

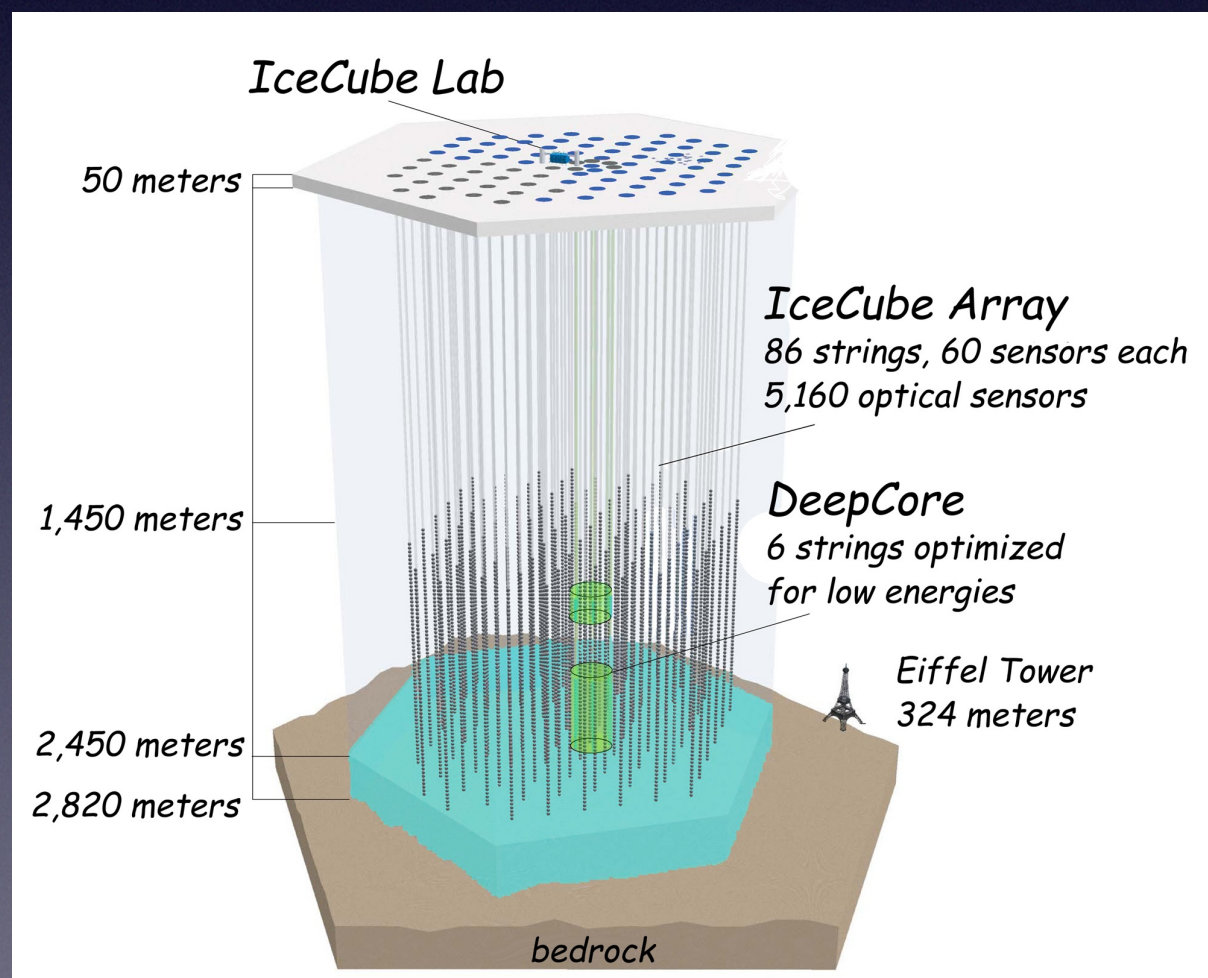
L'anomalia spettrale osservata da IceCube

Andrea Palladino
IFAE 2017, Trieste



Evidenza di neutrini cosmici

IceCube, un rivelatore di 1 km cubo costruito fra i ghiacci dell'Antartide, ha fornito la prima misura di un flusso di neutrini di alta energia (dai 30 TeV al PeV) con possibile origine “astrofisica”.

