

Neutrini Atmosferici

Luca Pezzini

March 2019

1 Introduzione

La componente cosmica si divide in due categorie :

1. Primari (protoni): misurazione ad alta quota a basse energie (il basso flusso richiede rivelatori di alta accettanza).
2. Secondari (fotoni e adroni): gli sciame estesi vengono impiegati per lo studio dell'intensità e composizione chimica dei primari di alte energie.

Il **flusso di neutrini atmosferici**¹ dipende dunque:

1. Dall'intensità dei primari.
2. Processi di interazione.
3. Spessore di materia attraversata dai secondari di prima interazione.

In molti casi lo studio dei neutrini atmosferici è utile per stabilire il **fondo di rumore** nella ricerca di neutrini astrofisici. Per ogni direzione di arrivo e località terrestre esiste un **taglio geomagnetico nella rigidità dei primari** al di sotto del quale non vengono prodotti secondari: esiste un valore di soglia, che dipende dalla posizione terrestre, che limita la penetrazione nel campo geomagnetico terrestre. La **rigidità** della particella determina se essa possa o no raggiungere la terra:

1. **effetto latitudine**: ad una diminuzione della latitudine geomagnetica corrisponde un aumento della rigidità di taglio e quindi una diminuzione del flusso di primari di bassa energia.
2. **effetto est-ovest**: la rigidità di taglio è maggiore per particelle provenienti da ovest verso est.

Per neutrini prodotti da primari con energia maggiore del taglio geomagnetico questi effetti sono ininfluenti.

¹Componente più abbondante dei raggi cosmici al suolo e sottoterra

2 Produzione

I Meccanismi di produzione:

1. Interazioni p-p e p- γ .
2. Interazioni protone-nucleo.
3. Interazione nucleo-nucleo.

L'origine dei neutrini si attribuisce al **decadimento di particelle secondarie a vita media breve** (π, K, μ). Il parametro che indica in branching ratio ² è l' **energia critica** ³. Da questo notiamo che i neutrini di:

1. **Bassa energia** sono prodotti da μ, π .
2. **Alta energia** sono prodotti da K.

Contributi all'intensità di neutrini μ :

1. $K \rightarrow \mu + \nu$.
2. $\pi \rightarrow \mu + \nu$.
3. $K \rightarrow \pi + \mu + \nu$.
4. $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$.

Contributi all'intensità di neutrini e:

1. $K \rightarrow \pi + e + \nu$.
2. $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$.

3 Spettro e Intensità dei μ

Def. Intensità: numero di particelle che attraversano l'unità di area perpendicolare alla direzione di arrivo nell'unità di tempo nell'unità di angolo solido ($cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}$).

Le particelle della radiazione cosmica in generale si distribuiscono su uno **Spettro Energetico**, dunque dobbiamo definire due grandezze:

1. **Intensità spettrale differenziale:** $I(E)dE$ che rappresenta l'intensità delle particelle con energia compresa tra E ed $E + dE$.
2. **Intensità integrale:** $I(> E) = \int I(E)dE$.

Def. Flusso: Intensità mediata sull'angolo solido.

²Percentuale di decadimenti che porta a produzione di neutrini.

³Energia di soglia sopra la quale il decadimento è inferiore all'interazione con l'aria.

1. **Flusso Integrato:** $N(> E) = aE^{-\gamma}$ ⁴.
2. **Flusso Differenziale:** $\frac{dN}{dE} = -\gamma a E^{-(\gamma+1)}$.

I muoni secondari che penetrano nel sottoroccia possono essere di tre tipi:

1. Muoni **pronti** prodotti con i neutrini dal decadimento di particelle a vita breve.
2. Muoni da **K e π** .
3. Muoni da **interazioni a correnti cariche** di neutrini atmosferici di tipo muonico che interagiscono nella roccia vicino al rivelatore.

Queste categoria sono state disposte in ordine crescente secondo contributo di intensità crescente a incrementare la profondità.

