

Capitolo 1

I Raggi Cosmici

Caratterizzazione dei raggi cosmici.

Esperimenti per la rivelazione di raggi cosmici

Neutrino- Astronomia

Il presente capitolo offre una panoramica generale sulla fisica delle astroparticelle. La rivelazione di radiazione cosmica costituisce un valido strumento di indagine astrofisica, consentendo di esplorare regioni dell'universo e fenomeni inaccessibili con le tradizionali osservazioni ottiche. Sono elencate, sinteticamente, le caratteristiche della radiazione cosmica (spettro di energia, composizione di massa), facendo riferimento ai principali esperimenti. Lo studio dello spettro e della composizione dei raggi cosmici pone il problema dell'origine delle astroparticelle (classificazione delle sorgenti e meccanismi di accelerazione, topologia delle sorgenti) e della propagazione nel mezzo interstellare. In particolare, si concentra l'attenzione sui neutrini: a causa del piccolo valore della sezione d'urto di interazione, i neutrini costituiscono una "sonda" per l'esplorazione dell'universo. Diverse tecniche di rivelazione di neutrini astrofisici sono state proposte. Attualmente sono in via di realizzazione dei "telescopi per neutrini" basati sulla rivelazione della luce Cherenkov originata dal percorso, in un mezzo trasparente quale acqua o ghiaccio, dei muoni relativistici prodotti nelle interazioni dei neutrini. Il piccolo valore della sezione d'urto di interazione dei neutrini e il piccolo valore del loro flusso al crescere dell'energia delle particelle [Figura 1.5] fanno sì che, per realizzare rivelatori di neutrini, occorra utilizzare radiatori Cherenkov naturali (oceani, ghiacci polari, masse rocciose). Un'alternativa e un complemento alla tecnica ottica (Cherenkov), come spiegato nel Capitolo 2 e nel Capitolo 3, è la rivelazione acustica in acqua degli sciami (adronici ed elettromagnetici) indotti dall'interazione di neutrini.

Astronomia con Raggi Cosmici

Fare osservazioni astrofisiche significa misurare una radiazione e ricostruire, dalle caratteristiche della radiazione misurata, le proprietà della sorgente. Per lungo tempo, le osservazioni astrofisiche sono state limitate alla sola radiazione visibile e il telescopio ottico ha costituito lo strumento preferenziale di indagine. Il concetto è, però, estendibile a tutti i tipi di radiazione misurabili, e, in questo senso, si parla di astronomia con raggi cosmici.



Figura 1.1 *La musa dell'Astronomia*
Arazzo fiammingo (~ 1500)
Röhsska Museet för Konsthantverk och Design
(Göteborg)

La rivelazione di radiazione cosmica permette di allargare l'orizzonte di osservabilità dell'astronomia tradizionale e fornisce informazioni di interesse astrofisico. Il problema dell'origine dei raggi cosmici, ad esempio, porta all'individuazione ed alla classificazione delle sorgenti, cioè degli oggetti astrofisici sede di meccanismi di produzione ed accelerazione delle particelle elementari; l'indagine sulle modalità di propagazione delle particelle e la variazione spaziale (anisotropia) e temporale del loro flusso possono fornire informazioni sulla natura del mezzo interstellare e dei campi elettromagnetici galattici; lo studio dei meccanismi di accelerazione descrive fenomeni "esplosivi" che caratterizzano l'evoluzione dell'universo, sulla base dei quali è possibile formulare teorie cosmologiche. L'allargamento dell'orizzonte di osservabilità, inoltre, potrebbe rendere accessibili eventi di fisica "non standard", come la violazione dell'invarianza di Lorentz, oppure il decadimento di particelle super-massive, conferme sperimentali dell'esistenza di materia oscura, o ancora l'esistenza di "difetti topologici", legati alla presenza di monopoli magnetici e/o di stringhe.

Il punto di partenza per qualsiasi indagine è l'osservazione e la caratterizzazione della radiazione cosmica e quindi, di conseguenza, lo sviluppo di tecniche e rivelatori per lo studio delle astroparticelle.

I Raggi Cosmici

La radiazione misurata sulla superficie terrestre è costituita da una componente di origine cosmica (raggi cosmici primari) e da una componente, secondaria, originata dalla interazione della componente primaria nell'atmosfera. La radiazione cosmica primaria è costituita principalmente da protoni (85%), da nuclei di elio (particelle α , 13%) e da nuclei più pesanti (Figura 1.2); bisogna considerare, inoltre, seppure in percentuali ancora minori, la presenza di raggi gamma e neutrini. La composizione della radiazione secondaria è, invece, molto varia, come si vede dalle Figure 1.3 – 1.4.

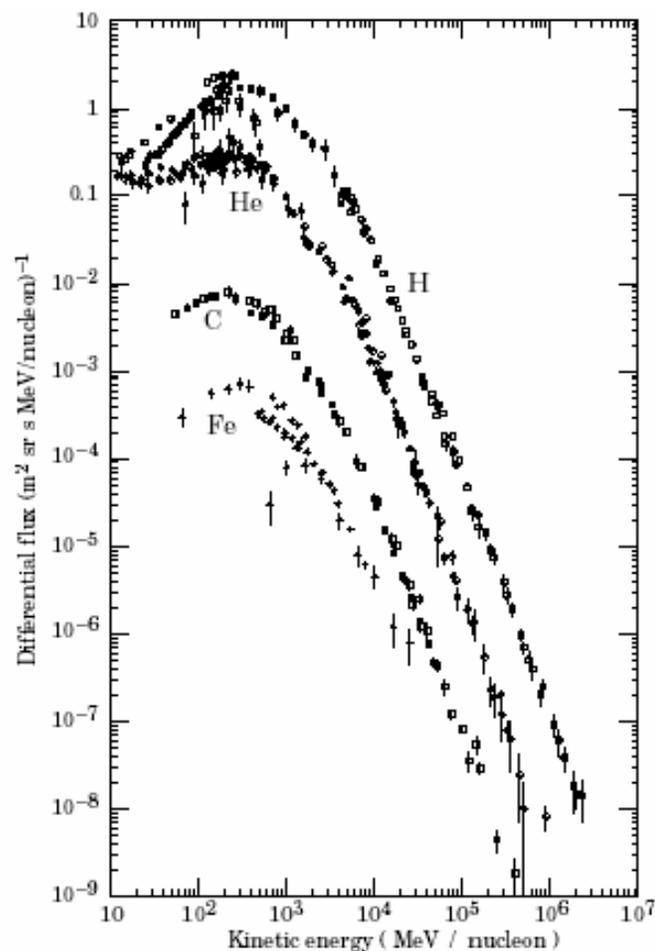


Figura 1.2 Spettro in energia delle principali componenti della radiazione cosmica primaria [LON92]. Il grafico riproduce il flusso differenziale di raggi cosmici in funzione dell'energia cinetica per nucleone (vedere Figura 1.5).

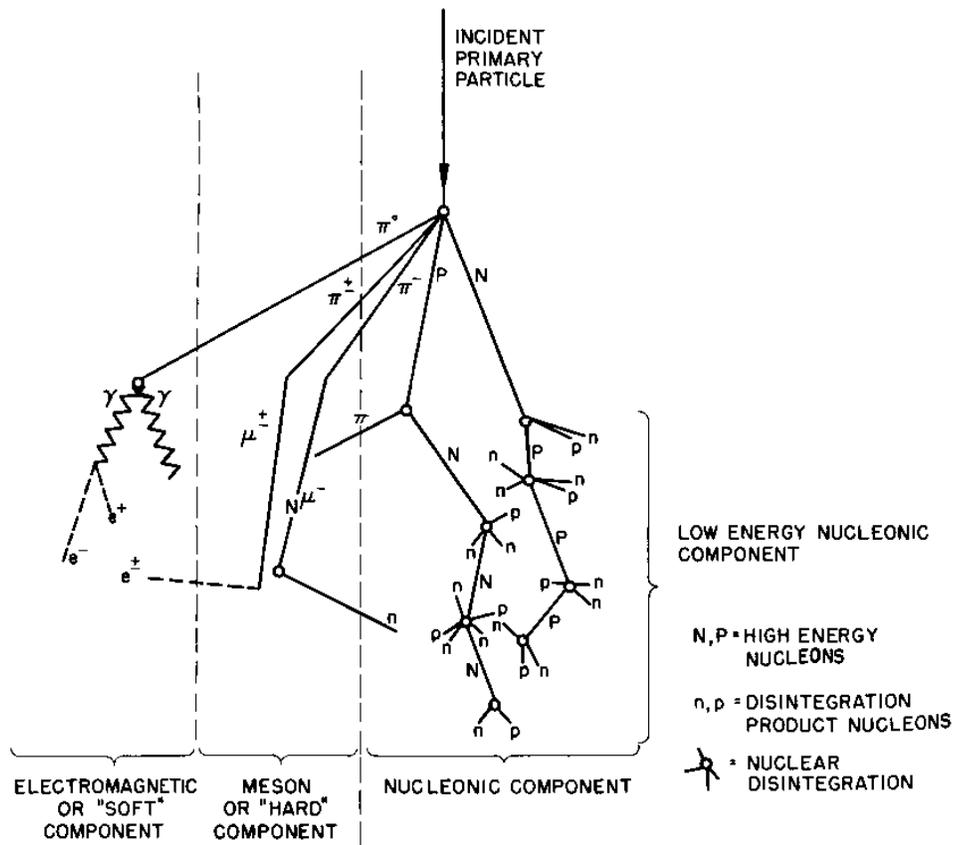


Figura 1.3 Rappresentazione schematica di uno EAS (Extensive Air Shower), sciame di particelle (radiazione secondaria), prodotto dall'interazione della radiazione cosmica primaria con gli strati superiori dell'atmosfera. Si distinguono una componente "dura", o penetrante (muoni), e una componente "molle" (elettroni e fotoni) [web1].

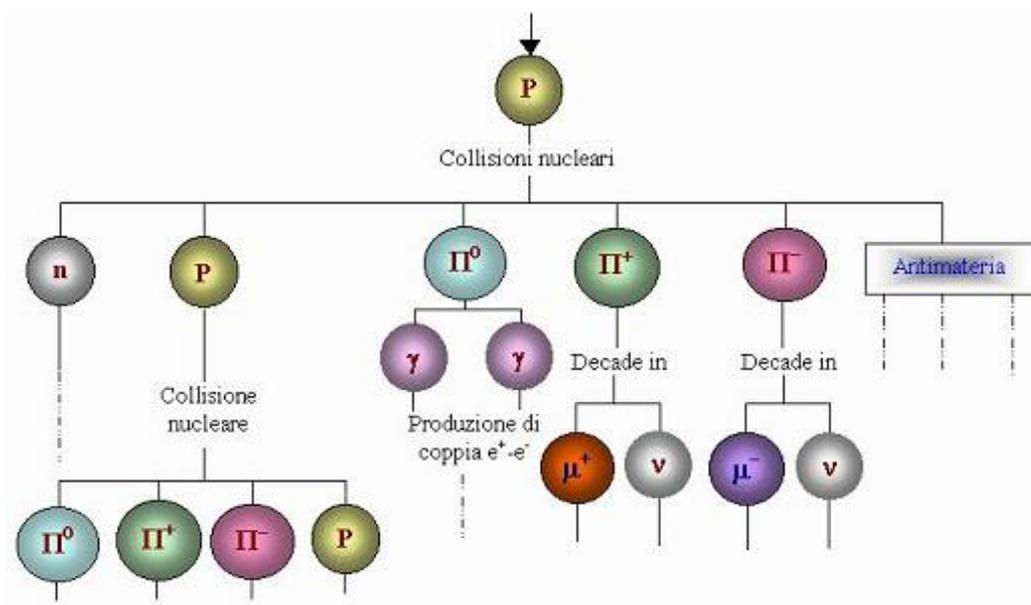


Figura 1.4 Composizione della radiazione secondaria [web2].

