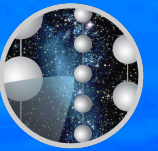


# Astrofísica de neutrinos con altas energías

Ignacio Taboada  
Georgia Institute of Technology



ICECUBE



LaCoNGA

# Material para hoy

Resumen de la presentación anterior

Detección de neutrinos en IceCube

IceCube

Señales y ruido en IceCube

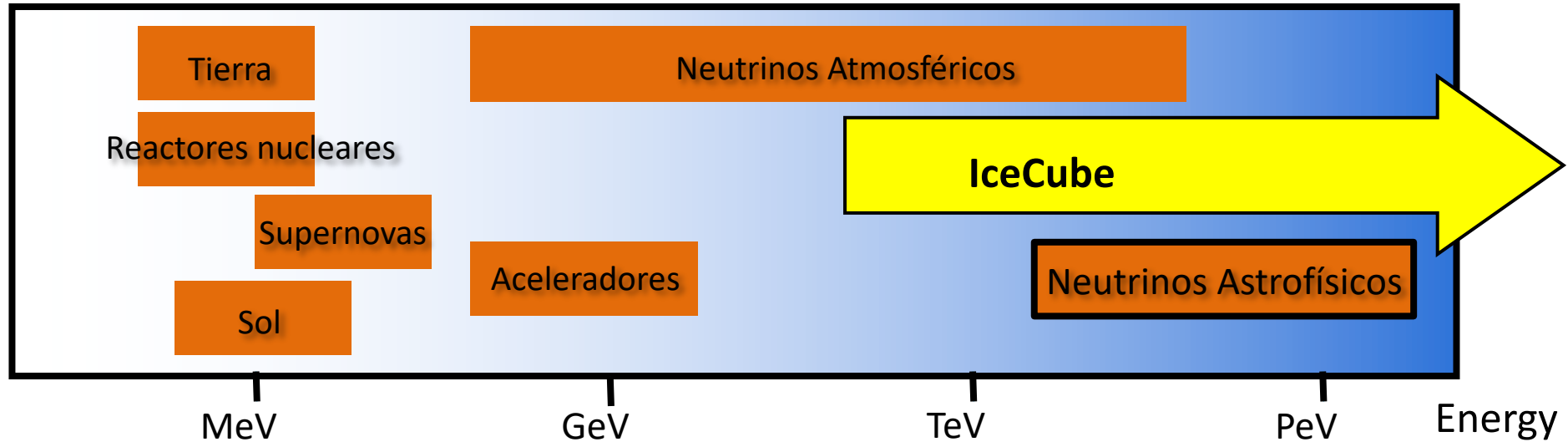
Observación de neutrinos astrofísicos con IceCube

Búsqueda de fuentes puntuales de neutrinos

El blazar TXS 0506+056: primer candidato de fuente de neutrinos

El futuro: IceCube-Gen2

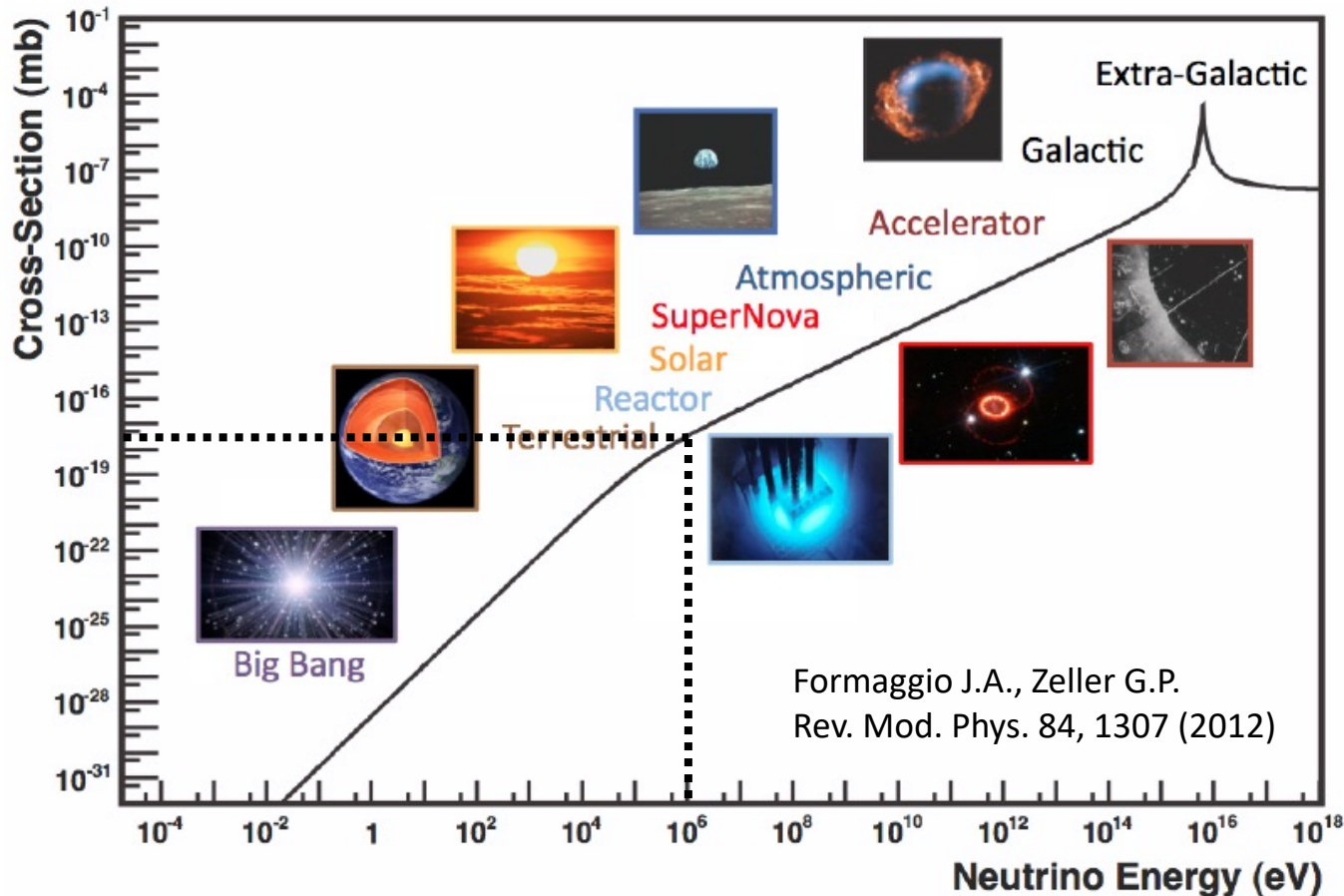
# Telescopios de neutrinos



## Instrumentos

<b>IceCube</b>	<b>Operando desde 2010</b>	<b>0.85 km<sup>3</sup></b>
ANTARES	Operando desde 2007	0.01 km <sup>3</sup>
KM3Net-ARCA	En construcción	Objetivo: 1 km <sup>3</sup>
Baikal-GVD	En construcción	Objetivo: 0.4 km <sup>3</sup>
P-ONE	Propuesto	Objetivo: 1 km <sup>3</sup>
IceCube-Gen2	Propuesto	Objetivo: 8 km <sup>3</sup>

# Sección eficaz neutrinos-materia



$$\sigma = \frac{1}{n\lambda} \quad n = N_A A \rho$$

En la Tierra, el flujo de neutrinos solares es:

$$10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Tomemos  $10^6$  eV como la energía típica. La sección eficaz es  $2 \times 10^{-18} \text{ mb} = 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$

Para el plomo:

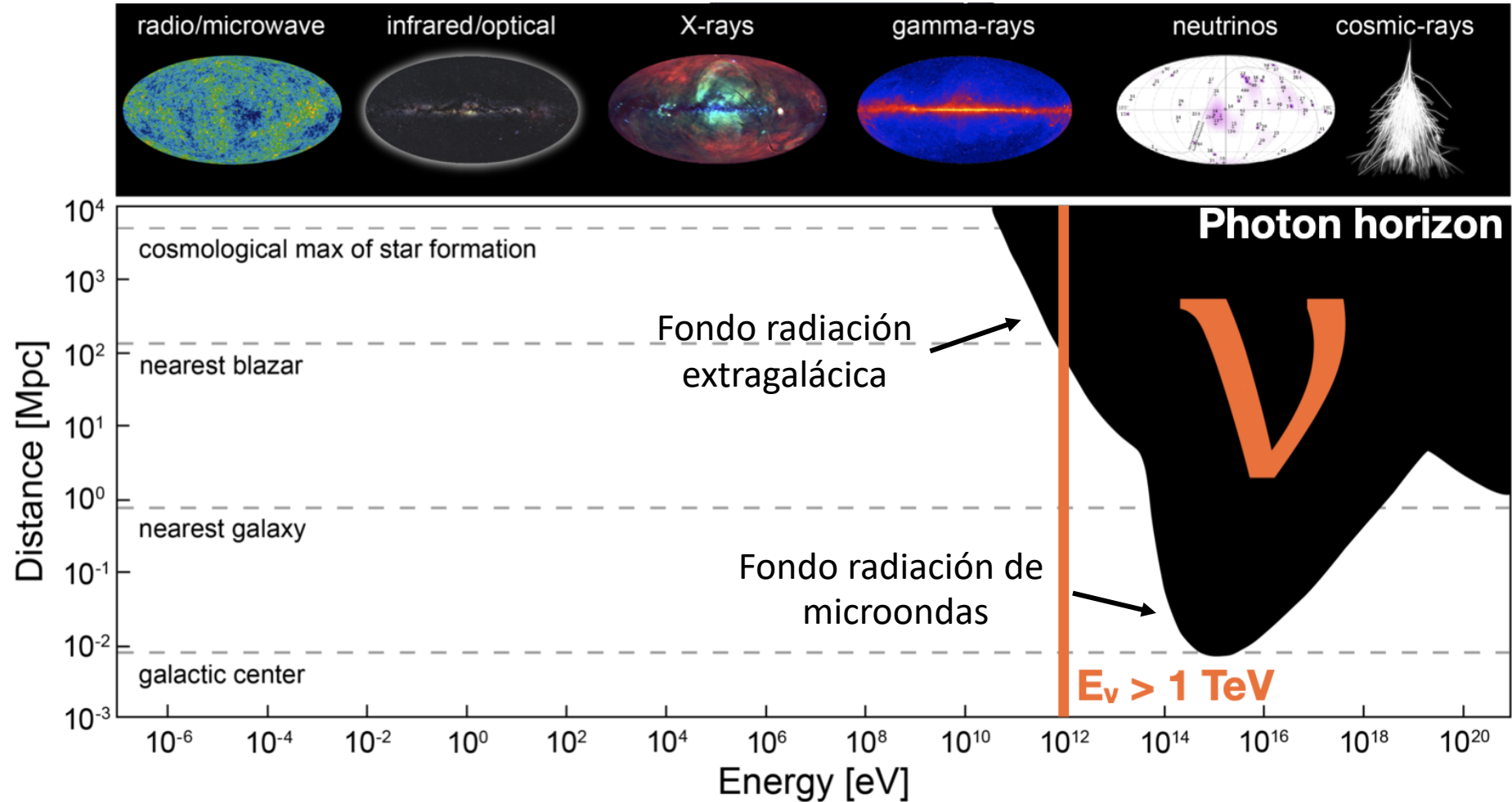
$$A = 82 ; \rho = 11.34 \text{ gr/cm}^3$$

El camino libre medio en plomo es:

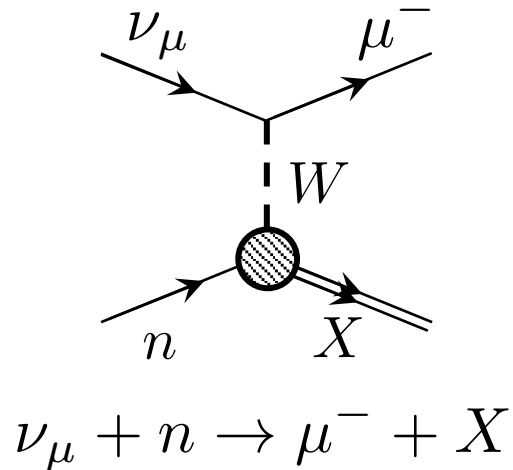
$$9 \times 10^{17} \text{ cm} = 1 \text{ año-luz}$$

