



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

Neutrinos cósmicos: una nueva ventana para observar el Universo



Juan Zúñiga - Juande Zornoza
IFIC(CSIC-Universitat de València)

IFIC Summer Student Programme 2016

Valencia, 18 de julio 2016



Modelo Estándar

- De acuerdo con el Modelo Estándar de Física de Partículas, los **ladrillos** fundamentales son los **quarks** (de los que están hechos los protones, los neutrones y otros hadrones) y los **leptones**.
- Hay otras cinco partículas fundamentales llamadas **bosones**, las responsables de la **interacciones** entre ellos y el bosón de Higgs.

$$\begin{aligned} 1 \text{ GeV} &\sim m_p \\ 1 \text{ TeV} &\sim 10^3 m_p \\ 1 \text{ PeV} &\sim 10^6 m_p \end{aligned}$$

	u up	c charm	t top	γ photon
quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
leptones	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau	W W boson

portadores de fuerza

H
Higgs

Los neutrinos

- Los neutrinos fueron propuestos por W. Pauli en 1930 como una “solución desesperada” al problema de la no conservación de la energía en las desintegraciones beta
- El nombre de “neutrino” fue propuesto por E. Fermi (el pequeño neutro)
- Fueron detectados por primera vez en 1956 por C. Cowan y F. Reines junto a un reactor nuclear
- El flujo de neutrinos en la Tierra (básicamente producidos en el Sol) es de $\sim 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (!)
- Un neutrino solar típico ($E \sim 0.3 \text{ MeV}$) podría cruzando un bloque de plomo de 5 años-luz tendría una probabilidad del 50% de salir sin interaccionar.

Fuentes de neutrinos

El Big Bang

$$\rho v = 330 / \text{cm}^3$$

$$E_\nu = 0.0004 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J})$$

AGNs/GRBs/otras?

$$E^{-2} \Phi_\nu^{Earth} \sim 10^{-8} \nu \text{ GeV/cm}^2 \text{s sr}$$

$$E_\nu \sim 100 \text{ TeV} - \text{PeV}$$

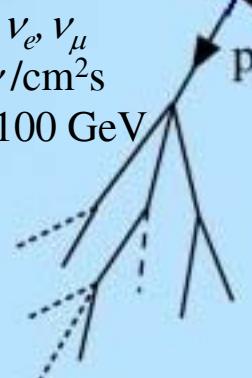
SN1987
 $E_\nu \sim \text{MeV}$

El Sol

$$\begin{aligned} & \nu_e \\ & \Phi_\nu^{Tierra} = 6 \times 10^{10} \nu / \text{cm}^2 \text{s} \\ & E_\nu \sim 0.1 - 20 \text{ MeV} \end{aligned}$$

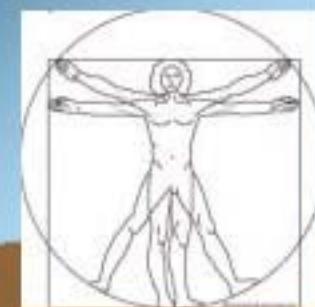
Neutrinos atmosféricos

$$\begin{aligned} & \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \nu_\mu \\ & \Phi_\nu \sim 1 \nu / \text{cm}^2 \text{s} \\ & E_\nu \sim 0.1 - 100 \text{ GeV} \end{aligned}$$



Reactores Nucleares

$$E_\nu \sim \text{pocos MeV}$$

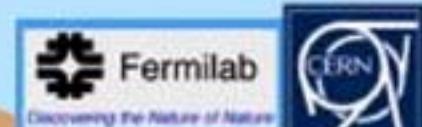


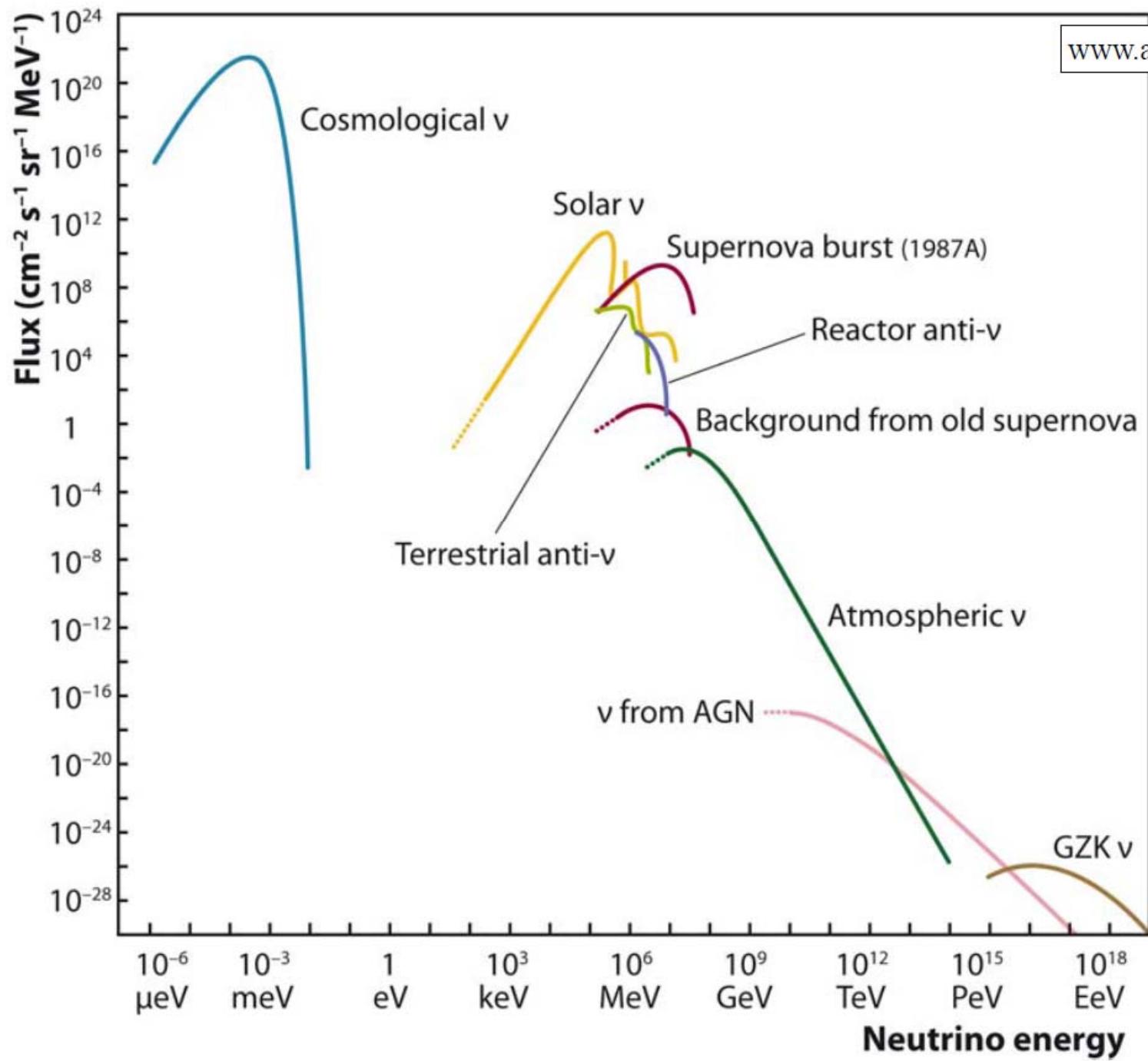
Radioactividad terrestre

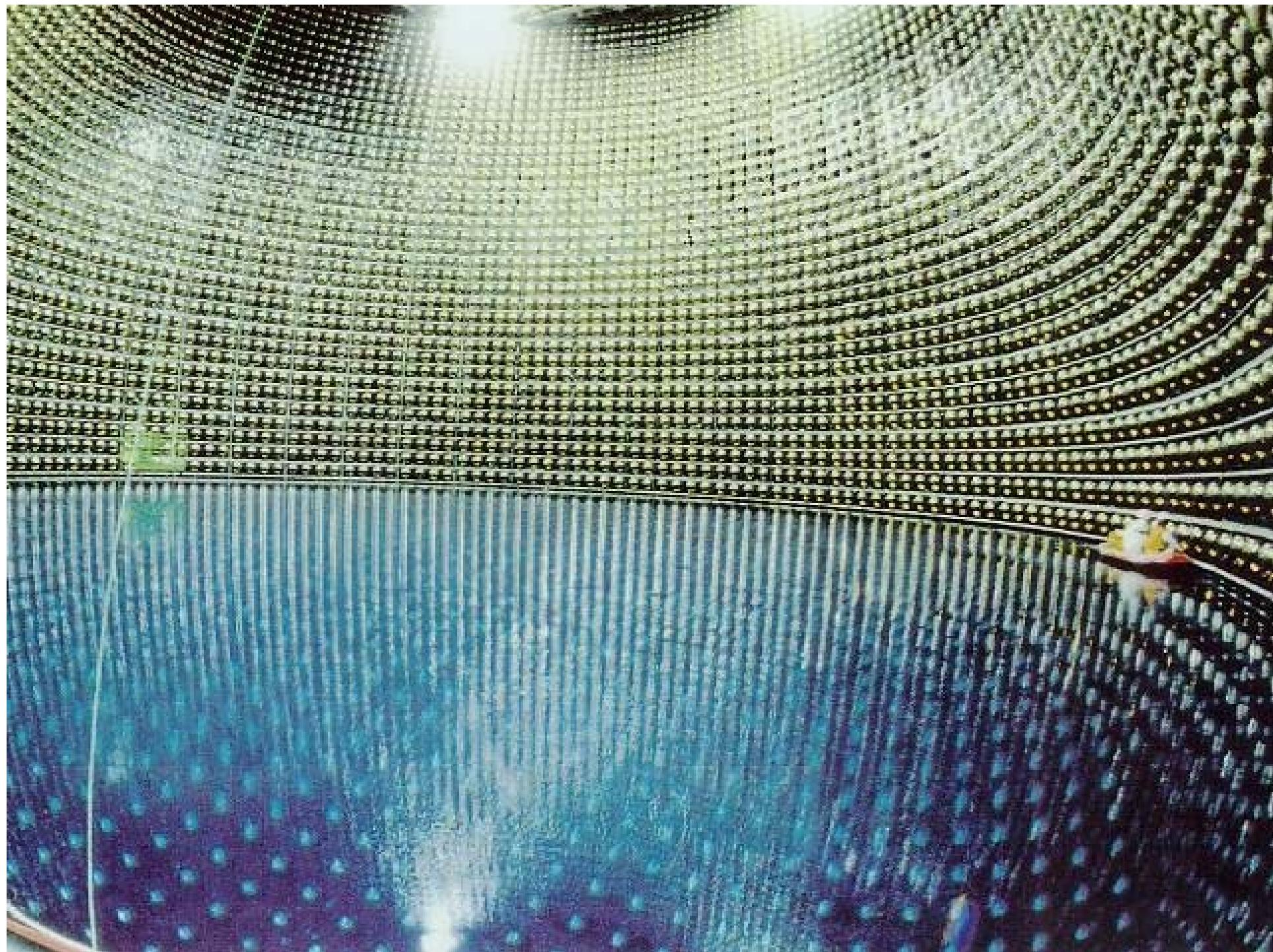
$$\Phi_\nu \sim 6 \times 10^6 \nu / \text{cm}^2 \text{s}$$