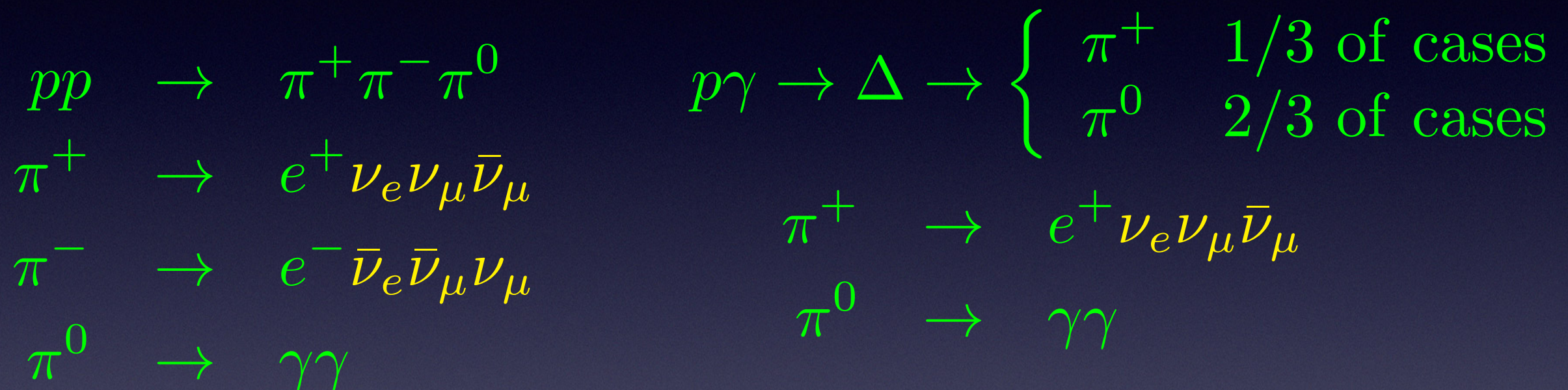


L'eccesso rispetto al background atmosferico ha una significatività **superiore a 5 sigma**.

IceCube coll., *Astrophys.J.* 809 (2015) no.1, 98

Meccanismi di produzione di neutrini

Ci sono due meccanismi principali. Collisione protone-protone e protone-gamma



L'energia dei neutrini è circa 1/20 dell'energia del protone primario

Composizione di flavor iniziale

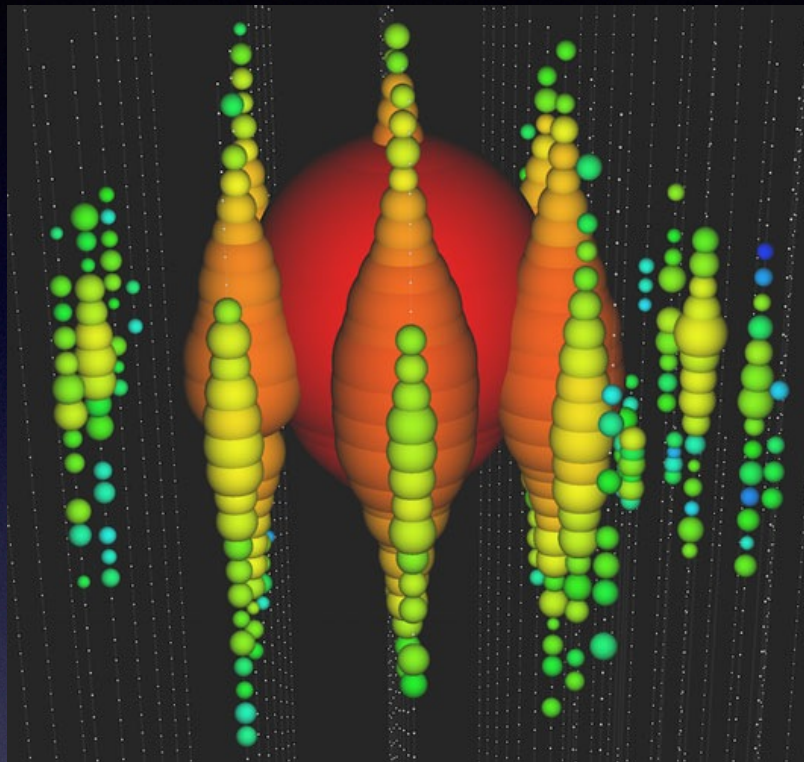
$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$$

Composizione di flavor dopo le oscillazioni

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$$

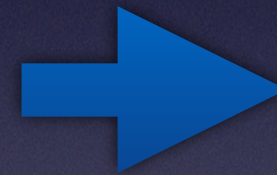
Come osserviamo i neutrini ?

In due modi distinti: HESE e throughgoing muons



1) Gli **HESE** (High Energy Starting Events) osservano principalmente cascate provenienti dall'emisfero Sud

Cascade (elettromagnetiche e/ o adroniche, non distinguibili fra loro). Cattiva risoluzione angolare, 15° circa



