

# Capitolo 1

## Rivelazione di neutrini astrofisici

La conoscenza che abbiamo dell'Universo proviene dalla rivelazione della radiazione cosmica che raggiunge la Terra. Studiare le proprietà dei raggi cosmici costituisce uno strumento di indagine complementare alle osservazioni compiute con telescopi ottici per investigare intervalli di energia e distanze altrimenti non accessibili con l'ausilio dei fotoni.

Nei primi paragrafi di questo lavoro si giustificherà la scelta del neutrino come particella candidata allo studio di sorgenti astrofisiche di altissima energia; si porrà l'attenzione sugli oggetti astrofisici osservabili con tale tecnica. Si discuterà delle tecniche di rivelazione dei neutrini astrofisici, della scelta del sito più favorevole per la collocazione dell'apparato rivelatore e della sua caratterizzazione.

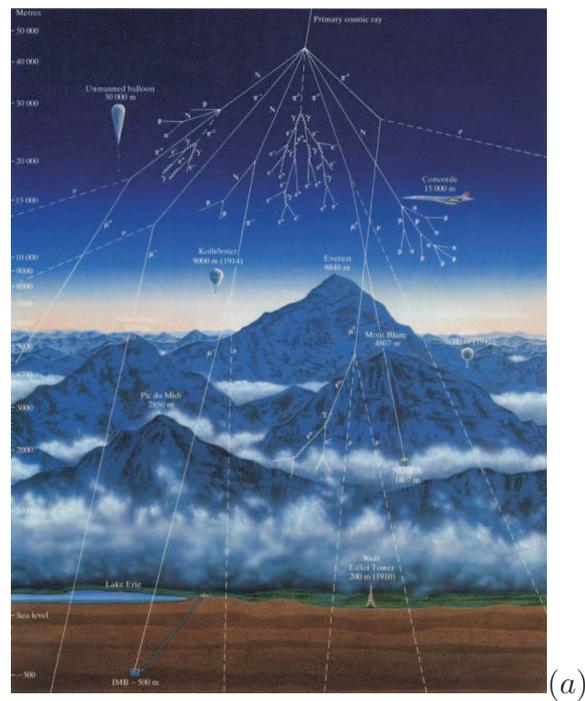
### 1.1 Astronomia con raggi cosmici

La conoscenza del cosmo è progredita fino ai giorni nostri basandosi principalmente sulle informazioni portate sulla Terra dalla radiazione elettromagnetica, dalle onde radio agli infrarossi, dalla luce visibile agli ultravioletti, fino ai raggi  $x$  e  $\gamma$ . La scelta dei fotoni come vettori di informazione presenta molti vantaggi. Essi sono prodotti in grandissima quantità e per molto tempo

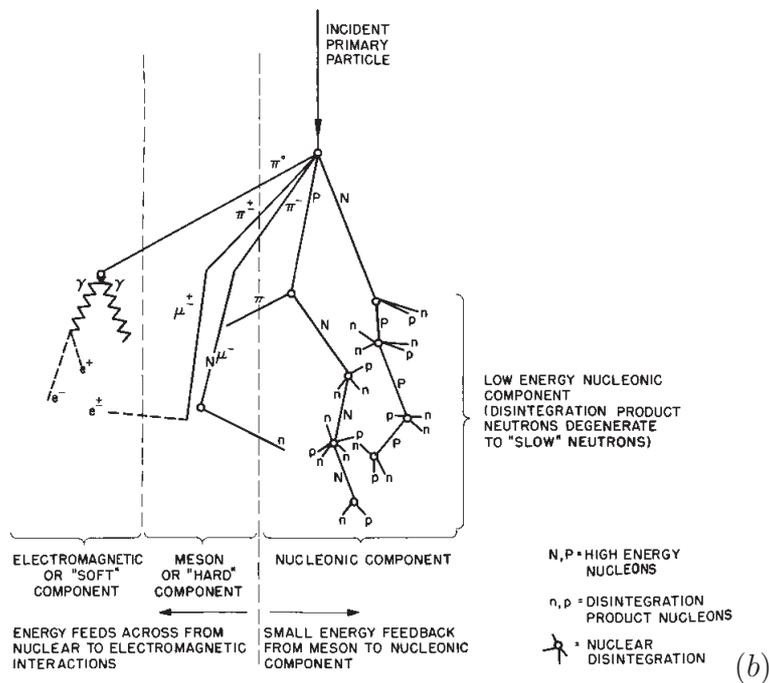
da quasi tutti i corpi celesti: basti pensare ai processi di nucleosintesi nelle stelle. I fotoni sono elettricamente neutri e stabili: l'identificazione della loro direzione di provenienza permette di risalire alla posizione della sorgente, in quanto un flusso di fotoni non subisce significative deflessioni nel corso della sua propagazione fino alla Terra. I fotoni, inoltre, sono facilmente rivelabili ed il loro spettro fornisce informazioni precise sulle proprietà (fisiche e chimiche) delle sorgenti. A partire dal XX secolo l'astrofisica si è arricchita di altri vettori d'informazione: si tratta di particelle nucleari e subnucleari cariche o neutre di origine extra-terrestre. Queste particelle vengono chiamate Raggi Cosmici (RC), e forniscono l'opportunità di studiare l'Universo in modo complementare a quanto fatto con i fotoni.

La radiazione cosmica che sopravvive al viaggio dalle sorgenti verso la Terra è detta componente "primaria", mentre viene detta componente "secondaria" il prodotto di frammentazione della radiazione primaria nell'atmosfera terrestre. I RC primari sono composti per l'85% da nuclei d'idrogeno (protoni), per il 13% da nuclei di elio (particelle  $\alpha$ ), e per il resto da nuclei più pesanti, di cui si individuano i gruppi più significativi in ordine di abbondanza: C, N, O, Fe, fino agli attinidi. A questi si aggiungono anche i fotoni gamma ed i neutrini di altissima energia che sono supposti essere prodotti nelle stesse sorgenti dei raggi cosmici carichi. Gli elettroni che rientrano nella radiazione cosmica primaria provengono quasi totalmente dal vento solare, mentre quelli di origine extrasolare perdono rapidamente energia per emissione di luce di sincrotrone e rimangono per lo più confinati in regioni prossime alle sorgenti.

L'atmosfera terrestre ha uno spessore medio di circa  $1030g \cdot cm^{-2}$  e rappresenta uno schermo pressoché totale per la componente primaria, che si frammenta in sciami elettromagnetici e adronici (si veda la figura 1.1); via via che lo sciame attraversa l'atmosfera terrestre, sono prodotte un gran numero di particelle fino ad un numero massimo legato all'energia ed al tipo di primario. Gran parte di queste non raggiungono la superficie terrestre; le particelle più penetranti (componente "dura") sono i muoni e i neutrini che si contrappongono agli adroni, fotoni ed elettroni di più bassa energia (componente "molle") che vengono assorbiti in maggior numero dall'atmosfera.



(a)



(b)

Figura 1.1: (a) Sciame di particelle prodotto dall'interazione dei raggi cosmici primari con gli strati superiori dell'atmosfera terrestre [web1]. (b) Rappresentazione schematica della radiazione cosmica secondaria; si distingue una componenti "dura" (*hard*) e una "molle" (*soft*) [web2].

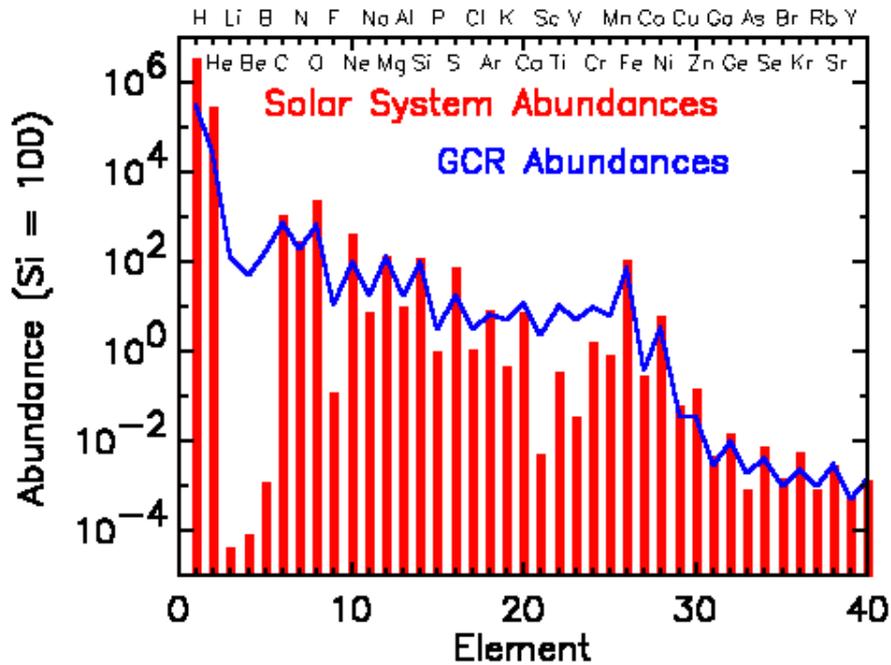


Figura 1.2: Abbondanza relativa degli elementi nei raggi cosmici di origine galattica con  $E \approx 100\text{GeV}$  misurata negli strati superiori dell'atmosfera, comparata con l'abbondanza nel Sistema Solare. I dati sono stati entrambi normalizzati ponendo per il silicio  $[Si] = 10^2$  [LON92].

Lo studio della composizione dei raggi cosmici e della loro distribuzione in energia rappresenta un importante mezzo per studiare in modo indiretto le sorgenti astrofisiche che li hanno generati, e capire i meccanismi di produzione, iniezione e propagazione nello spazio interstellare o intergalattico.

Ad esempio, il confronto delle abbondanze relative dei RC e della materia del sistema solare mostrato in figura 1.2 mette in luce similitudini e importanti differenze tra i due campioni di materia; una significativa discrepanza tra le rispettive composizioni risiede nella sostanziale abbondanza dei gruppi di nuclei Li, Be e B presenti nella radiazione cosmica come prodotto di spallazione dei primari più pesanti e assenti nella materia del sistema solare perché consumati come catalizzatori nelle reazioni nucleari all'interno del Sole.

Lo spettro in energia dei RC primari segue una legge di potenza del tipo:

$$\frac{dN}{dE} = 1.8E^{-\alpha} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1} \quad (1.1)$$

che viene rispettata in larga misura da tutti i nuclei. Il grafico di figura 1.3(a) riporta i flussi di RC misurati da vari esperimenti sensibili a diversi tipi di nuclei in funzione dell'energia dei nucleoni che li compongono. Come si vede la maggior parte dei RC sono protoni con energia inferiore a 3 GeV (sotto a questa soglia in energia è ben evidente la modulazione solare). Lo spettro in energia complessivo per tutti i nuclei è riportato in figura 1.3(b) in un intervallo molto ampio di energia (da qualche GeV a  $10^{21}$  eV). Esso segue ancora una legge di potenza; nella figura 1.3(b) sono messi in evidenza i tre intervalli energetici corrispondenti a tre valori leggermente, ma significativamente, diversi dell'esponente  $\alpha$ . Fino a  $E \sim 10^{15} eV$  (=1 PeV),  $\alpha$  vale circa 2.7; oltre tale soglia, denominata anche il "ginocchio" dello spettro (*knee*, in inglese) questo diventa più ripido con  $\alpha = 3$  per poi ritornare a circa 2.8 oltre  $E = 10^{19} eV$ , soglia denominata "caviglia" (*ankle*, in inglese) dello spettro.

I cambi di pendenza dello spettro in energia dei RC primari vengono spiegati assumendo che la quasi totalità dei RC con energia sotto a  $10^{17} eV$  siano di origine galattica, prodotti ed accelerati in prossimità dei Resti di Supernovae (*Supernova Remnants*, SNR); si ipotizza che questi restino confinati dal campo magnetico galattico ( $B \approx 3\mu G$ ) lungo i bracci della spirale fino a che non sono accelerati tanto da avere un raggio di girazione superiore alle dimensioni della Via Lattea.

