

Composizione in flavor degli eventi di IceCube e ricerca di neutrini sterili

IFAE 2015

Riccardo Biondi

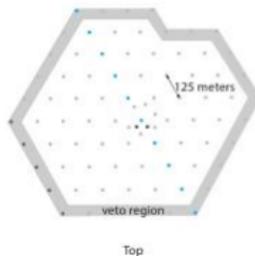
Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università degli studi dell'Aquila
INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)

9 Aprile 2015

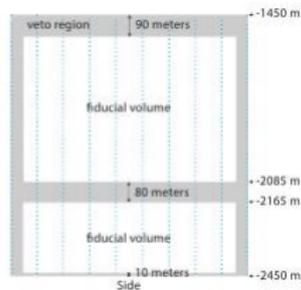


- 1 Dati di IceCube
- 2 Neutrini Standard
- 3 Neutrini Sterili
- 4 Modello
- 5 Conclusioni

- Detector Cherenkov di grande volume (1 km^3)
- Polo Sud
- 1450 – 2450 m sotto il ghiaccio antartico
- 5160 PMT's (DOM)
- Range Energetico: TeV- PeV



Top



Il Detector

In tutte le interazioni di corrente carica (CC), nel detector viene depositata energia sotto forma di un leptone carico e di uno sciame adronico.

L'energia depositata nel detector può essere ricostruita con una precisione del 15% oltre i 10 TeV.

Due topologie di eventi:

Tracce:

- Interazione CC di ν_μ
- Risoluzione Angolare $\leq 1^\circ$

Sciami:

- Interazione CC di ν_e o ν_τ
- Risoluzione Angolare $\sim 15^\circ$

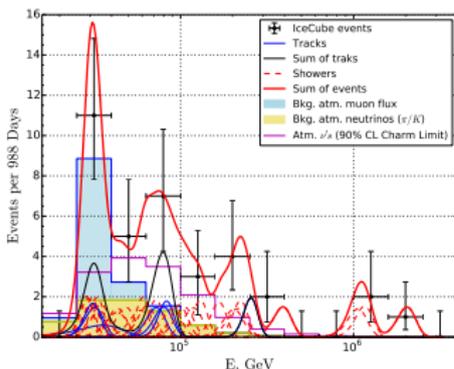
Background:

Neutrini e muoni prodotti dai raggi cosmici nell'atmosfera

Selezione Eventi:

Interazione nel volume fiduciale, veto sui muoni (pareti esterne) e carica depositata nei pmt > 600 ($E \gtrsim 30$ TeV)

Dopo tre anni di raccolta dati: 35 eventi tra 30 TeV e 2 PeV, rispetto al background atteso di 8.4 ± 4.2 per i muoni cosmici e $6.6^{+5.9}_{-1.6}$ dai neutrini atmosferici \Rightarrow **ecceso di 5.7σ**



- Gap 400 TeV – 1 PeV
- Eventi isolati a $E \sim 1\text{PeV}$
- Cut-Off a $E > 2\text{PeV}$
- Abbondanza di Sciami (28) rispetto alle tracce (7)

\Rightarrow Il numero delle tracce è compatibile con il background aspettato
 \Rightarrow Tra 100 TeV e 2 PeV abbiamo una sola traccia contro 11 sciami.

\Rightarrow Componente di neutrini cosmici dominante a $E > 60$ TeV che per qualche motivo preferisce ν_e e/o ν_τ a ν_μ .

Neutrini Standard

Composizione in flavor degli eventi di IceCube e ricerca di neutrini sterili

Riccardo Biondi

Sommario

Dati di IceCube

Neutrini Standard

Neutrini Sterili

Modello

Conclusioni

Possiamo capire qualcosa sull'origine di questi neutrini studiando il loro contenuto in flavor?

Supponiamo che questi neutrini provengano da un qualche tipo di fonte astrofisica

Vogliamo vedere se siamo in grado di spiegare la frazione di tracce rilevata da IceCube in un qualche modello che comprenda solamente i tre neutrini standard.