Le osservazioni astrofisiche sono quindi possibili tramite la caratterizzazione sperimentale della radiazione cosmica finalizzata alla misura del flusso, dello spettro in energia e della direzione di provenienza della componente primaria. Misure dirette della radiazione cosmica primaria si realizzano con esperimenti spaziali, posti su satelliti o stazioni orbitanti, oppure con esperimenti in alta atmosfera, realizzati su palloni. Misure indirette si ottengono dallo studio della componente secondaria, ad esempio con rivelatori di sciame estesi (EAS).

Spettro dei Raggi Cosmici

Lo spettro dei raggi cosmici in Figura 1.5 descrive l'andamento del flusso di astroparticelle misurabile sulla Terra, in funzione dell'energia. La figura mostra i risultati sperimentali ottenuti con diversi esperimenti e con diverse tecniche di rivelazione.

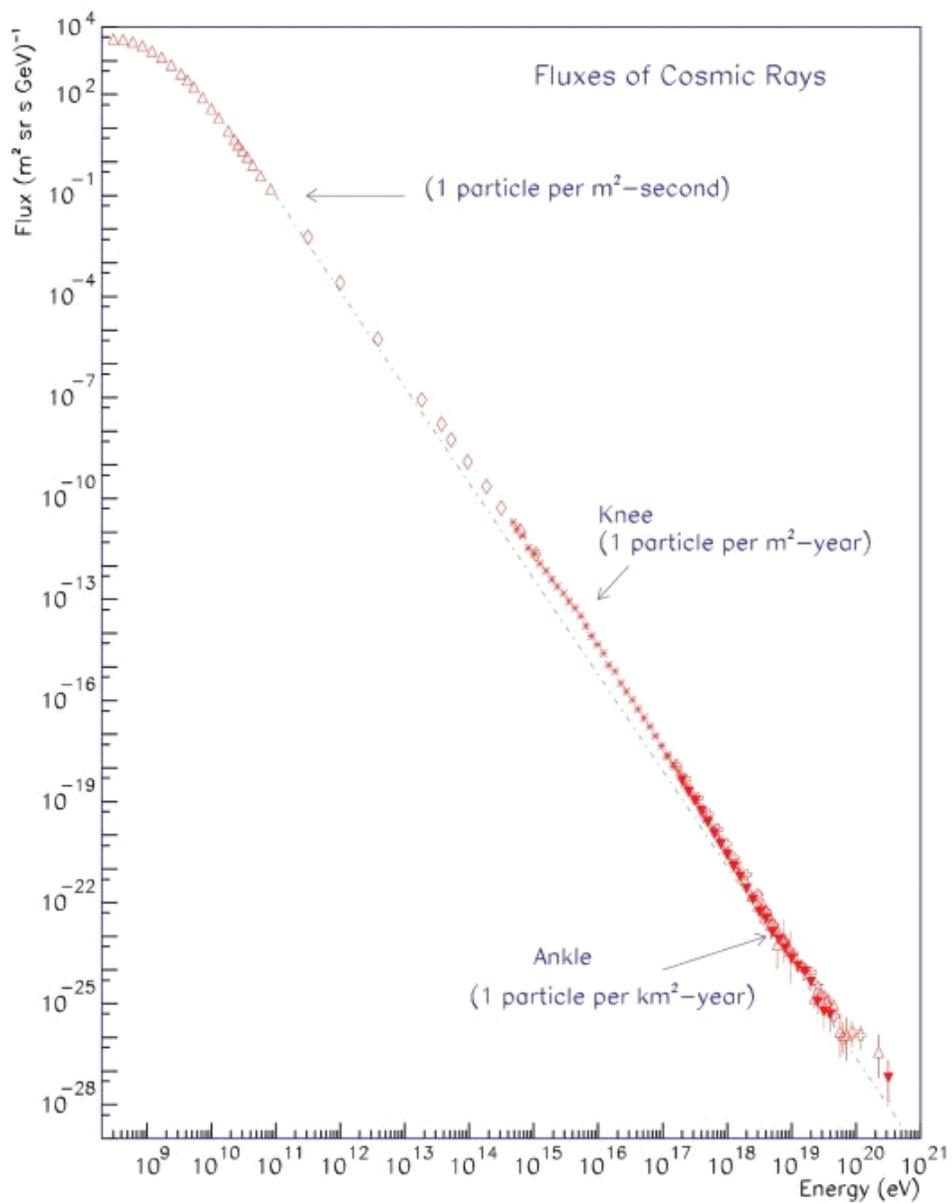


Figura 1.5 Lo spettro dei raggi cosmici, in funzione dell'energia. È evidenziata la posizione di "knee" e "ankle" [web3].

In ascissa è rappresentata, in scala logaritmica, l'energia cinetica delle particelle. In ordinata è rappresentato, sempre in scala logaritmica, il flusso differenziale, ossia il numero di particelle per intervallo di energia, nell'unità di tempo, di area e di angolo solido; l'unità di misura è $[\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{GeV}^{-1}]$.

La Figura 1.5 costituisce il punto di partenza per definire le diverse tecniche sperimentali di rivelazione dei raggi cosmici. Le tecniche di rivelazione si differenziano, infatti, a seconda della regione dello spettro che si intende esplorare¹.

La misura diretta della componente primaria dei raggi cosmici è possibile fino ad energie $E \approx 100 \text{ GeV}$. Come si vede dal grafico di Figura 1.5, infatti, il flusso di raggi cosmici atteso in questo intervallo di energia è abbastanza intenso e ciò permette di realizzare esperimenti di volumi contenuti, posizionabili su satelliti (AMS) o su palloni aerostatici (BESS, CAPRICE, HEAT, IMAX) [web5]. I principali risultati che si ottengono con questo tipo di esperimenti sono:

- misura dell'abbondanza relativa degli elementi nei raggi cosmici (Figura 1.6);
- misura del rapporto materia – antimateria

¹ Un elenco esteso degli esperimenti per la rivelazione di raggi cosmici è consultabile alla pagina web [web5]. Gli esperimenti sono classificati tenendo conto delle diverse tecniche di rivelazione. L'elenco è arricchito con collegamenti a pagine web di altri gruppi sperimentali. Sono inclusi esperimenti non più operativi, esperimenti in corso, esperimenti in fase di progetto.

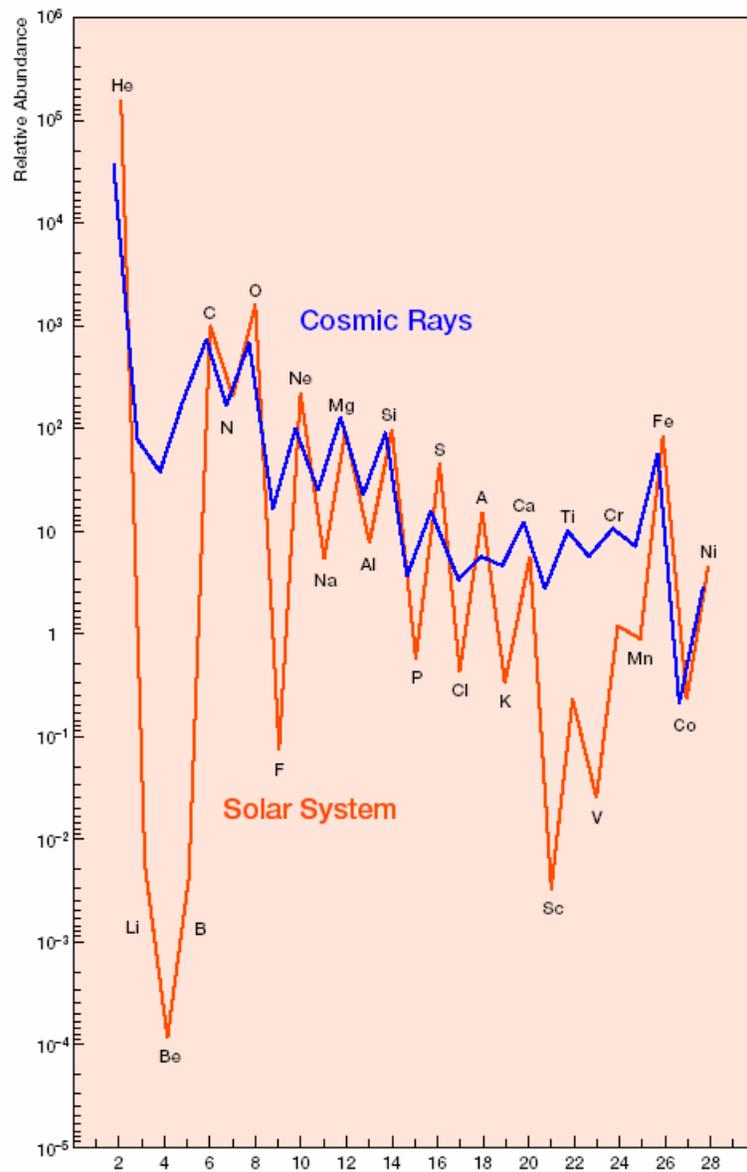


Figura 1.6 Abbondanza relativa degli elementi nei raggi cosmici (linea rossa), confrontata con l'abbondanza relativa degli elementi nel sistema solare (linea blu). In ascissa è riportato il numero atomico Z [web4]. Si trova che la composizione chimica dei raggi cosmici coincide, approssimativamente, con quella del sistema solare. Le principali differenze portano importanti informazioni sull'origine dei raggi cosmici, l'accelerazione, i meccanismi di trasporto (propagazione della radiazione cosmica e interazione con il mezzo interstellare), il confinamento ad opera del campo magnetico galattico [LON92] [BER90].

Per energie superiori, è necessario desumere le caratteristiche della radiazione primaria dalla misura della radiazione secondaria, ossia delle particelle originate dalla interazione dei raggi cosmici primari (protoni, nuclei e fotoni) con l'atmosfera. Il risultato di queste interazioni è la produzione di sciami estesi in atmosfera (EAS, Figura 1.3) [RA098].

Elenchiamo le principali tecniche di rivelazione di sciami estesi in atmosfera (EAS), citando alcuni esperimenti significativi:

- $E \approx 10^{12}$ eV → Telescopi Cherenkov: rivelazione di luce Cherenkov prodotta da sciami in atmosfera (interazione con gli atomi e le molecole dell'atmosfera) (CANGAROO, HEGRA, WHIPPLE, H.E.S.S., MAGIC, VERITAS) [web5].

- $E \approx 10^{15}$ eV → Rivelatori estesi di sciami di particelle (AGASA, ARGO, EAS-TOP, KASCADE, MILAGRO Auger) [web5]

Come si vede dalla Figura 1.5, particelle di energia elevata ($E \geq 10^{12}$ eV) presentano un flusso molto basso. La necessità di osservare, in tempi ragionevoli, un numero di eventi sufficienti a studiare in modo statisticamente significativo le proprietà dei raggi cosmici di alta energia richiede, quindi, rivelatori molto “estesi” ($> 1 \text{ Km}^2$). Al crescere dell'energia del primario, inoltre, crescono le dimensioni degli sciami prodotti, un altro motivo per estendere la superficie di rivelazione.

