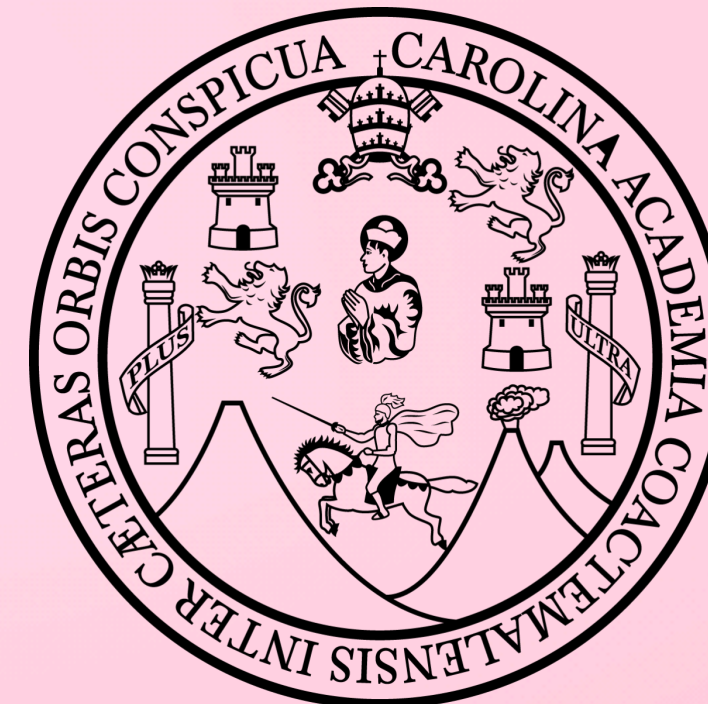




DETECTORES E INSTRUMENTACIÓN

SESIÓN III: ANÁLISIS DE DATOS

José Serna

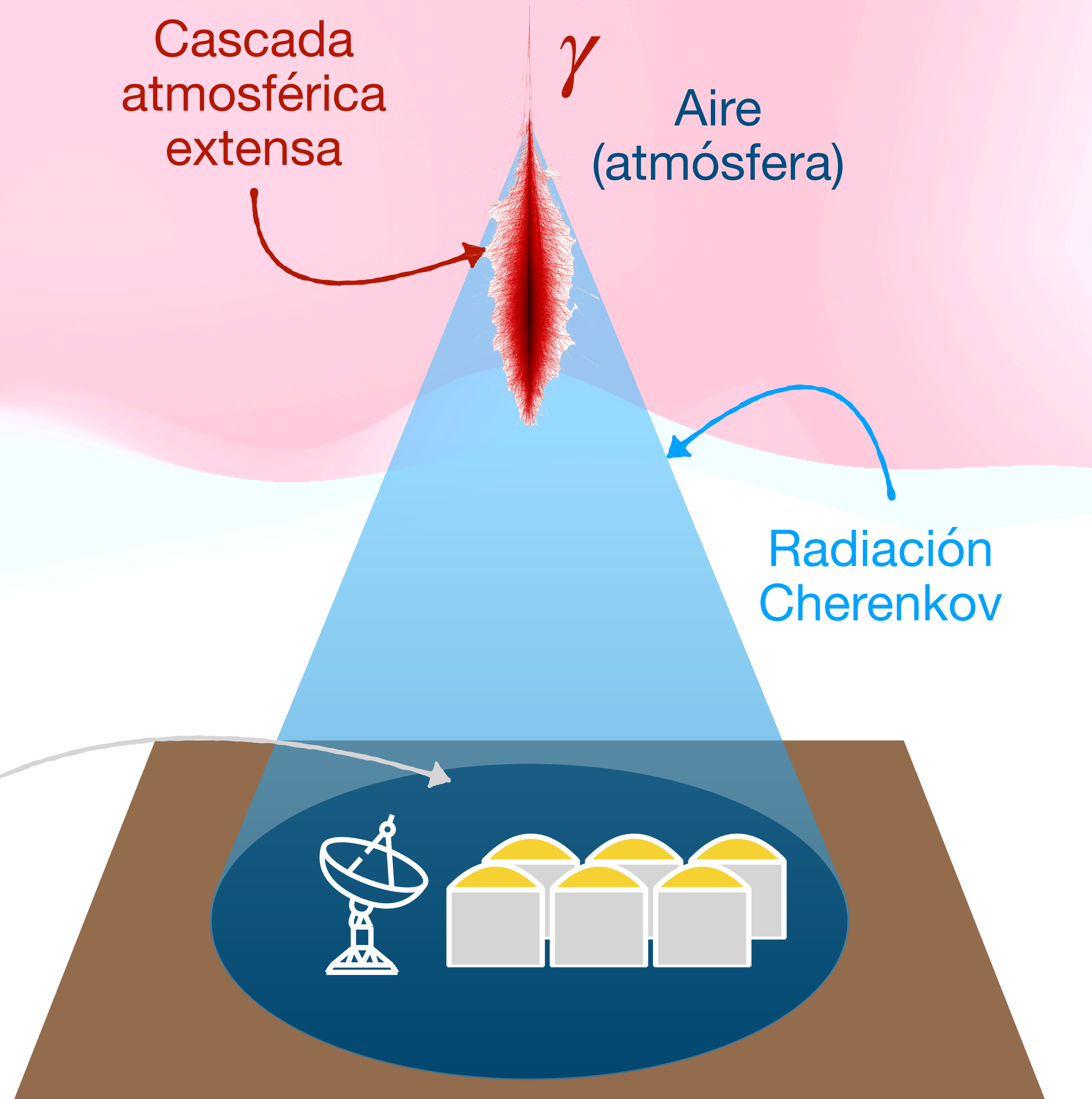
j_serna@ciencias.unam.mx

D&I - TAACO 2024 - Guatemala - Nov.2024

Detección indirecta

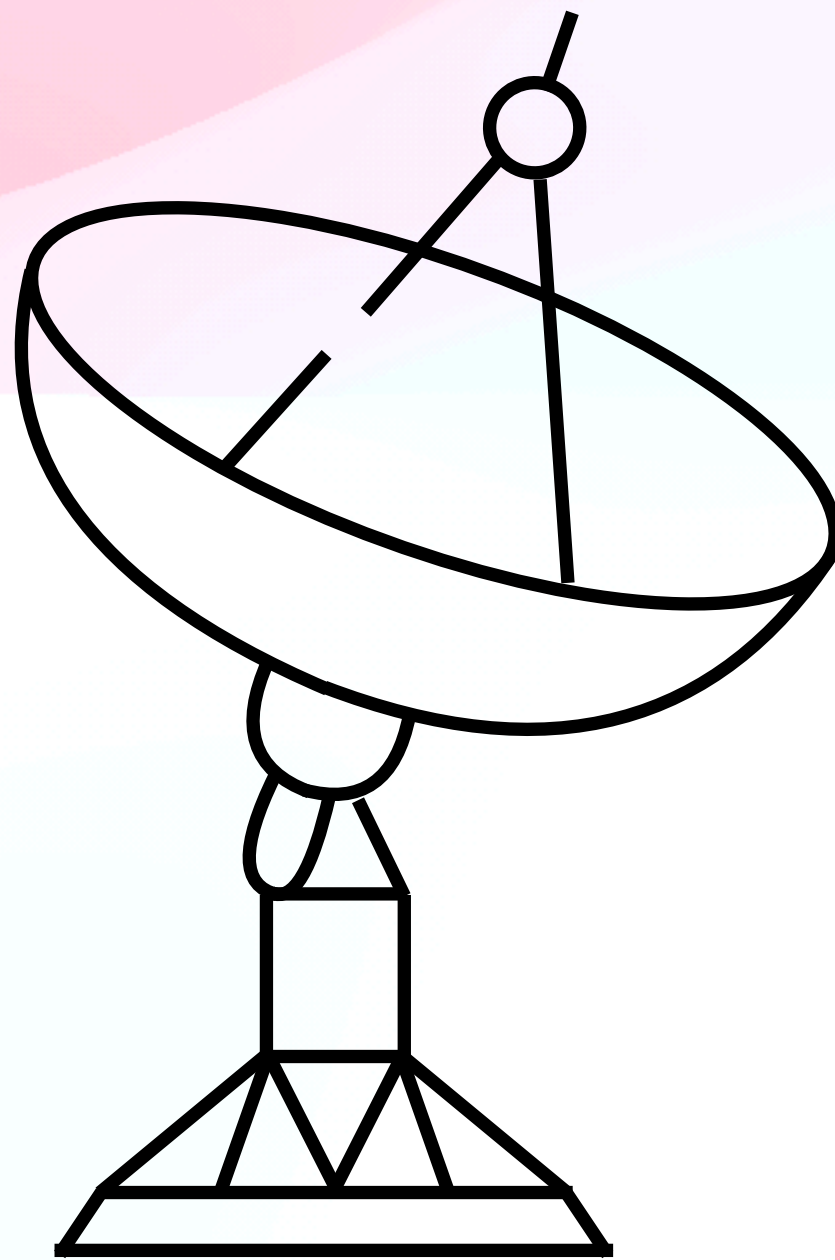
- ▶ Detección de las **partículas secundarias** de una cascada atmosférica generada por un **rayo gamma** primario
- ▶ Instrumentos **basados en tierra** que detectan la **radiación Cherenkov**

Detectores de
radiación Cherenkov



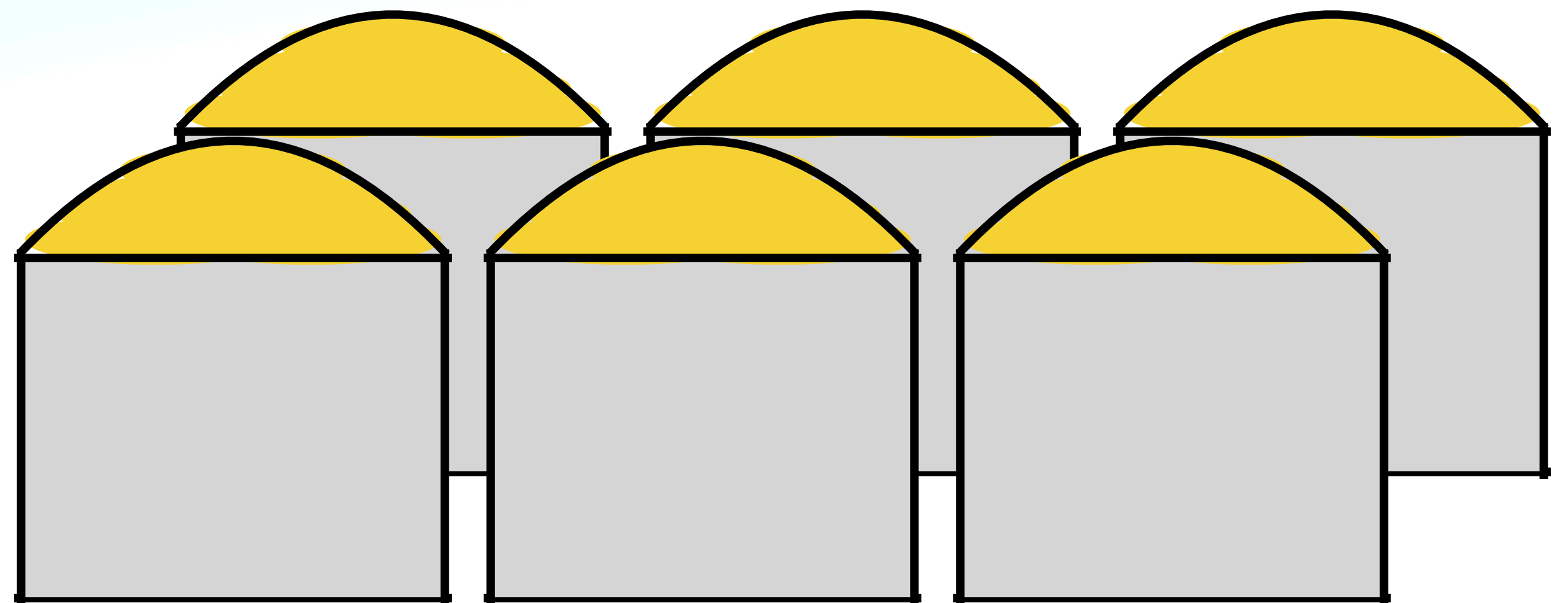
Detectores de radiación Cherenkov

Telescopios de Imagen de
Cherenkov Atmosférico
(*Imaging Air Cherenkov
Telescopes - IACTs*)



Radiación Cherenkov en el **aire**

Detectores de Amplio Campo de Visión
(*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)

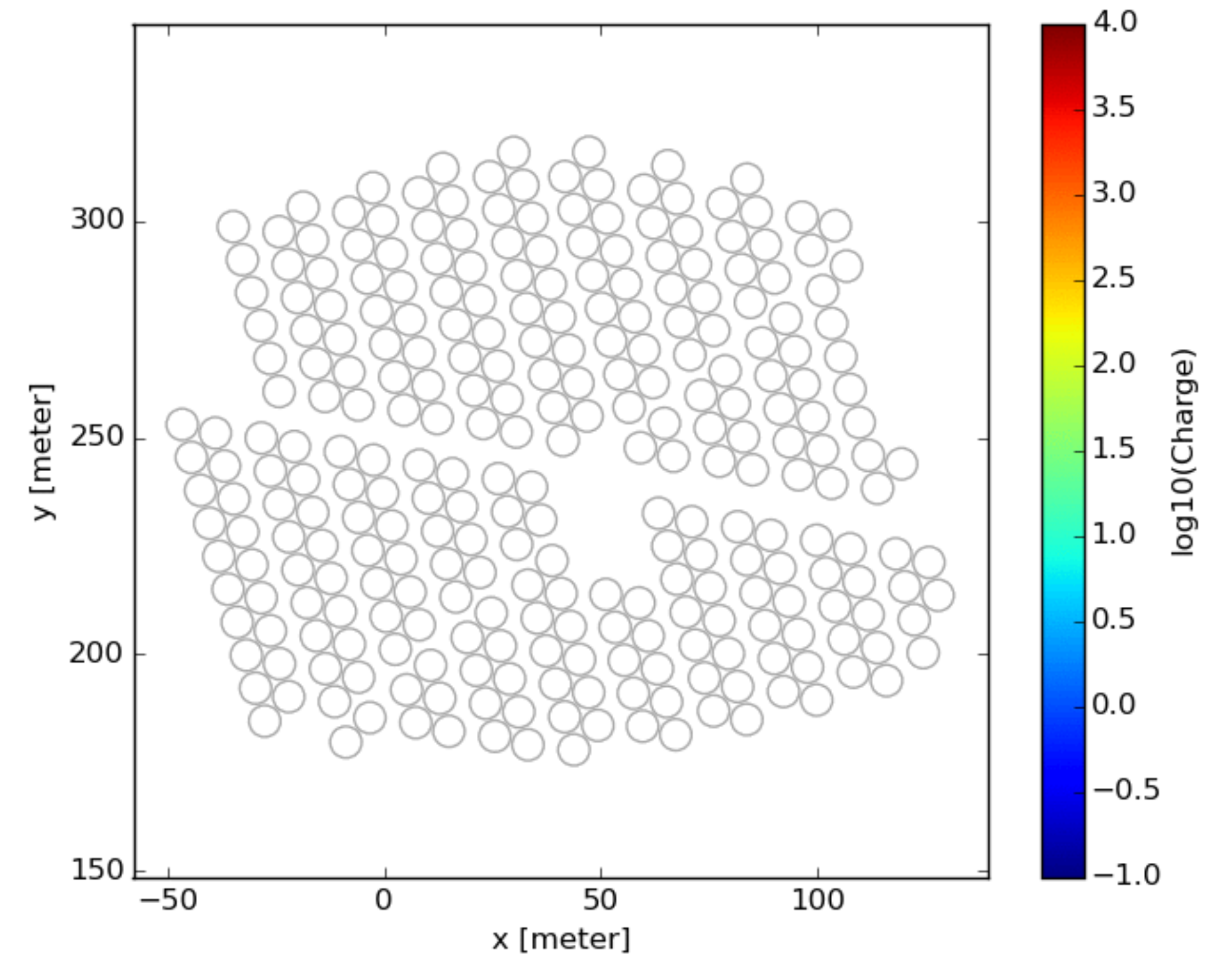
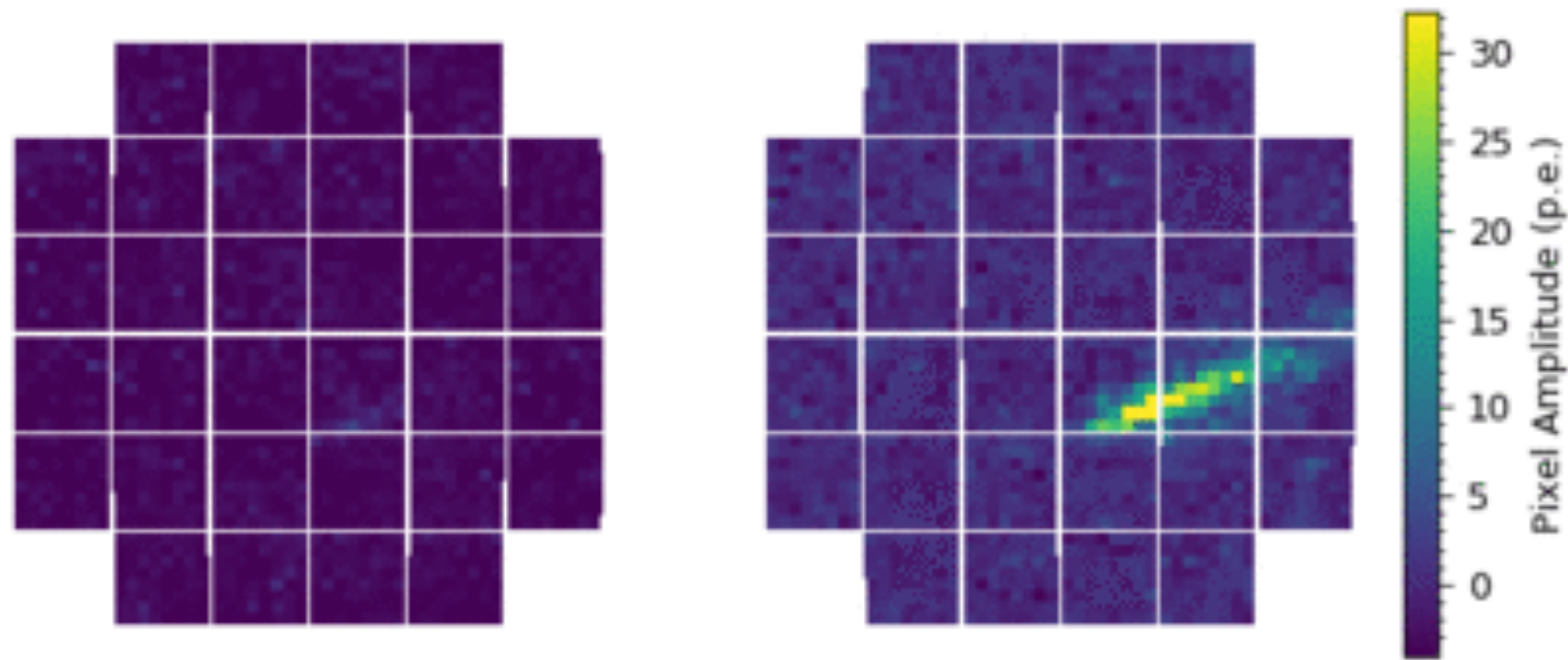


Radiación Cherenkov en el **agua**

Detectores de radiación Cherenkov

Telescopios de Imagen de
Cherenkov Atmosférico
(*Imaging Air Cherenkov
Telescopes - IACTs*)