La detección de neutrinos require instrumentos enormes

# El Universo es opaco a Altas Energías



# Interacciones de neutrinos con la materia (incompleto)



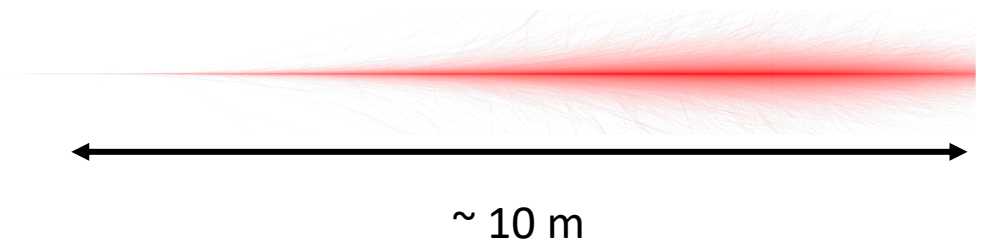
## Trazas de muones

Sólo los muones, viajan por  $>1$  km en roca/hielo

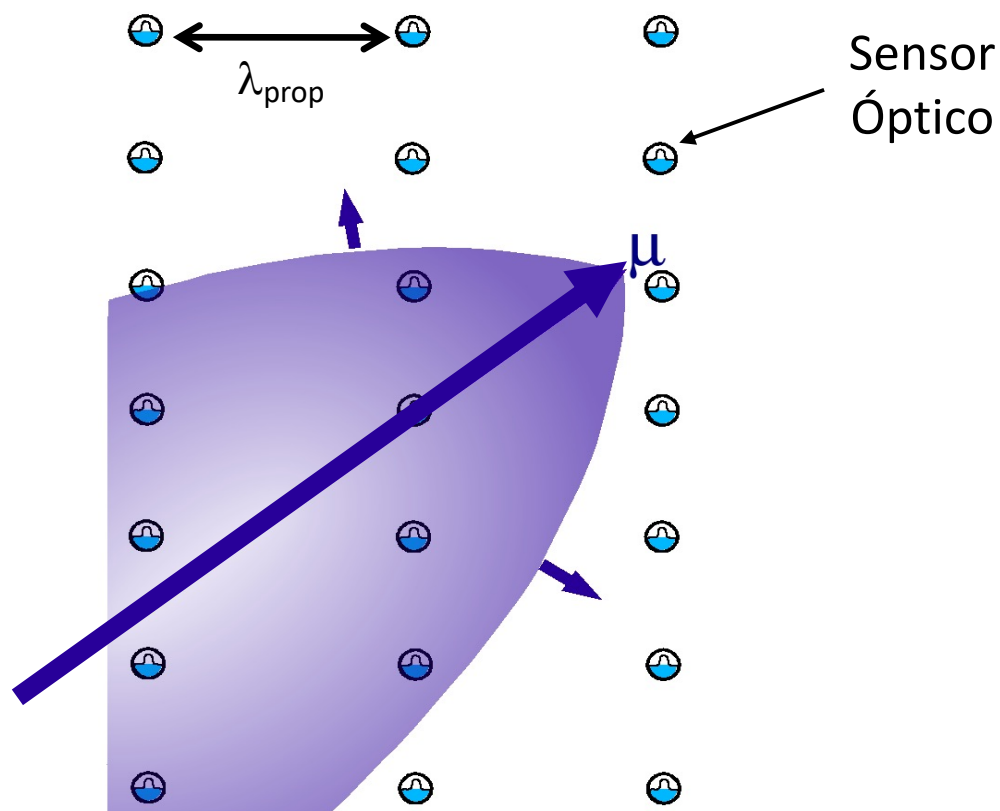
\* Hay excepciones, pero ignoremos esto hoy.

Todas las demás partículas (electrones, piones, etc.) interactúan en  $\sim 40$  cm (en agua) y producen 2 o más partículas

## Cascadas

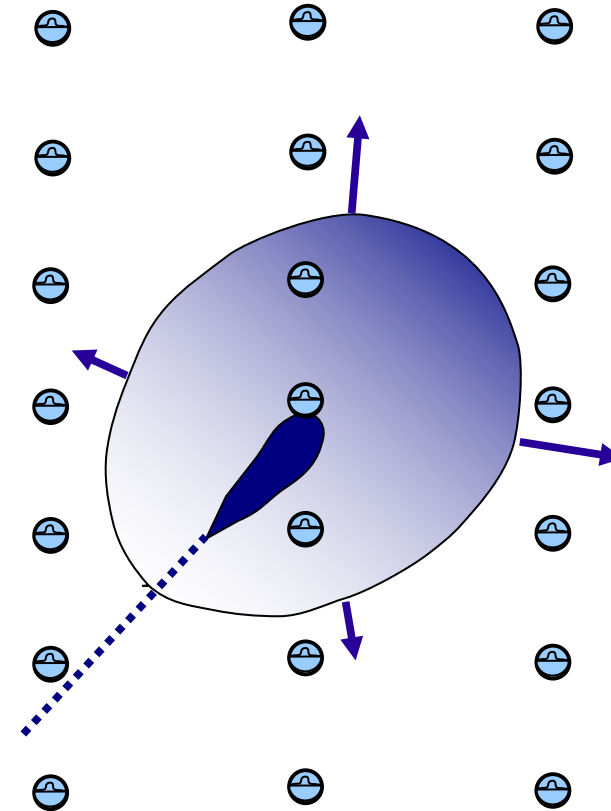


# Operación de telescopios de neutrinos



**Trazas de muones**

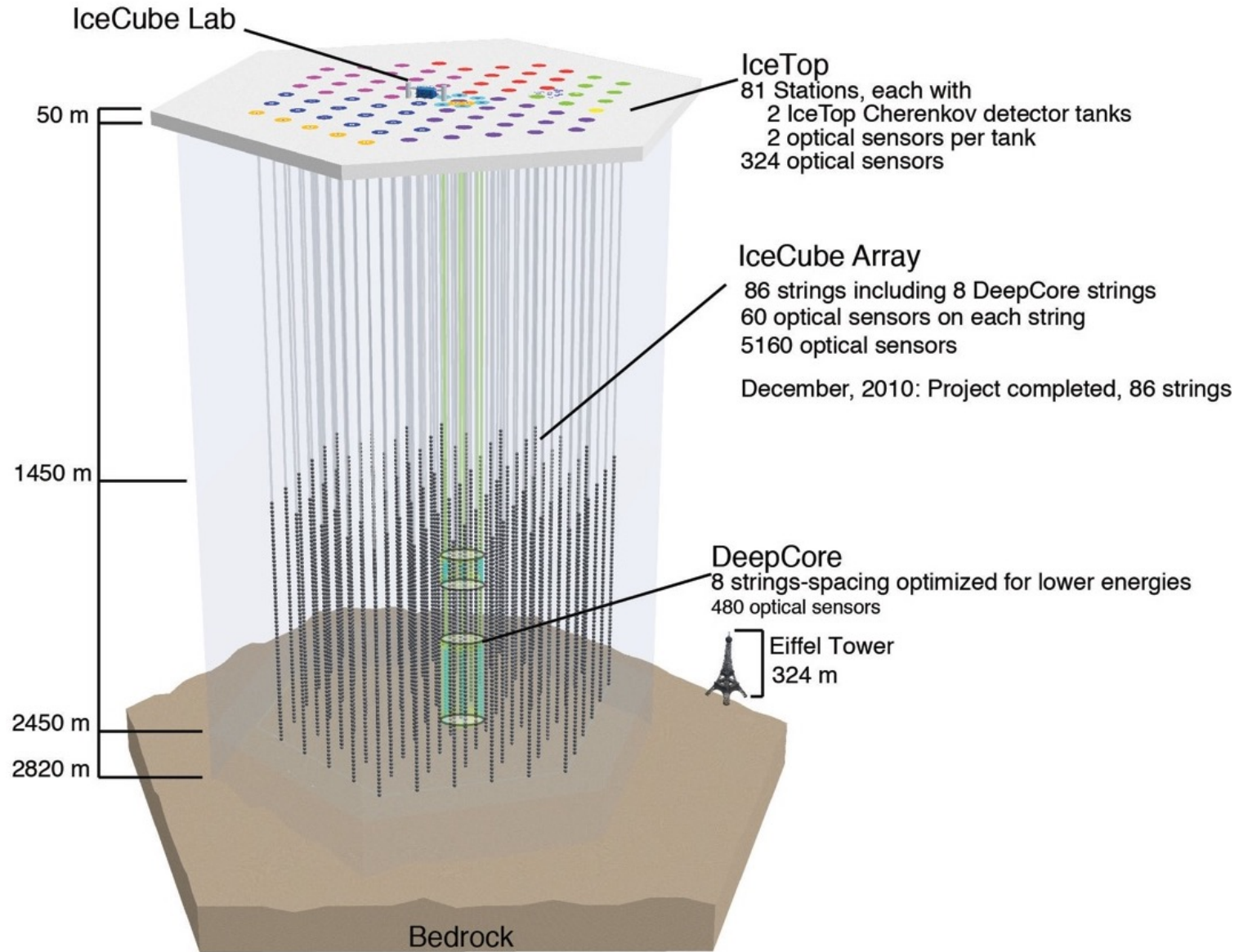
Buena resolución angular -> Astronomía  
Pobre correlación entre energía  
observada y energía del neutrino



**cascadas**

Pobre resolución angular  
Buena correlación entre energía  
observada y energía del neutrino

# IceCube





# THE ICECUBE COLLABORATION

**AUSTRALIA**  
University of Adelaide

**BELGIUM**  
Université libre de Bruxelles  
Universiteit Gent  
Vrije Universiteit Brussel

**CANADA**  
SNOLAB  
University of Alberta–Edmonton

**DENMARK**  
University of Copenhagen

**GERMANY**  
Deutsches Elektronen-Synchrotron  
ECAP, Universität Erlangen-Nürnberg  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Ruhr-Universität Bochum  
RWTH Aachen University  
Technische Universität Dortmund  
Technische Universität München  
Universität Mainz  
Universität Wuppertal  
Westfälische Wilhelms-Universität  
Münster

**JAPAN**  
Chiba University

**NEW ZEALAND**  
University of Canterbury

**REPUBLIC OF KOREA**  
Sungkyunkwan University

**SWEDEN**  
Stockholms Universitet  
Uppsala Universitet

**SWITZERLAND**  
Université de Genève

**UNITED KINGDOM**  
University of Oxford

**UNITED STATES**  
Clark Atlanta University  
Drexel University  
Georgia Institute of Technology  
Lawrence Berkeley National Lab  
Marquette University  
Massachusetts Institute of Technology  
Michigan State University  
Ohio State University  
Pennsylvania State University  
South Dakota School of Mines and  
Technology

Southern University  
and A&M College  
Stony Brook University  
University of Alabama  
University of Alaska Anchorage  
University of California, Berkeley  
University of California, Irvine  
University of Delaware  
University of Kansas  
University of Maryland  
University of Rochester  
University of Texas at Arlington

University of Wisconsin–Madison  
University of Wisconsin–River Falls  
Yale University

**FUNDING AGENCIES**

Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS) Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen (FWO-Vlaanderen)	Federal Ministry of Education and Research (BMBWF) German Research Foundation (DFG) Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)	Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Knut and Alice Wallenberg Foundation Swedish Polar Research Secretariat	The Swedish Research Council (VR) University of Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF) US National Science Foundation (NSF)
--	---	---	--

