

# **XXXI Encontro de Físicos do Norte e Nordeste**

## **Atividades de Ensino**

**Seminário 7**

# **Muon Lifetime Measurements using the LAGO Water Cherenkov Detectors**

**Hernán Asorey**  
**[hasorey@uis.edu.co](mailto:hasorey@uis.edu.co)**

**Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales y Grupo de  
Investigaciones en Relatividad y Gravitación (GIRG)**  
**Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander**  
**Bucaramanga, Colombia**

# Objetivos

- Introducir conceptos básicos en
  - Física de Partículas (inc. física nuclear y física relativista)
  - Física de detectores de radiación
  - Técnicas de análisis de datos complejos e inferencia estadística
- Experiencia de Laboratorio destinada a estudiantes de pre y posgrado
- Complejidad y profundidad adabtables al curso, desde ~10 hasta ~60 horas de clase

# Alcances

Astrofísica  
Relativista

Propagación  
intergaláctica

Transporte  
Heliosférico

Análisis de datos complejos

Física  
Atmosférica

Física de  
detectores

Física de  
Partículas

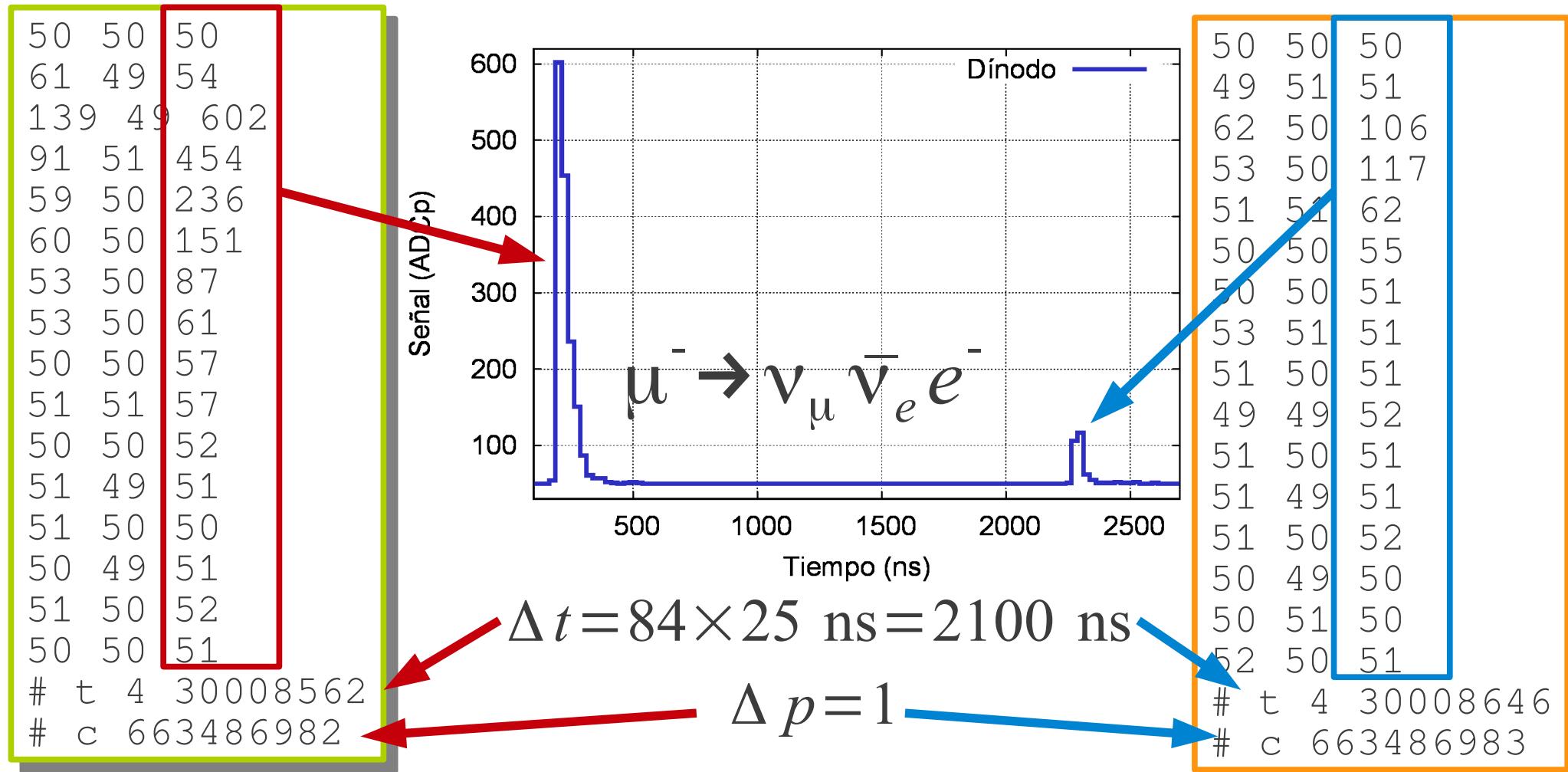
# Alcances

- Comienza en un remanente de supernova

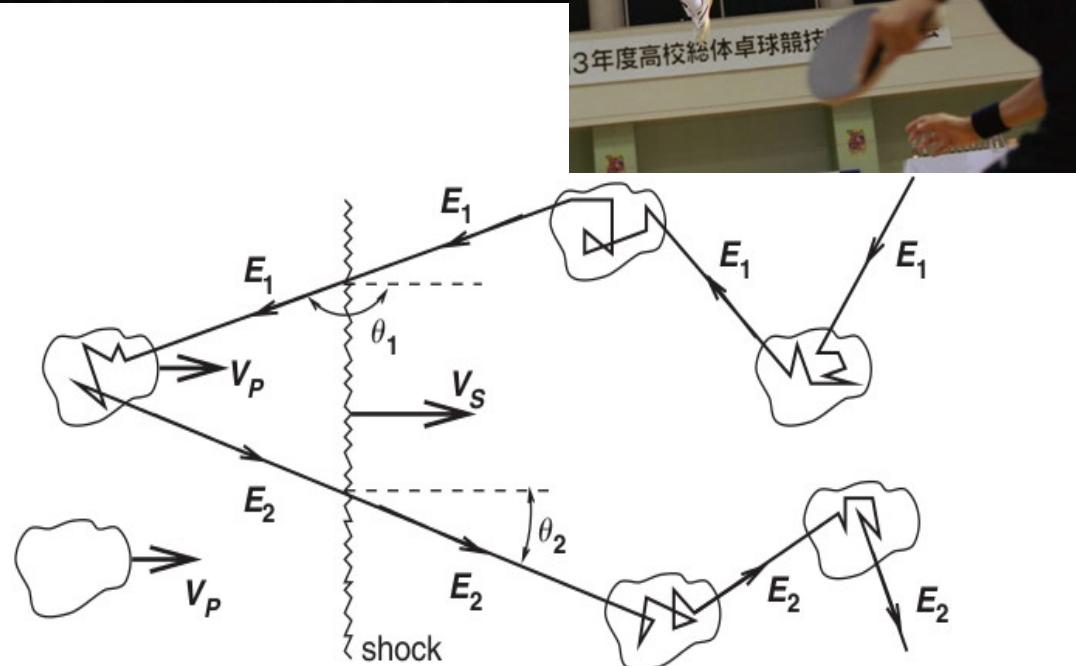
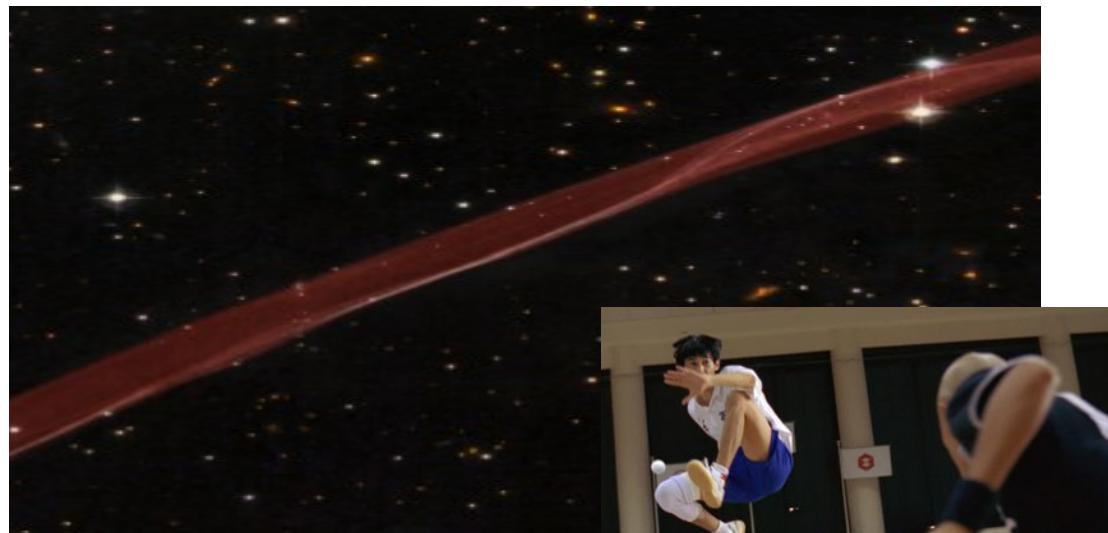


