

---

# Neutrini galattici e modelli misti

Andrea Palladino



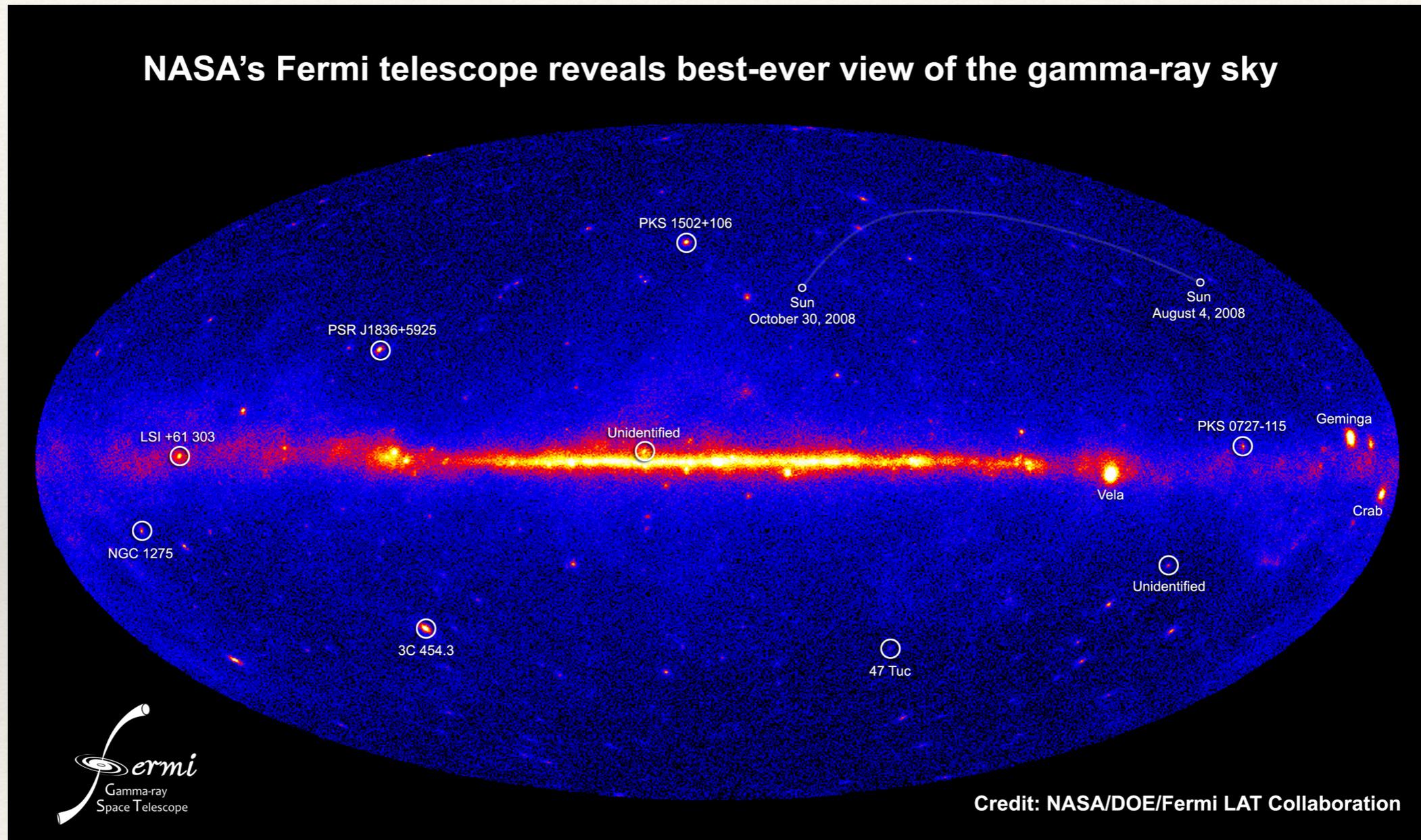
---

# Indice

---

- ❖ Ragioni teoriche a favore dei neutrini Galattici di alta energia
- ❖ Come osservano la Galassia i diversi telescopi di neutrini
- ❖ Ragioni sperimentali a favore dei neutrini Galattici di alta energia
- ❖ Modello a più componenti e confronto con i dati sperimentali

# Il cielo gamma



Possiamo notare emissione in corrispondenza del piano galattico. Ci aspettiamo anche neutrini di alta energia ?

---

# Interazione protone-protone

---

Può verificarsi interazione fra protoni accelerati e il gas presente sul disco della Galassia

$pp \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  in rapporti all'incirca uguali

