antineutrino)



**Figura 12:** I differenti processi attraverso i quali un neutrino interagisce con la materia.

schematicamente nella figura. Le singole particelle dello sciame non sono, nella più gran parte dei casi, rivelabili individualmente, ma è spesso possibile determinare, con una certa approssimazione, l'energia totale dello sciame e la sua direzione.

Il processo è schematizzato con:



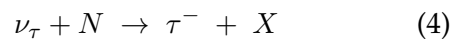
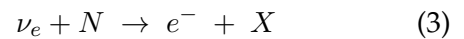
dove  $X$  indica lo sciame.

Analogamente, nel caso di un antineutrino avremo:



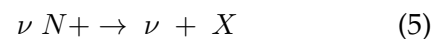
Per alte energie dei neutrini, in entrambe i processi il  $\mu$  viene emesso ad un angolo estremamente piccolo ( $\ll 1^{\circ}$ ) rispetto alla direzione del neutrino. Ciò è importante nella ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini di alte energie. La direzione del  $\mu$  indica in tal caso con chiarezza la posizione angolare della sorgente.

Considerazioni analoghe valgono nel caso dei restanti processi mostrati in figura:

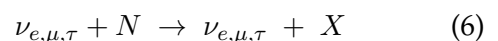


Nonchè degli analoghi processi indotti dai corrispondenti antineutrini.

Infine, l'ultimo dei processi mostrati in figura:



Può aver luogo indifferentemente per tutti i tipi di neutrini ed antineutrini. Ad esempio:



Ed analoghe per i corrispondenti antineutrini. In tali processi, non essendo rivelabile il neutrino prodotto, si vedrà solo lo sciame  $X$  e la rivelazione dell'evento, nonchè la valutazione dell'energia e direzione del neutrino, risulterà molto più problematica.



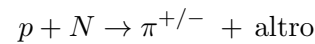
Un commento particolare è necessario nel caso del processo (3). In questo, l'elettrone prodotto, avendo una massa molto più piccola di quella del  $\mu^-$  prodotto nel processo (1), perde rapidamente energia nell'attraversare il mezzo denso in cui ha avuto luogo l'interazione. L'elettrone subisce un gran numero di collisioni con gli atomi che incontra, ed in ciascuna di queste perde energia, che emette sotto forma di fotoni ( $\gamma$ ). Questi a loro volta portano, nell'attraversamento del mezzo, alla produzione di coppie elettrone-positrone. Ciascuno di questi ultimi, perdendo energia in successive collisioni, produce ulteriori fotoni e quindi ulteriori coppie elettrone-positrone. Questo processo a catena si ripete fino a che l'energia di ciascuna delle coppie prodotte non scende al di sotto di una certa soglia. A questo punto l'ulteriore produzione di coppie  $e^+ e^-$  e di fotoni si arresta. Nel corso del processo sommariamente descritto si ha, come nell'analogo caso dello *sciame adronico*, lo sviluppo di uno *sciame elettromagnetico*, come schematizzato in figura. Tale sciame ha caratteristiche morfologiche assai diverse da quelle dello sciame adronico. Lo sciame elettromagnetico risulta più allungato e stretto di quello adronico, come visibile in figura.

## I raggi cosmici

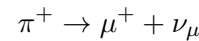
Per comprendere i problemi che si incontrano nella rivelazione dei neutrini astrofisici, è necessario capire preliminarmente quali altre particelle provengano a noi dal cosmo. Ciò anche perché molte di queste costituiscono una sorgente di segnali spuri nel tentativo di rivelare i neutrini; come si suol dire una *sorgente di fondi*, o anche di *rumore*. Altre danno luogo esse stesse alla produzione di neutrini, che è poi estremamente difficile distinguere dai neutrini di origine cosmica.

L'atmosfera terrestre è continuamente bombardata da un enorme flusso di particelle provenienti dallo spazio; quelli che sono noti come *raggi cosmici primari*. Essi sono prevalentemente costituiti da protoni ed altri nuclei di alta energia, con un piccolissimo contributo di altre particelle (elettroni, positroni,  $\gamma$  etc.). A terra siamo bombardati prevalentemente dai *raggi cosmici secondari*, prevalentemente muoni ( $\mu$ ) ma anche  $\gamma$ , elettroni, positroni e neutrini. Questi sono tutti il prodotto dell'interazione dei raggi cosmici

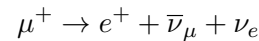
primari con i nuclei dell'atmosfera. In tali interazioni si ha la produzione di particelle a breve vita media, ad esempio:



dove  $N$  è un nucleo generico. Il  $\pi^+$  ( $\pi^-$ ) decade in circa  $10^{-8}$  secondi in un  $\mu$  ed un neutrino:

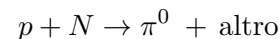


A sua volta il  $\mu^+$  decade in  $10^{-6}$  secondi in:

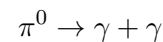


In definitiva questi processi, e gli analoghi in cui la particella prodotta è un  $\pi^-$ , danno origine alla produzione di neutrini ed antineutrini di entrambi i "flavour" ( $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ )

L'interazione dei protoni (o nuclei) dà luogo, con probabilità all'incirca uguali a quelle relative ai processi indicati, alla produzione dei partner neutri dei  $\pi^{+/-}$ , cioè dei  $\pi^0$  (massa circa 135 MeV):



Il  $\pi^0$  prodotto decade in tempi brevissimi ( $10^{-10}$  secondi) in due fotoni:



Riassumendo, sappiamo che nei raggi cosmici secondari sono presenti neutrini (antineutrini) e fotoni ( $\gamma$ ) di alta energia, all'incirca con la medesima abbondanza. Questi neutrini e  $\gamma$  sono in definitiva il risultato dell'interazione dei protoni (nuclei) incidenti sull'atmosfera, con i nuclei di cui l'atmosfera stessa è costituita.

Venendo ai neutrini di origine cosmica; la domanda che da decenni i ricercatori si pongono è: quali sono le possibili sorgenti galattiche (extragalattiche) di neutrini di alta energia? Qui non prendiamo in considerazione i neutrini solari nè quelli che possono provenire dall'esplosione di una supernova. Tutti questi hanno energie relativamente basse, limitate a poche decine di MeV.

È naturale pensare che queste siano quelle (principalmente resti di Supernovae) in cui si ritiene (come vedremo in seguito) avvenga la produzione ed accelerazione dei raggi cosmici

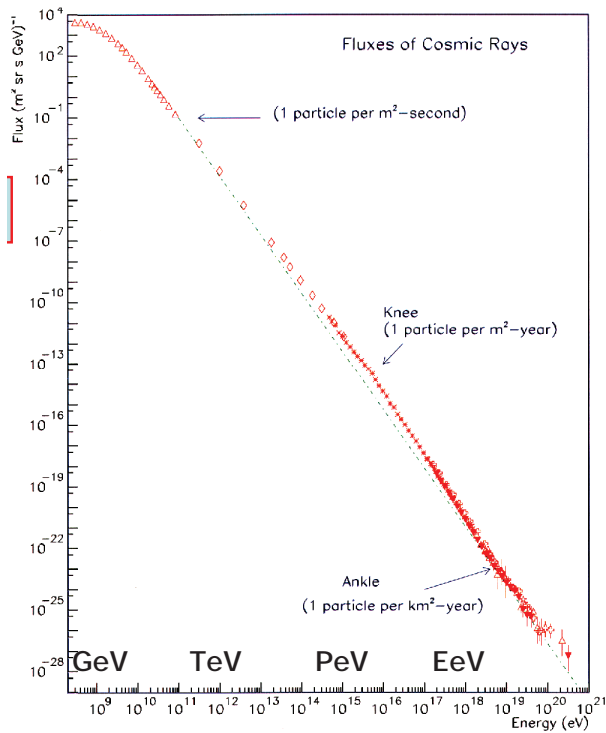


Figura 13: Spettro energetico dei raggi cosmici primari.

primari. Questi, interagendo con gli strati più esterni della sorgente (la Supernova Remnant nel caso specifico), potranno dar luogo a neutrini e fotoni, attraverso reazioni in tutto analoghe a quelle che hanno luogo nell'atmosfera terrestre. In quest'ipotesi, si è a lungo ritenuto che le sorgenti di  $\gamma$  fossero anche sorgenti di neutrini.