La rigidità magnetica per una particella si scrive come  $\frac{pc}{Ze}$ , pertanto risulta evidente che i protoni, ovvero la componente più abbondante, siano i primi a lasciare la nostra Galassia; il meccanismo di propagazione e di perdita dei protoni (più abbondanti) prima dei nuclei più pesanti (più rari) spiega l'aumento di pendenza attorno al "ginocchio". Il secondo cambio di pendenza dello spettro dei RC primari è in corrispondenza della cosiddetta "caviglia" ( $E \sim 10^{19} eV$ ). I RC che possiedono energie al di sopra di tale soglia vengono denominati raggi cosmici di energie estreme (*Ultra High Energy Cosmic Rays*, in inglese - UHECR). Il cambio di pendenza oltre la caviglia viene

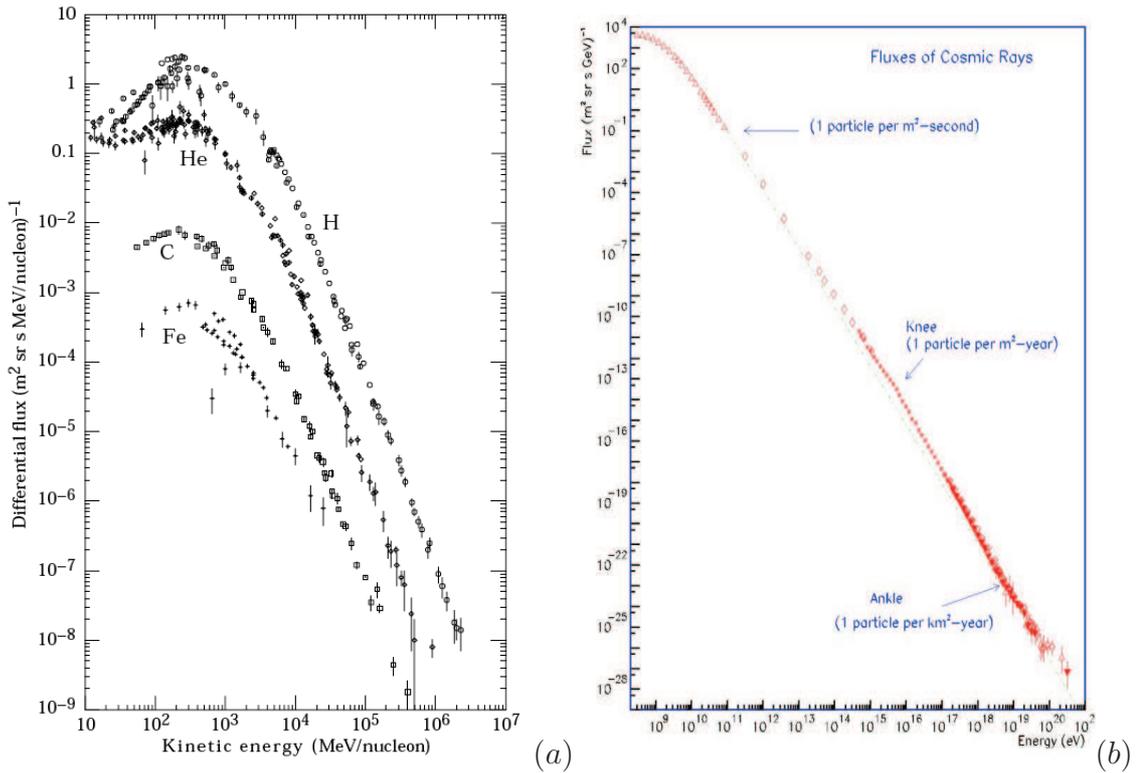


Figura 1.3: (a) Spettro differenziale in energia dei raggi cosmici primari. Sono riportati gli spettri di idrogeno, elio, carbonio e ferro: a basse energie è ben evidente la modulazione solare. Il flusso differenziale è riportato in funzione dell'energia cinetica in  $\text{MeV}$  per nucleone [LON92]. (b) Spettro complessivo dei RC in funzione dell'energia. L'energia è riportata su scala logaritmica ed espressa in  $\text{eV}$ ; in ordinata il flusso differenziale è riportato su scala logaritmica, ed è espresso in numero di particelle per intervallo di energia, per unità di area, di angolo solido e di tempo. I valori fra parentesi indicano il flusso integrato alle corrispondenti energie [web3].

spiegato considerando adesso predominante il flusso di origine extragalattica, proveniente da sorgenti estremamente più energetiche di quelle tuttora conosciute nella Via Lattea; tali macchine cosmiche, come i Nuclei Galattici Attivi (*Active Galactic Nuclei* - AGN) o i brillamenti di raggi gamma (*Gamma Ray Burst* - GRB), capaci di accelerare particelle fino ad energie di  $1ZeV$  ( $=10^{21}eV$ ), rappresentano sorgenti di gran lunga più efficienti nell'accelerazione alle altissime energie rispetto alle SNR, e determinano la diminuzione della ripidità del flusso dei RC primari.

Le misure dirette dei RC primari vengono effettuate con esperimenti alloggiati su palloni o aerei stratosferici (BESS, HEAT, RUNJOB, CAKE) o su satellite (ARIEL V, HEAO3, AMS) [web4], a quote dove l'atmosfera terrestre è quasi completamente rarefatta. Limitazioni di natura tecnologica obbligano la costruzione di tali rivelatori a dimensioni e peso contenuti. I tempi di esposizione alla radiazione cosmica, inoltre, non possono essere arbitrari, essendo in media di circa 15 giorni il tempo di volo di un pallone stratosferico di lunga durata (*Long Duration Balloon Flight*), di una decina di ore il volo di un aereo di alta quota, ed al massimo di qualche anno la permanenza di un esperimento in orbita sui satelliti.

Per questo motivo si determina necessariamente una soglia in energia per la rivelazione diretta, posta al di sotto del "ginocchio". Oltre tale soglia, le caratteristiche dei RC primari devono essere dedotte in modo indiretto, tramite la misura degli sciami estesi in atmosfera (*Extensive Air Shower*) con rivelatori posizionati direttamente sulla superficie terrestre, senza limitazioni spaziali o temporali dettate da necessità tecnologiche.

Si riporta di seguito una breve panoramica sui vari esperimenti a terra suddivisi per tipologia di rivelazione ed energie dei RC indagati.

$E \approx 10^{12}eV$ : rivelatori di luce Čerenkov prodotta dagli sciami in atmosfera (CANGAROO, HEGRA, HESS, MAGIC, VERITAS, WHIPPLE) [web4].

$E \approx 10^{15}eV$ : rivelatori estesi di sciami di particelle. Al crescere dell'energia del primario aumentano anche le dimensioni degli sciami prodotti, e sono pertanto necessari apparati molto estesi (AGASA, ARGO, KASKADE, MILAGRO, Auger) [web4].

$E \gtrsim 10^{16}eV$ : rivelatori di fluorescenza (EUSO, OWL, HiRes, Auger) [web4].

Ad energie oltre la “caviglia” ( $E \geq 10^{19}eV$ ) le misure sono estremamente poche (dell’ordine di qualche decina); gli esperimenti che hanno pubblicato dei risultati in quest’ultimo intervallo dello spettro energetico dei RC sono HIRES ed AGASA. HIRES sostiene di osservare il taglio dovuto al noto effetto *Greisen Zatsepin Kuz’min* (GZK), che verrà approfondito più in seguito, e che prevede una soppressione del flusso di RC extragalattici dovuto all’interazione di questi con la radiazione di fondo cosmica. AGASA al contrario afferma di osservare un risollevarimento del flusso di RC per  $E > 10^{20}eV$ , in palese violazione dell’effetto GZK [GAI97, HAL05]. Si tiene a precisare che i metodi di rivelazione dei due esperimenti non sono gli stessi e la determinazione corretta delle sistematiche di ciascuna misura gioca un ruolo cruciale nella determinazione del reale valore assoluto del flusso.

La figura 1.4 riporta un ingrandimento della parte finale dello spettro dei RC. La linea continua rappresenta la predizione teorica del flusso della componente extragalattica.

## 1.2 Perché astronomia con i neutrini?

Come si è accennato all’inizio, lo studio dell’Universo è stato limitato per secoli alle osservazioni effettuate con i telescopi ottici. Lo spettro dei fotoni fornisce informazioni precise sulle proprietà fisiche e chimiche dei corpi che li producono.

D’altro canto, le regioni centrali della maggior parte delle sorgenti astrofisiche sono più dense di materia e quindi sono opache ai fotoni. Ad esempio, le informazioni che abbiamo sulla natura interna del Sole provengono da osservazioni indirette. La temperatura nel nucleo solare è approssimativamente  $15 \cdot 10^6 K$ , e la sua densità è circa 150 volte quella dell’acqua. Sotto queste condizioni, i nuclei di idrogeno ionizzato, semplicemente protoni, collidono fra di loro con un’energia sufficiente a vincere la repulsione elettrostatica. I fotoni prodotti in queste reazioni sono estremamente energetici e si trovano nella regione dei raggi gamma dello spettro elettromagnetico, ma interagi-

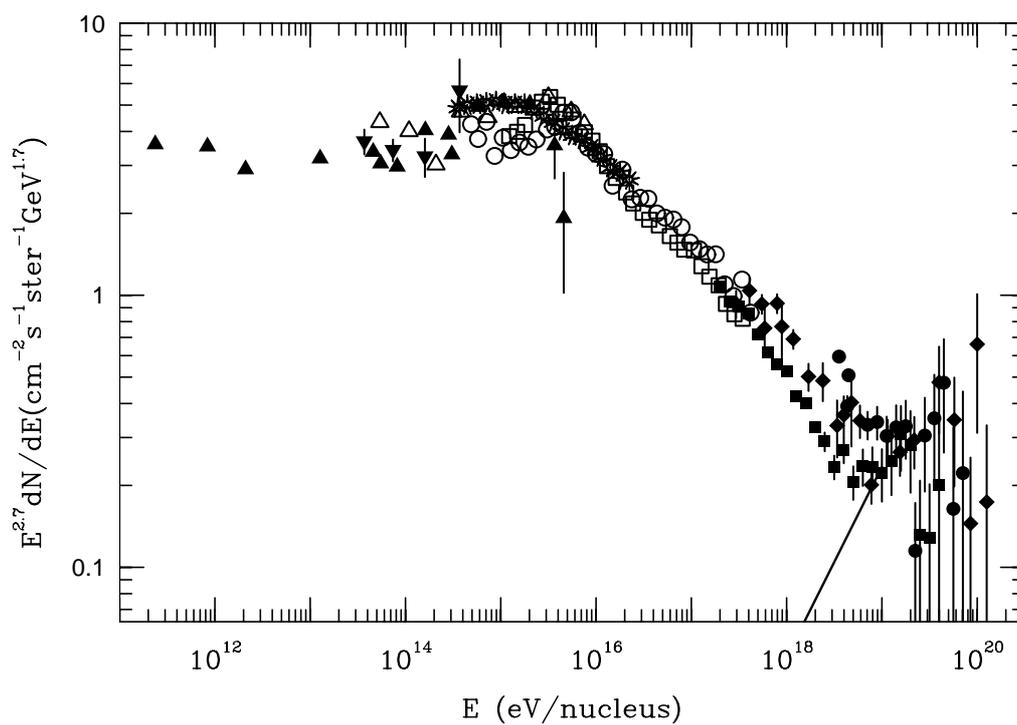


Figura 1.4: Lo spettro dei raggi cosmici altamente energetici. La presunta componente extragalattica è indicata con la linea continua a partire da  $10^{18} \text{ eV}$ , fittata sopra la zona detta *ankle*. Il taglio GZK è fissato a  $5 \cdot 10^{19} \text{ eV}$  [GAI97].

scono fortemente con la materia stessa del Sole attraverso processi di diffusione, assorbimento e ri-emissione. I fotoni si trovano prevalentemente nella regione del visibile e dell'infrarosso quando giungono sulla superficie del Sole e scappano via nello spazio. L'informazione portata dai fotoni che sono emessi direttamente nello spazio è per lo più correlata alla fotosfera, e solo indirettamente contribuisce alla conoscenza degli strati più interni.<sup>1</sup>

La radiazione cosmica di fondo (in inglese *Cosmic Microwave Background Radiation* - CMBR) è la radiazione elettromagnetica con  $E \sim 6.6 \cdot 10^{-4} eV$ , omogenea e isotropa che riempie tutto l'Universo; è interpretata come una evidenza sperimentale del modello del *Big Bang* in quanto rappresenta il residuo termico dell'esplosione originaria. I fotoni della CMBR hanno un'energia pari allo spettro di emissione di un corpo nero alla temperatura di 2.7 K. I fotoni ad altissima energia prodotti nelle zone più esterne delle sorgenti astrofisiche, se riescono ad allontanarsi dalle sorgenti stesse, possono interagire con i fotoni della radiazione cosmica di fondo per creare coppie elettrone-positrone [GOU66]. L'interazione dei fotoni di alta energia prodotti nelle sorgenti astrofisiche con i  $\gamma_{CMBR}$  elimina la possibilità di sopravvivenza dei fotoni ad altissima energia ( $>10$  TeV) a distanze superiori di 100 Mpc. Quindi il raggio d'indagine dell'Universo con l'ausilio dei fotoni è drasticamente limitato.

Per azione del campo magnetico galattico, i protoni cosmici con  $E_p < 10^{18} eV$  subiscono deflessioni che impediscono fortemente il puntamento, tramite la loro traiettoria, della direzione della sorgente. Astronomia con i protoni potrebbe essere possibile ad energie superiori a 50 EeV ( $= 5 \cdot 10^{19} eV$ ): a queste energie il campo magnetico galattico non devierebbe in maniera significativa la direzione dei protoni [HAL03]. I protoni puntano nella direzione della loro sorgente con una accuratezza determinata dal giroradio (o raggio

---

<sup>1</sup>Informazioni sulle proprietà interne del Sole vengono inferite mediante analisi *eliosismografiche*, che deducono la densità e la pressione negli strati sottostanti la fotosfera dallo studio delle onde magnetosoniche che si propagano fino alla superficie del Sole.

di Larmor) nel campo magnetico intergalattico  $B$ :

$$\frac{\theta}{0.1^\circ} \cong \frac{\left(\frac{d}{1\text{Mpc}}\right) \cdot \left(\frac{B}{10^{-9}\text{G}}\right)}{\left(\frac{E}{3 \cdot 10^{20}\text{eV}}\right)} \quad (1.2)$$

dove  $d$  è la distanza dalla sorgente. Poichè il campo magnetico intergalattico è dell'ordine di  $10^{-7} \div 10^{-12}\text{G}$ , per distanze di 100 Mpc la risoluzione angolare dovrebbe essere sotto il grado. A tali energie però anche i protoni vedono aumentare la sezione d'urto di interazione con i  $\gamma_{\text{CMBR}}$ ; l'effetto GZK limita il cammino libero medio dei protoni ad altissima energia a 50 Mpc.

### Astronomia: concetti base

Per fare astronomia con i raggi cosmici è necessario introdurre i concetti di puntamento direzionale e orizzonte di osservabilità. Una volta rilevata la radiazione cosmica, dalle sue proprietà si cerca di ricostruire quelle della sorgente, e, in particolare, di individuare la posizione del corpo che ha prodotto tale radiazione. Il puntamento direzionale è legato all'efficienza di ricostruzione della traiettoria delle particelle rilevate, al fine di costruire una mappa stellare. L'orizzonte di osservabilità è la stima della distanza massima indagabile con l'ausilio di una particolare radiazione scelta, ad un'energia fissata. I fotoni soddisfano molto bene la proprietà del puntamento direzionale, essendo privi di massa e di carica, ma per fotoni gamma di energia  $> 10^{13}\text{eV}$  il libero cammino medio è limitato a 10 Mpc (figura 1.5). I protoni invece subiscono deflessioni significative che limitano fortemente il puntamento direzionale.