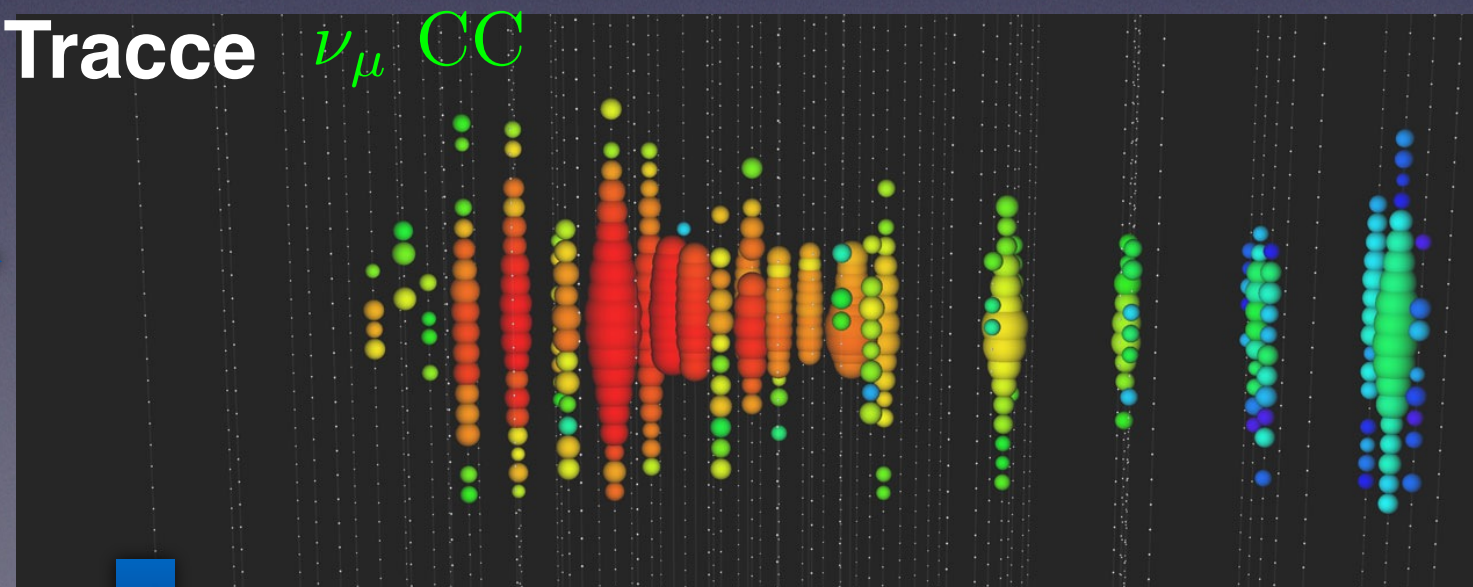
ν_e, ν_τ CC
 ν_e, ν_μ, ν_τ NC

2) I **throughgoing muons** sono costituiti da muoni provenienti dall'emisfero Nord. Buona risoluzione angolare, circa 1°



Tracce

ν_μ CC



L'anomalia spettrale

Gli HESE osservano un flusso (all flavor) molto pendente

$$\phi = (6.7_{-1.2}^{+1.1}) \times 10^{-18} \text{ GeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2} \left(\frac{E}{100 \text{ TeV}} \right)^{-2.50 \pm 0.09}$$

IceCube coll., *Astrophys.J.* 809 (2015) no.1, 98

I thoroughgoing muons osservano un flusso poco pendente

$$\phi_{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}} = (0.90_{-0.27}^{+0.30}) \times 10^{-18} \text{ GeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2} \left(\frac{E}{100 \text{ TeV}} \right)^{-2.13 \pm 0.13}$$

IceCube coll., *Astrophys.J.* 833 (2016) no.1, 3

Le oscillazioni, però, suggeriscono un'equipartizione dei flussi.

Come giustifico questa discrepanza a **3 sigma** ?

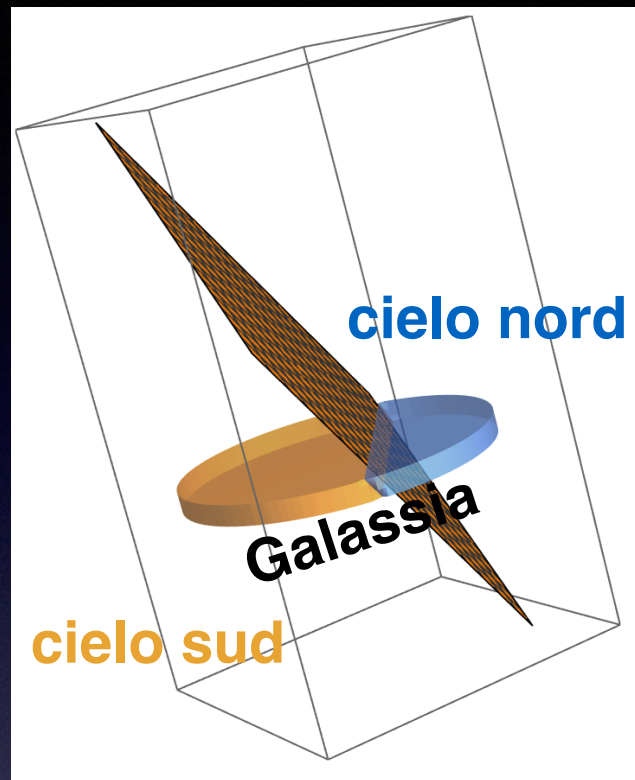
- effetto di soglia. HESE (> 30 TeV), thoroughgoing muons (> 200 TeV)
- dal cielo sud viene osservata una seconda componente

