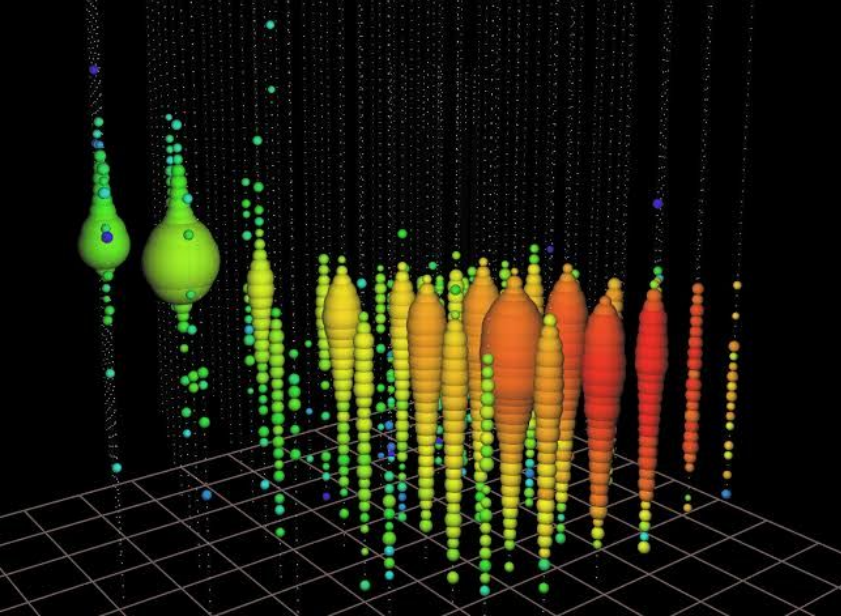
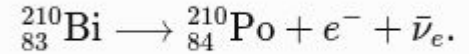




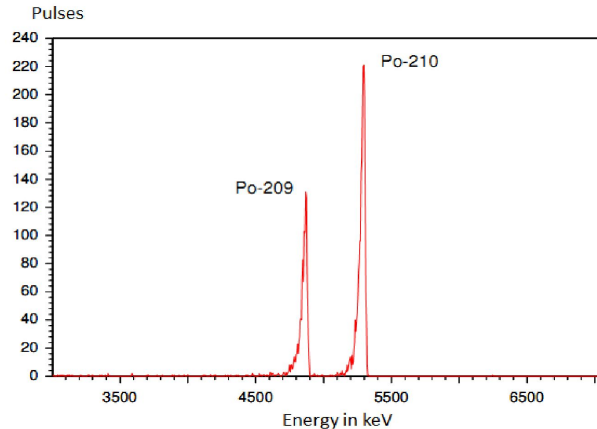
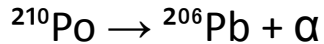
IceCube y el Nobel de Física 2026



El problema que llevó al neutrino

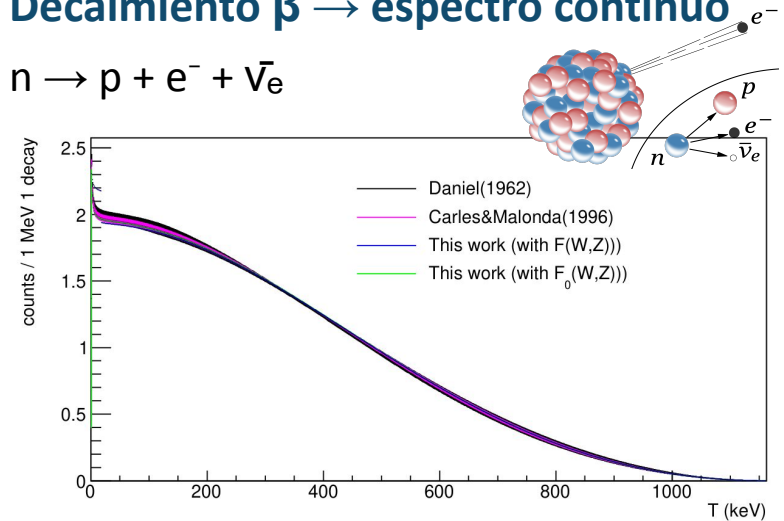
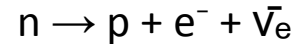


Dos cuerpos $\rightarrow$ energía discreta



Una transición dada produce un pico bien definido.