La figura 1.6 mostra in maniera sintetica i vantaggi di una astronomia di neutrini rispetto a una astronomia di fotoni e protoni.

### L'effetto GZK

Poco dopo la scoperta della radiazione cosmica di fondo ad opera di Penzias e Wilson nel 1965 [PEN65], Greisen e indipendentemente Zatsepin e Kuzmin ipotizzarono che ad energie molto alte l'universo sarebbe divenuto opaco

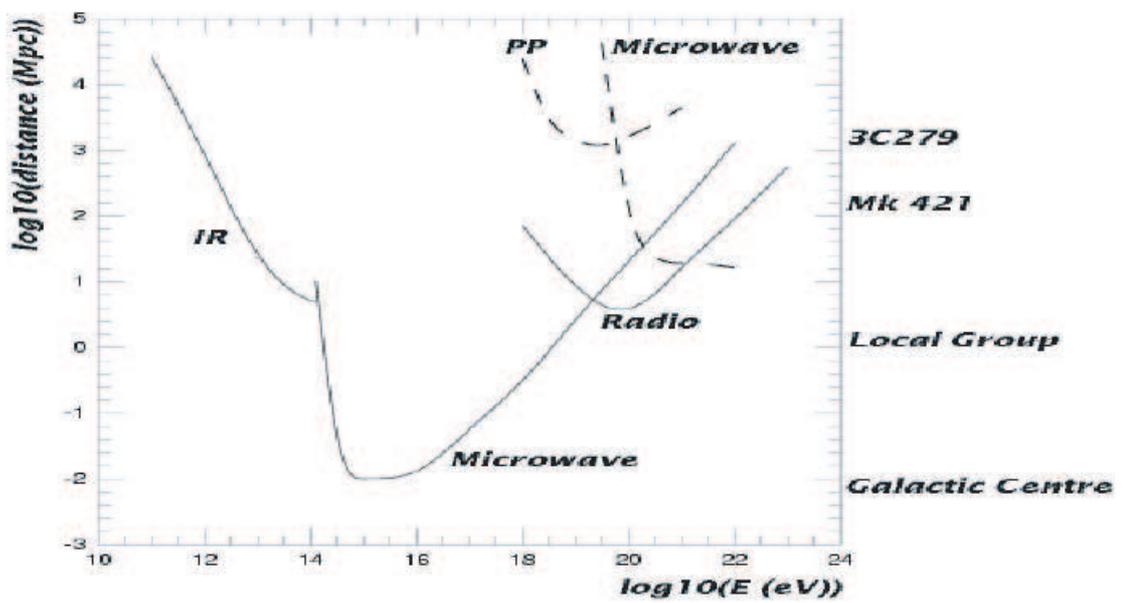


Figura 1.5: Libero cammino medio dei fotoni e dei protoni in funzione della loro energia. Sull'asse delle ordinate sono mostrate alcune dimensioni indicative: la prima dal basso è la distanza della Terra dal centro galattico e la seconda la distanza dal gruppo locale di galassie [ANTA].

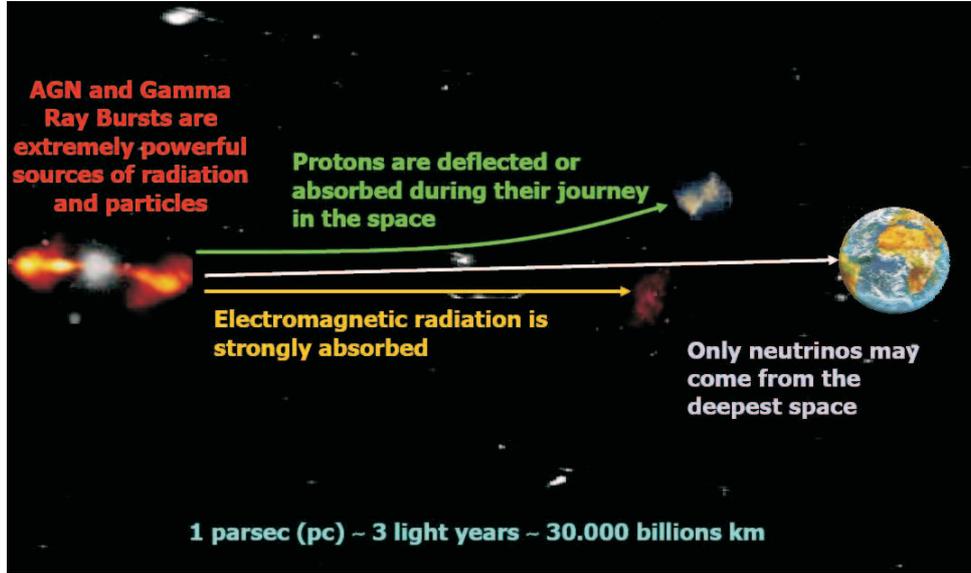


Figura 1.6: Motivazioni per una astronomia di neutrini [NEMO].

ai nuclei leggeri e pesanti [GRE66, ZAT66]. Questo effetto, di cui abbiamo dato un accenno nel primo paragrafo di questo capitolo, non contiene nulla di sconosciuto ed è facilmente riproducibile in laboratorio. Inviando un fotone di alcune centinaia di MeV su un bersaglio di protoni fermi si raggiunge l'energia di soglia per la fotoproduzione di pioni, attraverso ad esempio la produzione ed il successivo decadimento della risonanza  $\Delta^+$ . Analogamente, anche i fotoni della CMBR entrando in collisione con protoni di circa 50 EeV raggiungono l'energia di soglia nel centro di massa per la produzione della medesima risonanza.

Ad esempio, considerando il processo  $p + \gamma_{CMBR} \rightarrow \pi^+ + n$  (indipendentemente dalla creazione della risonanza) si ricava un'energia di soglia per il protone  $E_p$  data da:

$$E_p > \frac{m_\pi^2 + 2m_\pi m_n}{4\epsilon} \quad (1.3)$$

ove  $\epsilon = 2.3 \cdot 10^{-4} eV$  è l'energia della radiazione di fondo,  $m_\pi = 140 MeV$  è la massa del  $\pi^+$  e  $m_n = 940 MeV$  è la massa del neutrone. La fotoproduzione di pioni è la causa principale della perdita di energia dei protoni altamente

energetici. Il mezzo interstellare è opaco a tali raggi cosmici e si può stimare la lunghezza di assorbimento per i protoni con  $E_p > 50 EeV$  conoscendo la densità dei fotoni della CMBR,  $n_{CMBR} = 400 cm^{-3}$ , e la sezione d'urto protone su fotone,  $\sigma_{p+\gamma_{CMBR}} = 10^{-28} cm^2$ :

$$\lambda_{\gamma p} = \frac{1}{n_{CMBR} \cdot \sigma_{p+\gamma_{CMBR}}} \cong 10 Mpc. \quad (1.4)$$

L'effetto GZK limita la propagazione anche dei nuclei pesanti, che si frammentano per spallazione con i fotoni della CMBR.

L'effetto GZK è dunque responsabile di una rapida diminuzione del flusso di raggi cosmici di origine extragalattica, generando il cosiddetto GZK *cut-off*. Tale *cut-off* diventa importante ad energie  $> 10^{19} eV$ . Nella figura 1.7 sono mostrati i dati di HIREs, che presentano la variazione della pendenza dello spettro dei raggi cosmici secondo il GZK *cut-off*, confrontati con i dati di AGASA, che sembrano essere in netto contrasto con le previsioni dell'effetto GZK.

Come già detto nel paragrafo 1.1, l'esperimento AGASA è l'unico ad avere registrato eventi in contraddizione con le previsioni legate al GZK *cut-off*. I raggi cosmici ultra-energetici sono quelli con un'energia  $E > 10^{20} eV$  e attualmente non se ne conosce la composizione. I fotoni e i neutrini, poiché sono particelle di carica nulla, non possono essere accelerati secondo i meccanismi elettromagnetici canonici: sono il prodotto dell'interazione di particelle cariche ancora più energetiche. Dunque, le particelle candidate ad essere identificate come UHECR sono solo i protoni e i nuclei atomici.

Per giungere sulla Terra, gli UHECR che risentono dell'effetto GZK devono essere necessariamente prodotti entro una distanza di circa 50 Mpc. Questi, in virtù della loro rigidità magnetica  $\frac{pc}{Ze}$  così elevata, non risentono dei campi magnetici di bassissima intensità ( $\sim \mu G$ ) presenti nel mezzo intergalattico. Pertanto, la direzione misurata dagli eventi candidati ad essere identificati come UHECR dovrebbe puntare direttamente alle sorgenti, con un'accuratezza inferiore al grado. Sinora nessuna sorgente così energetica in grado di produrre UHECR è stata mai osservata entro la nostra galassia né entro 100 Mpc dalla stessa con strumenti d'indagine dell'astronomia

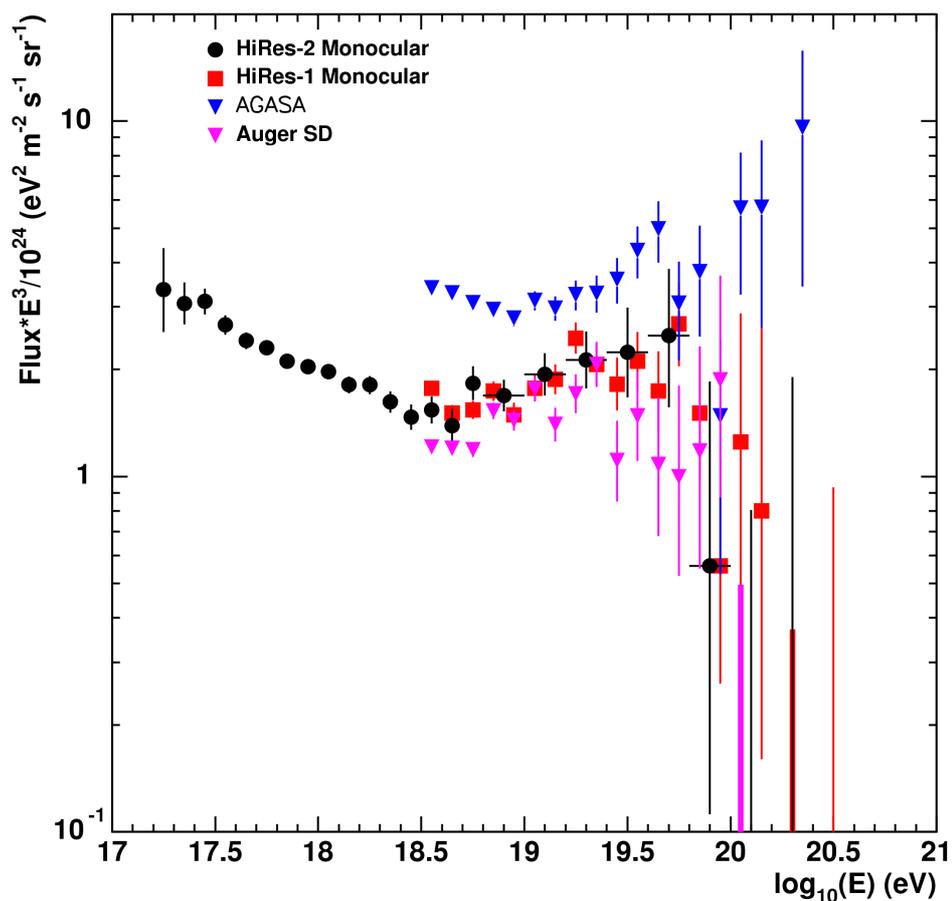


Figura 1.7: Dati dell'esperimento AGASA confrontati con i dati di HIRES e Auger. In ordinata lo spettro dei raggi cosmici è moltiplicato per  $E^3$  per mettere meglio in evidenza variazioni della pendenza. HIRES mostra il taglio dovuto all'effetto GZK, mentre AGASA è in disaccordo con tale previsione [web3].



Figura 1.8: Uno dei rivelatori dell'Osservatorio Auger in Argentina (sullo sfondo le Ande). L'esperimento completo richiederà l'installazione di 1600 stazioni su una superficie di  $3000\text{Km}^2$ . Le stazioni contengono ognuna 12 tonnellate di acqua pura e il passaggio di particelle cariche produce luce Čerenkov. La misura degli sciami estesi in atmosfera (*Extensive Air Shower* - EAS) permette la ricostruzione dell'energia e della direzione del raggio cosmico primario [web9].

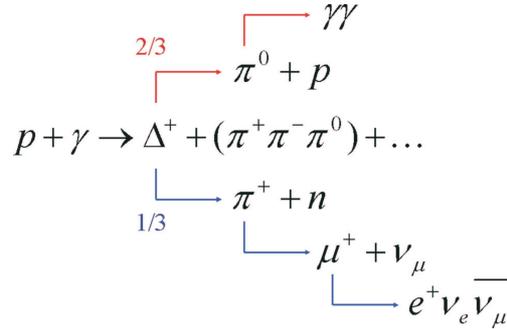
tradizionale.

È fondamentale realizzare a breve un esperimento che permetta, con tecniche alternative a quelle di AGASA, di indagare ad energie pari a  $E_{GZK} \simeq 10^{20}eV$ . Le attese sono per il momento legate alla realizzazione dell'esperimento Auger, in Argentina (vedi figura 1.8) [web4].

La realizzazione di un telescopio sottomarino a neutrini di volume pari al  $\text{km}^3$  potrebbe permettere di rilevare i neutrini prodotti dall'interazione degli UHECR con l'atmosfera terrestre.