**Throughgoing
muons**



HESE

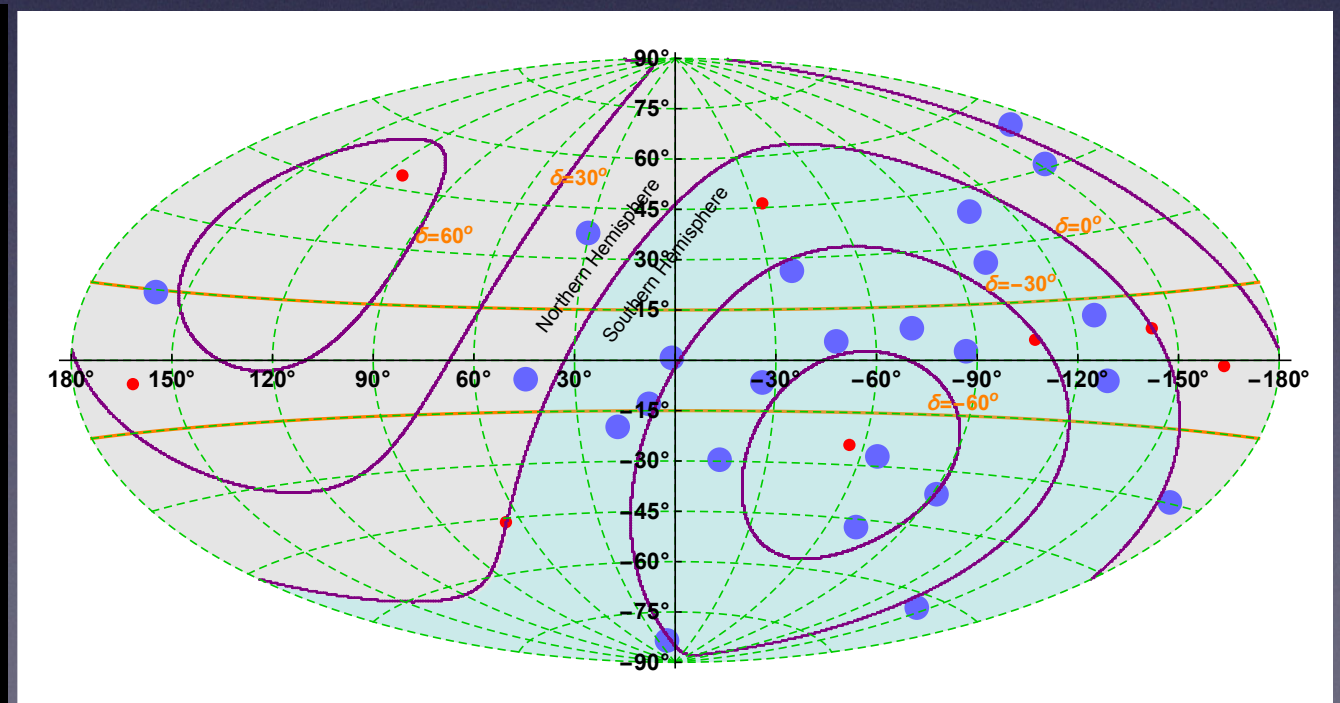
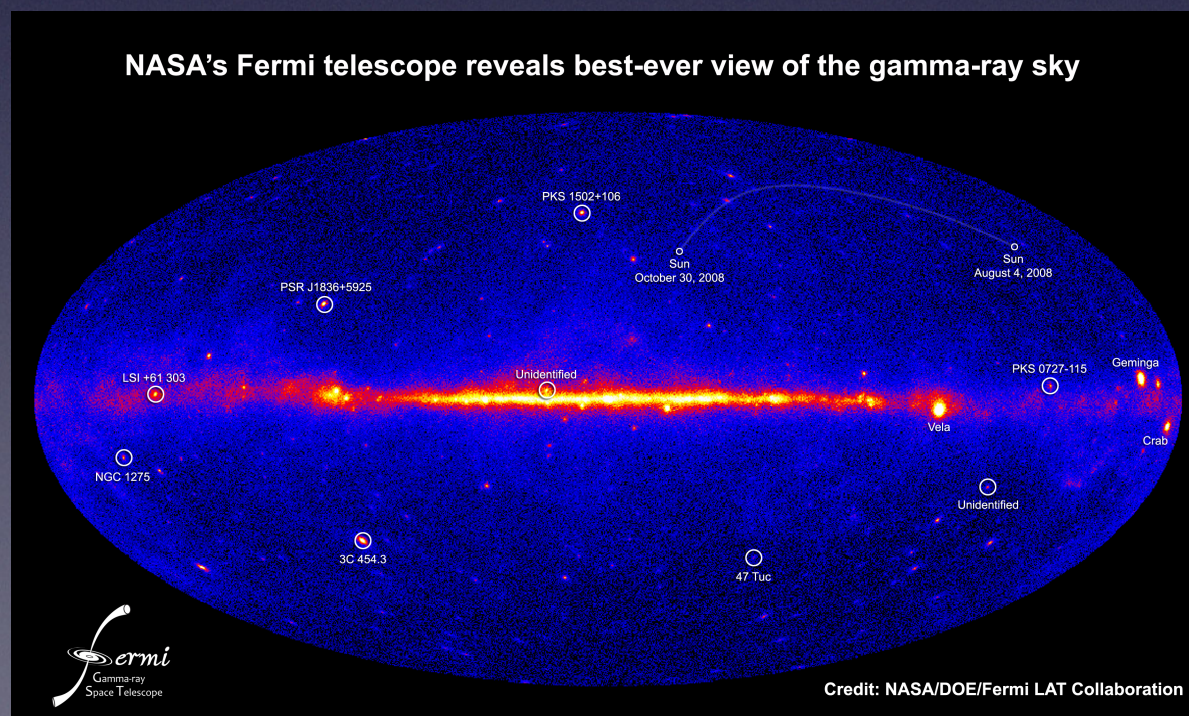
Neutrini Galattici



Oltre il 70% della nostra Galassia viene osservato dal cielo sud $\rightarrow$ se una **componente Galattica** esiste è plausibile che venga osservata in IceCube principalmente con gli **HESE**

La componente Galattica potrebbe provenire sia dal disco (anisotropia angolare) che dall'alone (diffuso, isotropo).