$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$

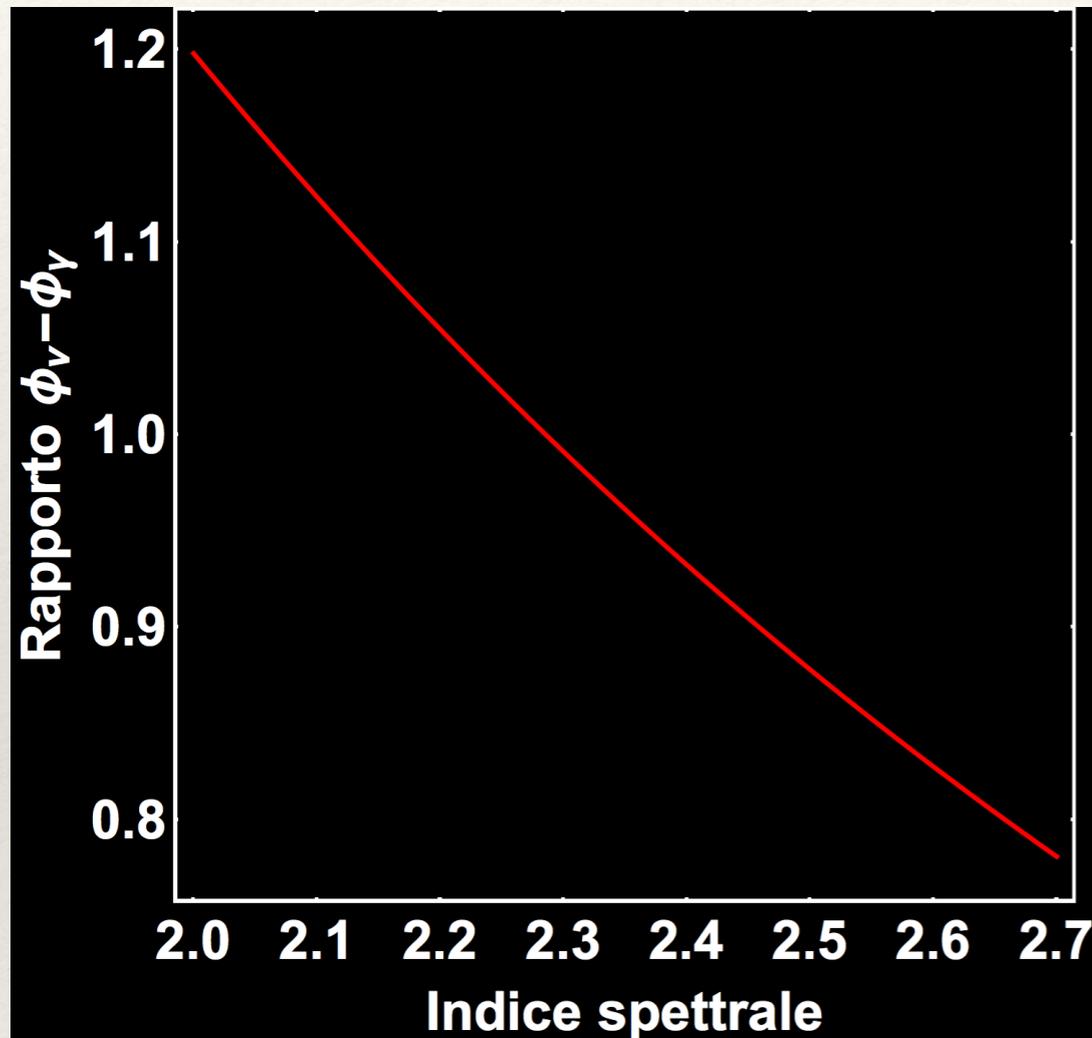
$\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

**Se ci sono neutrini devono esserci anche gamma. Non è vero il contrario.**

Lo spettro dei neutrini replica le caratteristiche dello spettro dei protoni (power-law, stesso indice spettrale)

# Rapporto spettro gamma-neutrini



Villante-Vissani, PRD, 2008

Nell'ipotesi di comune origine adronica e interazione pp il flusso totale di neutrini è uguale al flusso di gamma entro il 20%.

Poiché i gamma vengono prodotti anche tramite meccanismi leptonici il flusso di gamma rappresenta un upper limit per il flusso atteso di neutrini.

$$\phi_\nu \leq \phi_\gamma$$

**Attenzione all'assorbimento dei gamma !**

---

# Neutrini da disco e da alone

---

## Disco

- flusso localizzato intorno al piano galattico
- spettro  $E^{-2.4} \div E^{-2.7}$
- distinguibile da flusso extragalattico isotropo

## Alone

- flusso in buona approssimazione isotropo
- spettro ?
- non distinguibile da flusso extragalattico isotropo

# Neutrini galattici - modelli teorici

Pagliaroli, Evoli, Villante, arXiv, 2016

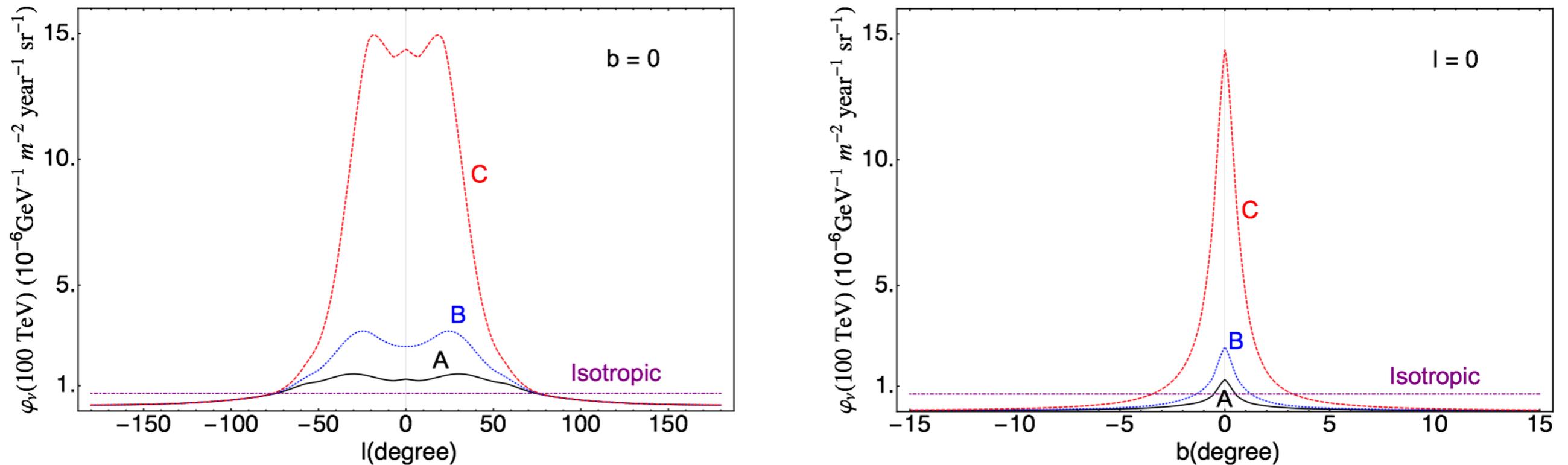
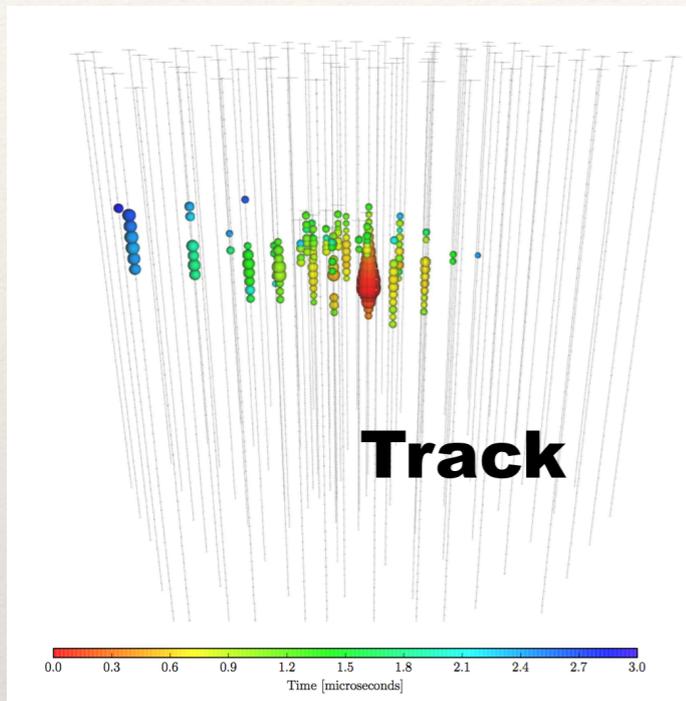