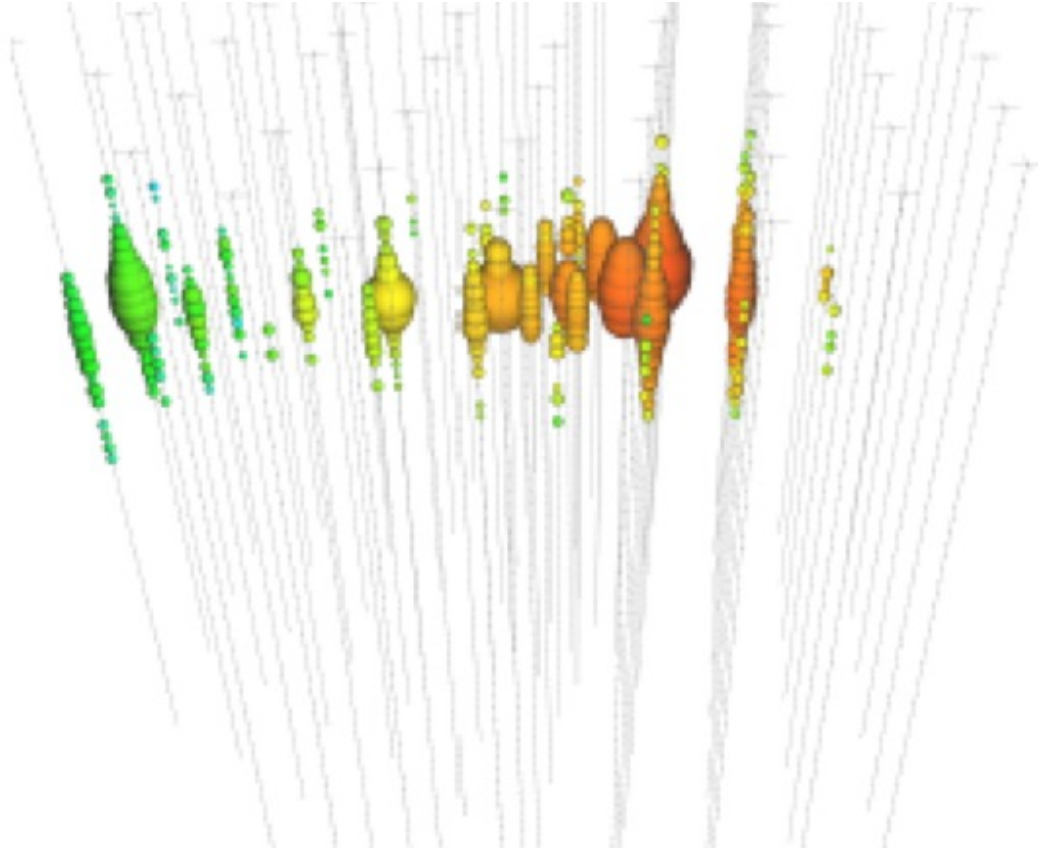


icecube.wisc.edu

# Señales de neutrinos

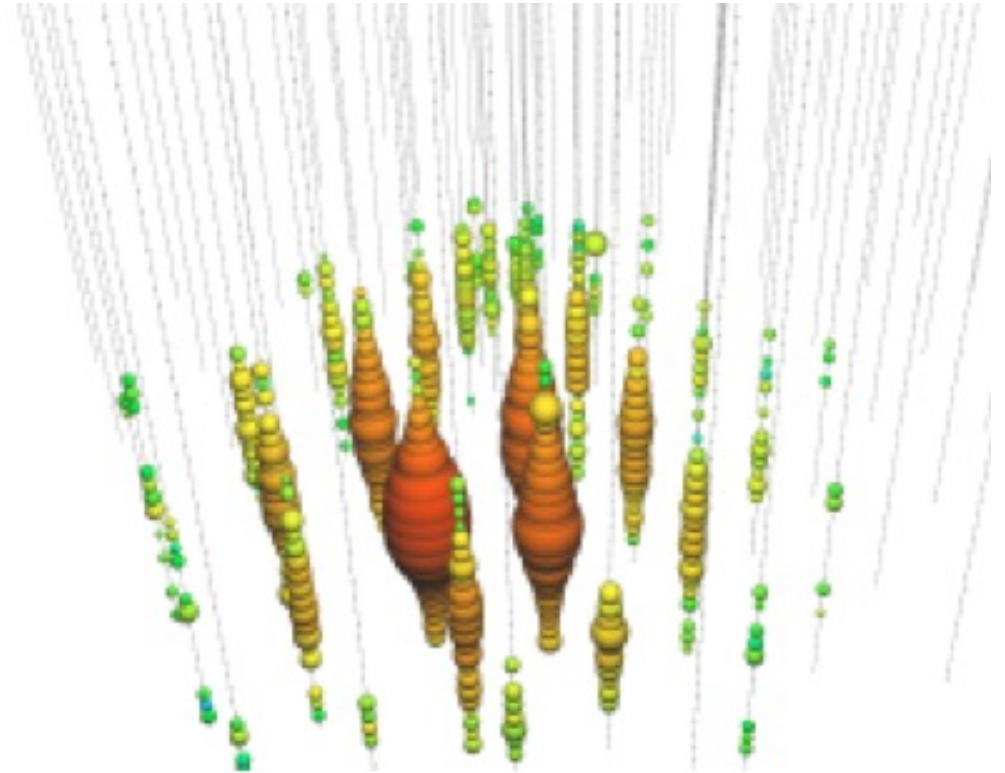
## Trazas

Resolución angular  $\approx 0.5^\circ$



## Cascadas

Resolución angular  $\approx 5-10^\circ$



# Señales y ruido

Encontrar neutrinos:

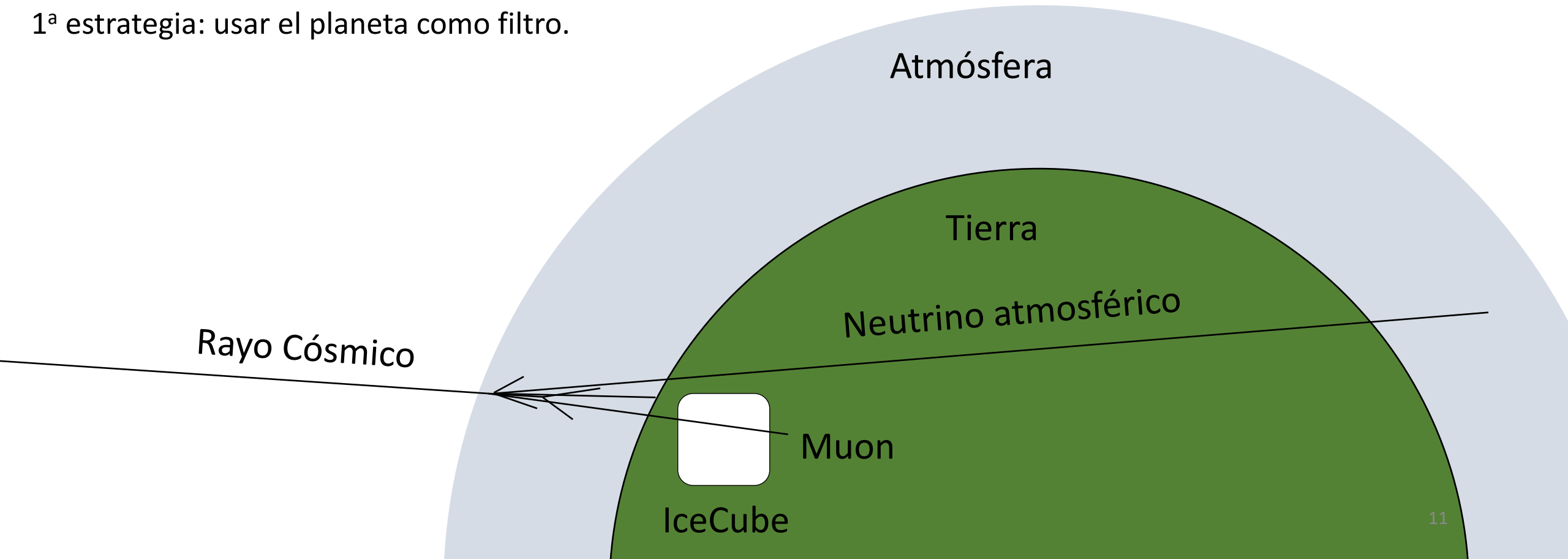
Un problema estadístico con cantidad masiva de datos

1ª estrategia: usar el planeta como filtro.

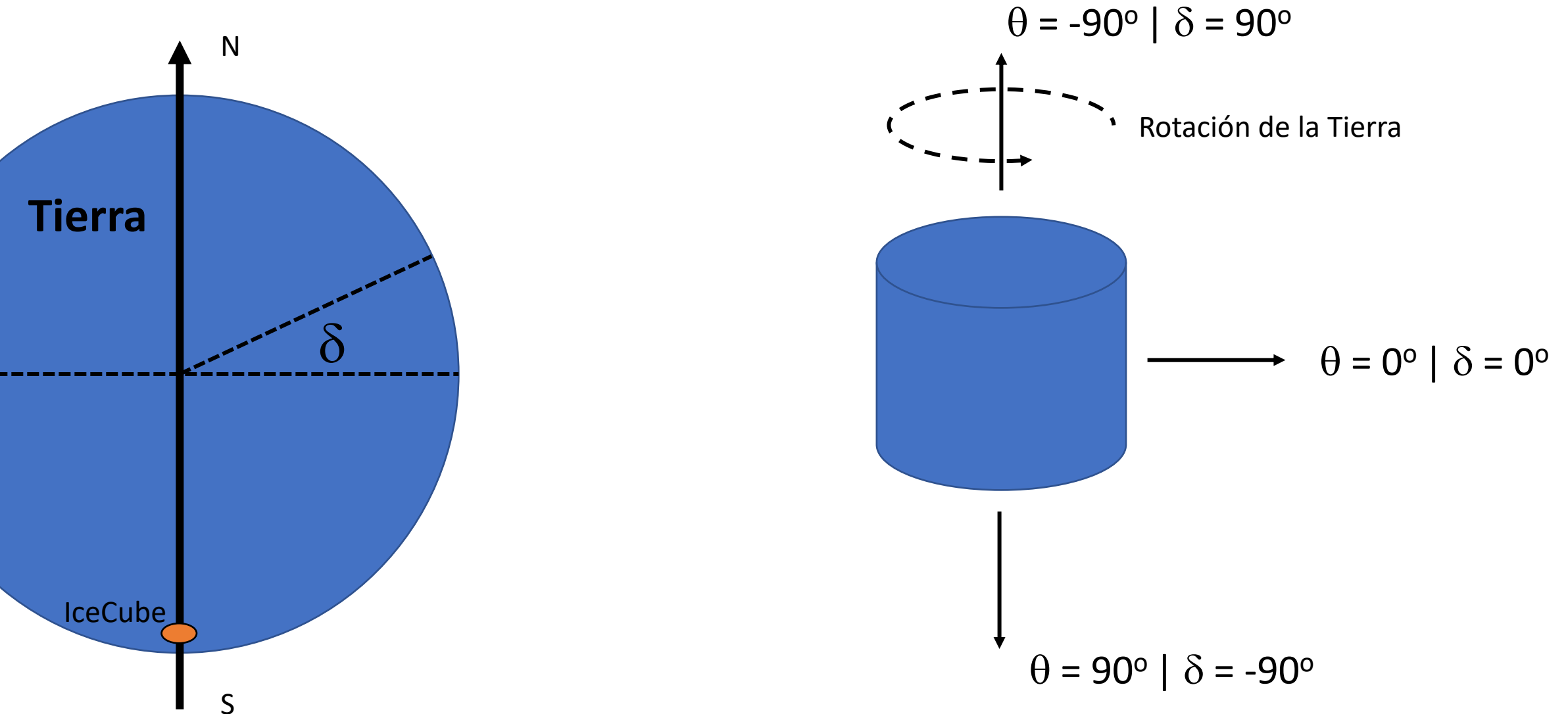
$\sim 10^{11}$  muones / año

$\sim 10^5$  neutrinos atmosféricos / año

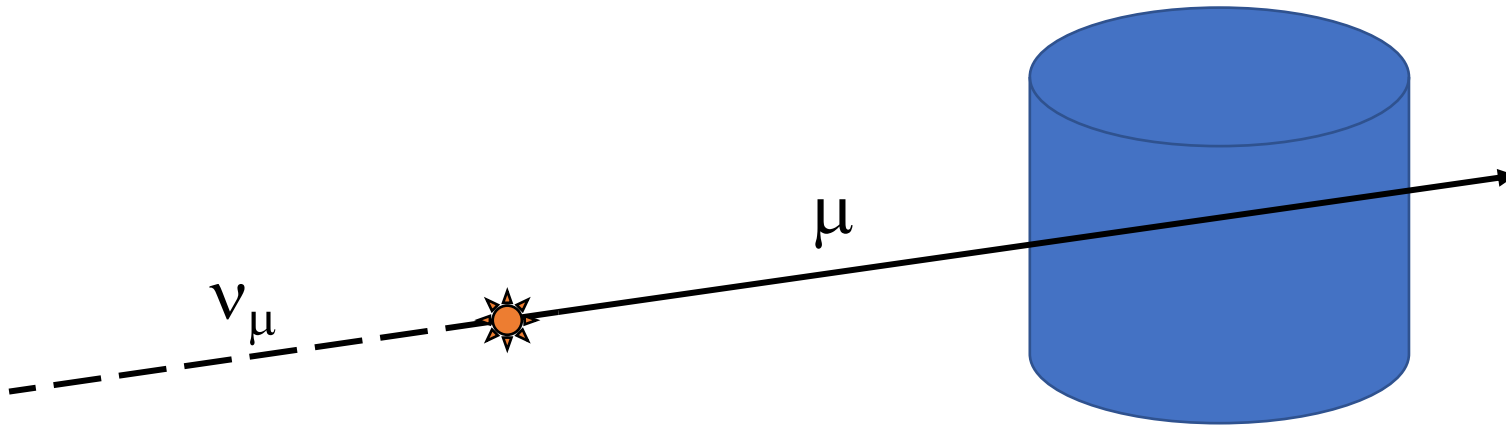
$\sim 10^3$  neutrinos astrofísicos / año