### 1.3 Le sorgenti astrofisiche

Il meccanismo principale di produzione di neutrini altamente energetici è legato all'evoluzione di protoni, in sorgenti astrofisiche, fino ad energie  $\gtrsim 10^{18} eV$ . Le interazioni dei protoni con la radiazione (o anche con la materia che circonda le sorgenti) producono mesoni (essenzialmente pioni) e attraverso i decadimenti leptonici si ottengono neutrini. In particolare i protoni, interagendo con la radiazione presente attorno alla sorgente (ad esempio i fotoni emessi dalle particelle cariche accelerate: radiazione di sincrotrone), possono dar luogo alla reazione mostrata nell'equazione 1.5. Da tale reazione ci possiamo aspettare che  $\nu$  e  $\gamma$ , alla sorgente, siano prodotti con lo stesso indice spettrale. Conoscendo la probabilità di decadimento (*Branching Ratio* - BR) del  $\Delta^+$  nei due canali, si può aggiungere, inoltre, che il flusso aspettato di neutrini e di fotoni è quantitativamente lo stesso: infatti si ha che  $BR(\Delta^+ \rightarrow \pi^0 p) = \frac{2}{3}$  e  $BR(\Delta^+ \rightarrow \pi^+ n) = \frac{1}{3}$ , dunque  $\Phi(\gamma) \sim \Phi(\nu)$ .



(1.5)

Si candidano dunque a sorgenti astrofisiche di neutrini i siti noti ove avviene accelerazione di protoni ed emissione di raggi  $\gamma$ . Si passeranno ora in rassegna le probabili sorgenti astrofisiche di neutrini.

### Binarie X

Le binarie X, o *X-ray binaries*, sono le sorgenti astrofisiche di raggi X più luminose. Sono formate da un oggetto compatto, un buco nero o una stella

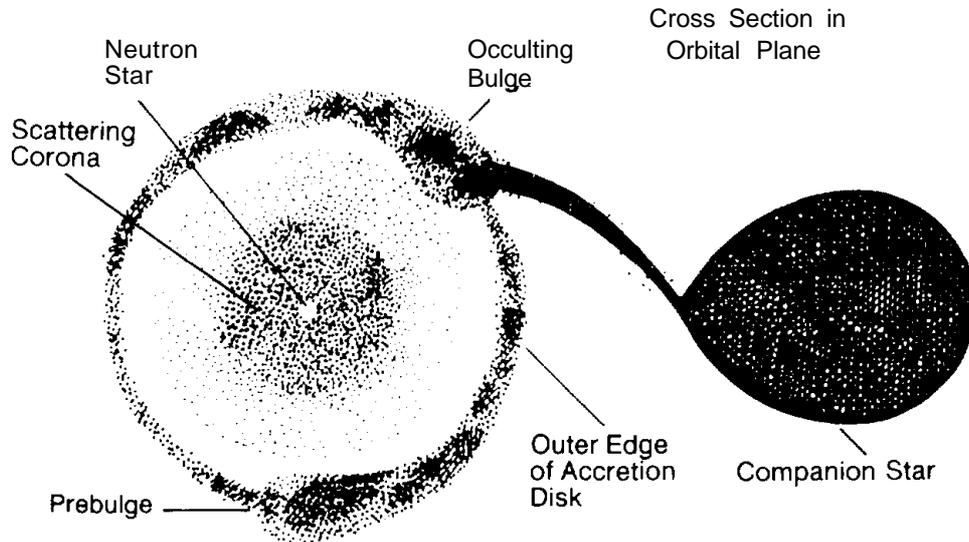


Figura 1.9: Sistema binario X formato da una stella di neutroni e da una stella compagna. È mostrato il disco di accrescimento della stella di neutroni e la corona dove il campo magnetico è altissimo ed è responsabile dei processi di accelerazione [COR86].

di neutroni, che incrementa la propria massa a discapito di una stella non degenera sua compagna che perde materia (si veda la figura 1.9). Il gas in caduta verso la stella compatta genera un'onda d'urto (*shock*) magnetosonica. Poiché i campi magnetici tra le due stelle d'un tale sistema binario possono essere anche molto intensi ( $\sim 10^{10}G$ ), diventa possibile l'accelerazione di particelle cariche fino ad energie molto elevate. Questi sistemi binari sono caratterizzati da una netta emissione nelle frequenze X. Gli  $e^-$  accelerati nelle regioni dello *shock* emettono luce di sincrotrone che, attraverso interazioni di tipo Compton inverso con la materia di accrescimento, generano tali raggi X. È lecito supporre che tale contesto così ricco di particelle ad alta energia sia una probabile sorgente di neutrini generati nelle interazioni tra le particelle cariche accelerate ed i fotoni.

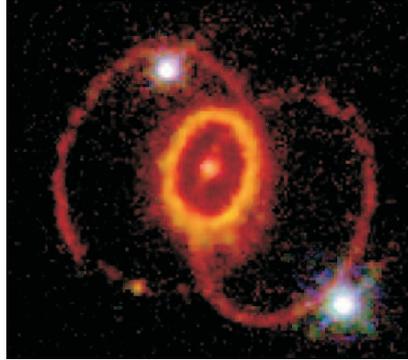


Figura 1.10: SN1987A.

## Supernova remnants

I resti di supernovae galattiche (*Supernova Remnants* - SNR) sono altri candidati per la produzione di flussi osservabili di neutrini. Le esplosioni di stelle massive (o supernovae) producono fronti di *shock* di materiale in espansione che accelerano le particelle di alta energia. L'accelerazione dei raggi cosmici all'interno di questi oggetti astrofisici è prevista dal meccanismo di Fermi del primo ordine. Le onde di *shock* che seguono l'esplosione di una supernova sono generate da successive e ripetute espansioni e compressioni di materia. Le particelle cariche risultano accelerate quando attraversano il fronte di *shock*, il quale viaggia ad una velocità  $u \sim 0.1c$ . Il processo di accelerazione è molto lungo, in quanto l'energia aumenta gradualmente quando la particella carica attraversa in avanti e all'indietro il fronte di *shock*. La vita dello *shock* limita l'energia massima raggiungibile dai raggi cosmici.

L'aumento dell'energia può essere stimato mediante la formula [GAI95]:

$$\frac{dE}{dt} \simeq K \frac{u^2}{c} ZeB \quad (1.6)$$

e quindi

$$E_{max} < K \frac{u}{c} ZeBL \sim 10^{14} eV \cdot Z \quad (1.7)$$

ove  $u$  è la velocità dello *shock*,  $Ze$  è la carica della particella accelerata,  $B \simeq 3\mu G$  è il campo magnetico galattico medio,  $K \sim 0.1$  è una costante numerica

legata all'efficienza del meccanismo di accelerazione, e infine  $L = uT$ , dove  $T \sim 10^3 \text{anni}$  è la durata del processo. Nel caso di *supernova remnants* giovani, come ad esempio SN1987A (figura 1.10), il campo magnetico nella regione di *shock* è dell'ordine dei  $mG$  e  $t \sim 10 \text{anni}$ : potrebbero pertanto essere prodotti raggi cosmici con energia molto maggiore, fino a  $E_{max} \sim 10^{17} eV$ .

Le interazioni di questi protoni di alta energia con la materia dei fronti d'onda produce neutrini e fotoni, rispettivamente dal decadimento di pioni carichi e neutri. I neutrini prodotti in tali interazioni raggiungono un'energia massima di  $\sim 10^{13} eV$ ; a tali energie, il flusso di neutrini atteso è molto basso: qualche neutrino per chilometro quadrato per anno. Nel caso di *supernova remnants* giovani il flusso atteso aumenta fino a circa 500 eventi per  $km^2$  per anno per  $E_\nu > 100 GeV$ .

## Nuclei attivi galattici

I nuclei attivi galattici, AGN dall'acronimo anglosassone di *Active Galactic Nuclei*, sono gli oggetti estesi noti più energetici dell'Universo. La loro luminosità media può variare da  $10^{35} \div 10^{41} W$ . I nuclei attivi galattici sono considerati come le sorgenti più probabili di neutrini di altissima energia,  $E_\nu > 100 TeV$  [GAI95].

Secondo diversi modelli teorici, la luminosità così elevata degli AGN è dovuta all'accrescimento di materia di un buco nero super-massivo collocato al centro di una galassia, che avviene al ritmo di qualche massa solare per anno. La massa del buco nero centrale è dell'ordine di  $10^6 \div 10^{10}$  masse solari, e l'accrescimento è dovuto ad un disco di gas e materia proveniente da stelle vicine e da un toro di materia che circonda il buco nero. Nella maggior parte dei casi, perpendicolarmente al disco di accrescimento vengono emessi due *jet* relativistici che trasportano radiazione e materia (figura 1.11). Le parti terminali dei *jet* sembrano essere siti ottimali per l'accelerazione di raggi cosmici di alta energia, grazie al basso livello di perdite di energia e ai valori ridotti del campo magnetico. I *jet* terminano in superfici di *shock* di grandi dimensioni, circa  $10^5 \div 10^6 pc$ , dove i protoni possono essere accelerati

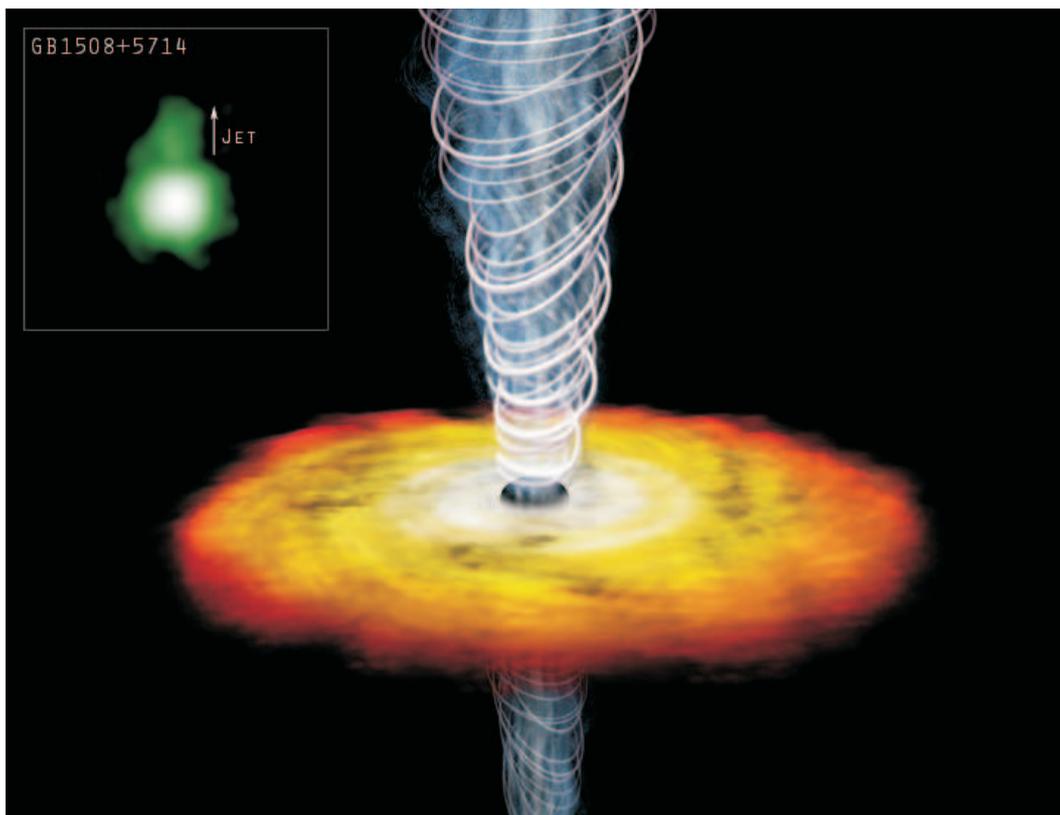


Figura 1.11: GB1508+5714 in un'immagine del telescopio Chandra ( riquadro in alto a sinistra). Si osserva un *jet* di particelle altamente energetiche che si estende per più di  $10^5$  anni luce al di sopra del buco nero centrale. Distanti 12 miliardi di anni luce dalla terra è il *jet* più distante finora scoperto. Il processo di accrescimento del buco nero, a spese del gas e della materia che compone le stelle vicine, è accompagnato da *jet* di altissima energia, come è mostrato nella visione artistica [web5].

grazie al meccanismo di Fermi fino ad energie pari a  $10^{20} eV$ . L'emissione di radiazione compensa la pressione dovuta all'accrescimento di materia del buco nero.

Nei modelli generici di AGN, che non implicano necessariamente l'esistenza dei *jet*, i protoni sono accelerati dalle onde di *shock* associate con l'accrescimento del buco nero. Questi protoni interagiscono con la materia del disco di accrescimento o con la radiazione presente. Alcuni modelli producono neutrini senza i raggi gamma associati (cfr. equazione 1.5), poiché i fotoni non riescono a fuggire dal nucleo dell'AGN per via della densità di energia assai elevata. Solo l'astronomia con i neutrini permetterà di conoscere approfonditamente il nucleo e i fenomeni che avvengono all'interno di un AGN.

## Gamma ray burst

I *Gamma Ray Burst* (GRB), o lampi gamma, sono i fenomeni più violenti e spettacolari noti attualmente che avvengono nell'Universo. Sono eventi con una luminosità elevatissima, dell'ordine di  $10^{50} \div 10^{54} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ , che avvengono in un intervallo molto breve,  $0.1 \div 100 \text{s}$ . Fino a qualche anno fa, erano considerati dei veri misteri per la moderna astrofisica; a partire dal 1997, il satellite italo-tedesco Beppo-SAX ha permesso di individuare qualche residuo di radiazione dopo i GRB, consentendo di localizzare in quali galassie avvenisse tale esplosione. Da allora sono stati rivelati circa una dozzina di GRB, di cui si sono misurate la distanza e l'intensità dell'energia emessa durante questi lampi.