Decaimiento $\beta \rightarrow$ espectro continuo



El electrón comparte Q con el antineutrino y el retroceso nuclear.

La “energía faltante” no desaparece: el neutrino permite conservar simultáneamente energía y momento en el decaimiento β .

¿Qué no sabemos aún sobre los neutrinos?

Las oscilaciones están establecidas. Precisamente por eso, el sector de neutrinos apunta más allá del Modelo Estándar mínimo.

$$m_1, m_2, m_3$$

Escala absoluta y ordenamiento

Las oscilaciones miden Δm^2 , no las masas absolutas. El orden normal está favorecido, pero todavía no establecido de forma definitiva.

$$\delta_{CP}$$

¿Existe violación CP leptónica?

¿Neutrinos y antineutrinos oscilan de manera diferente? Hay preferencias experimentales, pero no una observación concluyente de CPV.

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

¿Dirac o Majorana?

No sabemos si neutrino y antineutrino son partículas distintas. El doble beta sin neutrinos sería una señal clásica de naturaleza Majorana.

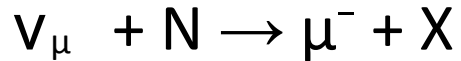
$$m\nu : \text{¿de dónde viene?}$$

¿Cómo adquieren masa?

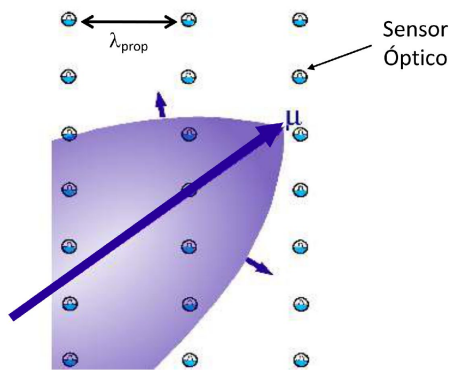
El Modelo Estándar mínimo no explica sus masas. ¿Yukawa de Dirac extremadamente pequeño, masa de Majorana, mecanismo seesaw u otra física?

De un neutrino a una señal eléctrica

Interacción de corriente cargada



Los secundarios cargados producen luz Cherenkov.

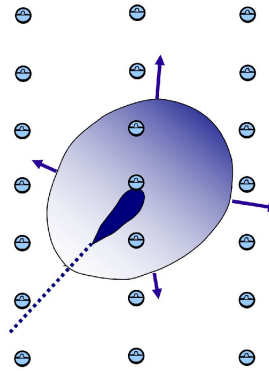


Esquemas: I. Taboada, LA-CoNGA, diap. 7.

Emisión Cherenkov

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

$$\beta = v/c \quad n\beta > 1$$

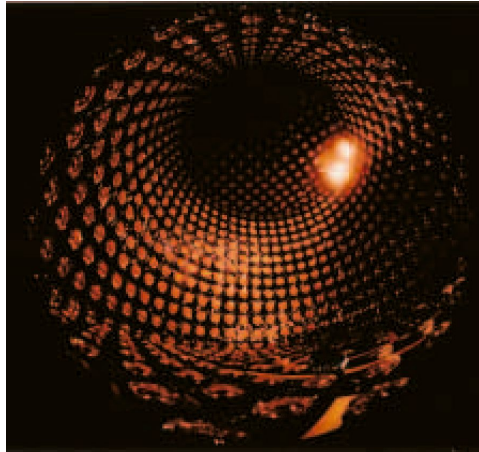


Luz $\rightarrow$ fotoelectrones $\rightarrow$ pulsos eléctricos $\rightarrow$ tiempos y carga

Kamiokande y AMANDA: antes de IceCube

Kamiokande

Agua en Japón, inicio en 1983



3000 t de agua y fotomultiplicadores.

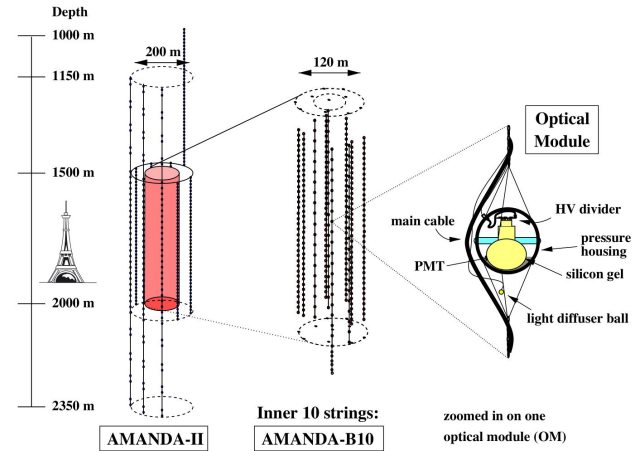
1987: neutrinos de SN 1987A

Ambos detectan luz Cherenkov de las partículas secundarias.