4 Spettro e Intensità dei neutrini atmosferici

Un metodo immediato per stabilire l'esistenza dei neutrini muonici prodotti in atmosfere, e che interagiscono nella roccia vicino ad un rivelatore, è quello di dimostrare che, per angoli prossimi a 90° , il flusso dei muoni non dipenda dalla profondità del sottoroccia. Dai dati raccolti dall'esperimento LVD, nel Gran Sasso, sono stati rilevati 14 eventi. Questi sono eventi muonici originati dall'interazione dei neutrini nella roccia vicina all'esperimento.

$$I_{\nu \rightarrow \mu}(90^\circ) = (8.3 \pm 2.6) 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (1)$$

Il flusso misurato è molto piccolo e costituisce una componente costante del fondo in ogni esperimento in cui si vogliano ricercare sorgenti astrofisiche di neutrini.

Dai decadimenti atmosferici che generano i neutrini quali:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (3)$$

Si nota che il numero degli elettroni è maggiore del numero dei muoni, e questo si traduce sui flussi:

$$\frac{\phi(\nu_\mu)}{\phi(\nu_e)} = 2 \quad (4)$$

Osserviamo la prima **anomalia nel flusso dei neutrini**: dalla teoria ci aspettiamo $N_\mu = 2N_e$ tuttavia sperimentalmente abbiamo $N_\mu < 2N_e$.

1. Il flusso dei muonici è il doppio rispetto a quello degli elettronici (analogo per antineutrini).

⁴L'indice γ non ha valori univoci ma varia con dell'energia.

2. Abbiamo coincidenza di rapporti $\frac{\nu_e}{\bar{\nu}_e} = \frac{\mu^+}{\mu^-}$.
3. Data la cinematica del decadimento ogni neutrino ha circa la stessa energia.

Concludiamo:

1. I μ osservati a livello del mare con energia di 1 GeV sono stati prodotti da particelle con energia di almeno 3 GeV al top dell'atmosfera.
2. I muoni di minor energia sono decaduti in atmosfera e forniscono il maggior contributo al flusso di neutrini elettronici.
3. I neutrini elettronici di bassa energia oscillano più degli altri ⁵.

E' per questo sfatto che per energie al di sopra del GeV il rapporto di elettronici e muonici decresce rapidamente; in particolare al alte energie la sola fonte di ν_e è il decadimento del K^0 ⁶.

Graficando il flusso di neutrini energetici di basse energie in funzione dell'energia, si nota:

1. Picco intorno ai 30-40 MeV che decresce fortemente col crescere dell'energia.
2. Località in prossimità dei poli geomagnetici hanno un maggiore flusso di neutrini.
3. Neutrini provenienti dal basso hanno un flusso meno dipendente dalla località perchè mediati su un angolo solido maggiore dell'emisfero opposto.

Considerazioni sull'angolo zenitale:

1. I flussi dei neutrini provenienti dall'alto o dal basso sono analighi.
2. I flussi dei neutrini provenienti da $90^\circ \pm 20^\circ$, si deve tenere conto della curvatura atmosferica terrestre: la densità di colonna è differente per le diverse direzioni, abbiamo **dipenza angolare del flusso di neutrini**.

L'implicazione di questi fatti è che abbiamo un aumento di neutrini orizzontali rispetto alle altre direzioni.

5 Rivelazione dei Neutrini Atmosferici

Per rivelare i neutrini atmosferici negli esperimenti sotterranei, si osservano gli elettroni e i muoni prodotti dall'interazione dei rispettivi neutrini. Si hanno tre tipologie di eventi:

⁵Necessità di un confronto statistico con simulazioni numeriche, Metodi MonteCarlo.

⁶Il calcolo del flusso dei neutrini può essere fatto analogamente dai decadimenti di π e K con risultati analoghi.

1. **Eventi contenuti:** interazione all'interno del rivelatore, l'energia di elettroni e muoni è minore di quella di confinamento.
2. **Eventi parzialmente contenuti:** interazione all'interno del rivelatore con energia maggiore di quella di confinamento.
3. **Muoni antivericali:** prodotti dall'interazione di ν_μ che interagiscono nella roccia dal basso ⁷.