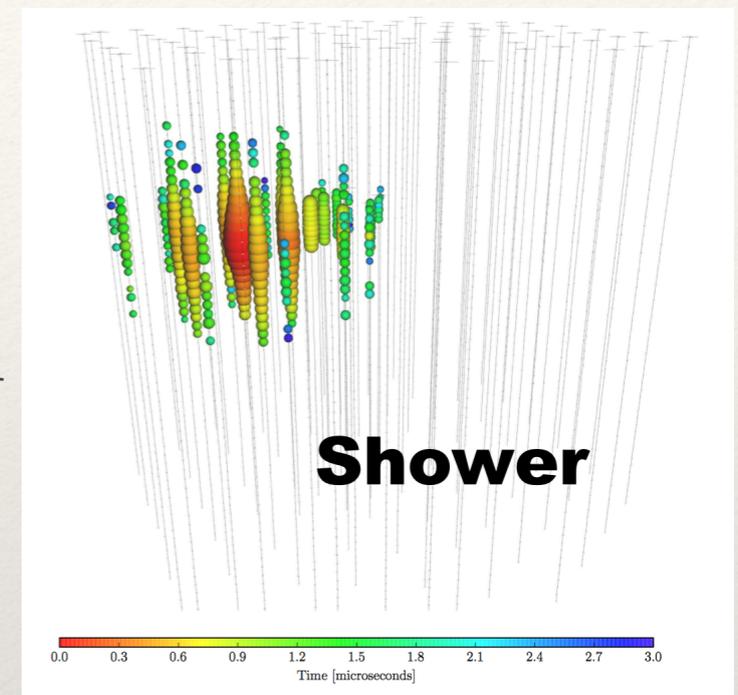
FIG. 2. The neutrino flux at  $E_\nu = 100 \text{ TeV}$  as a function of the Galactic longitude (left panel) and latitude (right panel) for the three different models considered for CR distribution. The solid black line corresponds to *Case A*, the blue dotted line corresponds to *Case B* and the red dashed line corresponds to *Case C*. The isotropic flux that reproduces IceCube HESE data is also reported for comparison with a purple dot-dashed line.

Nel caso C lo spettro dei raggi cosmici dipende dalla posizione. È l'unico scenario che dà un rate osservabile in IceCube, circa 1 evento l'anno.