Purtroppo tale ragionamento semplicistico non tiene conto di un importante caveat: esistono meccanismi diversi da quello descritto (noto come *meccanismo adronico*), che possono dar luogo a  $\gamma$  di alte energie, e che non implicano la produzione di neutrini. Il più noto di tali meccanismi (noti come *meccanismi leptonici*) è il *Synchrotron-inverse-Compton*, di cui non discuteremo [18].

## Produzione ed accelerazione dei raggi cosmici

Lo spettro energetico dei raggi cosmici primari è stato misurato in un gran numero di esperimenti di vario tipo. Come mostrato in Figura 13 esso copre una range di energie che arriva fino a circa  $10^{21}$  eV (circa 1000 EeV). In tale range di energie lo spettro diminuisce drammaticamente, passando da un rate di qualche decina di particelle per  $m^2$

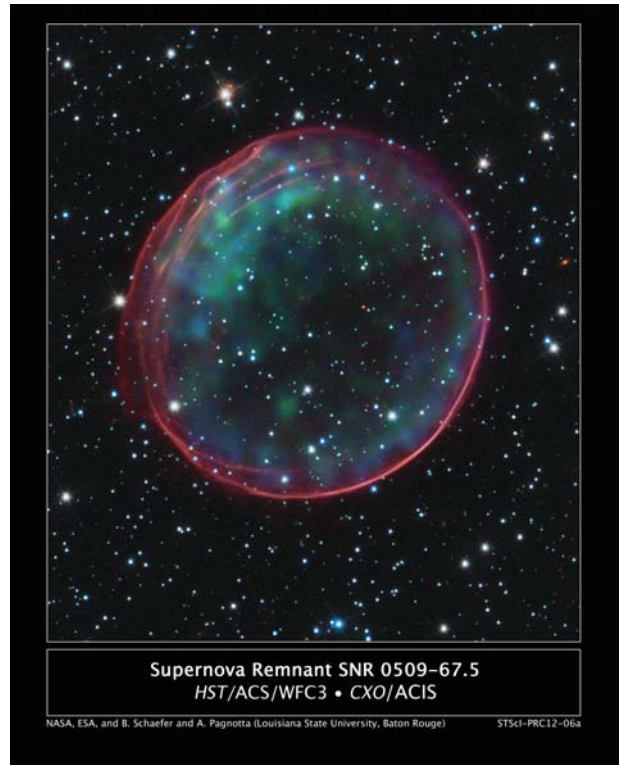
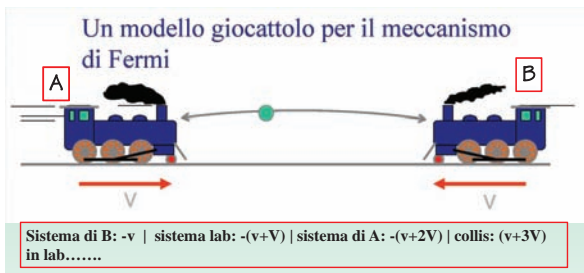


Figura 14: La supernova remnant snr 0509-67.5. Da NASA, ESA, CXC SAO. The Hubble space telescope Team.

per secondo a valori di qualche particella per  $km^2$  per decennio!

Non è del tutto chiaro quale meccanismo fornisca, in oggetti galattici o extragalattici, l'accelerazione osservata per protoni e nuclei. Il meccanismo comunemente accettato è noto come *meccanismo di Fermi del primo ordine* [19]. Tale meccanismo avverrebbe principalmente nelle *supernovae remnants*, cioè in ciò che rimane dopo l'esplosione di una supernova. A seguito dell'esplosione ciò che era una stella si contrae in una *stella di neutroni* o in un *buco nero*, mentre un fronte di gas e polveri si propaga nello spazio a velocità relativistiche, allontanandosi dal nucleo della stella originaria. Si veda ad esempio la Figura 14. La propagazione di quello che è un front di shock può proseguire per diversi secoli ed è in questa fase che protoni e nuclei possono, attraverso una serie di rimbalzi tra il fronte dello shock ed il mezzo interstellare circostante, acquistare le enormi energie osservate. Il meccanismo è assai più complesso di quel che possiamo qui descrivere. Tuttavia esso può essere qualitativamente compreso con riferimento al modello-giocattolo dei due trenini che viaggiano in direzioni opposte,



**Figura 15:** Un modello-giocattolo per illustrare il meccanismo d'accelerazione di Fermi.

come mostrato in Figura 15.

I due treni A e B viaggiano in direzioni opposte con velocità  $V$  uguali in modulo, sul medesimo binario. Se ora una pallina viene lanciata dal treno B verso il treno A, con velocità  $-w$  nel riferimento del treno B, essa avrà velocità  $-(w+V)$  nel laboratorio. La sua velocità nel riferimento di A sarà  $-(w+2V)$ . Se ammettiamo che la collisione della pallina con il treno A sia frontale ed elastica, la velocità della pallina nel sistema di A dopo la collisione sarà  $(w+2V)$ , mentre sarà  $(w+3V)$  nel sistema del laboratorio. Proseguendo nelle successive collisioni è facile vedere che, dopo un gran numero di collisioni la pallina avrà acquistato un'enorme velocità. Nel caso dell'accelerazione in Supernovae Remnants il problema è enormemente più complicato, per i seguenti motivi:

1. Il problema è tridimensionale
2. Le velocità sono relativistiche, il che richiede l'utilizzo delle trasformazioni di Lorentz
3. La presenza di campi magnetici gioca un ruolo importante nel processo
4. La massima energia raggiungibile dalle particelle dipende dalla durata del processo di espansione del fronte di shock

I calcoli necessari per raggiungere il risultato e calcolare lo spettro d'energia delle particelle sono complicati ed affetti da incertezze. È comunque necessario avere almeno un'idea della densità di Supernovae Remnants nella nostra Galassia e/o in Galassie vicine. Per una recente trattazione dei meccanismi d'accelerazione negli shock delle Supernovae Remnants si veda la referenza [20]. Lo spettro d'energia che tali calcoli forniscono è proporzionale a  $E^{-2.7}$ , in accordo

qualitativo con i dati sperimentali. Recentemente un'evidenza diretta della produzione di  $\pi^0$  in interazioni di protoni accelerati in Supernovae Remnants è stata fornita dall'esperimento FERMI [21].

## Possibili sorgenti di neutrini

Esiste un'ampia letteratura sulle possibili sorgenti di neutrini [22, 23, 24, 25, 26]. Qui ci limiteremo ad elencarne alcune ed a fornire qualche dettaglio aggiuntivo sulle Supernovae Remnants.

Tra le sorgenti possibili, sono state studiate in numerose analisi le seguenti:

1. Le quasars. Una quasar (contrazione di QUASi-stellar radio source, radiosorgente quasi stellare) è un nucleo galattico attivo estremamente luminoso e generalmente molto distante dalla Terra.
2. Le microquasars. Le microquasar hanno caratteristiche simili alle quasar ma, a differenza di queste, il buco nero al loro interno è di poche masse solari. Microquasar sono presenti anche nella nostra galassia.
3. Le pulsars. Sono stelle di neutroni che ruotano molto velocemente. La loro radiazione elettromagnetica in ristrette zone angolari è osservata come impulsi emessi ad intervalli estremamente regolari.
4. I nuclei galattici attivi. Galassie il cui nucleo, molto luminoso, emette una grandissima potenza radiativa (anche centinaia di volte superiore a quella delle normali galassie) con spettro che va dalle onde radio ai raggi X duri, e con una variabilità temporale su scale di tempo assai brevi (anche solo di qualche giorno o meno). Si ritiene che l'emissione sia causata da materiale in caduta verso un buco nero supermassivo (centinaia di milioni di masse solari).
5. Le blazars. Le Blazars sono delle quasars compatte, presumibilmente associate a buchi neri supermassivi, che emettono potenti getti di radiazione che, in modo continuo o intermittente, vengono a trovarsi orientati verso la Terra.

