



Inteligencia Artificial Aplicada a la Astrofísica (de Altas Energías)

4ta Clase: Aplicaciones en IceCube,
HAWC y SWGO

Pedro Elías Mirón Enríquez

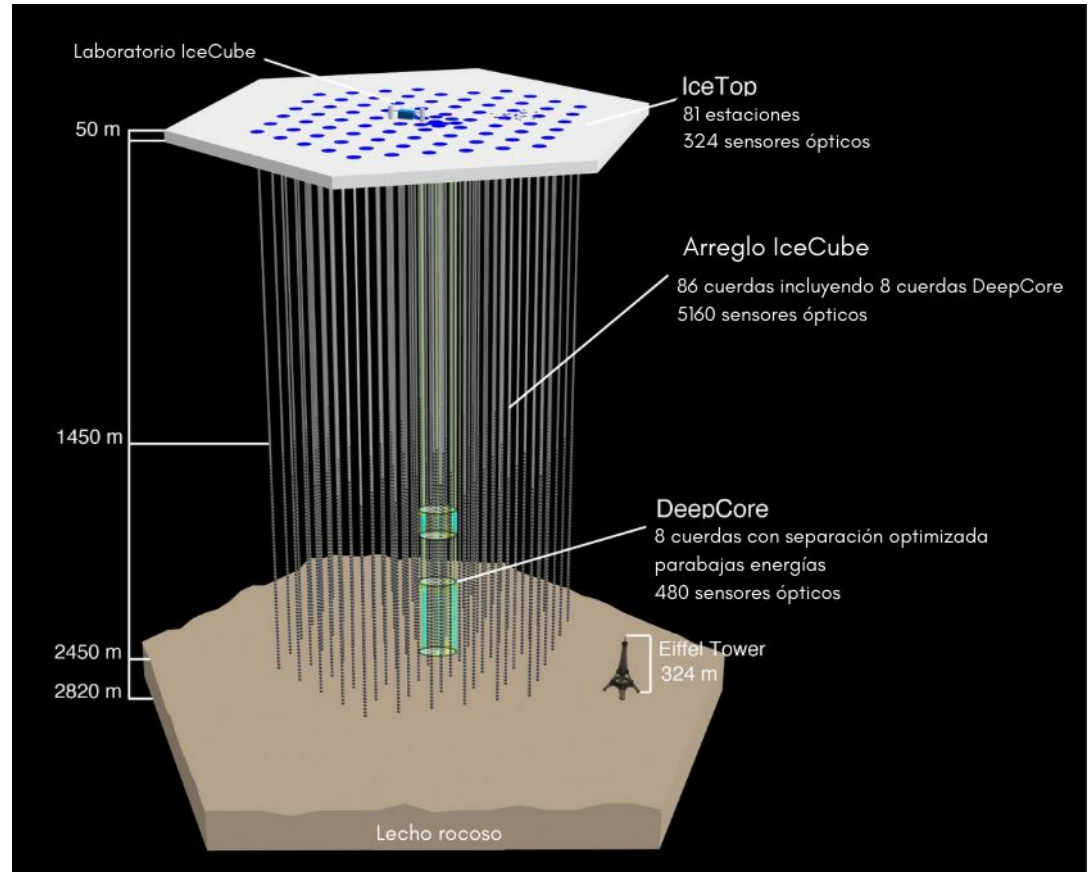
pmiron@astro.unam.mx

TAACO 2024, USAC, Ciudad de Guatemala, 21 de noviembre de 2024



IceCube

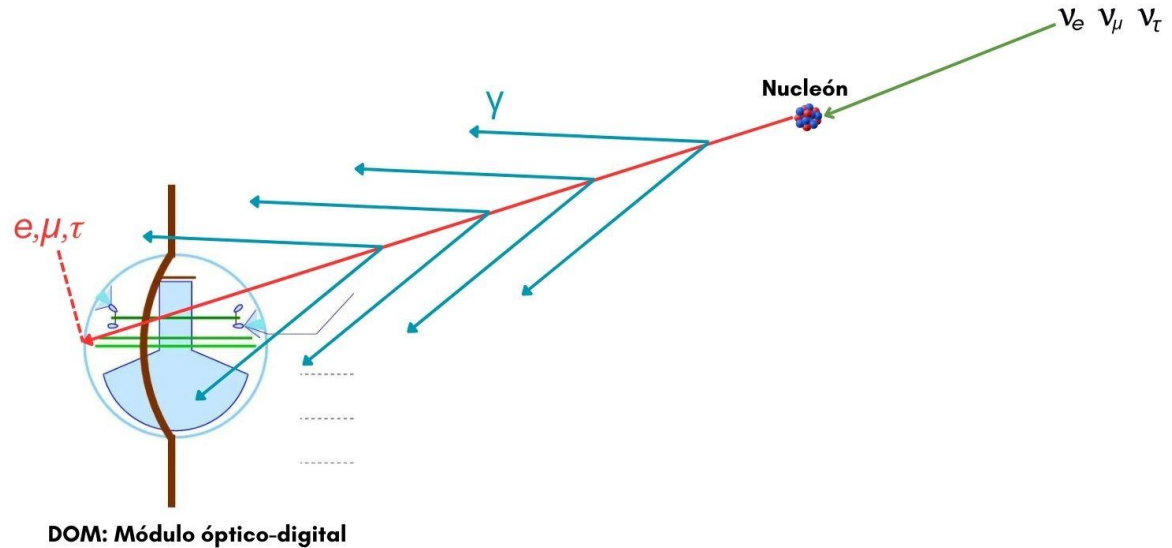
- Observatorio de neutrinos ubicado en Polo Sur.
- 5160 módulos digitales-ópticos que detectan radiación Cherenkov.
- Ubicados a profundidades entre 1.45 y 2.45 km debajo de hielo.
- Empezó operación en 2011.
- Observa eventos a una tasa de 2.7 kHz.



Fuente: [IceCube Collaboration](#)

Funcionamiento de IceCube - MOD

Neutrinos interactúan con nucleones presentes en el detector produciendo partículas secundarias, las cuales viajan más rápido que la velocidad de la luz en el hielo, resultando en radiación Cherenkov.



HAWC

- Ubicado en el Parque Nacional Pico de Orizaba, México, a 4,100 metros de altitud
- 300 tanques detectores de agua con 4 fotomultiplicadores cada uno
- Comenzó operaciones completas en 2015
- Detecta rayos gamma de muy alta energía (100 GeV - 100 TeV)
- Campo de visión de 2 sr y ciclo de trabajo >95%