- $E \geq 10^{16}$ eV → Rivelatori di fluorescenza: rivelatori della luce di fluorescenza prodotta da sciami estesi in atmosfera (interazione con gli atomi e le molecole dell'atmosfera) da parte di apparati ottici capaci di “osservare” decine di migliaia di Km^2 di atmosfera (HiRes, Auger, EUSO, OWL) [web5].

Un'attenzione particolare è riservata ai rivelatori per neutrini. La presenza di neutrini di alta energia nella componente cosmica primaria è sostenuta da numerosi modelli [LEA00]. La piccola sezione d'urto di interazione dei neutrini richiede lo sviluppo di rivelatori molto estesi: un grande "volume sensibile" in cui i prodotti delle loro interazioni possano essere osservabili da un apparato sperimentale. Diverse tecniche di rivelazione di neutrini astrofisici sono state proposte. Attualmente sono in via di realizzazione dei "telescopi per neutrini" basati sulla rivelazione della luce Cherenkov originata dal percorso, in un mezzo trasparente quale acqua o ghiaccio, dei muoni relativistici prodotti nelle interazioni dei neutrini. Rivelatori per neutrini sono proposti, realizzati e sono in via di realizzazione nelle profondità marine (DUMAND, Baikal, ANTARES, NESTOR, NEMO), sotto i ghiacci polari (AMANDA – IceCube), all'interno di caverne, in laboratori sotterranei (Kamiokande – Super Kamiokande, SNO, GNO, MACRO) [web5]. Il piccolo valore della sezione d'urto da una parte rappresenta un limite sperimentale, dall'altra costituisce l'elemento che rende possibile la "neutrino – astronomia", ossia l'indagine di oggetti astrofisici e astronomici sempre più lontani. I neutrini, leptoni neutri di massa trascurabile (esattamente nulla nel modello standard), non subiscono deviazioni da parte di campi magnetici, non interagiscono con la radiazione diffusa, interagiscono con la materia solo debolmente (la sezione d'urto d'interazione debole è circa 10^{-35} cm⁻² per $E_\nu \sim 1$ TeV [PER87]) e rappresentano, pertanto, un valido strumento di indagine astrofisica e una "sonda" per l'esplorazione dell'universo.

Origine dei Raggi Cosmici

Lo studio dello spettro dei raggi cosmici permette di formulare ipotesi sull'origine delle astroparticelle, sulle modalità della loro accelerazione e sulla loro propagazione nel mezzo interstellare. L'andamento dei punti sperimentali di Figura 1.5 è descritto da un legge di potenza, del tipo:

$$N(E) \propto E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

dove $N(E)$ è il flusso differenziale di particelle con energia cinetica E .

Si osserva (Figura 1.5) che il valore dell'esponente, o indice spettrale, γ varia in funzione dell'energia [LON92] [GAI97]. I risultati dei diversi esperimenti sono concordi nell'individuare, schematicamente, tre diverse regioni dello spettro, caratterizzate da un diverso valore dell'indice spettrale:

$$\begin{array}{lll} \gamma = 2.7 & \text{per } 10 \text{ eV} < E < 10^{16} \text{ eV} & \\ \gamma = 3.1 & \text{per } 10^{16} \text{ eV} < E < 10^{19} \text{ eV} & \text{“ginocchio” o “knee”} \\ \gamma = 2.5 & \text{per } 10^{19} \text{ eV} < E & \text{“caviglia” o “ankle”} \end{array}$$

La variazione dell'indice spettrale è più evidente rappresentando i punti sperimentali, come nel grafico di Figura 1.7, dopo aver moltiplicato il flusso differenziale di particelle per il valore $E^{2.7}$. Ciò permette di “nascondere” artificialmente la dipendenza dall'energia della distribuzione per energie $E < 10^{15}$ eV e di evidenziare la variazione dell'indice spettrale per energie superiori.

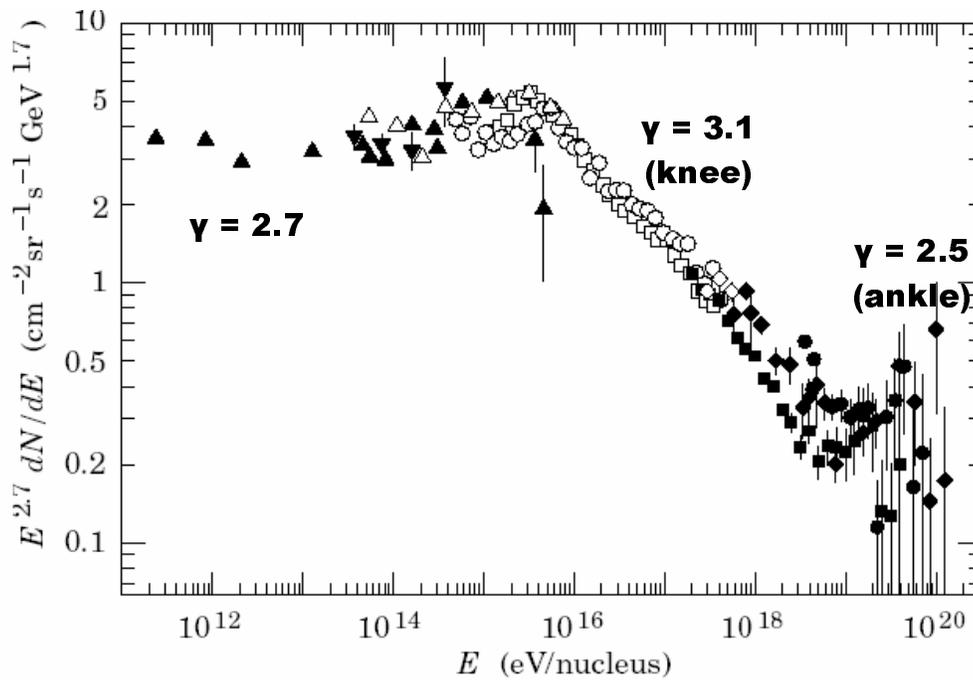


Figura 1.7 Spettro dei raggi cosmici, nella regione di energia $E > 10^{11}$ eV. La figura si ottiene dallo spettro di Figura 1. 5, moltiplicando il flusso differenziale di particelle per il valore $E^{2.7}$ [LON92].

Nelle Figure 1.5 e 1.7, sono evidenziati i punti (“knee” e “ankle”) in corrispondenza dei quali si osserva il cambiamento dell’esponente della legge di potenza.

Negli anni '40 Fermi ipotizzò un meccanismo di accelerazione capace di descrivere le caratteristiche dello spettro osservato (meccanismo di accelerazione di Fermi) [FER49]. Nel modello si assume che i raggi cosmici vengano accelerati in corpi celesti in cui sono presenti potenti emissioni di materia (*jet*).

Comunemente, la variazione dell'indice spettrale, ossia la variazione del flusso di particelle, è interpretata con riferimento all'origine della radiazione cosmica e alla tipologia delle sorgenti [HIL84]. Schematicamente, si può affermare che i raggi cosmici di energia $E < 10^{16}$ eV sono di origine galattica. Il “ginocchio”, ovvero la riduzione del flusso differenziale di particelle misurate sulla Terra, corrisponde alla “fuga” di raggi cosmici dalla nostra Galassia: l'azione di contenimento del campo magnetico galattico non è più sufficiente per trattenere particelle di energia così elevata².

In corrispondenza della “caviglia” (“ankle”) si osserva un aumento del flusso differenziale di raggi cosmici, ovvero una diminuzione dell'indice spettrale γ . L'ipotesi più accreditata per giustificare questi risultati è che per energie $E > 10^{19}$ eV diventa visibile una componente di raggi cosmici primari di provenienza extra-galattica: nella nostra Galassia, infatti, non è stata individuata alcuna sorgente astrofisica in grado di accelerare particelle fino ad energie così elevate.

² Il giroradio (o raggio di Larmor) R di una particella di energia relativistica E delimita la regione di confinamento della particella sotto l'azione di un campo magnetico B :

$$R_{LARMOR} = \frac{E}{Z \cdot e \cdot B \cdot \beta \cdot c} \quad (1.2)$$

con Z = numero atomico, e = carica dell'elettrone, c = velocità della luce.

Assumendo unità tali che $e=c=1$, si può esprimere per protoni ($Z=1$):

$$\frac{R_{LARMOR}}{[50 pc]} = \frac{\frac{E}{[10^5 TeV]}}{[3 \cdot 10^{-6} G]} \quad (1.3)$$

Nel caso di un protone con energia $E = 10^{18}$ eV, immerso nel campo magnetico galattico $B \approx 3 \mu\text{Gauss}$, si trova $R \approx 500$ pc. Questo valore è superiore alle dimensioni lineari della Galassia [WOL90]. Come si vede dalla Formula 1.2, la dipendenza del raggio di Larmor da Z (numero atomico) implica che il confinamento galattico è maggiore per nuclei pesanti. Per un nucleo di ferro avente la stessa energia ($E = 10^{18}$ eV), ad esempio, il raggio di Larmor è $R_{Fe} = \frac{1}{Z} \cdot R_H \approx 1$ pc. Queste considerazioni, pertanto, forniscono una spiegazione alla variazione nella composizione del flusso dei raggi cosmici in questa regione dello spettro [BER90].

Vediamo ora più in dettaglio le diverse sorgenti astrofisiche di raggi cosmici, distinguendo sorgenti galattiche e sorgenti extra-galattiche e mettendo in evidenza, in particolare, i meccanismi di produzione di neutrini e i flussi di neutrini aspettati alle diverse energie.

SORGENTI GALATTICHE

- **Il Sole e il Piano Galattico**

Il Sole è una sorgente nota di neutrini di bassa energia [BAH89].

Neutrini di alta energia possono essere prodotti nelle interazioni dei raggi cosmici di energia estrema con la materia contenuta nel piano galattico o all'interno del Sole [PRO98]. Secondo questa teoria i raggi cosmici di alta energia interagirebbero con i densi gas principalmente contenuti nei bracci di spirale della nostra Galassia. Noto il flusso di raggi cosmici, si possono stimare i flussi di neutrini e dei raggi gamma provenienti dal piano galattico [GAI95]:

$$\Phi(\gamma, \nu) \propto \Phi(CR) \cdot \frac{\sigma_{inelastica}}{m_N} \quad (1.4)$$

con	$\Phi(CR)$	flusso dei raggi cosmici
		$\Phi(CR) \approx 1.8 \cdot E^{-2.7} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Gev}^{-1}$
	$\sigma_{inelastica}$	sezione d'urto totale inelastica (p-p)
	m_N	massa del nucleone

Il flusso di neutrini è circa 10^{-5} volte inferiore al flusso dei raggi cosmici primari nella regione di energia $E=10^{18}$ eV. Questo risultato costituisce un grande limite per la rivelazione di neutrini provenienti dal piano galattico.

- **Supernova Remnants**

I resti di Supernovae galattiche (SNR: Supernovae Remnants) sono oggi tra le principali sorgenti galattiche candidate per la produzione di particelle di energia $E \approx 10^{15}$ eV [DOR00]. L'accelerazione di raggi cosmici in queste sedi astrofisiche è prevista dal meccanismo di Fermi del primo ordine [AXF77] [KRY77] [BEL78] [BLA78]. Le onde di shock sono generate dalle espansioni e collassi di materia che seguono l'esplosione di una Supernova³. Le particelle cariche vengono accelerate nelle collisioni con le onde di shock, in moto a velocità $\sim 10^{-1}c$. La massima energia raggiunta dalle particelle dipende dal numero di diffusioni attraverso il fronte dell'onda di shock e, quindi, dalla durata dello shock.