Neronov-Semikoz, *Astropart.Phys.* 75 (2016) 60-63
Pagliaroli-Evoli-Villante, *JCAP* 1611 (2016) no.11, 004
Spurio, *Phys.Rev. D* 90 (2014) no.10, 103004



Mappa del cielo gamma a sinistra, neutrini HESE sopra i 60 TeV a destra

2 componenti. Analisi spettrale

Supponiamo che il flusso osservato da IceCube sia puramente extragalattico dal cielo Nord e Galattico + extragalattico dal cielo sud

$$\phi_N = N_{eg} \times E^{-2}$$

$$\phi_S = N_{eg} \times E^{-2} + N_g \times E^{-2.7}$$

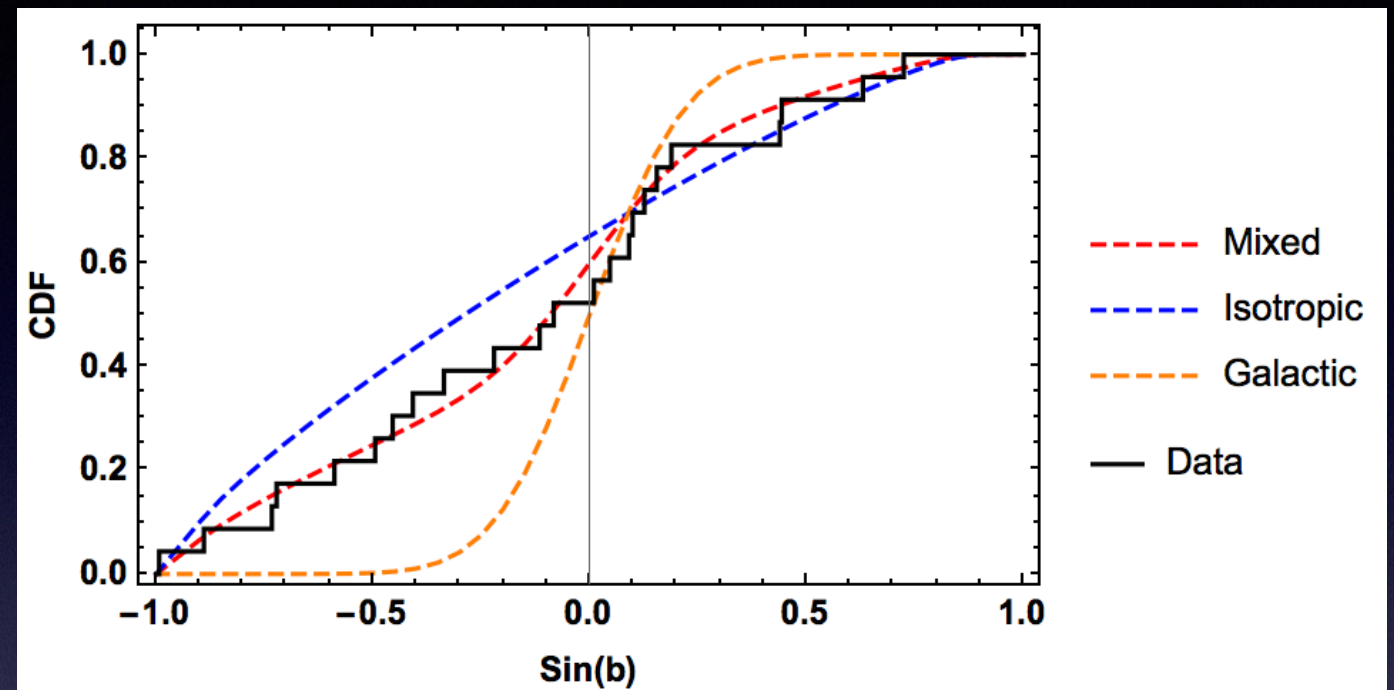
Palladino - Vissani, *Astrophys.J.* 826 (2016) no.2, 185

Utilizzando le aree effettive e riproducendo gli eventi rivelati nel cielo Nord e nel cielo sud otteniamo i coefficienti della normalizzazione.

La componente Galattica può essere responsabile **di circa 7-8** dei 54 HESE osservati da IceCube, con un ampio margine di incertezza.