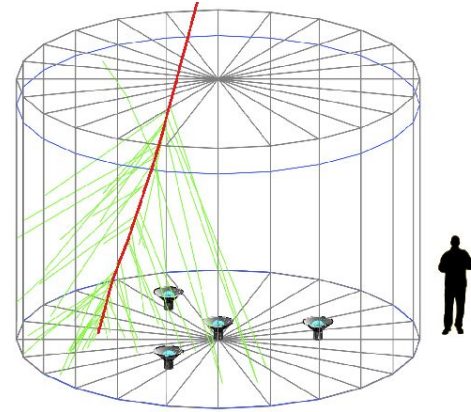
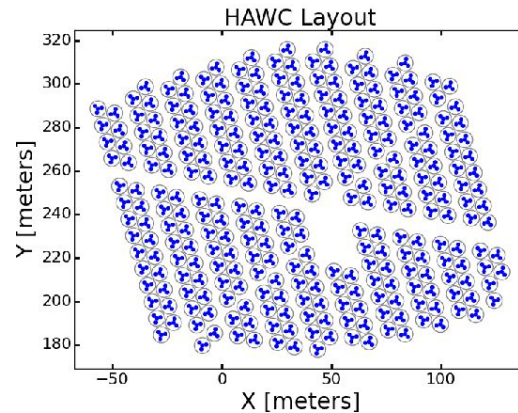
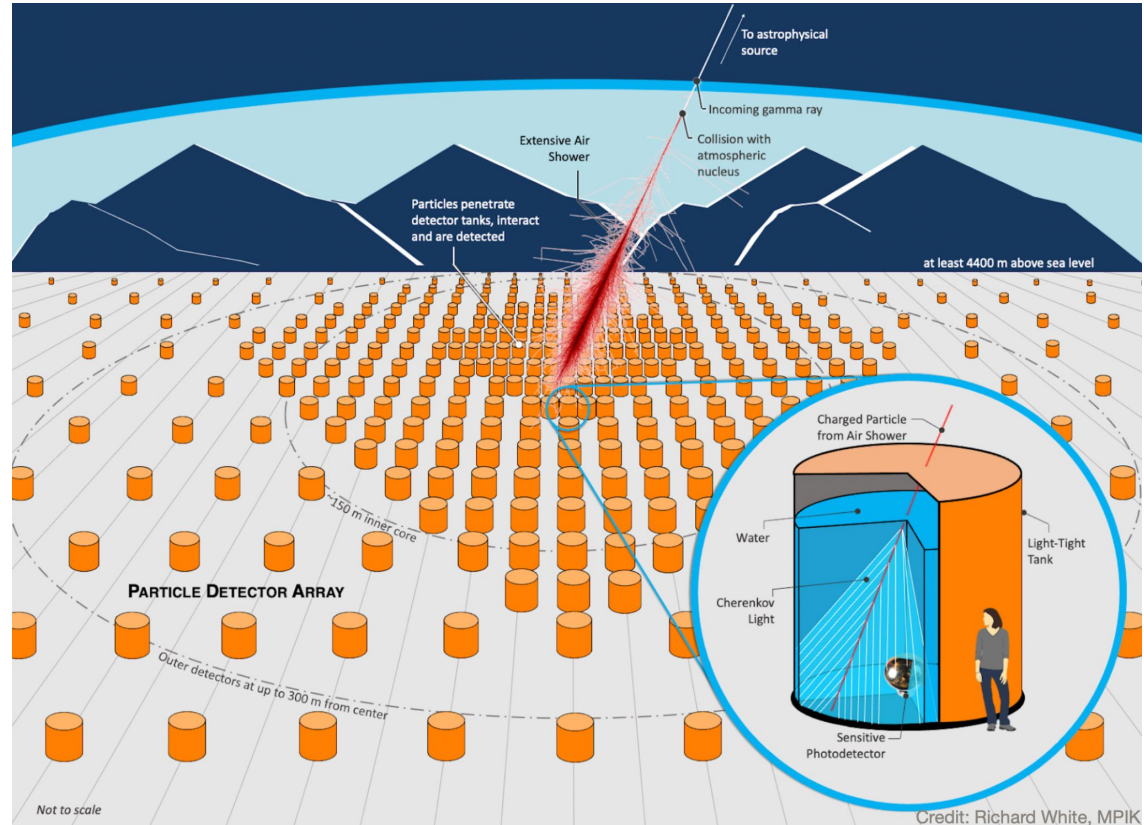


Diagrama del arreglo central de HAWC y escala de los tanques. Fuentes: [HAWC Layout \(Andrew James Smith\)](#) y [HAWC: A next-generation all-sky gamma-ray telescope](#)

SWG0

- Planificado para construcción en Chile
- Utilizará tecnología similar a HAWC pero con diseño mejorado
- Estará ubicado a más de 4,500 metros de altitud
- Cubrirá energías entre 100 GeV y varios cientos de TeV
- Actualmente en fase de diseño y desarrollo
- Se espera que comience operaciones después de 2025

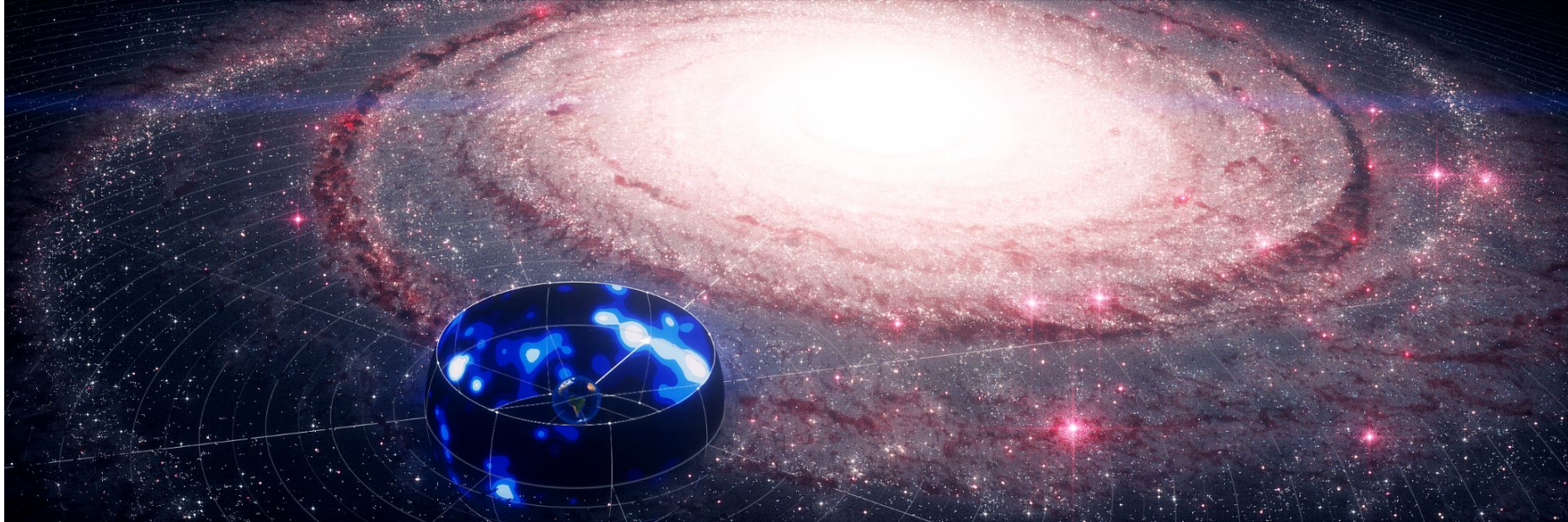




Caso 1: Difuso de neutrinos en el plano galáctico

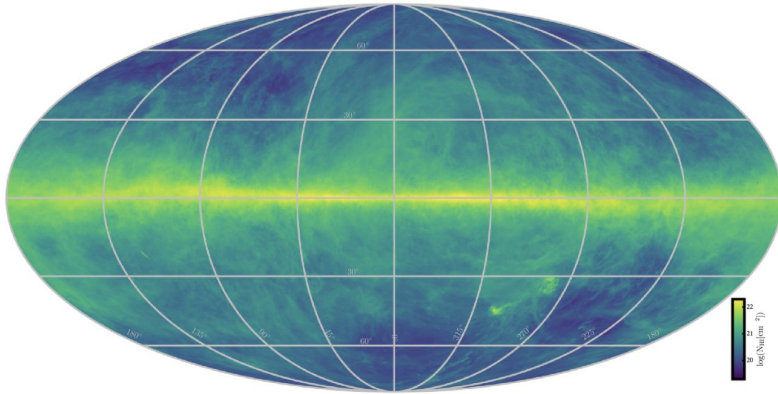


El difuso (de neutrinos) galáctico.