# Come osservare i neutrini ?



Tracce: neutrini mu in CC  
Cascate: tutti gli altri processi

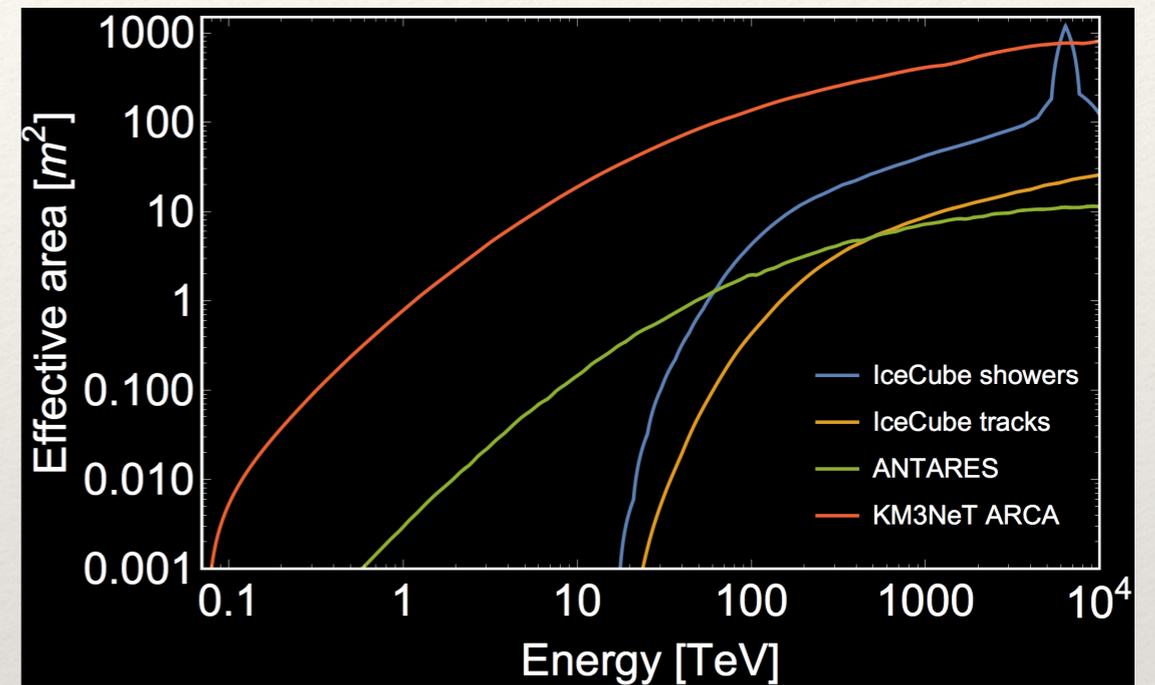
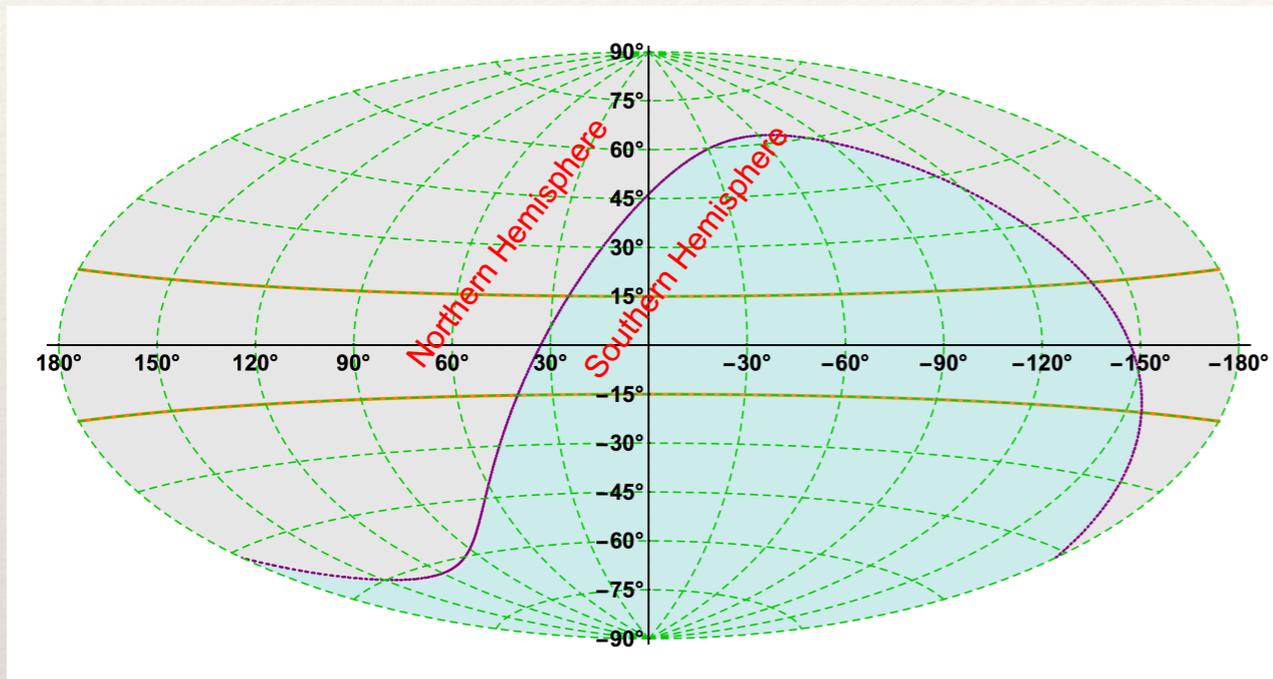


- Tracce: ottima risoluzione angolare, dell'ordine di  $1^\circ$  o meglio
- Cascate: cattiva risoluzione angolare, circa  $10^\circ$ -  $15^\circ$

**La miglior classe di eventi per identificare una sorgente è rappresentata dalle tracce**

# Confronto fra gli esperimenti

Come osservano la Galassia i diversi esperimenti ?