6. I gamma-ray-bursts. I gamma ray bursts sono brevi ma potentissime esplosioni che hanno luogo in galassie distanti, con emissione di raggi  $\gamma$ . Sono le più potenti esplosioni che hanno luogo nel cosmo, con durate che vanno da una frazione di secondo ad alcuni minuti.

Le Supernovae sono particolarmente interessanti, per quanto si è detto sopra quando si è parlato dei meccanismi di accelerazione.

Le stelle sono generalmente in equilibrio dinamico, come conseguenza del bilanciamento tra la pressione interna, dovuta ai processi di fusione nucleare ed al conseguente sviluppo di energia, e la gravità che tenderebbe a far collassare la stella verso il proprio nucleo interno. I processi di fusione iniziano, come già accennato, con la fusione di nuclei di idrogeno, poi di  $^2\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ , e via via dei nuclei sempre più pesanti prodotti. Tali processi proseguono fino a che l'elemento più abbondante non appartenga al gruppo del Fe. Essendo la fusione di nuclei di Fe un processo endotermico, che cioè non produce energia ma ne richiede, le reazioni di fusione si arrestano. A questo punto la pressione interna diviene insufficiente a bilanciare quella dovuta alla gravità. Ciò che accade in seguito è estremamente complesso, ma il risultato finale è l'implosione della stella, con simultanea creazione nella sua parte centrale di una stella di neutroni o di un buco nero e l'emissione di un guscio di materiale, ad altissime velocità. Nasce così una Supernova Remnant. Più in particolare, se il nucleo di Fe della stella originaria aveva massa compresa tra 1.39 e 3 masse solari, si ha la formazione di una stella di neutroni, mentre per masse maggiori di 3 masse solari viene a formarsi quello che è noto come un buco nero.<sup>3</sup> La nostra via lattea contiene qualche centinaia di migliaia di buchi neri. Esistono poi nell'Universo dei buchi neri supermassivi (che sono anzi la maggioranza). Questi hanno masse pari a milioni di volte quella del Sole. Si ritiene che ne esista uno al centro di ogni galassia, compresa la nostra, al cui centro è Sagittarius A\*, avente massa pari a circa 4 milioni di masse solari.

<sup>3</sup>Già Laplace, nel 1796, formulò l'ipotesi dell'esistenza di "stelle invisibili", in quanto talmente massive da rendere impossibile la fuoriuscita della luce. Appunto i buchi neri.

A parità di intensità emessa sotto forma di neutrini da una Supernova Remnant, il flusso osservabile sarà tanto maggiore quanto più essa è vicina. Per questo motivo particolare attenzione viene prestata alle Supernovae che negli ultimi millenni sono esplose nella nostra galassia o in galassie vicine. Tra le prime ricordiamo:

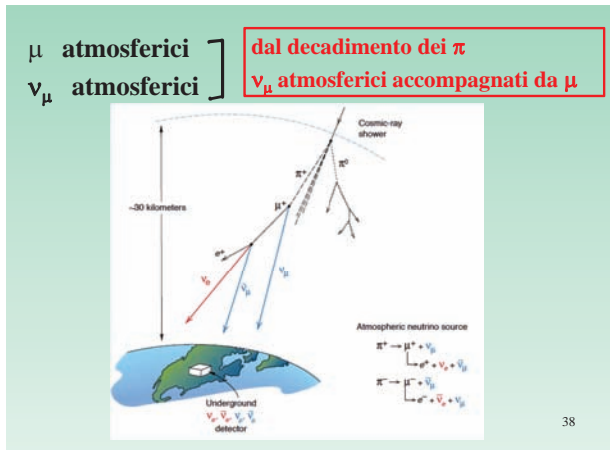
- la SN del 1006 (osservata da Cinesi, Giapponesi ed Arabi)
- la SN del 1054 (l'attuale CRAB)
- la SN del 1572 (detta di Tycho)
- la SN del 1604 (detta di Keplero)

Tra quelle in galassie vicine:

- la SN del 1885 (in Andromeda)
- la SN del 1987 (nelle nubi di Magellano)

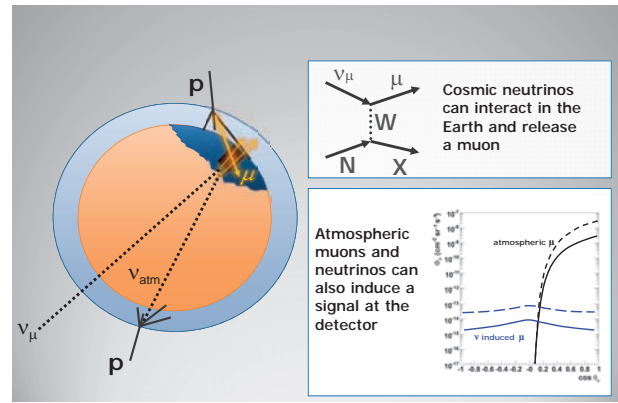
## Gli esperimenti sulla ricerca dei neutrini cosmici

Uno dei principali oggetti d'indagine nella fisica dei raggi cosmici è la ricerca delle relative sorgenti. Essendo i raggi cosmici costituiti prevalentemente da protoni ed altri nuclei leggeri, quindi dotati di carica elettrica, essi sono deflessi dai campi magnetici galattici/extragalattici, il che rende impossibile (se non ad altissime energie) associarli a determinate sorgenti. Inoltre, su grandi distanze essi sono assorbiti a causa delle interazioni con polveri e gas. I neutrini, essendo privi di carica elettrica, ed avendo una così piccola probabilità di collisione con le polveri ed i gas, non hanno alcuna di tali limitazioni. Si ritiene, come accennato, che essi provengano dal decadimento di "mesoni" ( $\pi$  ed altri) prodotti nelle interazioni di protoni e nuclei accelerati nelle Supernovae Remnants (o analoghi oggetti cosmici). Essi provengono cioè dalle medesime sorgenti da cui hanno origine i raggi cosmici e, a differenza di questi, "puntano" direttamente alle sorgenti. Un ulteriore vantaggio dei neutrini risiede nel fatto che, essendo così poco assorbiti dagli strati più esterni degli oggetti stellari, possono arrivare sulla Terra anche nei casi in cui siano stati prodotti nelle regioni più interne dei medesimi. Avendo poi essi una sezione d'urto così piccola,



**Figura 16:** Sorgenti di segnali spuri negli esperimenti sulla ricerca dei neutrini cosmici

è necessario un rivelatore di grande massa per consentirne la rivelazione. La prima idea di un rivelatore di grande volume per la rivelazione dei neutrini cosmici risale a M.A. Markov [27] che la propose nel 1960. L'idea era quella di usare l'acqua del mare (o di un grande lago o, come si fece in seguito il ghiaccio del polo sud) come bersaglio e rivelatore del  $\mu$  prodotto nell'interazione del neutrino. Il  $\mu$  è rivelato attraverso la luce Cherenkov che esso emette nell'attraversare il mezzo trasparente. Ciò è facilitato dal fatto che per alte energie ( $\gg 100$  GeV) il  $\mu$  prodotto acquista, come visto, una grossa frazione dell'energia del neutrino e di conseguenza percorre centinaia di metri nell'acqua del mare. Un gran numero di rivelatori ottici (fotomoltiplicatori/PMT) è ovviamente necessario per la rivelazione dei fotoni Cherenkov. Questi debbono esser sensibili alla debole quantità di luce prodotta. Essendo così sensibili potrebbero esser danneggiati da sorgenti intense di luce quale quella Solare o altre. È quindi opportuno posizionarli a grandi profondità marine (alcuni chilometri) dove il buio è assoluto. C'è un ulteriore vantaggio nel posizionare il rivelatore a grande profondità. Come accennato nella sezione sui raggi cosmici e come si può vedere nella figura 16, i raggi cosmici secondari, soprattutto i mesoni  $\mu$  atmosferici costituiscono un'importante sorgente di segnali spuri (di "rumore") per un rivelatore di questo tipo. Al livello della superficie terrestre il flusso dei  $\mu$  atmosferici è circa 100 per metro quadro e per secondo. Ad una profondità di 3 km tale flusso risulta, a causa della perdita d'energia che i  $\mu$  subiscono nell'attraver-