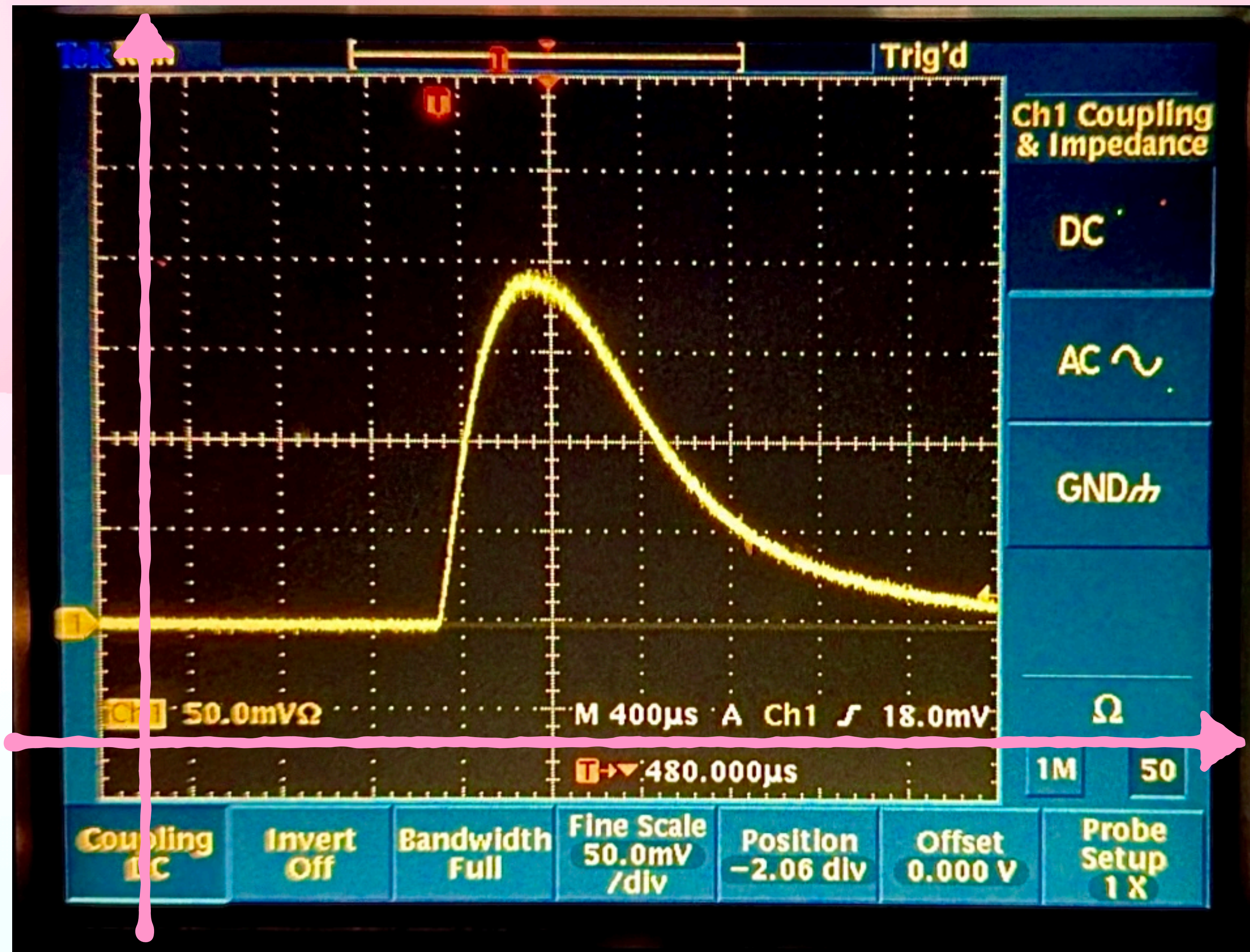
Detectores de Amplio Campo de Visión
(*Wide Field-of-view Detectors - WFDs*)



- ▶ Los **tiempos** de llegada de las señales se miden
- ▶ Entre más amarillo (izquierda) o rojo (derecha), mayor **carga eléctrica** asociada a la señal

Cargas (V)

Detección de señales eléctricas

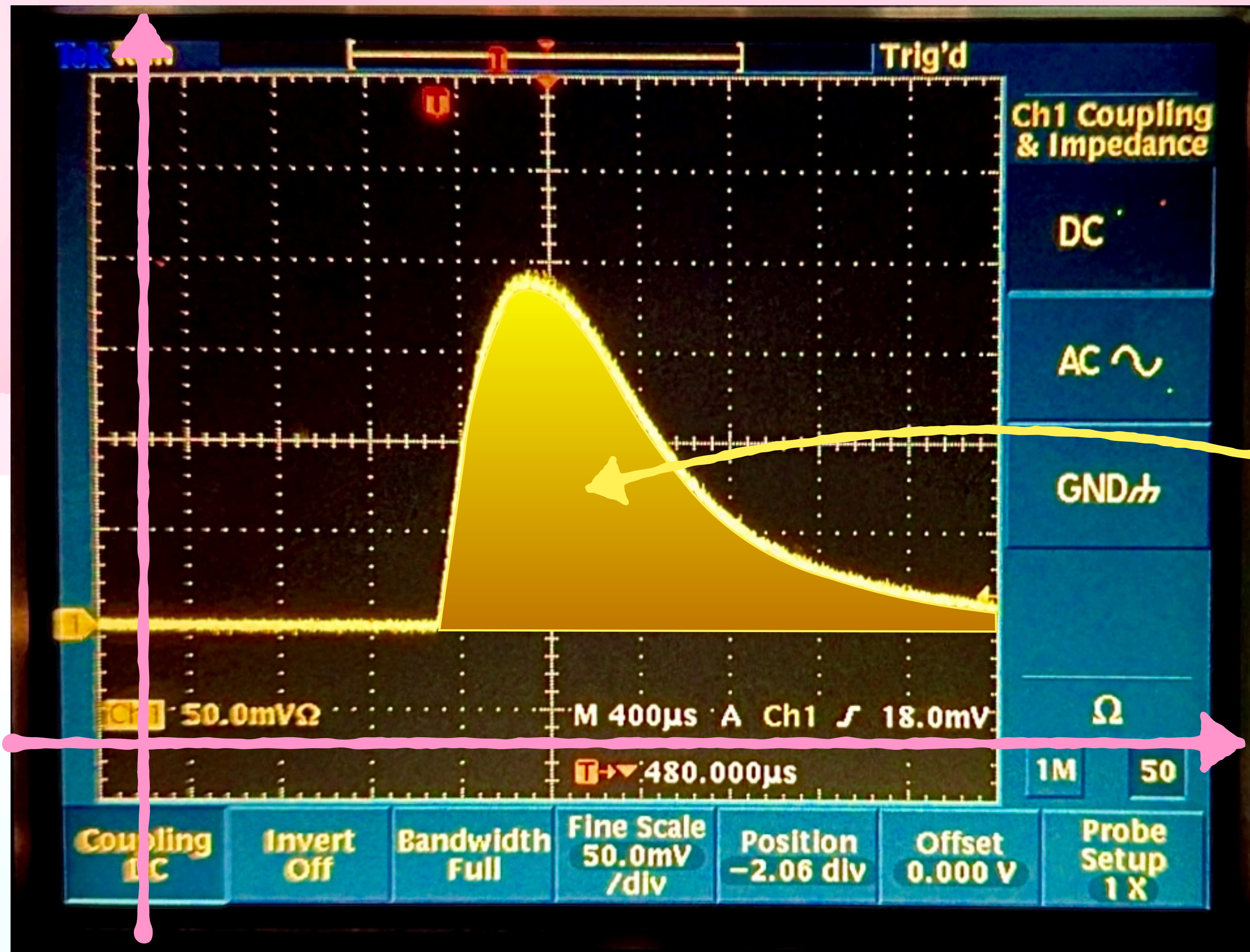


- Se detectan las **señales eléctricas** en función de su **tiempo de llegada**

Tiempo (s)

Cargas (V)

Detección de señales eléctricas



- Se detectan las **señales eléctricas** en función de su **tiempo de llegada**

- La integral de la **distribución de carga** es proporcional a la **carga (energía)** de la **partícula** que se detectó

Tiempo (s)

Detectores de radiación Cherenkov

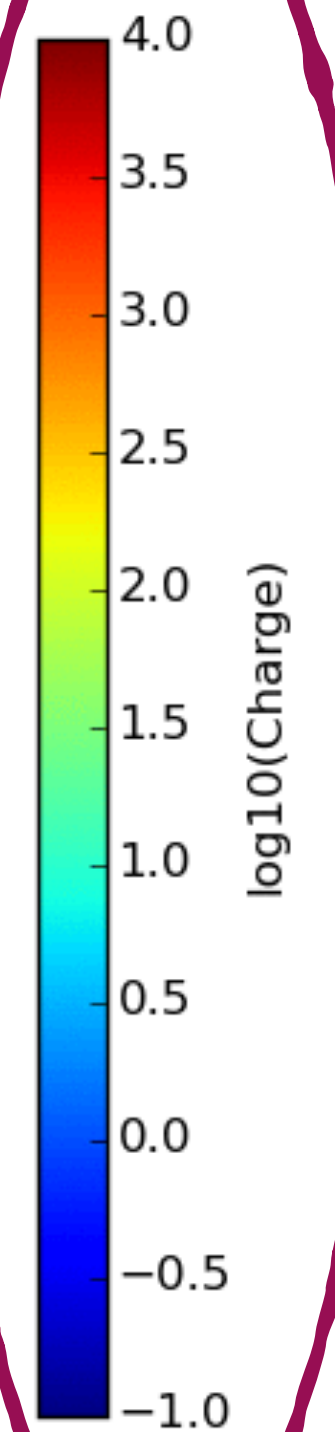
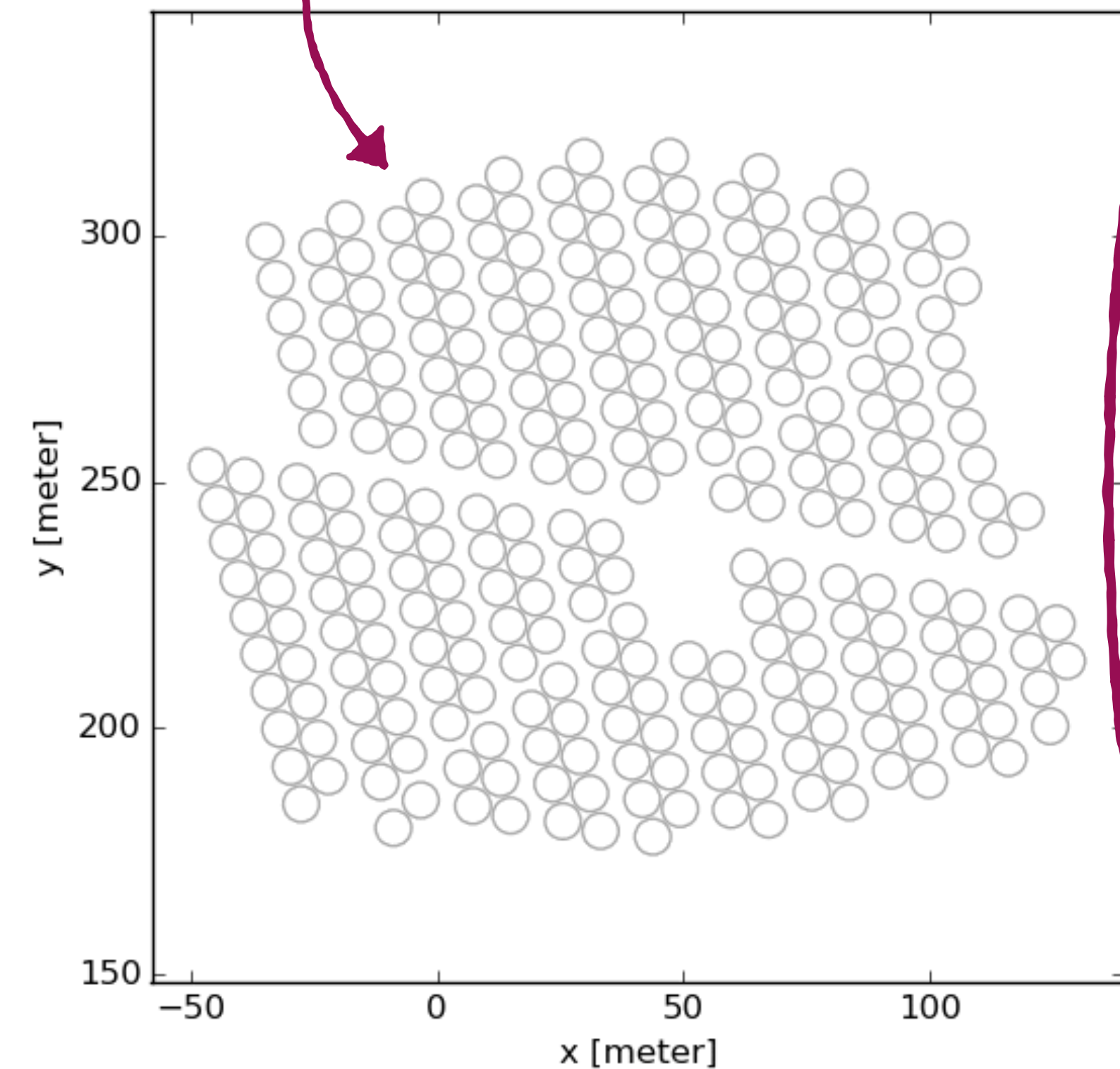
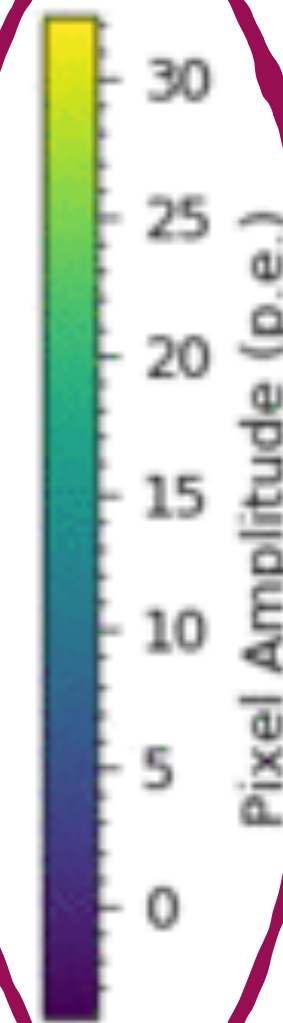
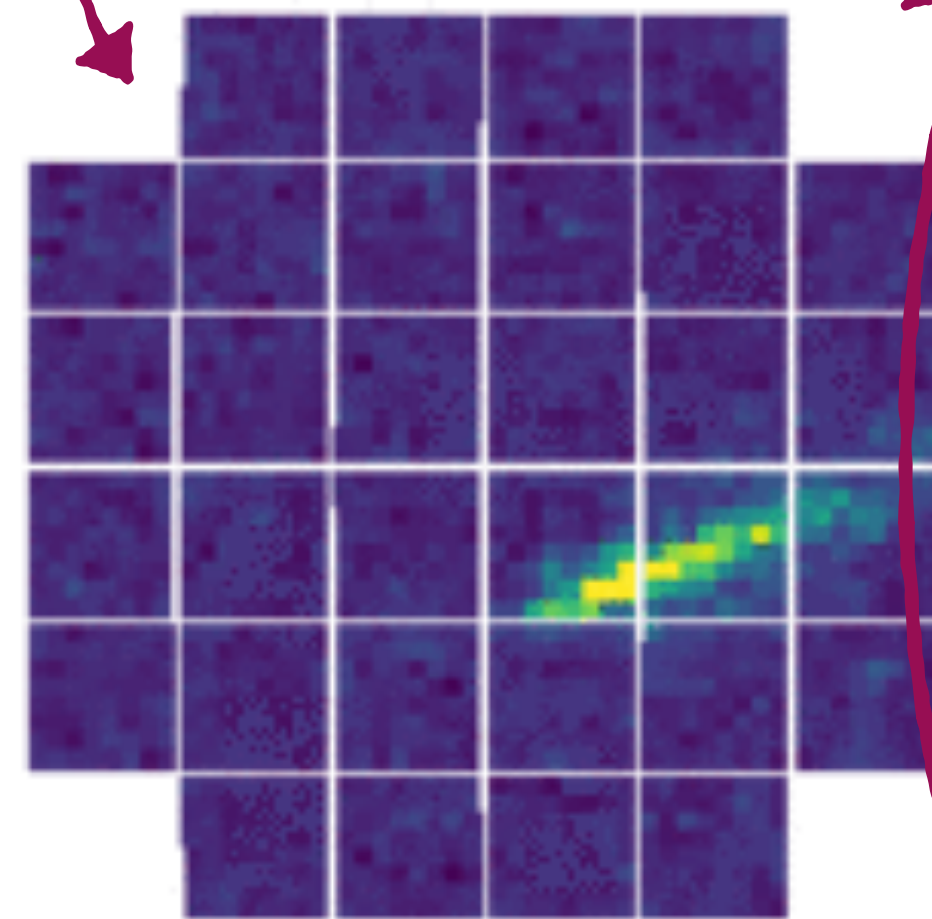
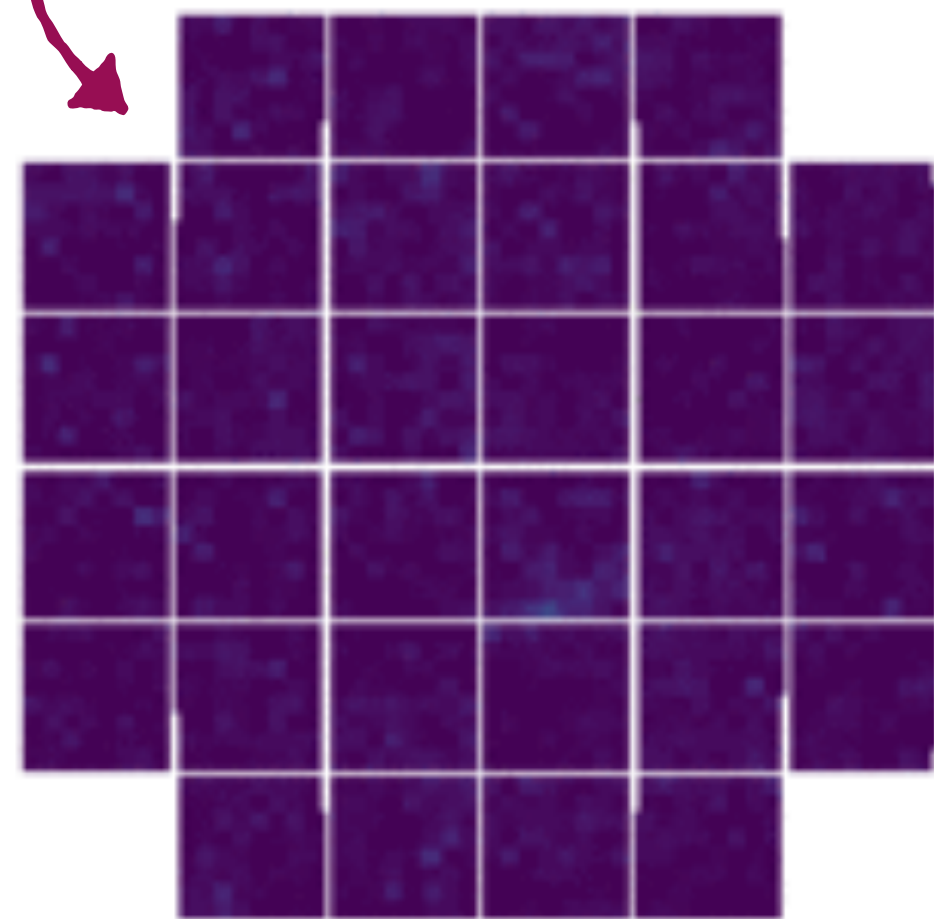
“Película” con
señales de
nanosegundos (ns)

“Fotografía” de la
unión de las señales
de nanosegundos
(ns)

Energía en
unidades de
fotoelectrón
único (p.e.)