Aceleradores

$$E_\nu \sim 0.3 - 30 \text{ GeV}$$

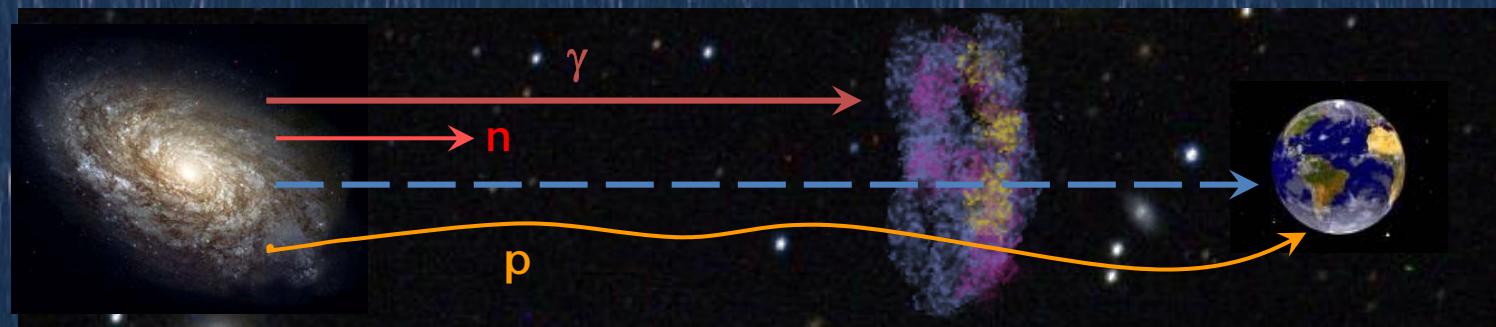




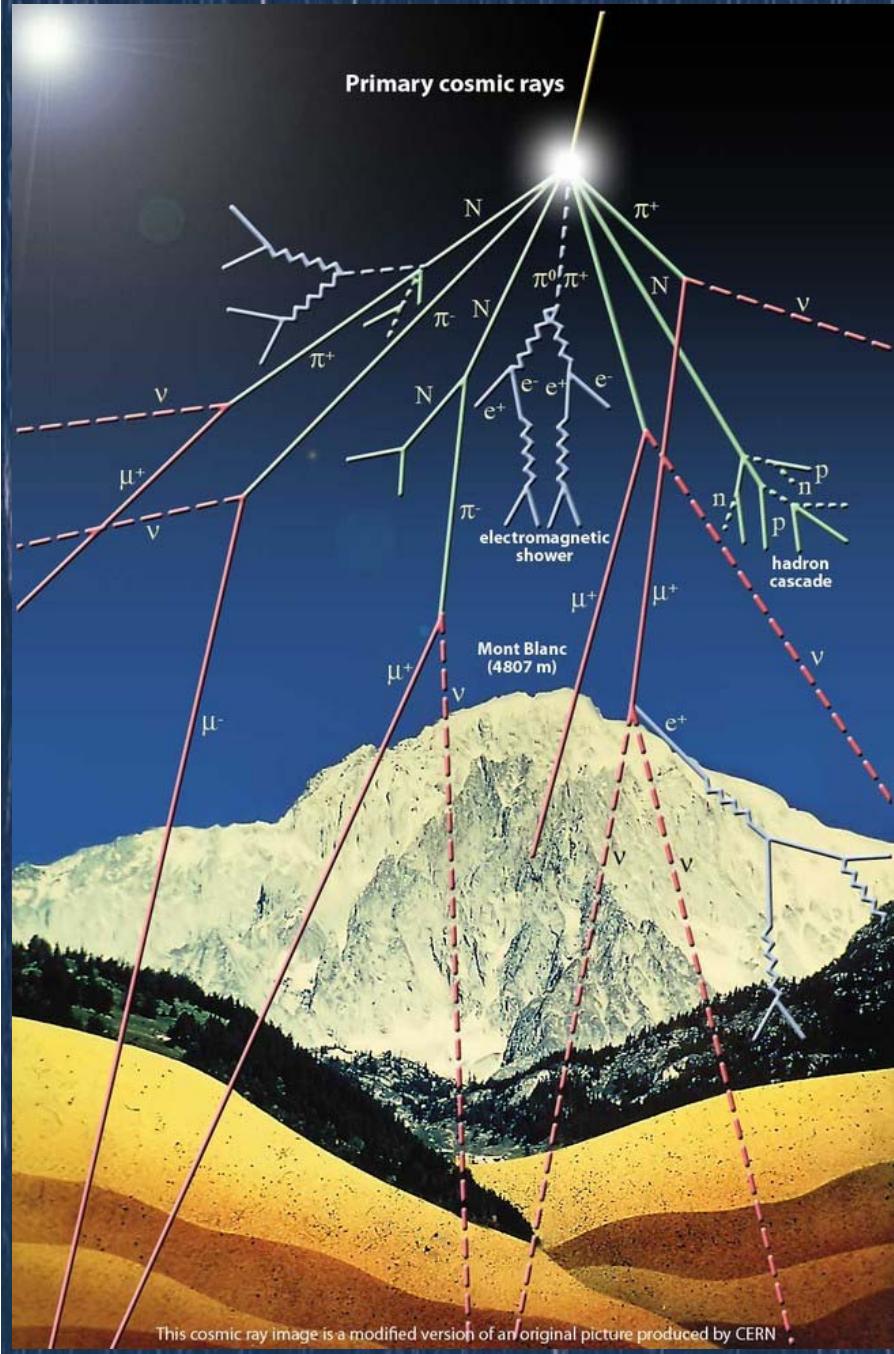


Astronomía de neutrinos

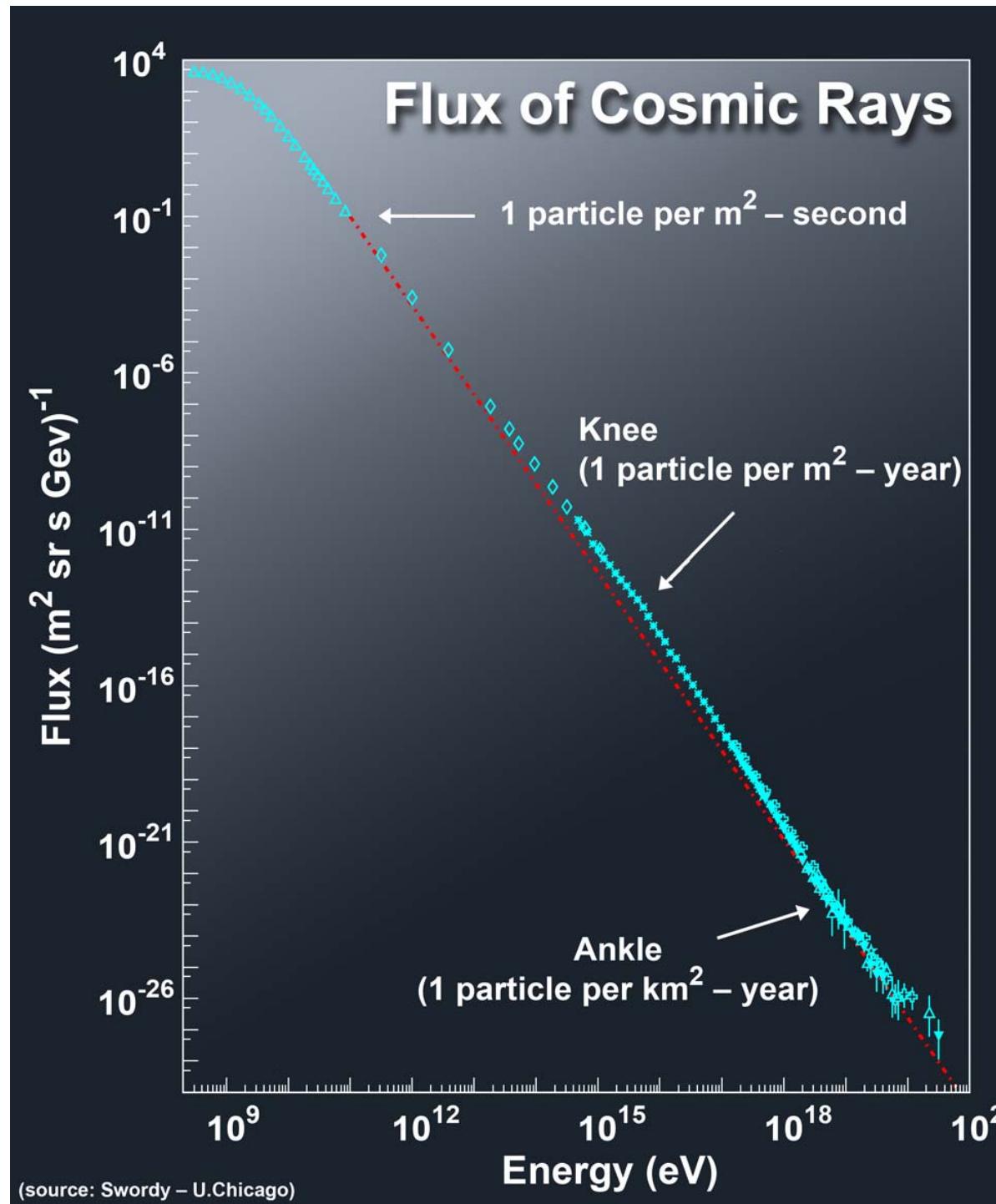
- Los **fotones** y los **rayos cósmicos** han sido tradicionalmente las fuentes de información sobre el universo.
- Los telescopios de neutrinos suponen una herramienta nueva y única para estudiar el cosmos:
 - Ventajas de los neutrinos:
 - No son absorbidos por la materia y la radiación en su camino hasta la Tierra (al contrario que los fotones y los rayos cósmicos)
 - No son desviados por campos magnéticos (al contrario que los rayos cósmicos)
 - Son estables: no se desintegran (al contrario que los neutrones)
 - Desventaja: se necesitan detectores enormes (¡mil millones de toneladas!) para observarlos



Rayos cósmicos



- En 1912, Victor Hess observó que la ionización espontánea del aire no disminuye con la **altura** sino que aumenta.
- Por tanto, demostró que el origen de esa ionización no eran los elementos radiactivos en la corteza terrestre sino que era de **origen cósmico**.
- Actualmente sabemos que se debe a **cascadas de partículas** producidas en la atmósfera por los “rayos cósmicos”:
 - protones (90%)
 - núcleos de helio (9%)
 - electrones (1%)
- Después de más de un siglo, aún no sabemos su origen...



Rayos cósmicos

- Espectro con forma de power-law con pocas distorsiones
- Su espectro abarca 30 décadas en flujo y 12 décadas en energía
- Detectores muy distintos según la energía que queramos estudiar

Rayos cósmicos

- A bajas energías, flujos grandes: satélites, globos...



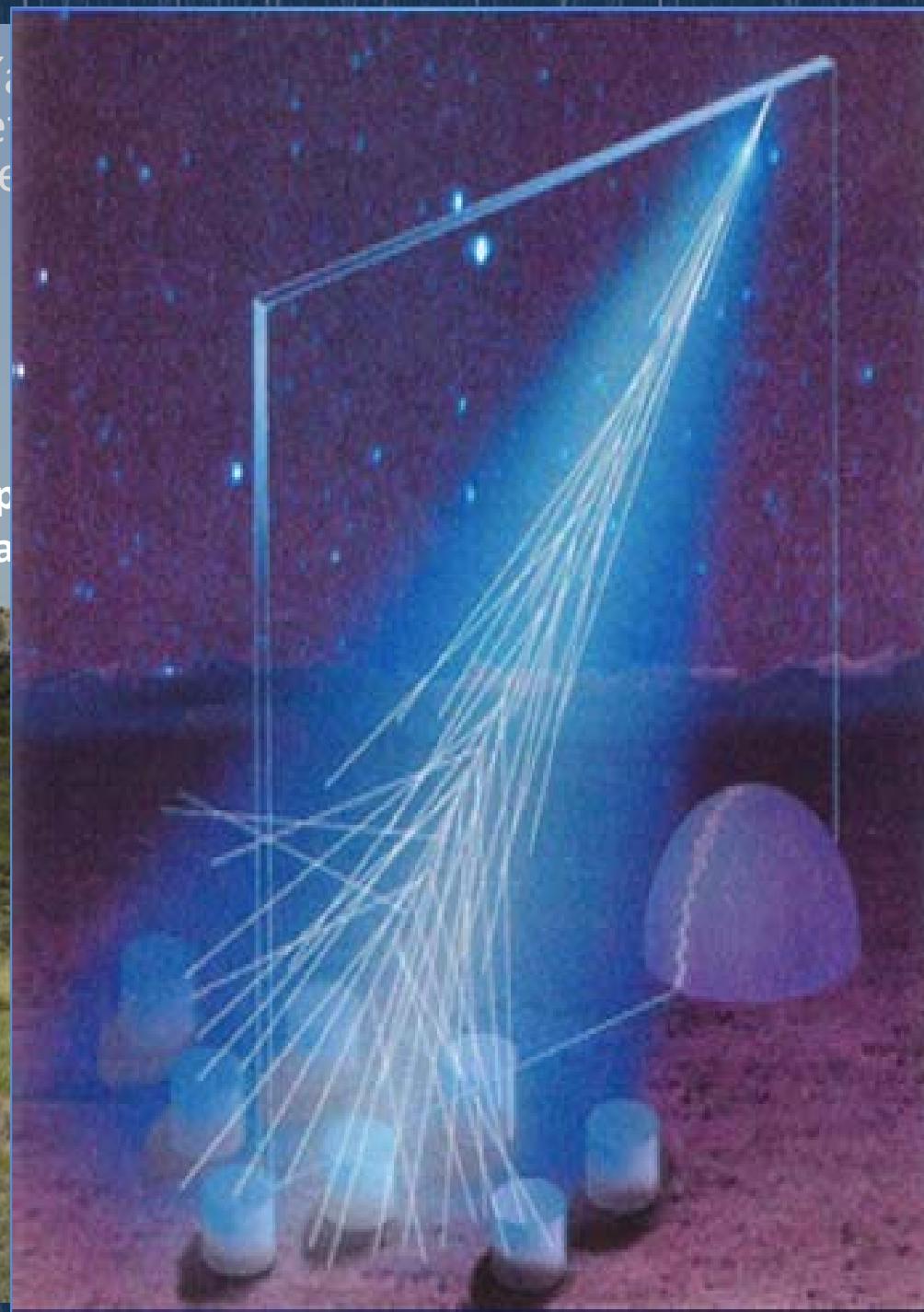
V. Hess, 1912



Globo Super Tiger, 2013

- A altas energías se necesarios de extensos (miles de km²)

Estación de telescopio de Fluorescencia

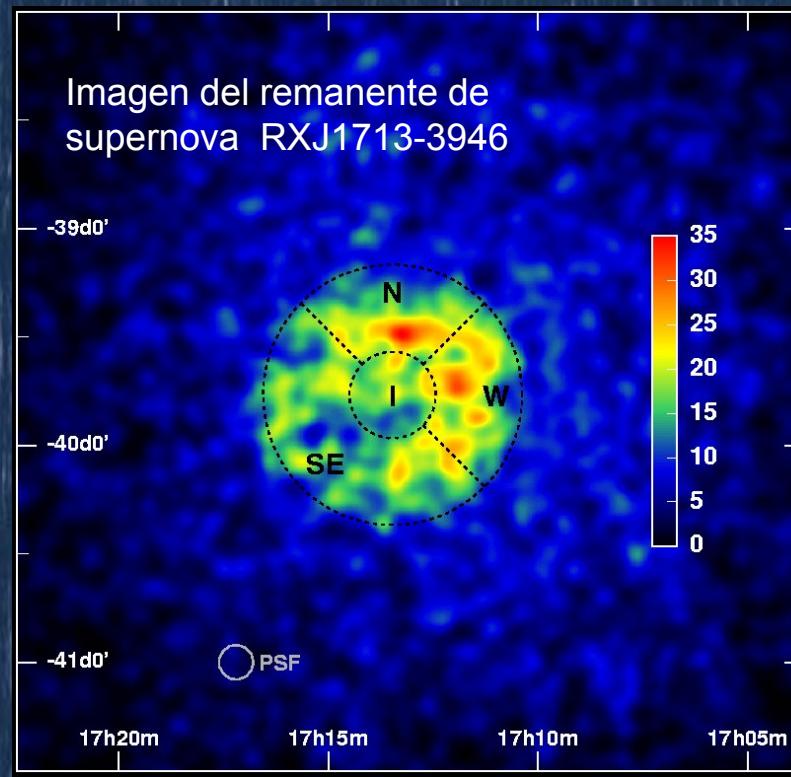


superficie



Rayos gamma

- Muchas fuentes astrofísicas emiten fotones de alta energía, pero en muchos casos no está claro cuál es el mecanismo
 - fenómenos leptónicos (Compton inverso, radiación de frenado) o
 - fenómenos hadrónicos (decaimiento de piones neutros) → ¡también habría neutrinos!



Rayos gamma

- A bajas energías, flujos grandes → satélites
- A altas energías, flujos pequeños → telescopios en superficie

Satélite FERMI

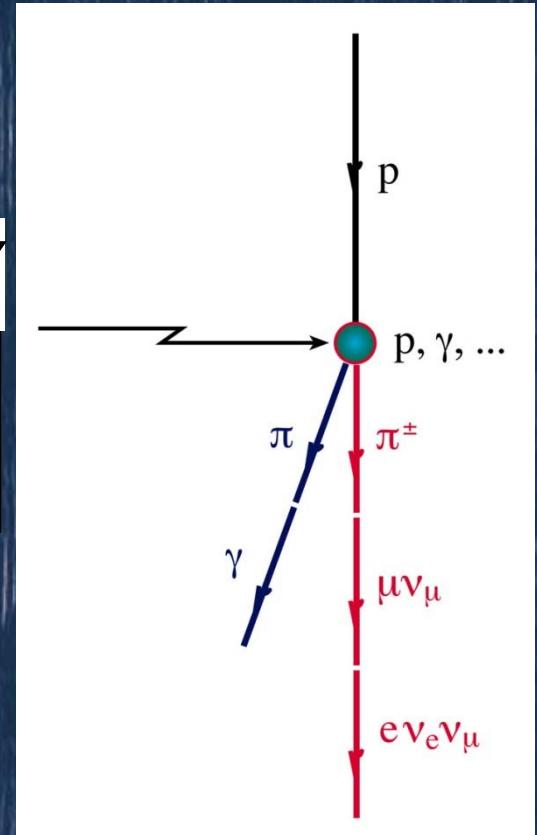
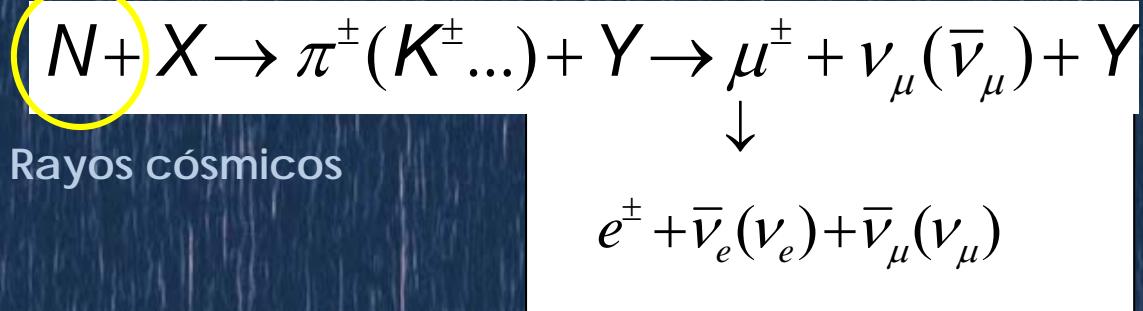