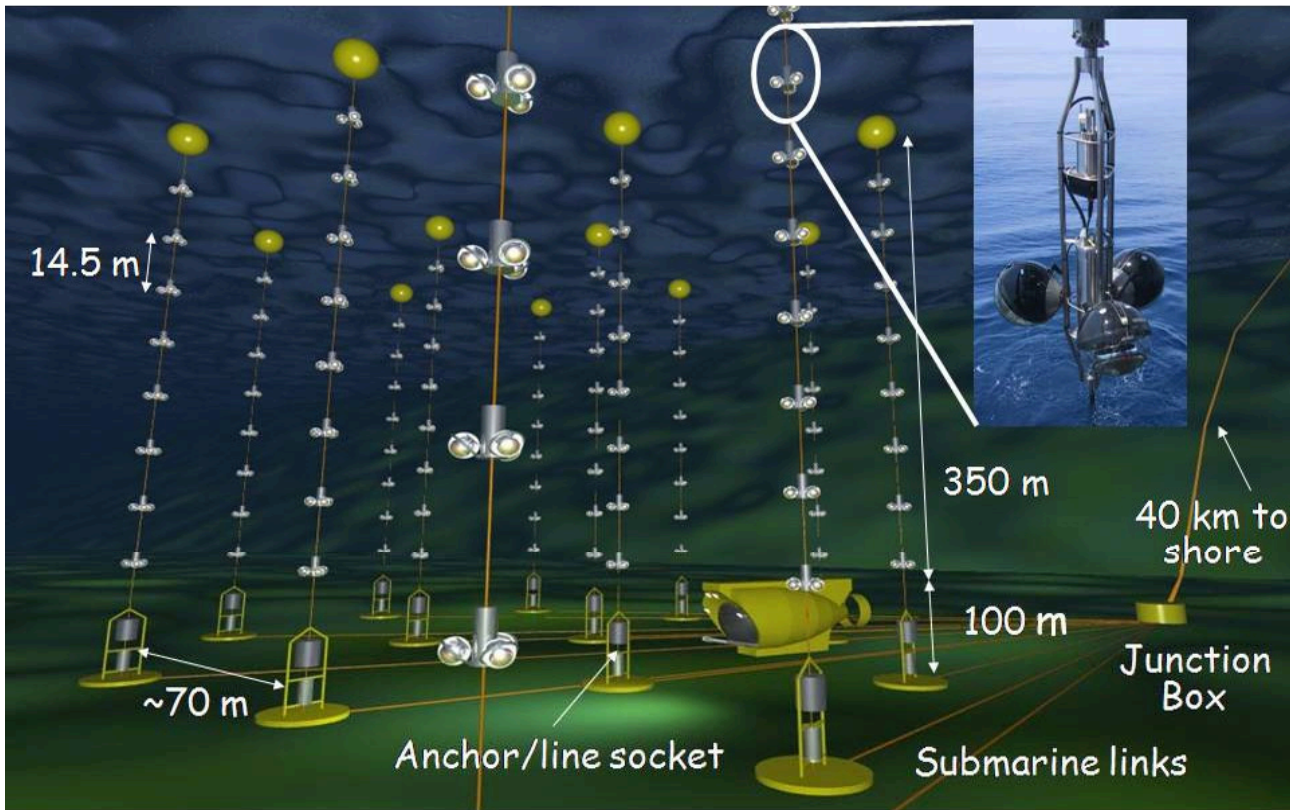


**Figura 17:** Tipica collocazione del rivelatore in fondo al mare. Sono mostrate le varie sorgenti di "fondi";  $\mu$  generati dai raggi cosmici nell'atmosfera; neutrini generati dai medesimi processi, anche nell'emisfero opposto. Il diagramma in alto a destra rappresenta il tipico processo di produzione di  $\mu$  da parte dei neutrini. In basso, il flusso dei  $\mu$  atmosferici confrontato con quello dei neutrini atmosferici, in funzione dell'angolo di provenienza.

sare l'acqua, all'incirca un milione di volte più piccolo, il che è un indubbio vantaggio per gli esperimenti.

Convieni a volte, per liberarsi completamente da tale residuo flusso di  $\mu$  atmosferici, costruire esperimenti ottimizzati per la ricerca di neutrini provenienti "dal basso", cioè neutrini che abbiano attraversato la Terra ed abbiano poi interagito negli strati di Terra posti sotto al rivelatore o nell'acqua. come mostrato in Figura 17. Nella Figura sono indicate le altre particelle che potrebbero costituire sorgenti di segnali spuri.

I primi tentativi di installare a grandi profondità marine un rivelatore di questo tipo risalgono al 1980, con l'esperimento DUMAND [28] di cui un prototipo fu installato al largo delle isole Hawaii, ad una profondità di circa 4.5 km. Questi proseguirono con l'esperimento Baikal [29], installato nell'omonimo lago, a partire dal 1990 ad una profondità di circa 1100 metri; poi con l'esperimento AMANDA [30], installato sotto i ghiacci del polo sud, a partire dal 1995 ad una profondità compresa tra 1500 e 2000 metri; con l'esperimento NESTOR [31], di cui un prototipo funzionò per qualche mese nel 2003, ad una profondità compresa tra 4000 e 5000 metri, al largo delle coste del Peloponneso; con l'esperimento NEMO [32, 33], di cui un prototipo fu installato e funzionò per qualche mese, ad una profondità di circa 1 km,



**Figura 18:** Sketch del rivelatore ANTARES. La foto nel piccolo riquadro mostra un tipico tripletto di PMT ed il relativo contenitore dell'elettronica associata.

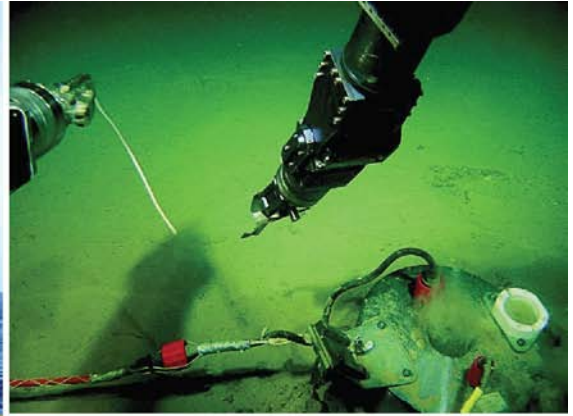
al largo del porto di Catania; con l'esperimento ANTARES [34, 35, 36, 37, 38], installato a partire dal 2002 al largo di Tolone ad una profondità di 2400 metri; con l'esperimento IceCube, installato sotto i ghiacci del polo sud. Dedicheremo nel seguito la nostra attenzione a due esperimenti tuttora in fase di presa dati: ANTARES ed IceCube. Accenneremo poi brevemente al nuovo grande progetto in costruzione nel Mediterraneo, KM3.

### L'esperimento ANTARES

Il rivelatore ANTARES, costruito ed operato da un'ampia collaborazione di istituzioni ed università soprattutto europee, è installato al largo di Tolone, a circa 40 km dalla costa, ad una profondità di 2400 metri. Esso consiste di 875 sensori ottici (fotomoltiplicatori / PMT) fissati, come mostrato in Figura 18, a 12 cavi elettro-ottici, dove sono raggruppati in "tripletti". Essi *guardano* verso il basso ad un angolo di  $45^\circ$  rispetto alla verticale. I cavi, saldamente ancorati sul fondo del mare e tenuti in tensione da apposite boe in cima, svolgono il triplo ruolo di reggere meccanicamente

i PMT, di fornire ai medesimi ed all'elettronica associata l'energia elettrica necessaria e di trasmettere verso la stazione di controllo posta a terra i segnali registrati dai PMT. Un cavo elettro-ottico sottomarino, lungo circa 40 km è anche adoperato a tale scopo. I PMT sono racchiusi in sfere di vetro resistenti alla pressione. Le correnti marine possono spostare lateralmente le boe e quindi tutti i PMT, anche di diversi metri. Poiché è d'altronde necessario, per la ricostruzione delle traiettorie dei  $\mu$ , conoscere con grande precisione la posizione ed orientazione di ciascun PMT, si fa ricorso ad un sistema di idrofoni, insieme a bussole ed inclinometri, i cui segnali consentono di avere, istante per istante, l'informazione geometrica desiderata. Scopo dell'esperimento è la ricerca di neutrini (principalmente  $\nu_\mu$  e  $\bar{\nu}_\mu$ ) aventi energie maggiori di circa 50 GeV, attraverso la rivelazione dei  $\mu$  prodotti. L'orientazione dei PMT è stata scelta per ottimizzare la rivelazione di neutrini provenienti dal basso.