Ipotizzando diverse composizioni in flavor alla sorgente calcoleremo la frazione di tracce che ci aspettiamo ad IceCube, in base a diversi possibili spettri di potenza e all'area effettiva del detector.

Terremo anche conto delle incertezze sperimentali sui parametri della matrice di mixing dei Neutrini Standard

Frazione di ν_μ attesa

Composizione in flavor degli eventi di IceCube e ricerca di neutrini sterili

Riccardo Biondi

Sommario

Dati di IceCube

Neutrini Standard

Neutrini Sterili

Modello

Conclusioni

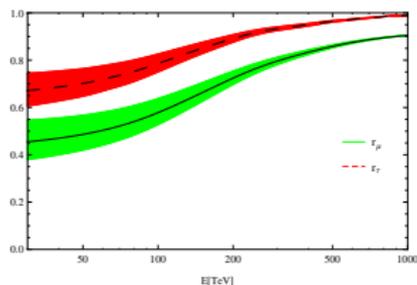
La frazione di tracce aspettate in un determinato intervallo energetico può essere espressa nella forma:

$$F(E, E') = \frac{N_t}{N_t + N_s} = \frac{\int_E^{E'} dE \phi_\mu(E) A_\mu(E)}{\int_E^{E'} dE \sum_\alpha \phi_\alpha(E) A_\alpha(E)}$$

Assumendo uno spettro di potenza: $\phi_\alpha(E) \propto E^{-\gamma}$

$$F(E, E') = \frac{r_\mu f_\mu}{f_e + r_\mu f_\mu + r_\tau f_\tau}$$

$$\text{con } r_{\mu,\tau} = \frac{\int_E^{E'} dE E^{-\gamma} A_{\mu,\tau}(E)}{\int_E^{E'} dE E^{-\gamma} A_e(E)}$$



$$\gamma = 2.4 + \delta\gamma \quad -0.4 < \delta\gamma < 0.4$$

Incertezze sui parametri di Mixing

Composizione in flavor degli eventi di IceCube e ricerca di neutrini sterili

Riccardo Biondi

Sommario

Dati di IceCube

Neutrini Standard

Neutrini Sterili

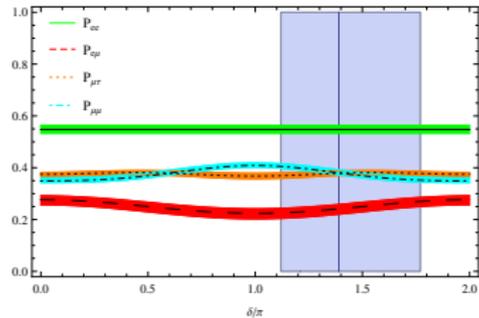
Modello

Conclusioni

Composizione alla sorgente $\implies \tilde{f}_\alpha$
 Lunga distanza percorsa $\implies P_{\alpha\beta} = \sum_i |V_{\alpha i}|^2 |V_{i\beta}|^2$
 Composizione a terra $\implies f_\alpha = P_{\alpha\beta} \tilde{f}_\beta$

- 6 elementi indipendenti
- 3 vincoli: $\sum_\alpha P_{\alpha\beta} = 1$

\implies 3 elementi indipendenti
 Scegliamo: P_{ee} , $P_{e\mu}$ e $P_{\mu\tau}$

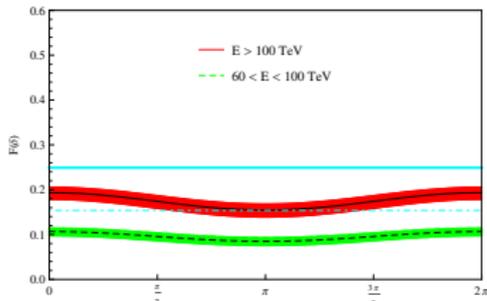
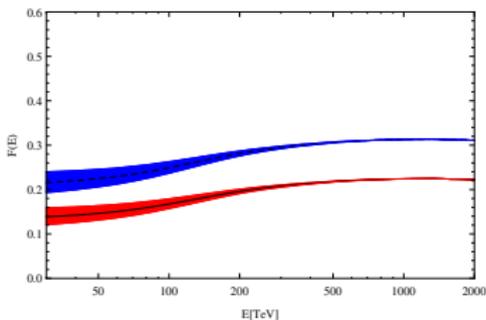