“Película” con
señales de
nanosegundos (ns)

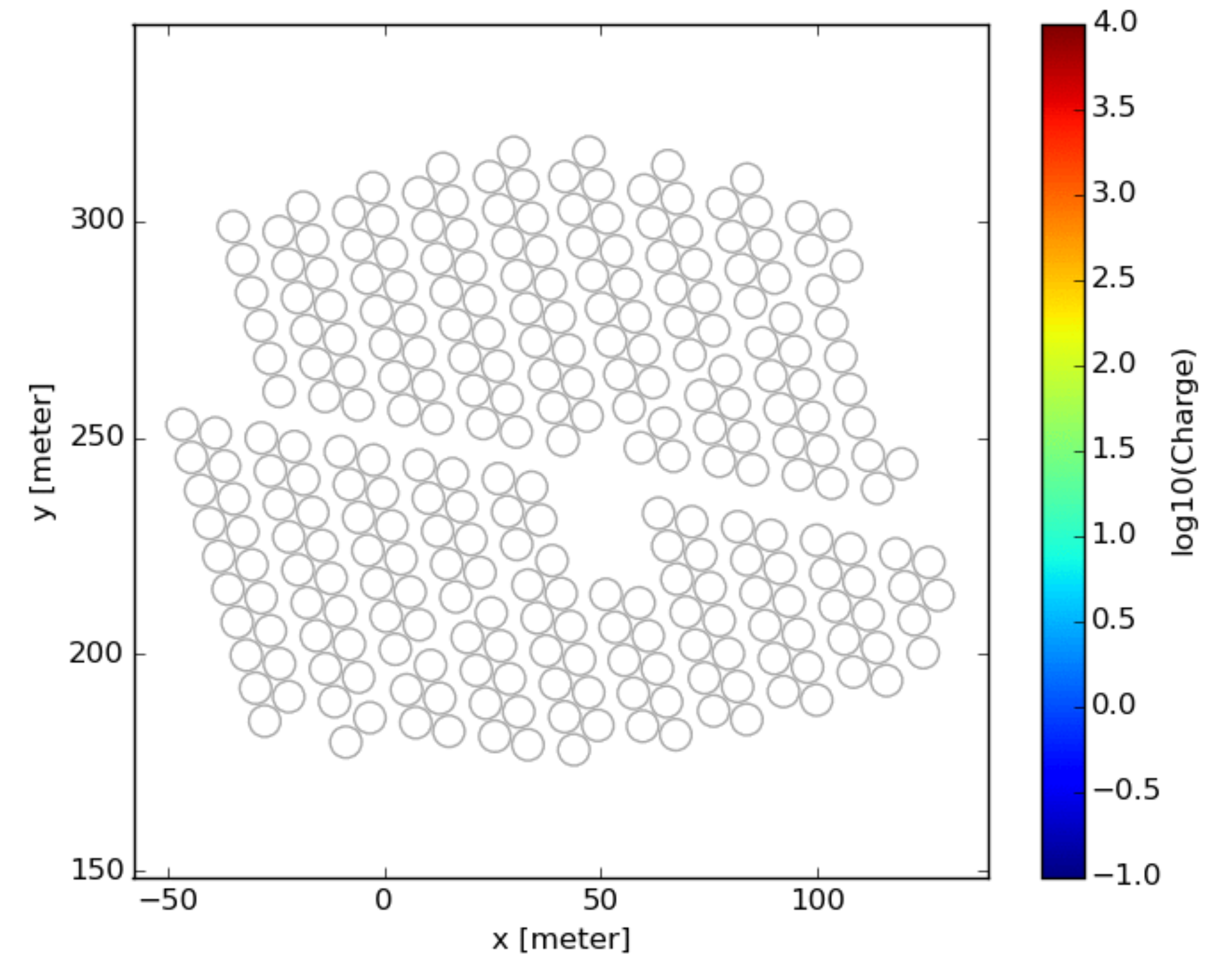
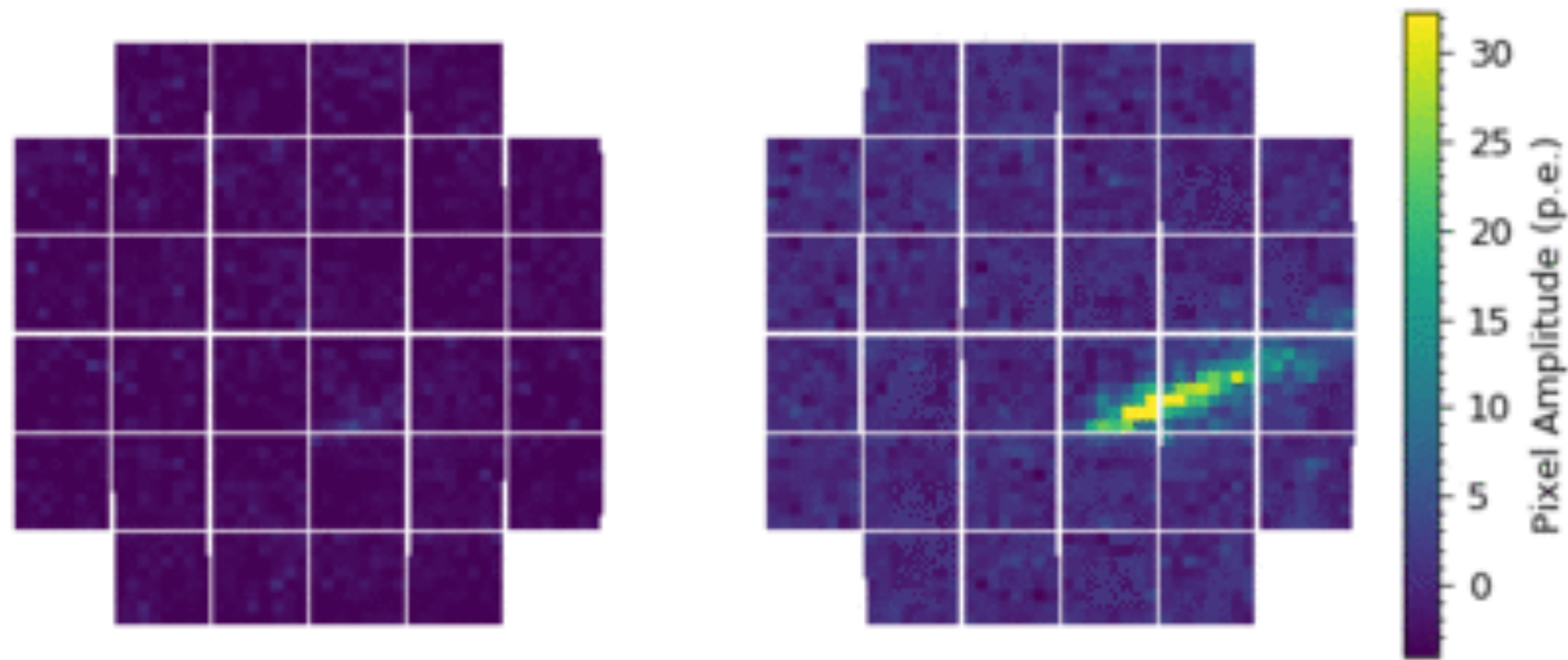
Energía en
unidades de
arbitrarias de
carga



- ▶ Los **tiempos** de llegada de las señales se miden
- ▶ Entre más amarillo (izquierda) o rojo (derecha), mayor **carga eléctrica** asociada a la señal

Detectores de radiación Cherenkov

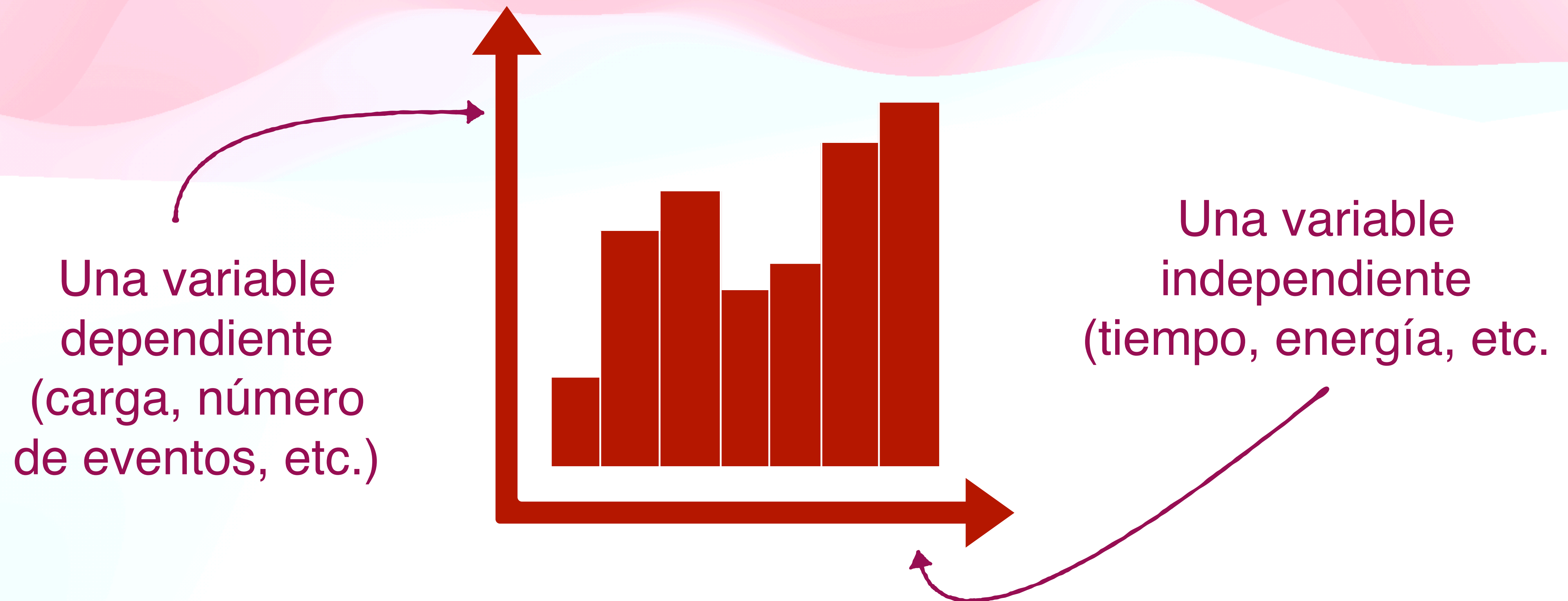
Histogramas



- ▶ Los **tiempos** de llegada de las señales se miden
- ▶ Entre más amarillo (izquierda) o rojo (derecha), mayor **carga eléctrica** asociada a la señal

¿Qué es un histograma?

Un histograma es una representación gráfica de la distribución de un conjunto de datos



¿Qué es un histograma?

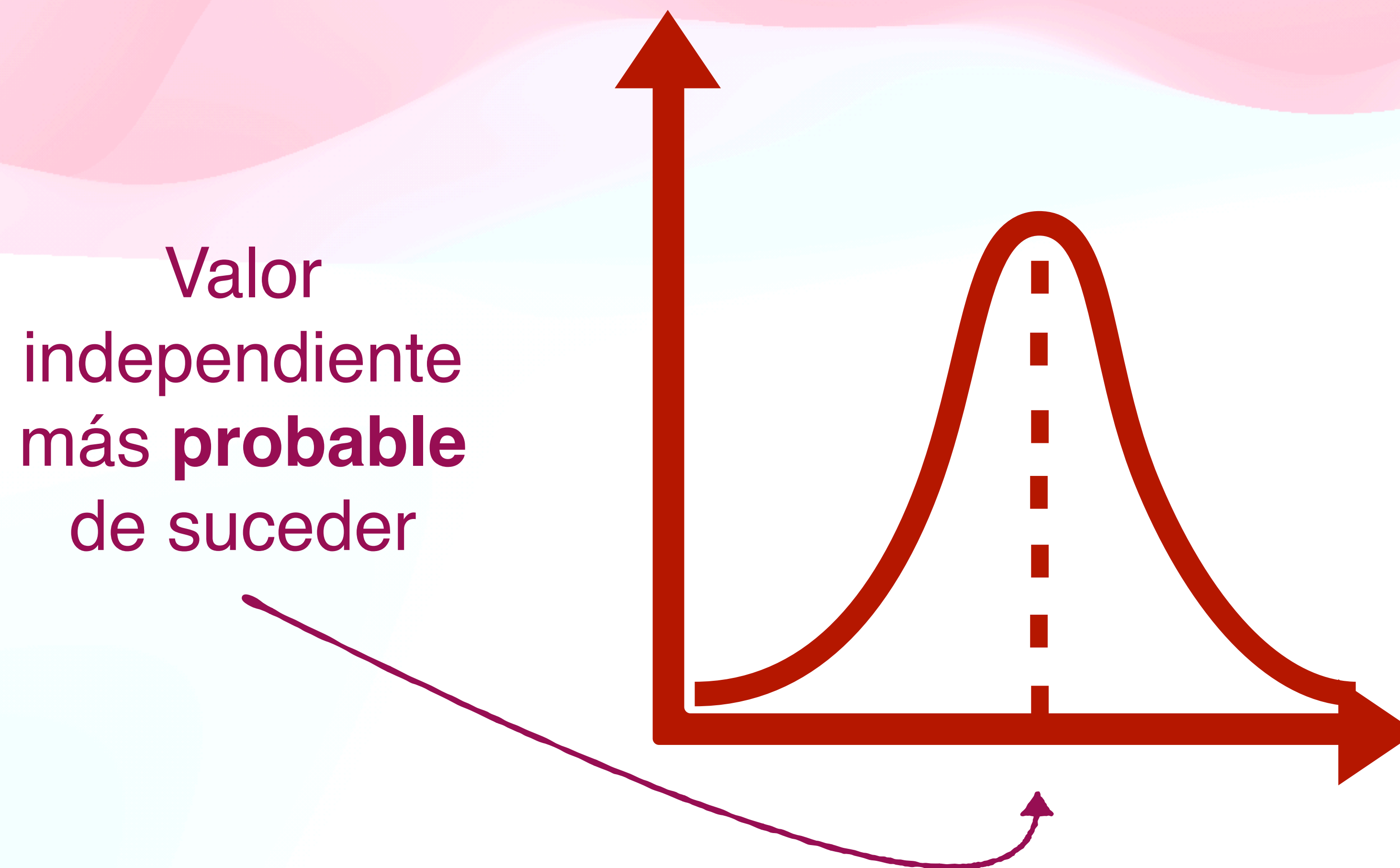
Un histograma es una representación gráfica de la distribución de un conjunto de datos



- ▶ Nos ayuda a **caracterizar** el proceso físico (experimento) estudiado
- ▶ Se puede estudiar el **comportamiento** de la distribución de datos
- ▶ Brinda la **probabilidad** de que una hipótesis sea correcta o no

¿Qué es un histograma?

Un histograma es una representación gráfica de la distribución de un conjunto de datos



- ▶ Nos ayuda a **caracterizar** el proceso físico (experimento) estudiado
- ▶ Se puede estudiar el **comportamiento** de la distribución de datos
- ▶ Brinda la **probabilidad** de que una hipótesis sea correcta o no

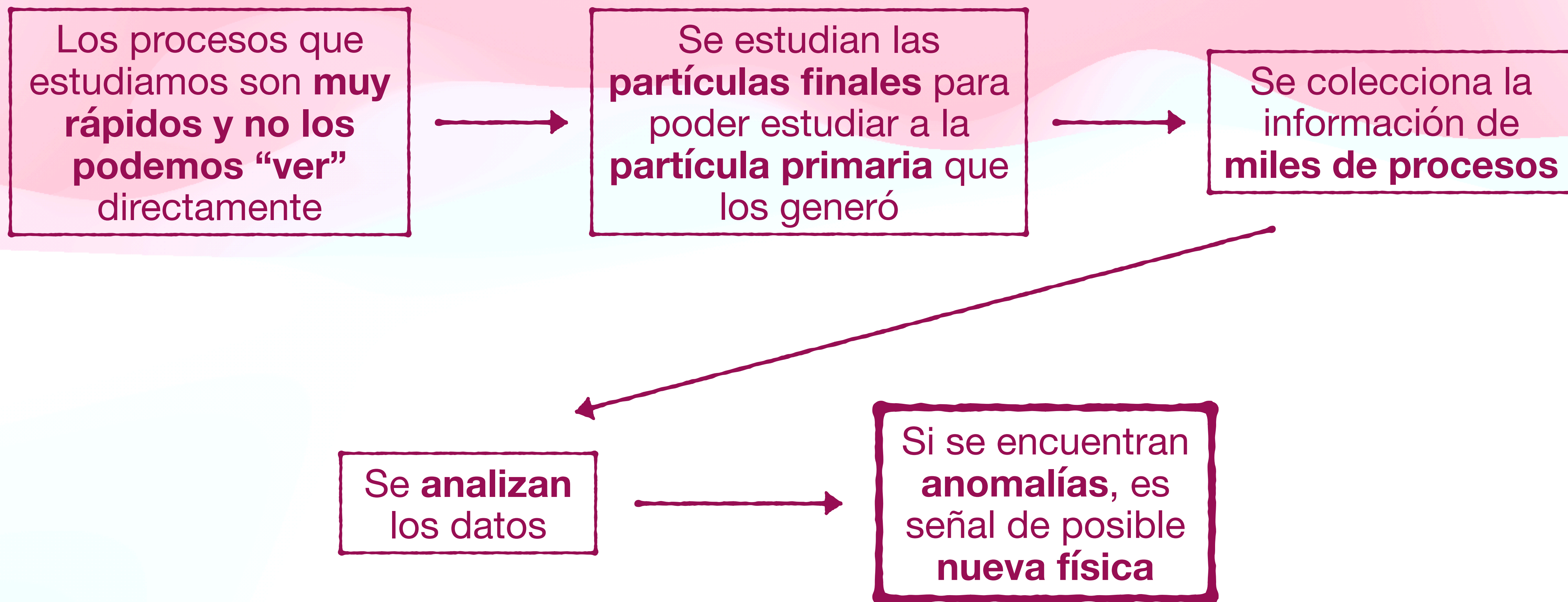
¿Cómo medimos la probabilidad?

¿Cómo medimos la probabilidad?



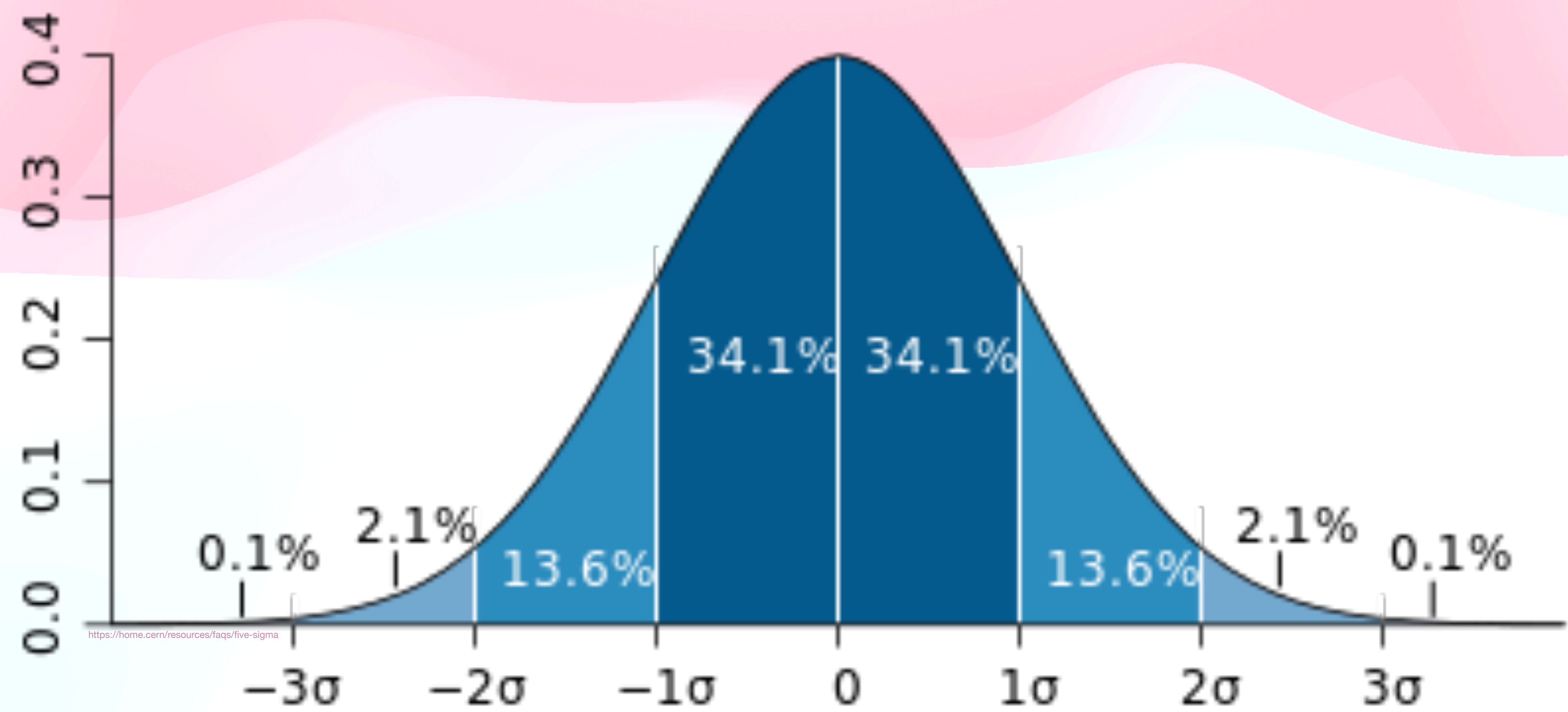
Significancia estadística

¿Por qué nos importa la estadística?



¿Qué es la significancia estadística?

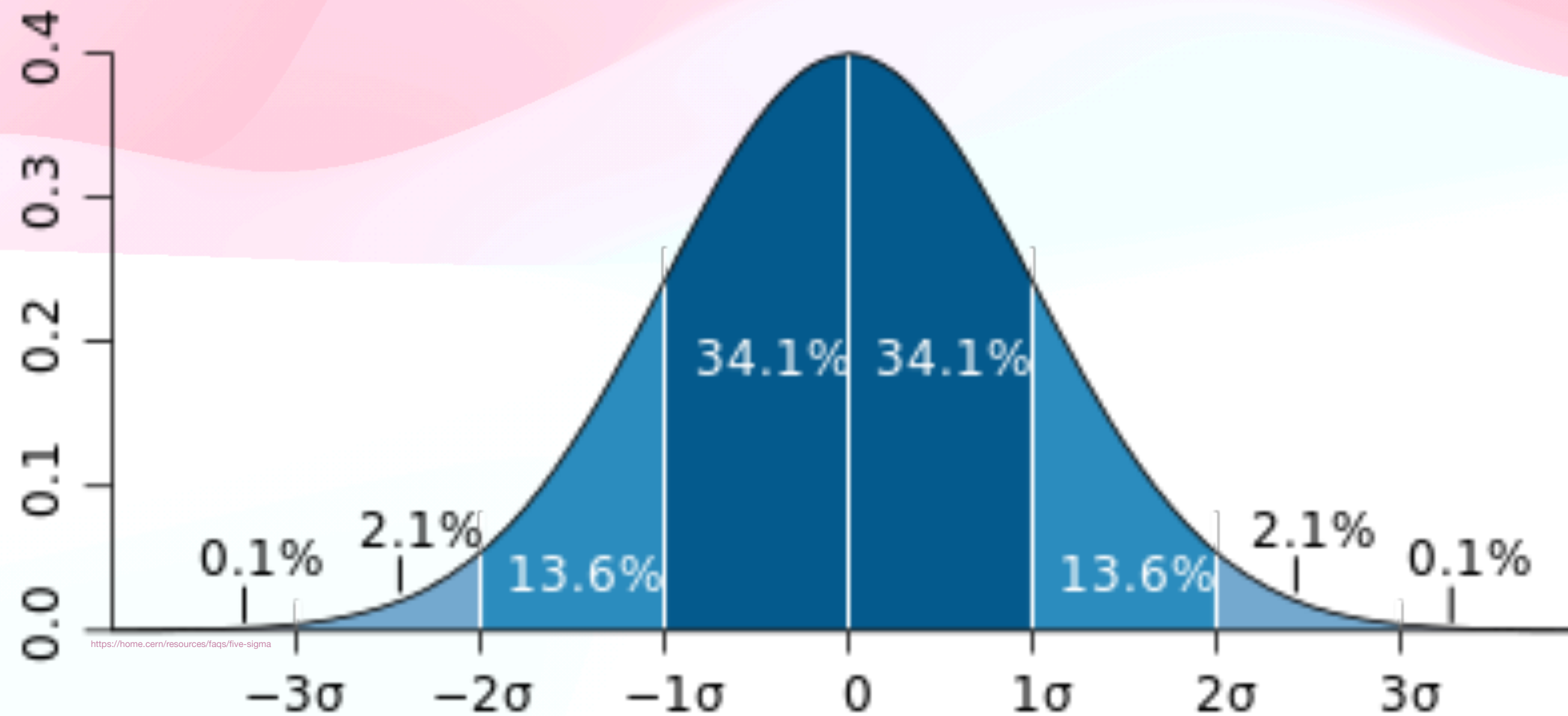
Distribución normal



¿Qué es la significancia estadística?