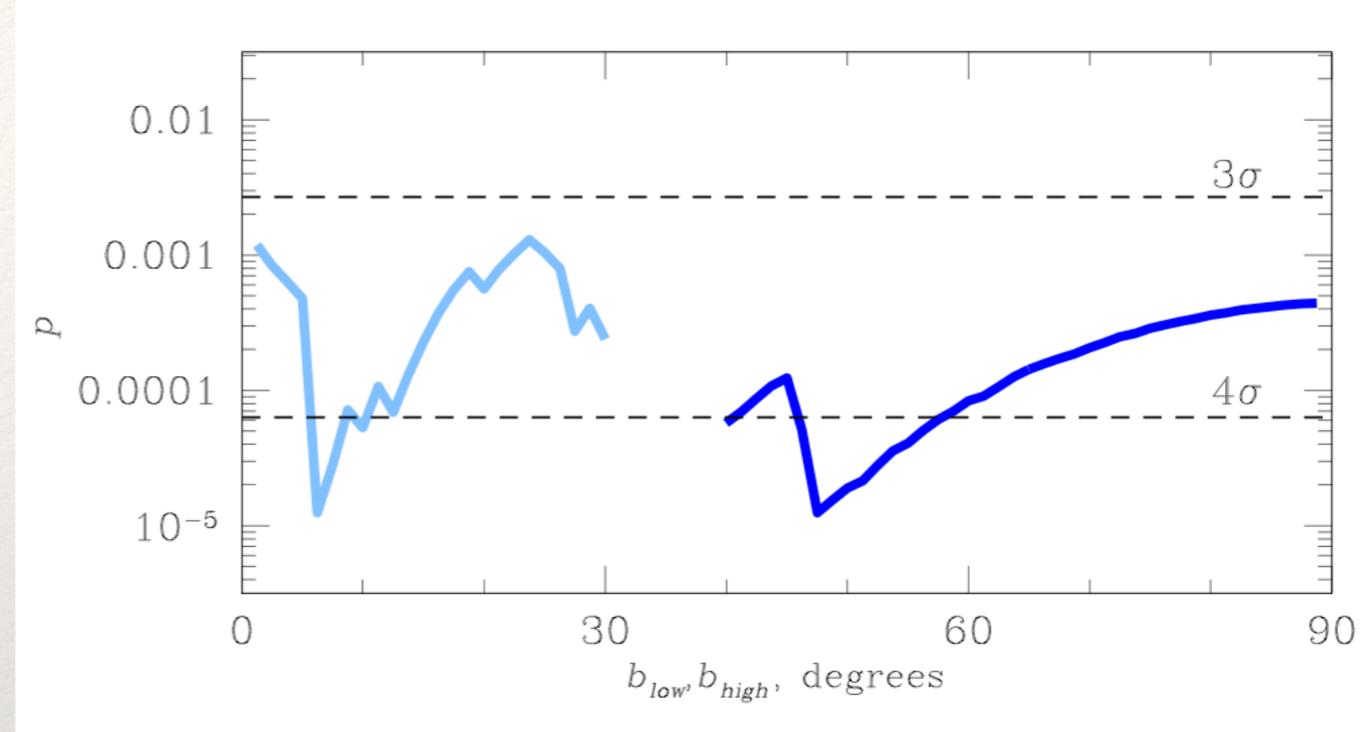
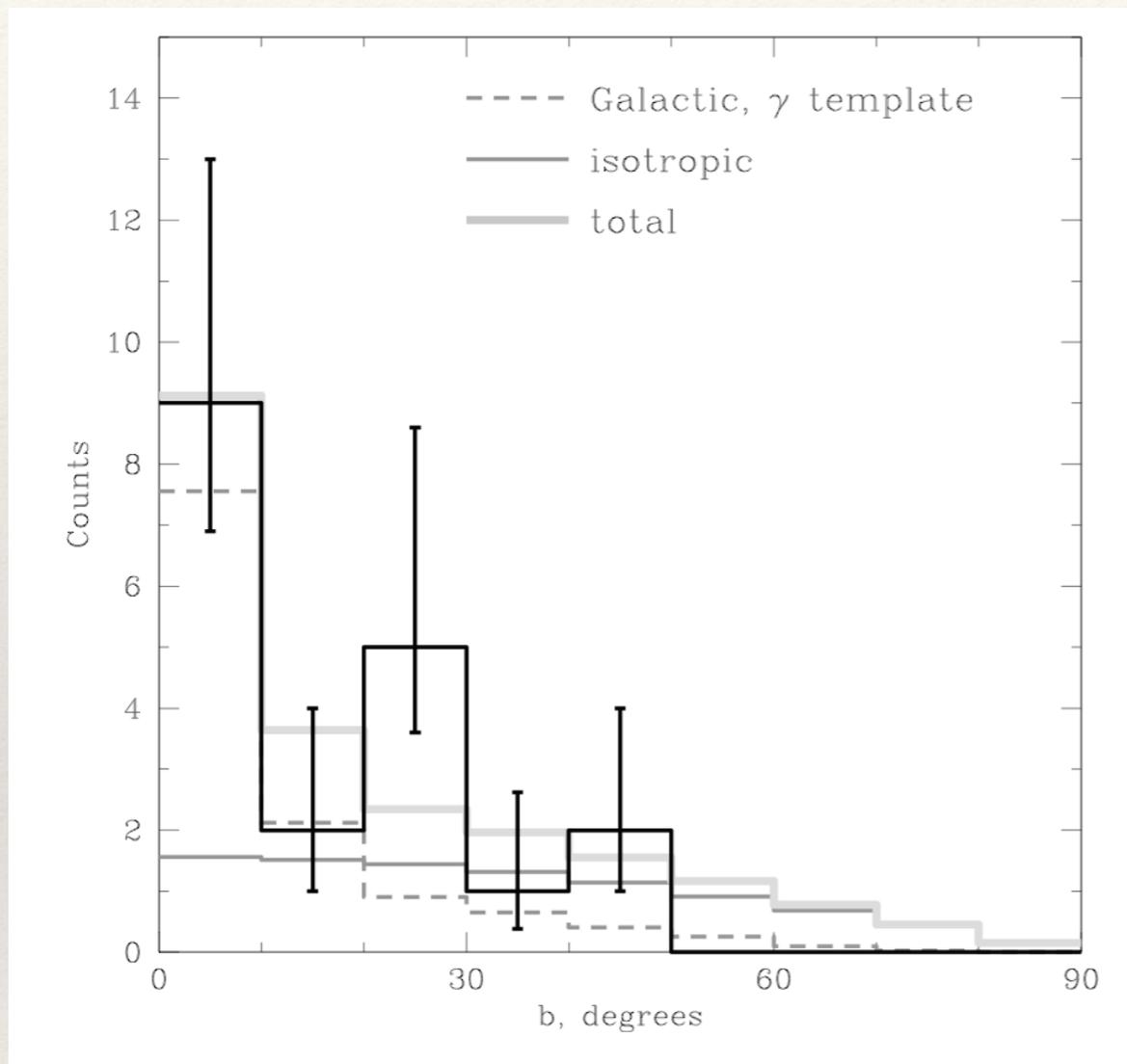
## Vantaggi

- ❖ **Antares:** buona posizione, osserva la Galassia con le tracce
- ❖ **IceCube:** grandi dimensioni, 1 Km cubo
- ❖ **KM3NeT:** buona posizione e grandi dimensioni

## Svantaggi

- ❖ **Antares:** piccole dimensioni
- ❖ **IceCube:** visibilità non ideale verso la Galassia
- ❖ **KM3NeT:** sarà completamente operativo nel 2020 !

# Asimmetria angolare



A **sx**: numero di eventi attesi in funzione della latitudine galattica. **Sopra**: significatività dell'anisotropia al variare dei bin

Neronov e Semikoz (Astroparticle Physics, 2015) notano un eccesso di eventi intorno al piano Galattico, quantificando la sua significatività intorno a 3 sigma. **Non ci sono dettagli sul flusso Galattico predetto**

---

# Asimmetria Nord-Sud

---

Gli eventi osservati dall'esperimenti IceCube sono ben interpretati da uno spettro power-law. Tuttavia c'è una asimmetria fra ciò che proviene dal cielo nord e dal cielo sud.

- ❖ Flusso dal cielo **sud** con eventi contenuti (HESE)

$$\alpha = 2.56^{+0.13}_{-0.12}$$

- ❖ Flusso dal cielo **nord** con eventi contenuti (HESE)

$$\alpha = 2.0^{+0.3}_{-0.4} \quad \text{IceCube collaboration, Astrophysical Journal 2015}$$

- ❖ Flusso dal cielo **nord** con muoni passanti

$$\alpha = 2.13 \pm 0.13 \quad \text{IceCube collaboration, arXiv, 2016}$$

La collaborazione IceCube attribuisce un livello di significatività di 3.3 sigma all'asimmetria registrata nei due emisferi.