2 componenti. Analisi angolare

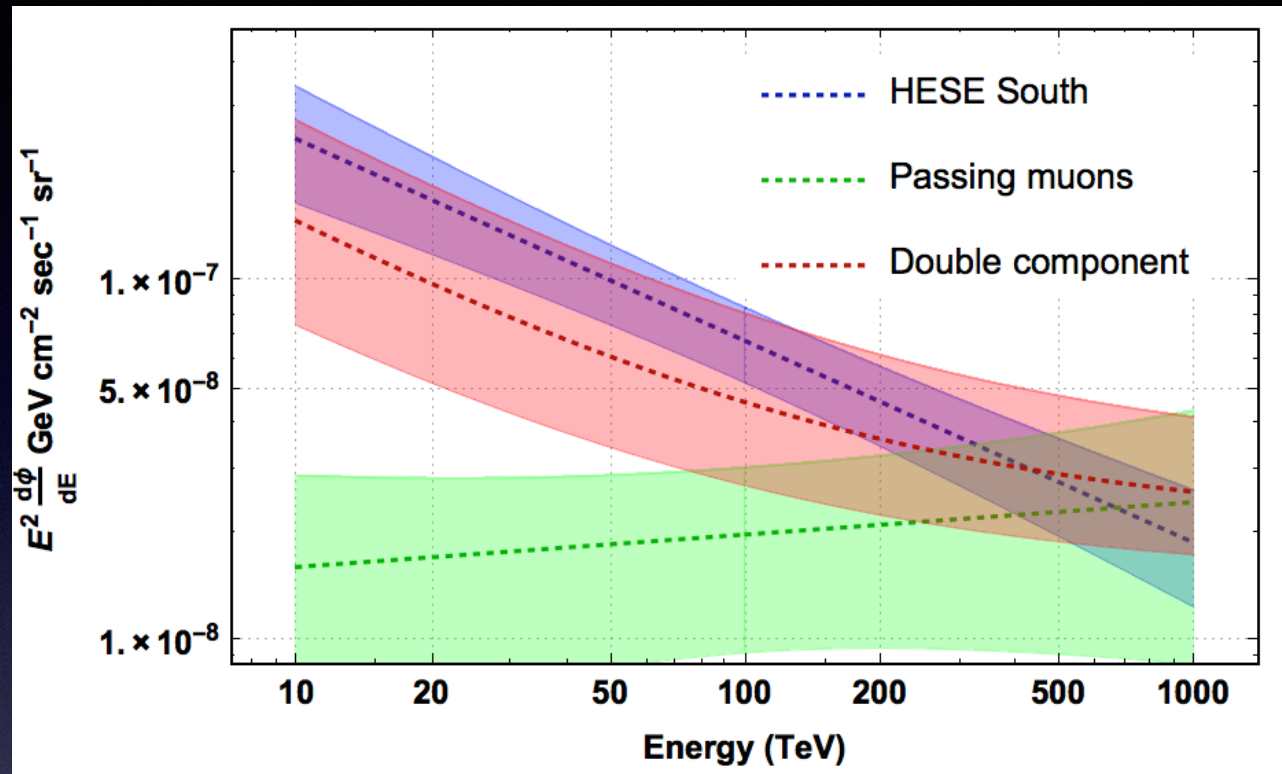
Analisi angolare:
componente isotropa
extragalattica + componente
Galattica gaussiana, piccata
su 0 e con st.dev. 10° .



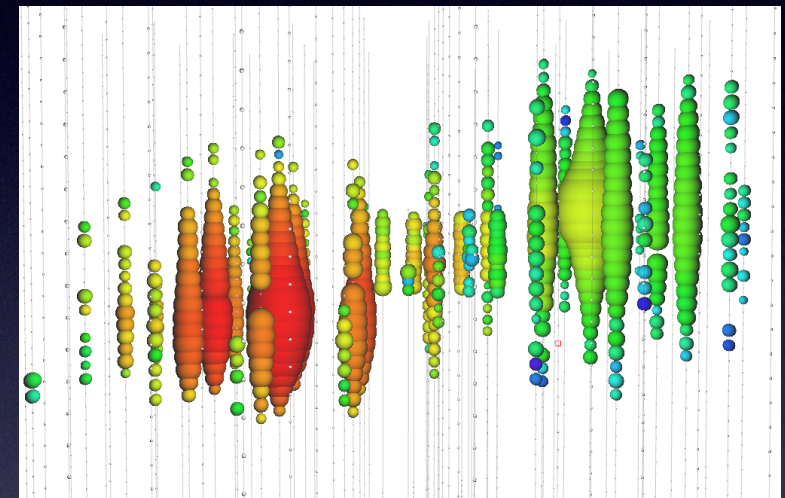
- Modello puramente galattico: sfavorito, probabilità < 0.01
- Modello isotropo extragalattico: compatibile, probabilità = 0.3
- Modello misto (gal. + extragal.) : compatibile, probabilità > 0.9

Da questa analisi otteniamo che la componente galattica è responsabile di **circa 6 eventi**, con incertezza minore rispetto alla precedente analisi.

Aspettative alle alte energie



Quanti eventi ci aspettiamo sopra 3 PeV ?



Glashow resonance

$$\bar{\nu}_e e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{shower}$$

1.5 eventi attesi a 6.3 PeV, 0 osservati.
Tensione di 1.2 sigma fra modello e dati sperimentali.

Double pulse: Eventi prodotti da neutrini tau con energie dal mezzo PeV in su.

0.5 eventi attesi, 0 osservati.
Non c'è tensione al momento.