6 Simulazioni Monte Carlo

Si parte dal flusso di raggi cosmici primari e successivamente grazie agli acceleratori si studia il numero di secondari prodotti (π^\pm), a energie più basse rispetto a quelle in gioco nei raggi cosmici, si tiene anche conto degli effetti geomagnetici. Per passare dai raggi cosmici ai neutrini ci si avvale di tre passaggi:

1. **p-p cross section** (centro di massa): misurata negli acceleratori a bersaglio fisso (anche qui abbiamo un limite energetico).
2. **Stima π prodotti:** da cui origineranno i neutrini.
3. **Modello atmosferico:** tengo conto delle eventuali interazioni con i nuclei atmosferici.

Da queste considerazioni si ottiene il flusso di neutrini atteso: si ha una leggera prevalenza di neutrini rispetto agli antineutrini dal momento che i raggi cosmici sono in prevalenza carichi positivamente (ci sono più π^+ che π^-).

7 Tipologie di Esperimenti

1. **Esperimenti in Disappearance:** si stimano i neutrini mancanti facendo il rapporto tra il flusso teorico e il flusso misurato.
2. **Esperimenti in Appearance:** in un fasci di neutrini di un determinato tipo vado a cercare neutrini di un'altro tipo così da misurare quelli mutati.

Il rapporto $\frac{N_\mu}{N_\pi}$ cresce con l'incrementare dell'energia, poichè il neutrino viene prodotto dal decadimento del muone: **più il muone è energetico e meno facilmente decade dunque meno elettroni saranno prodotti.**

⁷Tale meccanismo può anche avvenire dall'alto ma in questo caso i muoni da neutrino sono mascherati da muoni atmosferici, che hanno un flusso maggiore.

8 Conferma dell'Oscillazione

Il problema dell'anomalia coincolgeva il flusso di neutrini atmosferici nei rivelatori ad acqua (luce Cherenkov), mentre per gli altri non accadeva. Dapprima si pensò ad errori nell'identificazione dei muoni oppure al maggiore fondo cui erano esposti i rivelatori a luce Cherenkov. Invece la causa era da ricercarsi nell'oscillazione del neutrino. Per i neutrini provenienti **dall'alto** non si ha oscillazione, anche tenendo conto dell'energia più bassa e della distanza maggiore il rapporto $\frac{L}{E}$ non è sufficiente. Per i neutrini **dal basso** siamo nel regime di completa oscillazione⁸. La trasformazione di neutrini muonici in neutrini elettronici è stato scoperto dai ricercatori del Fermi LAB nell'ambito dell'esperimento Main Injector Neutrino Oscillation Search (MINOS). Per misurare l'evento viene proiettato un fascio di neutrini muonici a 735 Km di distanza attraverso la Terra, dal Main Injector accelerator del Fermilab verso un rivelatore di neutrini da 5000 tonnellate posto a 800 m di profondità presso il Soudan Underground Laboratory, nel Minnesota. L'osservazione degli eventi nel rivelatore del Soudan permette di studiare il parametro $\sin^2\theta_{13}$: se i neutrini muonici non si trasformassero in neutrini elettronici, tale quantità sarebbe nulla. MINOS è un rivelatore a campo magnetico, ciò dava un duplice vantaggio:

1. Distingue i muoni positivi da quelli negativi, dunque anche i neutrini dagli anti neutrini: **questo è fondamentale per lo studio della violazione CP**.
2. **Migliora la risoluzione di $\frac{L}{E}$** : facendo una stima dell'energia dei muoni dal raggio di curvatura nel calorimetro.

A seguito della scoperta dell'oscillazione dei neutrini atmosferici è partito un programma di esperimenti che proponeva:

1. **Confermare l'oscillazione**⁹, poichè il fatto di non vedere l'andamento oscillatorio, ma solo la dipendenza dall'angolo solido lasciava aperte le porte ad altre speculazioni teoriche¹⁰.
2. **Misurare i parametri neutrinici** come $\Delta m_{i,j}^2$ e $\theta_{i,j}$ ¹¹.