Se $r_\mu = r_\tau = 1 \implies F = f_\mu \simeq P_{e\mu} - (P_{e\mu} - P_{\mu\tau}) (1 - \tilde{f}_e)$

Poiché $P_{e\mu}$ è il parametro chiave, utilizziamo come margine superiore(inferiore) gli estremi degli intervalli di 1σ per i tre angoli di mixing che lo massimizzano(minimizzano) e lasciamo δ libero.

E [TeV]	$60 < E < 2000$	$60 < E < 100$	$100 < E < 2000$
$\tilde{\nu}_e : \tilde{\nu}_\mu : \tilde{\nu}_\tau$	$F_{IC} = 0.2$	$F_{IC} = 0.375$	$F_{IC} = 0.083$
1/3 : 1/3 : 1/3	$.229 + .045 \delta\gamma$.153 + .0012 $\delta\gamma$.249 + .031 $\delta\gamma$
1/3 : 2/3 : 0	$.235 \begin{smallmatrix} -.005 \\ +.015 \end{smallmatrix} + .045 \delta\gamma$	$.150 \begin{smallmatrix} -.005 \\ +.013 \end{smallmatrix} + .0012 \delta\gamma$	$.245 \begin{smallmatrix} -.005 \\ +.016 \end{smallmatrix} + .031 \delta\gamma$
1 : 0 : 0	$.156 \begin{smallmatrix} +.029 \\ -.032 \end{smallmatrix} + .035 \delta\gamma$.096 $\begin{smallmatrix} +.019 \\ -.020 \end{smallmatrix} + .0012 \delta\gamma$.174 $\begin{smallmatrix} +.032 \\ -.035 \end{smallmatrix} + .029 \delta\gamma$
0 : 1 : 0	$.264 \begin{smallmatrix} -.025 \\ +.046 \end{smallmatrix} + .046 \delta\gamma$	$.185 \begin{smallmatrix} -.021 \\ +.039 \end{smallmatrix} + .0012 \delta\gamma$	$.284 \begin{smallmatrix} -.025 \\ +.047 \end{smallmatrix} + .032 \delta\gamma$
0 : 0 : 1	$.279 \begin{smallmatrix} -.009 \\ -.005 \end{smallmatrix} + .045 \delta\gamma$	$.200 \begin{smallmatrix} -.004 \\ -.007 \end{smallmatrix} + .00012 \delta\gamma$	$.298 \begin{smallmatrix} -.011 \\ -.004 \end{smallmatrix} + .031 \delta\gamma$

dopo l'oscillazione il caso atmosferico si riduce a quello simmetrico



E se questi neutrini cosmici fossero prodotti in qualche settore nascosto sotto forma di neutrini sterili?

Dark Sector \leftrightarrow Standard Model

ad esempio Materia Oscura di massa \sim PeV che decade in neutrini sterili:

$$DM \rightarrow DM_{stabile} + \nu_s + \dots$$

Questi poi oscillano nei neutrini ordinari con piccoli angoli ¹ di mixing

$$\nu_s \rightarrow \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$$

¹BBN $\rightarrow \delta m_s^2 \sin^4 \theta_s < 10^{-6} eV^2$

Matrice di Mixing

Neutrino sterile aggiuntivo con angoli di mixing s_i piccoli:

$$R_S(s_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & s_1 \\ 0 & 1 & 0 & s_2 \\ 0 & 0 & 1 & s_3 \\ -s_1 & -s_2 & -s_3 & 1 \end{pmatrix} + O(s_i^2)$$