L'oggetto astrofisico che determina tale esplosione non è ancora noto; data l'elevata luminosità misurata, potrebbe trattarsi della fusione di due buchi neri molto massivi o di un buco nero e una stella di neutroni, con la deposizione sul buco nero di qualche massa solare al secondo in un raggio di circa  $100 \text{km}$ . L'energia contenuta in tale esplosione deve realizzare una cosiddetta "palla di fuoco" (dall'inglese *fireball*), un oggetto di grandissima massa ed energia, che si espande relativisticamente con fattori di Lorentz

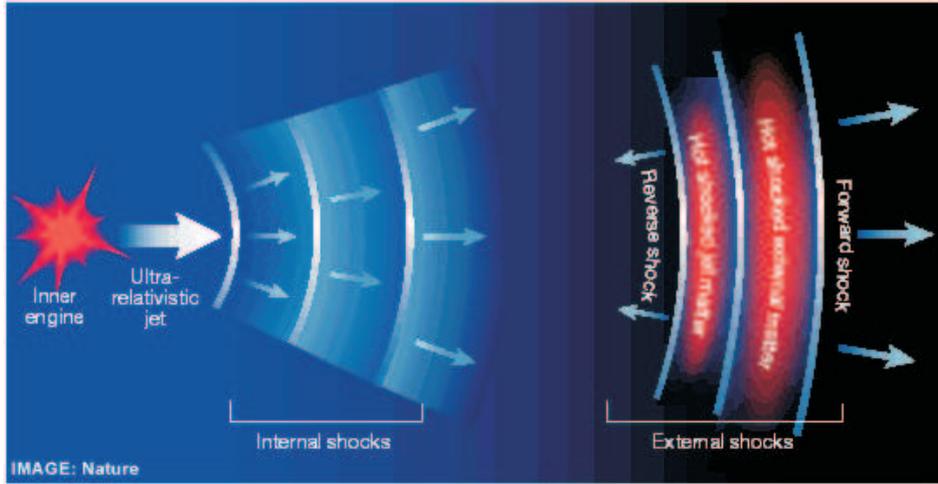


Figura 1.12: Modello di evoluzione di un *Gamma Ray Burst*. Si distinguono le due fasi di *internal shocks* e *external shocks* durante le quali può avvenire la produzione di neutrini [web6].

$\gamma \gtrsim 300$ . Il materiale espulso assomiglia a quello di una supernova, con la notevole differenza che raggiunge velocità relativistiche.

Il meccanismo di evoluzione della *fireball* sembra ben compreso e in accordo con le osservazioni [WAX97]. Il materiale espulso è delimitato da una superficie di *shock* relativistica, in corrispondenza della quale protoni di alta energia possono essere accelerati mediante il meccanismo di Fermi del prim'ordine, nelle collisioni con i fronti interni all'onda d'urto (*internal shocks*). Nella fase successiva, il gas si espande fino a distanze dell'ordine di  $10^{11} km$ , riscaldando improvvisamente il mezzo interstellare. Questo riscaldamento genera onde di *shock* termico che si propagano sia verso l'esterno (*forward shocks*) che verso l'interno (*reverse shocks*) (figura 1.12).

Le interazioni  $p - \gamma$  che avvengono nella fase degli *internal shock* durante la collisione con i fronti d'onda in espansione possono produrre neutrini con energie  $E_\nu \simeq 10^{14} eV$ . Durante la fase degli *external shock*, le interazioni dei protoni ad altissima energia possono generare neutrini con energia ancora maggiore,  $E_\nu \simeq 10^{20} eV$ . Rilevare un flusso di neutrini dovuto a un GRB consentirebbe di ridurre fortemente il rumore, effettuando misure in coincidenza spaziale e temporale con un flusso di fotoni provenienti dallo stesso

oggetto. La finestra temporale molto stretta, qualche secondo o frazione, offre un'opportunità unica per un rivelatore a neutrini di osservare neutrini associati ad un'unica esplosione.

## 1.4 Rivelazione Čerenkov di muoni upgoing

Nei paragrafi precedenti si è parlato dei vantaggi di una astronomia a neutrini e sono state mostrate alcune delle sorgenti candidate alla produzione di neutrini altamente energetici. In questo paragrafo si scenderà più nel dettaglio sulla rivelazione propria dei neutrini e sul principio di funzionamento di un telescopio Čerenkov sottomarino.

### Interazione neutrino-nucleone

I neutrini di altissima energia possono essere rivelati osservando la luce Čerenkov prodotta in un dato mezzo dai muoni generati nell'interazione di corrente carica (CC) neutrino-nucleone. Per ridurre il fondo dei muoni prodotti nell'atmosfera terrestre, è vantaggioso situare il telescopio a neutrini a diversi chilometri di profondità (sotto il ghiaccio, acqua, ecc.) e osservare i neutrini proveniente dal basso (*upward-going*). In generale, è utile calcolare il valore della sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone nei due casi di interazione da corrente carica (equazione 1.8) e di interazione da corrente neutra (NC) (equazione 1.9) [GAN96]:

$$\begin{array}{c} (-) \\ \nu_l + N \rightarrow l^\pm + X \end{array} \quad (1.8)$$

$$\begin{array}{c} (-) \quad \quad (-) \\ \nu_l + N \rightarrow \nu_l + X \end{array} \quad (1.9)$$

ove  $l$  indica il sapore del neutrino,  $N$  è il nucleone bersaglio,  $X$  rappresenta qualsiasi altro prodotto dell'interazione (tipicamente adroni).

La sezione d'urto si scrive in funzione degli invarianti di Bjorken:

$$x = \frac{Q^2}{2M\varepsilon} \quad (1.10)$$

$$y = \frac{\varepsilon}{E_\nu} \quad (1.11)$$

ove  $\varepsilon = E_\nu - E_l$  è l'energia trasferita nel sistema del laboratorio,  $E_\nu$  è l'energia del neutrino incidente,  $E_l$  è l'energia del leptone prodotto,  $Q^2$  è il momento invariante trasferito dal neutrino al leptone,  $M$  è la massa del nucleone bersaglio. I due parametri  $x$  e  $y$  sono adimensionali e compresi tra  $0 \leq (x \div y) \leq 1$ ;  $x$  rappresenta la frazione del momento del nucleone posseduta dal quark interessato dall'interazione col neutrino,  $y$  rappresenta la frazione di impulso trasferita allo sciame adronico.

La sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone si scrive [GAN96]:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{2G_F^2 M E_\nu}{\pi} \left( \frac{M_{W,Z}^2}{Q^2 + M_{W,Z}^2} \right)^2 [xq(x, Q^2) + x\bar{q}(x, Q^2) (1-y)^2] \quad (1.12)$$

ove  $M_{W,Z}$  è la massa del bosone intermedio di scambio ( $W^\pm$  per interazione da corrente carica,  $Z_0$  per corrente neutra),  $M$  è la massa del nucleone bersaglio,  $G_F \cong 10^{-5} GeV^{-2}$  è la costante di Fermi,  $q(x, Q^2)$  e  $\bar{q}(x, Q^2)$  sono le funzioni di distribuzione dei quark e antiquark nel nucleone [GAN96].

Gli andamenti delle sezioni d'urto sono mostrati in figura 1.13 in funzione dell'energia del neutrino, nell'intervallo di energia  $10 \div 10^{12} GeV$ . La sezione d'urto aumenta al crescere dell'energia e dalla figura si può ricavare schematicamente che  $\sigma \propto E_\nu$  per  $E_\nu \lesssim 10^{12} eV$  e che  $\sigma \propto E_\nu^{0.4}$  per  $E_\nu \gtrsim 10^{15} eV$ .

A causa della piccola massa dell'elettrone, l'interazione neutrino-elettrone può essere generalmente trascurata rispetto all'interazione neutrino-nucleone: la sezione d'urto dipende, infatti, dalla massa del bersaglio. C'è però un'eccezione: la formazione della risonanza del bosone intermedio  $W^-$  nell'intera-

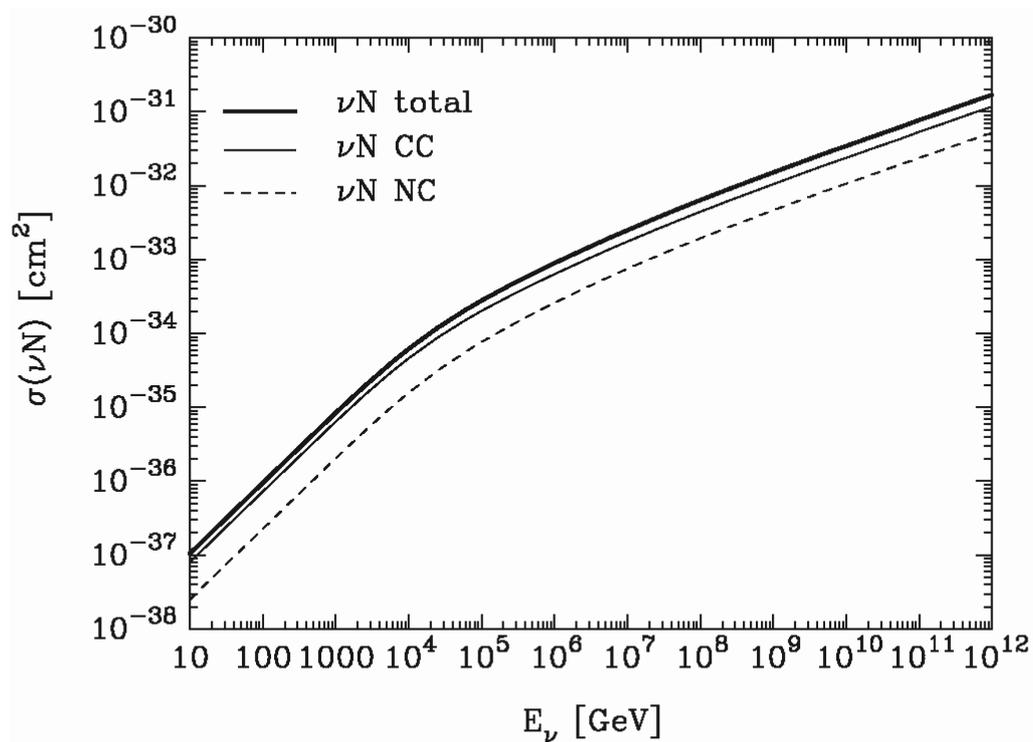


Figura 1.13: Sezione d'urto dell'interazione  $\nu N$  ad alte energie: linea tratteggiata  $\sigma(\nu N \rightarrow \nu + X)$ , linea continua  $\sigma(\nu N \rightarrow l + X)$ , linea spessa sezione d'urto totale (corrente neutra piú corrente carica) [GAN96].

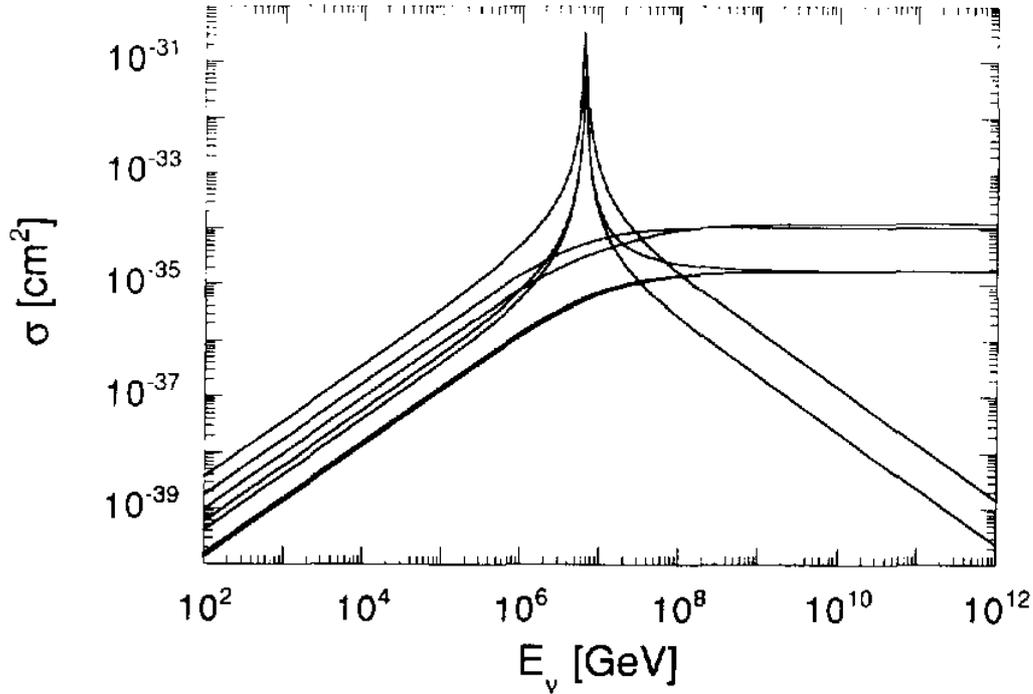


Figura 1.14: Sezione d'urto dell'interazione dei neutrini su un bersaglio di elettroni. Sono mostrate le sezioni d'urto su elettrone di neutrini e anti-neutrini di tipo  $e$  e  $\mu$ . Solo le interazioni di  $\bar{\nu}_e$  danno luogo alla risonanza [GAN96].

zione  $\bar{\nu}_e e$  all'energia:

$$E_{\nu}^{ris} = \frac{M_W^2}{2m_e} = \frac{(80.22 \frac{GeV}{c^2})^2}{2 \cdot 0.511 \frac{MeV}{c^2}} = 6.3 PeV \quad (1.13)$$

A tale energia per il  $\bar{\nu}_e$ , la sezione d'urto di risonanza antineutrino-elettrone assume un valore più alto della sezione d'urto neutrino-nucleone (si veda la figura 1.14). La presenza della risonanza deve essere tenuta in considerazione quando si trattano dati provenienti da un telescopio a neutrini, e può essere utilizzata per una calibrazione in energia dell'apparato.