La nuova tecnica adottata negli esperimenti successivi¹² non era confrontare le misurazioni con un Monte Carlo bensì misurare il flusso per ogni angolo θ e confrontare quei flussi che dovrebbero essere uguali, ovvero con angolo speculare, ad

⁸L'esperimento MACRO, al Gran Sasso, nato per lo studio dei monopoli magnetici ha studiato le oscillazioni di neutrino, analizzando il rapporto tra i neutrini provenienti dal basso e quelli provenienti dall'alto

⁹Si passava da 1 a $\frac{1}{2}$ senza vedere il pattern di oscillazione.

¹⁰Ad esempio il neutrino decay oppure la decoerenza che avevano un andamento che poteva essere simulato.

¹¹Se il $\theta_{1,3}$ fosse zero non potrei fare studi di violazione CP nel settore leptonic poichè non ci sarebbe la fase nella matrice di mixing

¹²Questo metodo viene usato nello studio dei neutrini μ multi-GeV, ovvero di alte energie, in cui la direzione è la stessa del muone prodotto.

esempio up-down. Dunque si elimina la dipendenza dal Monte Carlo e si ricava la probabilità di sopravvivenza dei ν_μ ; questo richiede un'ottima risoluzione $\frac{L}{E}$ e implica una buona precisione in Δm^2 . **Il rapporto tra il flusso atteso senza oscillazione (up) e quello con oscillazione (down) mi dà una completa informazione del pattern di oscillazione**, da cui risco ad individuare la posizione di L_{max} e dunque ricavare Δm^2 .

NOTA: La risoluzione sull'orizzontale è molto critica per il contributo di $\tan^2 \theta$ (θ è l'angolo che serve misurare per definire L) che a 90° tende a inf, ciò fa sballare la risoluzione.

E' necessario effettuare un confronto con una simulazione Monte Carlo dal momento che gran parte dei risultati viene data inizialmente con neutrini di bassa energia, che non sono correlati con la direzione di arrivo, per cui si ha una bassa risoluzione in $\frac{L}{E}$.

NOTA: Passando dalla simulazione in 2D alla 3D abbiamo un effetto geomagnetico che modifica l'accettanza a causa della differente cinematica dei raggi cosmici che producono neutrini sull'orizzontale (questo discorso è poco importante dal momento che sull'orizzontale la risoluzione è pessima).

9 Discriminare eventi e da μ

Gli eventi vengono caratterizzati da una serie di parametri che combinati danno il **Particles Identification Parameter** con cui si distinguono gli eventi elettronici e muonici. Una conferma ancora più stretta è data quando un evento μ è seguito da un evento e, questo ne identifica il suo decadimento. Dal raggio dell'anello che definisce l'evento sul rivelatore abbiamo informazioni sulla cinematica della particella dal momento che l'angolo dipende dalla sua velocità.

10 Oscillazioni

I neutrini che arrivano dall'alto non hanno subito oscillazioni e dunque vengono considerati come un beam di riferimento, inoltre considero neutrini con energie dell'ordine del GeV che sono maggiormente correlati con la direzione. Grazie al beam altamente energetico ho un confronto 1:1 dunque posso dire quali arrivano dall'alto e quali arrivano dal basso, invece col Monte Carlo posso fare solo un confronto di tipo statistico.

La σ della distribuzione in energia incide su $\frac{L}{E}$ perchè in base alla larghezza di questa curva conosco meglio o peggio l'angolo di arrivo e quindi la direzione da cui si calcola la distanza L. Per avere una buona risoluzione $\frac{L}{E}$ devo avere una risoluzione che è meglio della metà del periodo altrimenti non posso risolvere il pattern di oscillazione, questo prende il nome come **Criterio di Niquist**.

ATTENZIONE: Non si considerano gli eventi sull'orizzontale e di bassa energia. Lo studio dei dati in funzione di $\frac{L}{E}$ il pattern di oscillazione è evidente e dunque si possono definitivamente escludere le altre ipotesi.