# Sistema de Coordenadas en IceCube

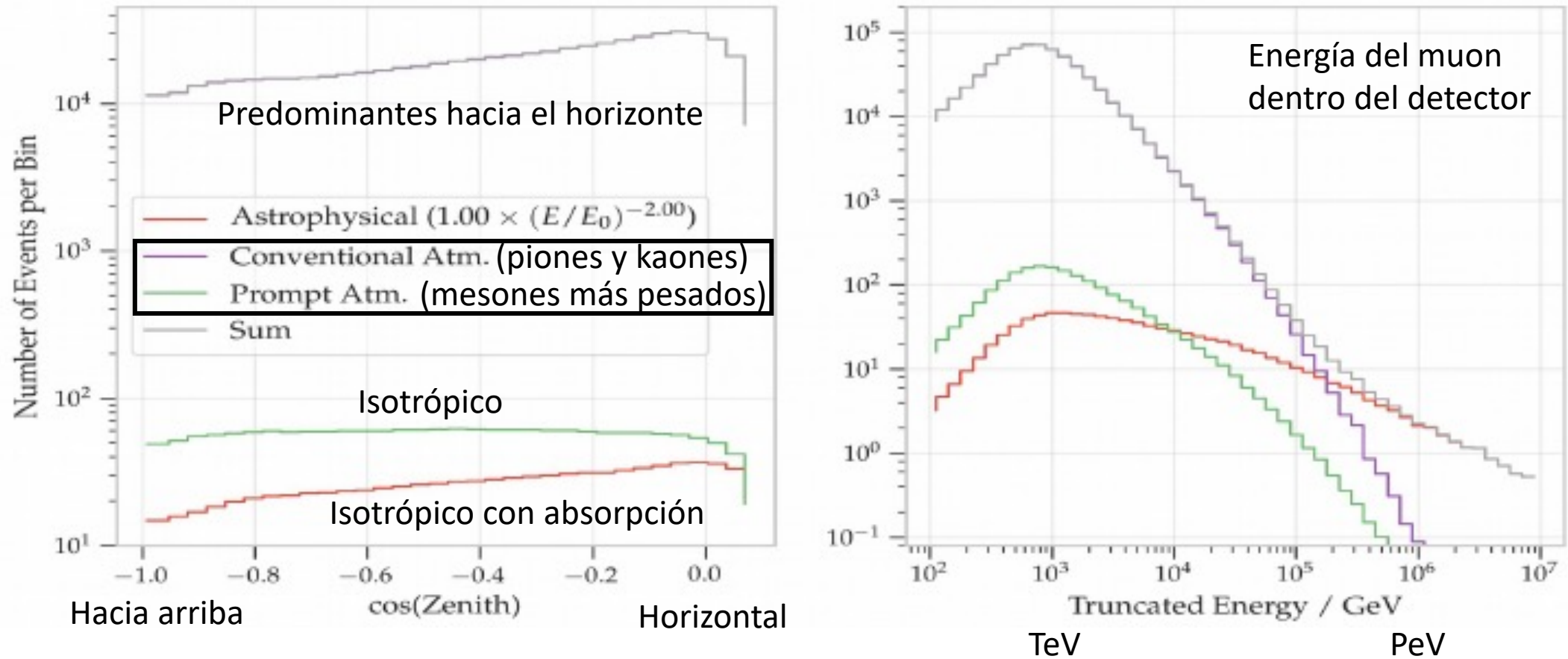


# Observación de $\nu_\mu$ astrofísicos (trazas)



Utilizar trazas aumenta el tamaño efectivo del detector.

# Observación de $\nu_\mu$ astrofísicos (trazas)

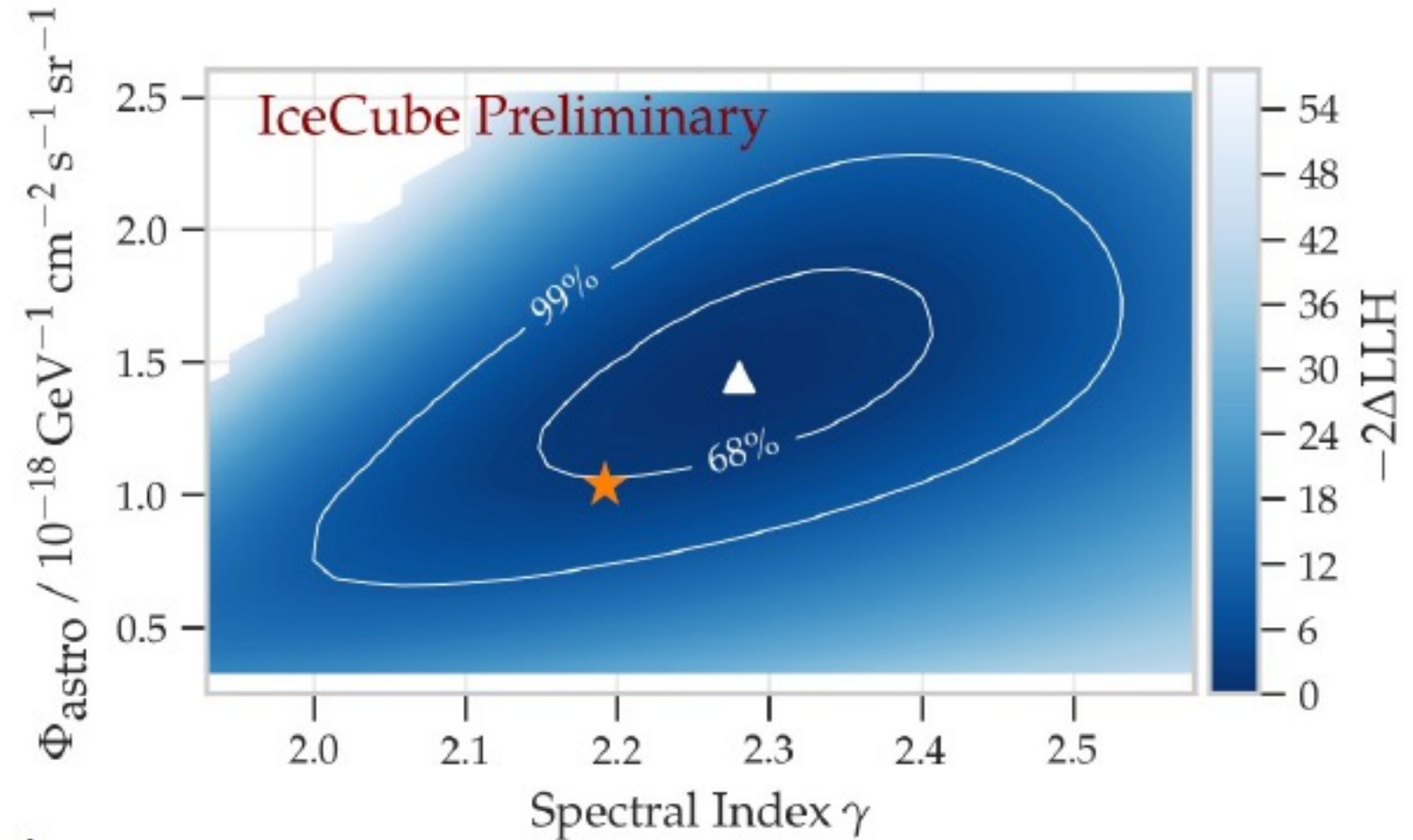


Las distribuciones de neutrinos en dirección zenital y en energía son distintas.

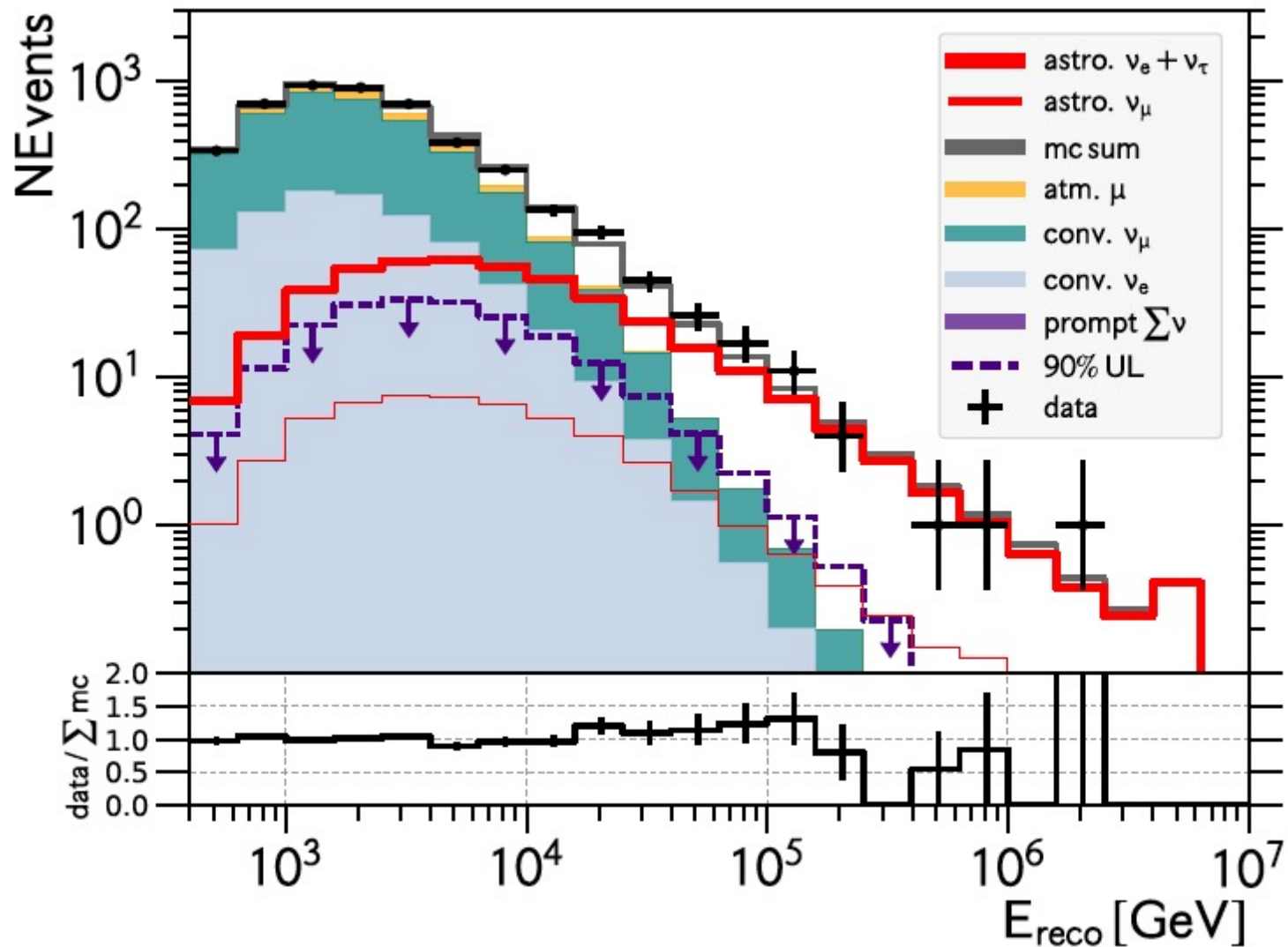
# Observación de $\nu_\mu$ astrofísicos (trazas)

$$\frac{d\phi}{dE} = \phi_{astro} \left( \frac{E}{100 \text{ TeV}} \right)^{-\alpha}$$

La expectativa de espectro debido a aceleración de Fermi es una ley de potencias con  $\alpha \sim 2$  a  $3$ .