- ▶ El porcentaje de probabilidad se mide en función de la **desviación estándar σ**

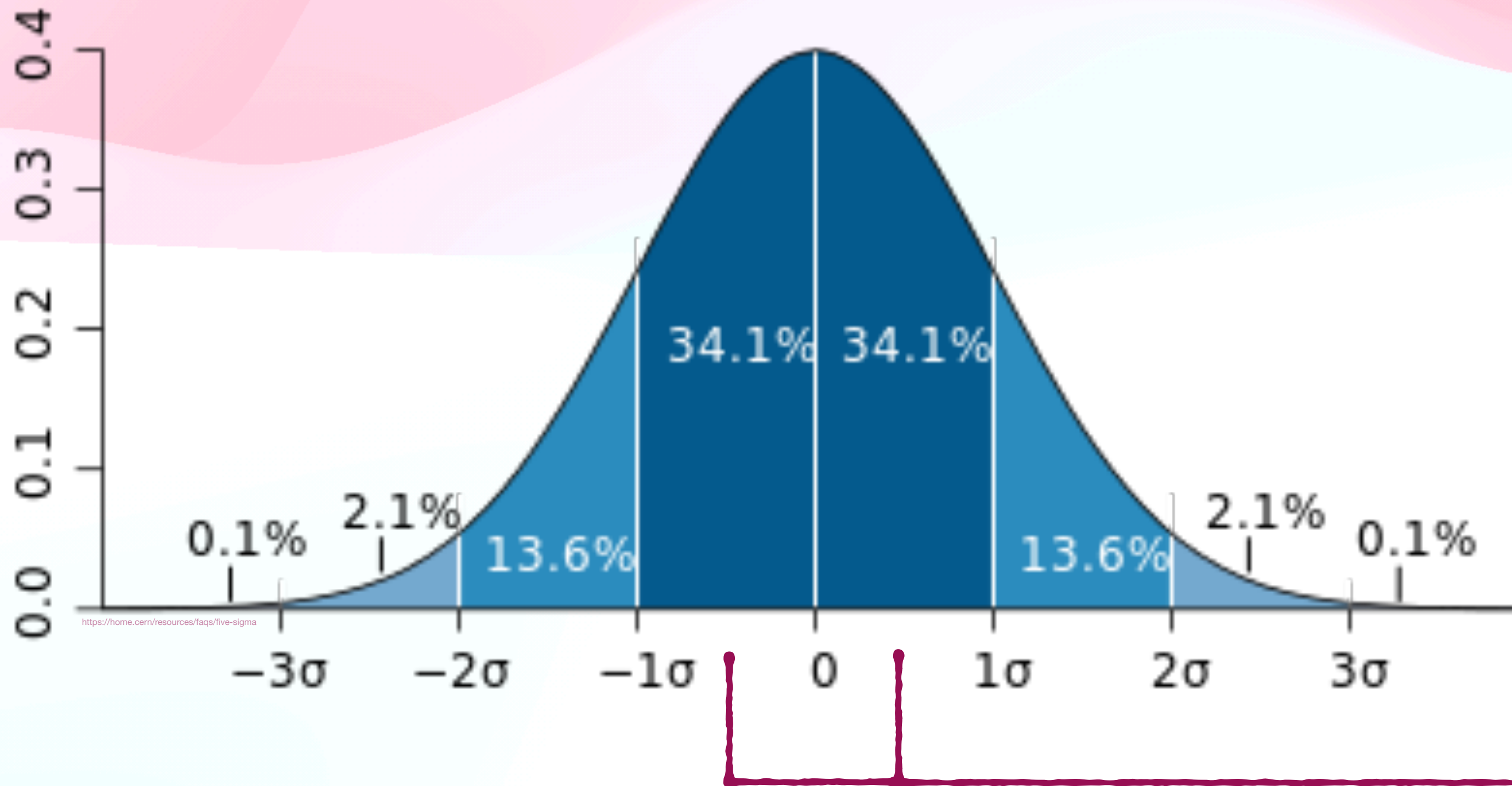
Distribución normal



¿Qué es la significancia estadística?

Distribución normal

- El porcentaje de probabilidad se mide en función de la **desviación estándar σ**

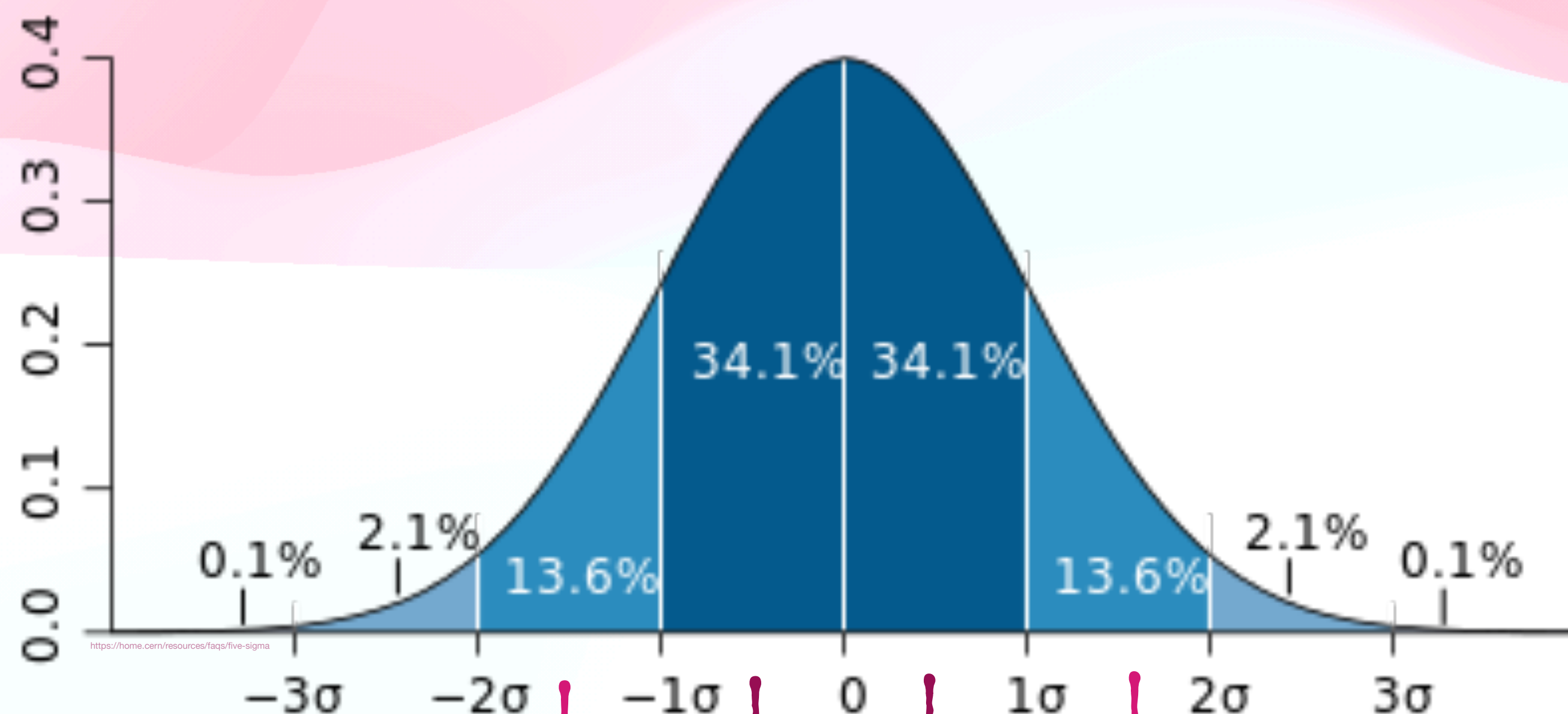


$$34.1\% + 34.1\% = 68.2\% = 1\sigma$$

¿Qué es la significancia estadística?

- El porcentaje de probabilidad se mide en función de la **desviación estándar σ**

Distribución normal



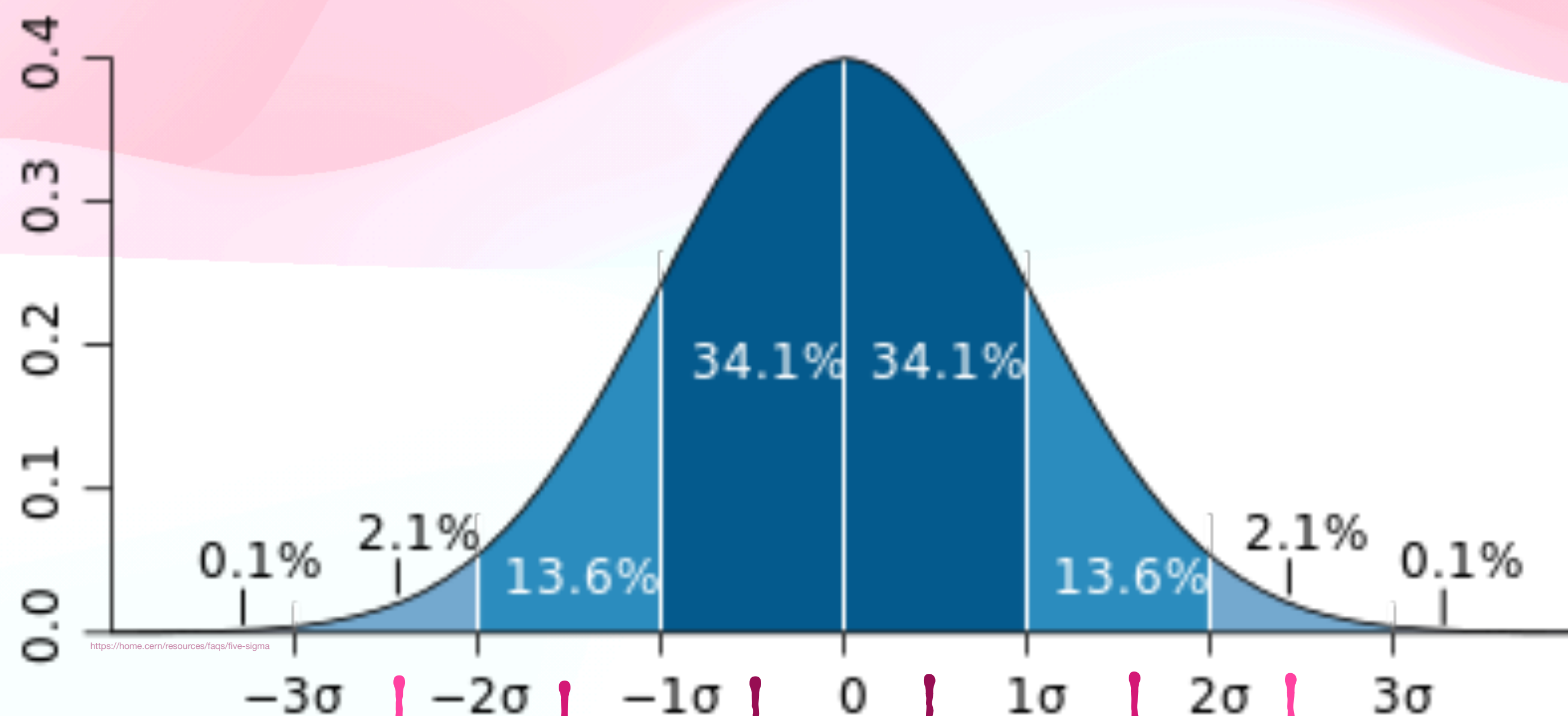
$$34.1\% + 34.1\% = 68.2\% = 1\sigma$$

$$68.2\% + 13.6\% + 13.6\% = 95.4\% = 2\sigma$$

¿Qué es la significancia estadística?

- El porcentaje de probabilidad se mide en función de la **desviación estándar σ**

Distribución normal



$$34.1\% + 34.1\% = 68.2\% = 1\sigma$$

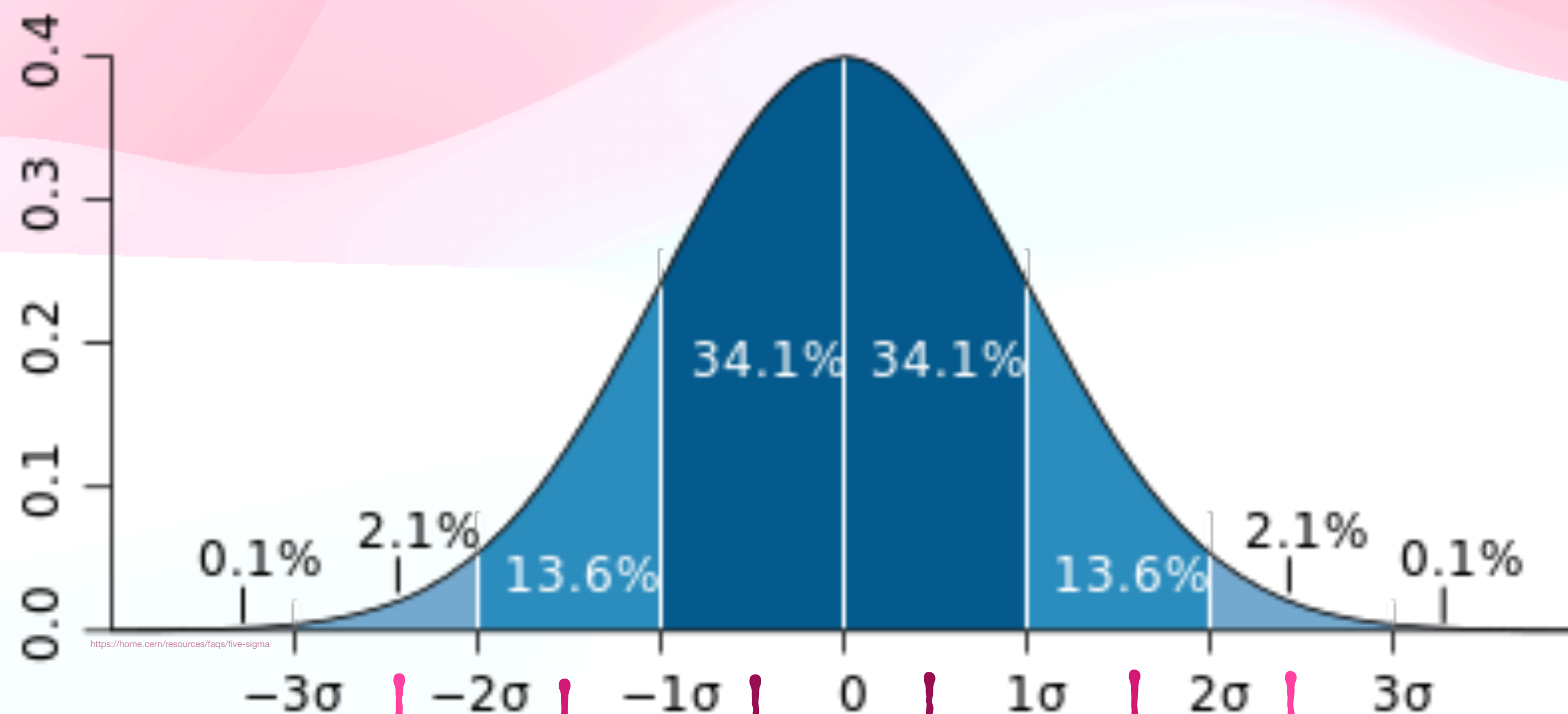
$$68.2\% + 13.6\% + 13.6\% = 95.4\% = 2\sigma$$

$$95.4\% + 2.1\% + 2.1\% = 99.6\% = 3\sigma$$

¿Qué es la significancia estadística?

- El porcentaje de probabilidad se mide en función de la **desviación estándar σ**

Distribución normal



$$34.1\% + 34.1\% = 68.2\% = 1\sigma$$

$$68.2\% + 13.6\% + 13.6\% = 95.4\% = 2\sigma$$

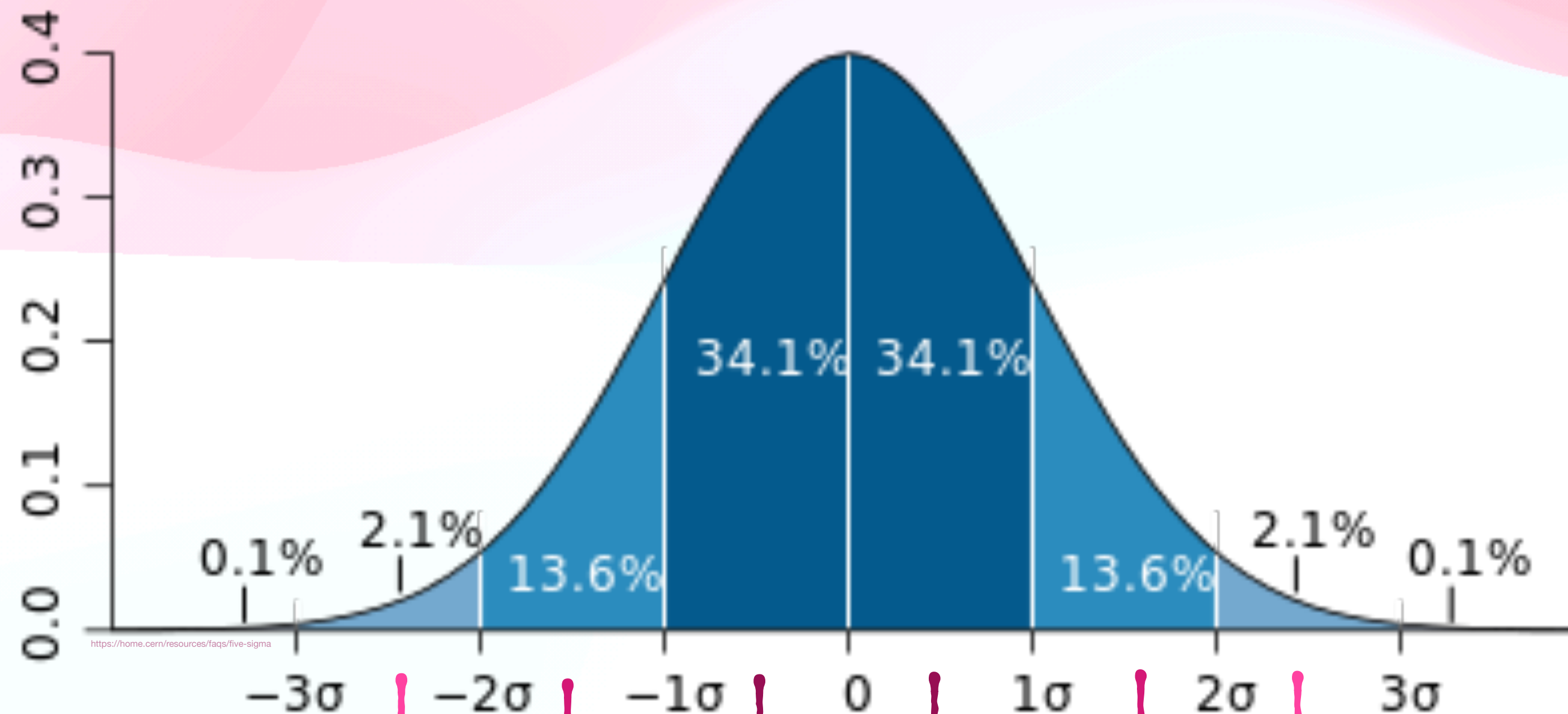
$$95.4\% + 2.1\% + 2.1\% = 99.6\% = 3\sigma$$

$$99.993\% = 4\sigma$$

¿Qué es la significancia estadística?