Telescopios MAGIC

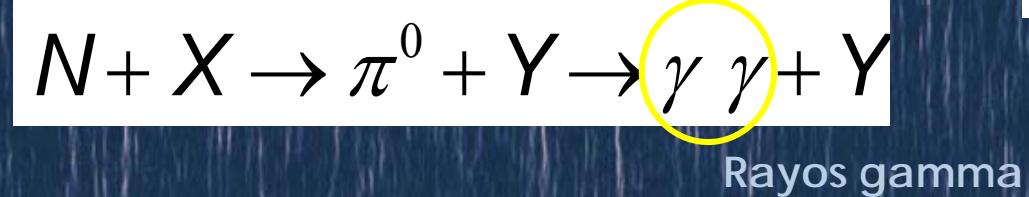


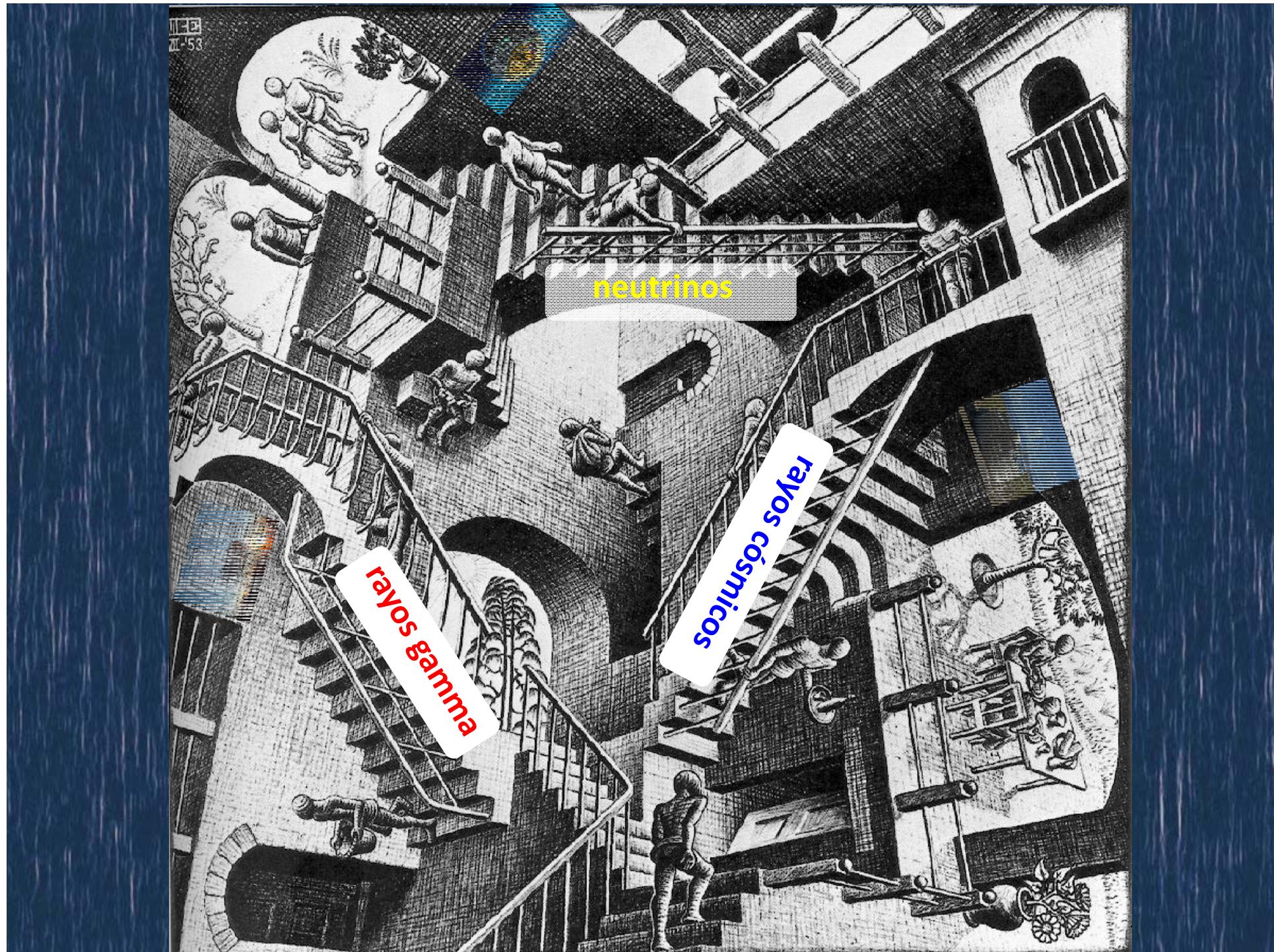
¿Cómo se producen los neutrinos?

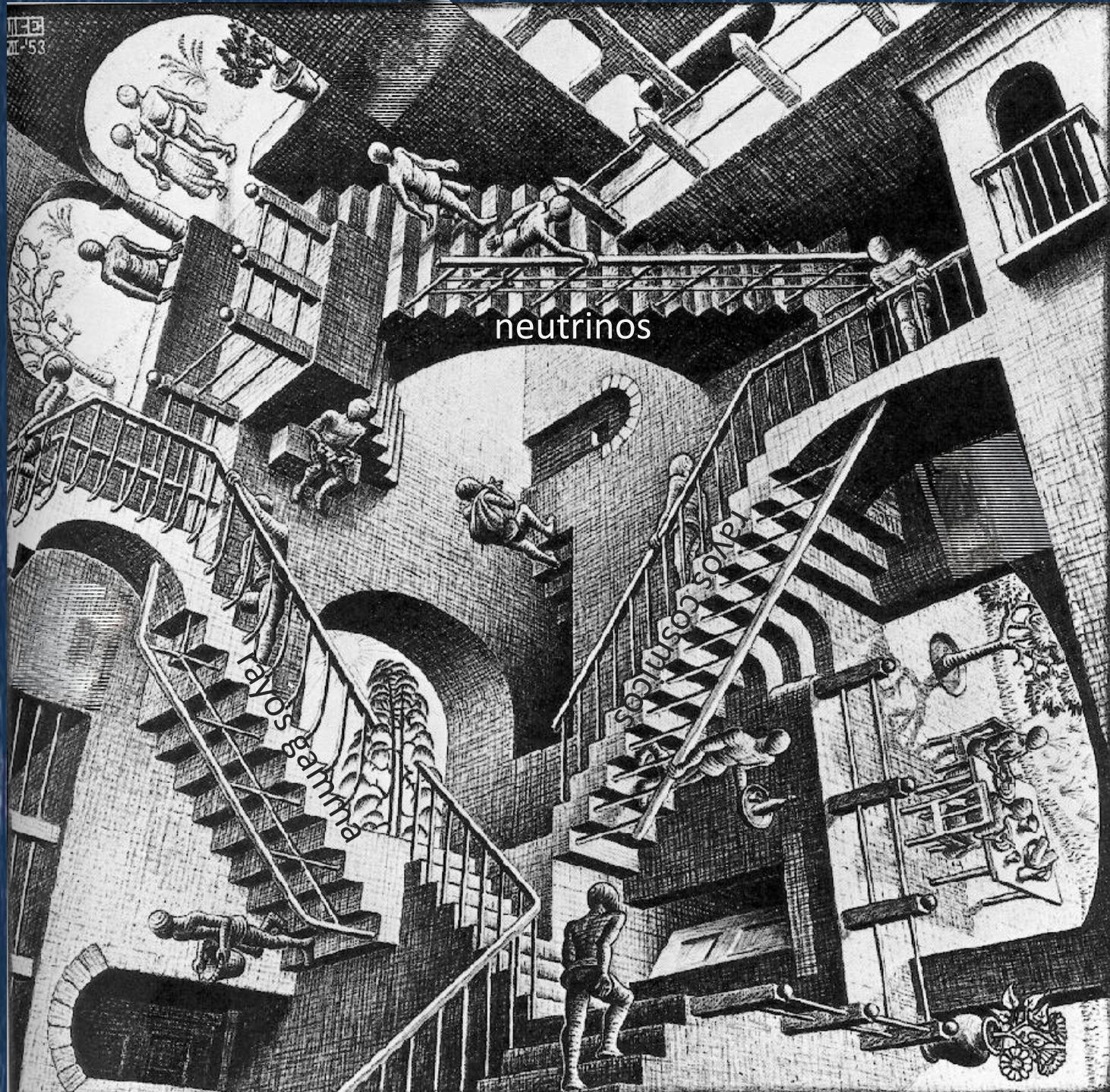
- Los neutrinos cósmicos han de producirse en la interacciones de los rayos cósmicos con materia o radiación:



- Además, en estas interacciones también se producen rayos gamma:

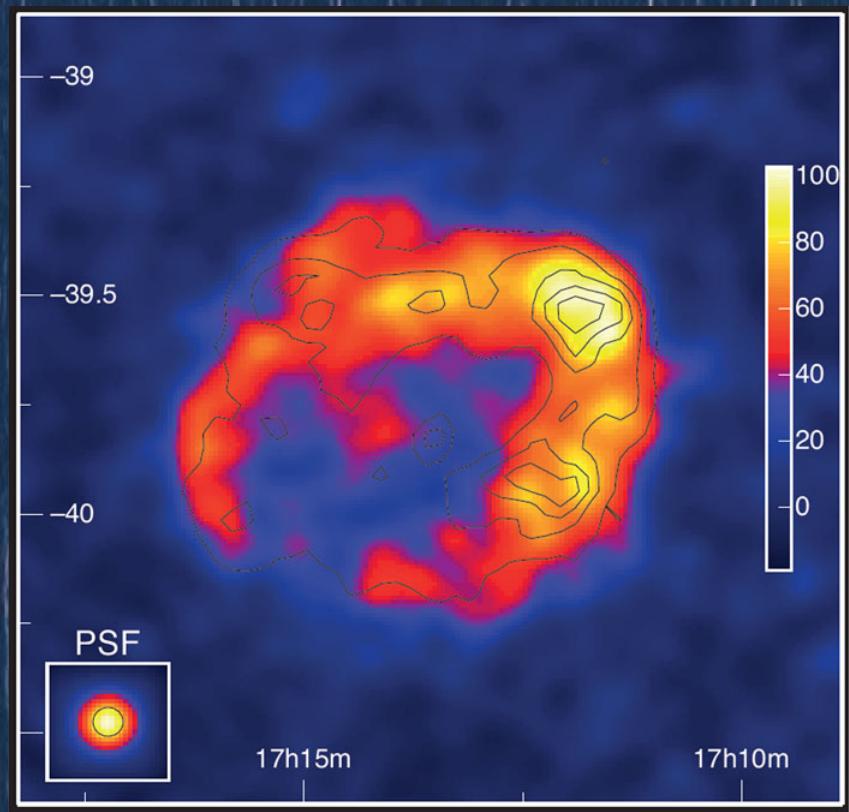






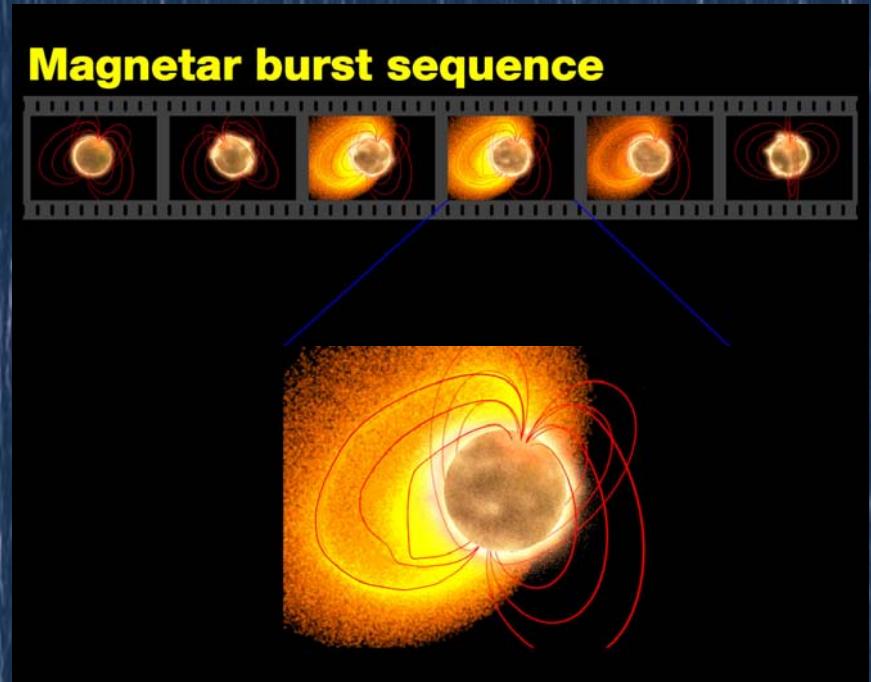
Remanentes de supernovas

- Se forman tras la explosión de una supernova por el material que colisiona con el medio interestelar
 - Pulsar Wind Nebulae (o plerions), que tienen un pulsar en su centro
 - Shell-type SNRs



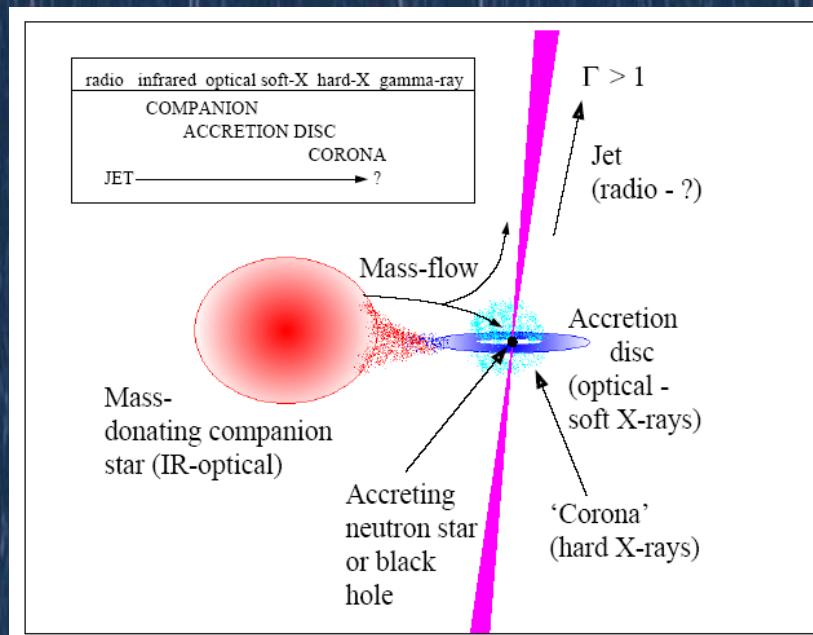
Magnetares

- Estrellas de neutrinos con campos magnéticos en la superficie de unos 10^{15} G, mucho mayor que los púlsares ordinarios
- La actividad sísmica en la superficie puede inducir aceleración de partículas en la magnetosfera



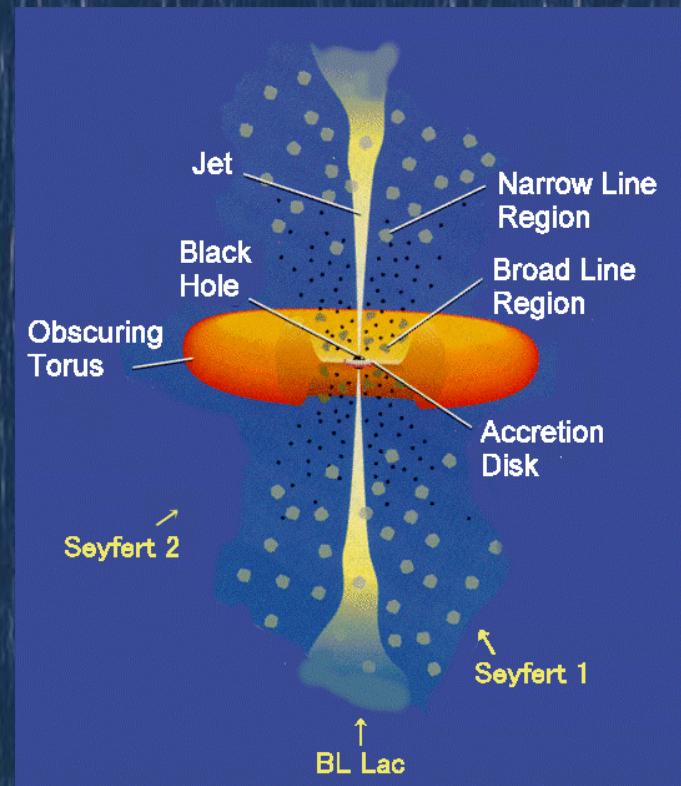
Micro-cuásares

- Micro-cuásar: objeto compacto (agujero negro o estrella de neutrones) hacia el que una estrella compañera está acretando materia