# La componente Galattica - analisi spettrale

Nel cielo sud si osserva un eccesso di eventi rispetto al cielo nord, pur tenendo in considerazione l'assorbimento della Terra (23 osservati, 15 attesi)

- ❖ Ipotizziamo che il flusso da nord sia puramente extragalattico;
- ❖ Il flusso da sud sia misto, extragalattico + Galattico;
- ❖ Usiamo la componente Galattica per interpretare l'eccesso di eventi da sud

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

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

Otteniamo che la normalizzazione della componente Galattica a 100 TeV è data da:  $\longrightarrow N_g = 2.1_{-1.3}^{+2.4} \times \frac{10^{-18}}{\text{GeV cm}^2 \text{ sec sr}}$

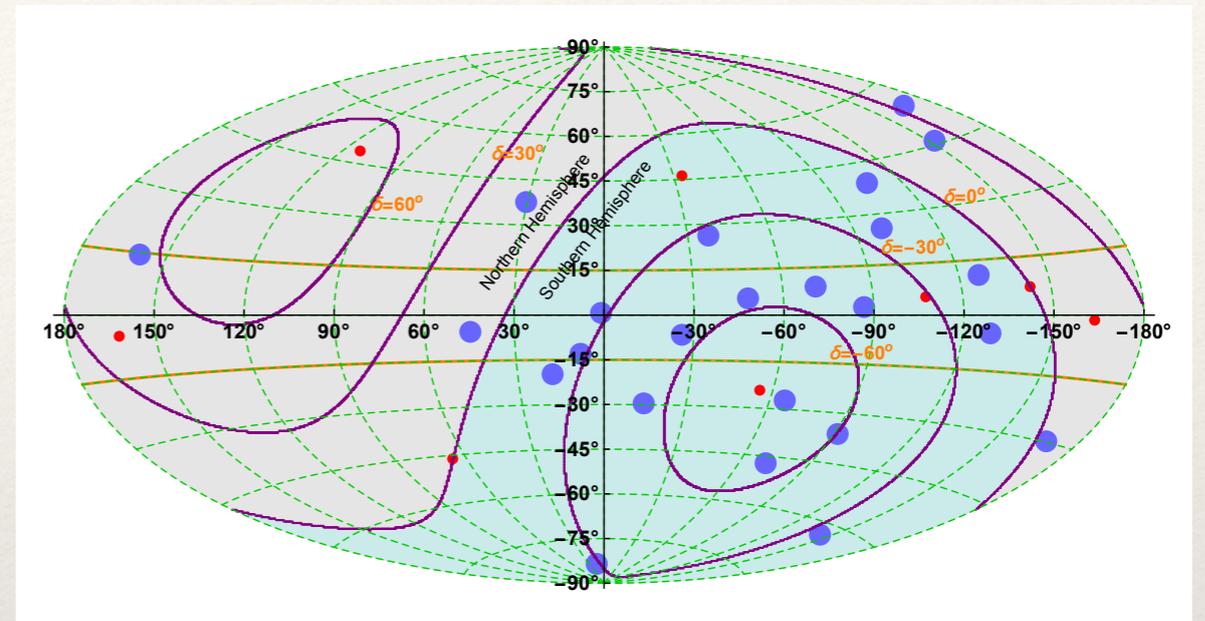
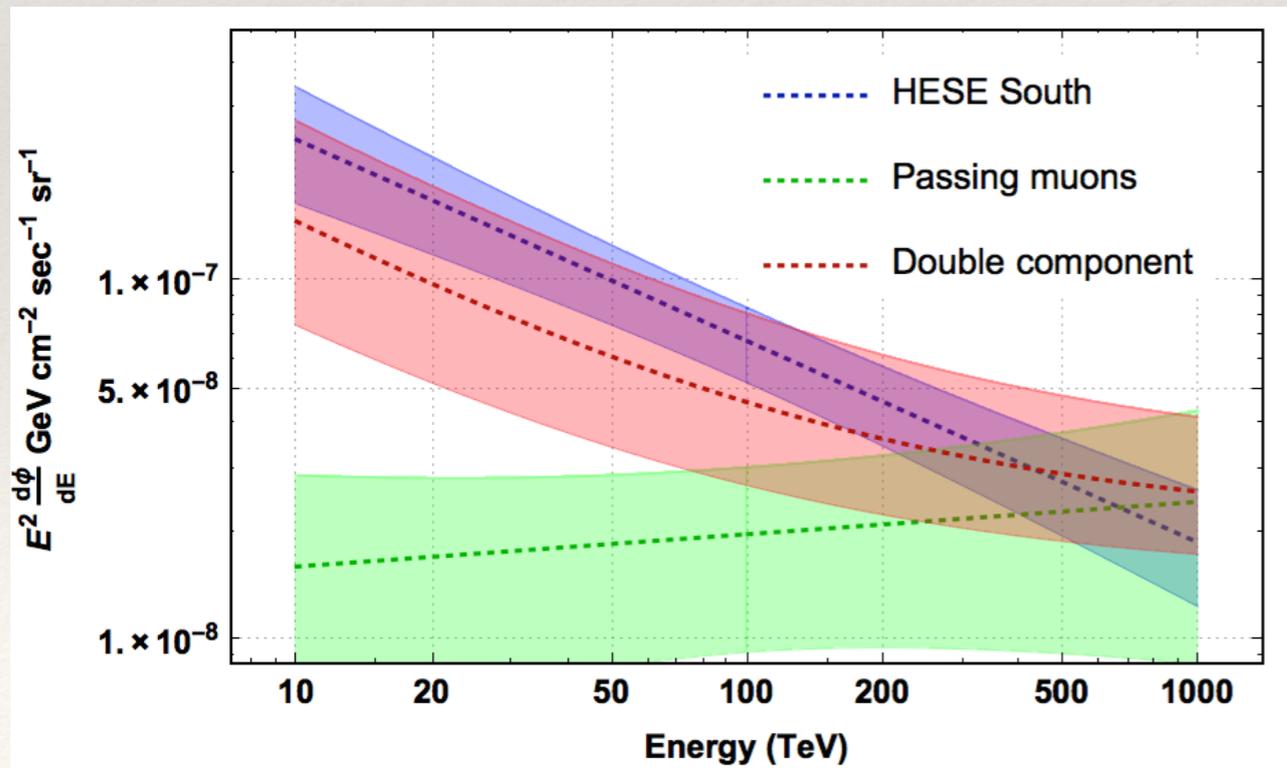
**La componente Galattica può essere responsabile di circa il 15% degli eventi totali visti in IceCube.**

**Palladino - Vissani, APJ, 2016**

# La componente Galattica - analisi angolare

Analisi angolare: componente isotropa extragalattica + componente Galattica gaussiana, piccata su 0 e con st.dev.  $10^\circ$ .