L'installazione e le eventuali operazioni di riparazione del rivelatore richiedono l'utilizzo di navi e di sottomarini teleguidati. Un esempio è mostrato in Figura 19. Uno dei problemi che si in-



**Figura 19:** Nella foto di sinistra: una delle linee, posizionata sulla nave e pronta per l'immersione. In primo piano è ben visibile la boa. Nella foto di destra si vedono due dei "bracci" del sottomarino teleguidato che effettua un collegamento in profondità.

contrano in esperimenti di questo tipo effettuati in mare è quello delle sorgenti spurie di piccoli segnali luminosi. Queste hanno due diverse origini:

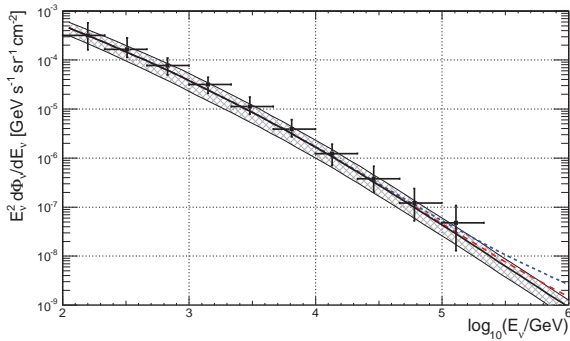
1. La presenza nell'acqua del mare di un isotopo radioattivo del potassio ( $^{40}\text{K}$ ). Questo, decadendo dà luogo ad elettroni che, per effetto Cherenkov, emettono piccole quantità di luce.
2. La presenza, anche a grandi profondità, di organismi marini che "comunicano" emettendo piccoli impulsi luminosi

Il primo dei due effetti è abbastanza costante nel tempo e non crea troppi problemi. Il secondo può divenire importante in alcuni periodi, a causa dell'afflusso di organismi biologici, spesso dovuto a correnti sottomarine. Si trova che tale effetto diminuisce con la profondità, per cui è in

linea di massima preferibile installare gli esperimenti a grandi profondità e ad una notevole distanza dalla costa.

ANTARES ha raccolto dati a partire dal 2007. Nel periodo 2007-2013 erano stati raccolti all'incirca 6300 eventi indotti da neutrini ed antineutrini muonici [39]. In questa analisi erano stati eliminati gli eventi aventi  $\cos \theta \geq 0.1$  dove  $\theta$  è l'angolo zenitale del  $\mu$ . In aggiunta erano stati ottenuti molti eventi in cui solo lo sciame adronico/elettromagnetico era visibile. Due diverse analisi erano state effettuate su questi eventi, più precisamente sugli eventi raccolti fino a tutto il 2012:

1. Una ricerca di sorgenti puntiformi di neutrini in una regione prossima al centro della nostra galassia
2. Una ricerca di neutrini "diffusi"; cioè di un eccesso di eventi di altissima ener-



**Figura 20:** Spettro energetico dei neutrini atmosferici misurato in diversi esperimenti.

gia rispetto al "fondo" dovuto ai neutrini atmosferici

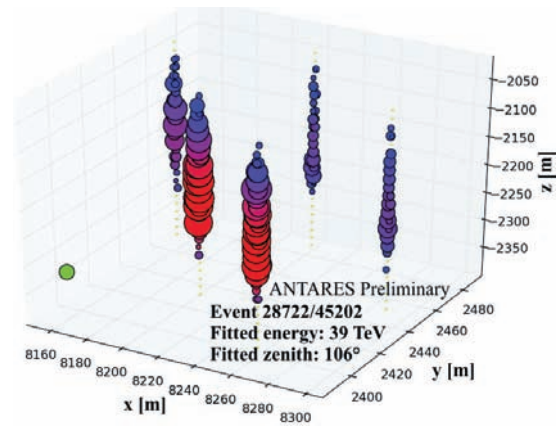
Nel primo caso si cerca un eccesso ad un certo angolo (in coordinate galattiche) rispetto ad una distribuzione angolare relativamente uniforme, dovuta ai neutrini atmosferici. A sua volta questa analisi è stata ripetuta in due modi diversi:

1. Cercando un eccesso in una qualsivoglia direzione
2. Cercando un eccesso in direzioni predefinite, corrispondenti a 50 sorgenti galattiche note

In entrambi i casi si ipotizzava una dipendenza del flusso dall'energia  $E$  del neutrini proporzionale ad  $E^{-2}$ . Nessuna delle due ricerche ha evidenziato un eccesso. In queste circostanze, ciò che l'esperimento pubblica è un *limite superiore* al flusso. Tale limite è normalmente espresso in unità dell'energia al quadrato moltiplicata per il flusso ( $\text{GeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). In entrambe le analisi menzionate il limite risulta dell'ordine di ( $1 \div 3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Una ricerca alternativa è quella dei cosiddetti *neutrini diffusi*, cioè di un eccesso di  $\nu$  rispetto al fondo dei neutrini atmosferici. La ricerca dei neutrini diffusi [40] è basata sulla misura dell'energia dei  $\mu$  rivelati che, come accennato in precedenza, è una frazione rilevante dell'energia dei neutrini. Ciò consente di liberarsi del "fondo" dei neutrini atmosferici che, come mostrato in Figura 20 diminuisce molto rapidamente con l'energia.

Applicando quindi un "taglio" sull'energia del  $\mu$  rivelato, si cerca un'eccesso di eventi per energie che superino tale valore. <sup>4</sup> Per "eccesso" si



**Figura 21:** Esempio di evento con sciame. Sono mostrati i segnali indotti in 5 delle 12 linee del rivelatore.

intende un numero di eventi maggiore di quello atteso dai fondi dovuti sia a  $\mu$  atmosferici mal ricostruiti che alle "code" ad alte energie dei neutrini atmosferici. Con un taglio in energia di 45 TeV, gli autori trovano 8 eventi, con un fondo atteso di 8.4. Ne deducono un limite superiore al flusso dei neutrini astrofisici di:

$$E^{-2} \Phi = 5.1 \text{ GeV} \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

Un'ulteriore ricerca di neutrini diffusi è stata effettuata facendo uso degli eventi contenenti solo uno "sciame". Questi possono essere eventi indotti da  $\nu_\tau$ , da  $\nu_e$  o da  $\nu_\mu$  in cui il  $\mu$  ha solo una piccola frazione dell'energia del neutrino. Possono anche esser eventi, del tipo descritto in precedenza, in cui non c'è produzione di alcun leptone carico, ma nello stato finale è presente un neutrino uguale a quello che ha interagito. Un evento con sciame è mostrato in Figura 21.

Anche in questo caso non è stato trovato alcun eccesso. Il limite posto al flusso di neutrini cosmici nel range di energie ( $23 \text{ TeV} \div 7.8 \text{ PeV}$ ) è in tal caso:

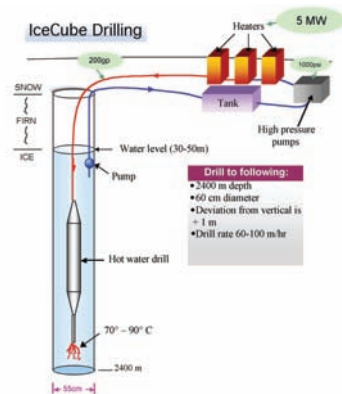
$$E^{-2} \Phi = 4.91 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

## La ricerca di neutrini da Blazars in ANTARES

Come detto più su, una sorgente di fondo difficile da eliminare è quella dei neutrini atmosferici.