L'energia massima raggiungibile da protoni accelerati all'interno di SNR galattiche (ad esempio SN1006), può essere stimata mediante la formula [GAI95]:

$$E_{\max} = k \cdot \frac{U}{c} \cdot Ze \cdot B(c \cdot \Delta t) \sim 10^{15} \text{ eV} \quad (1.5)$$

³ La velocità del suono c_s è la velocità di propagazione di un'onda meccanica in un mezzo. Nel caso di una perturbazione che viaggia nel mezzo ad una velocità maggiore di quella del suono si osserva una discontinuità tra la regione che precede e quella che segue la perturbazione. La regione di discontinuità è detta fronte dell'onda di shock. Nel caso di Supernovae Remnants, la velocità di propagazione della perturbazione $U \approx 10^{-1} c \gg c_s \approx 10 \text{ Km s}^{-1}$.

con U velocità di avanzamento dello shock, $U/c \sim 0.1$
Δt durata del processo, $\Delta t \sim 10^3$ anni
B campo magnetico medio, $B \sim 3 \mu\text{Gauss}$
k fattore di efficienza del meccanismo di accelerazione, $k \sim 0.1$.

Nel caso di SNR giovani (ad esempio SN1987A), nella cui regione di shock sono presenti campi magnetici dell'ordine dei mGauss e per cui $\Delta t \sim 10$ anni, potrebbero essere prodotti raggi cosmici di energia massima ben superiore, fino ad $E_{max} \sim 10^{17}$ eV.

Le particelle cariche accelerate possono originare raggi gamma e neutrini attraverso interazioni p-p o p- γ con il mezzo interstellare (processo di *astrophysical beam dump*) [BER89]. I calcoli mostrano che le SNR galattiche sono sorgenti candidate per neutrini fino a energie $E_\nu \sim 10^{13}$ eV. A tali energie, il flusso di neutrini atteso è di pochi eventi per km^2 per anno [GAI95]. Nel caso di giovani SNR, in presenza di intensi campi magnetici, è atteso un numero maggiore di eventi: circa 500 per anno per km^2 per $E_\nu > 100$ GeV [PRO96].

Una interessante previsione proposta di recente da Berezhko afferma che, entro i prossimi 5÷10 anni, la nota SN1987A potrebbe emettere un flusso di fotoni, prodotto da interazioni adroniche ($E_\gamma \sim \text{TeV}$), maggiore di $2 \cdot 10^5$ per km^2 per anno [BER00]; ci si aspetta un flusso di neutrini altrettanto intenso [PER03]

- **Binarie X**

Le binarie X sono costituite da due stelle: un buco nero massiccio (o una stella di neutroni) ed una stella vicina la cui materia, cadendo nel buco nero, forma una densa regione di accrescimento. Il forte campo magnetico, dovuto alla presenza del buco nero (o della stella di neutroni) e al denso plasma, che costituisce la regione di accrescimento, crea le condizioni per la formazione di onde di shock. Raggi gamma e neutrini vengono prodotti in interazioni p-p o p- γ di protoni accelerati con la materia presente nella regione di accrescimento [BER85].

- **Microquasar**

Nel 2001 Levinson e Waxman [LEV01] hanno suggerito che particolari sistemi binari X, noti come microquasar, potrebbero emettere neutrini di energia superiore ad 1 TeV. Le microquasar sono sistemi binari X galattici in cui è stata osservata la presenza di jets relativistici che emettono radiazione nella banda radio. Supponendo l'esistenza di una componente adronica all'interno dei jets, si può assumere che i protoni presenti vengano accelerati con meccanismo di Fermi ($E_p^{max} \sim 10^{16}$ eV) e producano neutrini di energia compresa nell'intervallo $10^{12} < E_\nu < 10^{14}$ eV. Recenti stime teoriche [DIS02] mostrano che il flusso di neutrini con energia $E > 1$ TeV, misurabile sulla Terra, emesso da alcune microquasar (SS443, GX339-4, GRS1915+105), è dell'ordine di 10^{-11} erg \cdot cm $^{-2}$ \cdot s $^{-1}$, più elevato del flusso atteso dalle altre sorgenti astrofisiche e ben identificabile, eventualmente, con i futuri telescopi sottomarini.

La rivelazione di neutrini da microquasar permetterebbe di approfondire gli studi sulla composizione chimica e sul contenuto energetico dei jets, con particolare riferimento alla presenza della componente adronica. Una migliore conoscenza dei processi fisici che avvengono nei jet delle microquasar, inoltre, consentirebbe una migliore comprensione dei jet nelle quasar ed, in generale, negli AGN.

SORGENTI EXTRA-GALATTICHE

Le sorgenti astrofisiche più interessanti per la ricerca di neutrini di alta energia sono corpi celesti estremamente luminosi come gli AGN (Active Galactic Nuclei) ed i GRB (Gamma Ray Burst). Stime teoriche prevedono, in questi casi, un flusso di neutrini direzionale di altissima energia ($E_\nu > 10^{17}$ eV). I meccanismi di accelerazione all'interno di questi oggetti astrofisici sono tuttavia poco noti e i diversi modelli proposti non sono concordi nel valutare il flusso di neutrini aspettato⁴.

- **AGN**

Gli AGN (Active Galactic Nuclei) sono le sorgenti continue più luminose nell'Universo: le loro luminosità medie sono circa 10^{40} J·s⁻¹. Gli AGN sono considerati tra le più probabili sorgenti di neutrini di energia elevatissima ($E_\nu > 100$ TeV) [GAI95][HAL97].

Diversi modelli teorici descrivono l'AGN come costituito da un buco nero supermassivo ("core" di massa $M \sim 10^6$ masse solari e raggio $R \sim 10^{16}$ cm), alimentato da agglomerati di gas liberi o da materia proveniente dalle stelle vicine (disco di accrescimento), e da un toro di materia circostante. In direzione perpendicolare al toro vengono emessi due jets di materia e radiazione; le dimensioni dei jets variano da 10^6 km a decine di kpc (Figura 1.9).

⁴ Sulla base delle osservazioni di raggi cosmici di alta energia provenienti da AGN Waxman e Bahcall [WAX99] hanno posto un limite superiore sul flusso atteso di neutrini con energia $E_\nu > 100$ TeV. Il valore calcolato è $\Phi < 10^{-7.5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{GeV}^{-1}$. Mannheim, Protheroe e Rachen [MAN98] hanno calcolato un limite superiore più elevato di circa 2 ordini di grandezza per $E_\nu < 10^{16}$ eV; il risultato ottenuto è confrontabile con quello di Waxman e Bahcall solo ad energie estreme.

Il sistema mantiene il suo l'equilibrio dinamico compensando la pressione della materia in caduta sul buco nero con l'emissione di radiazione elettromagnetica.

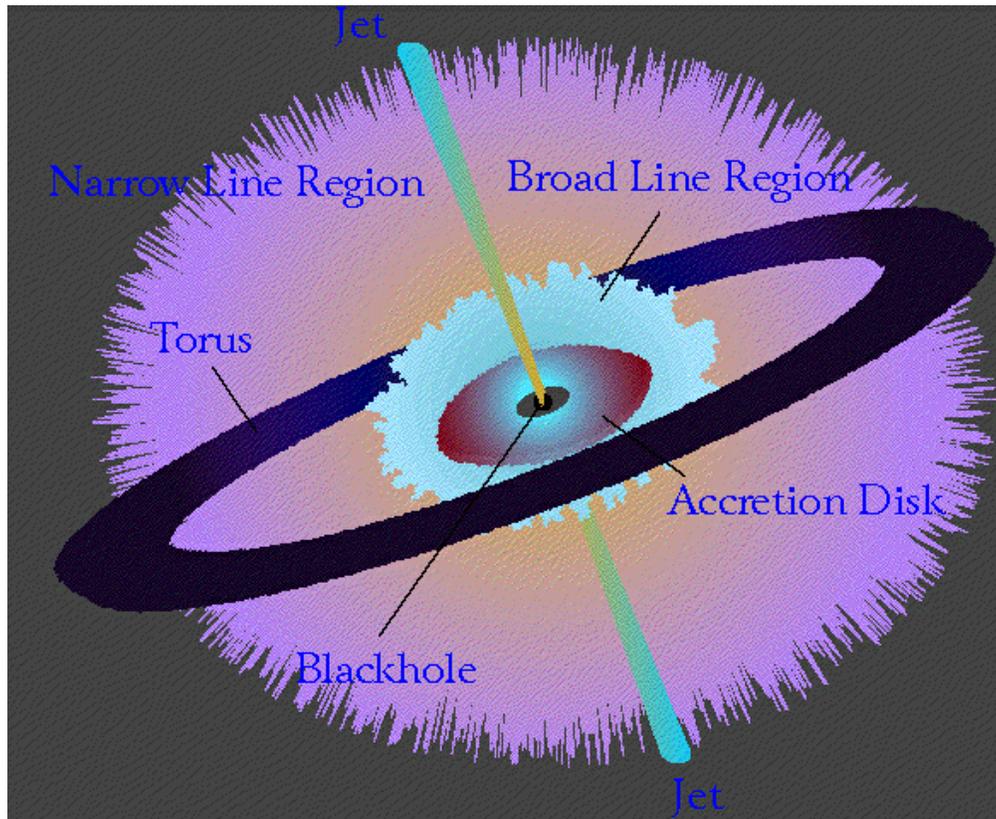


Figura 1.9 Rappresentazione schematica di un Nucleo Galattico Attivo (AGN) [web6].

Diversi modelli teorici sono stati proposti per spiegare il meccanismo di produzione e accelerazione di radiazione cosmica all'interno di AGN e lo spettro di emissione.

Modelli come il Synchrotron Self-Compton model (SSC) [MAR92] descrivono lo spettro di emissione di gamma di alta energia dagli AGN come prodotto dalle interazioni (Compton inverso) tra elettroni energetici accelerati dagli AGN e fotoni di bassa energia prodotti per irraggiamento dagli stessi elettroni accelerati.

I modelli “adronici”, al contrario, prevedono che le onde di shock nell’AGN possano accelerare nucleoni anche ad altissima energia; la produzione di gamma e neutrini avviene come conseguenza del processo di *astrophysical beam dump* con la radiazione ambiente. In particolare, il modello proposto da Biermann [BIE97] prevede la produzione di protoni con energia $E_p \sim 10^{15} \div 10^{18}$ eV.

Le previsioni teoriche calcolano, in prossimità del buco nero, una densità di energia talmente elevata da impedire la fuoriuscita di fotoni e nucleoni di alta energia. Una conoscenza più approfondita della struttura del “core” e dei fenomeni che avvengono all’interno di un AGN appare possibile, pertanto, solo attraverso la neutrino-astronomia.

- **GRB**

I GRB (Gamma Ray Burst) sono i fenomeni più violenti e spettacolari dell’universo conosciuti fino ad oggi; tipiche luminosità sono dell’ordine di 10^{50} e 10^{54} erg · s⁻¹ in un intervallo temporale di pochi secondi (0.1–100 s) [HAL04]. Per questo motivo alcuni autori considerano i GRB come le sorgenti più probabili di raggi cosmici di energia estrema.