Due possibili parametrizzazioni:

$$U_L = R_S(s_i) V(\theta_{23}, \theta_{13}, \delta, \theta_{12}) \quad U_R = V(\theta_{23}, \theta_{13}, \delta, \theta_{12}) R_S(s_i)$$

$$U_{L,R} = \left(\begin{array}{ccc|c} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} & V_{e4} \\ V_{\mu1} & V_{\mu2} & V_{\mu3} & V_{\mu4} \\ V_{\tau1} & V_{\tau2} & V_{\tau3} & V_{\tau4} \\ \hline V_{s1} & V_{s2} & V_{s3} & 1 \end{array} \right) + O(s_i^2)$$

Avendo $|V_{si}| \ll 1$, le $P_{\alpha\beta}$ tra i tre neutrini ordinari restano le stesse,
Mentre:

$$P_{s\alpha} = |V_{\alpha4}|^2 + \sum_{i=1}^3 |V_{si}|^2 |V_{\alpha i}|^2$$

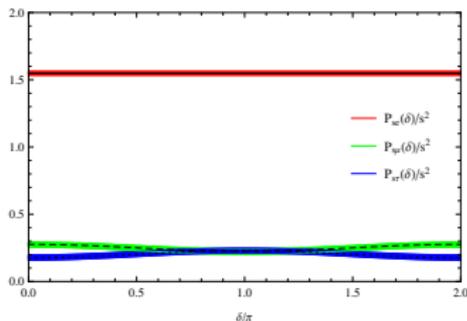
Diversi scenari possibili, ad esempio $s_2 = s_3 = 0$ e $s_1 = s$

Left

$$P_{se} = s^2 [1 + P_{ee}]$$

$$P_{s\mu} = s^2 P_{e\mu}$$

$$P_{s\tau} = s^2 P_{e\tau}$$

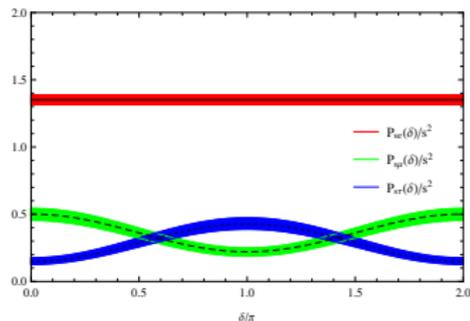


Right

$$P_{se} = 2s^2 |V_{e1}|^2$$

$$P_{s\mu} = 2s^2 |V_{\mu 1}|^2$$

$$P_{s\tau} = 2s^2 |V_{\tau 1}|^2$$



Frazione di ν_μ attesa

Quindi nel caso **Left**:

$$F(E, E') = \frac{s^2 r_\mu P_{e\mu}}{s^2 (1 + P_{ee} + r_\mu P_{e\mu} + r_\tau P_{e\tau})}$$

Mentre **Right**:

$$F(E, E') = \frac{2s^2 r_\mu |V_{\mu 1}|^2}{2s^2 (|V_{e1}|^2 + r_\mu |V_{\mu 1}|^2 + r_\tau |V_{\tau 1}|^2)}$$

Le $F(E, E')$ sono indipendenti da s !

⇒ Per questi casi particolari, in cui abbiamo degli $s_i = 0$ otteniamo due risultati diversi per le due parametrizzazioni.

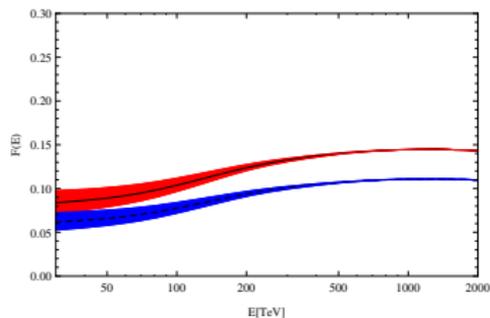
⇒ Per ottenere un risultato indipendente dalle parametrizzazioni dobbiamo avere tutti gli $s_i \neq 0$.