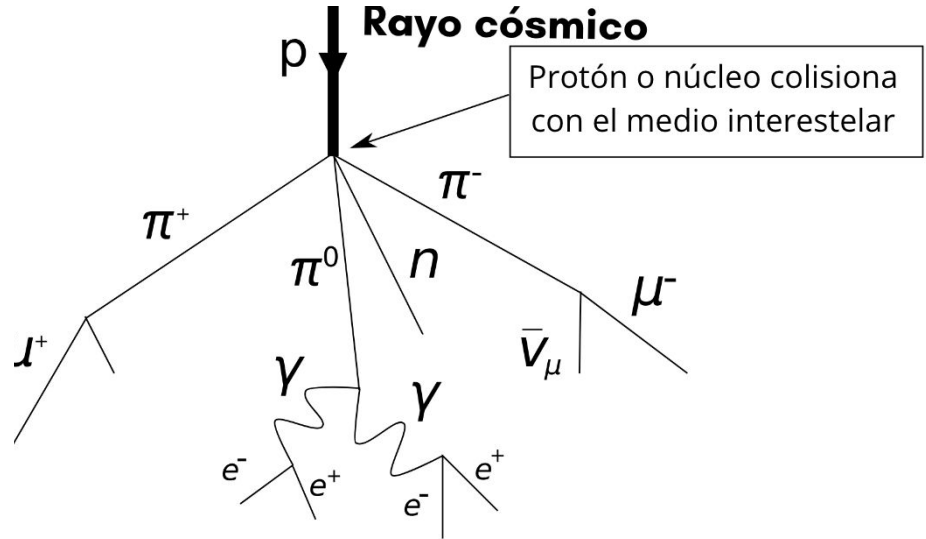
¿Que es la emisión difusa?, ¿Por que buscarla en neutrinos?

Emisión que no se puede asociar a una fuente.

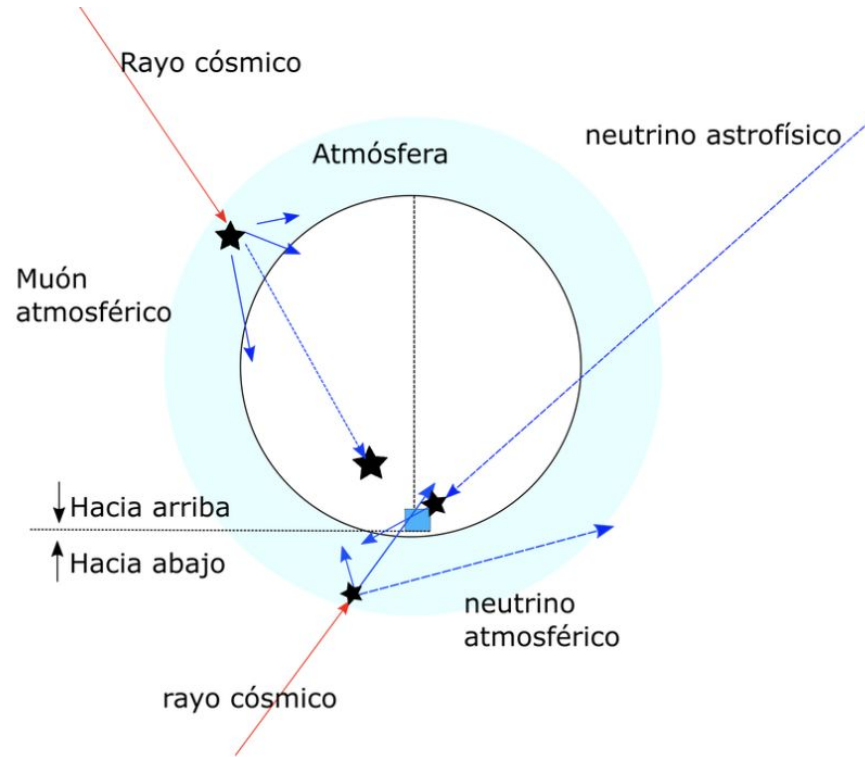


Mapa de distribución de hidrógeno creado por Benjamin Winkel / Colaboración HI4PI

Fuente: [HI4PI: a full-sky H I survey based on EBHIS and GASS](#)

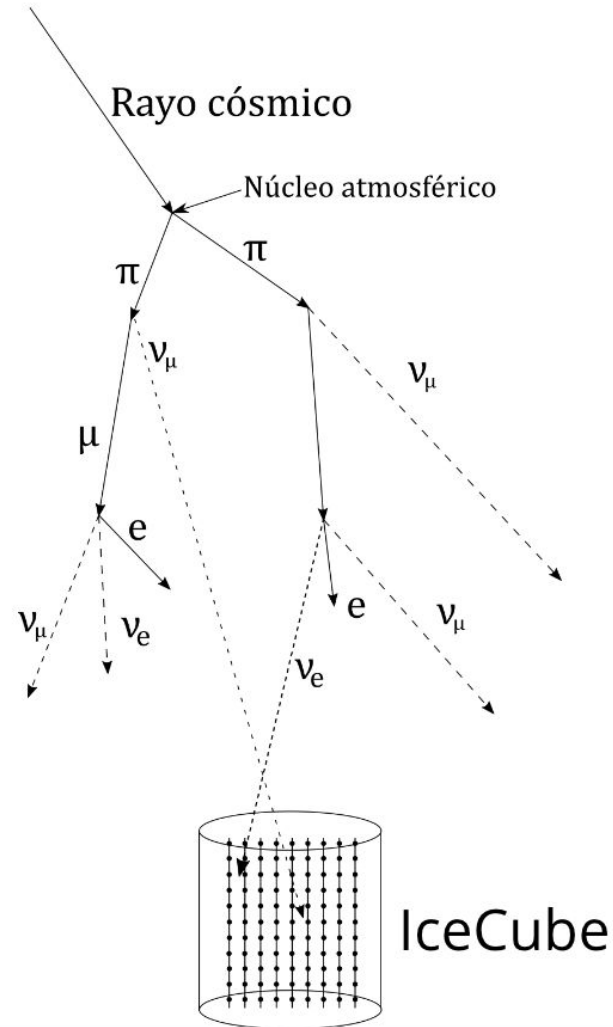


Detección de neutrinos:

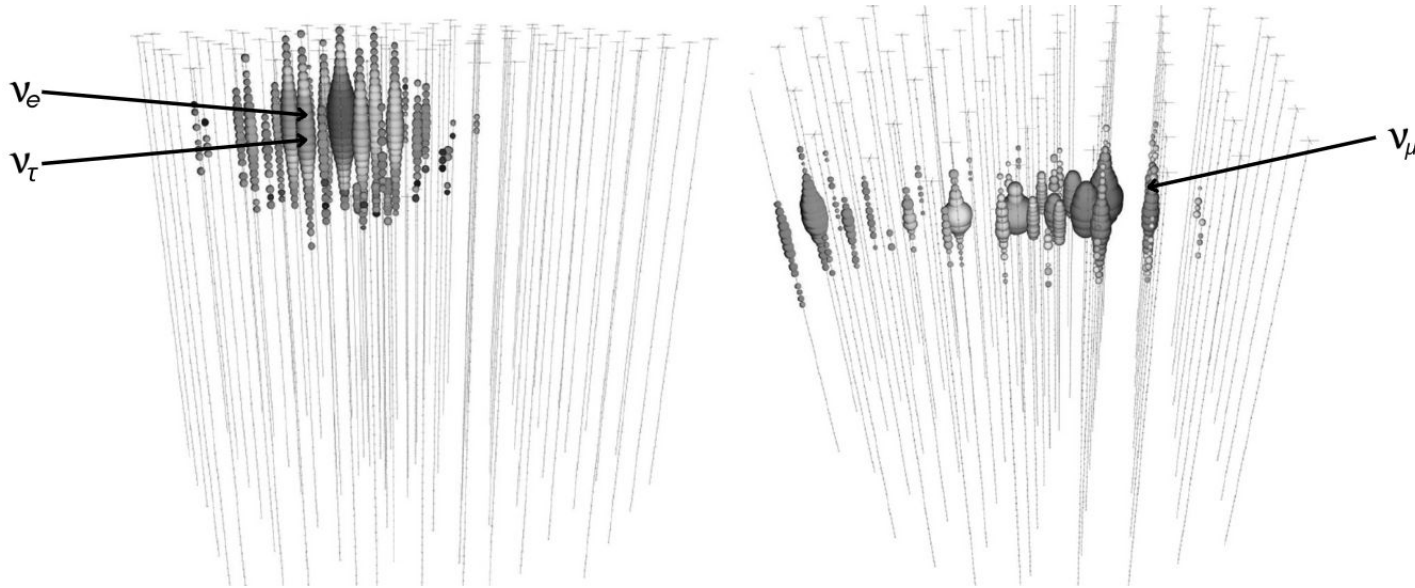


Neutrinos atmosféricos:

- Mayor fuente de ruido.
- 10^8 neutrinos atmosféricos por cada neutrino astrofísico.
- Tasa de detección de 2.7 kHz



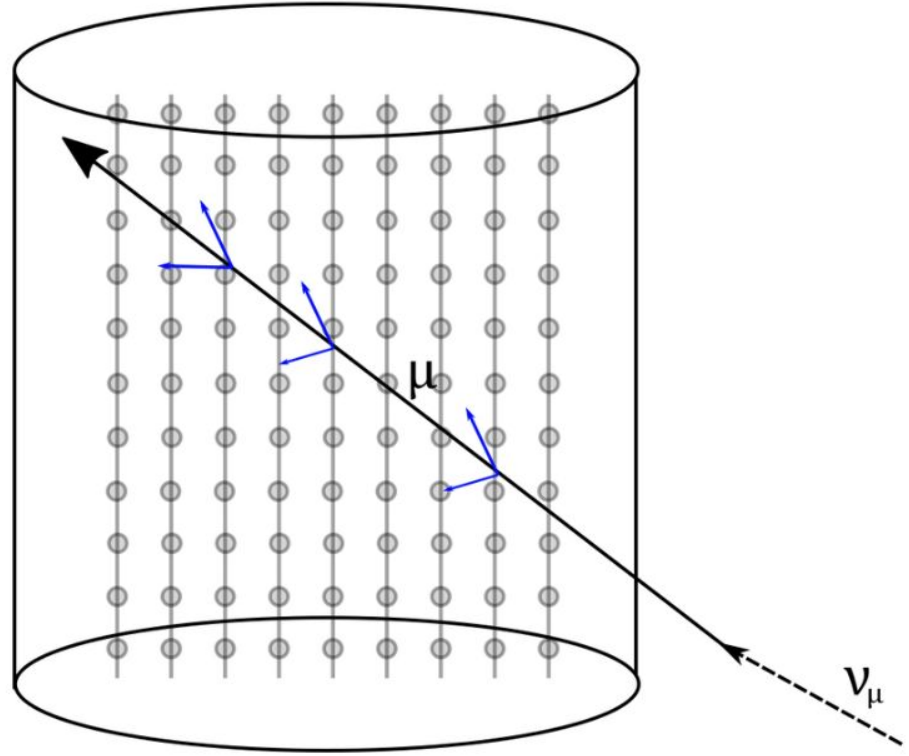
2 tipos de eventos: cascadas vs trazas



Izquierda: evento cascada #3 (2 PeV de energía depositada); Derecha: El inicio del evento traza #5 (70 TeV de energía depositada). La cascada empieza dentro de la mitad superior del detector y se expande desde su centro. La traza empieza dentro del detector, en la derecha y se mueve a través de él. Imágenes de la colaboración IceCube.

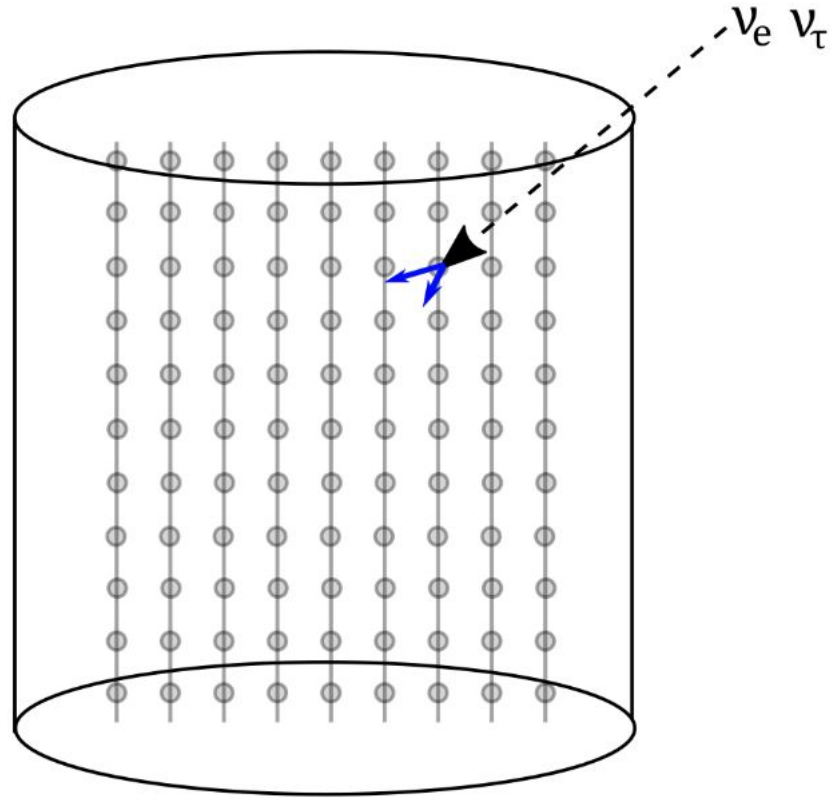
Funcionamiento de IceCube - trazas

En cambio los neutrinos muónicos, al producir muones generan una detección a lo largo del detector.