<sup>4</sup>La determinazione dell'energia del  $\mu$  è basata sulla quantità di luce vista dai rivelatori ottici.





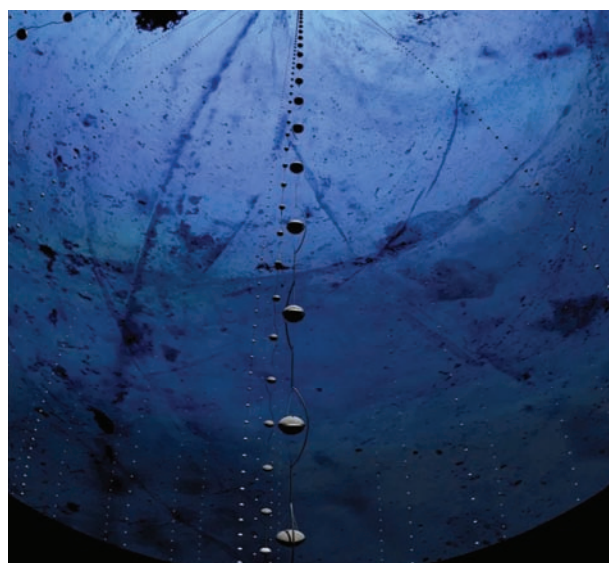
**Figura 22:** Sistema adoperato da IceCube per la fusione del ghiaccio e per la successiva installazione di una stringa.

Poiché questi hanno energie relativamente basse (inferiori a  $40 \div 50$  TeV) la tecnica normalmente adoperata è quella di selezionare eventi con energie superiori a tali valori. Tuttavia è possibile in alcuni casi ricorrere ad un diverso metodo. Se infatti una sorgente emettesse neutrini solo in un breve intervallo di tempo, sarebbe possibile selezionare eventi in quell'intervallo, in cui il flusso dei neutrini atmosferici sarebbe enormemente ridotto. Sorgenti di questo tipo sono le *Blazars*, caratterizzate da una emissione concentrata in piccoli intervalli di tempo, ed i cosiddetti "flares". L'emissione  $\gamma$  da parte di tali sorgenti è monitorata dal rivelatore FERMI ad energia fino al GeV e, ad energie molto più elevate, dai rivelatori Cherenkov atmosferici, quali H.E.S.S., MAGIC e VERITAS. ANTARES ha quindi cercato neutrini provenienti da tali sorgenti in coincidenza temporale con l'osservazione dei  $\gamma$ . L'analisi si è concentrata su 41 Blazars di grande luminosità osservate da FERMI e su 7 "flares" di energia nella regione del TeV osservati dai rivelatori Cherenkov. È stata trovata un singolo neutrino in correlazione spazio-temporale con un  $\gamma$ , dalla blazar 3C79 nella regione del GeV. Tuttavia la probabilità che tale evento sia dovuto ad una delle varie sorgenti di fondo non è ritenuta trascurabile. Solo limiti superiori al flusso di neutrini da tali sorgenti sono quindi stati forniti da queste analisi [41].

## L'esperimento IceCube

L'esperimento IceCube, condotto da un'ampia collaborazione internazionale, è stato installato sotto i ghiacci del polo sud tra il 2005 ed il 2010. Il rivelatore è situato ad una profondità che va da 1450 a 2450 metri, ed occupa un volume totale di circa  $1 \text{ km}^3$ . I 5160 sensori ottici (PMT) sono distribuiti su 86 stringhe. Uno dei vantaggi che derivano dall'operare sotto i ghiacci è nel fatto che l'attività biologica, presente nel mare, è qui totalmente assente. Parimenti assente è il  $^{40}\text{K}$ . Tali vantaggi sono in parte controbilanciati dal fatto che, una volta che il rivelatore sia "immerso" a qualche km di profondità nel ghiaccio, è destinato a restarvi. Nessuna operazione di recupero/riparazione è possibile. Come mostrato in Figura 22, per installare ogni singola stringa viene effettuato, facendo uso di acqua ad alta temperatura, un profondo foro nel ghiaccio. La stringa viene quindi immersa nell'acqua del foro che, poco tempo dopo, risolidifica. L'operazione richiede molto tempo ed energia. L'installazione di una stringa richiede in media 2 giorni. La Figura 23 mostra alcune stringhe di IceCube come viste da sotto il ghiaccio.

L'esperimento ha pubblicato, negli ultimi anni, una gran quantità di risultati. Questi comprendono, per la prima volta, l'osservazione di neutrini cosmici. Ci limiteremo qui ai risultati riguardanti:

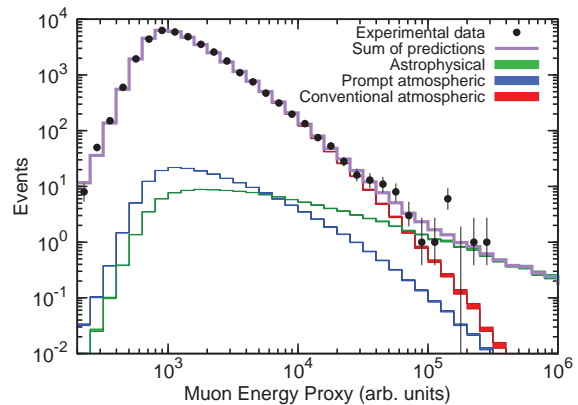


**Figura 23:** Veduta delle stringhe di IceCube da sotto il ghiaccio.

1. i  $\mu$ , sia atmosferici che cosmici, con origine nella Terra o nel ghiaccio sotto il rivelatore,
2. gli eventi che hanno origine all'interno della zona occupata dal rivelatore.

## Eventi con $\mu$

I risultati riguardanti questi eventi sono stati pubblicati di recente [42]. Questi hanno riguardato i dati raccolti nei primi anni di presa dati (35000  $\nu_\mu$  rivelati tra Maggio 2010 e Maggio 2012). Nell'analisi sono stati accettati solo eventi provenienti dall'emisfero nord. Per far ciò sono stati selezionati eventi con angolo zenitale maggiore di  $85^\circ$ , corrispondenti ad una massa totale attraversata dai neutrini equivalente ad almeno 12 km d'acqua. L'energia dei  $\mu$ , grossolanamente legata a quella dei neutrini è stata valutata sulla base della quantità di luce vista dai PMT. Quando il  $\mu$  entra nella zona strumentata può aver già attraversato centinaia di metri ed aver quindi perso una considerevole frazione della sua energia. Dato che la sezione d'urto dei neutrini aumenta all'aumentare dell'energia, per neutrini di altissima energia ci si aspetta un notevole assorbimento dei medesimi nell'attraversare la terra, specie per quelli provenienti dallo zenit. La Figura 24 mostra lo spettro d'energia dei  $\mu$  osservati. I punti neri con barra d'errore sono i dati sperimentali. In rosso è mostrata la distribuzione attesa dai neutrini atmosferici. Si nota come, ad energie superiori a circa 30 TeV vi sia un eccesso d'eventi rispetto al flusso atteso dai soli neutrini atmosferici. Questo è un primo indizio di neutrini d'origine cosmica. Il flusso degli atmosferici è stato calcolato come la somma di quelli provenienti dal decadimento di  $\pi^{+/-}$ ,  $\mu^{+/-}$ ,  $K^{+/-}$ . Esiste anche un flusso atteso dal decadimento di particelle più pesanti, a breve vita media (soprattutto i mesoni D). Le predizioni per quest'ultimo sono mostrate in blue nella medesima figura. Come si vede il suo contributo non appare importante. L'eccesso di eventi ad energie superiori a circa 30 TeV corrisponde a 3.7 deviazioni standard. Le predizioni, risultanti da questa analisi, per i neutrini astrofisici, sono mostrate dalla curva verde nella figura. L'eccesso osservato ad alte energie è consistente con un flusso di neutrini ( $\nu_\mu$ ) astrofisici dato da:



**Figura 24:** Spettro energetico dei  $\mu$  misurati in IceCube. I punti in nero, con barra d'errore sono i dati sperimentali. In rosso il contributo atteso dai neutrini atmosferici. In blu quello dei neutrini dal decadimento di particelle più pesanti (mesoni D). In verde il contributo calcolato per i neutrini di origine astrofisica, dove si è ipotizzata una dipendenza dall'energia del tipo  $E^{-2}$ . La scala orizzontale non è propriamente l'energia, ma il valore di circa  $3 \times 10^3$  è all'incirca la stessa quantità in GeV.

$$\Phi(E_\nu) = 9.9^{+3.9}_{-3.4} \times 10^{-19} \left( \frac{E_\nu}{100 \text{ TeV}} \right)^{-2} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

È stata effettuata una ricerca [43] di possibili sorgenti puntiformi di tali neutrini, con risultati negativi.