Palladino-Pagliaroli-Villante-Vissani, Eur.Phys.J. C76 (2016) no.2, 52

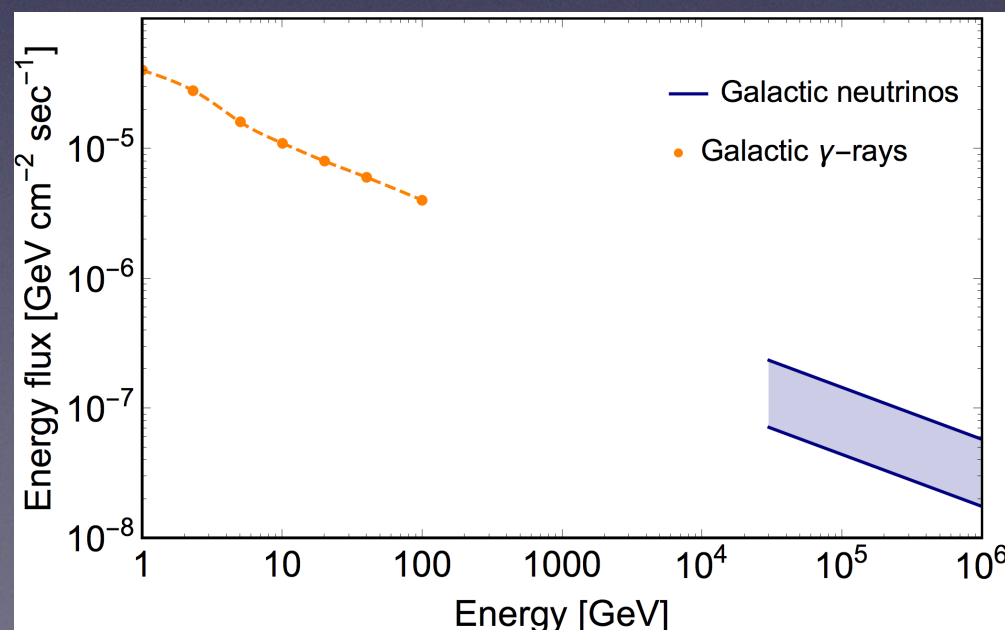
Biehl-Fedynitch-Palladino-Weiler-Winter, JCAP 1701 (2017) 033

Variazioni sul modello

L'ipotesi che il flusso Galattico sia visto solo dal cielo sud è un'ipotesi minimale. Se il flusso ha un'estensione longitudinale superiore ai 35° può essere visto (in piccola parte) anche da nord.

Extension δ	[60, 90)	[30, 60)	[0, 30)	[-30, 0)	[-60, -30)	[-90, -60)
$ b ^* = 4^\circ, \ell ^* = 30^\circ$	0%	0%	0%	52%	48%	0%
$ b ^* = 4^\circ, \ell ^* = 50^\circ$	0%	0%	17%	34%	43%	6%
$ b ^* = 4^\circ, \ell ^* = 70^\circ$	0%	2%	25%	24%	34%	15%

In tabella la frazione di flusso che può essere vista in ciascun intervallo di declinazione, a seconda del modello considerato.



Variamo l'indice spettrale della componente galattica. Anziché $E^{-2.7}$ consideriamo uno spettro $E^{-2.4}$, come suggerito dallo spettro del diffuso gamma Galattico

Palladino-Spurio-Vissani, JCAP 1612 (2016) no.12, 045

Il ruolo dei neutrini prompt

Alle alte energie ci si aspetta che il decadimento del charm contribuisca al flusso di neutrini atmosferici osservabili

- I neutrini prompt sono previsti teoricamente ma non ancora osservati
- Il loro spettro è isotropo e ricalca quello dei raggi cosmici $\sim E^{-2.7}$
- La composizione di flavor è $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 0)$

A differenza del background convenzionale con spettro $E^{-3.7}$, che decade rapidamente, il flusso di prompt può dare un contributo fino a qualche centinaio di TeV

IceCube coll., *Astrophys.J.* 833 (2016) no.1, 3

Il limite sperimentale corrisponde a 0.5 x ERS (modello teorico)

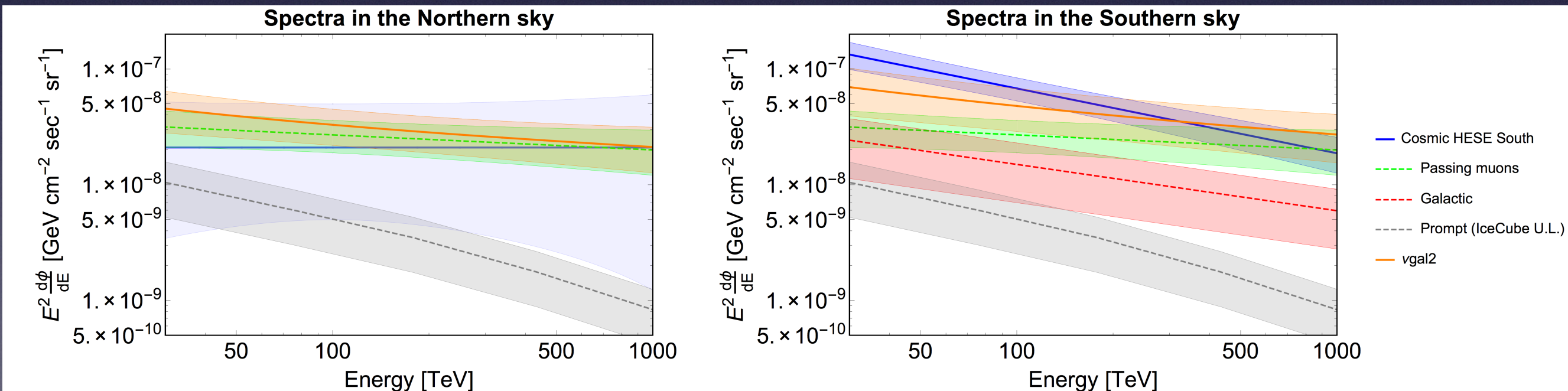
Enberg-Reno-Sarcevic, *Phys. Rev. D* 78 (2008) 043005