- El porcentaje de probabilidad se mide en función de la **desviación estándar σ**

Distribución normal



$$34.1\% + 34.1\% = 68.2\% = 1\sigma$$

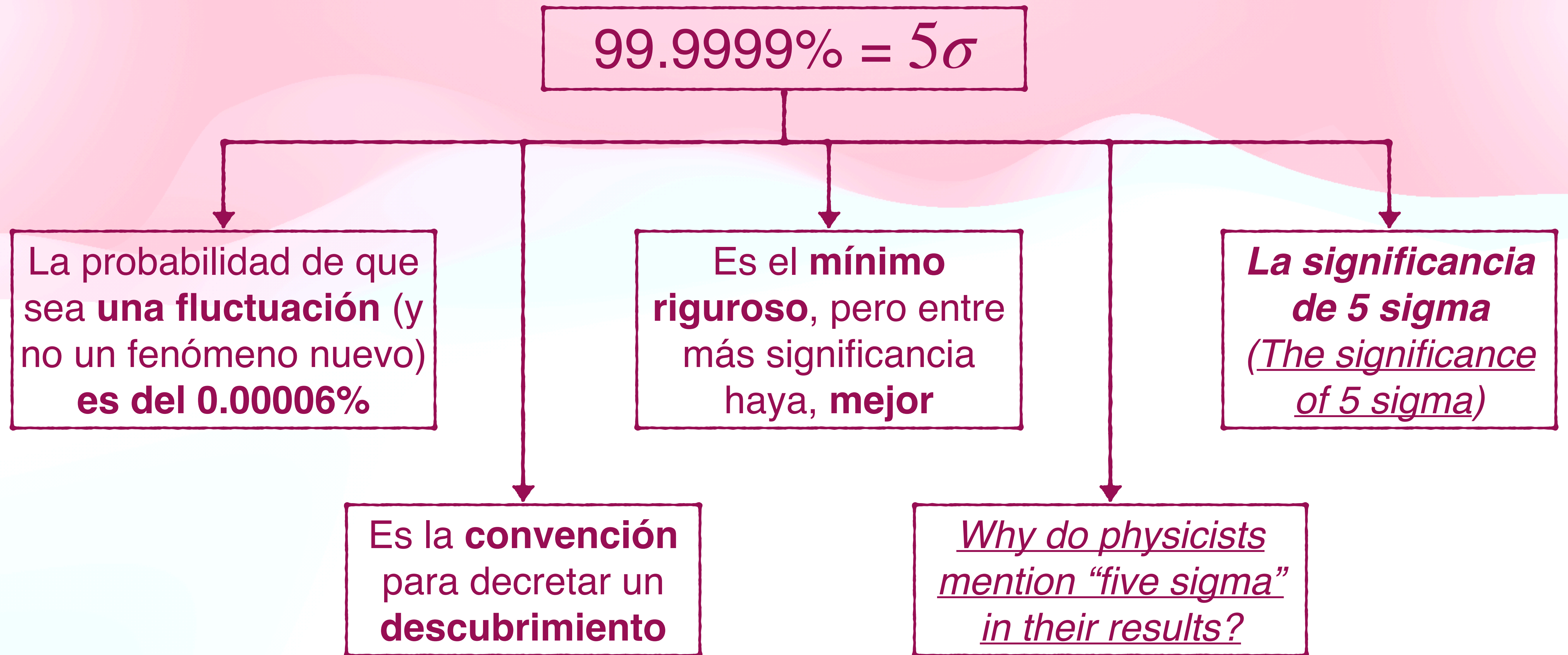
$$68.2\% + 13.6\% + 13.6\% = 95.4\% = 2\sigma$$

$$95.4\% + 2.1\% + 2.1\% = 99.6\% = 3\sigma$$

$$99.993\% = 4\sigma$$

$$99.9999\% = 5\sigma$$

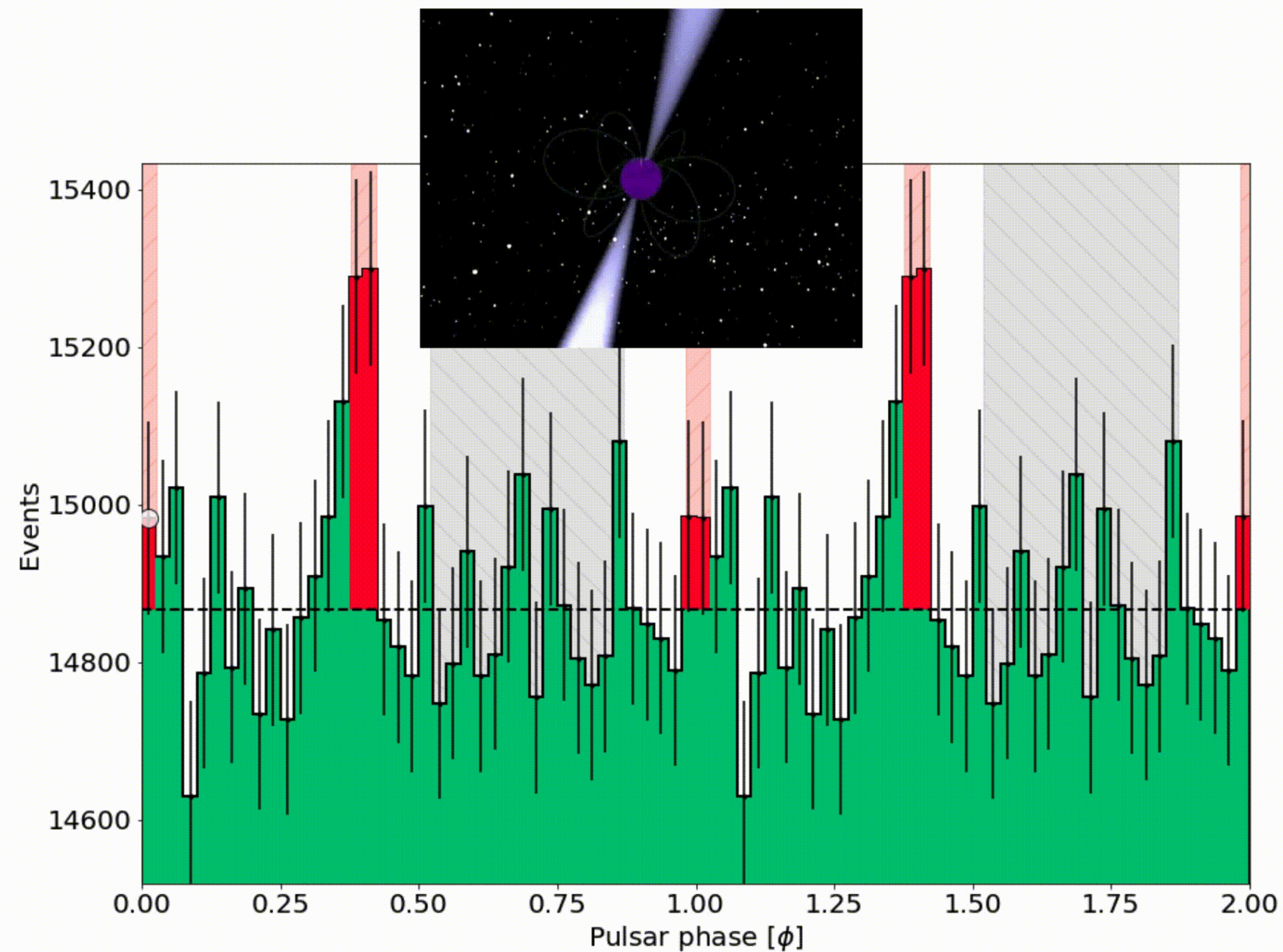
¿Qué es la significancia estadística?



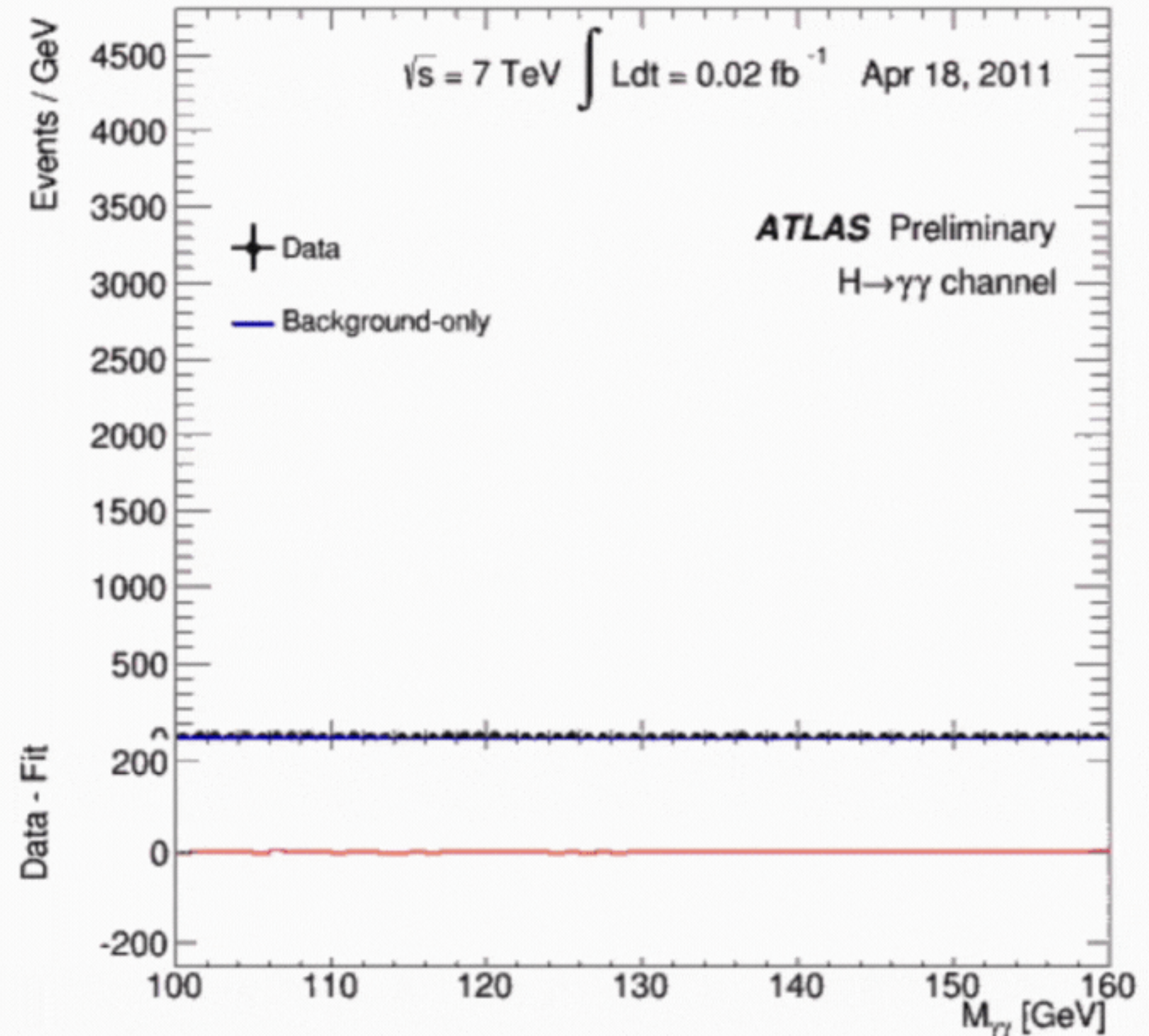
Probabilidad y estadística en histogramas

<https://www.ifae.es/news/2020/06/22/cta-prototype-1st-1-detects-very-high-energy-emission-from-the-crab-pulsar/>

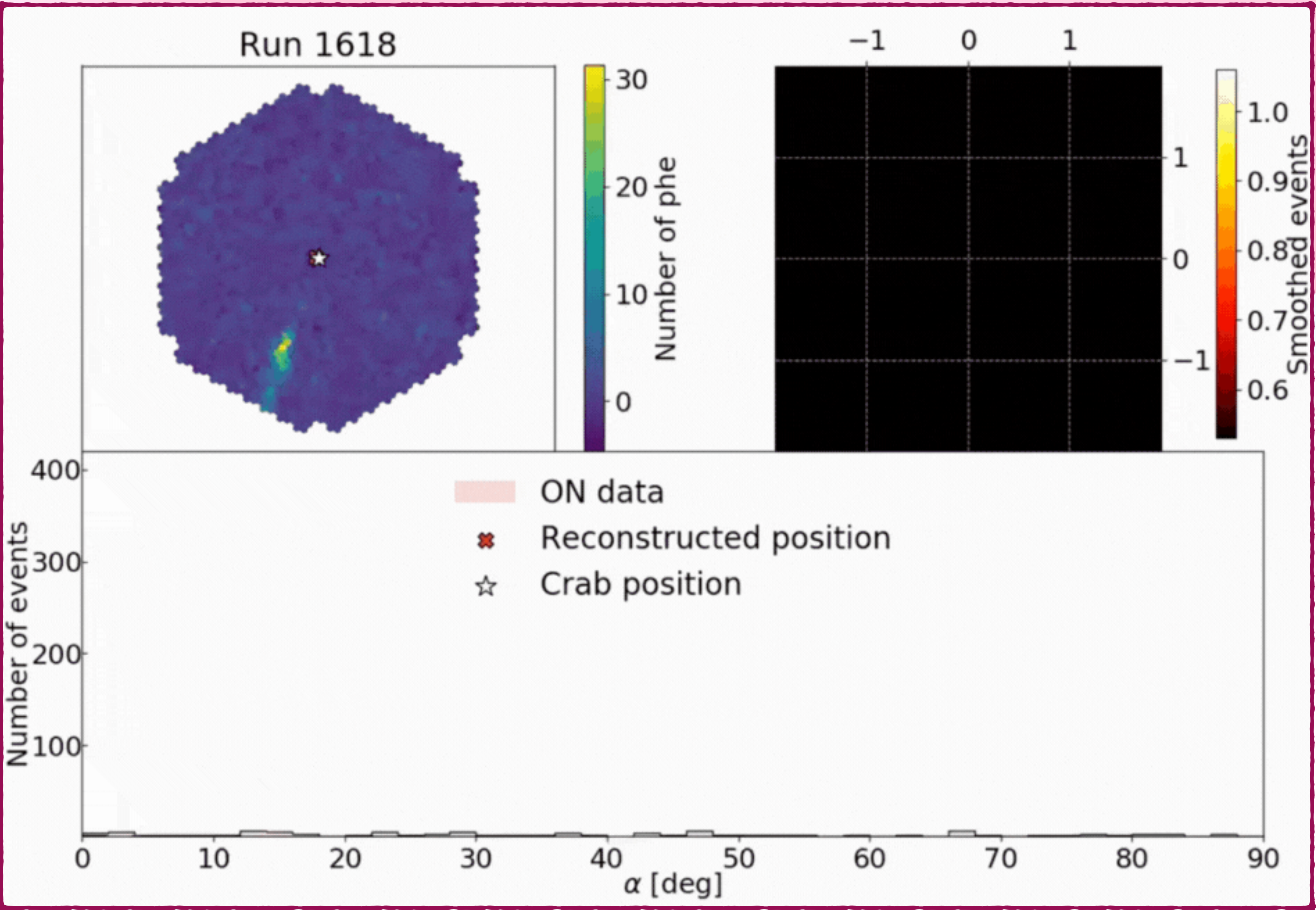
<https://home.cern/resources/faqs/five-sigma>



Astrofísica:
 histograma asociado a la
 detección de un **pulsar**

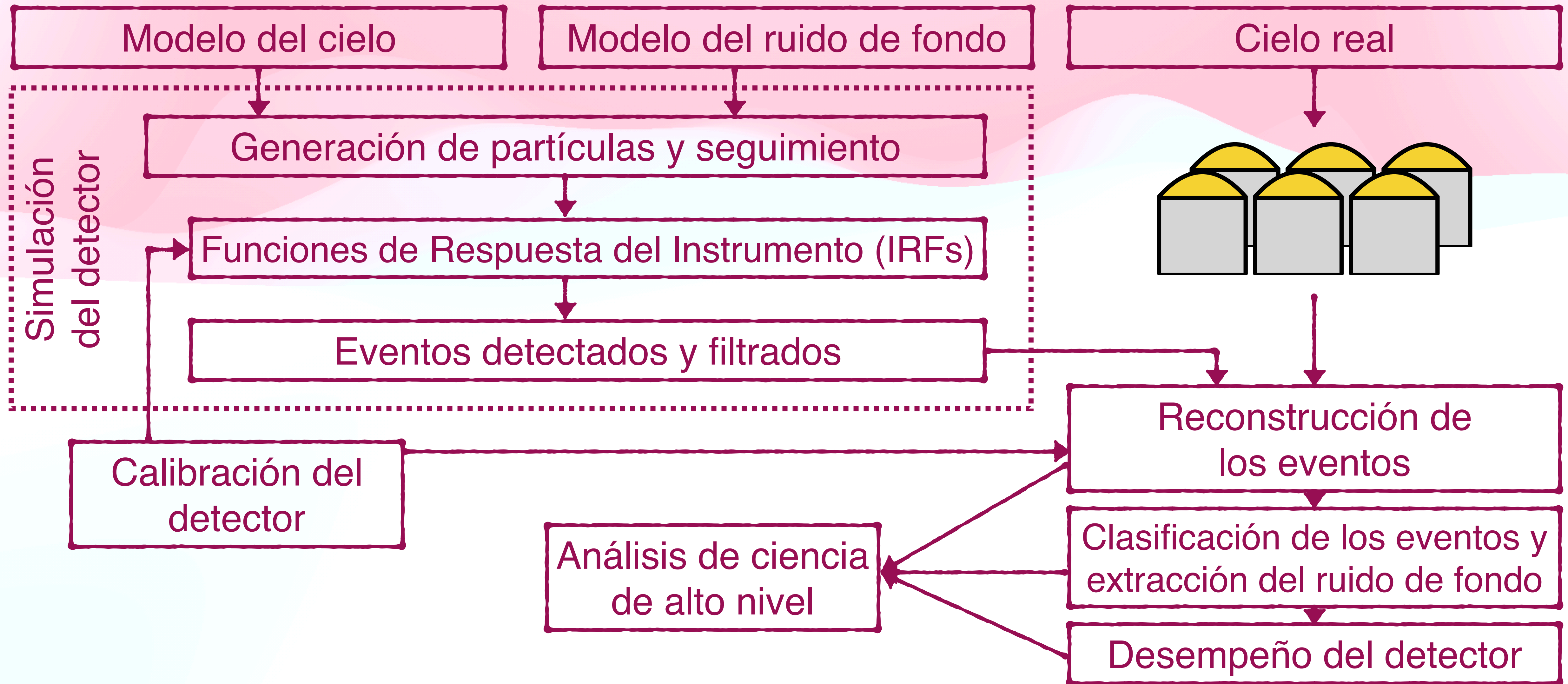


Física de partículas:
 descubrimiento del
Bosón de Higgs

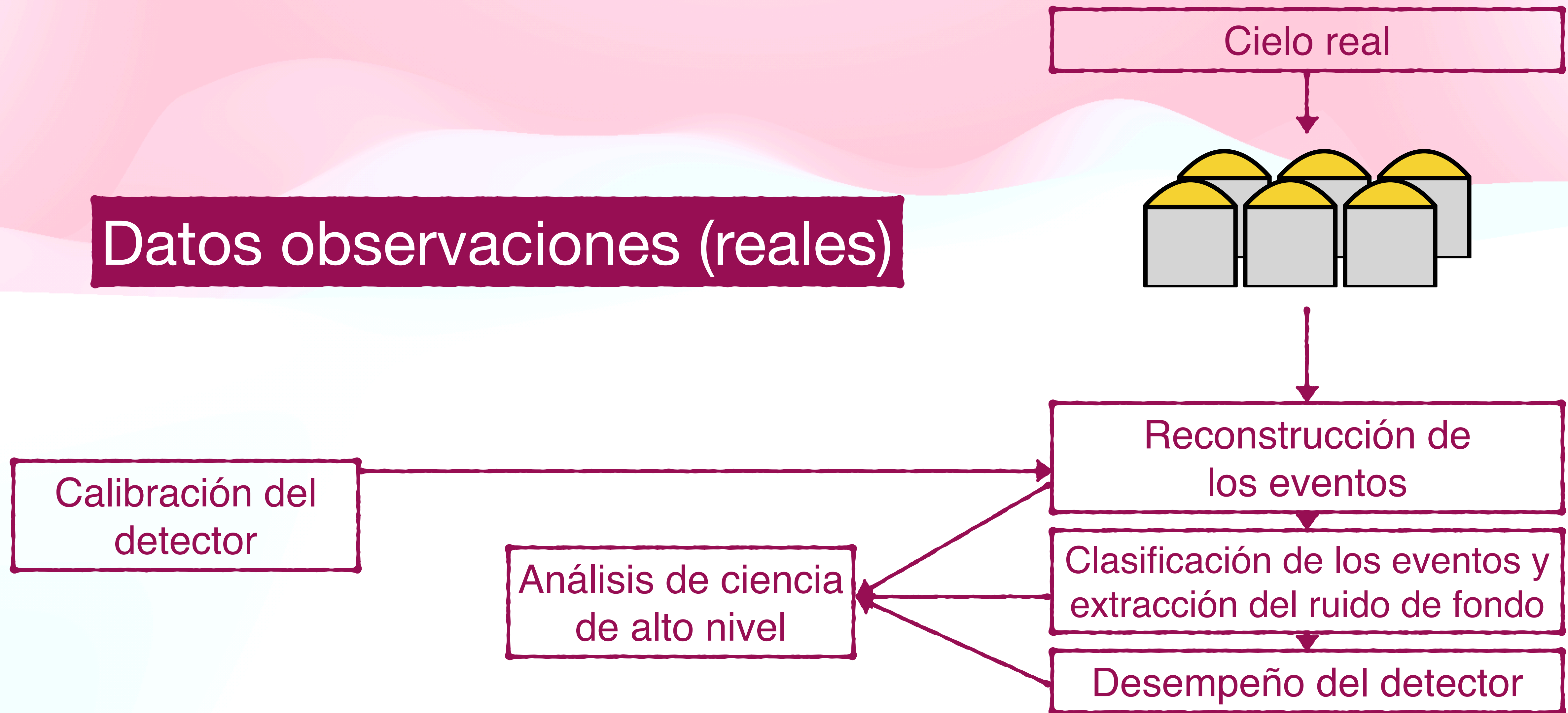


- ▶ **Superior izquierda:** datos observados por un IACT asociados a rayos gamma
- ▶ **Superior derecha:** mapa de significancia asociado a la región del cielo observada
- ▶ **Inferior:** histograma de eventos detectados (gammas)