## Eventi con inizio all'interno della zona strumentata

Per liberarsi completamente del fondo residuo dei  $\mu$  atmosferici nonché di quello dovuto ai neutrini atmosferici che hanno interagito al di sotto del rivelatore, è stata effettuata una selezione dei soli eventi che hanno origine all'interno della zona strumentata [44, 43, 45]. A tale scopo sono stati rigettati gli eventi che hanno dato luogo a segnali nei PMT più esterni, in coincidenze locali ed a tempi causalmente compatibili con la posizione del vertice ricostruito, come mostrato in Figura 25. Si noti che per alte energie i  $\nu$  atmosferici, dal decadimento  $\pi \rightarrow \mu\nu$  sono spesso accompagnati da  $\mu$ . Quindi la reiezione dei  $\mu$  entranti nel rivelatore aiuta a rigettare i neutrini atmosferici. Ulteriori dettagli di tali criteri di veto sono dati nella referenza [44].

Ricerca di eventi di altissima energia iniziati nel rivelatore



**Figura 25:** Schema del rivelatore ICECUBE, con indicazione del veto utilizzato per rigettare eventi con origine fuori dalla zona strumentata.

Una prima selezione ha portato, usando gli eventi raccolti in 641 giorni di presa dati, ad un campione di 388 eventi con origine all'interno della zona strumentata, aventi energie superiori ad 1 TeV. Un'analisi dettagliata di tali eventi porta ad una stima del numero di quelli indotti da neutrini astrofisici di  $87_{-10}^{+14}$ , cui corrisponde, nel range di energie 25 TeV ÷ 1.4 PeV un flusso dato da:

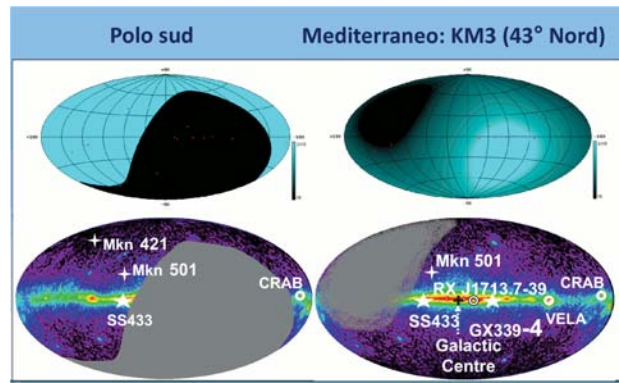
$$\Phi_{\nu} = 2.06_{-0.3}^{+0.4} \times 10^{-18} (E_{\nu}/100 \text{ TeV})^{-2.46 \pm 0.12} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Notiamo che questo dato è relativo alla somma dei tre "flavour" di neutrini ( $\nu_{\mu}, \nu_e, \nu_{\tau}$ ), mentre quello ottenuto in precedenza era relativo ai soli  $\nu_{\mu}$ . I due risultati sono quindi compatibili entro gli errori. IceCube ha così portato ad una prima osservazione di neutrini di alta energia da sorgenti astrofisiche. Al momento, tuttavia, nessuna associazione a specifiche sorgenti note, sia galattiche che extragalattiche, è stata evidenziata.

Una ricerca di sorgenti puntiformi localizzate nell'emisfero sud è stata effettuata combinando i dati di ANTARES con quelli di IceCube relativi ai neutrini provenienti dal cielo sud. Il risultato è stato negativo [46].

## Il progetto KM3

Ricordiamo che l'idea base degli esperimenti che non intendono limitarsi ad eventi con origine



**Figura 26:** Confronto tra la zona della nostra galassia vista da un rivelatore collocato nel Mediterraneo e da uno collocato al polo sud.

all'interno del rivelatore, è quella di rivelare neutrini provenienti "dal basso", che abbiano cioè attraversato la Terra. Tenendo conto della posizione ed orientazione della Terra nella nostra galassia, ciò implica che un esperimento operante nell'emisfero nord è ottimale per rivelare neutrini provenienti dalle zone centrali della galassia, dove si ritiene possano esistere numerose sorgenti; vedi Figura 26. Questo è un indubbio vantaggio rispetto ad esperimenti quali IceCube, installati nell'emisfero sud. Un ulteriore vantaggio che caratterizza gli esperimenti effettuati in mare, rispetto a quelli effettuati nel ghiaccio, è la migliore risoluzione angolare nella ricostruzione dei  $\mu$ .<sup>5</sup>

Come accennato in precedenza, allo scopo di minimizzare sorgenti spurie di luce, quali quelle legate ad attività biologiche, è opportuno lavorare a grandi profondità e grande distanza dalla costa. Sotto questo profilo la scelta del sito di ANTARES, anche se vantaggiosa sotto il profilo logistico, data la vicinanza a grandi installazioni marine quali quelle presenti nel porto di Tolone, non è ideale. Si è quindi individuato un sito nel Mediterraneo meridionale, a sud della Sicilia, profondo circa 3500 metri e distante circa 100 km dalla costa. È stato quindi messo in opera un lungo cavo elettro-ottico sottomarino che connette la stazione di terra (posta a Capopassero - Sicilia) con il sito scelto. Qui sono stati installati sul fondo del mare i sistemi d'interfaccia tra il cavo sottomarino ed il rivelatore. Quest'ultimo è ora in fase di costruzione. Il rivelatore sarà co-

<sup>5</sup>Ciò è legato al fatto che i fotoni Cherenkov prodotti subiscono processi di diffusione nettamente ridotti in acqua rispetto a quanto accade nel ghiaccio.



**Figura 27:** Uno dei moduli ottici adoperati nell'esperimento KM3. Ciascun modulo contiene 31 PMT di piccolo diametro, otto dei quali sono visibili nella foto.

stituito da una gran numero di "moduli ottici". Ciascuno di questi consiste di una sfera di vetro resistente alla pressione, che contiene, al posto del singolo fotomoltiplicatore di grande superficie adoperato sia in ANTARES che in IceCube, 31 piccoli fotomoltiplicatori, come mostrato in Figura 27. Con tale scelta è da un lato possibile ridurre i problemi legati alle sorgenti spurie di segnali luminosi, dall'altro "vedere" la direzione di provenienza della luce Cherenkov, il che aiuta nella ricostruzione delle tracce. I moduli ottici saranno distribuiti su 115 stringhe alte circa 700 metri, con 18 moduli per stringa. Si otterrà in tal modo un rivelatore pari a circa tre volte IceCube.