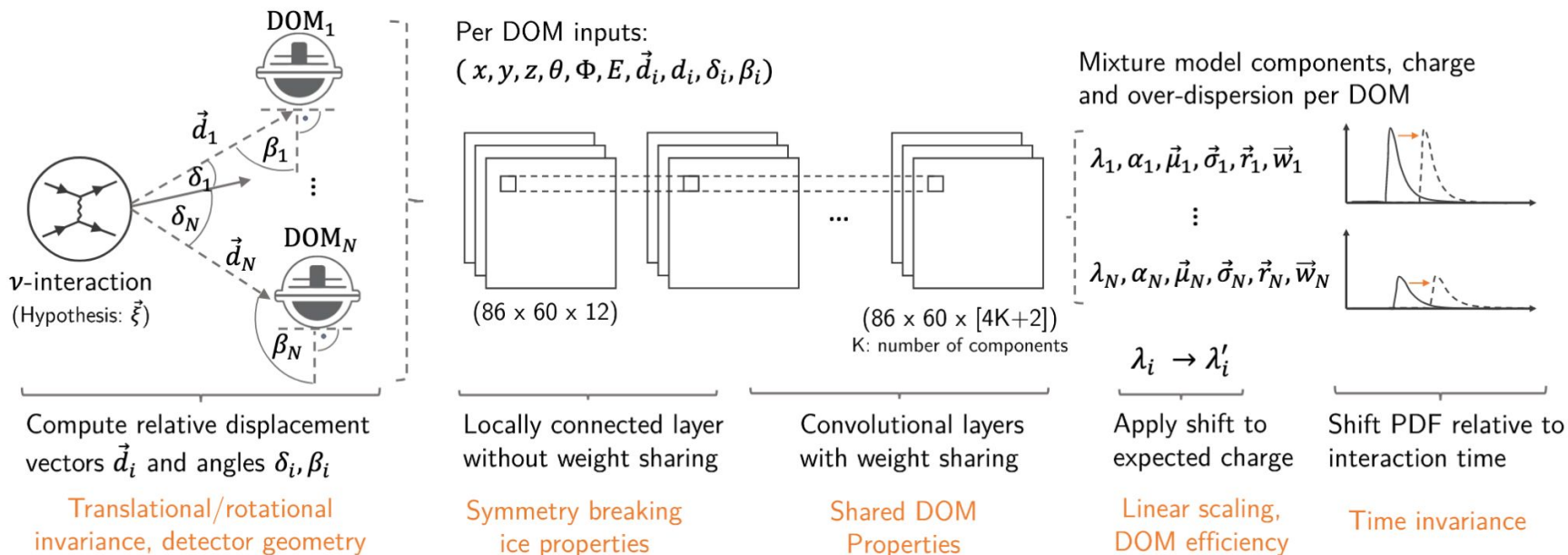


Funcionamiento de IceCube - cascadas

Para interacciones del neutrino electrónico y neutrino tauónico, junto con interacciones neutras de neutrinos con el medio.



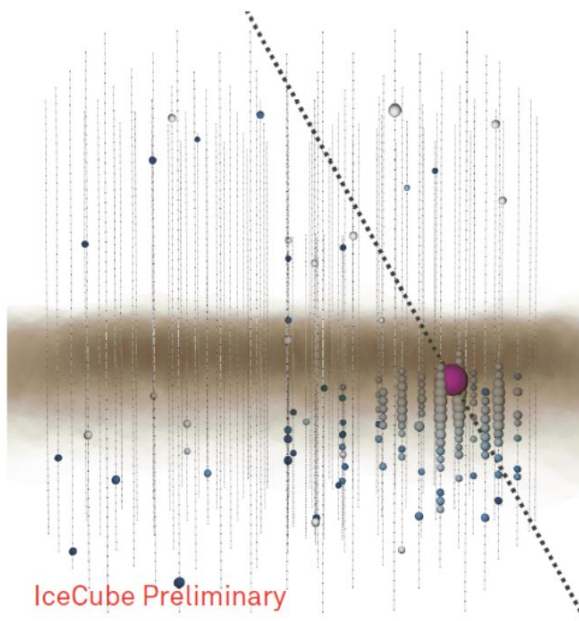
Aprendizaje automatizado: ¿Cómo?



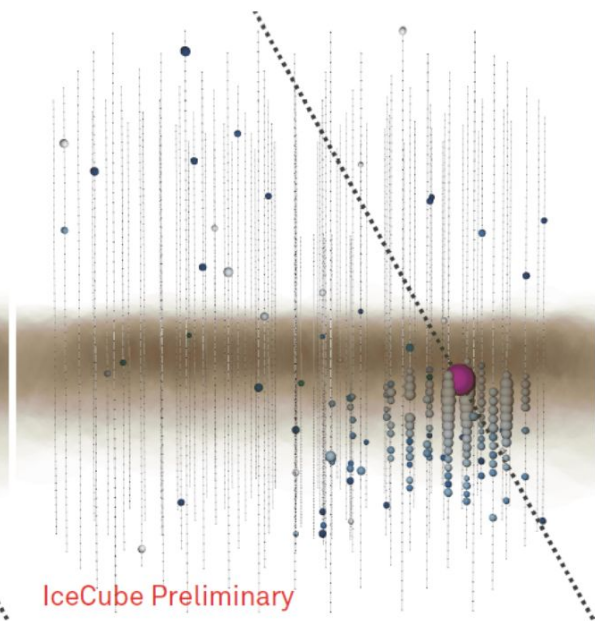
Inteligencia artificial para reconstrucción:

- 10 años de datos.
- Uso de eventos tipo cascada.
- Comparación de modelos de emisión difusa con emisión de fondo.
- Significancia de 4.5
- No se puede distinguir (completamente) entre fuentes no resueltas y una emisión difusa.