11 Oscillazioni Subdominanti

1. Neutrini solari $\rightarrow \theta_{1,2}, \Delta m_{1,2}^2$.
2. Neutrini atmosferici $\rightarrow \theta_{2,3}, \Delta m_{2,3}^2$.

Mancano i parametri $\theta_{1,3}, \Delta m_{1,3}^2$ che si misurano considerando i neutrini atmosferici che oscillano da $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, anziché ν_τ come consuetudine. Per rivelare queste oscillazioni si possono considerare gli effetti di materia, infatti il ν_e interagisce con gli elettroni sia in CN che in CC.

NOTA: gli effetti di materia dipendono da Δm e dunque è possibile stabilire una gerarchia a seconda se la risonanza avvenga con i neutrini o gli anti neutrini che mi darà segno positivo o negativo.

Per misurare le oscillazioni subdominanti è necessaria un'elevata precisione dal momento che si va a misurare un'effetto nell'effetto.

1. $\theta_{2,3} = 45^\circ$
2. $\theta_{1,2} = 33^\circ$
3. $\theta_{1,3} \ll 1$

12 Esperimento T2K

Si tratta di un'esperimento sul fascio. Riesco a studiare la violazione CP nonostante il mio rivelatore non abbia campi magnetici per il fatto che conosco le particelle componenti del fascio (muoni positivi e negativi). La particolarità dell'esperimento consiste nell'avere un unico detector invece di due (far detector e near detector¹³). Gli obiettivi dell'esperimento sono due:

1. Studio della sparizione di ν_μ di elevata accuratezza.
2. Studio dall'apparenza dei ν_e .

Dal momento che l'iniettore di fascio è molto vicino al rivelatore è necessario lavorare a basse energie per avere oscillazione. In questo caso non è importante la direzione come lo è per i neutrini atmosferici poiché la correlazione viene fatta temporalmente, ovvero si scelgono gli eventi entro una certa finestra temporale. Il fascio del beam è impulsato dunque conoscendo quando vengono emessi i neutrini calcolo il tempo di volo dalla velocità e dalla distanza.

12.1 Tecnica di generazione del fascio

Tecnica off-axes il rivelatore non è posizionato al centro del fascio per avere un beam più pulito nello spettro energetico. In questo caso è il beam che

¹³I near detector fa misure sul background e sulle sezioni d'urto per avere una maggiore precisione nell'interpretazione dei dati nel far detector.

viene spostato: a 0° lo spettro energetico dei neutrini è molto ampio dunque ha un'incertezza sull'energia maggiore; bensì se passiamo a 2° lo spettro si restringe e quindi ho una conoscenza migliore dell'energia.

Per gli esperimenti in appearance è importante valutare la **contaminazione**¹⁴ del fascio: voglio rivelare i ν_e devo conoscere quanti ne ho in partenza nel fascio, ad esempi a causa del decadimento del muone, per vedere quanti oscillano. Il fascio di neutrini muonici viene creato da protoni che incidono su un target producendo pioni che decadono in μ ν_μ , questi ultimi sono quelli che comporranno il fascio che sarà inquinato da muoni che decadranno in ν_e .

13 Esperimento Nova

Anche questo esperimento è off-axes e ha l'obiettivo di:

1. Studio della disappearance di ν_μ .
2. Studio dall'appearance dei ν_e .

Se $\theta_{1,3} > 0 \Rightarrow \nu_\mu \rightarrow \nu_e$.

Il detector di Nova è un rivelatore tracciante. Ci sono dei contenitori di policarbonato riempiti di materiale scintillatore liquido che vengono letti da una fibra ottica che ne preleva il segnale. La misura dell'energia viene effettuata in modo calorimetrico per contenimento. Non trovandosi sotto terra tale esperimento è esposto a background di atmosferici molto elevato tuttavia riesco a selezionare gli eventi in tempo e in direzione.

¹⁴Che non è così influente $< 1\%$.