. Koshiba, Nobel Lecture (2002), fig. 1. J. M. Santander, tesis UW–Madison (2013), fig. 2.13.

AMANDA-II

Hielo del Polo Sur, 2000–2009



677 módulos ópticos en 19 cuerdas.

Precursor directo de IceCube

Neutrinos como mensajeros

Rayos cósmicos

Los campos magnéticos desvían protones y núcleos.

Fotones

Permiten hacer imágenes, pero pueden absorberse en materia y radiación.

Neutrinos

Sin carga y con interacción débil.
Transportan información desde aceleradores cósmicos.

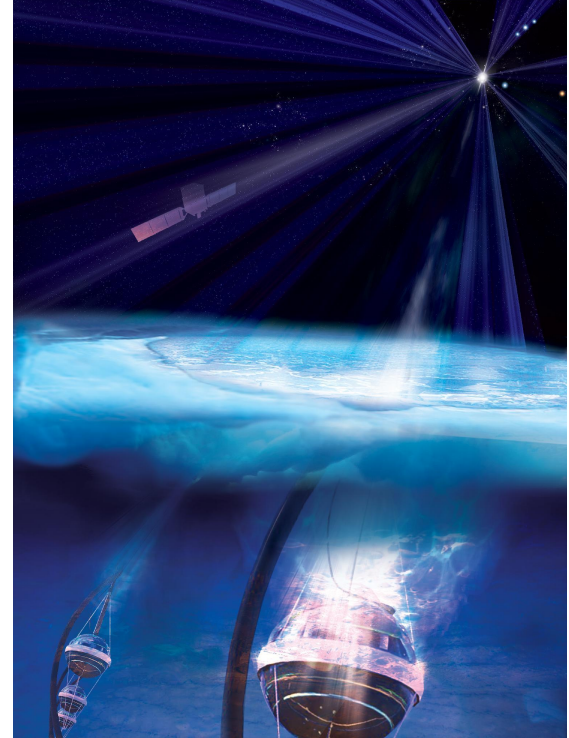
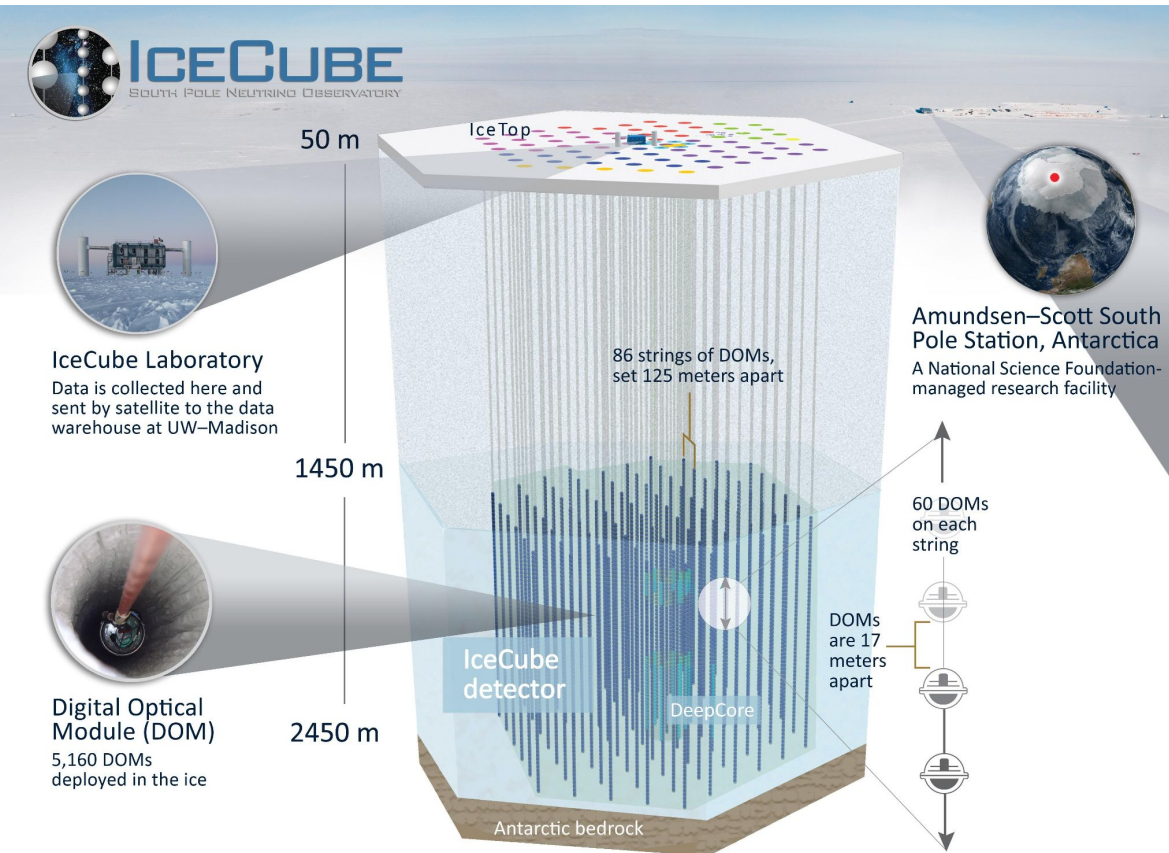