$$\tilde{f} = (0 : 0 : 0 : 1) \text{ con } \phi_s(E) \propto E^{-\gamma}$$

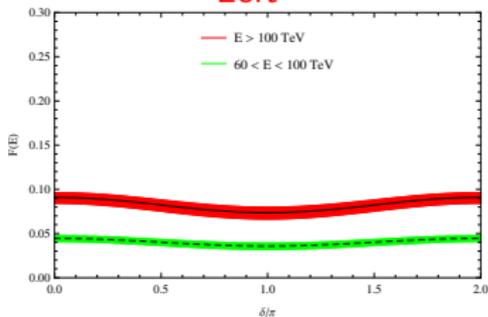
$$\mathcal{M}_{s\alpha}^{L,R} : \nu_s \leftrightarrow \nu_\alpha$$

E [TeV]	60 < E < 2000	60 < E < 100	100 < E < 2000
	$F_{IC} = 0.2$	$F_{IC} = 0.375$	$F_{IC} = 0.083$
\mathcal{M}_{se}^L	$.071^{+.012}_{-.014} + .021 \delta\gamma$	$.040^{+.007}_{-.008} + .001 \delta\gamma$	$.080^{+.014}_{-.016} + .016 \delta\gamma$
$\mathcal{M}_{s\mu}^L$	$.572^{-.019}_{+.032} + .058 \delta\gamma$	$.457^{-.023}_{+.038} + .002 \delta\gamma$	$.596^{-.017}_{+.031} + .039 \delta\gamma$
$\mathcal{M}_{s\tau}^L$	$.137^{-.005}_{-.002} + .022 \delta\gamma$	$.101^{-.003}_{-.002} + .001 \delta\gamma$	$.145^{-.005}_{-.001} + .016 \delta\gamma$
\mathcal{M}_{se}^R	$.106^{+.058}_{-.052} + .029 \delta\gamma$	$.062^{+.035}_{-.031} + .001 \delta\gamma$	$.120^{+.065}_{-.058} + .021 \delta\gamma$
$\mathcal{M}_{s\mu}^R$	$.278^{-.054}_{+.044} + .056 \delta\gamma$	$.191^{-.039}_{+.034} + .001 \delta\gamma$	$.300^{-.057}_{+.046} + .036 \delta\gamma$
$\mathcal{M}_{s\tau}^R$	$.341^{-.021}_{+.031} + .037 \delta\gamma$	$.275^{-.019}_{+.028} + .001 \delta\gamma$	$.355^{-.022}_{-.031} + .026 \delta\gamma$

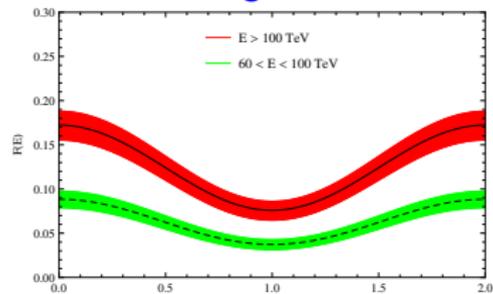
$$M_{se}^{L,R} : \nu_s \leftrightarrow \nu_e$$