3 componenti

	Extragalattici	Galattici	Prompt
Indice spettrale	1.9 - 2.3	2.4 - 2.7	2.7
Distr. angolare	Isotropia	Non isotropa	Isotropia
Rapporti tra flavor	1:1:1	1:1:1	1:1:0

Un modello a più componenti spiega:

1. asimmetria Nord - Sud;
2. eccesso di eventi da Sud;
3. accumulo di eventi vicino il piano Galattico



Il modello è in accordo con l'upper limit di Antares se l'estensione è $|b| > 3^\circ$ e $|L| > 40^\circ$ (in coordinate galattiche)

Numero di eventi attesi

Palladino-Spurio-Vissani, JCAP 1612 (2016) no.12, 045

Component	North	South	Sum
Extragalactic [5]	8.8 ± 1.7	$16.1^{+1.5}_{-1.9}$	$24.9^{+3.2}_{-3.6}$
Galactic [11]	≈ 0	6.0 ± 3.5	6.0 ± 3.5
Prompt [5, 37]	1.5 ± 0.8	2 ± 1	3.5 ± 1.8
Atmospheric μ [3]	0	12.4 ± 6.2	12.4 ± 6.2
Conventional π/K [3]	6.2 ± 1.9	3.6 ± 1.2	9.8 ± 3.1
Total	16.5 ± 2.7	40.1 ± 7.5	56.6 ± 8.7
Observed [41]	16.5	37.5	54

Le predizioni sono in accordo entro 1 sigma con i dati sperimentali

Ci sono diversi indizi a favore di una componente Galattica di neutrini di alta energia. È importante verificarne l'esistenza e nel caso misurarla (con Antares e in futuro con KM3NeT)

Sorgenti extragalattiche

Diverse sorgenti candidate, ma al momento nessuna sorgente riesce a spiegare il flusso osservato

- **GRB**: sfavoriti dalla mancanza di correlazioni temporali [Icecube, arXiv:1702.06868](#)
- **Blazars**: - evidenza di correlazioni con gli HESE [Padovani et al., Mon.Not. \(2016\)](#)
 - non correlano con i throughgoing muons [Palladino-Vissani, arXiv:1702.08779](#)
 - secondo IceCube possono contribuire al massimo per il 25%
[IceCube coll., Astrophys.J. 835 \(2017\) no.1, 45](#)
- **Star Forming Galaxies**: hanno il budget energetico necessario per produrre i neutrini di IceCube. Estremamente difficile osservare correlazioni con i gamma, che vengono riprocessati a bassa energia.
[Loeb-Waxmann, JCAP 0605 \(2006\) 003](#)
[Tamborra-Murase, JCAP 1409 \(2014\) 043](#)
[Bechtol et al., Astrophys.J. 836 \(2017\) no.1, 47](#)

Sorgenti Galattiche

Nessuna evidenza di sorgenti puntiformi.

- Il flusso di neutrini attesi dal centro Galattico è stato analizzato in **Celli-Palladino-Vissani, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.2, 66, (Talk di Giovedì 20, ore 10:15, Silvia Celli)** ma non può dare contributo importante in IceCube
- Un contributo dal piano Galattico (neutrini prodotti per interazione pp) è plausibile e non contraddice alcun dato sperimentale (es. distribuzione angolare degli eventi, limite di Antares)
Palladino - Vissani, Astrophys.J. 826 (2016) no.2, 185, Pagliaroli-Evoli-Villante, JCAP 1611 (2016) no.11, 004, Spurio, Phys.Rev. D90 (2014) no.10, 103004
- Un flusso di neutrini provenienti dall'alone Galattico è stato proposto in **Taylor-Gabici-Aharonian, Phys.Rev. D89 (2014) no.10, 103003** . Tale flusso sarebbe quasi isotropo e difficilmente distinguibile dal flusso extragalattico.

Conclusioni

- IceCube ha fornito la prima evidenza di neutrini cosmici di alta energia;
- Tra HESE e throughgoing muons c'è tensione ad almeno 3 sigma
- Una componente Galattica di neutrini riesce a riconciliare i diversi spettri;
- Essa è supportata dalla distribuzione angolare degli HESE;
- I neutrini prompt sono previsti ma non ancora osservati;
- Un modello a più componenti si accorda con tutti i dati sperimentali disponibili se l'estensione della componente Galattica è $|b| > 3^\circ$ e $|L| < 40^\circ$
- Nessuna evidenza di sorgenti;
- I candidati extragalattici sono GRB, Blazars e Star Forming Galaxies;
- I candidati Galattici sono disco e alone Galattico

Grazie per l'attenzione