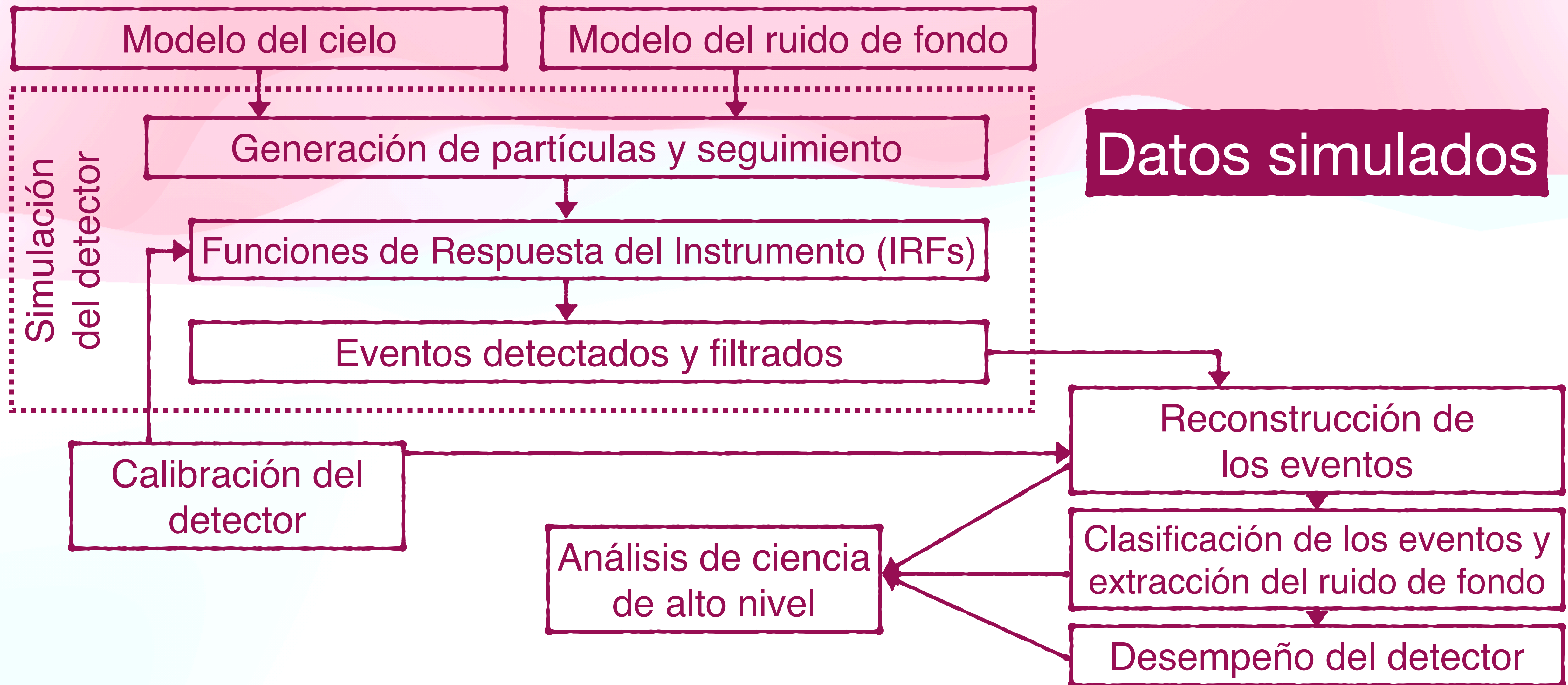
¿Cómo sabemos que nuestras hipótesis son consistentes con las observaciones?



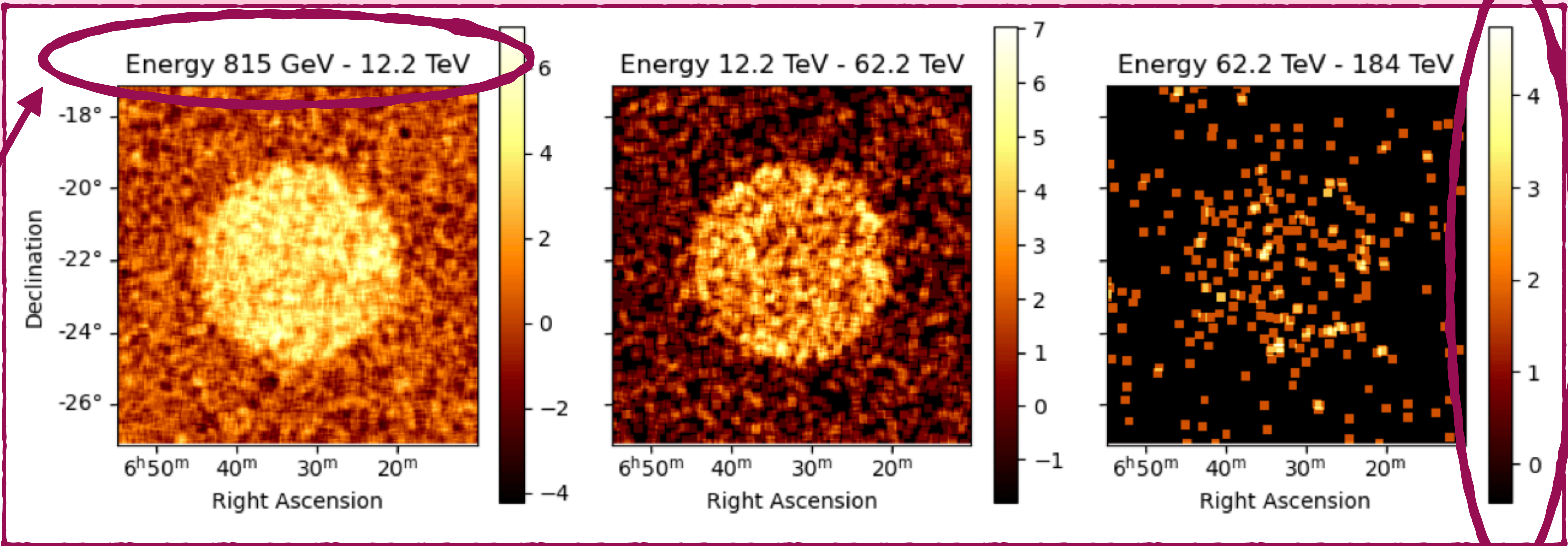
¿Cómo sabemos que nuestras hipótesis son consistentes con las observaciones?



¿Cómo sabemos que nuestras hipótesis son consistentes con las observaciones?



Simulaciones de una fuente extendida tipo Geminga para diferentes rangos de energía



Resultados producidos por Erick Rangel

Energía en unidades de eV

Significancia en unidades de σ

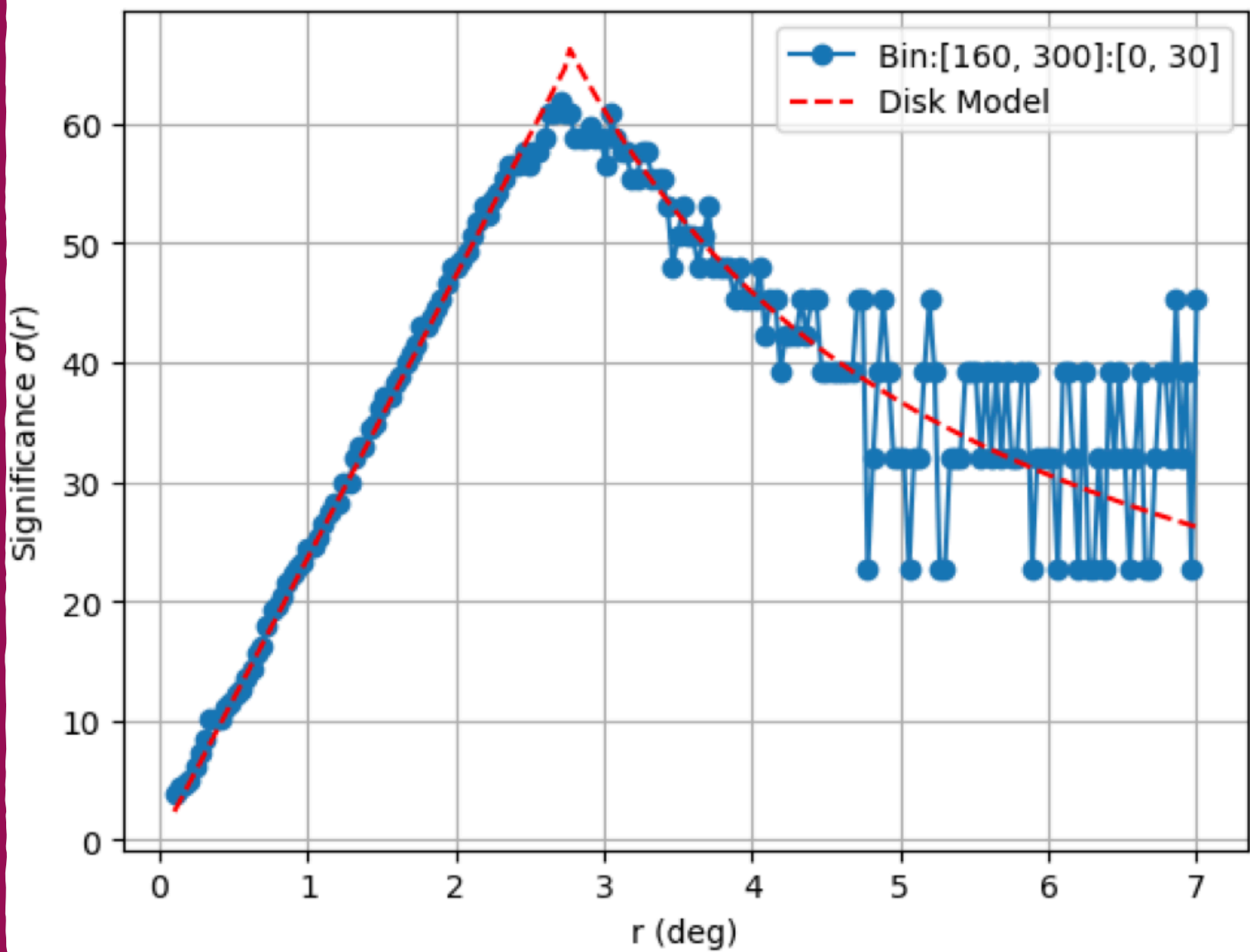
Análisis de las simulaciones

Modelos teóricos que se quieren analizar

Resultados producidos por Erick Rangel

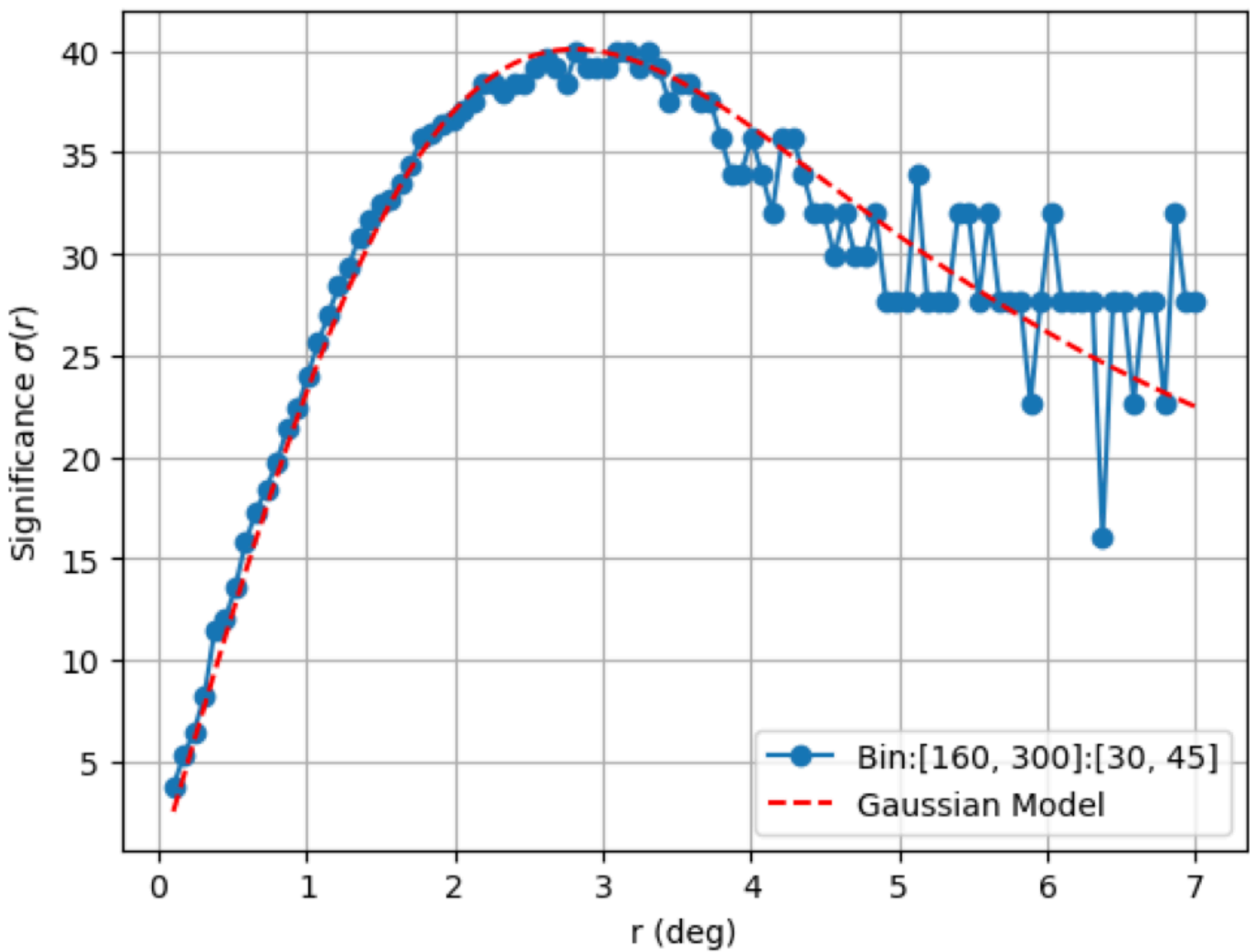
$$\phi(lon, lat) = \frac{1}{2\pi(1 - \cos r_0)} \cdot \begin{cases} 1 & \text{for } \theta \leq r_0 \\ 0 & \text{for } \theta > r_0 \end{cases}$$

DISK MODEL



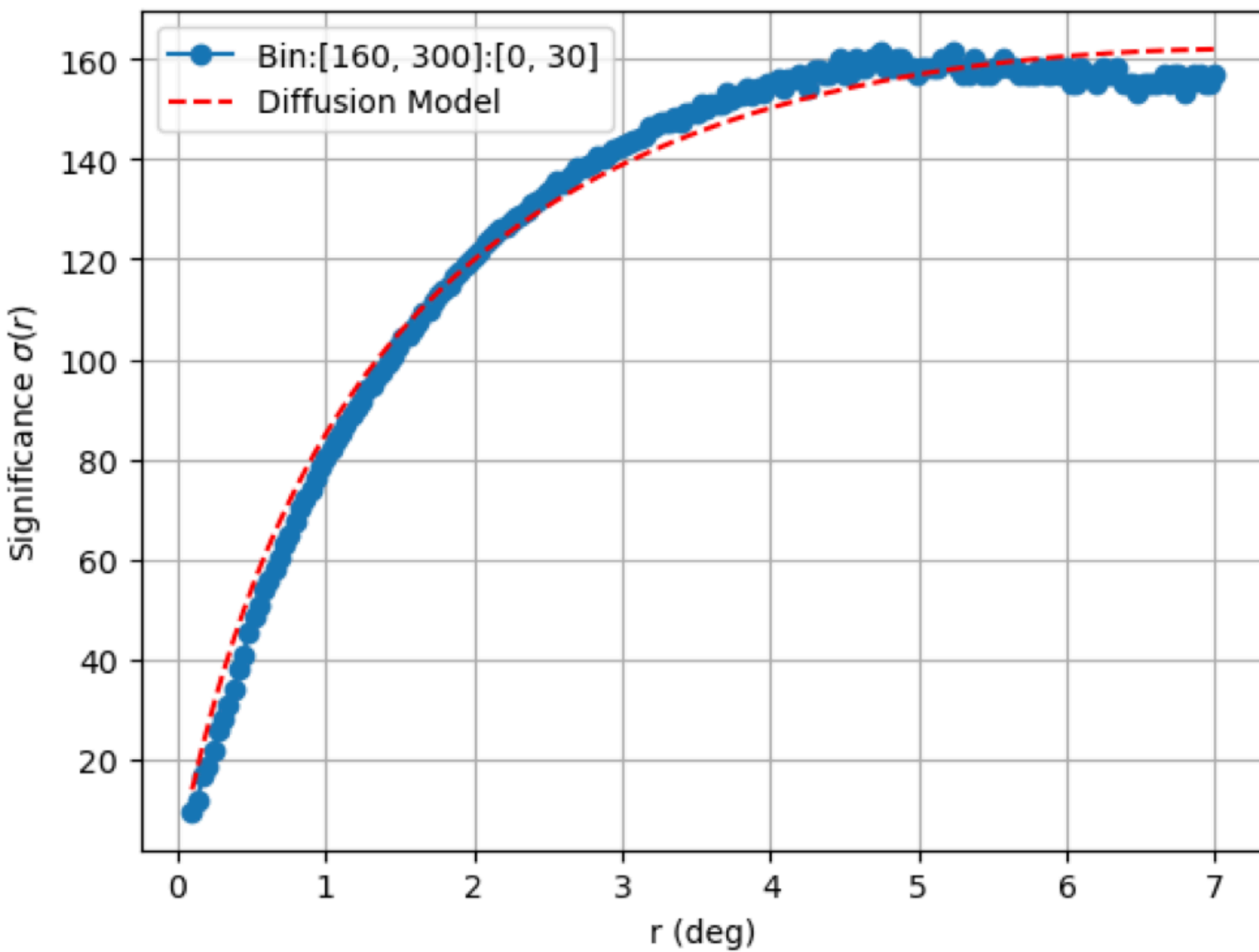
$$\phi(lon, lat) = N \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos \sigma} \right\}$$

GAUSSIAN MODEL

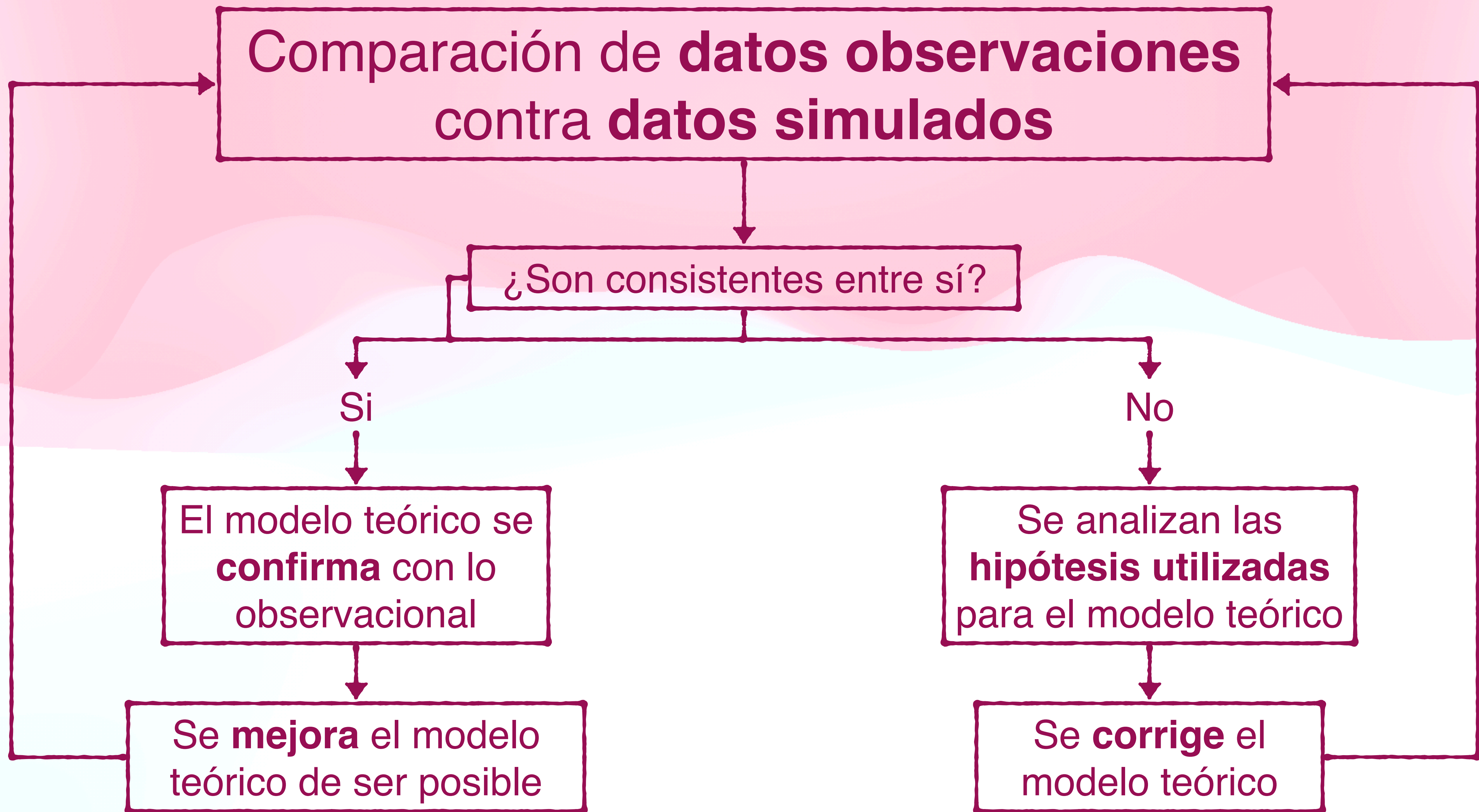


$$\phi(lon, lat) = \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right)^2 \frac{1,2154}{\sqrt{\pi^3 r_{diff}(r^2 + 0,06 r_{diff})}} \exp \left(-\frac{r^2}{r_{diff}^2} \right)$$

DIFFUSION MODEL



Comparación del **modelo teórico** (linea roja punteada) con la **observación simulada** (distribución en azul)



¿Qué hacemos cuando nuestros datos son detecciones confirmadas?