# Observación de neutrinos astrofísicos con cascadas



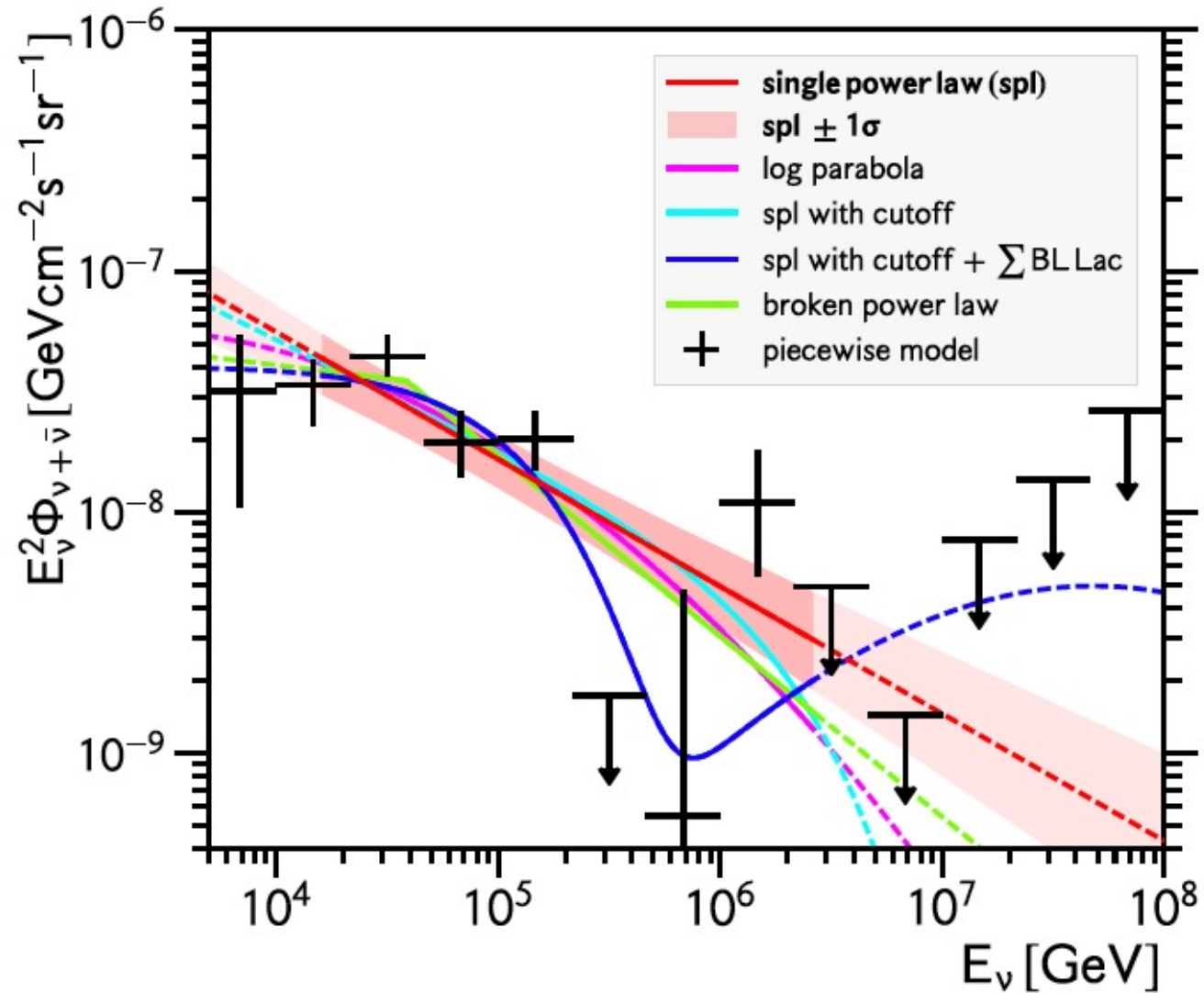
El mayor componente de ruido son  $\nu_e$  de origen atmosférico.

Principalmente sensible a cascadas astrofísicas debido a  $\nu_e$  y  $\nu_\tau$

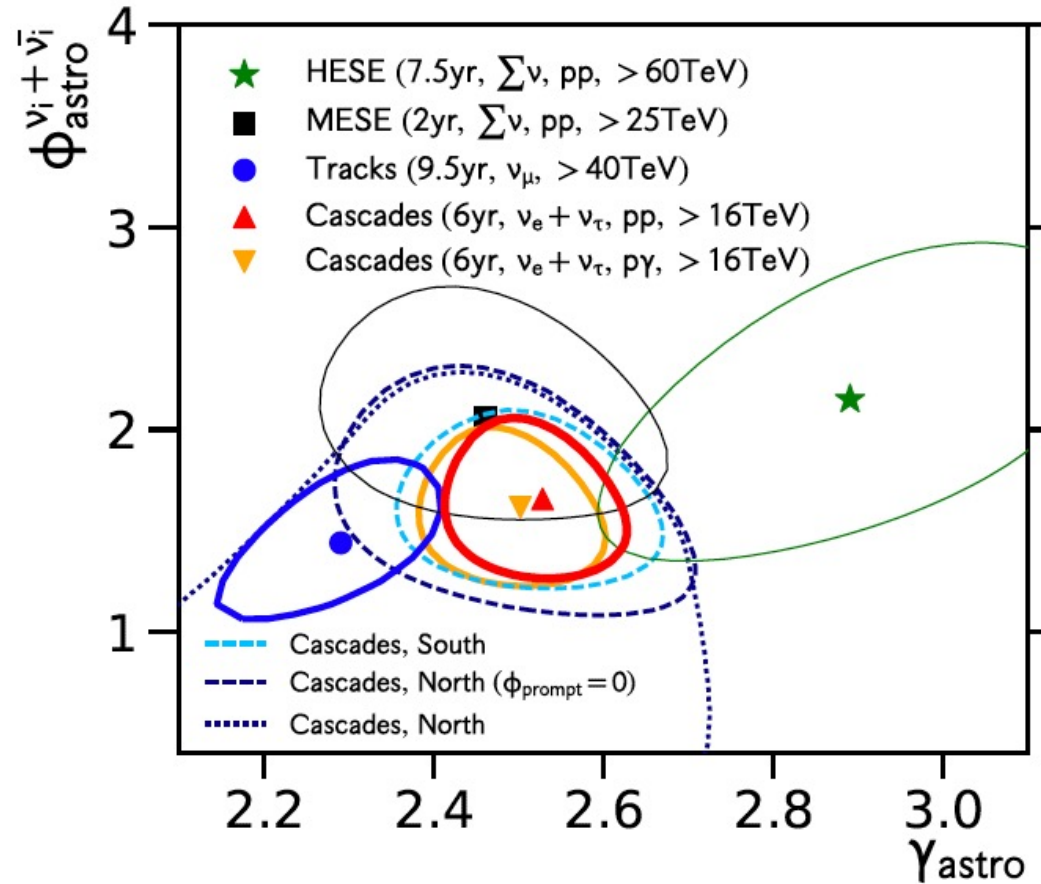
Este método permite extender las observaciones a energías más bajas que con trazas. (Pero es limitado en la otra dirección)



# Observación de neutrinos astrofísicos con cascadas



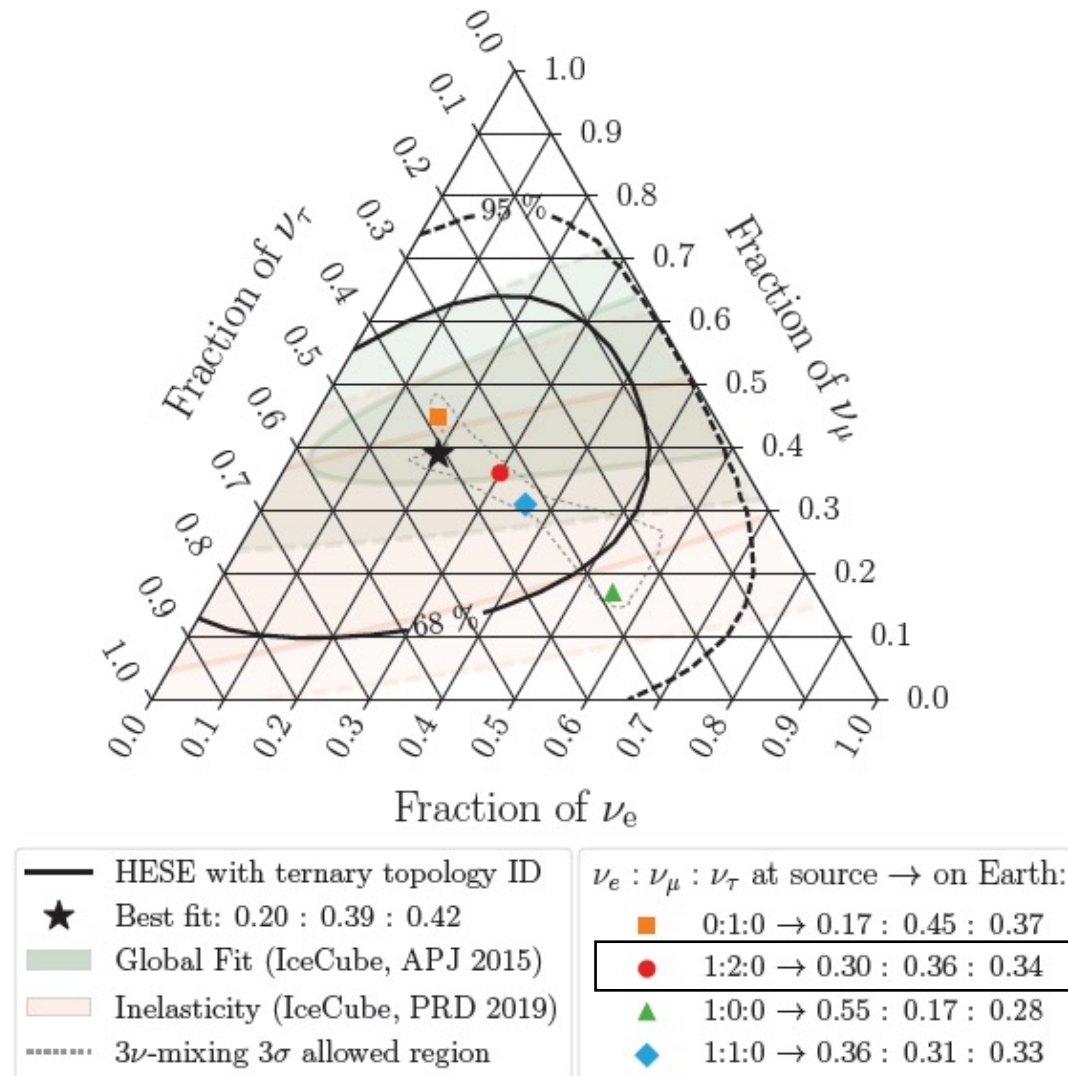
# Comparación de métodos



Aparente inconsistencia en el espectro reconstruido.