Evento detectado
por IceCube

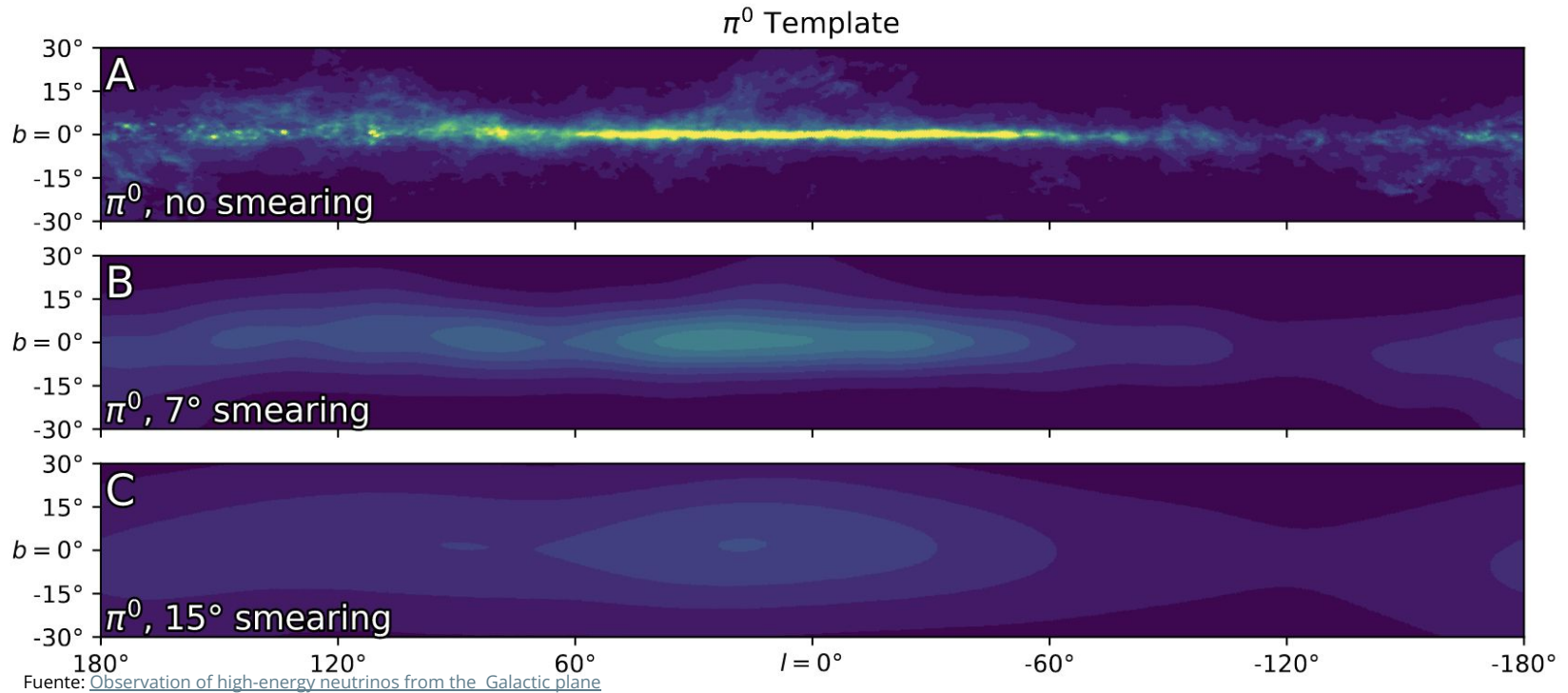


Evento generado
por la CNN

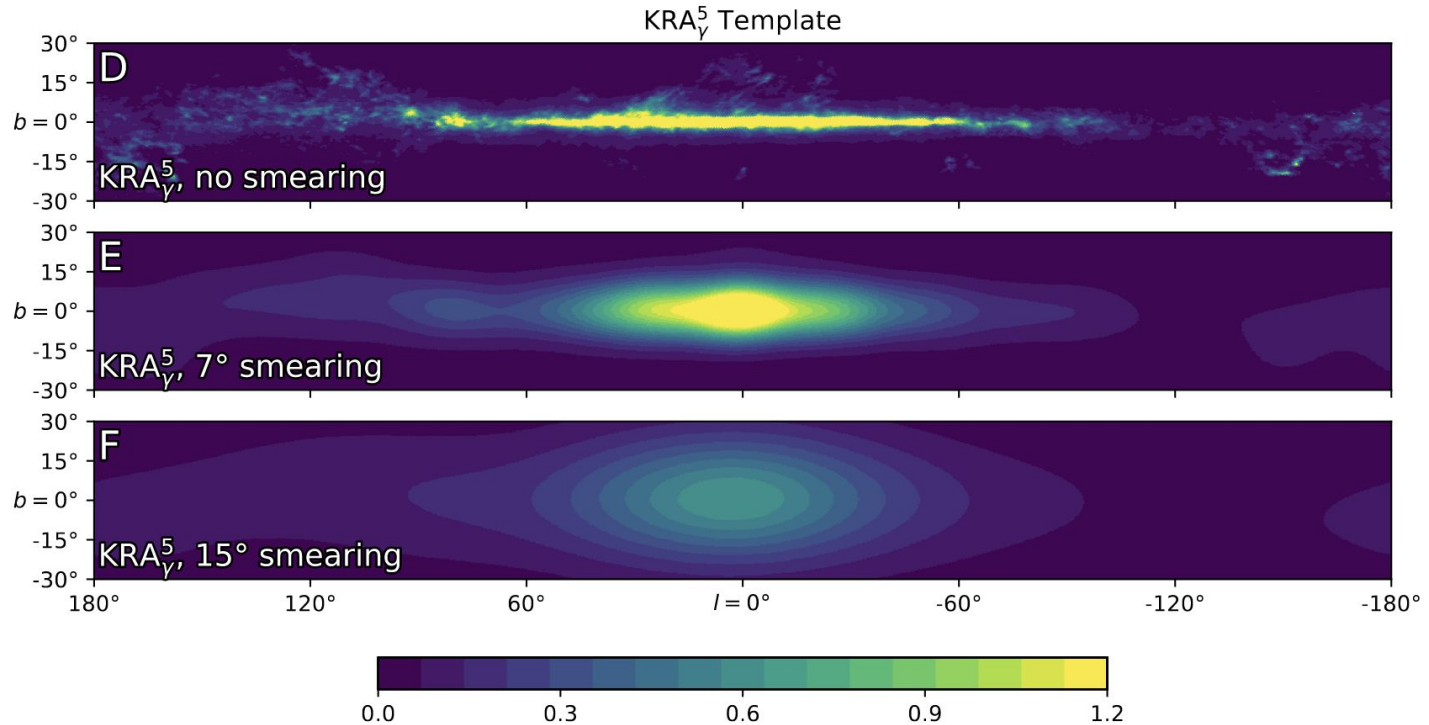


Fuente: [Combining Maximum-Likelihood with Deep Learning for Event Reconstruction in IceCube](#)

Templates usados

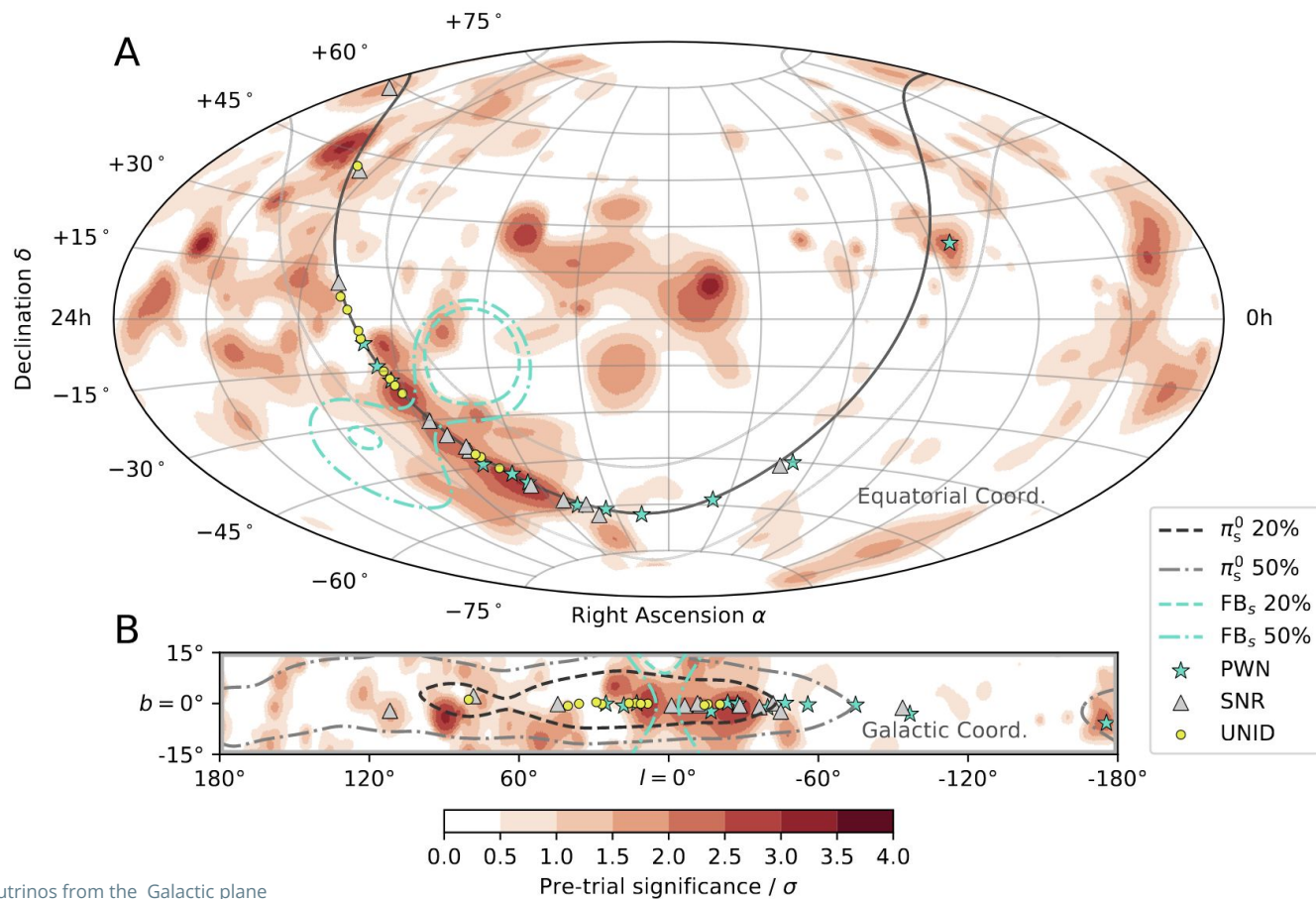


Templates usados



Fuente: [Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane](#)