Considerando il basso valore della sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone e considerando che ad alte energie il flusso di neutrini aspettati è

molto piccolo, un telescopio astronomico a neutrini deve avere un volume di rivelazione dell'ordine del  $km^3$ , in modo tale da garantire, su un tempo di presa dati dell'ordine di qualche anno, un numero di eventi statisticamente significativo.

## La rivelazione Čerenkov

Particelle cariche emettono luce sotto un angolo caratteristico quando passano attraverso un mezzo con una velocità superiore a quella della luce nel mezzo stesso. L'obiettivo principale dei telescopi sottomarini a neutrini è quello di rivelare la radiazione Čerenkov emessa da un muone prodotto dall'interazione di corrente debole di un neutrino con un nucleone. Ricostruendo la traccia del muone è possibile risalire alla direzione del neutrino astrofisico che ha generato il muone.

Una particella carica che attraversa un mezzo ad una velocità superiore a quella della luce in quel mezzo polarizza gli atomi lungo la direzione del suo moto. Gli atomi polarizzati emettono fotoni in modo da creare un fronte d'onda coerente (si veda la figura 1.15) caratterizzato da un angolo  $\theta$  Čerenkov dato da [LON92]:

$$\cos \theta = \frac{1}{n \cdot \beta} \quad (1.14)$$

ove  $\beta = \frac{v}{c}$  è il rapporto fra la velocità della particella e la velocità della luce, e  $n = \frac{c}{c_{mezzo}}$  è l'indice di rifrazione del mezzo considerato.

L'angolo  $\alpha$  fra la direzione del muone prodotto e quella del neutrino diminuisce al crescere dell'energia del neutrino secondo la relazione sperimentale [LEA00]:

$$\langle \alpha \rangle \approx \frac{1.5^\circ}{\sqrt{E_\nu [TeV]}} \quad (1.15)$$

con l'energia espressa in  $TeV$ . È evidente, quindi, che ad energie superiori a  $10^{12}eV$  ricostruire la traccia del muone corrisponde a ricostruire la direzione del neutrino.

Nell'intervallo di energia di interesse per un telescopio a neutrini,  $E_\nu >$

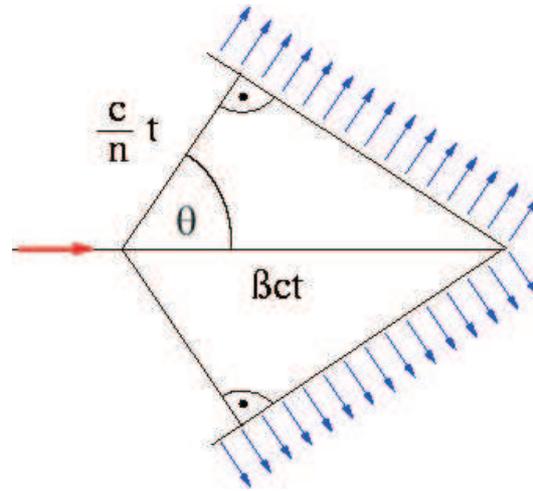


Figura 1.15: Ricotruzione della direzione di propagazione del fronte d'onda della radiazione Čerenkov. La freccia rossa indica la direzione della particella carica (muone), le frecce blu rappresentano i fotoni emessi dagli atomi polarizzati [web7].

$10\text{GeV}$ , le particelle possono essere considerate ultra-relativistiche con  $\beta = 1$ . Questo introduce una semplificazione: indipendentemente dall'energia del neutrino, l'angolo Čerenkov dipende solo dall'indice di rifrazione del mezzo. Nel caso di telescopi sottomarini, grandi volumi d'acqua vengono utilizzati come parte di "rivelatori Čerenkov" insieme a griglie di fotomoltiplicatori (in inglese *Photo-Multiplier Tube*, PMT) che, disposti secondo una geometria predefinita, raccolgono la luce Čerenkov prodotta. L'indice di rifrazione dell'acqua di mare è  $n = 1.35$  per luce con lunghezza d'onda  $\lambda = 450\text{nm}$ ; dunque la luce Čerenkov viene emessa sotto un angolo di  $\sim 42^\circ$  per questa lunghezza d'onda. Questa caratteristica permette la ricostruzione della traccia del muone a partire dai segnali rivelati da un reticolo di fotomoltiplicatori. In figura 1.16 è mostrata la schematizzazione della rivelazione della luce Čerenkov di un muone *up-going* dal reticolo di fotomoltiplicatori dell'apparato ANTARES (*Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch*).

La collaborazione russa Baikal è stata la prima che ha installato un apparato in grado di rivelare radiazione Čerenkov sottacqua, in Siberia nel lago

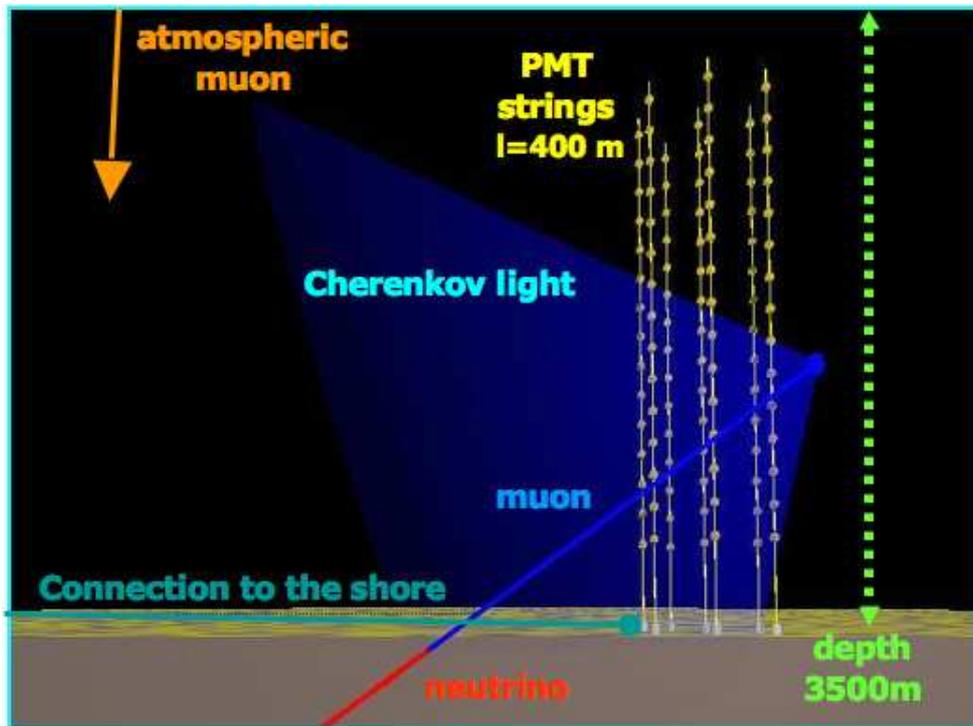


Figura 1.16: Rappresentazione schematica del telescopio sottomarino ANTARES. Situato nel mar Mediterraneo a 3500 m, rivela i muoni provenienti dal basso (scartando il fondo dovuto ai muoni atmosferici) generati da neutrini che hanno interagito nelle vicinanze dell'apparato [ANTARES].

omonimo a una profondità fra i 900 e i 1100 metri [web4].

In Antartide, la collaborazione internazionale AMANDA (*Antarctic Muon And Neutrino Detector Array*) ha installato un rivelatore di luce Čerenkov per neutrini altamente energetici nel ghiaccio [web4]. Il rivelatore attuale, AMANDA-II, ha una superficie di rivelazione di circa  $10^4 m^2$  ed è posizionato ad una profondità di  $1500 \div 2000 m$ . È attualmente in fase di realizzazione l'estensione di AMANDA-II al  $km^3$ : il progetto ICECUBE. La realizzazione di ICECUBE terminerà nel 2008, ed estenderà le dimensioni dell'apparato fino a coprire un volume di ghiaccio dell'ordine del  $km^3$ . Anche il telescopio ICECUBE è un rivelatore di neutrini *up-going*; il suo scopo, quindi, sarà quello di indagare la porzione di Universo visibile dall'emisfero boreale. Diviene così indispensabile installare, entro breve tempo, un telescopio a neutrini nell'emisfero settentrionale in modo tale da osservare la porzione di cielo non accessibile ad ICECUBE.

Il lavoro svolto inizialmente da NESTOR (*Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research*) [NEST], e successivamente da ANTARES [ANTA] e NEMO (*NEutrino Mediterranean Observatory*) [NEMO], è stato quello di progettare l'installazione nel Mar Mediterraneo di un telescopio sottomarino per neutrini astrofisici. La sede dell'apparato NESTOR è presso l'isola di Pylos in Grecia, ad una profondità di circa 4000 metri; ANTARES sarà situato a circa 40 km dalle coste francesi a largo di Tolone; il sito prescelto dalla collaborazione NEMO è localizzato a circa 100 km di distanza dalle coste siciliane a largo di Capo Passero, ad una profondità di 3300 metri. Il lavoro delle tre collaborazioni europee sta convergendo verso la realizzazione di un unico telescopio sottomarino nel Mar Mediterraneo, che svolgerà un lavoro complementare a quello svolto da ICECUBE (figura 1.17 [ANTA]).

Da tutte le considerazioni espresse finora, si possono dedurre le motivazioni principali che hanno spinto la collaborazione NEMO verso la realizzazione di un apparato rivelatore di neutrini astrofisici di altissima energia:

- il neutrino permette di estendere l'orizzonte di osservabilità dell'Universo ad energie elevate in quanto non risente del GZK *cutoff*;

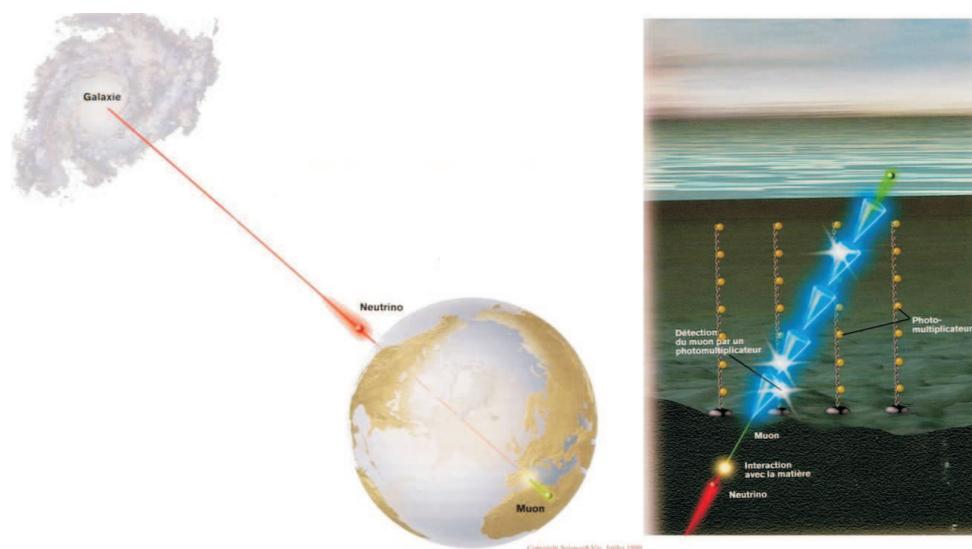


Figura 1.17: Rappresentazione artistica di un rivelatore sottomarino di neutrini astrofisici [ANTA].

- non risente affatto di deflessioni dovute alla presenza di campi magnetici: il neutrino è una particella stabile e di carica elettrica nulla;
- il neutrino possiede una bassa sezione d'urto che cresce in funzione dell'energia: permette di indagare le zone più interne delle sorgenti astrofisiche;
- potrebbe aprire alla scoperta di oggetti astrofisici non ancora noti, non rilevabili con altre tecniche.

## 1.5 La scelta del sito abissale

La rivelazione Čerenkov dei muoni prodotti da neutrini astrofisici avviene in acqua per mezzo di opportuni fotomoltiplicatori. I PMT danno un segnale di carica nell'istante in cui uno o più fotoni investono la superficie sensibile del PMT: il fotocatodo. La rivelazione su diversi PMT di un segnale di carica permette, nota la posizione di tutti i PMT, la ricostruzione della traccia del muone che ha prodotto la luce Čerenkov. La struttura di un telescopio

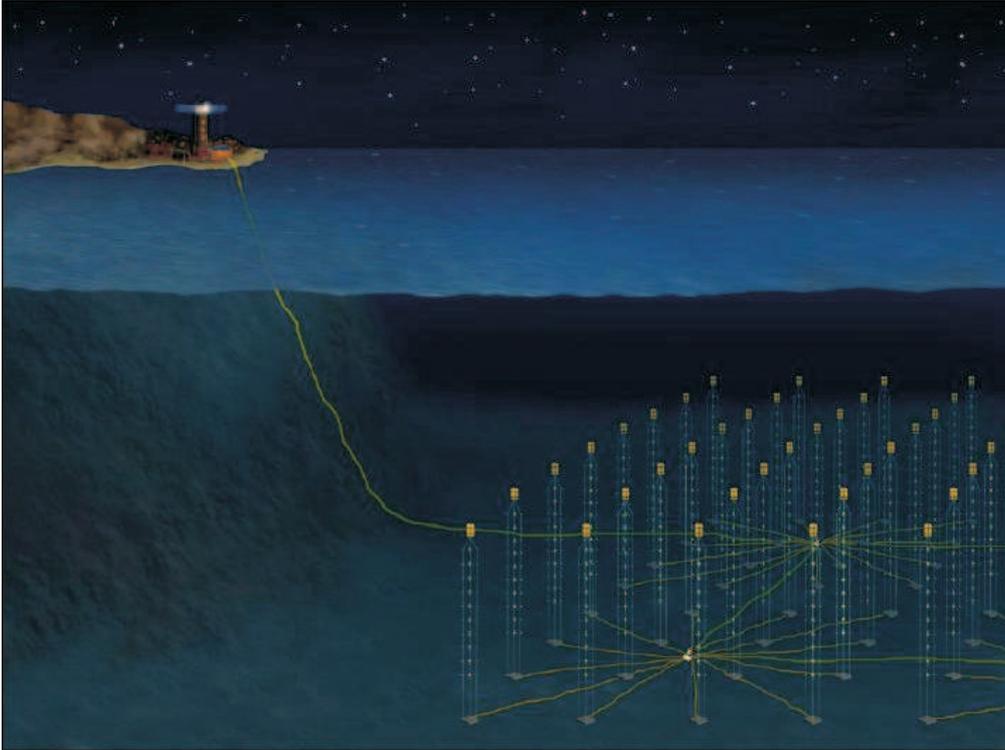


Figura 1.18: Modello del telescopio sottomarino di NEMO. Sono visibili le torri in cui alloggianno i fotomoltiplicatori, i cavi che connettono fra loro le varie torri e il cavo che connette tutto l'apparato a terra [NEMO].

sottomarino Čerenkov deve essere dunque di tipo modulare tridimensionale, e i PMT vengono disposti in modo tale da formare un reticolo regolare. Una configurazione spesso utilizzata è quella in cui i fotomoltiplicatori vengono posizionati lungo stringhe oppure su torri semirigide ancorate al fondo sottomarino e tenute in posizione verticale da boe (si veda la figura 1.18).