La medición “HESE”, a pesar de ser el primer método, es el peor método para medir el espectro.

# Tasa de flujos de neutrinos astrofísicos



# Observación de neutrinos astrofísicos

Consistentes con isotropía en dirección -> Origen extragaláctico

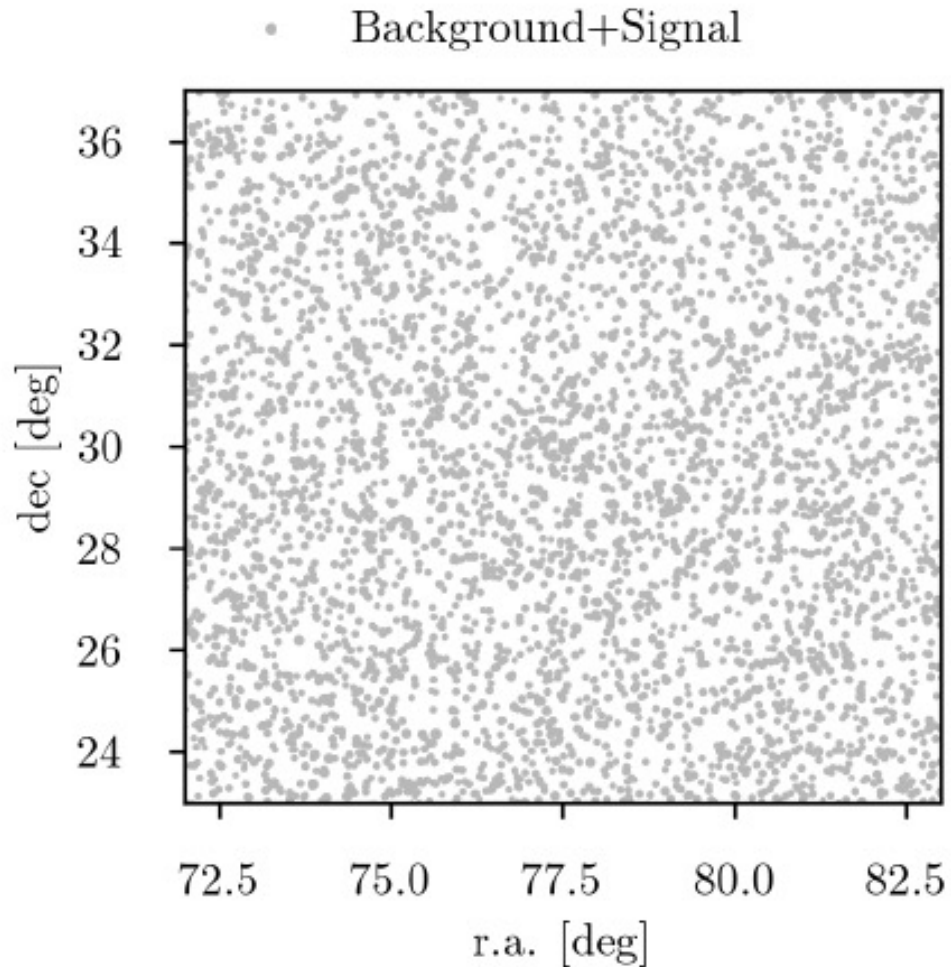
Consistentes con  $\Phi_{\nu_e + \bar{\nu}_e} : \Phi_{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu} : \Phi_{\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau} = 1 : 1 : 1$

La observación se ha hecho con varios métodos, incluyendo: trazas, cascadas y eventos de todo tipo que se inician dentro del detector.

Aparente incompatibilidad entre mediciones con varios métodos:

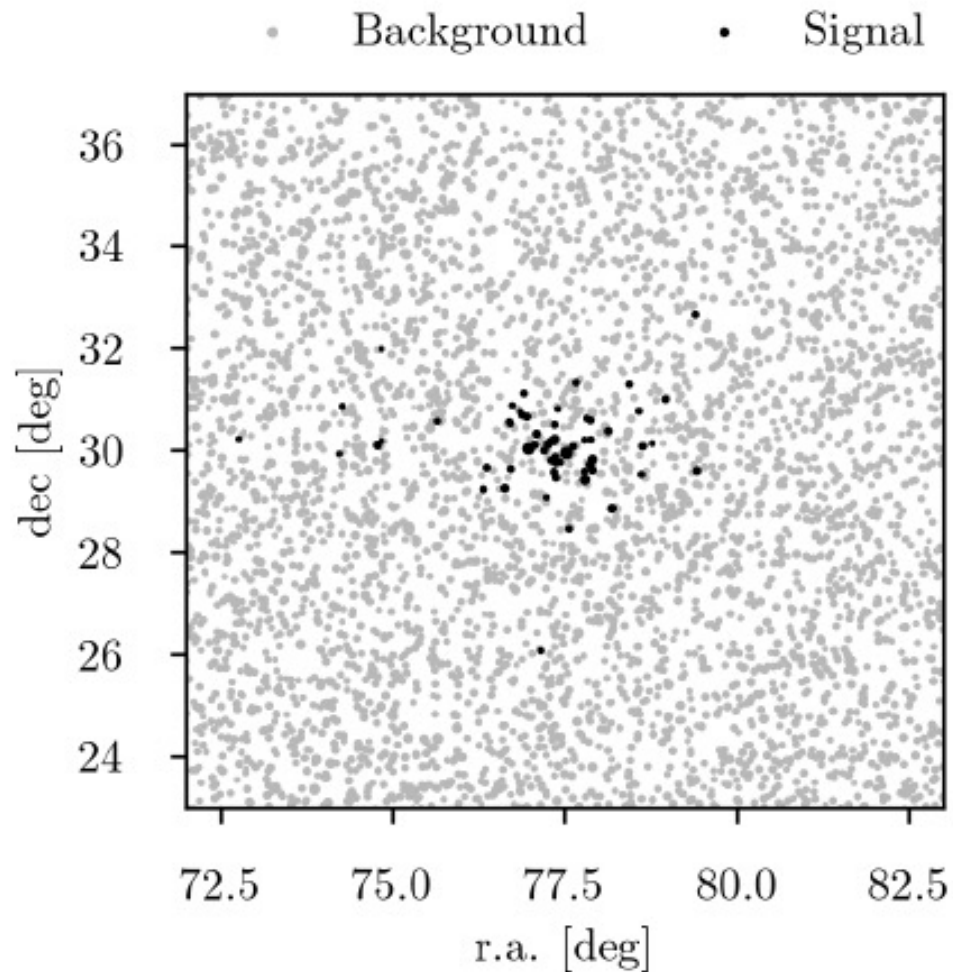
- El método HESE es menos confinable
- El espectro no es una ley de potencias y cada método tiene cobertura de energía distinta.

# Fuentes puntuales de neutrinos



Esta región del cielo incluye una simulación de 9 años de observación de ruido (neutrinos atmos.) y señal puntual

# Fuentes puntuales de neutrinos

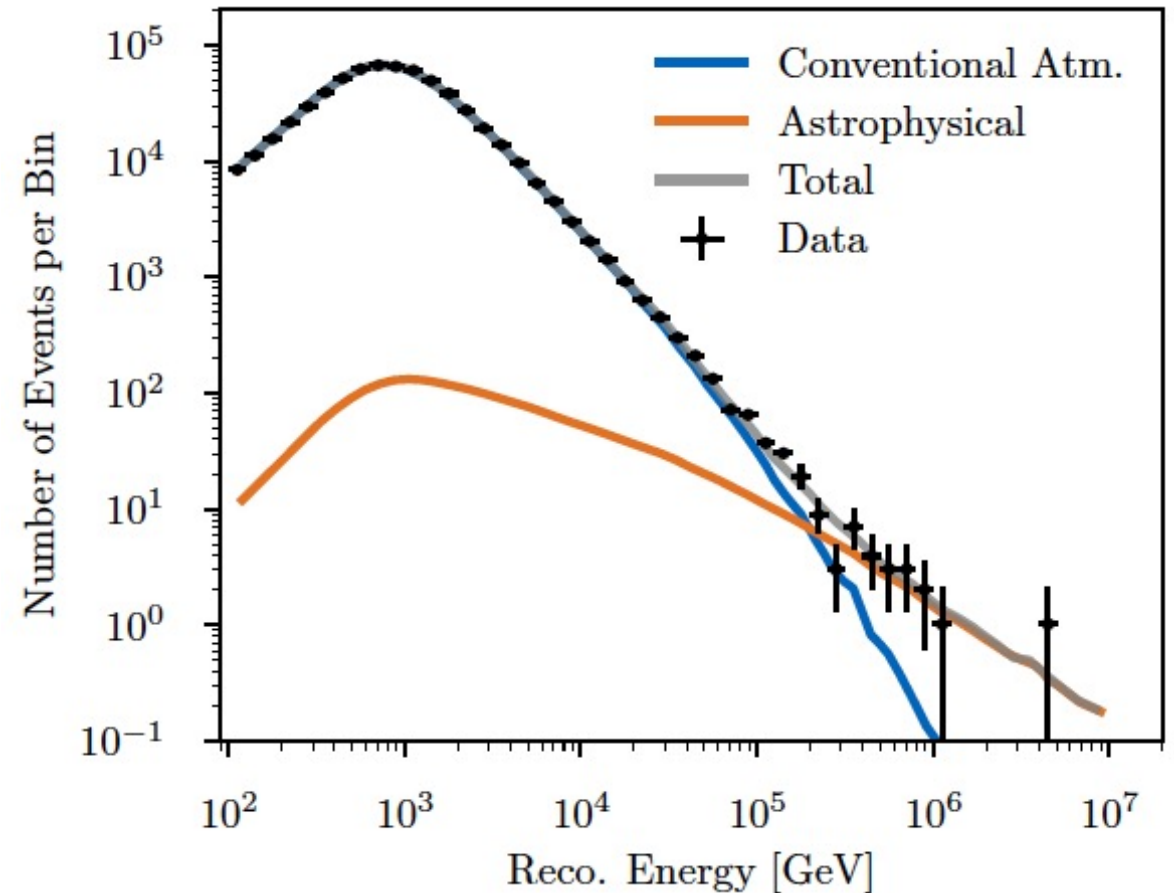


Esta región del cielo incluye una simulación de 9 años de observación de ruido (neutrinos atmos.) y señal puntual.

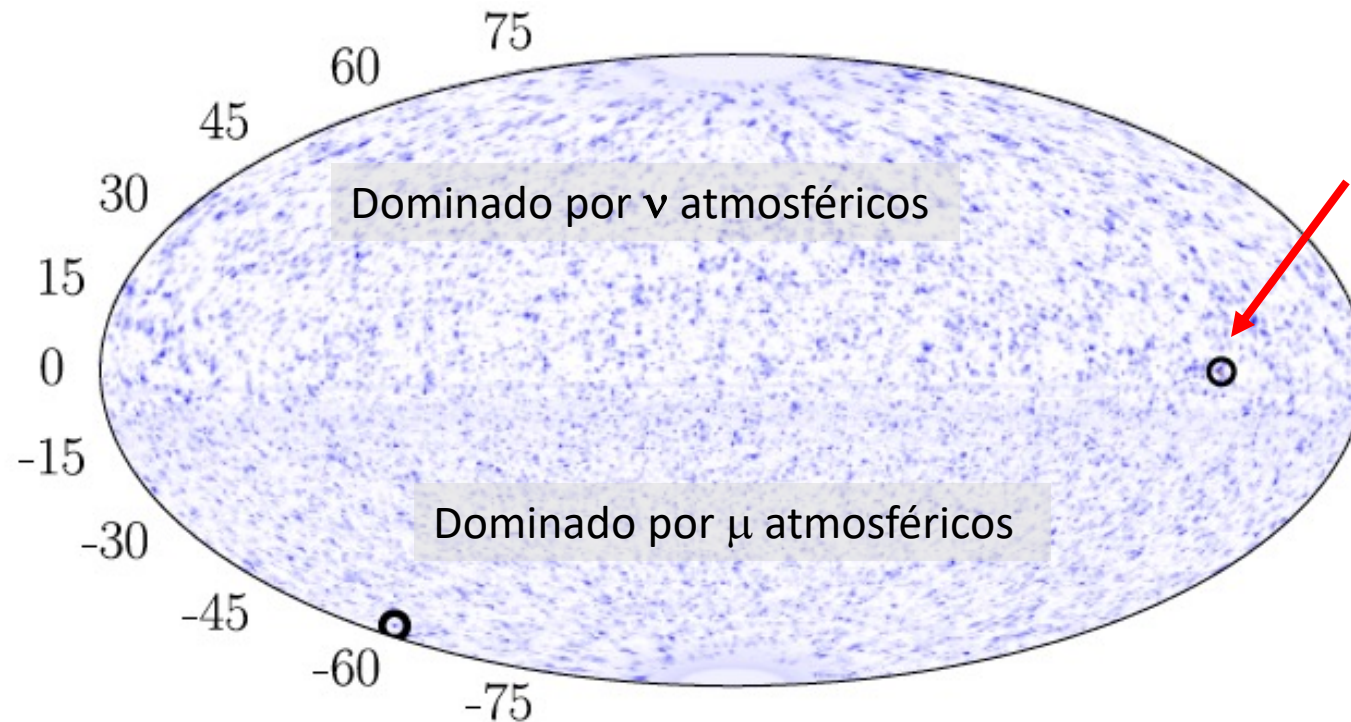
Claramente la señal no es obvia!