L’origine dei GRB è ancora misteriosa: si suppone che possa trattarsi dell’ultimo stadio della fusione di un sistema binario di due buchi neri compatti (di raggio $\sim 10^2$ km) o di un buco nero compatto ed una stella di neutroni, con la conseguente formazione di un oggetto di grandissima massa ed energia: la *fireball*. Date le luminosità osservate, la sorgente energetica del GRB potrebbe essere la deposizione sul buco nero di una quantità di materia pari a circa una massa solare al secondo. L’evoluzione del sistema (*fireball model*) sembra, invece, ben compresa e confermata dalle osservazioni [RAC98] [PIR98] [VIE98] [WAX97].

Durante la fase di espansione della *fireball*, protoni di altissima energia possono essere accelerati con un meccanismo di Fermi del primo ordine, nelle collisioni tra fronti dell'onda d'urto (*internal shocks*). Nella fase successiva il gas si propaga fino a distanze dell'ordine di 10^{11} km nel mezzo interstellare e raffreddandosi produce lo spettro di fotoni di più bassa energia (*afterglow*). In questa fase, il riscaldamento improvviso del mezzo interstellare genera onde di shock termico (*external shocks*) che si propagano sia verso l'esterno (*forward shock*) che in direzione della regione centrale del GRB (*reverse shock*) (Figura 1.10). Questo modello di evoluzione temporale del GRB ha avuto una importante conferma dall'analisi della curva di luce del GRB990123 [KUL99].

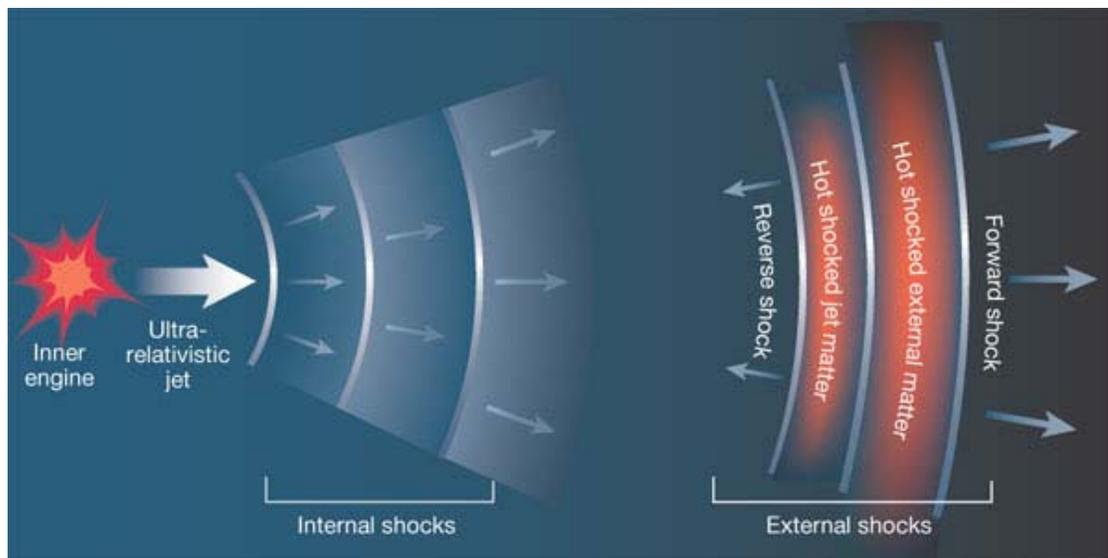


Figura 1.10 *Fireball Model* di evoluzione di un Gamma Ray Burst. . I neutrini possono essere emessi sia nella fase degli *internal shocks* che nella fase degli *external shocks* [web7].

Neutrini con energia circa 10^{14} eV sono prodotti dalle interazioni $p-\gamma$ (ed in minor numero $p-p$) che avvengono, nella fase di espansione della *fireball* (*internal shocks*), durante le collisioni tra i fronti d'onda che si espandono con differenti velocità. Neutrini con energia ancora maggiore ($E_\nu \sim 10^{18}$ eV) sono prodotti durante gli shock esterni nelle interazioni tra i protoni di altissima energia ed i fotoni di *afterglow* [WAX00].

La rivelazione di neutrini da GRB prevede la possibilità di effettuare misure in coincidenza (entro una finestra temporale di pochi secondi) dei flussi di neutrini e di fotoni emessi durante il *burst*. Simili osservazioni renderebbero più semplice il riconoscimento del segnale rispetto alle sorgenti di rumore.

RAGGI COSMICI PRODOTTI DA PARTICELLE ESOTICHE E MATERIA OSCURA

La rivelazione di eventi con $E > 10^{20}$ eV ha introdotto un nuovo problema riguardo le sorgenti di particelle ultra-energetiche. Sorgenti astrofisiche così potenti, infatti, non possono trovarsi all'interno della nostra galassia; d'altra parte, l'effetto GZK, come sarà spiegato più avanti, limita fortemente la regione di provenienza di particelle ultra-energetiche a distanze minori di 50 Mpc. Questo scenario ha sollevato l'ipotesi che l'origine dei raggi cosmici di energia estrema potrebbe esser dovuta al decadimento (o all'annichilazione) di particelle con massa estremamente grande (particelle "X") originate in epoche prossime all'era dell'inflazione dell'Universo. I modelli prevedono la generazione di particelle "X" in corrispondenza di difetti topologici (stringhe, monopoli magnetici). Per effetti di attrazione gravitazionale la densità di ipotetiche particelle super-massive potrebbe essere maggiore in corrispondenza di galassie, o cluster di galassie, a distanze molto minori di 50 Mpc dalla Terra: il flusso di raggi cosmici provenienti dal loro decadimento, pertanto, non mostrerebbe il cut-off GZK [GAI95].

I flussi di neutrini attesi dal decadimento di particelle "X" sono fortemente dipendenti dal modello di evoluzione cosmologica e di decadimento. La previsione per neutrini con energia $E_\nu > 10^{18}$ eV è $\Phi(E_\nu) < 10^{-11}$ erg · cm⁻² · s⁻¹ · sr⁻¹ [BAT98].

Neutrino – Astronomia

Per spiegare l'attenzione particolare riservata ai neutrini e alle tecniche di rivelazione di neutrini e per comprendere i vantaggi offerti dalla neutrino-astronomia è utile introdurre i concetti di puntamento direzionale e orizzonte di osservabilità. Fare “astronomia” con raggi cosmici significa ricostruire, dalla misura della radiazione, le caratteristiche dei corpi celesti, in particolare la posizione, in modo da produrre, come risultato, una mappa del cielo. Il puntamento direzionale è la proprietà per cui la misura della direzione della radiazione cosmica incidente permette di individuare direttamente la posizione della sorgente, nel caso in cui la propagazione attraverso il mezzo interstellare non introduce significative deflessioni. L'orizzonte di osservabilità definisce la distanza massima da cui è possibile ricevere informazioni, utilizzando una particolare tecnica di rivelazione; l'orizzonte di osservabilità è limitato da fenomeni di assorbimento della radiazione cosmica durante la propagazione.

Le tradizionali osservazioni ottiche e gli esperimenti che si rivolgono alla rivelazione di fotoni nella componente primaria dei raggi cosmici soddisfano bene le condizioni di puntamento direzionale, in quanto i fotoni, essendo privi di carica elettrica, non subiscono deviazioni ad opera di campi magnetici. L'orizzonte di osservabilità dei fotoni, tuttavia, è piuttosto limitato, in quanto essi sono soggetti a numerosi processi di interazione. I flussi dei raggi gamma di alta energia, infatti, vengono fortemente attenuati in processi di produzione di coppia nelle interazioni con la radiazione di fondo dell'Universo (effetto GZK); di conseguenza, il libero cammino medio dei fotoni di alta energia ($E_\gamma > 10^{13}$ eV) è inferiore a 10 Mpc.

La componente carica dei raggi cosmici (essenzialmente protoni) subisce deflessione per azione dei campi magnetici galattici e questo limita notevolmente la proprietà di puntamento nella direzione della sorgente. Per alte energie ($E > 10^{19}$ eV), tali che siano trascurabili le deflessioni prodotte dai campi magnetici, bisogna considerare, tuttavia, l'effetto GZK, ovvero l'interazione dei protoni con il fondo diffuso di microonde, che limita il libero cammino medio di protoni a un valore di circa 50 Mpc.

- **Effetto GZK**

A seguito della scoperta della radiazione cosmica di fondo⁵ (1965), nel 1966 Kenneth Greisen, Vadim Kuzmin and Georgi Zatsepin, analizzandone gli effetti sulla propagazione dei raggi cosmici ipotizzarono l'esistenza di un limite a tale propagazione [GRE66] [ZAT66]. Tale previsione è nota oggi con il nome di “effetto GZK”, dalle iniziali dei tre scopritori; il fenomeno è anche indicato col nome “GZK cut-off”, con riferimento al fatto che l'interazione dei protoni cosmici primari (e dei fotoni) con la radiazione cosmica di fondo deve produrre un “taglio” nello spettro dei raggi cosmici, cioè una netta variazione della pendenza della curva dello spettro. Questo fenomeno si dovrebbe osservare per energie dei protoni dell'ordine di $E_{GZK} \approx 10^{20}$ eV⁶, ovvero in corrispondenza della parte terminale dello spettro di Figura 1.6.

⁵ La radiazione cosmica di fondo (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR) è la radiazione omogenea e isotropa che riempie l'intero universo; la lunghezza d'onda di radiazione è nell'infrarosso e lo spettro corrisponde all'emissione di un corpo nero di temperatura di 2.726 K°. Essa è interpretata come residuo termico del Big Bang, e costituisce una prova sperimentale del modello cosmologico basato su una grande esplosione originaria.

⁶ Il risultato si ottiene imponendo la conservazione della massa invariante nel processo di interazione tra i protoni e la radiazione di fondo $p + \gamma \rightarrow \Delta^+$, con produzione della risonanza barionica Δ^+ ($m_{\Delta^+}=1232$ MeV). L'energia dei fotoni CMBR è circa $2.3 \cdot 10^{-4}$ eV, corrispondente alla temperatura $T=2.7^\circ\text{K}$.

Nel corso degli anni Novanta l'effetto GZK è tornato prepotentemente di attualità e ha sollevato nuovi problemi interpretativi a causa di alcuni risultati ottenuti dall'esperimento AGASA. L'osservazione di una decina di eventi con $E > E_{\text{GZK}} \approx 10^{20}$ eV (Figura 1.11) mostra evidenza di violazione della previsione di Greisen, Kuzmin e Zatsepin [CHI01].