¿Qué hacemos cuando nuestros datos son detecciones confirmadas?



Le avisamos a los demás detectores para saber acerca de sus observaciones

HAWC



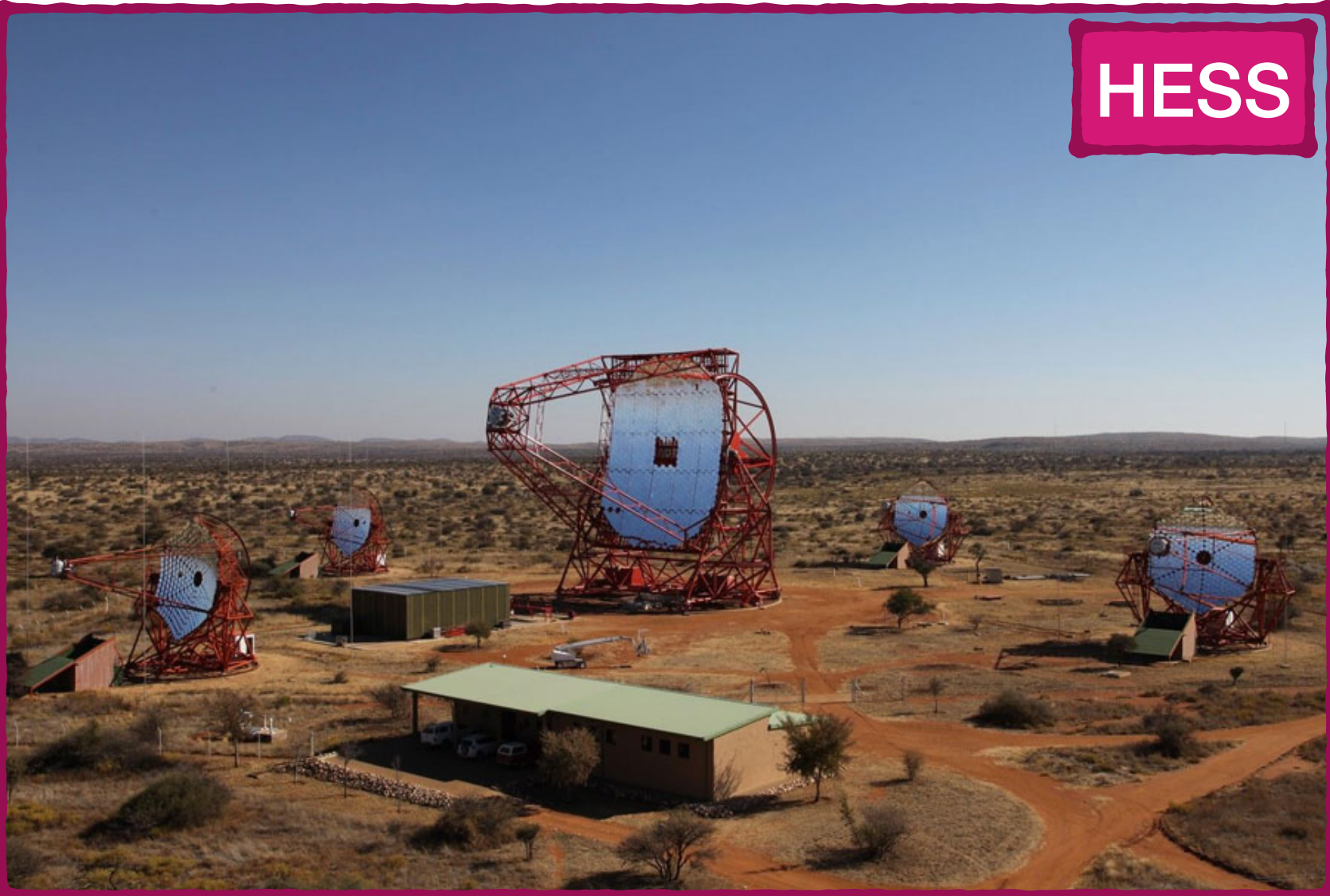
LHAASO



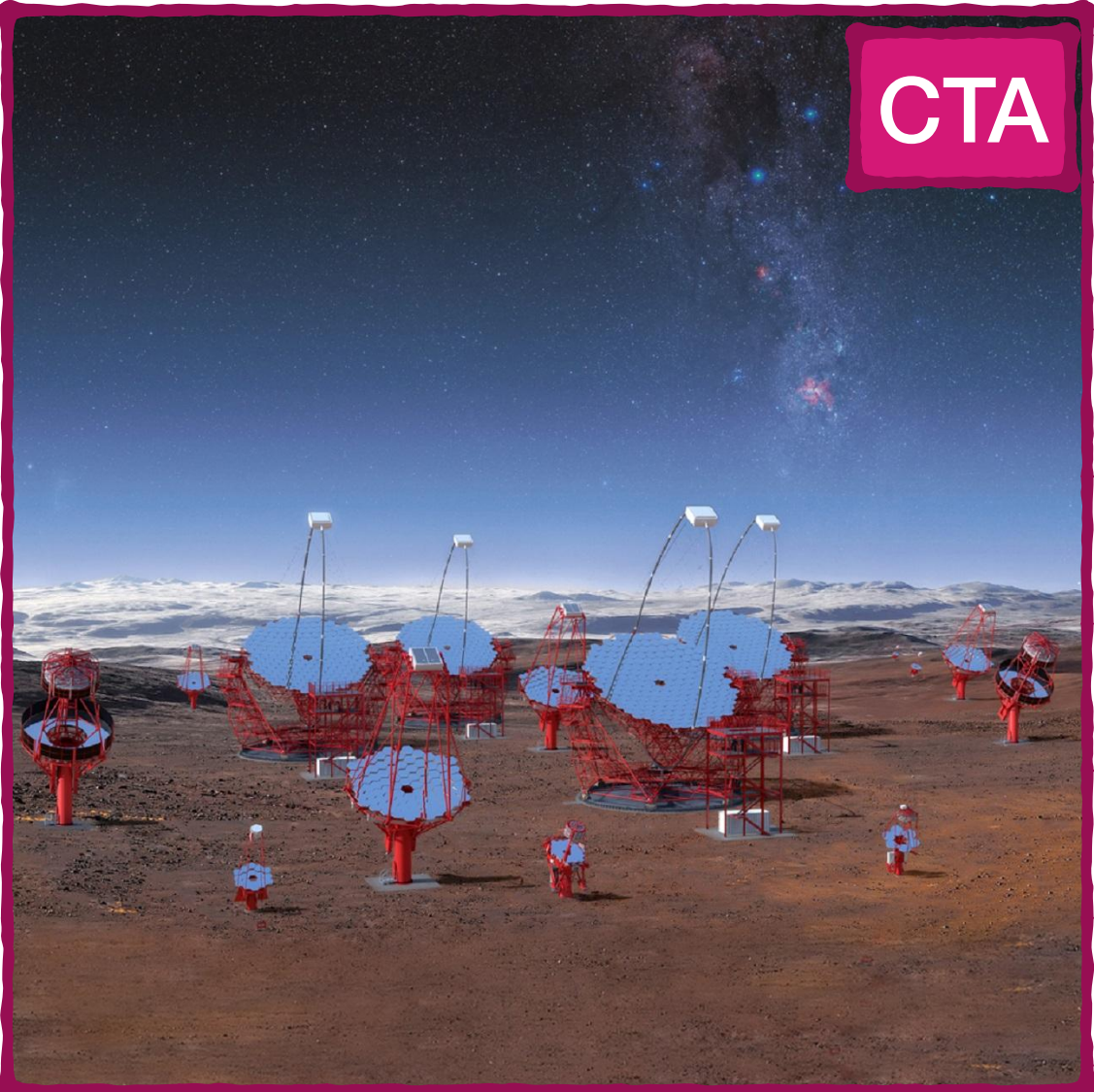
MAGIC

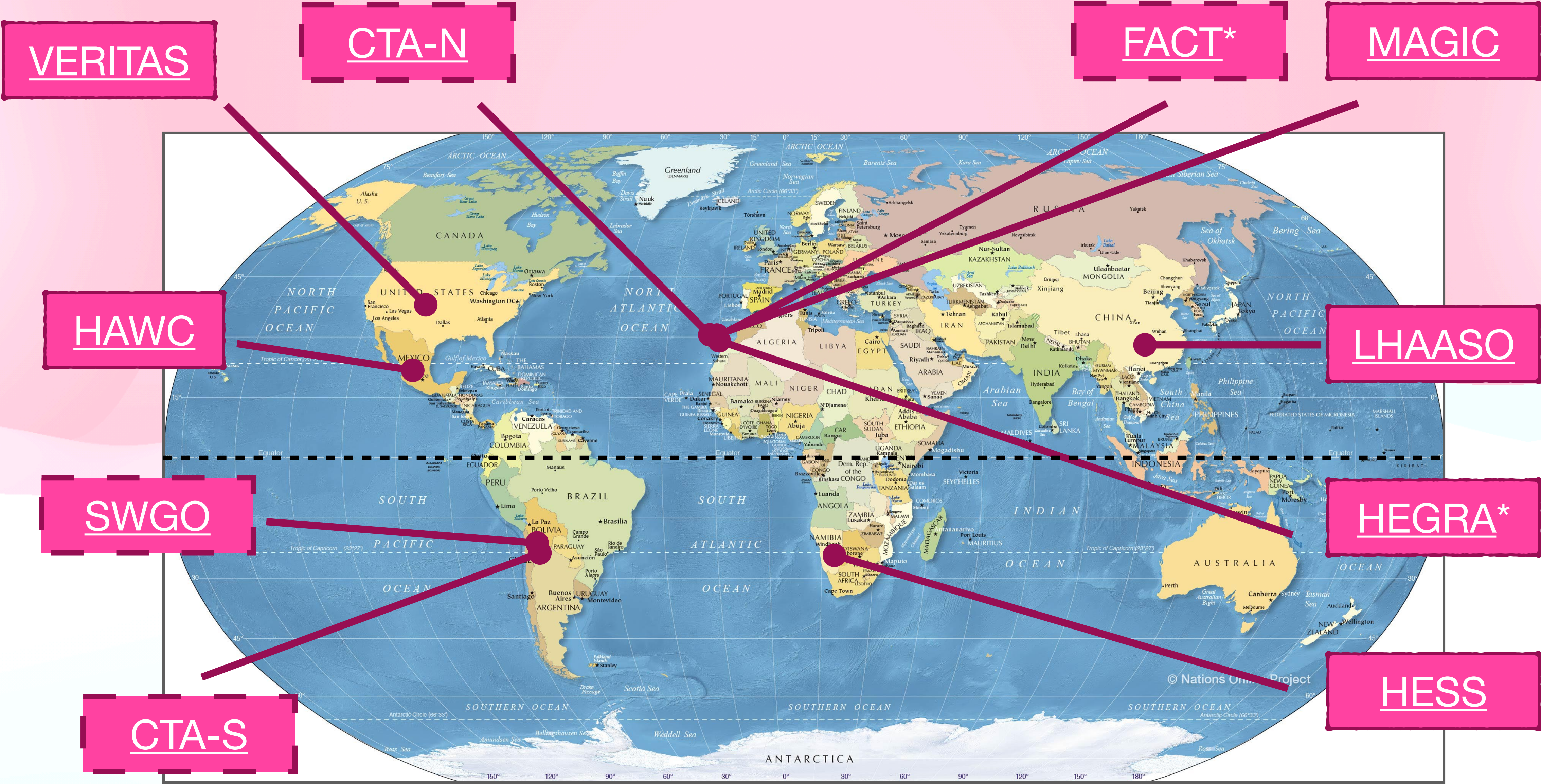


HESS



CTA



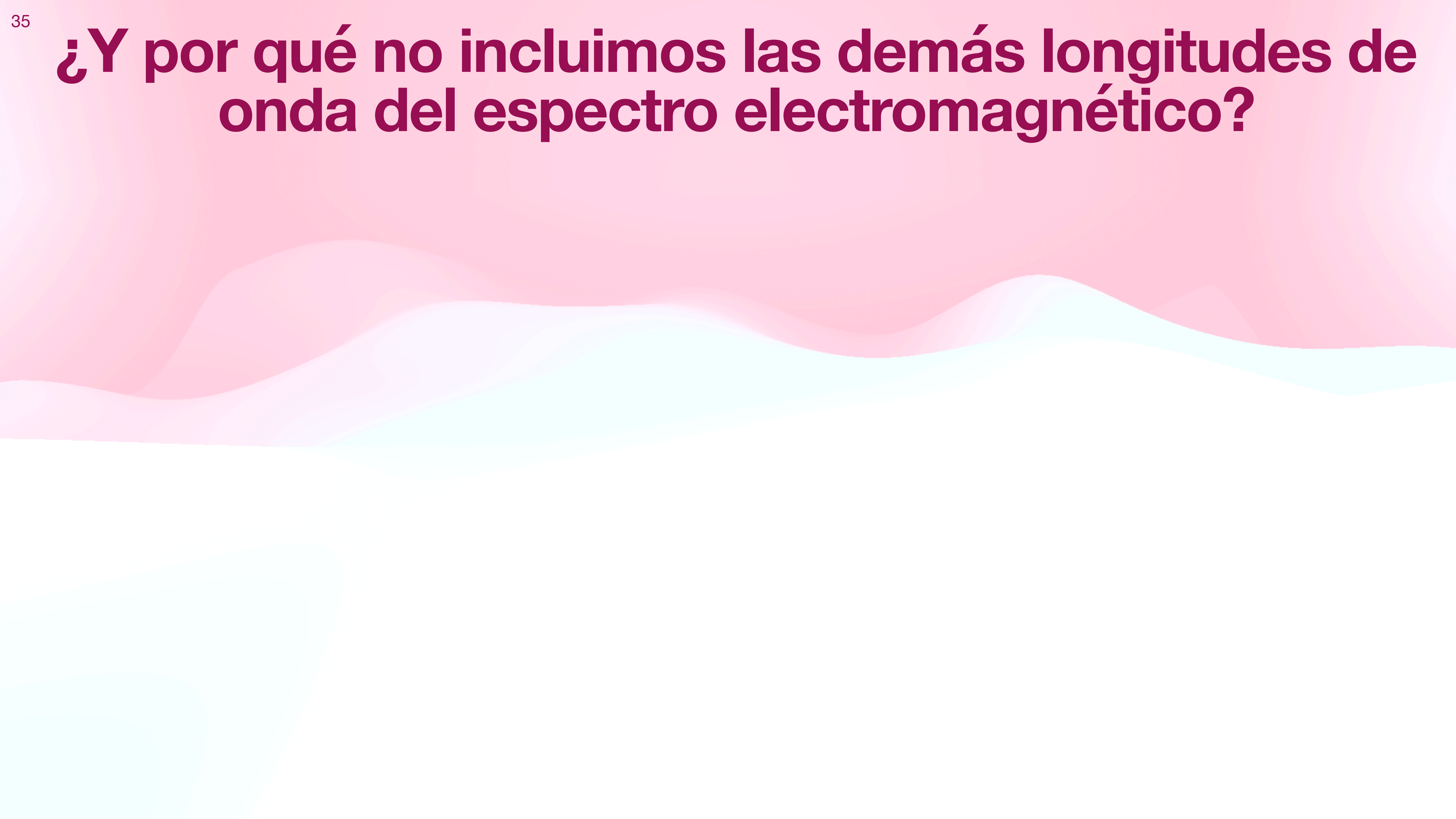


* Fuera de operación

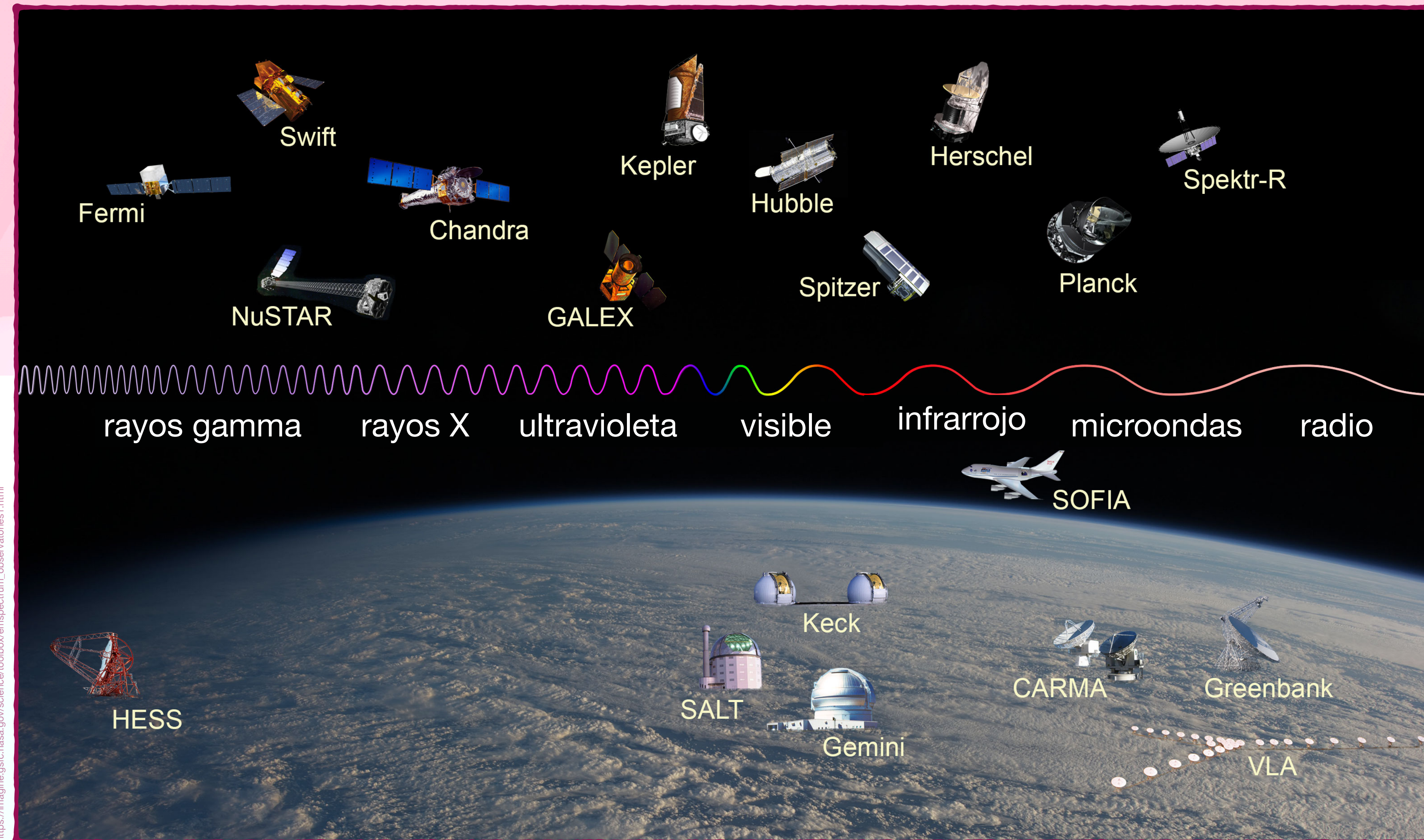
RAYOS GAMMA

--- En desarrollo

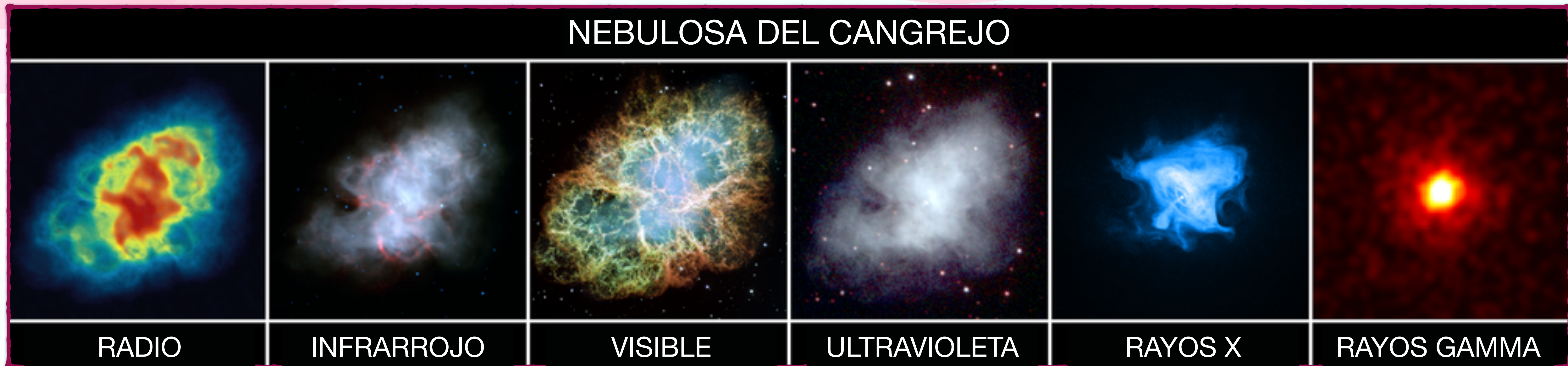
¿Y por qué no incluimos las demás longitudes de onda del espectro electromagnético?