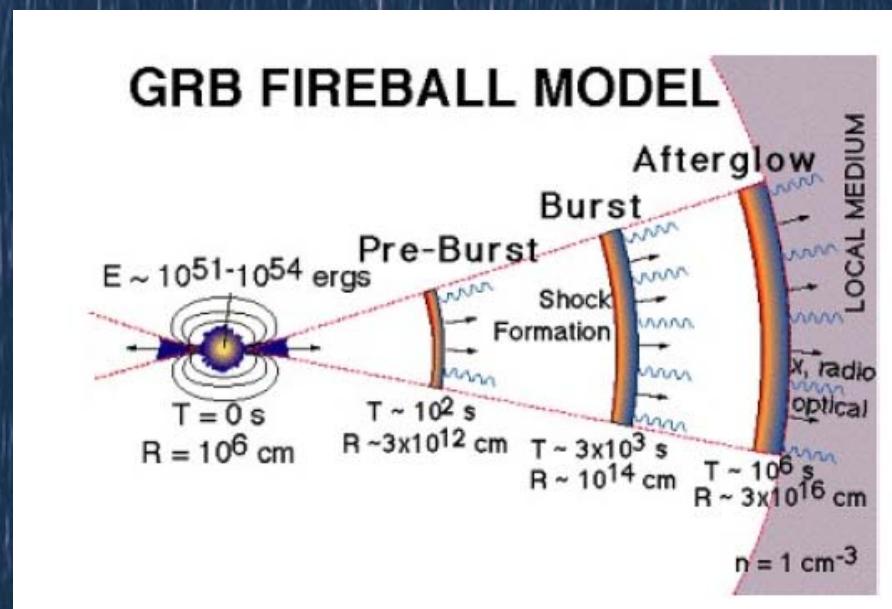
Galaxias de Núcleo Activo (AGNs)

- Incluye varios tipos de objetos, según el ángulo de observación: Seyferts, cuásares, radio-galaxias and blazars.
- Modelo canónico: un agujero negro supermasivo (10^6 - $10^8 M_\odot$) hacia el que se acreta gran cantidad dematerial



Gamma Ray Bursts

- Los Estallidos de Rayos Gamma o Gamma Ray Bursts (GRBs) son breves explosiones en rayos-X are brief explosions of γ rays (a menudo acompañadas de X-ray, óptico y radio).
- El progenitor puede ser una estrella supermasiva (GRBs cortos, 0.5 s) o la fusión de dos objetos compactos (GRBs largos, 30 s)



Materia oscura

- Solo una cuarta parte de la materia del Universo está hecha de partículas del Modelo Estándar
- Las otras tres cuartas partes no sabemos lo que son, aunque tenemos diversas teorías
- Una familia de modelos son los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)
- Estas se acumularían en objetos astrofísicos como el Sol, el Centro Galáctico, etc. y al aniquilarse acabarían dando lugar a neutrinos de alta energía, que podemos detectar



Objetivos científicos

- Origen de los rayos cósmicos
- Escenarios hadrónicos vs leptónicos
- Materia oscura

Tamaño del detector

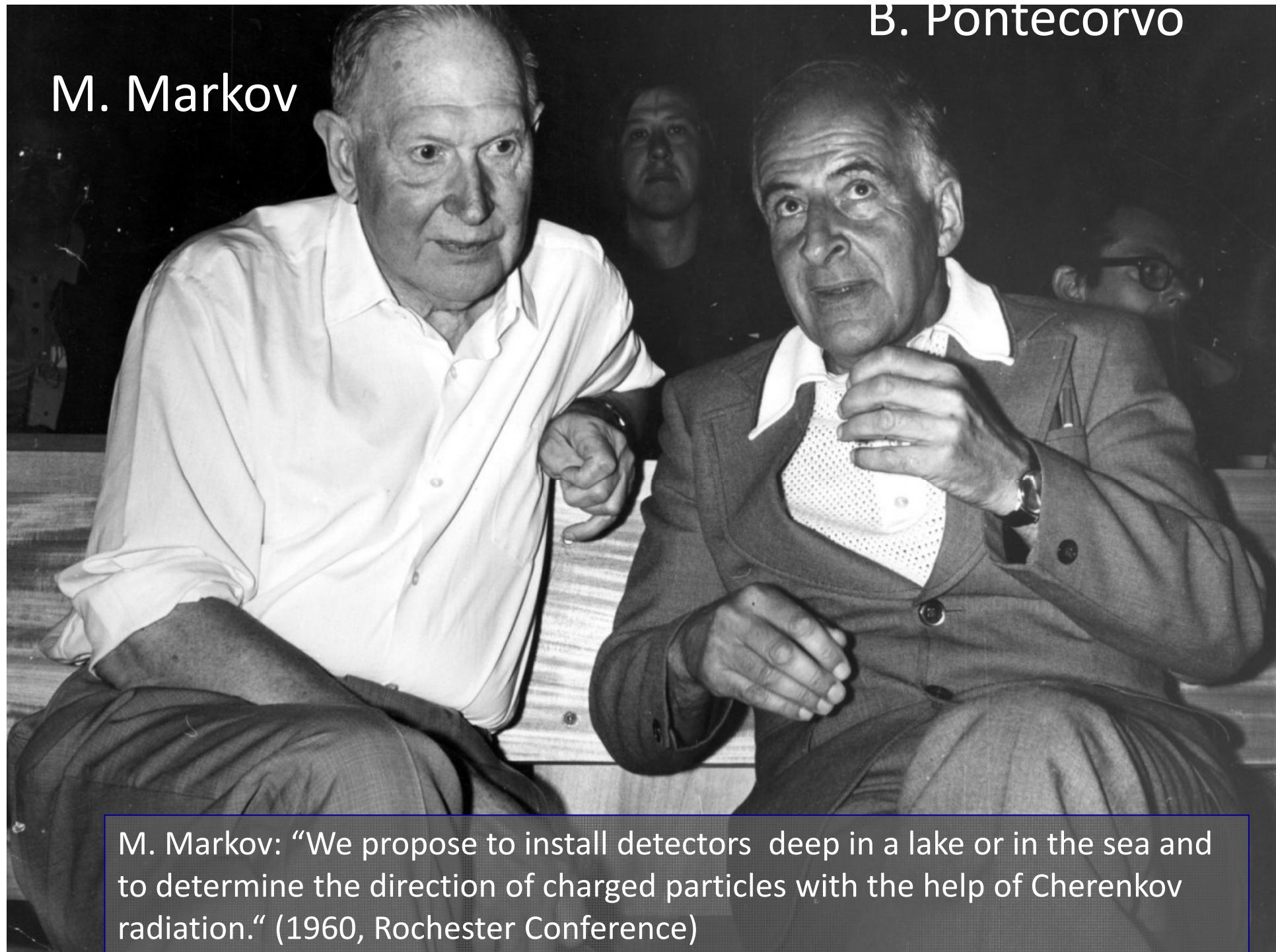


Técnicas de detección de neutrinos

- Cherenkov óptico:
 - En hielo: AMANDA, IceCube
 - En agua: Baikal, ANTARES, NEMO, Nestor, KM3NeT
- Cascadas atmosféricas:
 - Desde la superficie: Auger
 - Desde el espacio: EUSO
- Radio:
 - Desde la superficie: RICE, ARIANNA, ARA
 - Globos: ANITA
- Acústica:
 - AMADEUS, SPATS

B. Pontecorvo

M. Markov

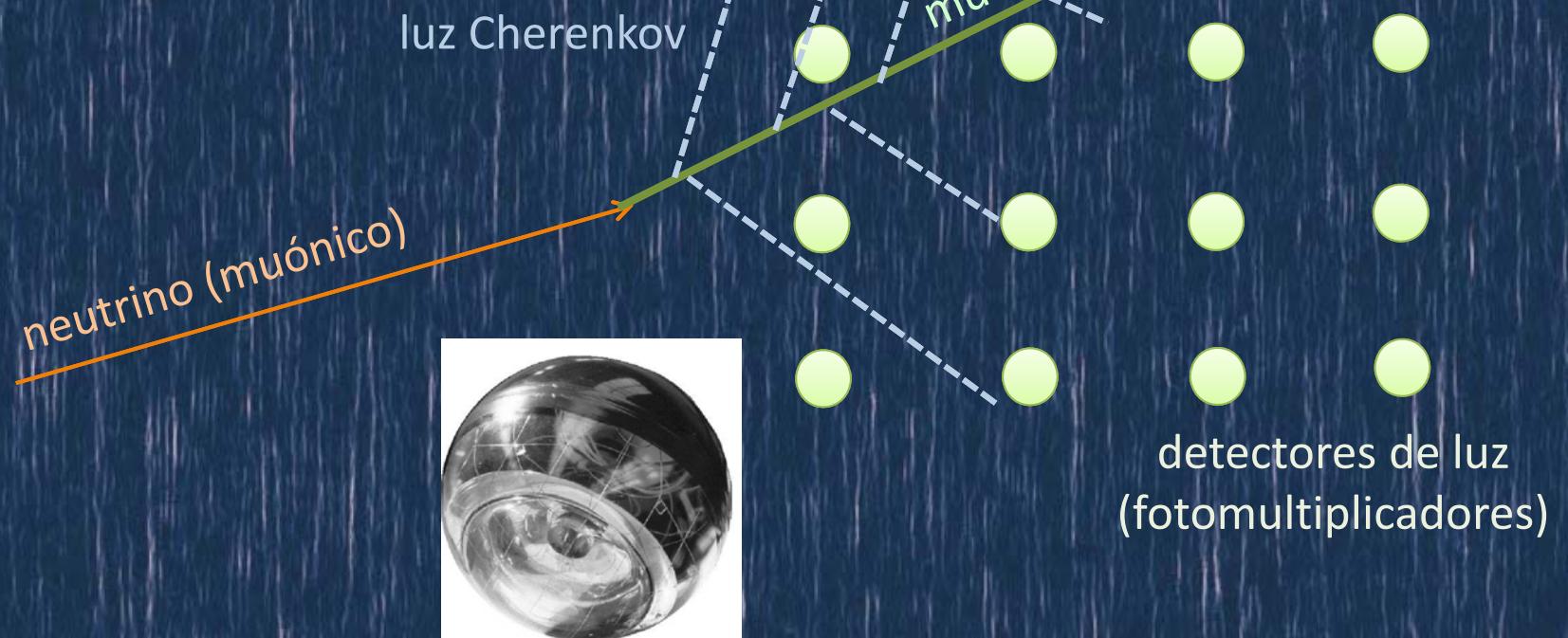


M. Markov: "We propose to install detectors deep in a lake or in the sea and to determine the direction of charged particles with the help of Cherenkov radiation." (1960, Rochester Conference)

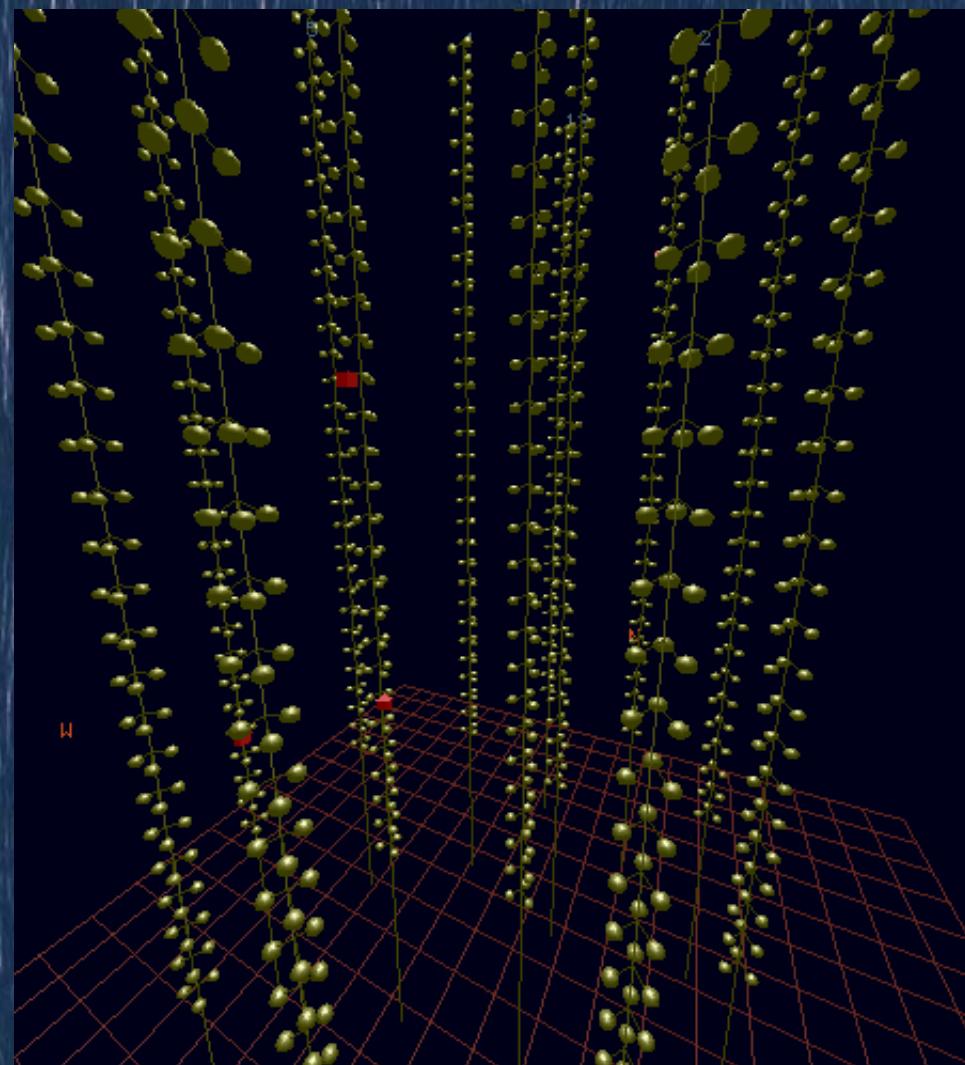
Principio de detección

¿Dónde poner el detector?

- 1) En un medio transparente
- 2) Los neutrinos interactúan poco →
 - Necesitamos mucho volumen →
 - Tiene que ser barato → Medio natural
 - Océanos (o lagos) o hielo antártico



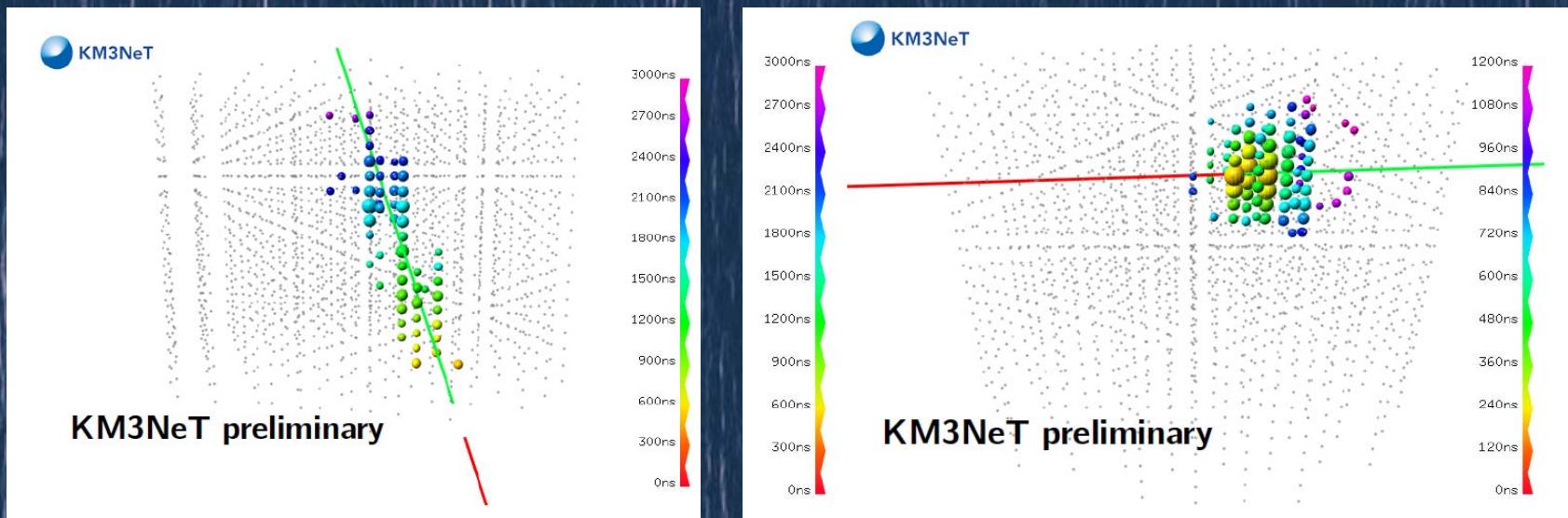
Principio de detección



Muon atravesando ANTARES

- La posición y los tiempos de los fotones detectados permiten medir con buena precisión la dirección del neutrino: ¡es un telescopio!