Left



Right



Risultati III

Composizione in flavor degli eventi di IceCube e ricerca di neutrini sterili

Riccardo Biondi

Sommario

Dati di IceCube

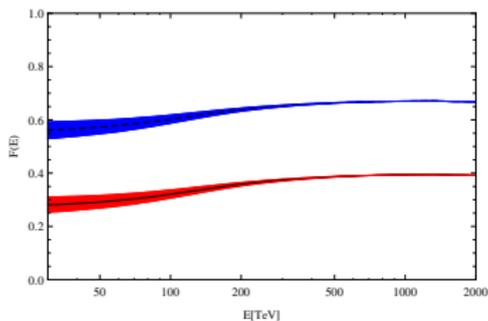
Neutrini Standard

Neutrini Sterili

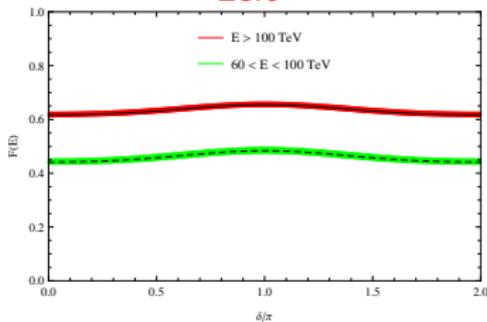
Modello

Conclusioni

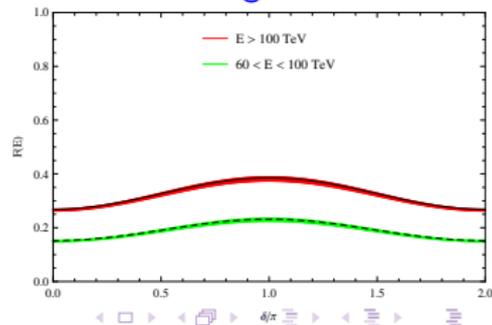
$$\mathcal{M}_{S\mu}^{L,R} : \nu_S \Leftrightarrow \nu_\mu$$



Left



Right



Quindi, l'ideale per spiegare il contenuto in flavor dei neutrini di IceCube sarebbe un meccanismo che produce ν_s mixati con ν_e sopra i 100 TeV e ν_s mixati con ν_μ al di sotto.

si potrebbe pensare a due diverse specie di materia oscura con diverse masse e modi di decadimento, che abbiano come prodotto di decadimento dei neutrini sterili ma in un caso mixati con il nostro ν_e mentre nell'altro caso mixati con ν_μ .

$$DM_e \rightarrow \dots + \nu_s \leftrightarrow \nu_e$$

$$DM_\mu \rightarrow \dots + \nu_s \leftrightarrow \nu_\mu$$

Lo Spettro

Composizione in flavor degli eventi di IceCube e ricerca di neutrini sterili

Riccardo Biondi

Sommario

Dati di IceCube

Neutrini Standard

Neutrini Sterili

Modello

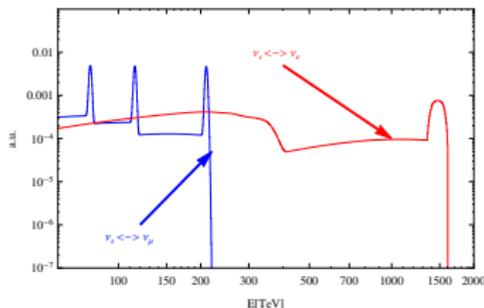
Conclusioni

In questa idea, possiamo prendere in considerazione uno spettro più particolare rispetto al semplice power like.

Questo spettro più complesso potrebbe essere il risultato una combinazione derivante dai vari modi di decadimento delle particelle di materia oscura decadute nella via lattea più un termine cosmologico dovuto a materia oscura decaduta in altre galassie e arrivata a noi dopo aver subito un red-shift a causa dell'espansione dell'universo.

Qui abbiamo un esempio:

E [TeV]	60 < E < 100	100 < E < 2000
	$F_{IC} = 0.375$	$F_{IC} = 0.083$
Left	$.456 \begin{matrix} - .022 \\ + .036 \end{matrix}$	$.122 \begin{matrix} + .021 \\ - .024 \end{matrix}$
Right	$.193 \begin{matrix} - .038 \\ + .032 \end{matrix}$	$.175 \begin{matrix} + .092 \\ - .084 \end{matrix}$



⇒ Abbiamo visto che spiegare il contenuto in flavor dei neutrini osservati ad IceCube in termini di neutrini standard è difficile

⇒ Un maggiore accordo con quanto osservato ad IceCube si può ottenere considerando un neutrino sterile.

⇒ In particolare, in presenza di materia oscura che decade in neutrini sterili, sotto alcune condizioni molto generali si può ottenere un buon accordo con quanto osservato ad IceCube.

⇒ Ovviamente con una statistica così bassa è ancora prematuro trarre delle conclusioni.