# Alcances

- Comienza en un remanente de supernova
- finaliza en el análisis de un archivo de datos



# Once upon a time in a place far, far away...

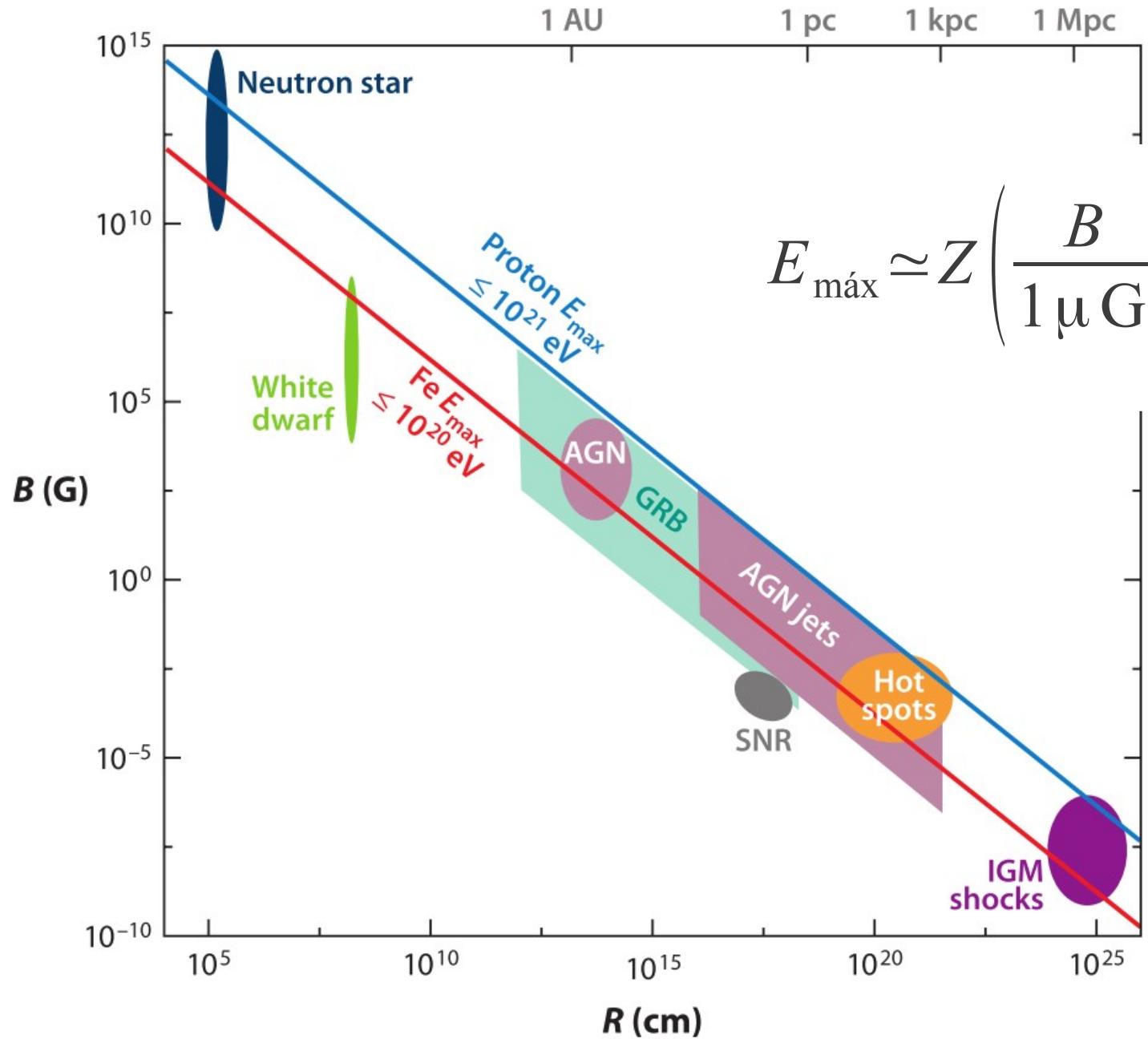


- Partículas cargadas
  - $B \rightarrow$  confinación
  - $E \rightarrow$  aceleración
- Si la longitud de coherencia es mayor que el radio de Larmor, la partícula va y vuelve por el frente
- Cada vez que pasa, gana energía