Mapa del cielo

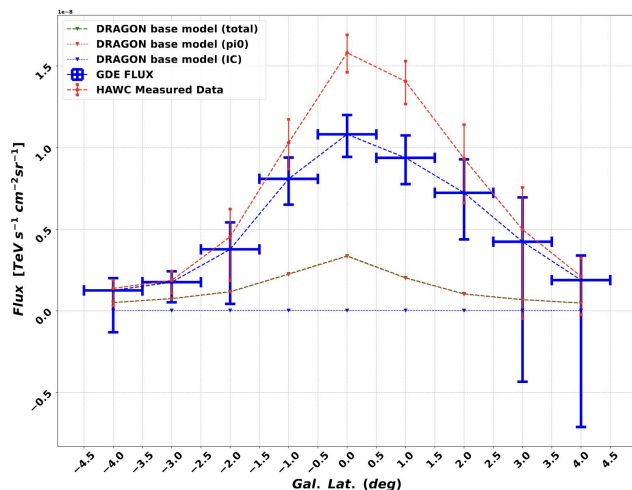


Fuente: [Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane](#)

Caso 2: Difuso de gamma en el plano galáctico

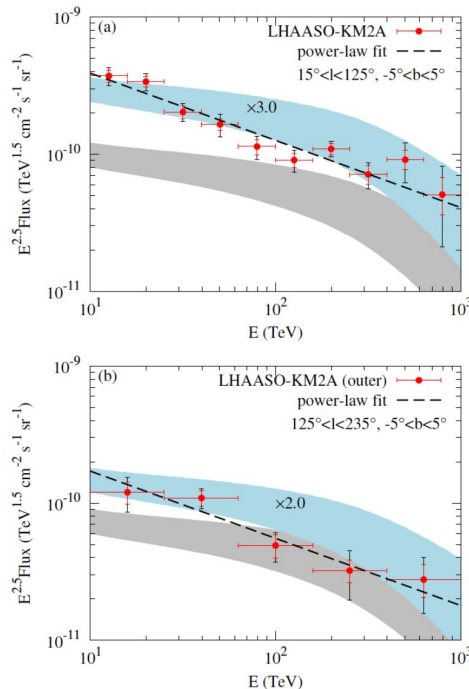
Motivación: exceso detectado en el centro galáctico

Mejorar la detección de HAWC el año pasado



Fuente: [Galactic Gamma-Ray Diffuse Emission at TeV energies with HAWC Data](#)

Corroborada por LHAASO



Fuente: [Measurement of Ultra-High-Energy Diffuse Gamma-Ray Emission of the Galactic Plane from 10 TeV to 1 PeV with LHAASO-KM2A](#)

Mediciones de IceCube: anterior modelo, indican porible exceso de interacciones hadrónicas.

RESEARCH ARTICLE

NEUTRINO ASTROPHYSICS

Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane

IceCube Collaboration[†]

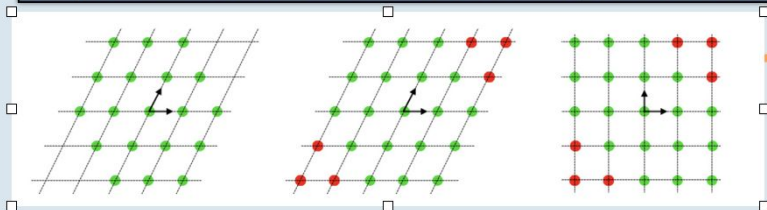
The origin of high-energy cosmic rays, atomic nuclei that continuously impact Earth's atmosphere, is unknown. Because of deflection by interstellar magnetic fields, cosmic rays produced within the Milky Way arrive at Earth from random directions. However, cosmic rays interact with matter near their sources and during propagation, which produces high-energy neutrinos. We searched for neutrino emission using machine learning techniques applied to 10 years of data from the IceCube Neutrino Observatory. By comparing diffuse emission models to a background-only hypothesis, we identified neutrino emission from the Galactic plane at the 4.5σ level of significance. The signal is consistent with diffuse emission of neutrinos from the Milky Way but could also arise from a population of unresolved point sources.

Fuente: [Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane](#)

¿Cómo se implementaría?

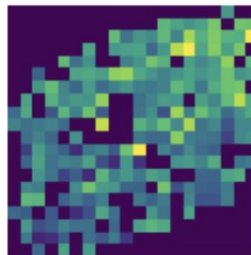
1. Train reconstruction algorithms with Graph neural networks.

Deep Neural Networks were used in IceCube, GNNs are a kind of DNN.

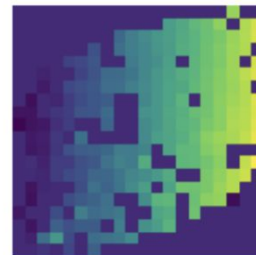


Transforming an Hexagonal array to an orthogonal one. Source: "Deep Learning in Physics exemplified by the Reconstruction of Muon-Neutrino Events in IceCube" - M. Hueneefeld.

charge PMT 0

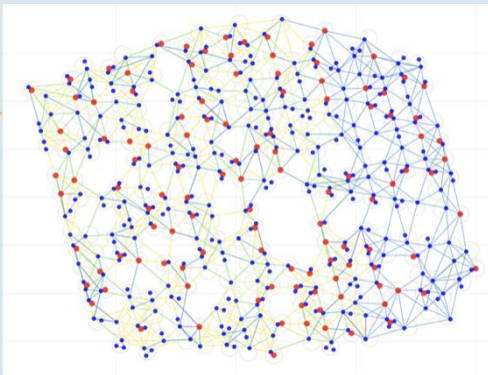


time PMT 0



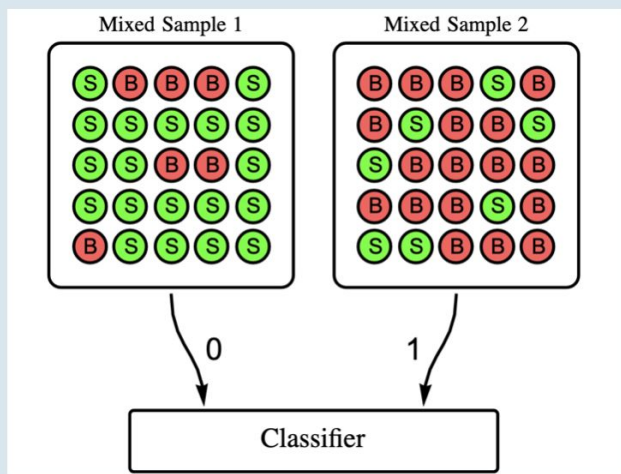
Transforming an Hexagonal array to an orthogonal one. Source: "Convolutional Neural Networks for Low Energy Gamma-Ray Air Shower Identification with HAWC" - I. Watson, HAWC Collaboration.

GNNs will make use of the relationships (edges) between the pmts (nodes). Making use of Domain Knowledge. Already being implemented in SWGO simulation (upcoming J. Glombitza's paper).



Entramiento... ¿con datos?

2. Train gamma/hadron separation algorithms with simulations and (mostly) data.



Theorem 1. Given mixed samples M_1 and M_2 defined in terms of pure samples S and B using Eqs. (2.3) and (2.4) with signal fractions $f_1 > f_2$, an optimal classifier trained to distinguish M_1 from M_2 is also optimal for distinguishing S from B .

We can take real data where the signal fractions are well known:

- Crab Nebula.
- The background.

Pruebas con diferentes modelos

3. Testing several different GDE models with the trained ML algorithm

Once trained the algorithm can easily implement diffusive emission templates:

As in IceCube:

$$\pi^0$$

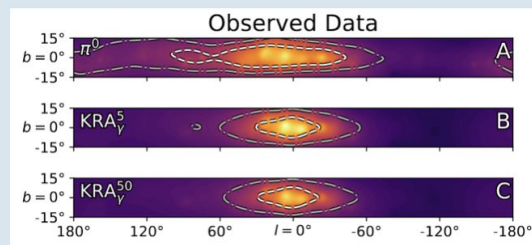
$$KRA_\gamma^5$$

$$KRA_\gamma^{50}$$

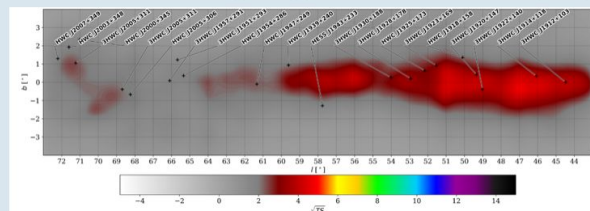
As in HAWC:

DRAGON base model

Many others: CRINGE, Simple diffusive Power-law model, etc.