# Fuentes puntuales de neutrinos

Usar un método estadístico para encontrar neutrinos provenientes de la misma dirección y que tengan un espectro más duro que el ruido.

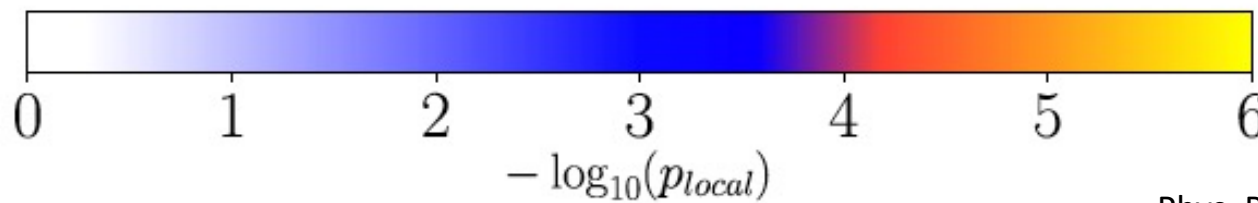


# Fuentes puntuales de neutrinos



Lugar más significativo  
p-value  $9.9 \times 10^{-2}$  (Norte)

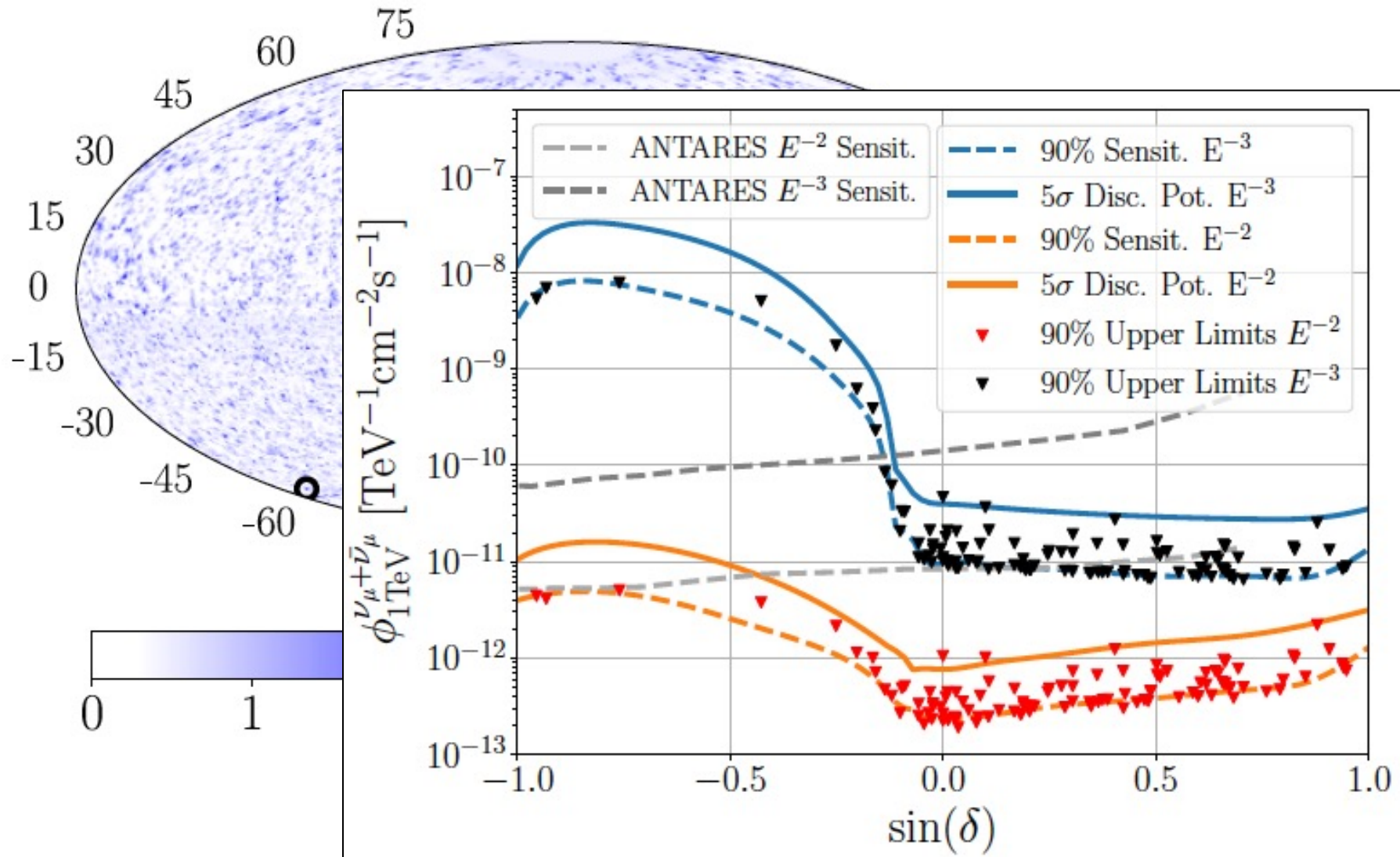
**Resultados de 10 años de datos**



Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 051103



# Fuentes Puntuales de Neutrinos



# Fuentes puntuales de neutrinos

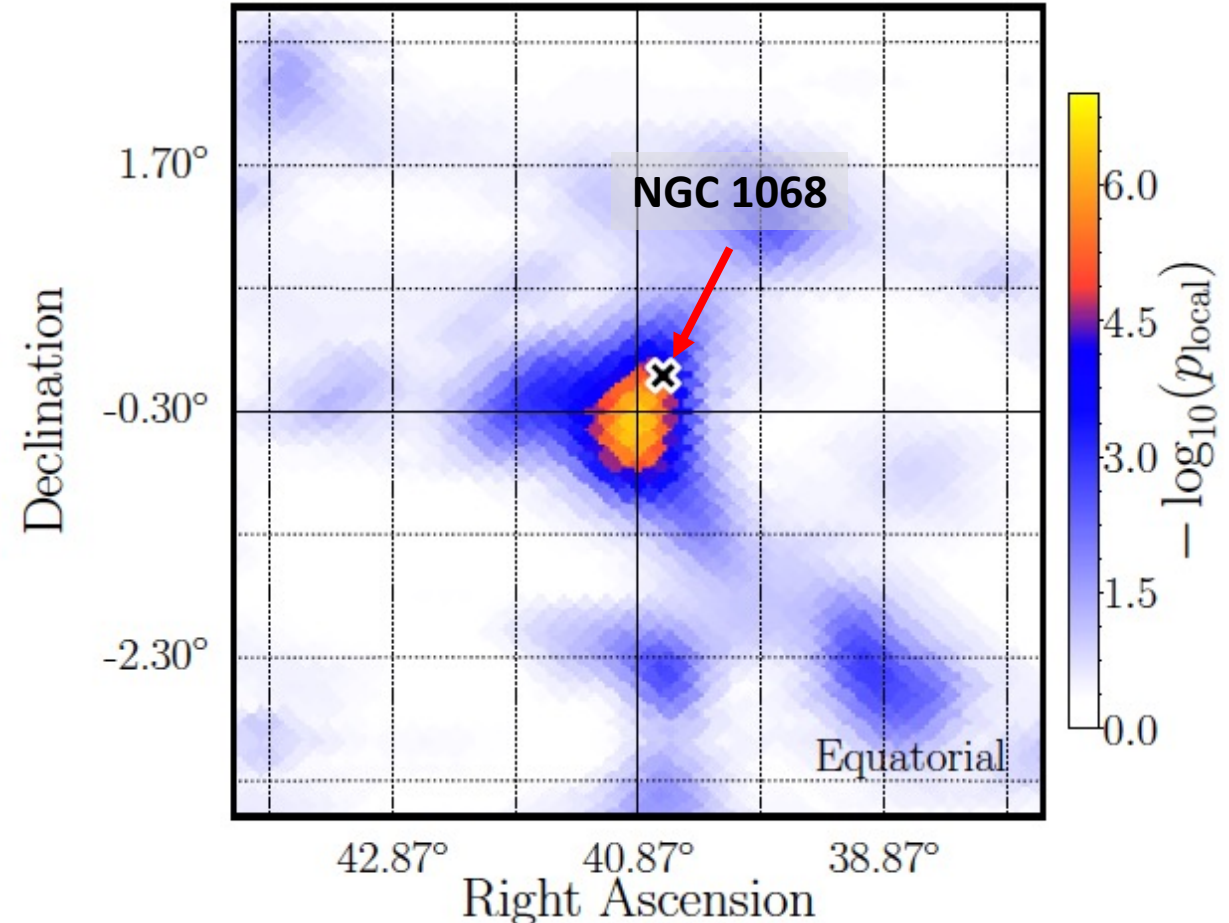
En una lista de 110 objetos que posiblemente emiten neutrinos, la fuente más significativa es:

NGC 1068 (Messier 77)

Significancia:  $2.9 \sigma$

A  $0.3^\circ$  del punto más significativo en el hemisferio norte.

NGC 1068: Galaxia con rápida creación de nuevas estrellas y una de las galaxias con núcleo activo más cercana a la Tierra.



# Alertas de neutrinos

Ya sabemos que neutrinos de más de  $\sim 100$  TeV son probablemente astrofísicos.

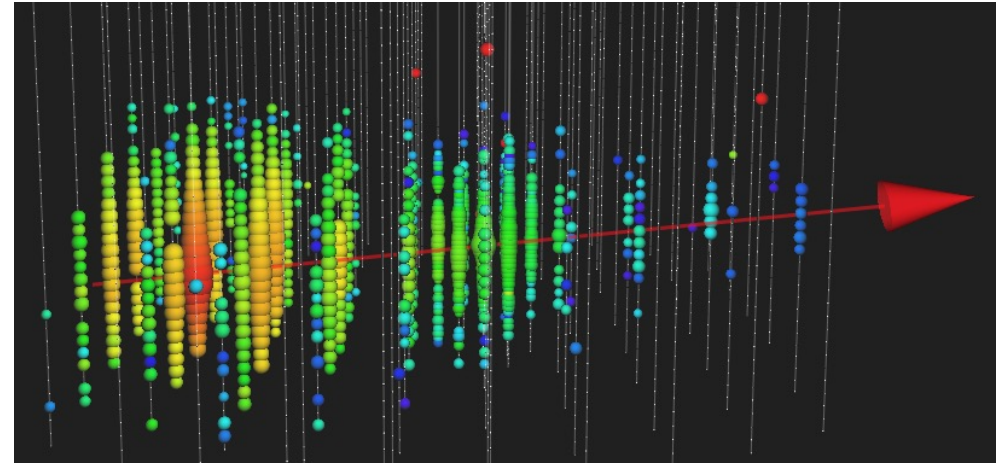
Utilizar métodos estadísticos para identificar rápido ( $\sim 2$  minutos) neutrinos de probable origen astrofísico

Alertas Oro: 10 / año.