Ilustración: NASA/Fermi · A. Simonnet, Sonoma State University

Un kilómetro cúbico de hielo instrumentado



Configuración original

$\approx 1 \text{ km}^3$

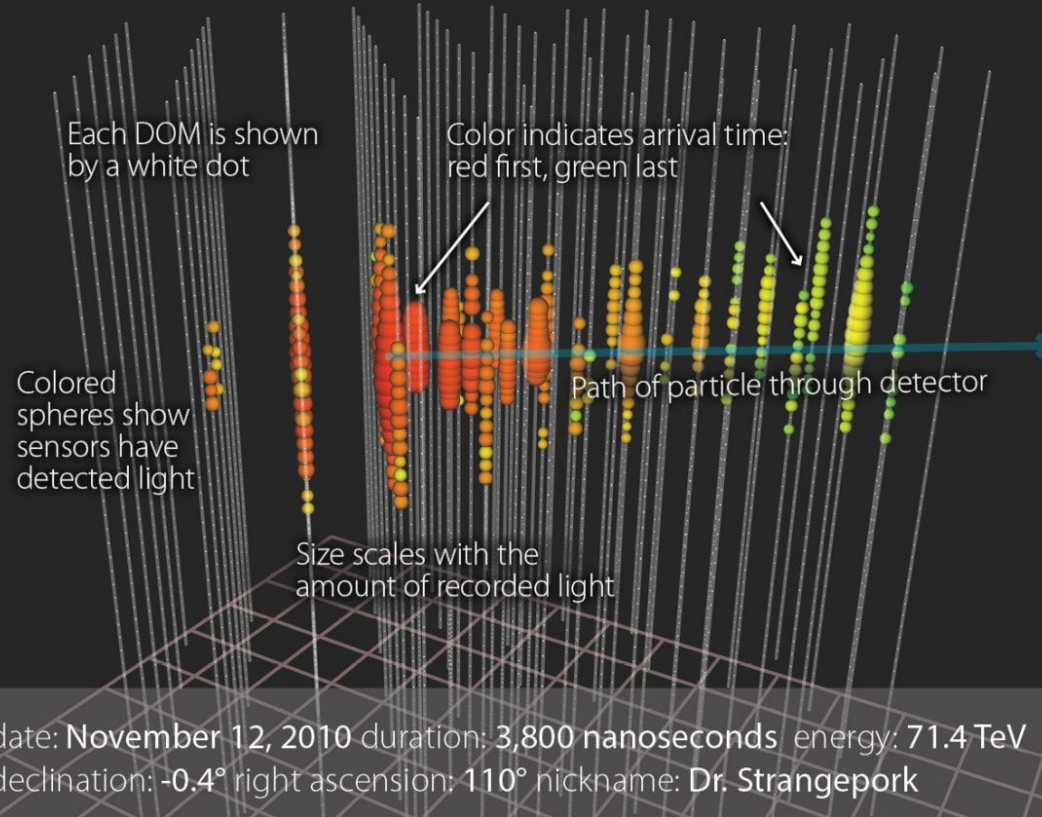
86 cuerdas
5160 módulos ópticos

1450–2450 m
de profundidad

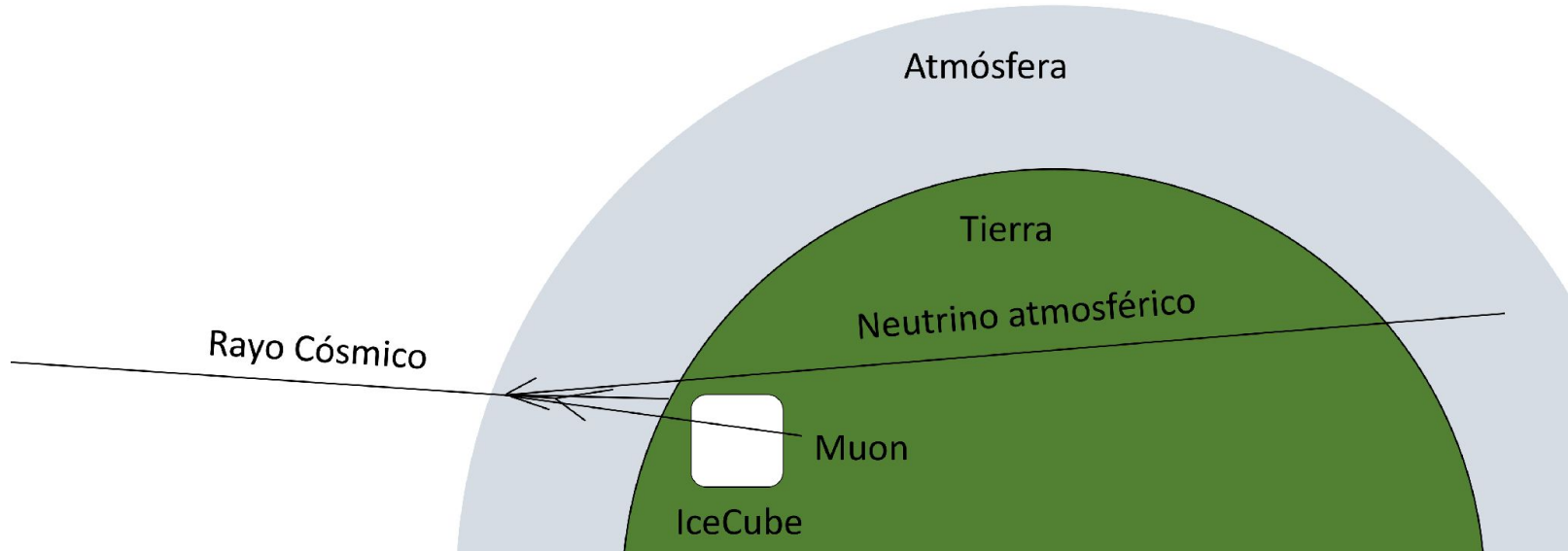
Operación completa desde 2011

How does IceCube work?

When a neutrino interacts with the Antarctic ice, it creates other particles. In this event graphic, a muon was created that traveled through the detector almost at the speed of light. The pattern and the amount of light recorded by the IceCube sensors indicate the particle's direction and energy.