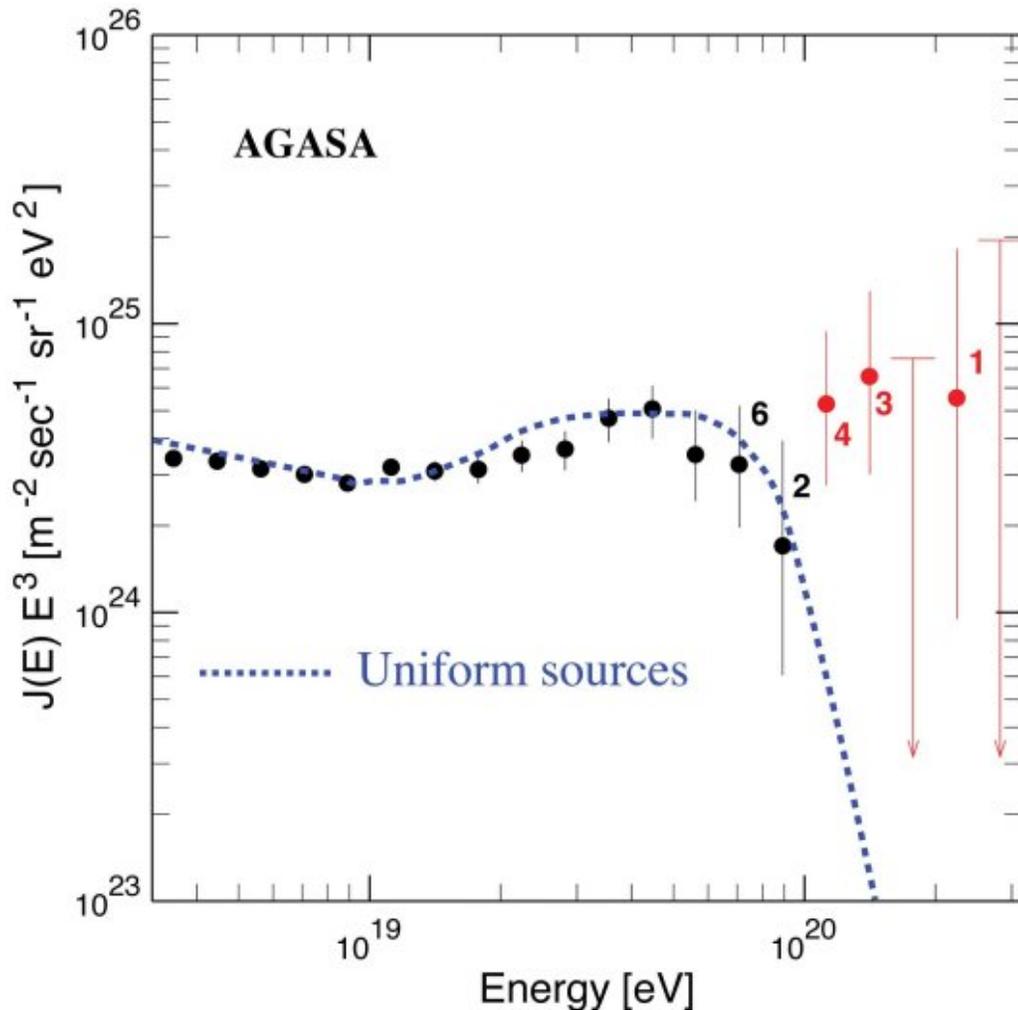


Figura 1.11 Dati di AGASA con energia $E > 10^{20}$ eV (lo spettro differenziale è moltiplicato per il fattore E^3). I risultati sperimentali sono messi a confronto con le previsioni teoriche (GZK cut-off) [web8].

Al momento, AGASA è l'unico esperimento ad aver registrato eventi che sembrano offrire ipotesi di violazione all'effetto GZK.

Il dibattito è aperto: mentre alcuni ritengono che la presenza di dati non conformi alla teoria sia da attribuire a errori sperimentali, altri affermano che, entro l'errore statistico di ricostruzione, i risultati sono perfettamente compatibili con la teoria e con i valori ottenuti da altre fonti. Tuttavia, molti sono coloro che pensano che gli eventi registrati da AGASA corrispondono a una realtà fisica ancora non indagata. Le interpretazioni a questo proposito sono numerose: si parla di esistenza di sorgenti non ancora osservate, della possibilità di una rottura dell'isotropia nella distribuzione della radiazione cosmica, di violazioni più radicali che coinvolgono l'esattezza del Modello Standard e delle sue previsioni per quanto riguarda le interazioni fondamentali [CRIS04]. C'è notevole attesa per la soluzione di questo "enigma" nella fisica dei raggi cosmici. Al momento, il problema fondamentale che impedisce lo scioglimento della questione è la scarsità di dati sperimentali per la regione di spettro interessata dall'indagine. E' quindi molto importante, anche all'interno di questo dibattito, la realizzazione di un esperimento che, con tecniche diverse rispetto a quelle messe a punto da AGASA, consenta di rivelare raggi cosmici di energia $E \approx 10^{20}$ eV, così da confermare oppure rigettare i risultati finora raccolti. Grandi speranze si ripongono nell'esperimento Auger, in fase di completamento [web5]. L'utilizzo di una tecnica di rivelazione acustica in un telescopio per neutrini sottomarino del tipo "Km³" potrebbe estendere la soglia di rivelazione fino ad energie $E_\nu > 10^{18}$ eV ed, eventualmente consentire l'osservazione di eventi di neutrino originati da interazione di protoni con violazione dell'effetto GZK.

La Figura 1.12 riassume i limiti di un'astronomia con fotoni e protoni e propone i vantaggi di una astronomia con neutrini. I neutrini, a causa delle loro particolari proprietà, non subiscono deflessioni durante la propagazione attraverso il mezzo interstellare (proprietà di puntamento direzionale); il piccolo valore della sezione d'urto permette, inoltre, di estendere l'orizzonte di osservabilità fino a regioni dello spazio altrimenti "opache".

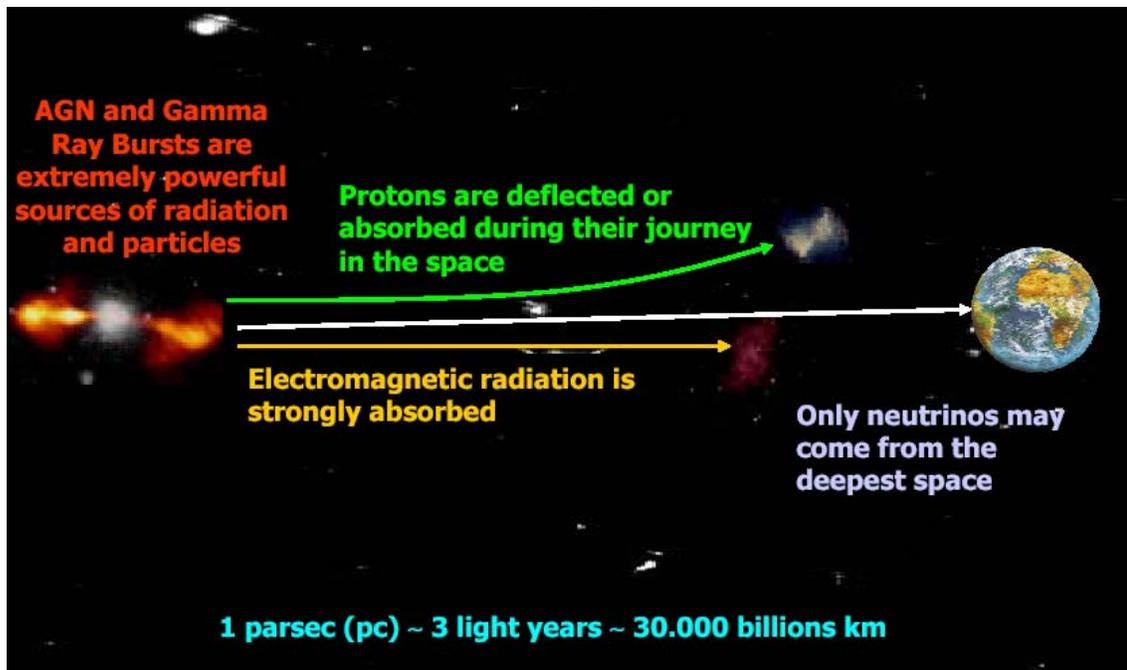


Figura 1.12 Motivazioni per una astronomia con neutrini [nemo].

Le proprietà di interazione dei neutrini e le sezioni d'urto per i diversi processi di interazione sono state largamente studiate sia attraverso calcoli teorici, sia per mezzo di verifiche sperimentali con esperimenti agli acceleratori [GAN96] [KWI98].

I neutrini e gli antineutrini interagiscono con i quark e con gli elettroni atomici. Le interazioni neutrino-nucleone avvengono tramite processi deboli di corrente carica (CC) (Formula 1.6) o neutra (NC) (Formula 1.7) [GAN96]:

$$\bar{\nu}_l^{(-)} + N \rightarrow l^{\pm} + X \quad (\text{CC}) \quad (1.6)$$

$$\bar{\nu}_l^{(-)} + N \rightarrow \bar{\nu}_l^{(-)} + X \quad (\text{NC}) \quad (1.7)$$

dove l indica il sapore del leptone

N è il nucleone bersaglio

X è l'adrone o lo sciame adronico prodotto dall'interazione.

La sezione d'urto d'interazione neutrino-nucleone è parametrizzata in funzione degli invarianti di Bjorken:

$$x = Q^2 / 2M\varepsilon \quad (1.8)$$

$$y = \varepsilon / E_\nu \quad (1.9)$$

dove $\varepsilon = E_\nu - E_l$ è l'energia trasferita nel sistema del laboratorio:

E_ν è l'energia del neutrino incidente,

E_l è l'energia del leptone prodotto nell'interazione.

Q^2 è il momento invariante trasferito dal neutrino al leptone

M è la massa del nucleone – bersaglio.

x e y sono parametri adimensionali ($0 \leq x, y \leq 1$). x rappresenta la frazione del momento del nucleone trasportata dal quark interessato all'interazione con il neutrino; y rappresenta l'ineleasticità dell'interazione.

Usualmente, la formula che ben descrive l'interazione di neutrini su quark ed anti-quark è data da:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{2 \cdot G_F^2 \cdot M \cdot E_\nu}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{M_{W,Z}^2}{Q^2 + M_{W,Z}^2} \right)^2 \cdot [x \cdot q(x, Q^2) + x \cdot \bar{q}(x, Q^2) \cdot (1-y)^2] \quad (1.8)$$

dove $M_{W(Z)}$ è la massa del bosone di scambio (W^\pm nel caso CC e Z^0 nel caso NC), G_F la costante di Fermi ($G_F = 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$) e q sono le funzioni di distribuzione dei quark e degli antiquark nel nucleone (nei due casi CC e NC) [GAN96].

La Figura 1.13 mostra l'andamento della sezione d'urto di neutrini, in funzione dell'energia, nell'intervallo ($10^{10} - 10^{21}$) eV, per l'interazione neutrino - nucleone (N). Si distinguono i processi di corrente neutra (NC) da quelli che avvengono per effetto di correnti cariche (CC). In entrambi i casi, i processi avvengono per interazione debole.

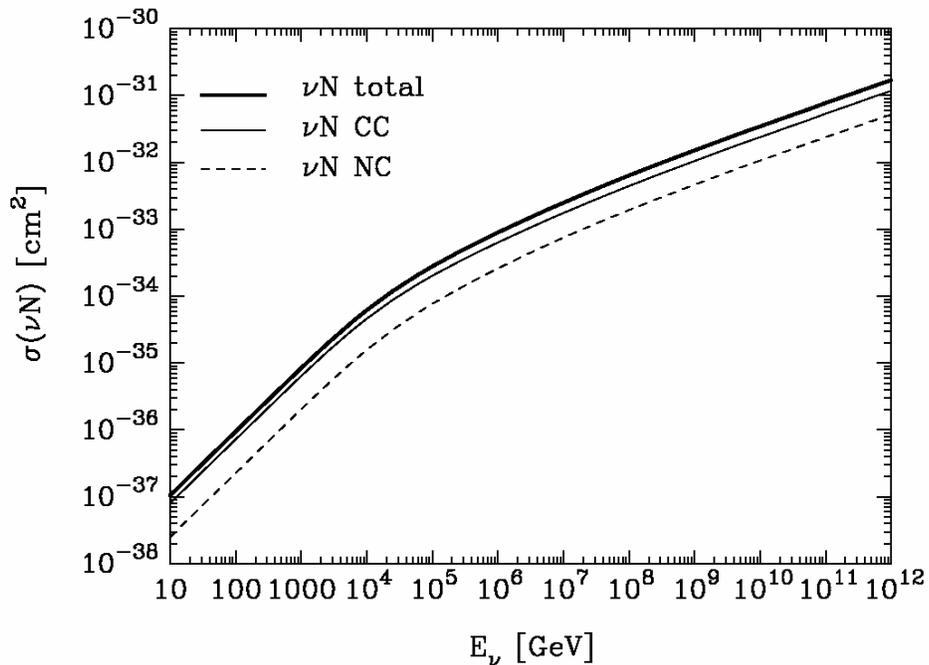


Figura 1.13 Sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone in funzione dell'energia del neutrino [GAN96].