Canales



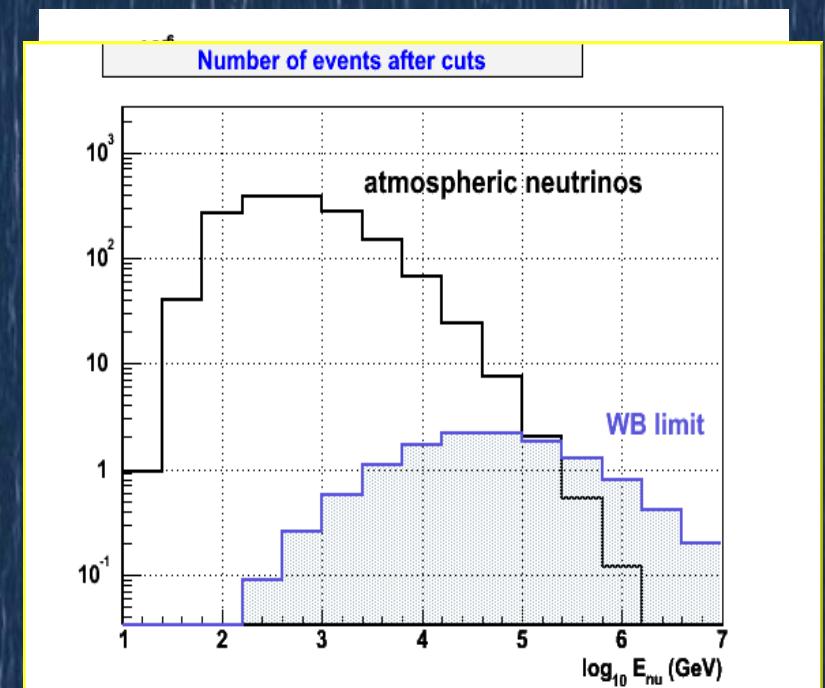
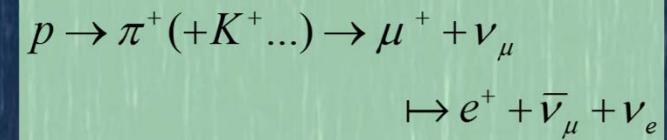
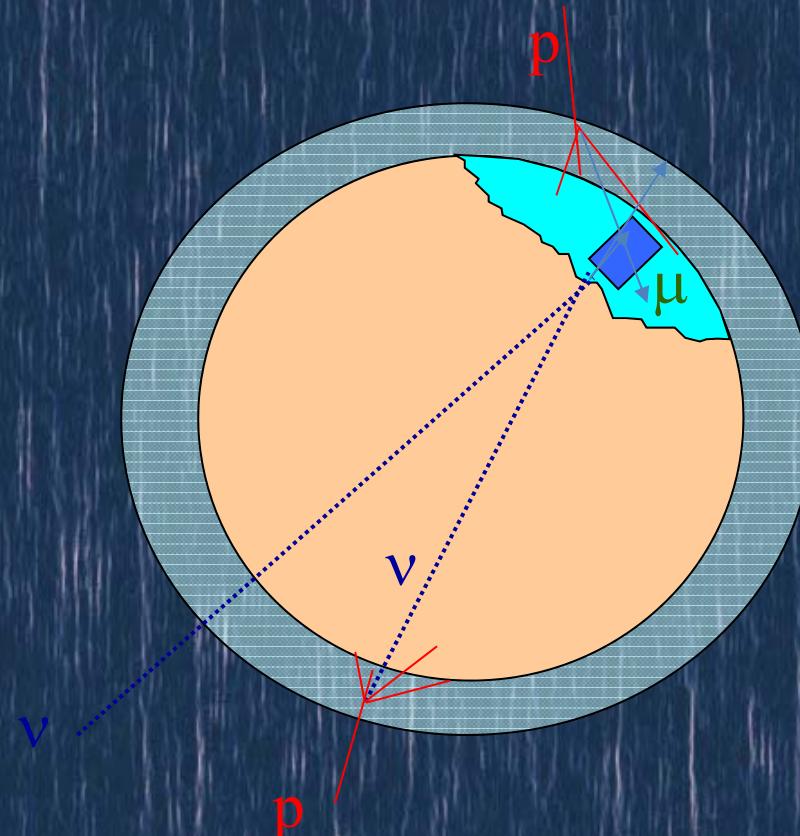
traza

cascada

neutrino atmosférico de 1
PeV con “bundle” de muones

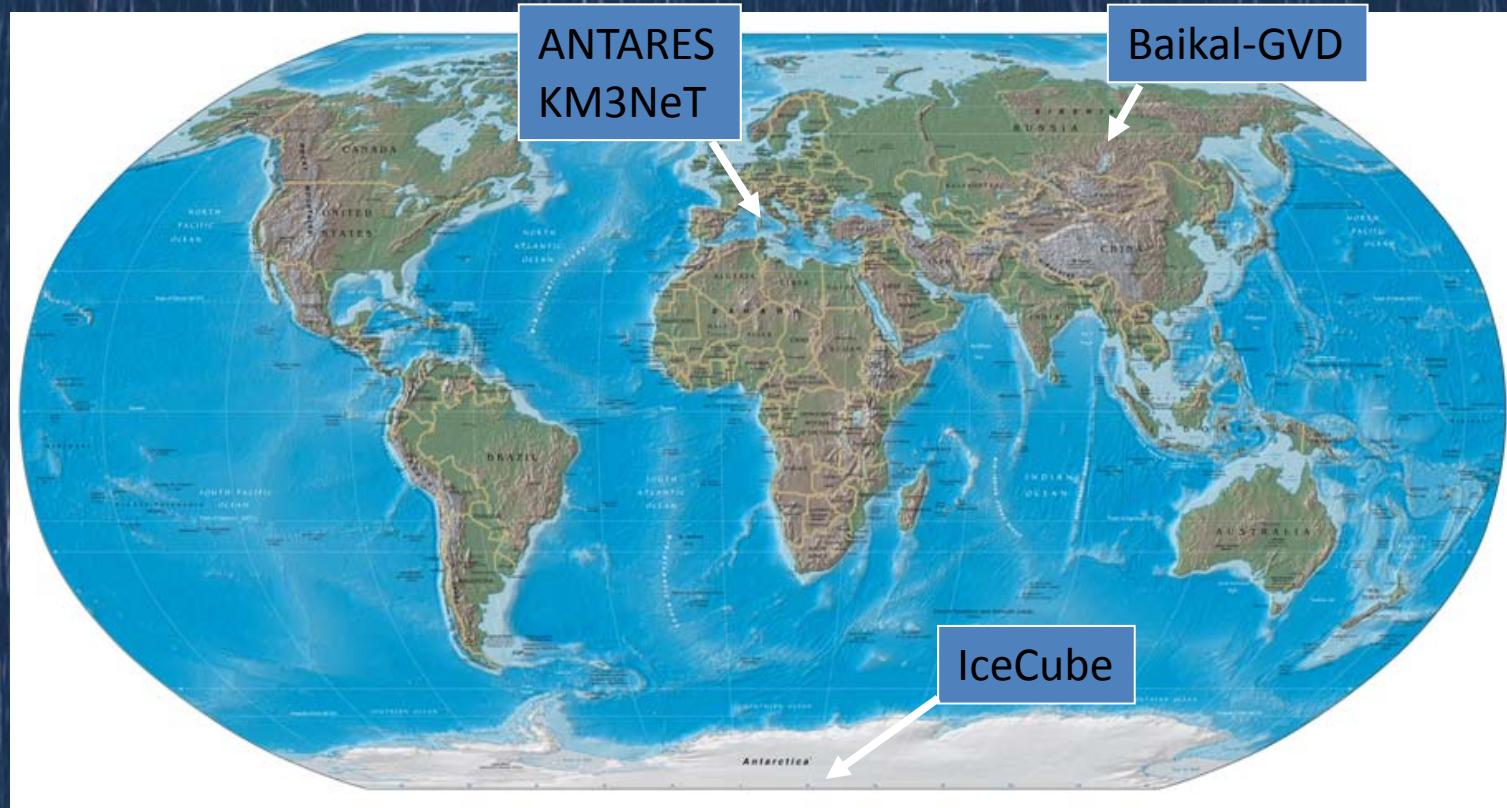
Fondo

- Hay dos tipos de fondo, producidos por los rayos cósmicos interactuando en la atmósfera:
 - Muones atmosféricos (\rightarrow detector a gran profundidad y sucesos hacia arriba).
 - Atmospheric neutrinos (\rightarrow selección de alta energía).



Telescopios de neutrinos en el mundo

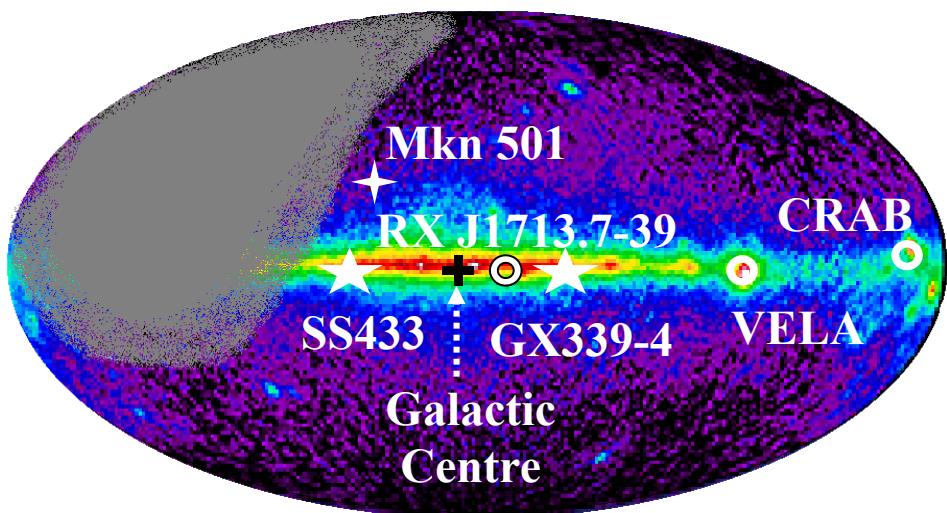
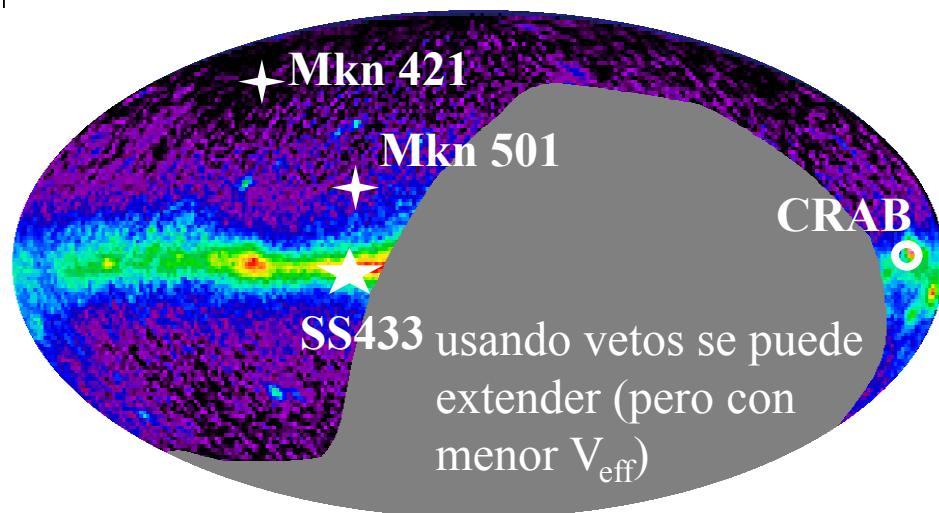
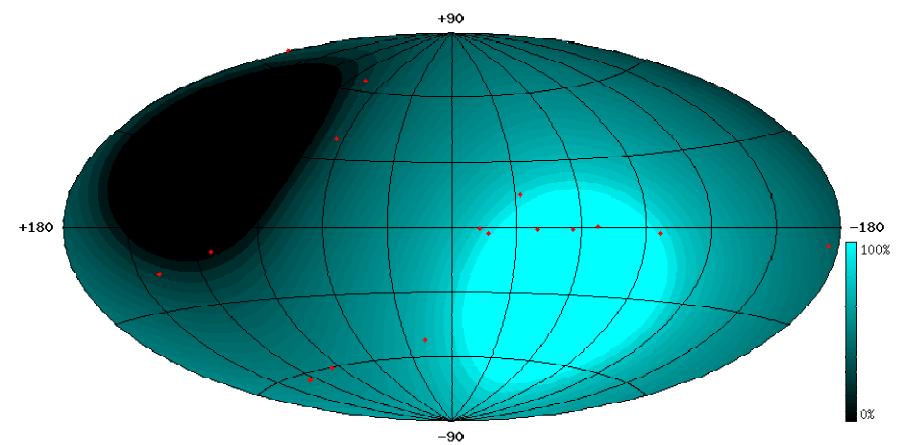
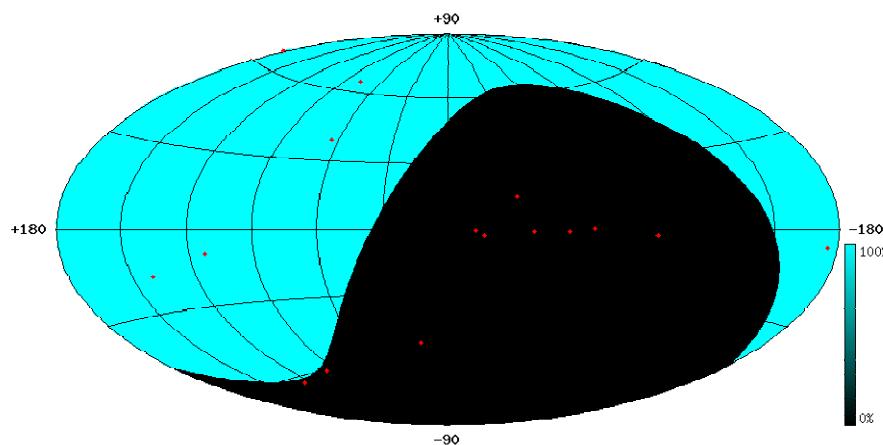
- Hay varios proyectos de telescopios de neutrinos funcionando o en construcción:



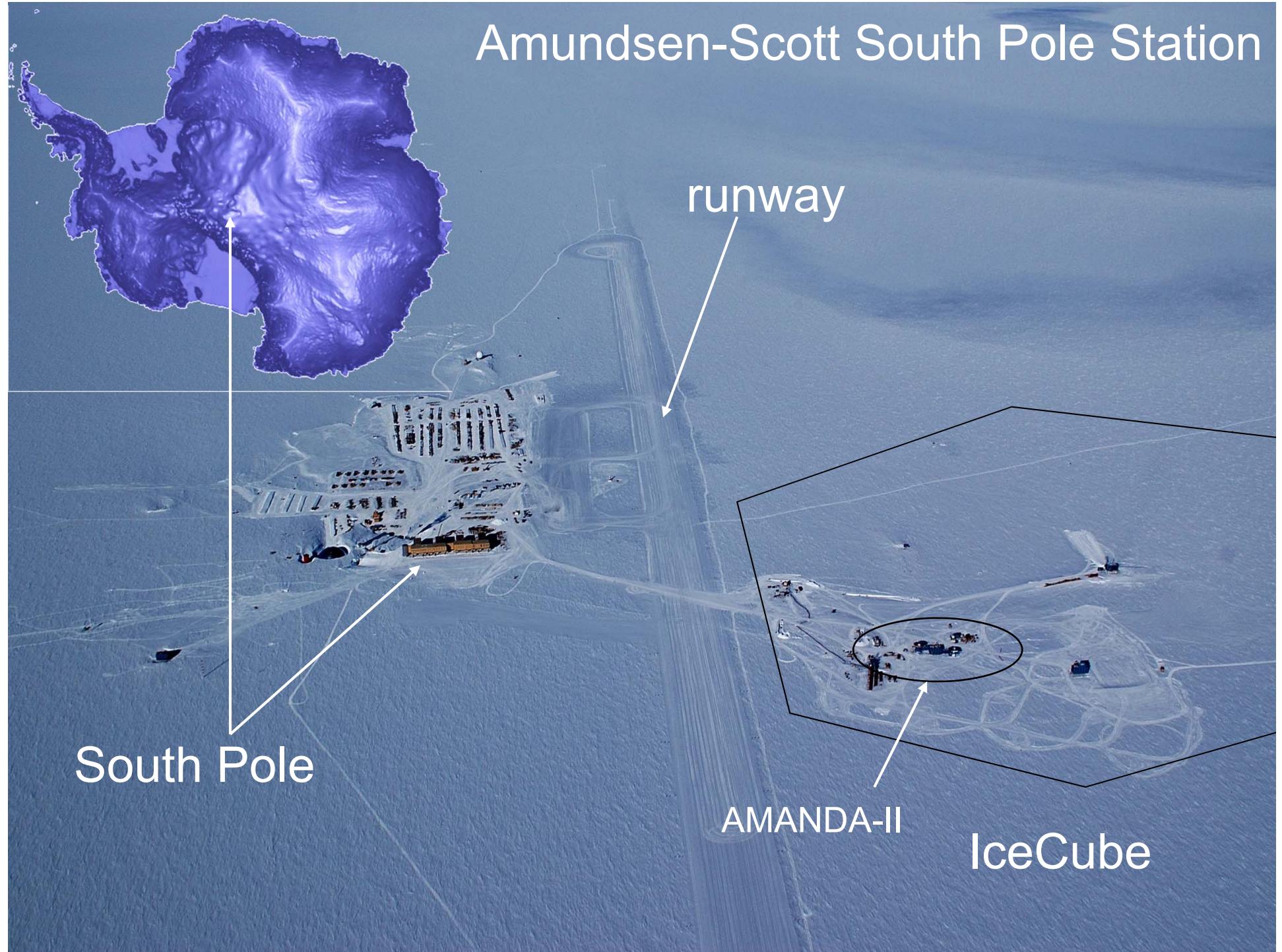
Visibilidad

IceCube (Polo Sur)
(ang. res.: 0.6°)

ANTARES (43° Norte)
(ang. res.: $\sim 0.3^\circ$)



IceCube



Amundsen-Scott South Pole Station

IceCube

IceTop

80 pares de tanques
Cherenkov
Umbral ~ 300 GeV

IceCube Array

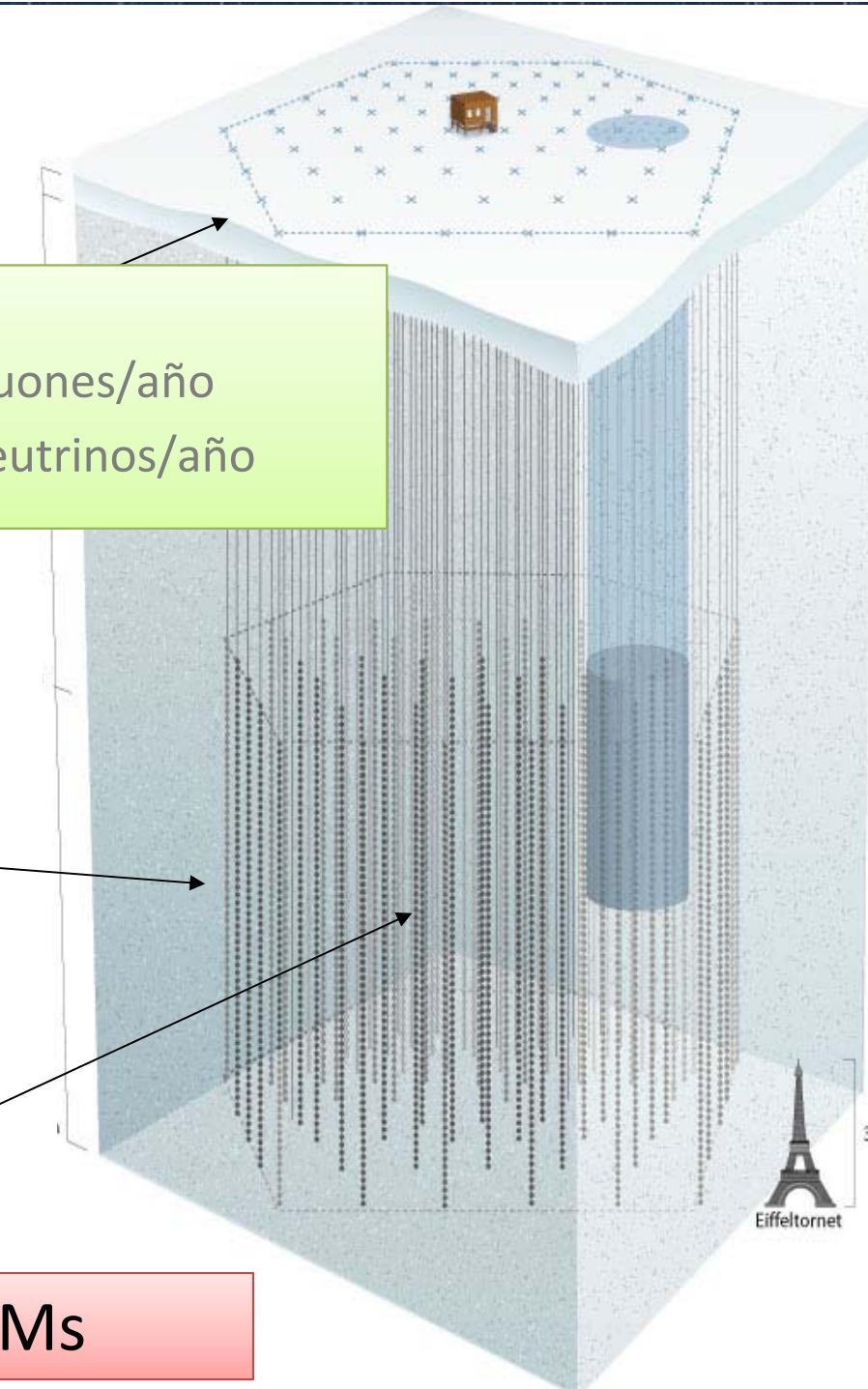
80 líneas con 60 OMs
17 m entre OMs
125 m entre líneas
1 km³. Un detector de mil millones de toneladas (1 Gton)

Deep Core

6 líneas con 60 OMs HQE
Parte interna del detector

IC86:

~ 5×10^{10} muones/año
~ 20,000 neutrinos/año

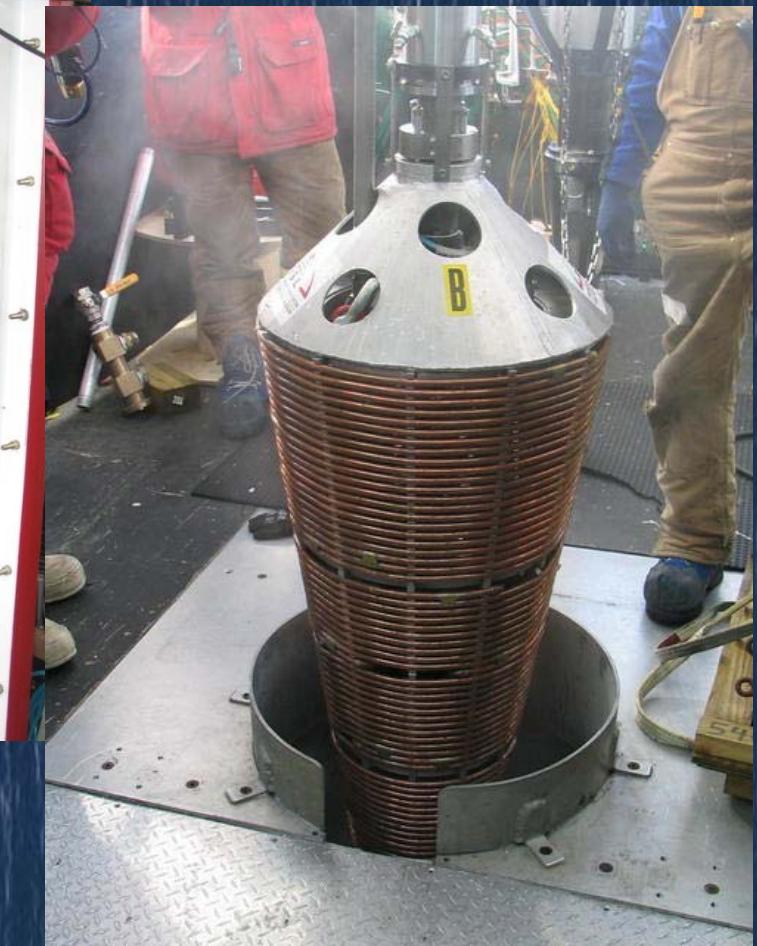


IceCube + Deep Core = 5160 OMs



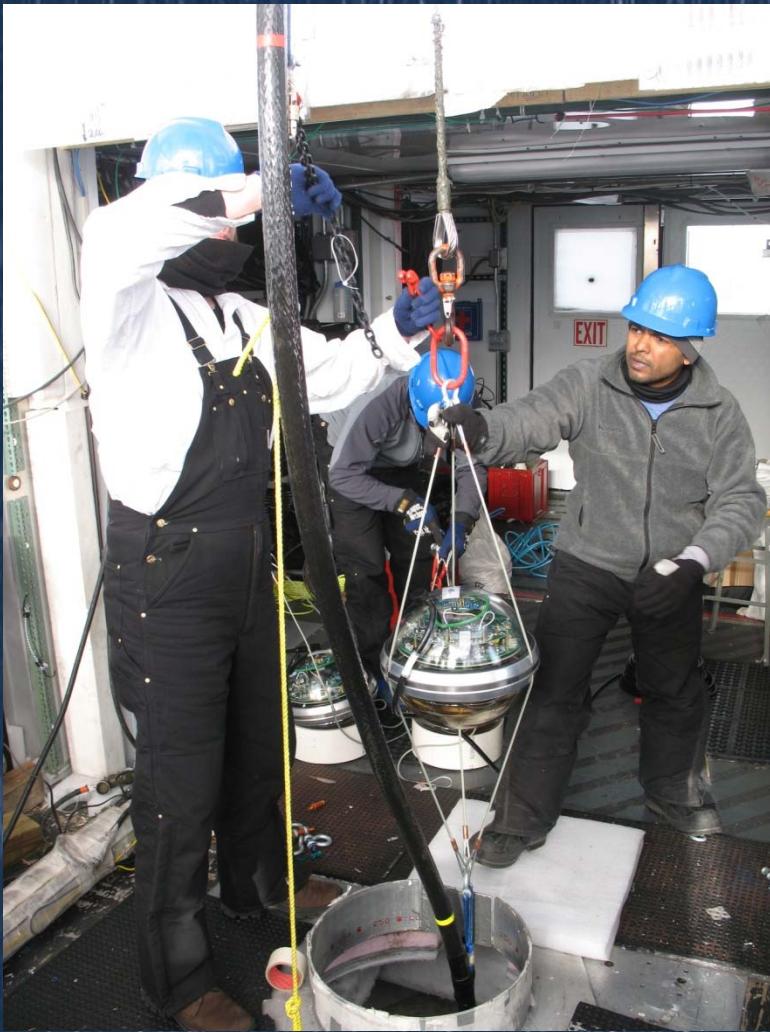
planta energética de 5 MW
 10^6 kg de equipamiento de
perforación