La componente Galattica è responsabile di circa l'11%  $\pm$  6% degli eventi totali



*Mappa degli HESE sopra i 60 TeV, in coordinate galattiche*

Analisi spettrale ed angolare sono indipendenti fra loro. Esse danno risultati compatibili.

A sinistra lo spettro a due componenti proposto in **Palladino - Vissani, APJ, 2016**

# Modello galattico realistico

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  $35^\circ$  può essere visto anche da nord.

Extension $\delta$	[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.*

IceCube ha visibilità ideale per declinazioni positive, mentre Antares e KM3NeT hanno visibilità ideali per declinazioni negative (in particolare minori di  $-30^\circ$ ).

# Il ruolo dei prompt

I neutrini atmosferici **prompt**, prodotti dal decadimento di mesoni pesanti, hanno indice spettrale pari a 2.7

A livello spettrale potrebbero essere degeneri con la componente Galattica, ma non lo sono per quanto riguarda la distribuzione angolare.

	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

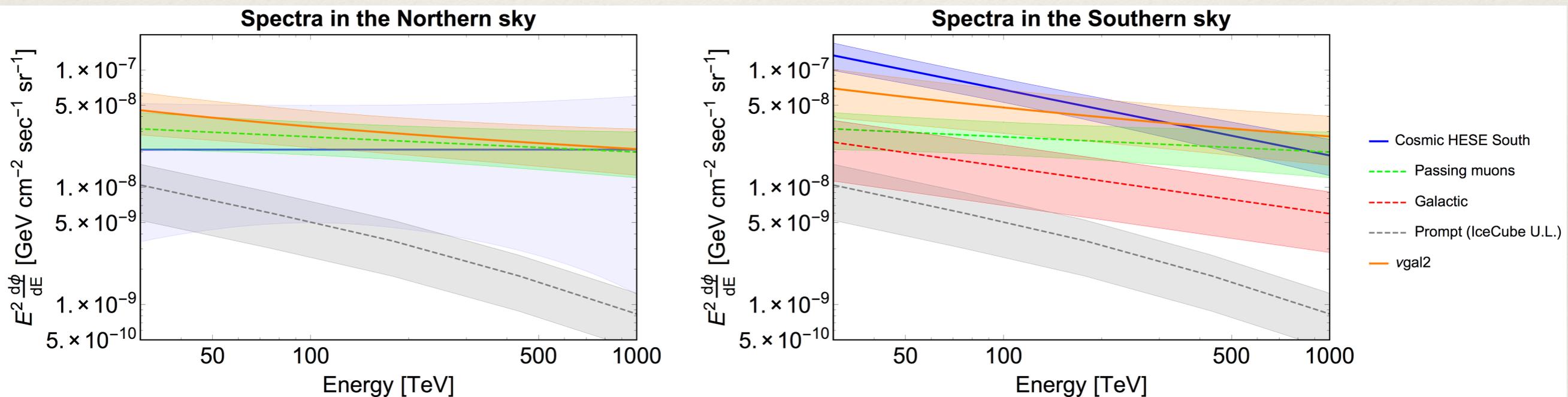
**Palladino-Spurio-Vissani,  
arXiv:1701152,2016**

**Un modello a più componenti è ragionevole dal punto di vista teorico ed è in accordo con i dati sperimentali**

# Modello a più componenti

## Un modello a più componenti spiega:

- differenza fra il flusso proveniente da nord e da sud;
- eccesso di eventi nel cielo sud;
- accumulo di eventi vicino il piano Galattico



In figura flusso galattico con indice spettrale 2.4

Uno flusso di neutrini Galattici, con indice spettrale compreso fra 2.4 - 2.7, è sufficiente per dare ragione dei dati sperimentali.

# Predizioni del modello a più componenti

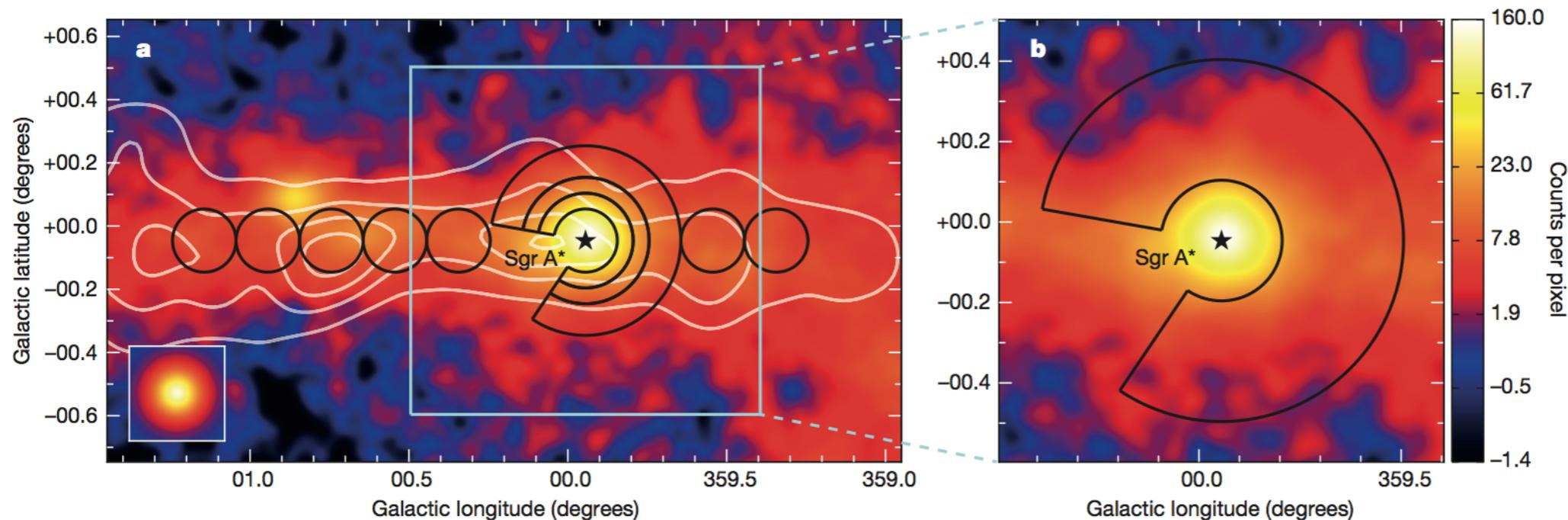
Palladino-Spurio-Vissani, arXiv:1701152, 2016