In particolare, la collaborazione NEMO ha progettato un telescopio sottomarino con un volume dell'ordine del  $km^3$ , formato da 81 "torri" disposte su un reticolo quadrato  $9 \times 9$ . Ogni torre è costituita da 18 "piani", e su ogni piano sono collocate 4 sfere per l'alloggiamento di altrettanti PMT (si veda la figura 1.19). Il numero totale di PMT risulta essere di 5832: la tecnologia richiesta dall'ambiente sottomarino e gli elevati costi di operazione sono fra i principali problemi della realizzazione di tale apparato.

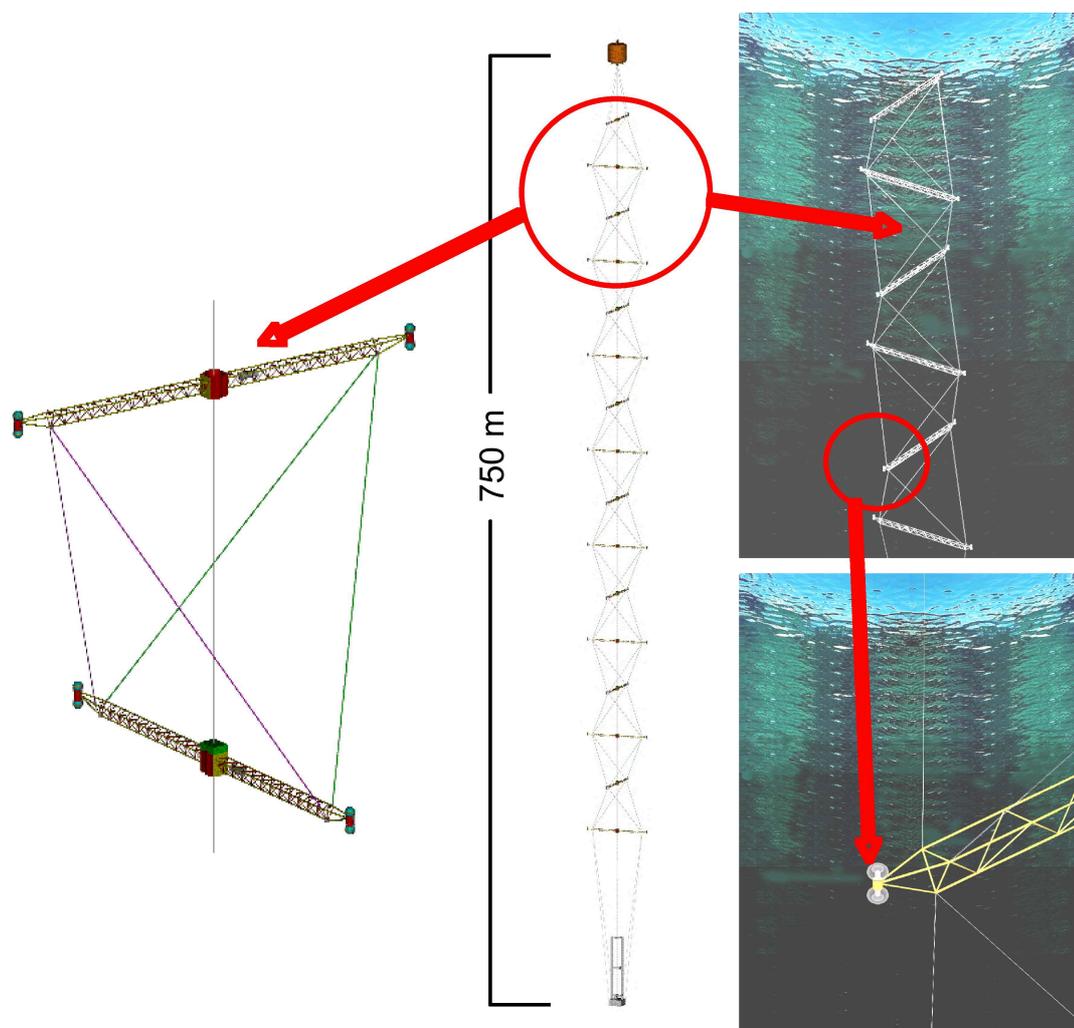


Figura 1.19: Struttura di una singola torre di NEMO. I piani che formano la torre sono costituiti da un braccio metallico. Alle due estremità di ogni piano sono collocati due PMT, per un totale di 4 PMT per piano [NEMO].

## Propagazione della luce in acqua marina

La rivelazione della luce Čerenkov prodotta dai muoni generati da neutrini astrofisici è legata fortemente alla trasparenza dell'acqua utilizzata come parte del rivelatore. Muoni relativistici che si propagano in acqua producono, nell'intervallo di lunghezza d'onda in cui i PMT sono sensibili, circa 200 fotoni Čerenkov per ogni cm di traccia [NEMO]; i fotoni devono avere una probabilità non nulla di raggiungere i PMT e di produrre un segnale di carica.

Esistono principalmente due fenomeni che limitano la propagazione della luce in acqua: l'*assorbimento* e la *diffusione*. L'assorbimento di luce riduce direttamente il numero di fotoni che raggiunge il rivelatore; la diffusione influenza la misura del tempo di arrivo del fotone sul rivelatore, cioè altera un parametro fondamentale per la ricostruzione della traccia del muone.

Si può caratterizzare la trasparenza dell'acqua attraverso due parametri quantitativi: la lunghezza di assorbimento  $L_a$  e la lunghezza di diffusione  $L_b$ . Ogni lunghezza rappresenta il cammino dopo il quale un fascio di fotoni di intensità  $I_0$ , che viaggia lungo la direzione di emissione, è ridotto di un fattore  $\frac{1}{e}$  da fenomeni di assorbimento o diffusione. In formule [MOB94]:

$$I_a(x) = I_0 e^{-\frac{x}{L_a}} \quad (1.16)$$

$$I_b(x) = I_0 e^{-\frac{x}{L_b}} \quad (1.17)$$

ove  $x$  è il cammino ottico dei fotoni e  $I_{a,b}(x)$  è l'intensità del fascio ad una distanza  $x$  dalla sua generazione. Si possono definire il coefficiente di assorbimento  $a = \frac{1}{L_a}$  e il coefficiente di diffusione  $b = \frac{1}{L_b}$ ; la somma di questi due parametri è chiamata *attenuazione*  $c = a + b$ . Questi coefficienti sono fortemente dipendenti dalla lunghezza d'onda dei fotoni [MOB94]:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1.18)$$

In figura 1.20 è mostrato l'andamento del coefficiente di assorbimento dell'acqua pura (linea continua) e dell'acqua marina pura (linea tratteggiata) in funzione della lunghezza d'onda. È interessante notare la presenza di un

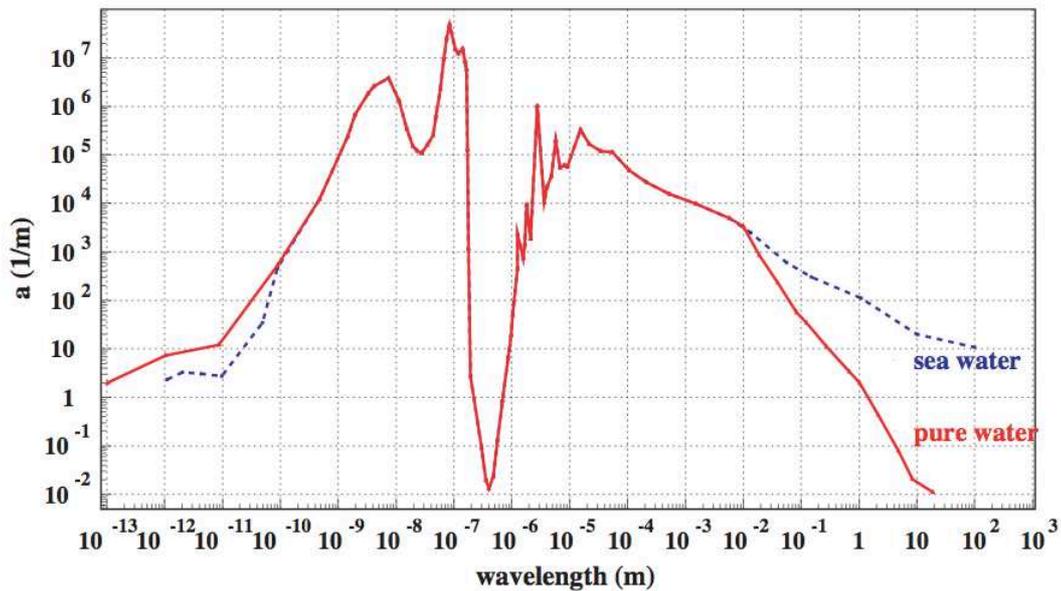


Figura 1.20: Coefficiente di assorbimento dell'acqua pura (linea continua) e dell'acqua marina pura (linea tratteggiata) in funzione della lunghezza d'onda [MOB94].

minimo nell'andamento del coefficiente di assorbimento proprio in corrispondenza della radiazione visibile, che è dunque quella che meglio si propaga in acqua.

La collaborazione NEMO ha eseguito misure dei coefficienti di assorbimento e attenuazione nel sito prescelto per l'installazione del telescopio, a varie profondità e in diversi periodi dell'anno. Si può notare dalla figura 1.21 che sotto i 2500m di profondità i coefficienti hanno un valore pressoché costante e indipendente dalle stagioni.

In figura 1.22 sono mostrate le lunghezze di assorbimento e di attenuazione misurate nell'intervallo della radiazione visibile nel sito di Capo Passero a 3100 metri di profondità, comparate con l'andamento delle stesse grandezze in acqua pura (si confronti la figura 1.20 che mostra l'andamento del coefficiente di assorbimento in acqua pura). Da tali dati risulta molto chiaramente che le proprietà ottiche dell'ambiente sottomarino analizzato sono ottimali per la rivelazione di luce Čerenkov.

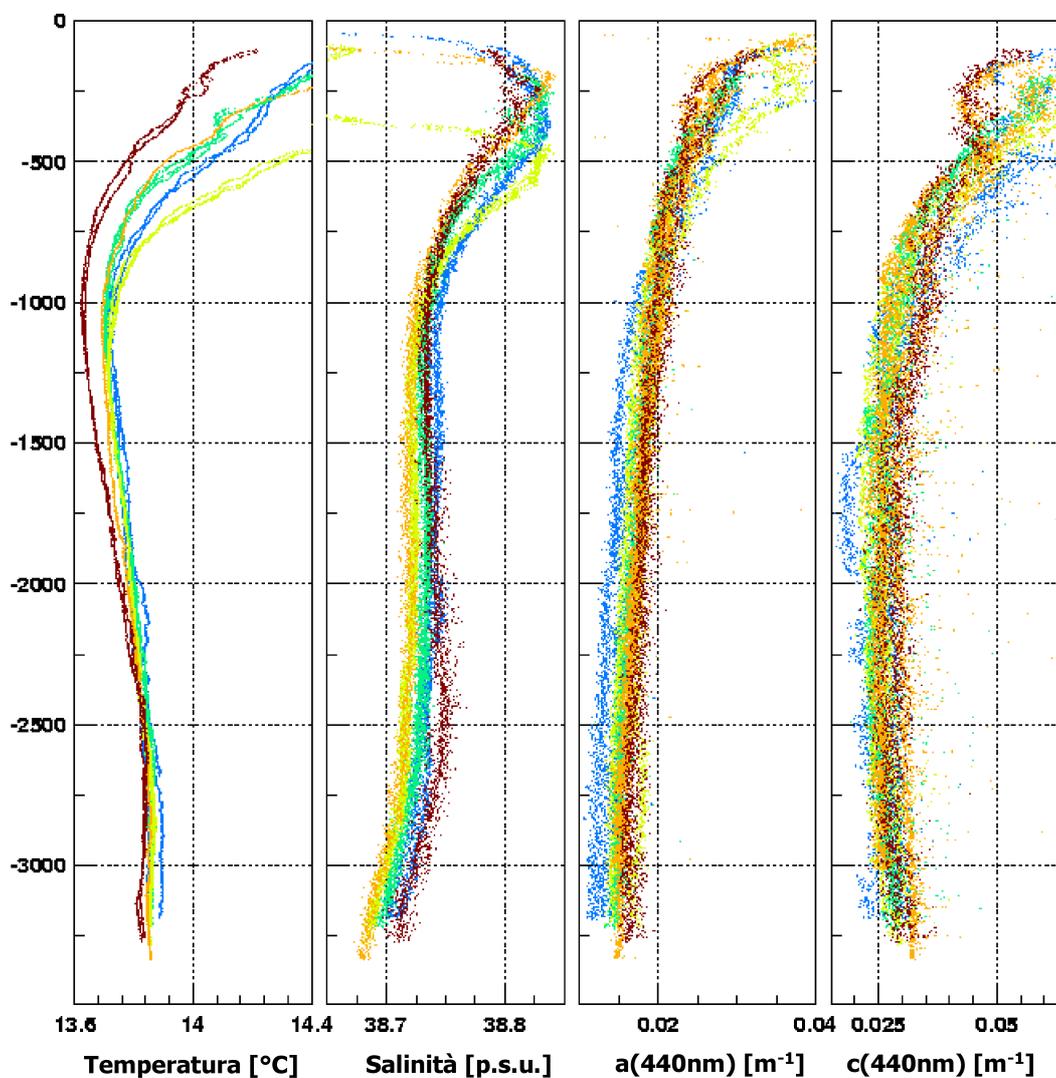


Figura 1.21: Coefficienti di assorbimento,  $a(\lambda)$ , e di attenuazione,  $c(\lambda)$ , nel sito di Capo Passero in funzione della profondità per  $\lambda = 440nm$ , comparati con i dati della temperatura e della salinità. I diversi colori rappresentano misure acquisite in diversi periodi dell'anno [NEMO].