Poiché la sezione d'urto dipende dalla massa del bersaglio, le interazioni tra i neutrini ed i quark del mezzo attraversato sono estremamente più probabili rispetto a quelle tra neutrini ed elettroni; l'interazione del neutrino con l'elettrone, pertanto, rappresenta un processo più raro. L'eccezione a quanto detto è rappresentata dalla formazione risonante del bosone intermedio W^- nei processi di interazione anti-neutrino elettronico su elettrone, con energia di soglia $E^{\text{th}} = 6.3 \text{ PeV}$. La sezione d'urto di risonanza è maggiore della sezione d'urto di interazione neutrino-nucleone per neutrini dell'energia considerata (Figura 1.14).

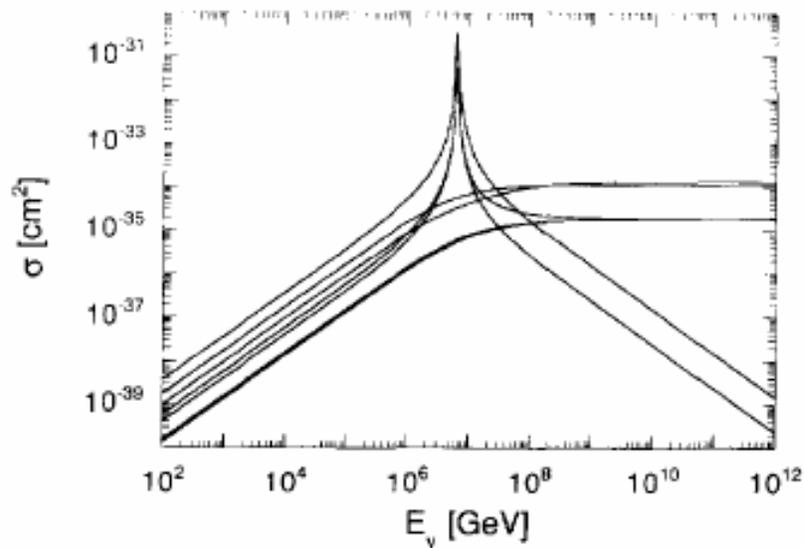


Figura 1.14 Sezione d'urto di interazione neutrino-elettrone in funzione dell'energia del neutrino. Le diverse curve distinguono le diverse interazioni con elettrone, considerando separatamente neutrini e antineutrini, ν_μ e ν_e . Solo le interazioni di anti-neutrino elettronico danno origine alla risonanza [GAN96].

Occorre tenere conto del fenomeno della risonanza nello studio dei rivelatori di neutrini sottomarini [GAN96].

Rivelazione di Neutrini

TELESCOPI CHERENKOV SOTTOMARINI

L'utilizzo della tecnica Cherenkov, su cui si basano i grandi telescopi sottomarini per neutrini, venne proposta per la prima volta negli anni sessanta da Markov [MAR61][MAR86].

Il processo che origina la radiazione Cherenkov è la polarizzazione degli atomi del mezzo lungo la direzione di moto di una particella carica, avente velocità superiore a quella della luce nel mezzo. L'angolo φ di emissione dei fotoni Cherenkov (Figura 1.15) è dato dalla relazione [LON92]:

$$\cos \varphi = \frac{1}{n \cdot \beta} \quad (1.6)$$

dove β è il rapporto tra la velocità della particella e la velocità della luce nel vuoto (c),

$$\beta = v/c$$

n è l'indice di rifrazione del mezzo, $n = c/c_{mezzo}$

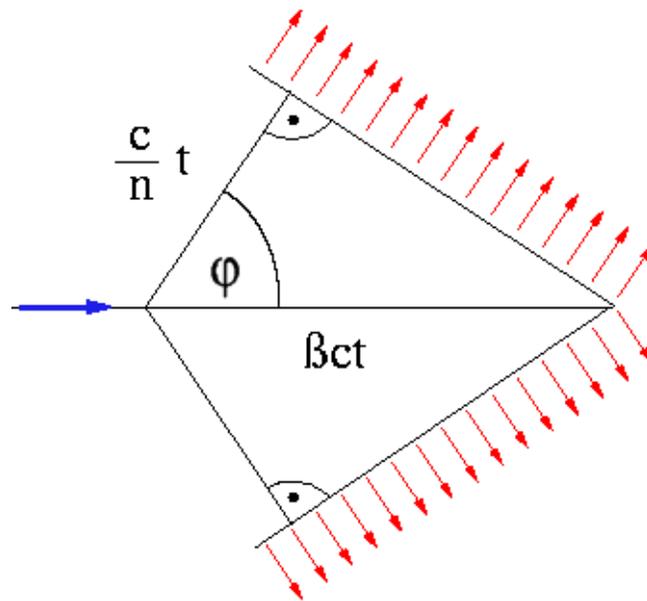


Figura 1.15 Emissione Cherenkov. La freccia rossa indica la direzione della particella carica (muone); le frecce blu rappresentano i fotoni Cherenkov [web9].

L'obiettivo primario di un telescopio sottomarino per neutrini è la rivelazione e la ricostruzione di tracce di muoni. Ricostruendo la direzione dei muoni è, infatti, possibile identificare la sorgente astrofisica del neutrino. Sperimentalmente si trova che l'angolo θ di emissione del muone rispetto alla direzione del neutrino incidente diminuisce all'aumentare dell'energia del neutrino, secondo la relazione [LEA00]:

$$\langle \theta \rangle \approx \frac{1.5^\circ}{\sqrt{E_\nu [\text{TeV}]}} \quad (1.7)$$

Ad energie superiori al TeV ricostruire la direzione del muone equivale, dunque, a ricostruire la direzione del neutrino e di conseguenza ad identificarne la sorgente astrofisica (proprietà di puntamento direzionale).

Negli esperimenti sottomarini si considera la luce Cherenkov emessa come conseguenza del passaggio del muone prodotto dall'interazione del neutrino. La luce Cherenkov viene raccolta da dispositivi fotomoltiplicatori (Photo Multiplier Tube, PMT); i segnali (carica e tempo di occorrenza), opportunamente elaborati, vengono poi utilizzati, assieme alla conoscenza della posizione dei PMT, in algoritmi di ricostruzione per calcolare la direzione della traccia del muone.

La struttura dei rivelatori Cherenkov sottomarini è una struttura modulare: i fotomoltiplicatori seguono una disposizione geometrica regolare, costituendo un reticolo tridimensionale. In molte architetture le sfere di alloggiamento dei fotomoltiplicatori sono posizionate su stringhe, o strutture semirigide (torri) che, nel caso di telescopi sottomarini, sono ancorate al fondo marino e tenute in posizione verticale da boe (Figura 1.16).

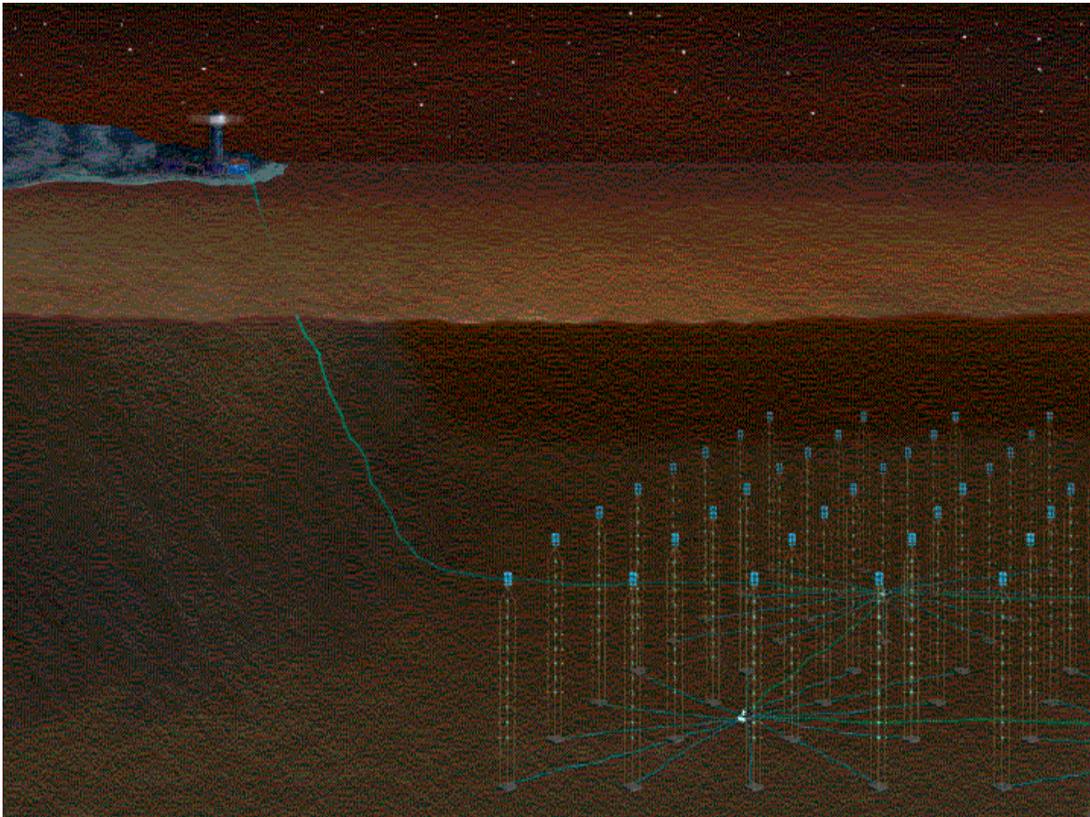


Figura 1.17 **Modello per un apparato di rivelazione Cherenkov sottomarino [nemo].**

La limitazione maggiore per questi apparati è dovuta alla trasmissione della luce in acqua marina: tale mezzo produce un'attenuazione della luce che non permette il propagarsi delle onde elettromagnetiche per lunghe distanze. Di conseguenza, affinché si conservi informazione sull'evento di interazione, la distanza tra i moduli ottici è limitata dal piccolo valore della lunghezza di attenuazione della luce ($R^*_{EM} < 100$ m). Si vede subito il limite economico imposto da queste condizioni all'estensione del rivelatore finale. Aumentare la soglia di energia rivelabile significa aumentare la superficie esposta al flusso; poiché la distanza tra i moduli ottici che costituiscono la struttura è fissata dal valore della lunghezza di assorbimento, un aumento di volume del rivelatore significa un aumento del numero di fotomoltiplicatori. Questo fattore incide notevolmente sui costi di realizzazione, in quanto ciascun modulo ottico impiegato nella struttura ha un prezzo molto elevato, tenendo conto che un fotomoltiplicatore per ricerca sottomarina deve possedere particolari caratteristiche di bassa usura e basso consumo, resistenza all'umidità e a valori elevati di pressione. Una soluzione a questo problema (aumento del volume di rivelazione e riduzione dei costi) può essere ottenuta con la tecnica di rivelazione acustica, tenendo conto delle proprietà di propagazione del suono in acqua (Capitolo 2).