## Conclusioni

Dopo l'osservazione dei neutrini solari in due diversi esperimenti, e quella dei neutrini emessi nell'esplosione della Supernova SN1987/A, gli sforzi di numerosi gruppi sperimentali si sono concentrati sulla ricerca di neutrini di alta energia emessi da sorgenti galattiche o extragalattiche. Alcuni di questi esperimenti sono stati completati ed hanno preso dati per diversi anni. Abbiamo qui analizzato i due esperimenti, ANTARES nell'emisfero nord ed IceCube al polo sud, che hanno la massima sensibilità nei rispet-

tivi emisferi. Il primo di questi esperimenti, di dimensioni nettamente inferiori a quella di IceCube ma caratterizzato da una migliore risoluzione angolare nella ricostruzione dei  $\mu$ , non ha al momento individuato alcuna sorgente di neutrini. Il secondo ha trovato diversi eventi indotti da neutrini di altissima energia, sia attraverso la rivelazione dei  $\mu$  prodotti che attraverso l'osservazione di sciami elettromagnetici o adronici. Tuttavia i tentativi di associare tali eventi a determinate sorgenti galattiche o extragalattiche non hanno dato esito positivo. Un nuovo esperimento, Km3, che si ritiene possa avere sensibilità migliore di quella di IceCube, è attualmente in fase di costruzione/messa in opera nel Mediterraneo.



- [1] F. DE PAOLIS, M. GIORDANO, G. INGROSSO, L. MANNI, A. NUCITA, F. STRAFELLA: "Macro / Micro / Retro lensing gravitazionale", *Ithaca* 5 (2015) 19 - 34.
- [2] <http://www.asdc.asi.it/bepposax/>
- [3] <http://chandra.harvard.edu/>
- [4] [www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/](http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/)
- [5] [magic.mpp.mpg.de/](http://magic.mpp.mpg.de/)
- [6] <http://veritas.sao.arizona.edu/about-veritas-mainmenu-81>
- [7] B. S. ACHARYA ET AL.: "Introducing the CTA concept", *Astroparticle Physics* 43 (2013) 3-18.
- [8] D. J. THOMPSON: "Gamma ray astrophysics: the EGRET results", *Reports on progress in physics* 71 (2008) 116901.
- [9] <http://www.nasa.gov/content/fermi-gamma-ray-space-telescope>
- [10] H.A. BETHE: "Energy production in stars", *Physical Review* 55 (1939) 434.
- [11] H.A. BETHE AND C.U. CRITCHFIELD: "The formation of deuterons by proton combination", *Physical Review* 54 (1938) 248.
- [12] R. DAVIS ET AL.: "SEARCH FOR NEUTRINOS FROM THE SUN", *Physical Review Letters* 20 (1968) 1205.. R. DAVIS; *Proc. Informal Conf. on Status and Future of Solar Neutrino Res.*, Upton, NY, (1978)
- [13] M. KOSHIBA ET AL.: "Constraints on Neutrino Oscillation Parameters from the Measurement of Day-Night Solar Neutrino Fluxes at Super-Kamiokande", *Physical Review Letters* 82 (1999) 1810..
- [14] K. HIRATA ET AL.: "Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A", *Physical Review Letters* 58 (1) 1987) 1490 . R. M.BIONTA ET AL.: "Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the large magellanic cloud", *Physical Review Letters* 58 (1987) 1494.
- [15] <http://apod.nasa.gov/apod/ap980605.html>

- [16] N. AGAFONOVA ET AL.: “Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2014) 101C01.
- [17] D. GREEN: *The Physics of Particle Detectors*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2000).
- [18] M. S. LONGAIR: *High Energy Astrophysics*. Princeton Series in Astrophysics, Princeton (2011).
- [19] E. FERMI: “On the Origin of the Cosmic Radiation”, *Physical Review* **75** (1949) 1169.
- [20] A.R. BELL: “Cosmic ray acceleration”, *Astroparticle Physics* **43** (2013) 56.
- [21] M. ACKERMANN ET AL.: “Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants”, *Science* **339** (2007) 807-811.. Vedi anche: arXiv:1302.3307 v1 [astro-ph.HE] 14 Feb. 2013.
- [22] J. N. BAHCALL: *Neutrino Astrophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1989).
- [23] T. STANEV: *High Energy Cosmic Rays*. Springer, Berlin (2004).
- [24] M. D. KISTLER, J.F. BEACOM: “Guaranteed and prospective galactic TeV neutrino sources”, *Physical Review D* **74** (2006) 063007.
- [25] F. AHARONIAN, L. ANCHORDOQUI, D. KHANGULYAN, AND T. MONTARULI: “Microquasar LS 5039: a TeV gamma-ray emitter and a potential TeV neutrino source”, *J. Phys. Conf. Ser.* **39** (2006) 08.
- [26] A. M. TAYLOR ET AL.: “Revisiting the diffuse neutrino flux from the inner Galaxy using new constraints from very high energy  $\gamma$ -ray observations”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **602** (2009) 113.
- [27] M.A. Markov, *Proc. 1960 Ann. Int. Conf. on High Energy Physics (Rochester)* (1960).
- [28] ARTHUR ROBERTS: “The birth of high-energy neutrino astronomy: A personal history of the DUMAND project”, *Reviews of Modern Physics* **64** (1992) 1.
- [29] <http://www.ifh.de/baikal/baikalhome.html>
- [30] <http://icecube.wisc.edu/> <http://amanda.uci.edu/>
- [31] <http://www.nestor.org.gr/>
- [32] <http://nemoweb.lns.infn.it/>
- [33] S.AIELLO ET AL.: “Measurement of the atmospheric muon flux with the NEMO Phase-1 detector”, *Astroparticle Physics* **66** (2015) 1.
- [34] The ANTARES Collaboration *Proposal for a 0.1 km<sup>2</sup> detector*, (1999), available at <http://antares.in2p3.fr>
- [35] V. Flaminio; *Proc. XIII Intern. Works. on Neutrino Telescopes* M.B.Ceolin Ed. (2009).
- [36] J.A. AGUILAR ET AL.: “Transmission of light in deep sea water at the site of the ANTARES neutrino telescope”, *Astroparticle Physics* **23** (2005) 131.
- [37] P. AMRAM ET AL.: “Background light in potential sites for the ANTARES undersea neutrino telescope”, *Astroparticle Physics* **13** (2000) 127.
- [38] M. AGERON ET AL.: “Studies of a full scale mechanical prototype line for the ANTARES neutrino telescope and tests of a prototype instrument for deep-sea acoustic measurements”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **581** (2007) 695.
- [39] S. ADRIÁN-MARTINEZ ET AL.: “Searches for Point-like and extended neutrino sources close to the Galactic Centre using the ANTARES neutrino Telescope”, *The Astroparticle Journal Letters* **766** (2014) L5.
- [40] S. ADRIÁN-MARTINEZ ET AL.: “Measurement of the atmospheric  $\nu_\mu$  energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope”, *Eur. Physics Journal C* **73** (2013) 2606.
- [41] ADRIÁN-MARTINEZ ET AL.: “Search for muon-neutrino emission from GeV to TeV gamma ray flaring blazars using five years data of the ANTARES telescope”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **in press** (2015)
- [42] M.G. Aartsen et al.; *Evidence for astrophysical muon neutrinos from the northern sky with IceCube* arXiv:1507.04005 v1 [astro-PH.HE] (14 Luglio 2015).
- [43] M.G. Aartsen et al.; *Search for extended and point-like neutrino sources with four years of IceCube data* arXiv:1406.6757 v1 [astro-PH.HE] (2014).
- [44] M.G. Aartsen et al.; *Atmospheric and astrophysical neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube* arXiv:1410.1749 v2 [astro-PH.HE] (2015).
- [45] M.G. Aartsen et al.; *Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data* arXiv:1405.5303 v2 [astro-PH.HE] (2014).
- [46] J. Barrios-Marti and Chad Finley; *First combined search for neutrino point-sources in the Southern Sky with the ANTARES and IceCube neutrino telescopes*. 34th International Cosmic Ray Conference The Hague, The Netherlands, (2015)

---

**Vincenzo Flaminio:** Già Ordinario di Fisica Sperimentale presso l’Università di Pisa, dove ha ricoperto numerose cariche. Ha lavorato a lungo in esperimenti di fisica adronica al CERN di Ginevra e negli Stati Uniti. È stato responsabile di numerosi progetti di ricerca, sia nazionali che Europei. A partire dagli anni ’80 si è occupato prevalentemente di fisica dei neutrini, con esperimenti effettuati al CERN. Si è poi occupato di esperimenti sulla ricerca di neutrini astrofisici, quali ANTARES e KM3.