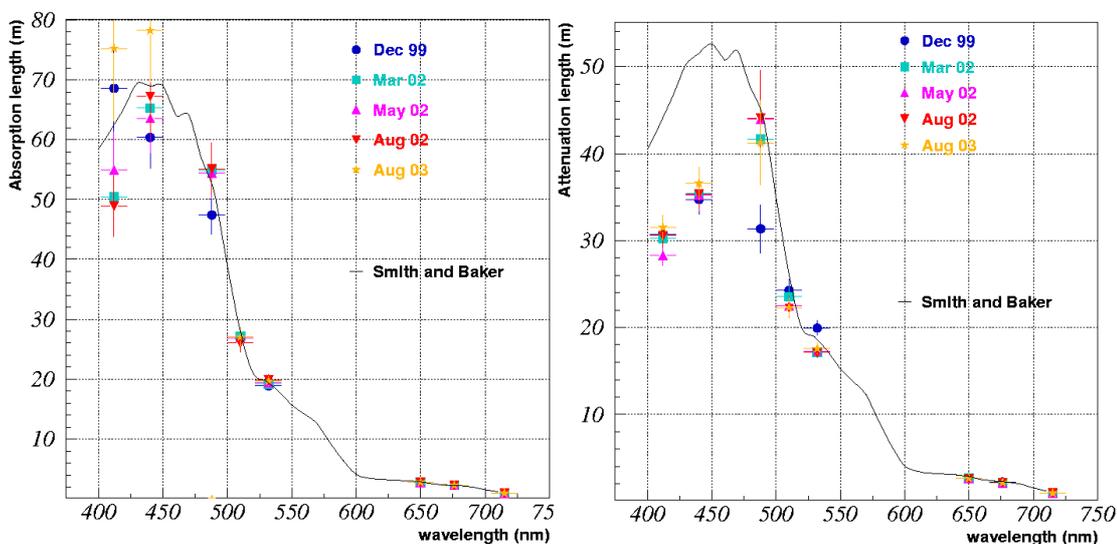


Figura 1.22: Lunghezza di assorbimento e lunghezza di attenuazione misurate nel sito di Capo Passero nell'intervallo della radiazione visibile. Tali lunghezze sperimentali sono confrontate con quelle dell'acqua pura [NEMO].

La lunghezza di assorbimento dell'acqua di mare è di circa 70 metri per la radiazione visibile: i moduli ottici di un telescopio Čerenkov sottomarino devono essere posti ad una distanza reciproca inferiore, o al massimo dello stesso ordine di grandezza, al fine di garantire la ricostruzione della traccia dei muoni generati da neutrini astrofisici.

## Caratteristiche del sito

Il sito sottomarino più adatto al posizionamento del telescopio di NEMO deve essere conforme ad una serie di requisiti che migliorano l'efficacia di rivelazione del telescopio stesso e limitano i costi di realizzazione e di installazione. La collaborazione ha scelto una zona sottomarina nei pressi di *Capo Passero*, sulla costa siciliana, nel Mar Ionio meridionale ad una profondità di 3350 m; le coordinate geografiche di tale sito sono  $35^{\circ}50'N$ ,  $16^{\circ}10'E$  (vedi figura 1.23).

Le proprietà del sito di Capo Passero possono essere riassunte nei seguenti punti:

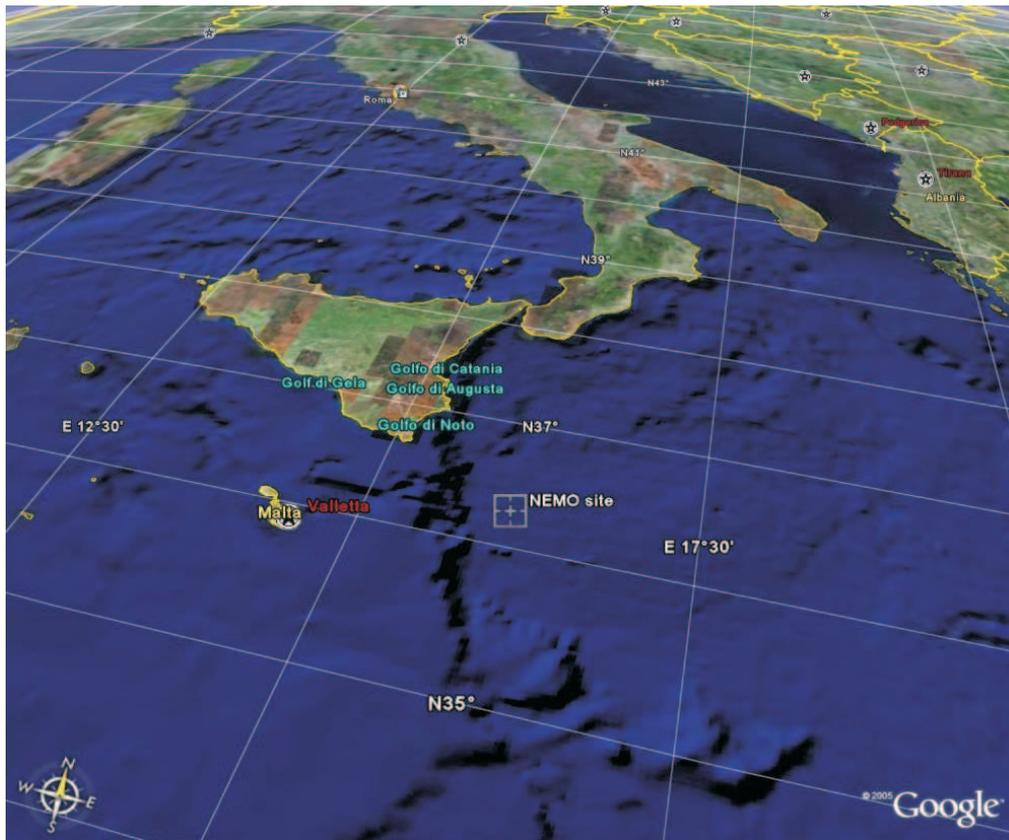


Figura 1.23: Sito sottomarino selezionato dalla collaborazione NEMO per il posizionamento del telescopio sottomarino. Il sito è posizionato lontano dalla scarpata di Malta, in una zona piana a 3350 m di profondità, a  $35^{\circ}50'N$  e  $16^{\circ}10'E$  [web8].

- La profondità a cui viene installato l'apparato permette di ridurre fortemente la presenza dei muoni atmosferici, meno energetici di quelli di interesse astrofisico, prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre. La colonna d'acqua che sovrasta l'apparato (circa 3 km) riduce di un fattore  $\sim 10^6$  il numero dei muoni atmosferici rispetto a quelli osservati al livello del mare [GAI95]. Se il telescopio fosse posto ad una minore profondità, rimarrebbe "accecato" dai muoni atmosferici e più difficilmente potrebbe osservare i neutrini.
- La distanza dalla costa è relativamente piccola (circa 80 km); questo limita fortemente i costi di costruzione, operazione e manutenzione.
- Il profilo batimetrico del sito è piatto su una superficie di più di  $10\text{km}^2$ . È lontano dalla scarpata di Malta: ciò garantisce l'assenza di "valanghe" sottomarine, più sicurezza nella fase di installazione e di ancoraggio delle strutture meccaniche.
- Le correnti sottomarine sono piuttosto deboli: il valor medio del modulo della corrente è  $\sim 3\text{cm/s}$  e il valor massimo, osservato in una sola occasione in cinque anni di misure continue, è  $\sim 15\text{cm/s}$  [NEMO]. Il telescopio non subisce eccessive sollecitazioni meccaniche.
- La trasparenza del mare è prossima a quella dell'acqua pura: la lunghezza di attenuazione è  $\sim 35\text{m}$  e la lunghezza di assorbimento è  $\sim 70\text{m}$ , ideale per la ricostruzione delle tracce.
- L'attività biologica è limitata: il valore della bioluminescenza, dovuto alla presenza di batteri e che introduce rumore ottico, è molto basso.
- Il flusso di sedimenti ed il fenomeno di crescita di film sottili di batteri semi-trasparenti (detto *bio-fouling*) sulle superfici "sensibili" dell'apparato sono ridotti: dovendo operare in profondità e per parecchi anni, è importante che le superfici ottiche attive del telescopio non vengano oscurate né dalla presenza di particolato organico e inorganico né dalla crescita di film biologico.

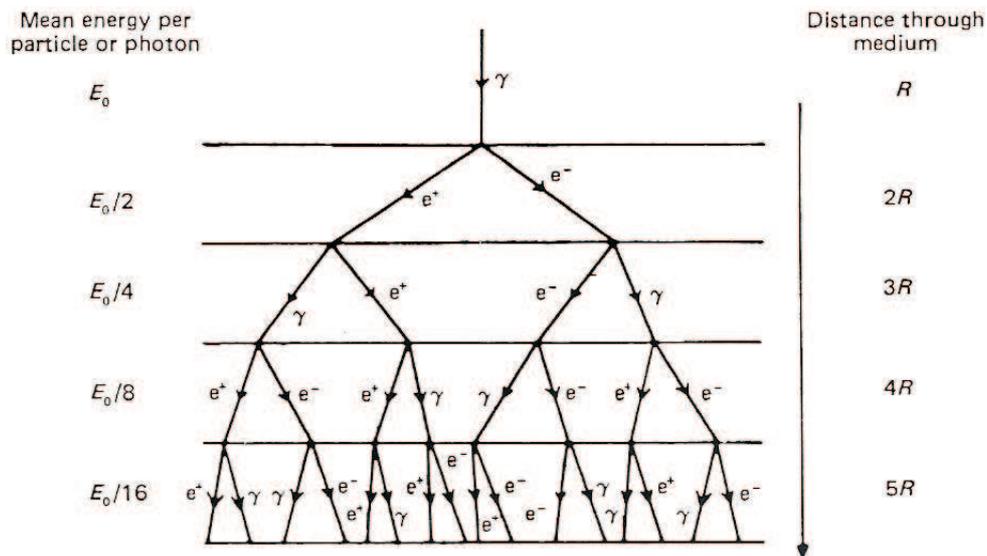


Figura 1.24: Evoluzione di uno sciame elettromagnetico [LON92].

## 1.6 Tecniche alternative di rivelazione

Si accenna brevemente in questo paragrafo alle tecniche di rivelazione radio e acustica di neutrini, alternative alla rivelazione della luce Čerenkov.

### La rivelazione radio

Un neutrino altamente energetico ( $E \gtrsim 10^{15} eV$ ) di tipo elettronico che interagisce con la materia può dare luogo ad una cascata elettromagnetica, costituita da elettroni, positroni e fotoni (si veda la figura 1.24). In virtù della diffusione Compton dei fotoni della cascata sugli elettroni del mezzo in cui si propaga, e per via dell'annichilazione dei positroni, si verifica un eccesso di carica negativa che si propaga con lo sciame elettromagnetico. Alla cascata può, dunque, essere associata una carica negativa in moto ad una velocità prossima a quella della luce. Si osserva l'emissione di un segnale radio Čerenkov coerente [ASK62].

## La rivelazione acustica

Le interazioni dei neutrini in un mezzo, con conseguente produzione di sciami, sono tali da prevedere la formazione di un segnale acustico misurabile. L'energia del neutrino viene dissipata attraverso un meccanismo termo-acustico: l'energia cinetica del neutrino altamente energetico viene trasferita alle molecole del mezzo; la deposizione di energia nel mezzo produce un riscaldamento locale con conseguente espansione termica e creazione di un'onda di pressione.

Un rivelatore acustico di neutrini può essere formato da un reticolo tridimensionale di idrofoni. Il valore della lunghezza di attenuazione del suono in acqua è molto elevato ( $\sim 1km$  per frequenze di  $10kHz$ ): ciò consente di posizionare i rivelatori acustici a grande distanza fra loro, senza perdere significativamente informazione sul segnale. A differenza della rivelazione di luce Čerenkov, si potrebbe estendere attraverso degli idrofoni il volume di rivelazione utilizzando un minor numero di rivelatori disposti a maggior distanza tra loro, rendendo accessibili eventi di neutrini cosmici con  $E_\nu \sim 10^{18}eV$  [LEA03, NEMO].