El problema de los fondos



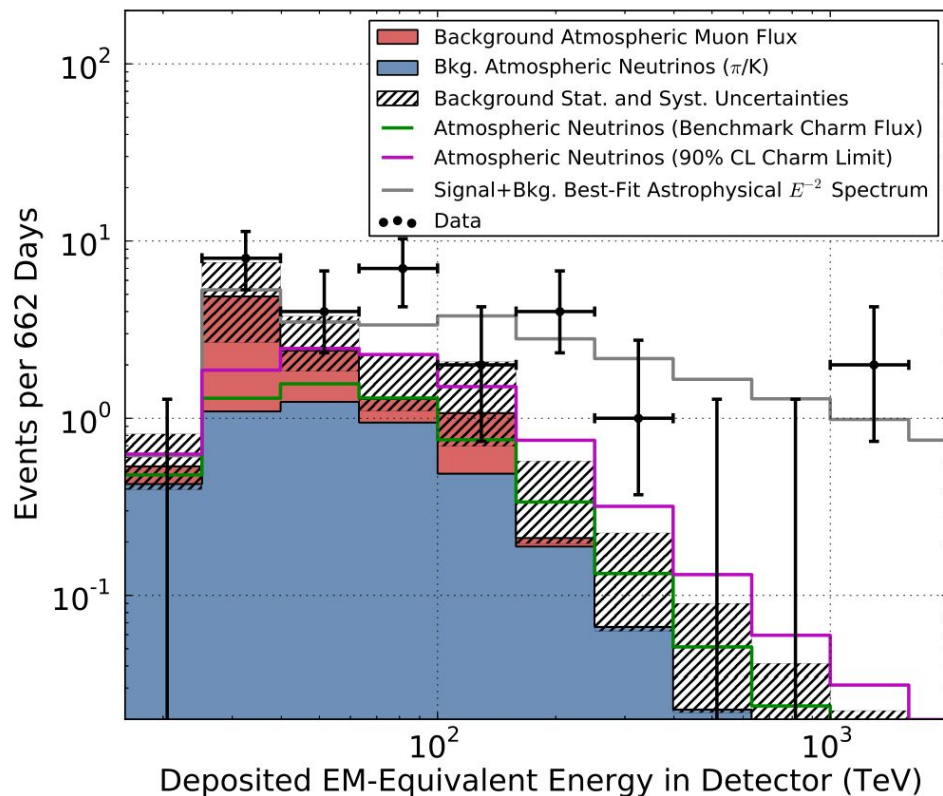
Selección de eventos

La Tierra suprime muones.
El veto selecciona eventos contenidos.

Separación estadística

Energía y dirección permiten estimar
el fondo de neutrinos atmosféricos.

La evidencia de 2013



IceCube, Science 342, 1242856 (2013), fig. 4.

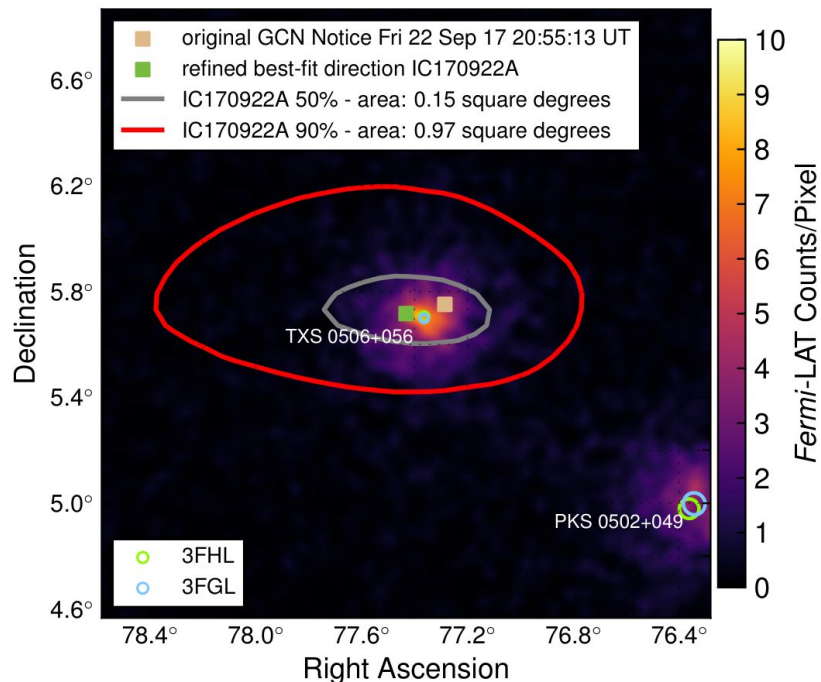
**28 eventos
en 662 días**

30–1200 TeV
de energía depositada

$\approx 4\sigma$

Evidencia de una
componente astrofísica
en la muestra.

Una fuente candidata: TXS 0506+056



22 de septiembre de 2017

IceCube-170922A
+ actividad gamma del blazar

Coincidencia espacial
y temporal: $\approx 3\sigma$

Archivo 2014–2015: 3.5σ
en un análisis separado

Dirección, tiempo y otros observatorios

El Nobel de Física de 2026



Foto: Althea Dotzour / UW–Madison (2024).

Francis Halzen

Investigador principal de IceCube

Contribuciones decisivas a IceCube
y al descubrimiento de neutrinos
astrofísicos de alta energía.

Las mediciones son fruto del
trabajo de la colaboración IceCube.