¿Y por qué no incluimos las demás longitudes de onda del espectro electromagnético?

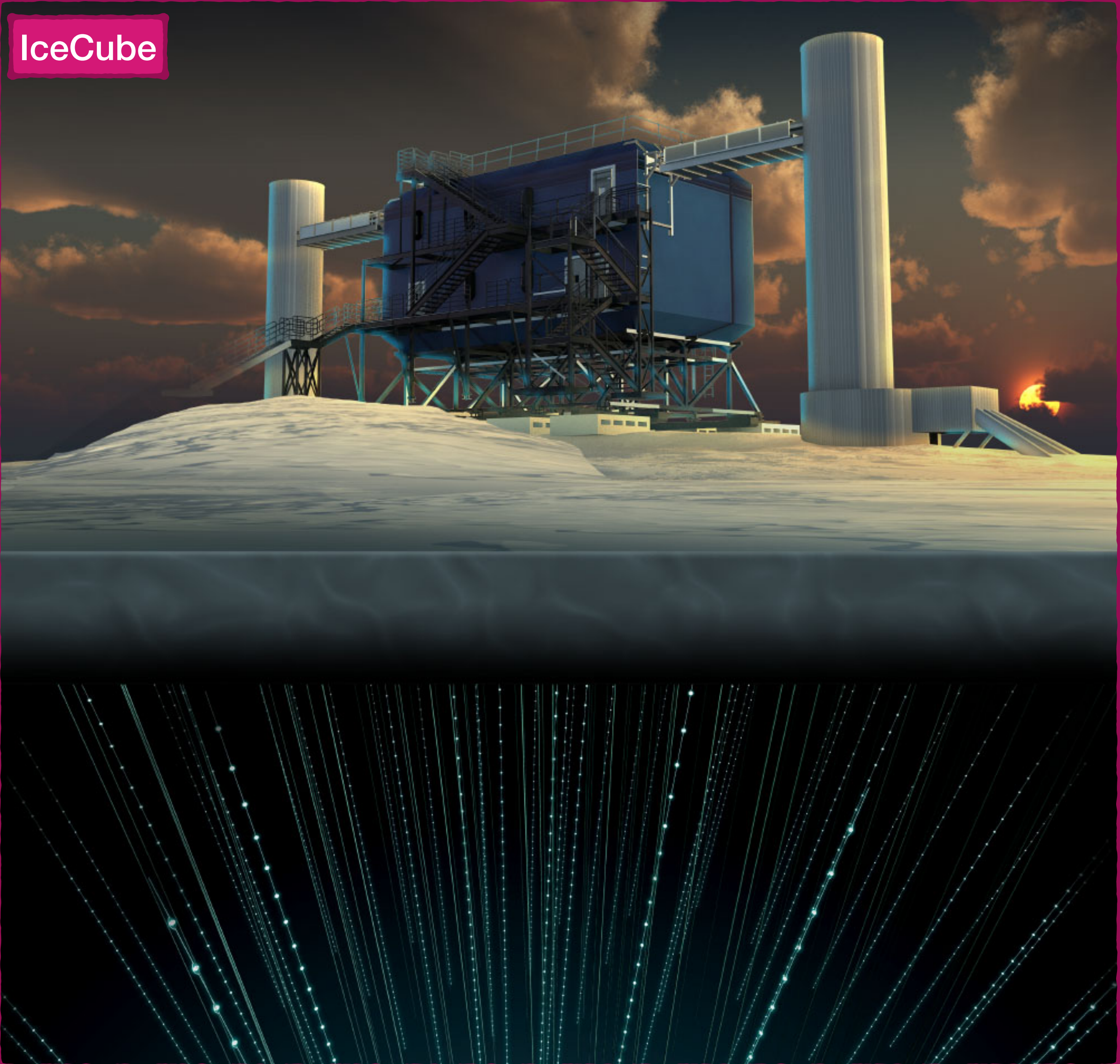


Análisis de fuentes astrofísicas a lo largo de todo el espectro electromagnético



¿Y si consideramos a los demás mensajeros?

¿Existen observatorios para detectarlos?



IceCube

<https://sayostudio.com/portfolio/icecube-observatory/>



LIGO

<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20170927>



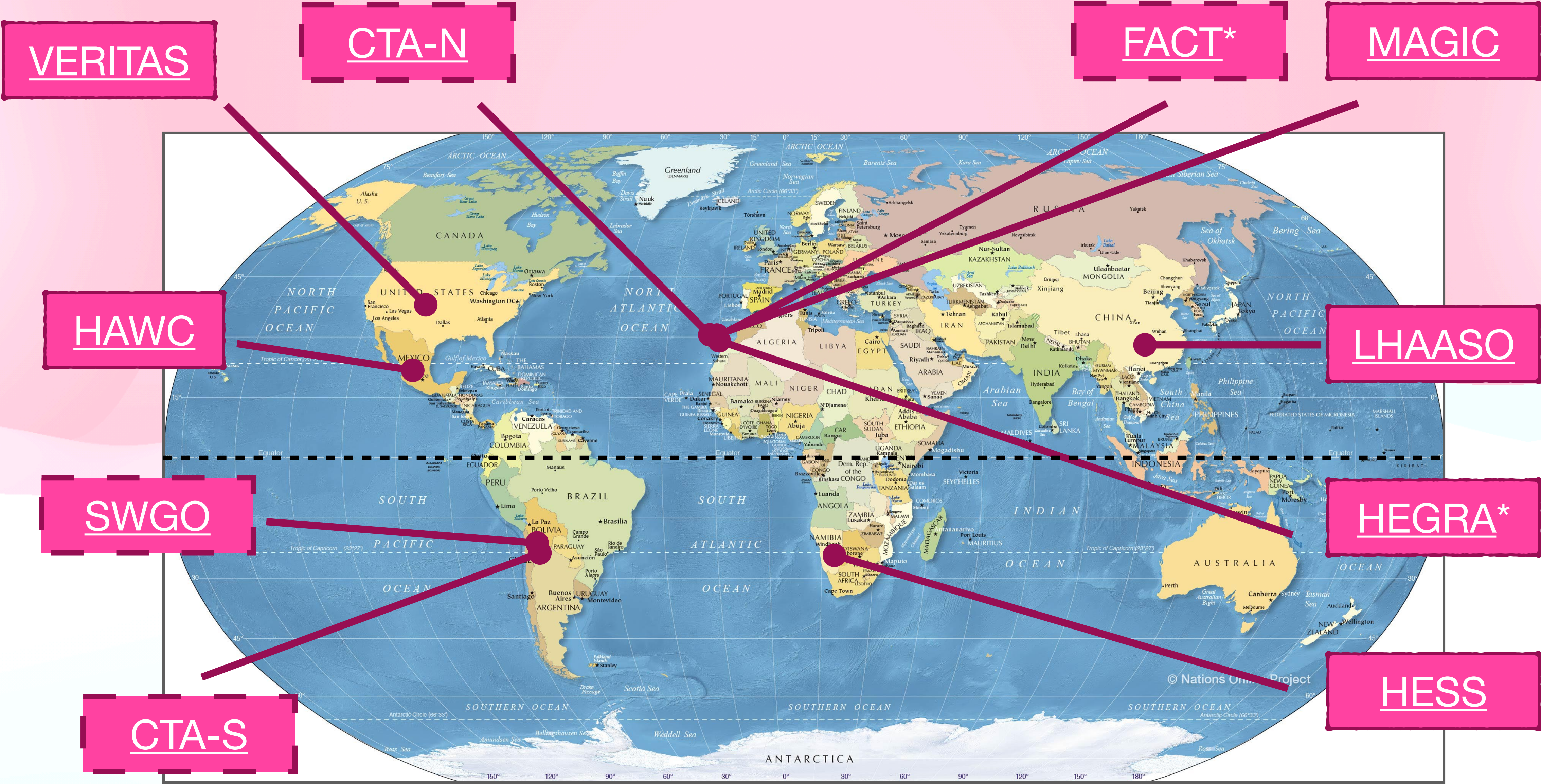
AUGER

<https://ung.si/en/research/cac/research-cac/pierre-auger-observatory/>



Super-Kamiokande

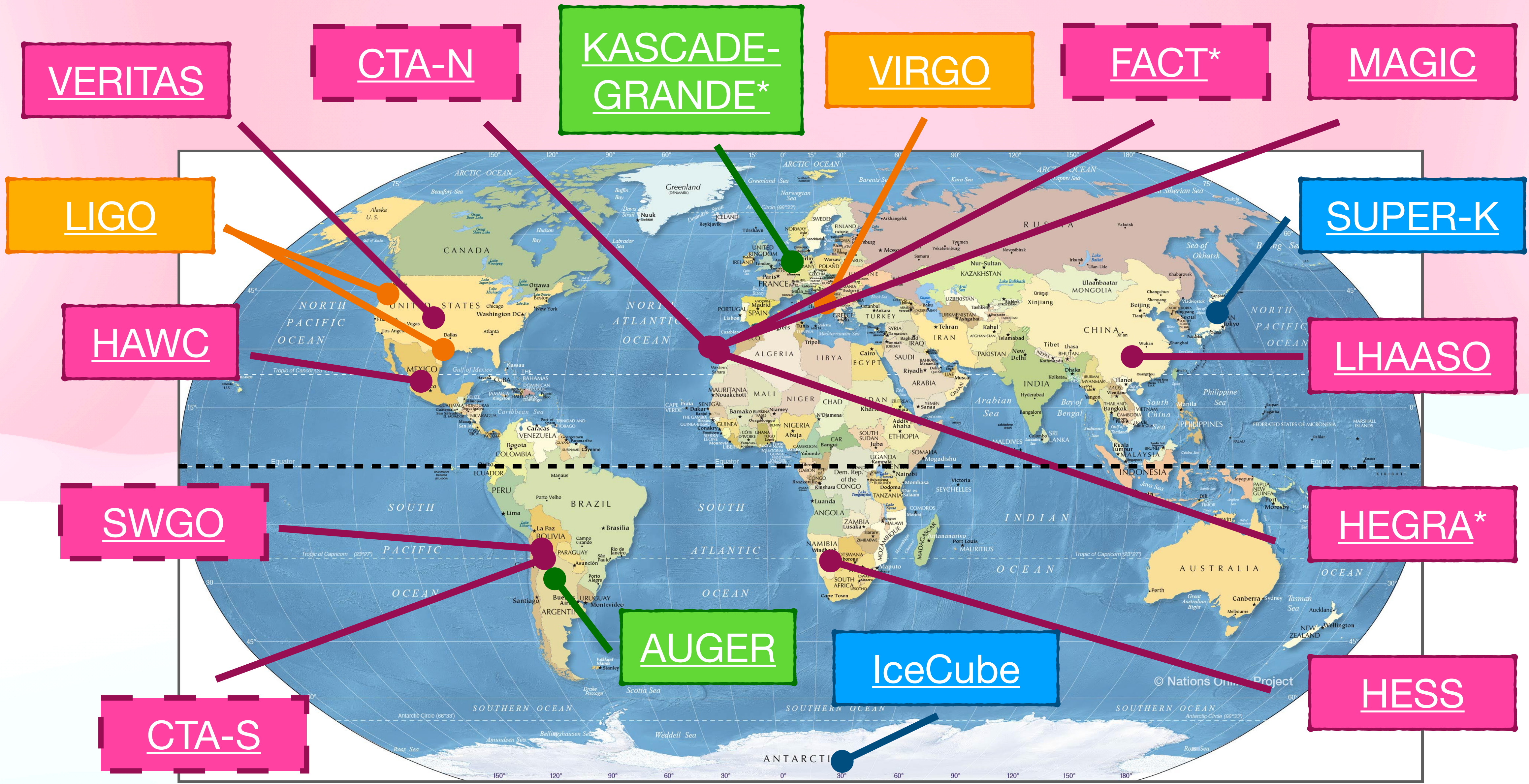
https://x.com/PPD_STFC/status/1786329545001279959



* Fuera de operación

RAYOS GAMMA

--- En desarrollo



* Fuera de operación

— — — En desarrollo

RAYOS GAMMA

NEUTRINOS

RAYOS CÓSMICOS

ONDAS GRAVITACIONALES

Algunas publicaciones con resultados de varias colaboraciones en conjunto: MULTIMENSAJERO (*MULTIMESSENGER*)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 974:61 (17pp), 2024 October 10

© 2024. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad698d>



CrossMark

Multiwavelength Investigation of γ -Ray Source MGRO J1908+06 Emission Using Fermi-LAT, VERITAS and HAWC

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 976:8 (15pp), 2024 November 20

© 2024. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad812f>



CrossMark

Search for Joint Multimessenger Signals from Potential Galactic Cosmic-Ray Accelerators with HAWC and IceCube

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 866:24 (18pp), 2018 October 10

© 2018. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aade4e>



CrossMark

VERITAS and *Fermi*-LAT Observations of TeV Gamma-Ray Sources Discovered by HAWC in the 2HWC Catalog

Monthly Notices
of the

ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **485**, 356–366 (2019)

Advance Access publication 2019 January 16

doi:10.1093/mnras/stz089



MAGIC and *Fermi*-LAT gamma-ray results on unassociated HAWC sources

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 917:6 (16pp), 2021 August 10

© 2021. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf64b>



CrossMark

TeV Emission of Galactic Plane Sources with HAWC and H.E.S.S.



PROCEEDINGS
OF SCIENCE



Combined dark matter searches towards dwarf spheroidal galaxies with Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S., MAGIC, and VERITAS

Uno de los resultados más importantes en astrofísica ¡DE LA HISTORIA!

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

OPEN ACCESS



Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube Collaboration, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN Collaboration, The Insight-HXMT Collaboration, ANTARES Collaboration, The Swift Collaboration, AGILE Team, The 1M2H Team, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, GRAWITA: GRAvitational Wave Inaf TeAm, The Fermi Large Area Telescope Collaboration, ATCA: Australia Telescope Compact Array, ASKAP: Australian SKA Pathfinder, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper, Wider, Faster Program), AST3, and CAASTRO Collaborations, The VINROUGE Collaboration, MASTER Collaboration, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, Caltech-NRAO, TTU-NRAO, and NuSTAR Collaborations, Pan-STARRS, The MAXI Team, TZAC Consortium, KU Collaboration, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS: Transient Robotic Observatory of the South Collaboration, The BOOTES Collaboration, MWA: Murchison Widefield Array, The CALET Collaboration, IKI-GW Follow-up Collaboration, H.E.S.S. Collaboration, LOFAR Collaboration, LWA: Long Wavelength Array, HAWC Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, ALMA Collaboration, Euro VLBI Team, Pi of the Sky Collaboration, The Chandra Team at McGill University, DFN: Desert Fireball Network, ATLAS, High Time Resolution Universe Survey, RIMAS and RATIR, and SKA South Africa/MeerKAT

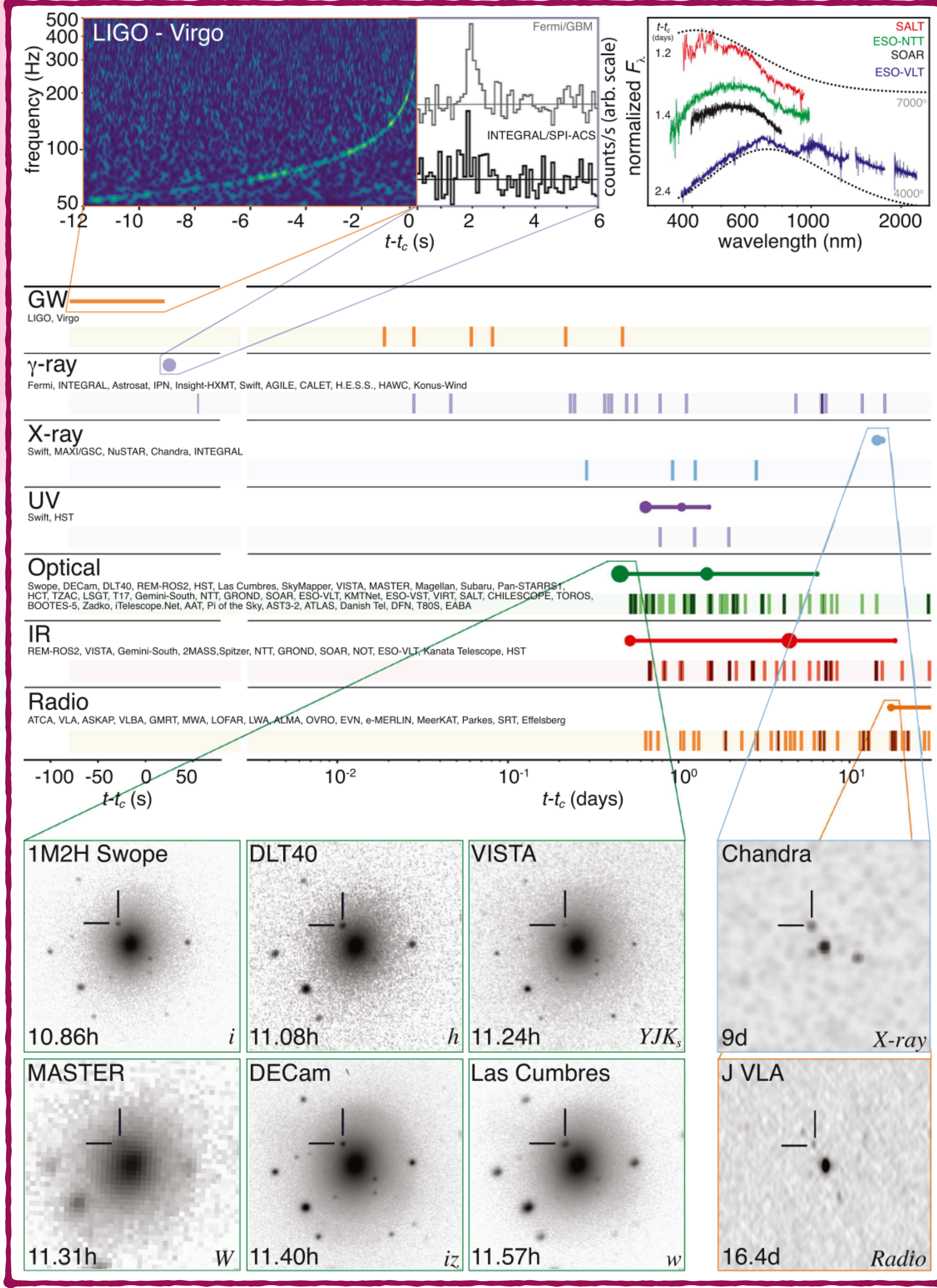
(See the end matter for the full list of authors.)

Gracias al *multimessenger*

Detección de la **onda gravitacional** con LIGO-Virgo

Seguimiento de la detección con **todos** los observatorios de **radiación** en **todas** las longitudes de onda

Ejemplos de **mapas de significancia** obtenidos con diversos observatorios



Se pudo confirmar observacionalmente, por **primera vez en la historia**, el modelo teórico de la **kilonova** (coalición de dos estrellas de neutrones)

En resumen

- ▶ La instrumentación científica es de gran importancia para la confirmación y mejora de los modelos teóricos
- ▶ Siempre es posible mejorar un instrumento, aunque algunas veces estamos limitados por agentes externos
- ▶ Cualquier modelo teórico es irrelevante sin su contraparte observacional
- ▶ Colaborar, hablar entre colegas, discutir resultados, y trabajar en equipo es esencial en esta área
- ▶ No tengan miedo de equivocarse, ese es el único medio para aprender