Il primo esperimento che ha dimostrato la fattibilità della rivelazione Cherenkov con apparati sottomarini è stato installato dalla collaborazione russa Baikal nel lago omonimo (Siberia) a profondità compresa tra 900 m e 1100 m [BAL00] [web5].

La collaborazione internazionale AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array) [AND00] [web5] ha installato un rivelatore Cherenkov per neutrini nei ghiacci del Polo Sud. L'attuale rivelatore AMANDA-II è posizionato alla profondità di 1500-2000 m e ricopre un'area di rivelazione di circa 10^4 m^2 .

Il progetto ICECUBE [web5] costituirà l'estensione di AMANDA, coprendo un volume di ghiaccio dell'ordine del Km^3 . Il rivelatore, la cui ultimazione è prevista per il 2008, potrà osservare solo i neutrini provenienti dall'emisfero boreale; pertanto, la comunità internazionale ritiene necessaria la costruzione di un ulteriore telescopio per neutrini nell'emisfero nord, capace di osservare la porzione di cielo inaccessibile ad ICECUBE. Il Mar Mediterraneo è tra i siti candidati per l'installazione del telescopio sottomarino "Km³".

Lo scopo delle collaborazioni europee NEMO, ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) [wANT] e NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) [wNES] è la realizzazione di rivelatori sottomarini nel Mediterraneo. L'apparato di ANTARES sarà installato a circa 40 Km a largo di Tolone (Francia); il rivelatore NESTOR, in Grecia, sarà realizzato a circa 4000 m di profondità a largo dell'isola di Pylos.

La Collaborazione italiana NEMO (NEutrino Mediterranean Observatory) [nemo], finanziata dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, conduce dal 1998 un intenso programma di ricerca e sviluppo finalizzato alla realizzazione di un telescopio Cherenkov sottomarino per neutrini astrofisici con un volume di rivelazione dell'ordine del Km^3 . La collaborazione ha selezionato un sito sottomarino ottimale per l'installazione del rivelatore “ Km^3 ”, localizzato nel Mar Ionio meridionale, a largo delle coste della Sicilia, alla profondità di 3300 m, in prossimità di Capo Passero (Figura 1.18). Il sito prescelto soddisfa i criteri di selezione elencati di seguito:

- Profondità. Lo strato d'acqua sovrastante il rivelatore assorbe la componente meno energetica (e più abbondante) dei muoni atmosferici (fondo atmosferico), generati dai raggi cosmici interagenti con l'atmosfera terrestre. A 3000 m di profondità, ad esempio, il flusso dei muoni atmosferici che raggiunge l'apparato è ridotto, rispetto a quello misurabile a livello del mare, di un fattore 10^6 [GAI95].
- Trasparenza dell'acqua. Le proprietà ottiche del sito prescelto sono tali da ottimizzare la rivelazione di tracce⁷.
- Basso livello di attività biologica. Questa condizione riduce l'incidenza di bioluminescenza e bio-fouling⁸.
- Basso livello di correnti marine. Una situazione di stabilità riduce le sollecitazioni meccaniche sulle strutture sottomarine.

⁷ La lunghezza di attenuazione nel sito di NEMO è $R^*_{EM} \approx 60$ m per radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda $\lambda = 440$ nm. Per confronto, nel sito di ANTARES si ha $R^*_{EM} \approx 45$ m per radiazione della stessa lunghezza d'onda.

⁸ La bioluminescenza è dovuta alla presenza di batteri; è una sorgente di rumore ottico ambientale. Il termine “bio-fouling” identifica l'accumulo di materiale biologico sulle strutture del rivelatore, in particolare sulle sfere di alloggiamento dei PMT; il bio-fouling limita l'efficienza di rivelazione.

- Vicinanza con la costa e con infrastrutture a terra. In questo modo, si riducono i costi di installazione e manutenzione.
- Posizionamento su un fondale marino regolare, per garantire sicurezza di installazione. Il sito prescelto dalla collaborazione NEMO è situato lontano dalla scarpata di Malta, in una regione pelagica piana.

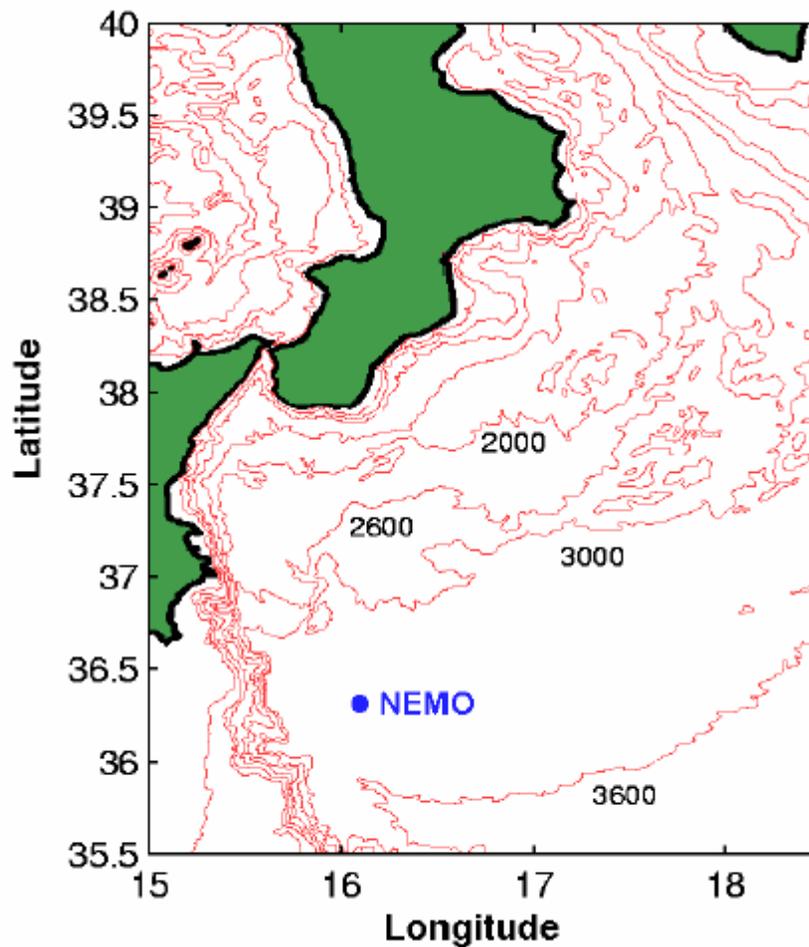


Figura 1.18 Sito selezionato dalla collaborazione NEMO per un rivelatore sottomarino “Km³” [nemo].

La struttura del rivelatore è mostrata in Figura 1.19. Il progetto attuale prevede il posizionamento di 81 “torri” da 18 “piani”; su ogni piano-torre sono collocate 4 sfere per l’alloggiamento di PMT.

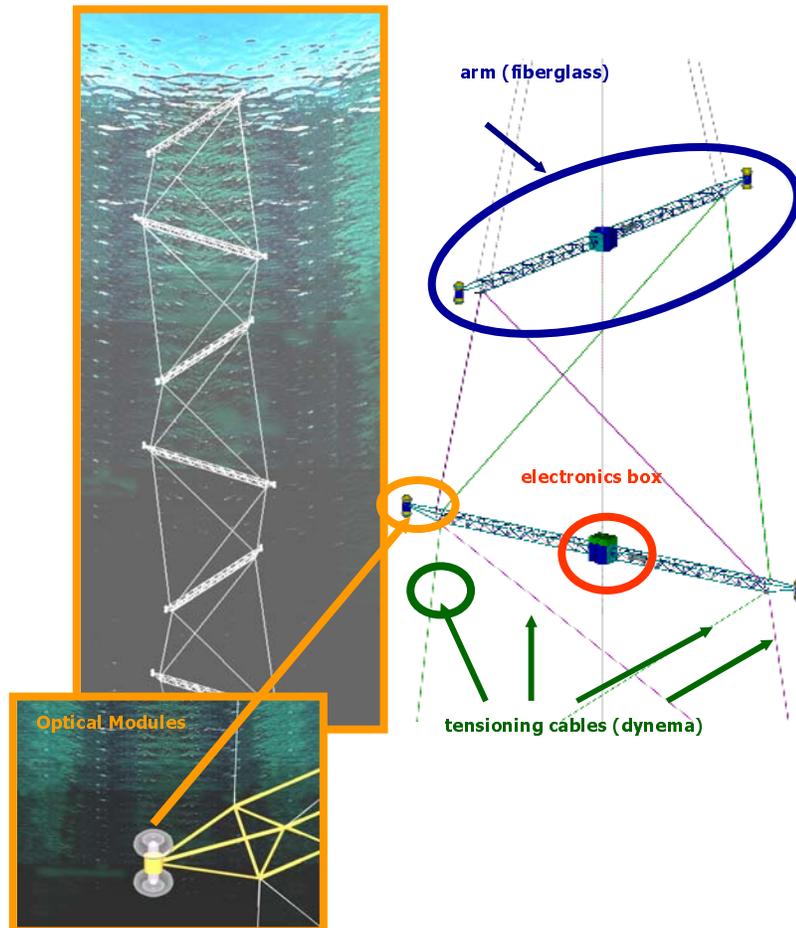


Figura 1.19 Struttura del telescopio NEMO. Il disegno mostra la singola “torre”; ogni “piano-torre” è individuato da un “braccio” metallico, alle cui estremità sono collocate due coppie di sfere per l’alloggiamento di PMT [nemo].

Al fine di verificare l’efficienza della struttura di rivelazione e per collaudare la strumentazione e le tecnologie di installazione e trasmissione dati, il progetto NEMO prevede una prima fase di test (NEMO – Fase 1) da svolgersi in un sito di prova (NEMO Test Site), situato a circa 28 Km dalle coste di Catania.

TECNICHE DI RIVELAZIONE ALTERNATIVE

RIVELAZIONE RADIO

Nell'interazione di un neutrino elettronico di energia estrema ($E > 10^{15}$ eV) può essere prodotta una cascata elettromagnetica. Una cascata elettromagnetica è costituita da elettroni, positroni e fotoni (Figura 3.1). A causa della differenza tra le sezioni d'urto di interazione degli elettroni e dei positroni, e per la diffusione Compton dei fotoni della cascata sugli elettroni del mezzo, nella cascata vi è un eccesso della componente elettronica e, quindi, una asimmetria nella distribuzione della carica. La cascata è descrivibile, pertanto, come una carica negativa in moto a velocità prossima a quella della luce. Ci si aspetta di osservare, pertanto, l'emissione di un segnale radio Cherenkov coerente [ASK62].

Tra gli esperimenti di rivelazione radio di neutrini citiamo il progetto americano RICE [FRI96] (Radio Ice Cherenkov Experiment), nei ghiacci dell'Antartide, nello stesso sito in cui opera il telescopio AMANDA.

RIVELAZIONE ACUSTICA

La tecnica di rivelazione acustica consiste nella misura, per mezzo di idrofoni, del segnale di pressione prodotto in acqua da sciame elettromagnetici e/o adronici generati dall'interazione di neutrini. La descrizione della tecnica di rivelazione acustica è svolta nel Capitolo 3.