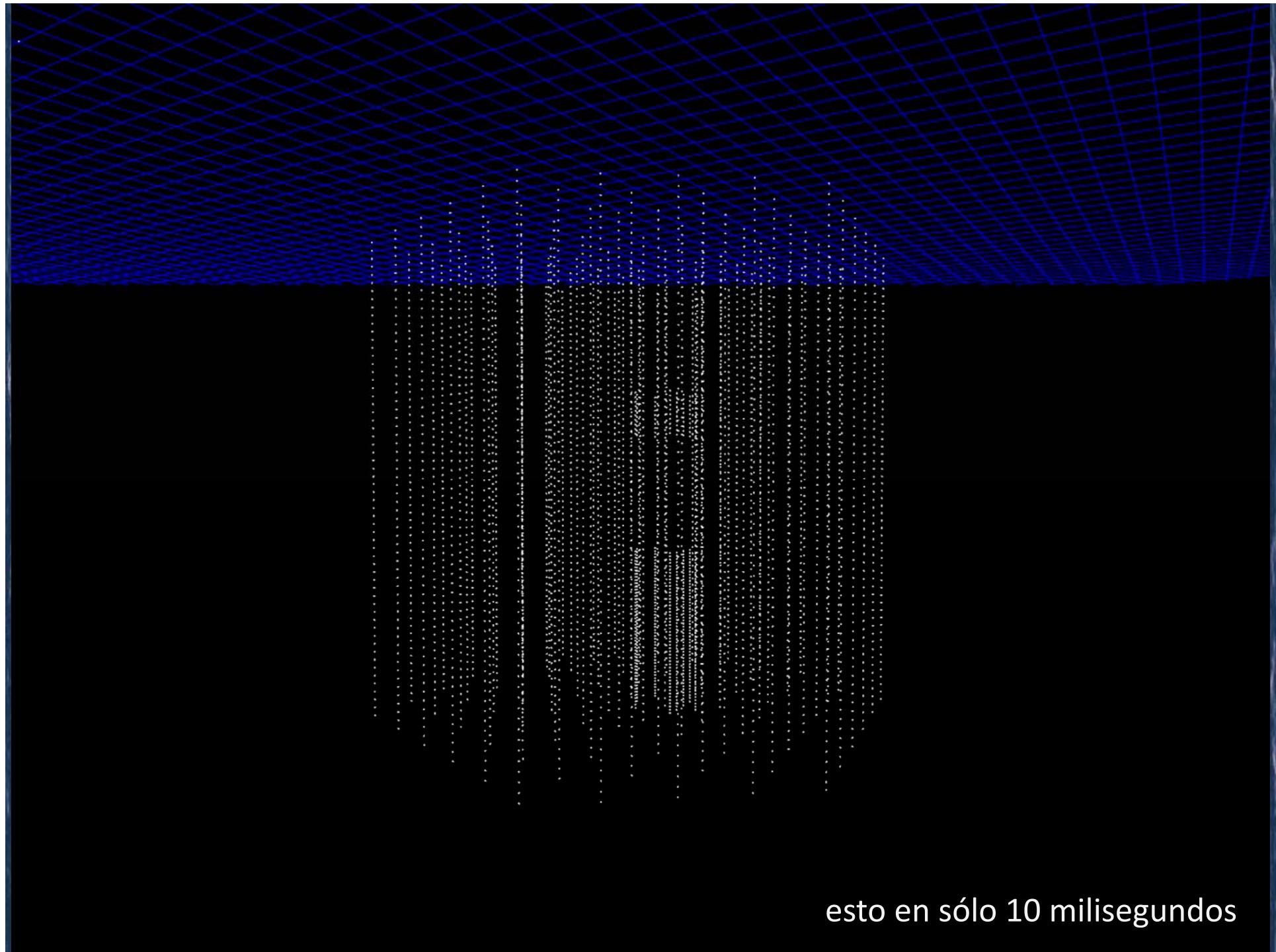
Instalación de las líneas



la perforación de
2.5 km se realiza
en unos dos días

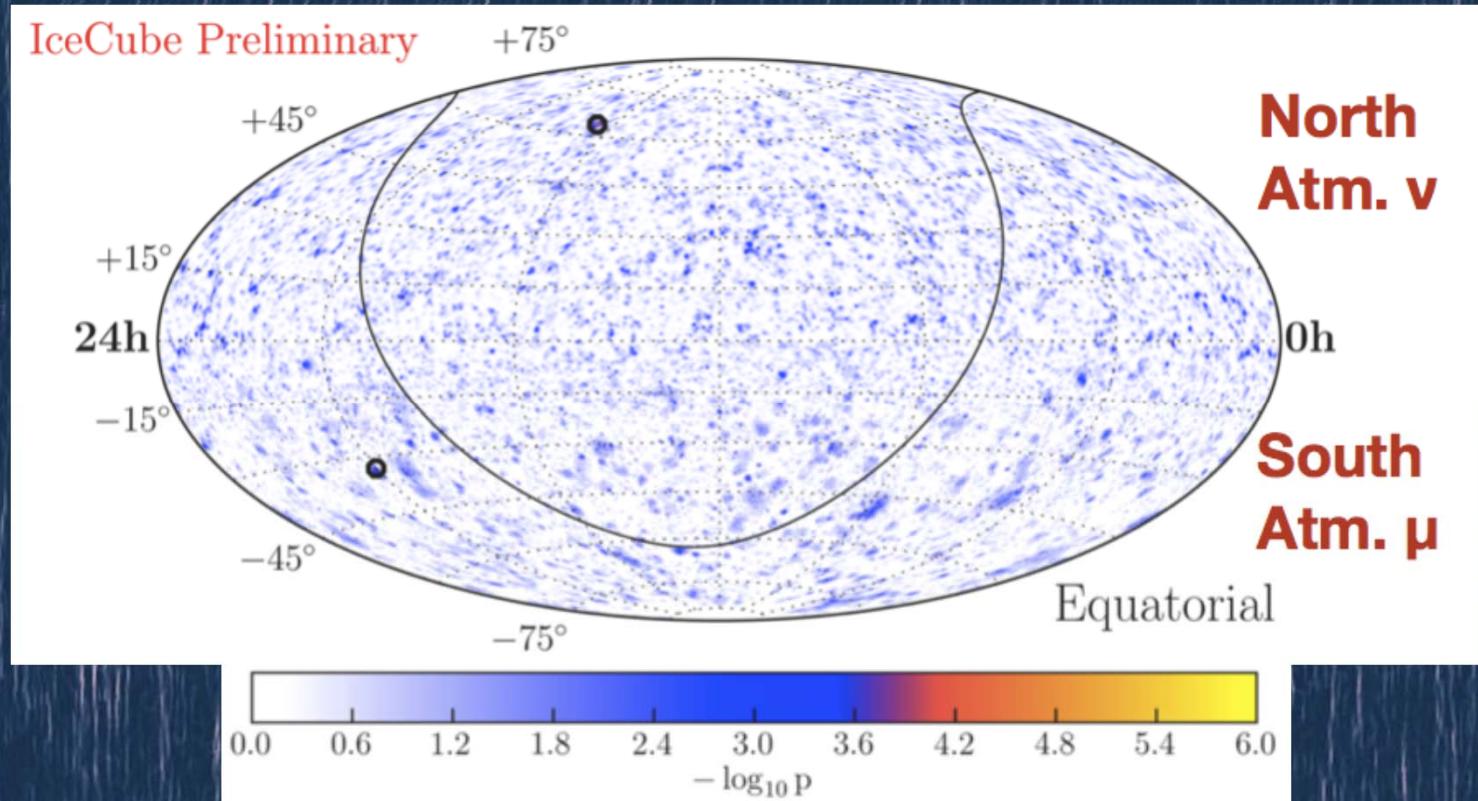
Instalación de las líneas





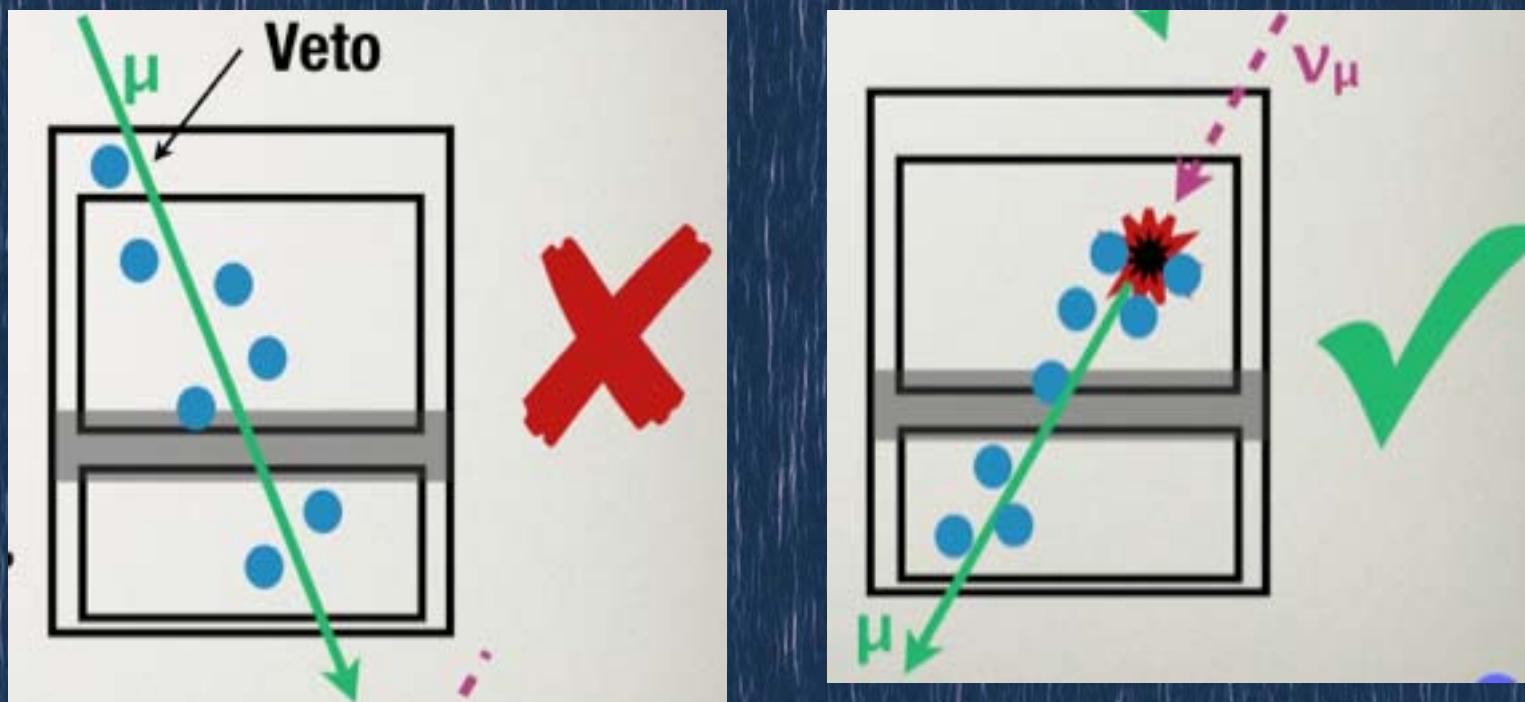
esto en sólo 10 milisegundos

Mapa del cielo



Eventos HESE

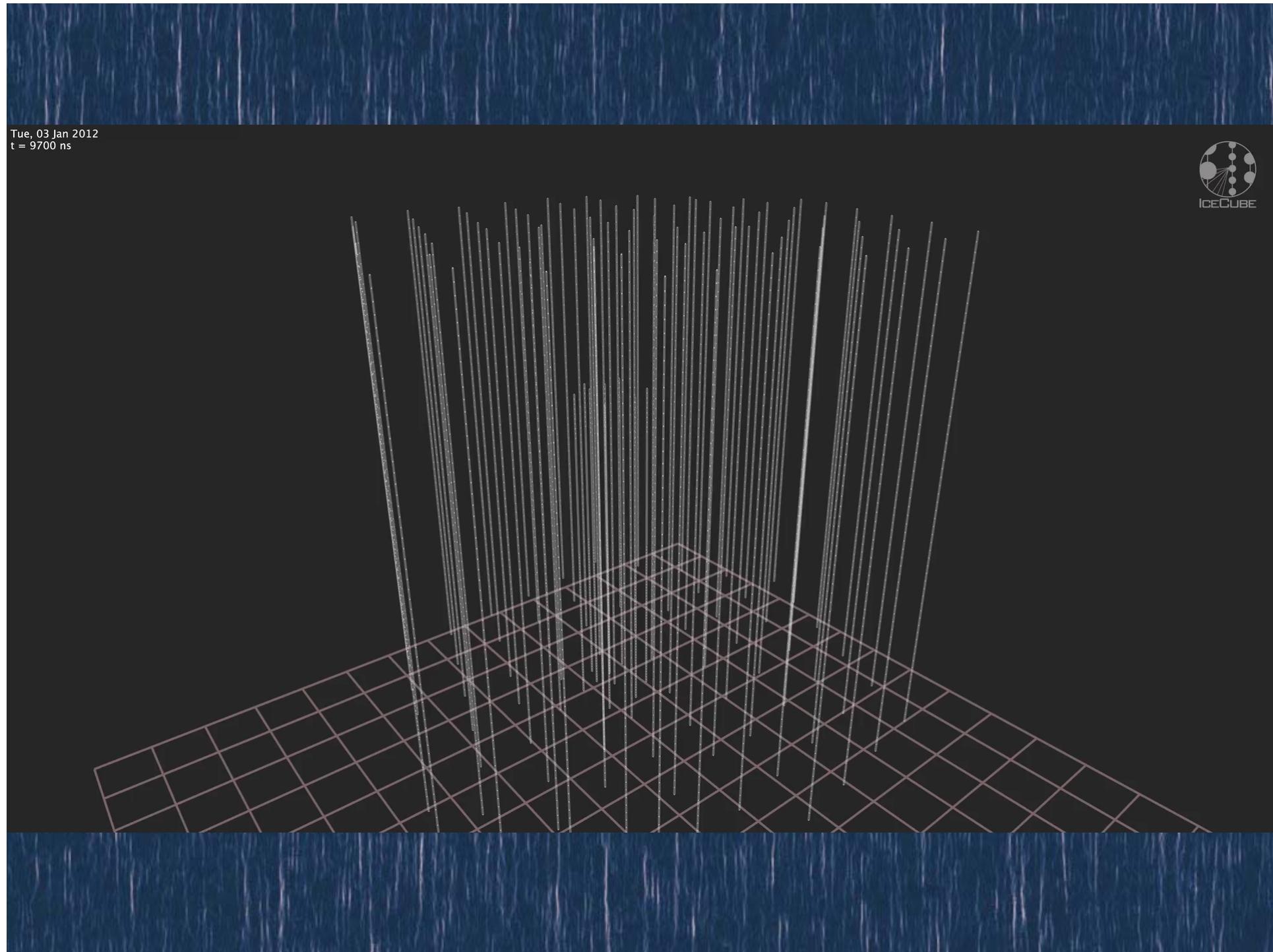
HESE (High Energy Starting Events): Sucesos de alta energía que empiezan dentro del detector



Esta estrategia permite reducir el fondo debido a los muones atmosféricos, porque habrían dejado señal en la parte externa del detector (veto)

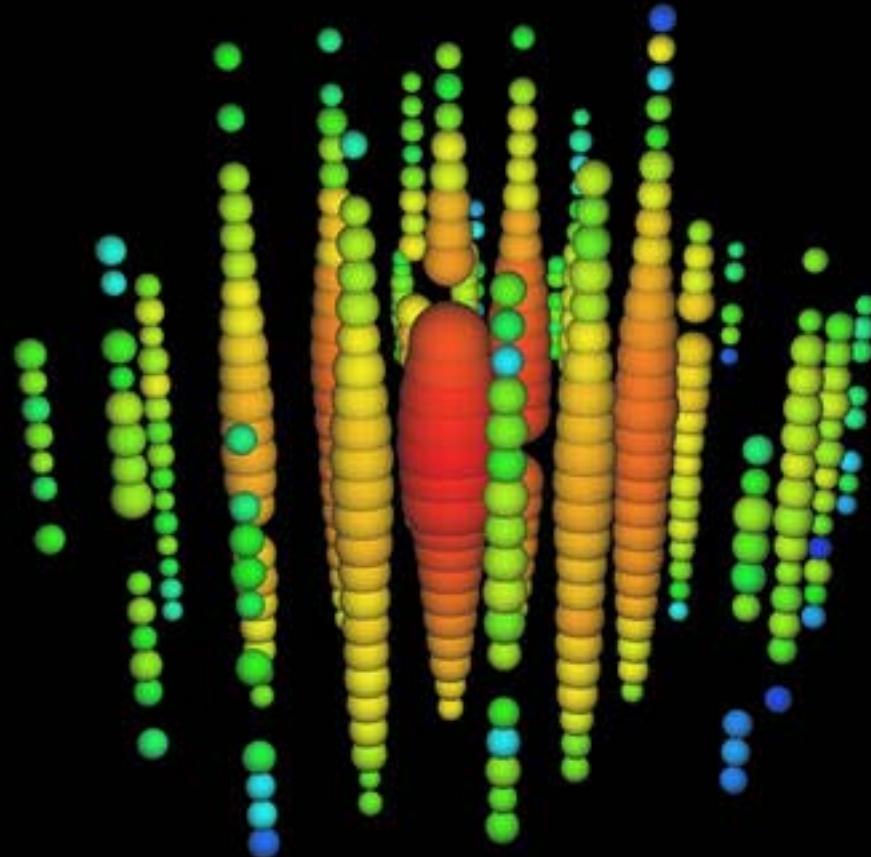
También ayuda a filtrar los neutrinos atmosféricos pues suelen ir acompañados de muones

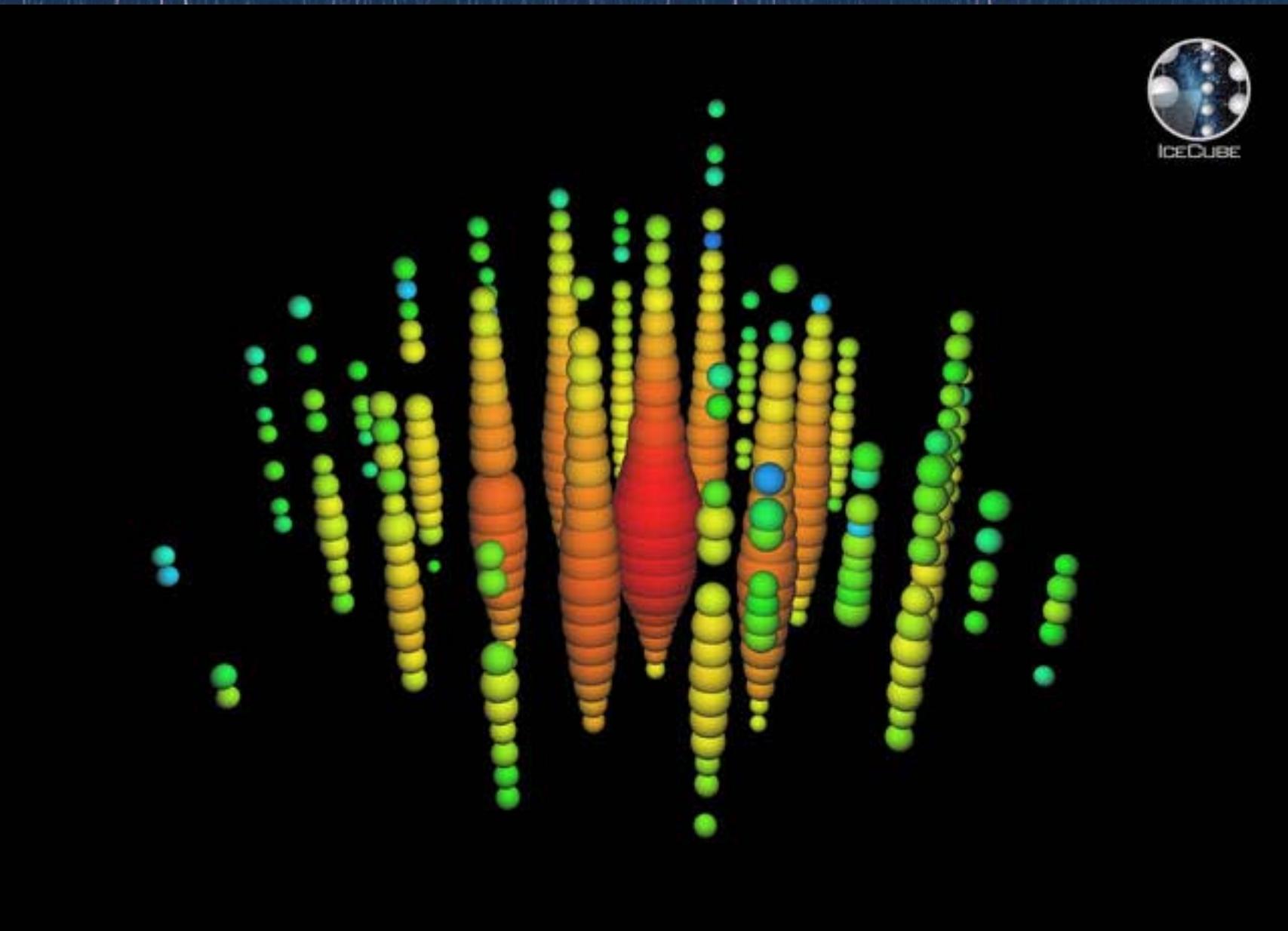
Desventaja: se reduce el volumen efectivo (¡sólo sucesos contenidos!)