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

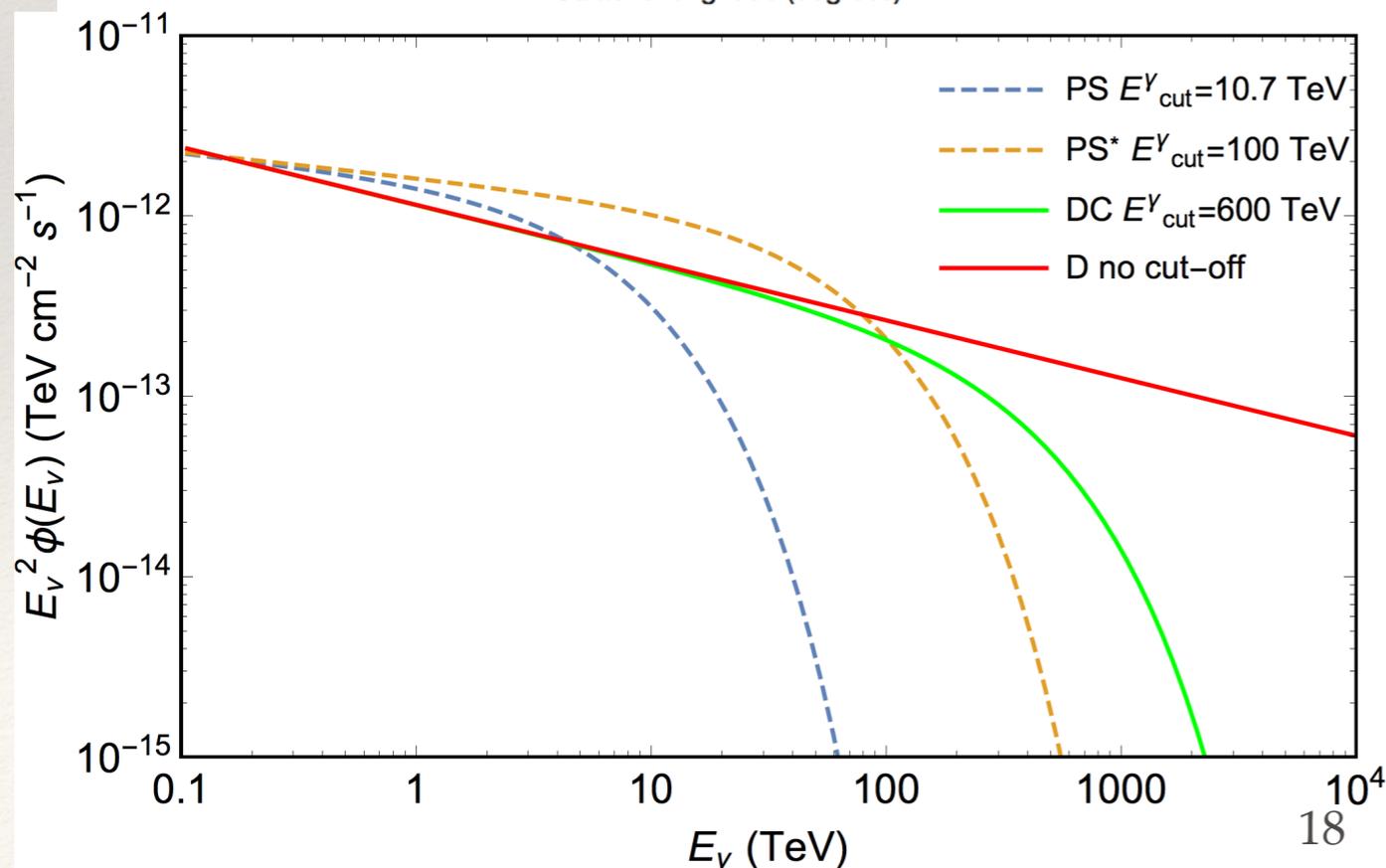
Le predizioni sono in accordo entro 1 sigma con i dati sperimentali.

**Ci sono diversi indizi a favore di una componente Galattica di neutrini di alta energia. Adesso è possibile verificarne l'esistenza e nel caso misurarla.**

# Neutrini dal centro galattico



HESS Collaboration,  
Nature 2016



- ❖ Possibilità di osservare 1-2 eventi l'anno in KM3NeT Arca.
- ❖ Rate atteso molto basso in IceCube (0.1 per anno) e Antares (0.01 per anno).

Celli-Palladino-Vissani, arXiv, 2016

---

# Conclusioni

---

- ❖ L'esistenza di gamma sul piano Galattico suggerisce l'esistenza di neutrini galattici di alta energia;
- ❖ Il flusso di gamma rappresenta un upper limit per il flusso di neutrini;
- ❖ IceCube non è nella posizione giusta per osservare la Galassia, ma ha accumulato indizi sperimentali a supporto dei neutrini galattici (asimmetria Nord-Sud, accumulo di eventi intorno al piano Galattico) e ne può fornire altri. Ci sono indizi sperimentali a supporto dei neutrini galattici (asimmetria Nord-Sud, accumulo di eventi intorno al piano Galattico)
- ❖ Un modello a più componenti (extragalattico + Galattico + prompt) si accorda meglio con i dati sperimentali globali rispetto alla singola legge di potenza.
- ❖ Le misure di KM3NeT saranno molto importanti per stabilire l'esistenza di neutrini Galattici di alta energia.

---

---

*Grazie per l'attenzione*