50% de probabilidad de origen astrofísico

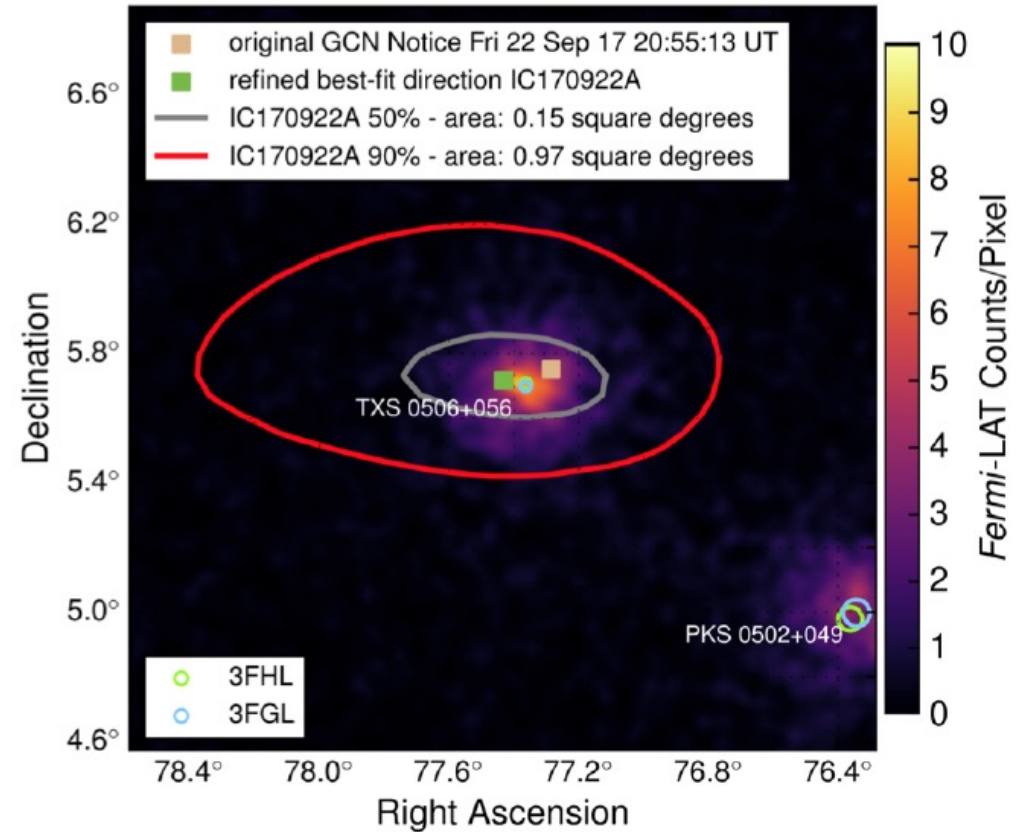
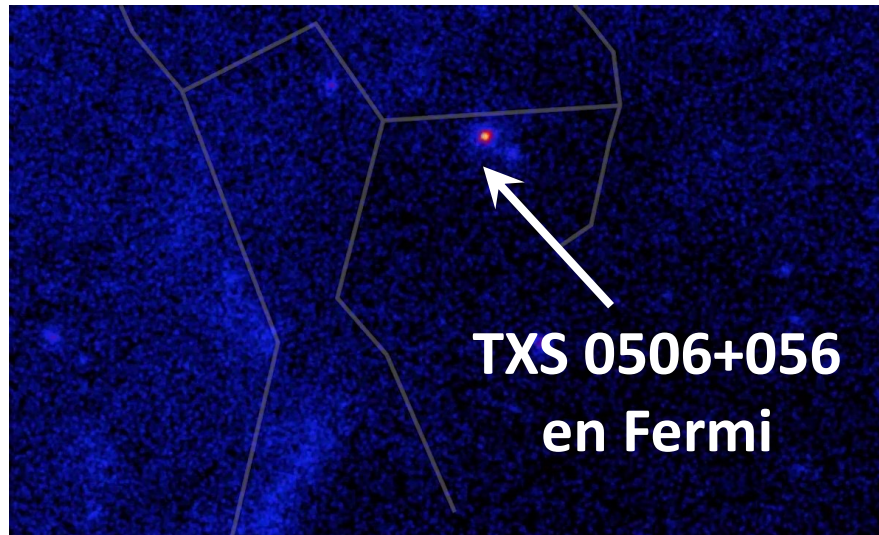
Alertas Bronce: 30 / año

30% de probabilidad de origen astrofísico



Primera alerta pública: IceCube-160427

# El Blazar TXS 0506+056 y IceCube-170922A



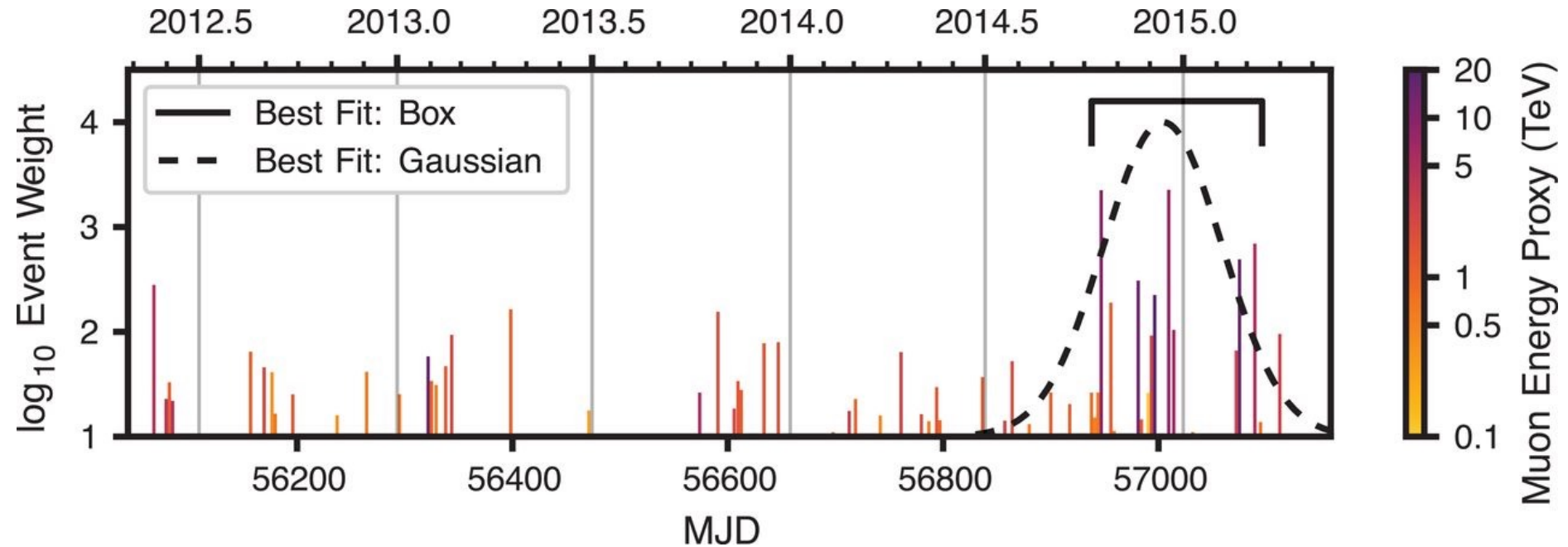
Science 361 (2018) eaat1378

**IceCube-170922:** una alerta de IceCube

Fermi y MAGIC identificaron que el blazar **TXS 0506+056** emitía rayos gamma al mismo tiempo.

Significancia de la correlacion:  $3 \sigma$

# Datos de archive de IceCube en la dirección de TXS 0506+056



Eventos: 13 ; índice espectral: -2.2  
Significancia:  $3.5 \sigma$

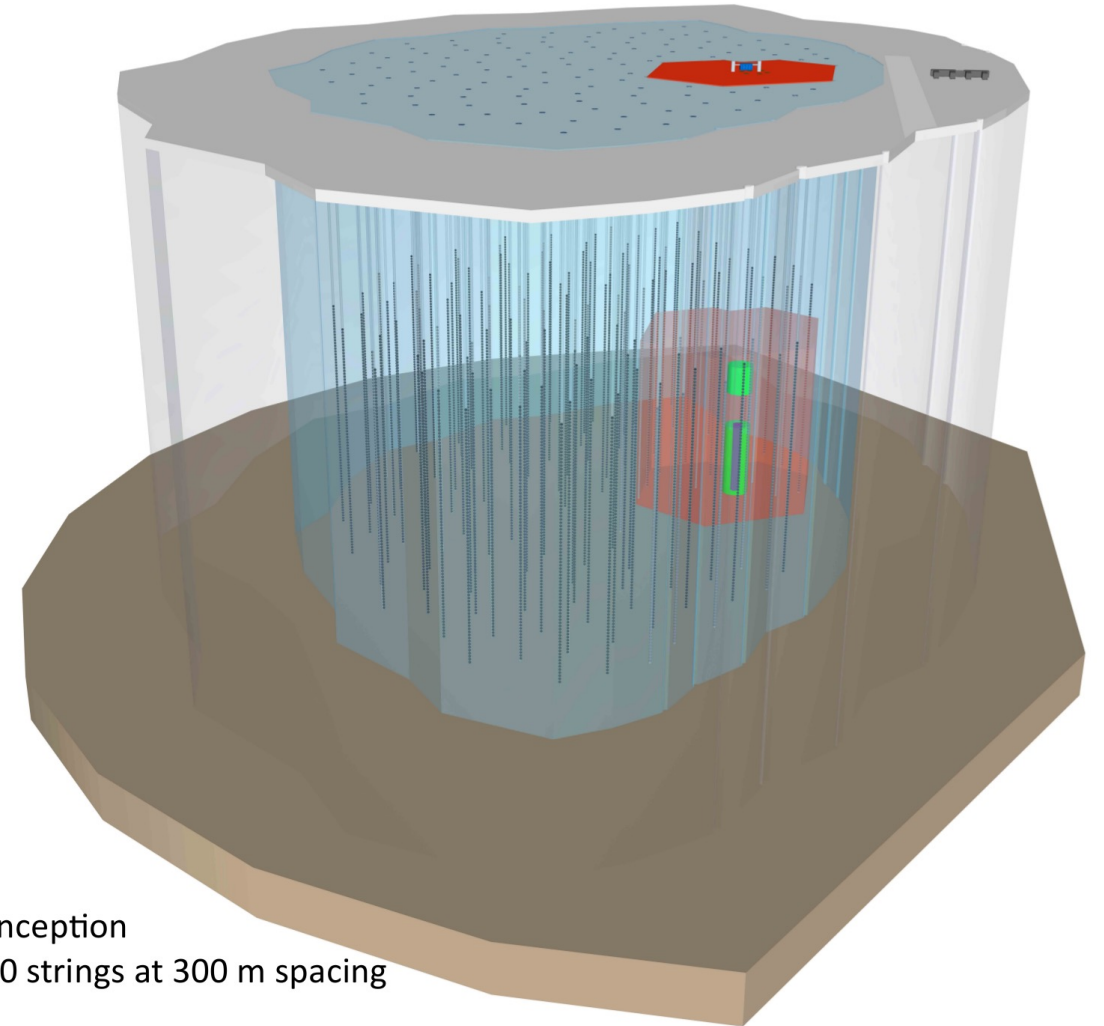
Science 361 (2018) 147-151

# El futuro de astronomía de neutrinos: IceCube-Gen2

10 veces el volumen de IceCube

5 veces mayor sensibilidad a fuentes puntuales

Simulaciones indican que Gen2 puede detectar fuentes puntuales para todos los escenarios predecidos del origen de los neutrinos astrofísicos.



Artist conception  
Here: 120 strings at 300 m spacing

# Conclusiones

IceCube ha detectado neutrinos astrofísicos, probablemente de origen extragaláctico.

El Blazar TXS 0506+056 es la primera fuente candidata identificada.

No hay identificación clara de fuentes puntuales de neutrinos – utilizando solo neutrinos. Muchas fuentes contribuyen al flujo astrofísico

IceCube-Gen2 incrementará significativamente las capacidades para detectar fuentes puntuales de neutrinos.