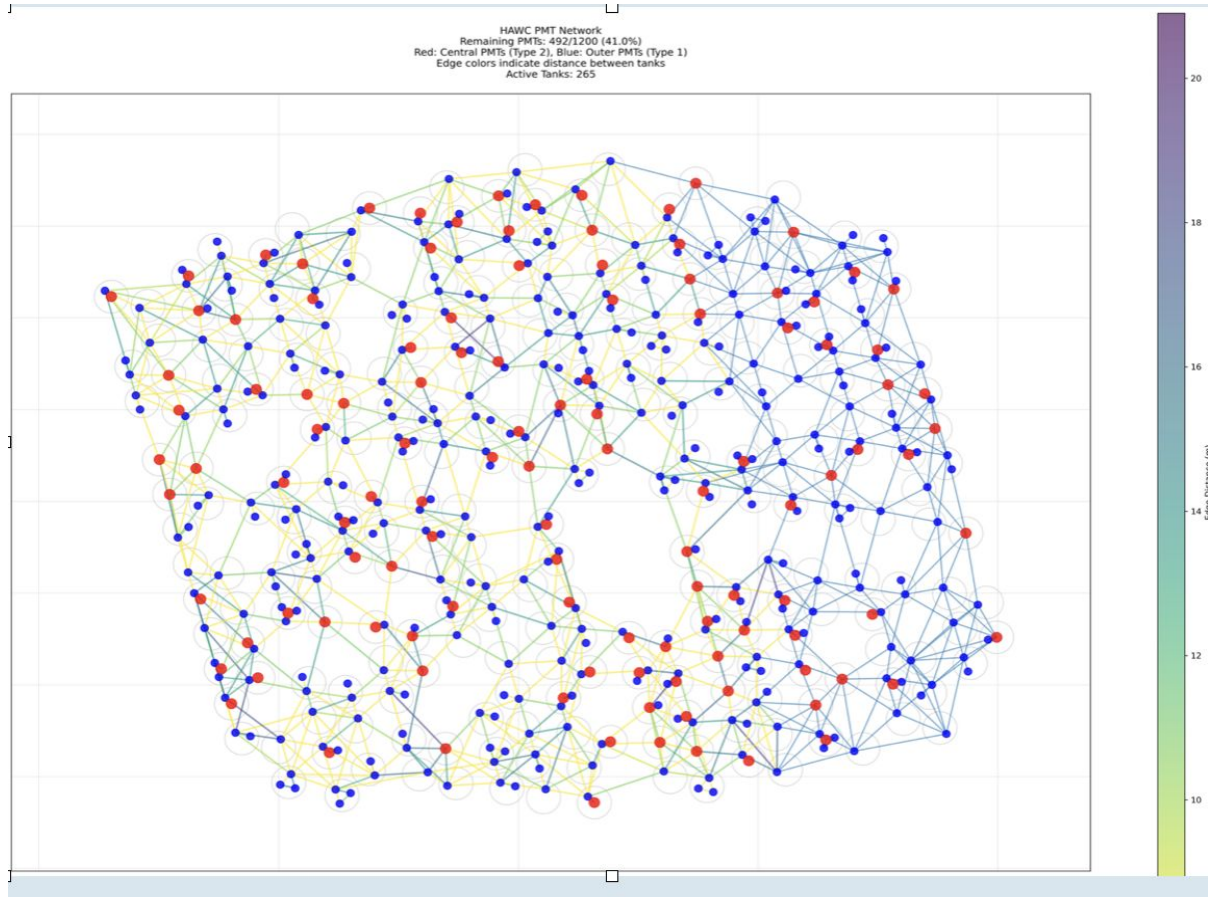


Source: Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane



Source: Measurement of ultra-high-energy diffuse gamma-ray emission of the Galactic plane from 10 TeV to 1 PeV with LHAASO-KM2A

Primer paso



Más aplicaciones...

Un análisis con datos astrofísicos

[Hands-on ML for astrophysics.ipynb](#)

Modelos para datos tabulares:

- **Uso de scikit-learn**
- **Implementación de SVM y Random Forests**
- **Clasificación estelar usando parámetros físicos**

Análisis de imágenes:

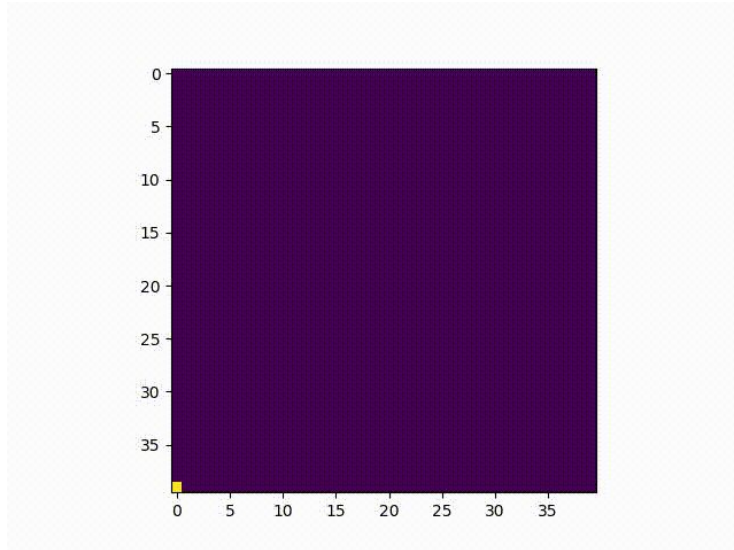
- **Extracción manual de características (histogramas de gradientes)**
- **Uso de CNN para aprendizaje automático de características**

Aplicaciones de Deep Learning:

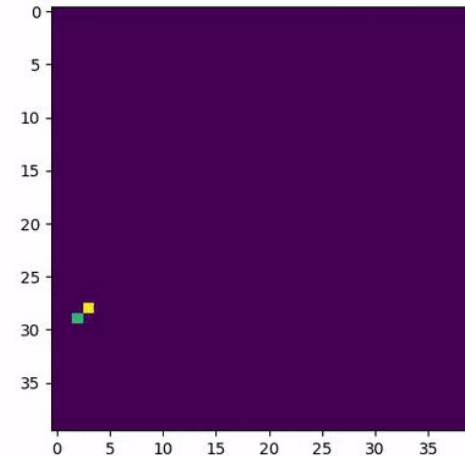
- **Clustering 2D**
- **Recuperación de imágenes**
- **Fine-tuning de modelos pre-entrenados**

Redes neuronales profundas para HAWC

Redes neuronales profundas aplicadas a datos de HAWC, simulación de eventos.



Datos "reales"



Datos generados

Aprendizaje automatizado para Astro

Introducción al aprendizaje automático en astronomía:

- Conceptos básicos aplicados a datos astronómicos.
- Métodos fundamentales como clasificación y regresión.

Análisis de datos con Python:

- Uso de herramientas populares como *scikit-learn* y *matplotlib*.
- Ejercicios prácticos con datasets astronómicos para aprendizaje supervisado y no supervisado.

Visualización y modelado:

- Creación de gráficos y representaciones visuales de resultados.
- Entrenamiento y evaluación de modelos predictivos.

Problemas astronómicos comunes:

- Identificación de tipos estelares y análisis de espectros.
- Aplicaciones prácticas que abordan casos reales en el campo.