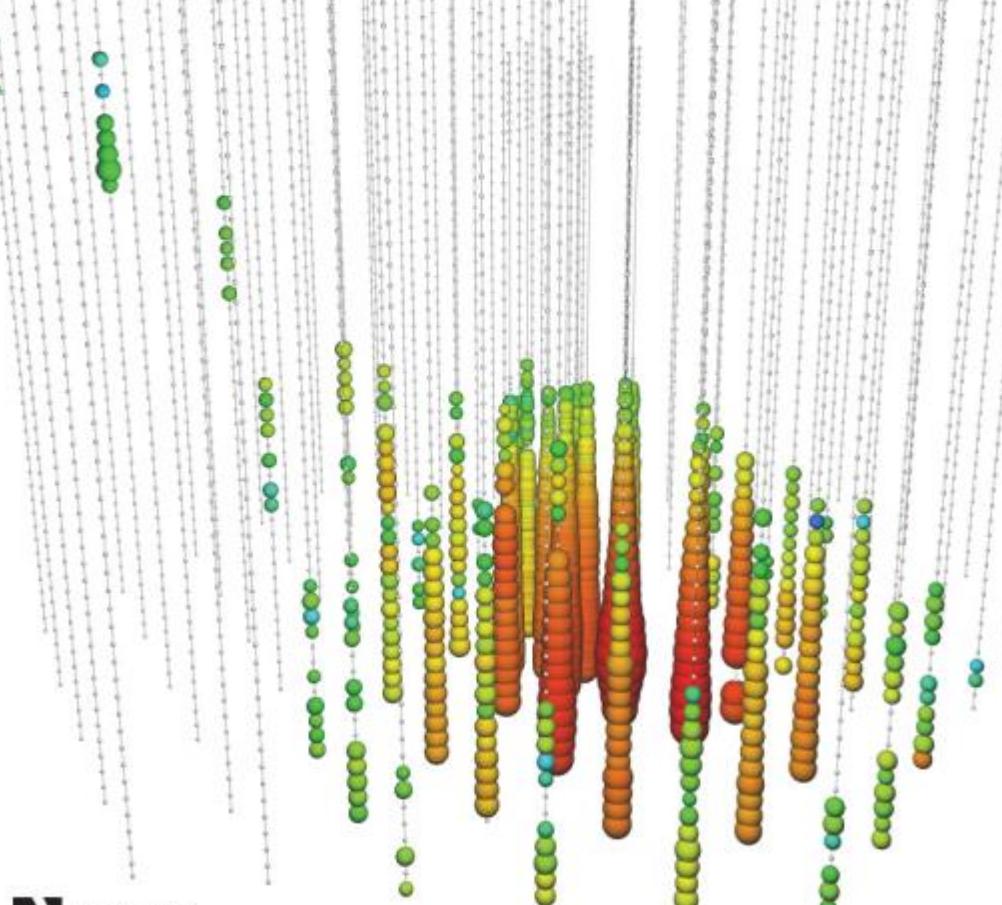
IceCube





Science

22 November 2013 | \$10



AAAS

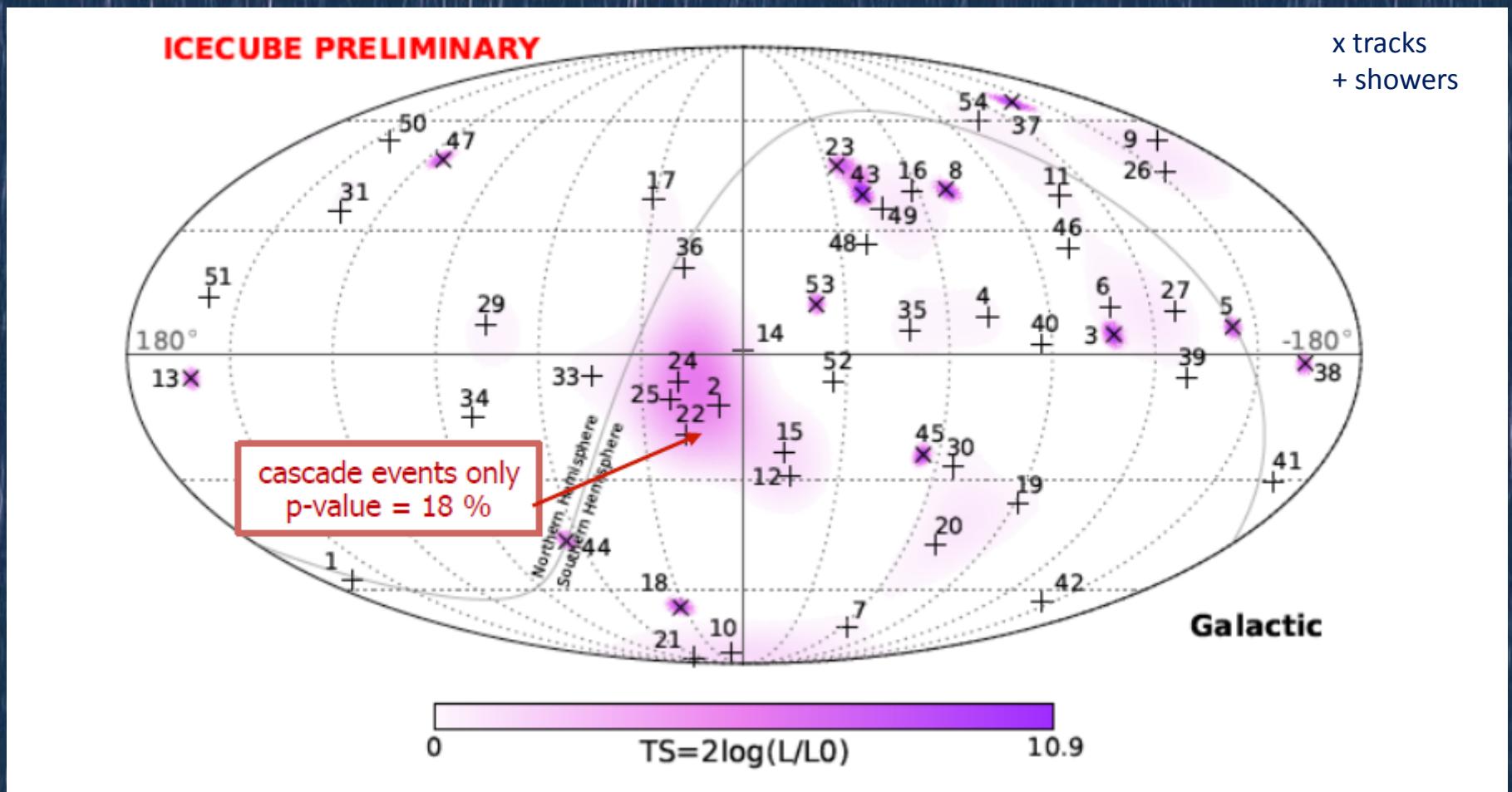
ESE

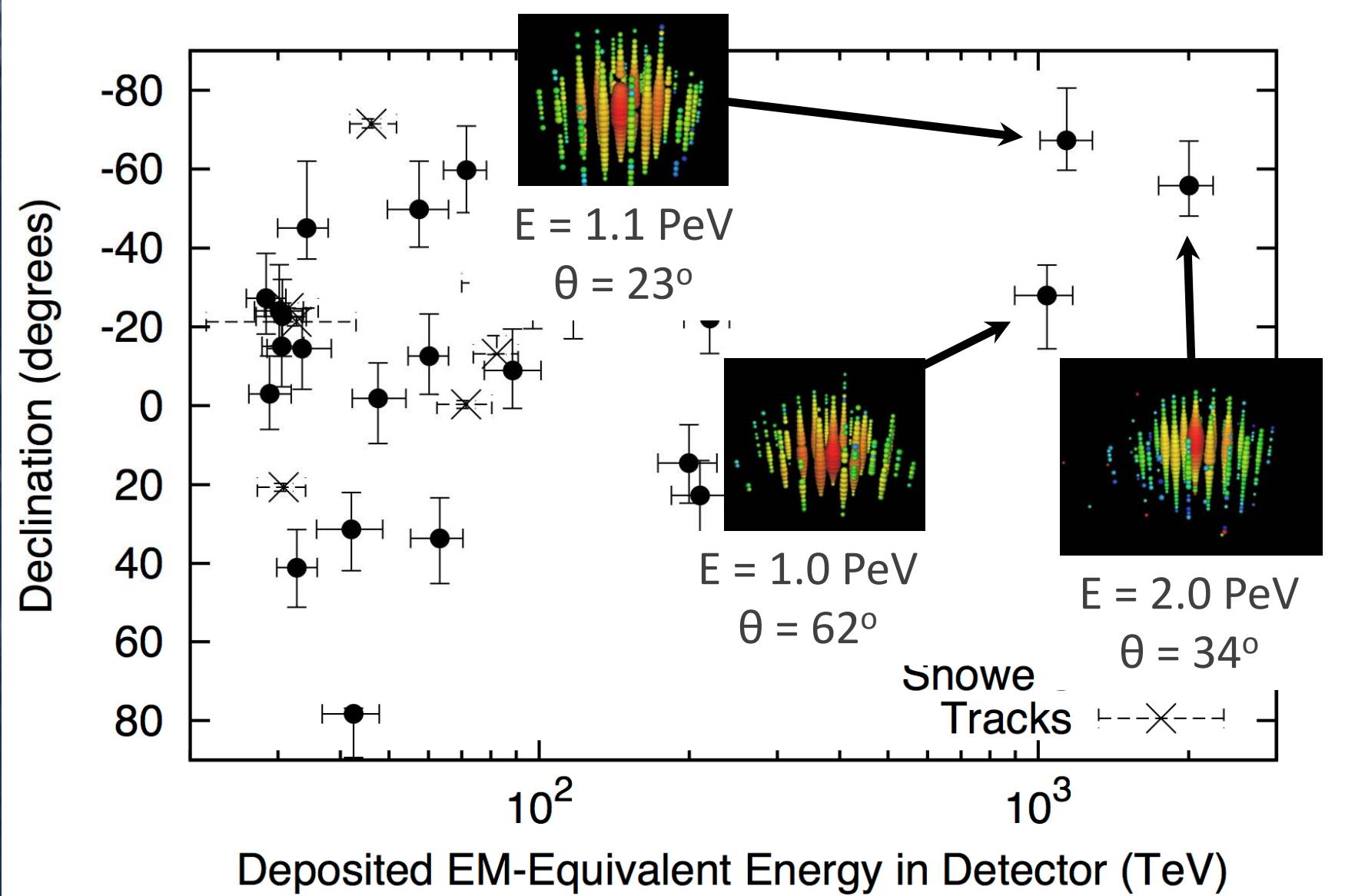
- 28 sucesos en total (incluyendo a Epi y Blas)
- Fondo esperado:
 - 6.0 ± 3.4 muones atm.
 - 4.6 ± 1.5 neutrinos atm.
- Significancia: 4.9σ

Discovery!

- Con cuatro años ya se ha pasado a 54 sucesos, con un fondo de 20 ± 6 (significancia: $\sim 7\sigma$)

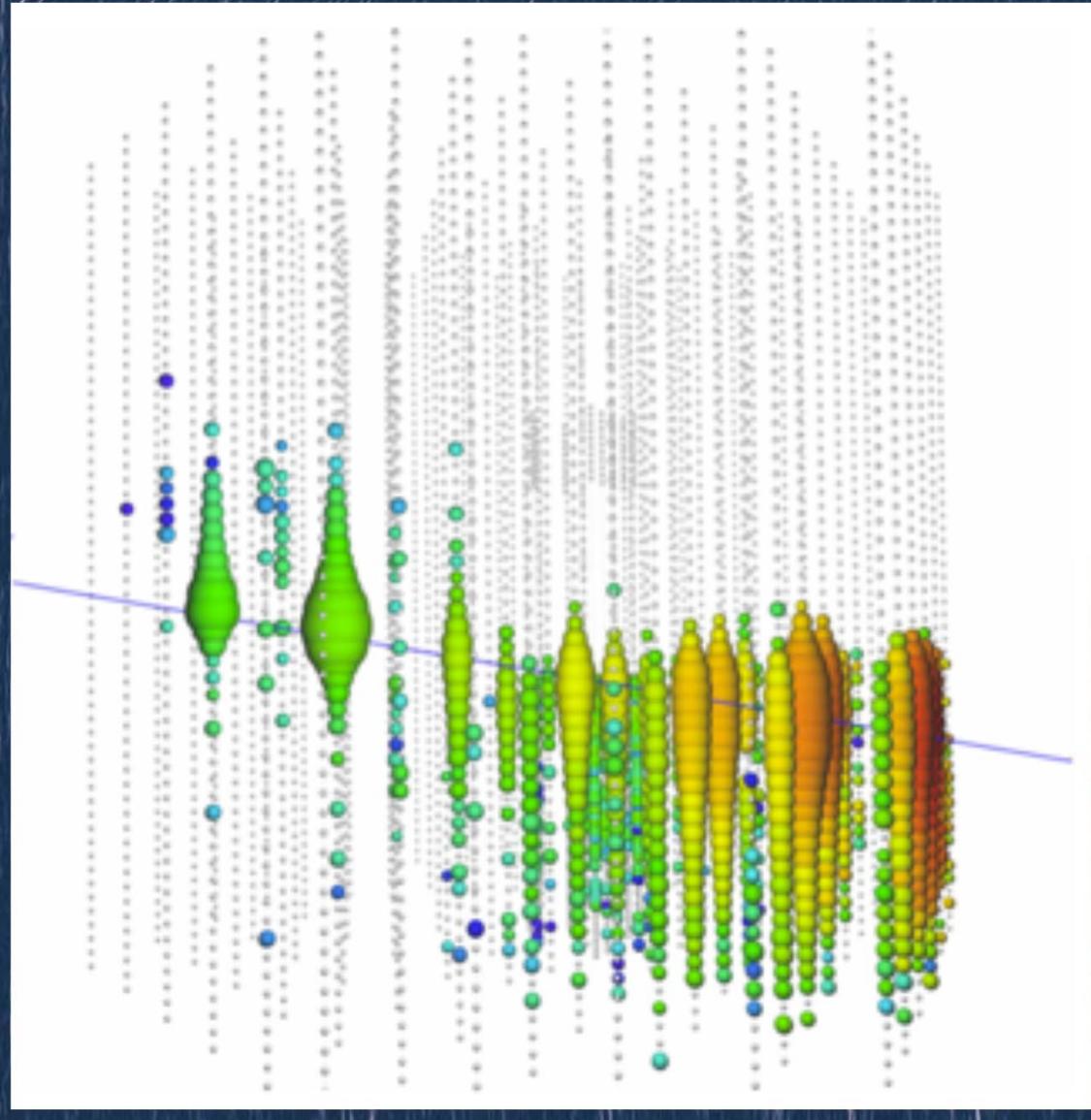
Mapa de sucesos HESE





G. Hill

¡Récord en energía!



- Energía *depositada*: 2.6 ± 0.3 PeV (neutrino más energético jamás observado)
- La energía total ha de ser mayor (sólo vemos la que parte de traza que cruza el detector)