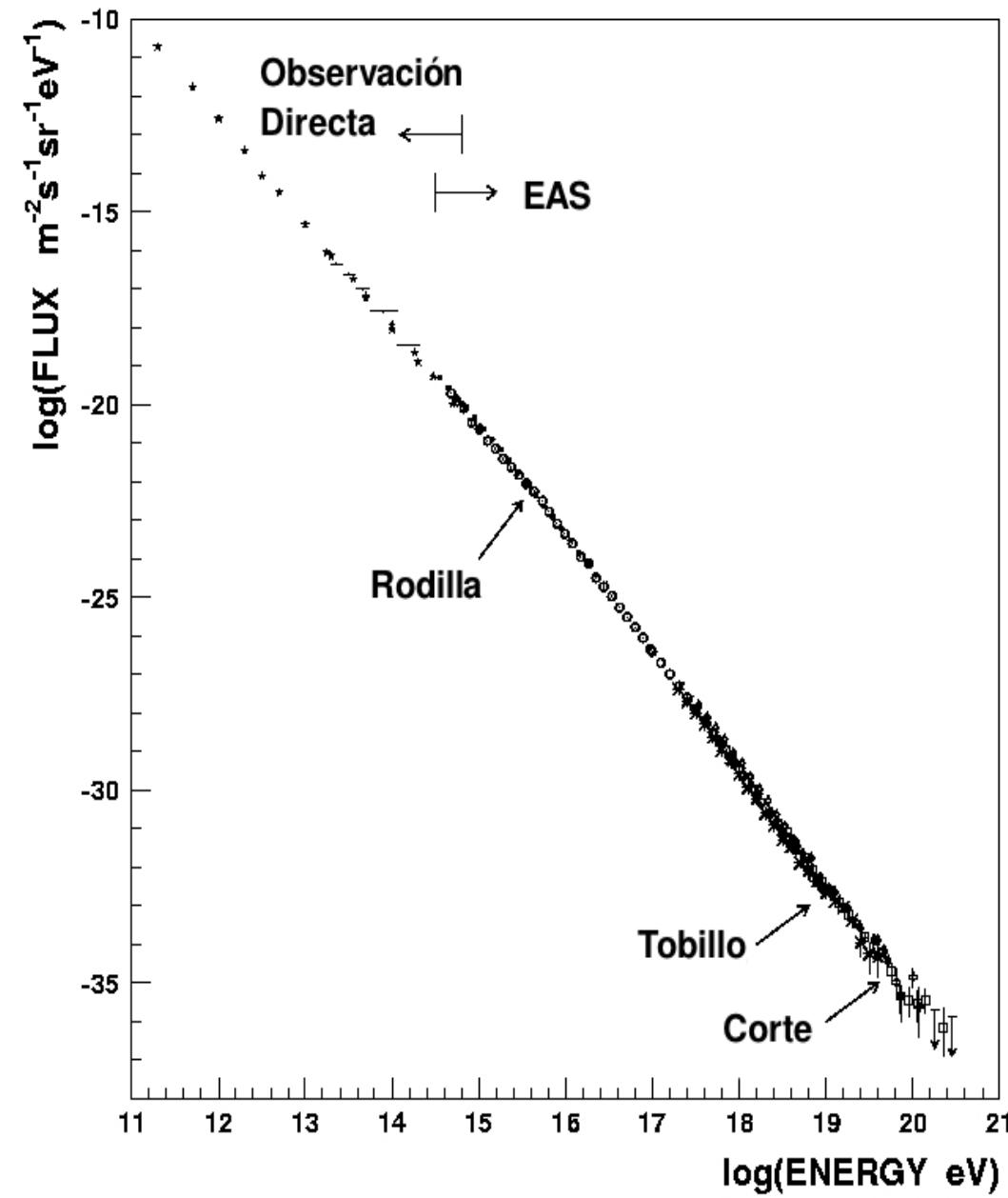
$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \propto \left( \frac{v_s}{c} \right)$$

a media del muón

# Hillas Plot



# Espectro



- Espectro de energía:

$$j(E) = \frac{d^4 N}{dt dA d\Omega dE}$$

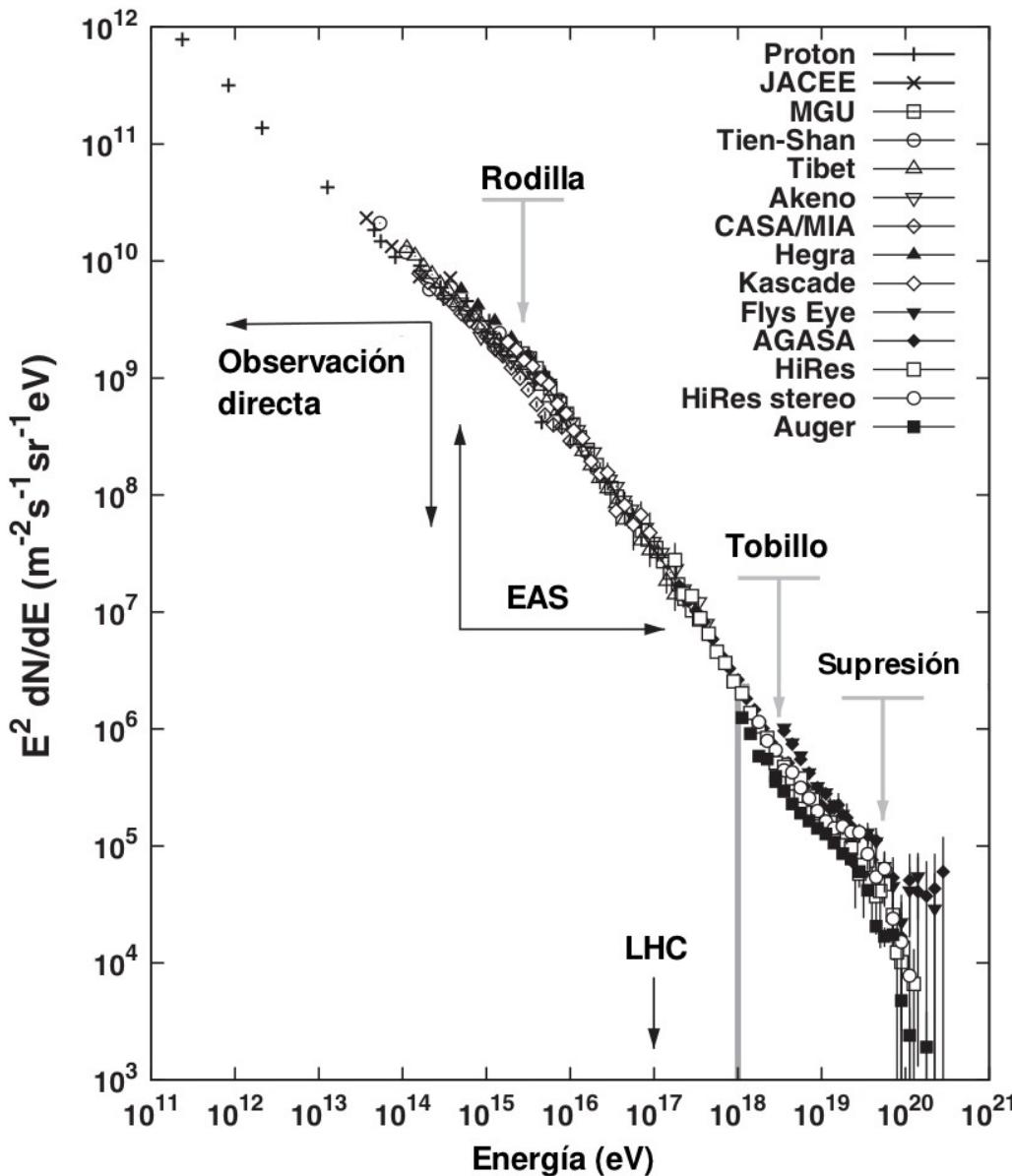
- Unidades

$$[j(E)] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s} \text{sr} \text{eV}}$$

- En general:

$$j(E) = j_0 E^\alpha, \alpha \approx -3$$

# Espectro x $E^2$

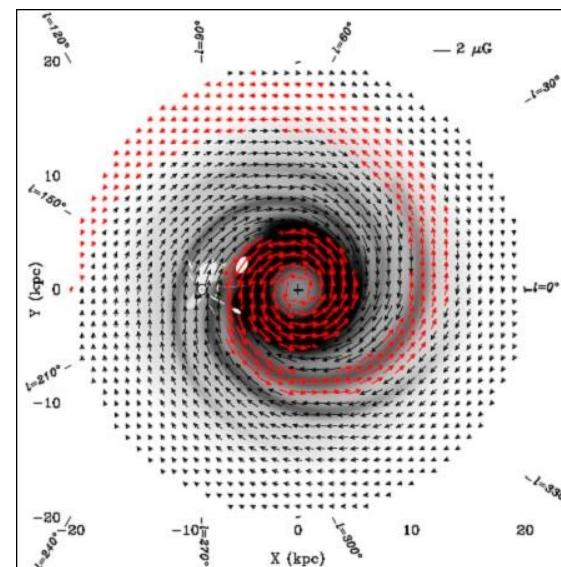
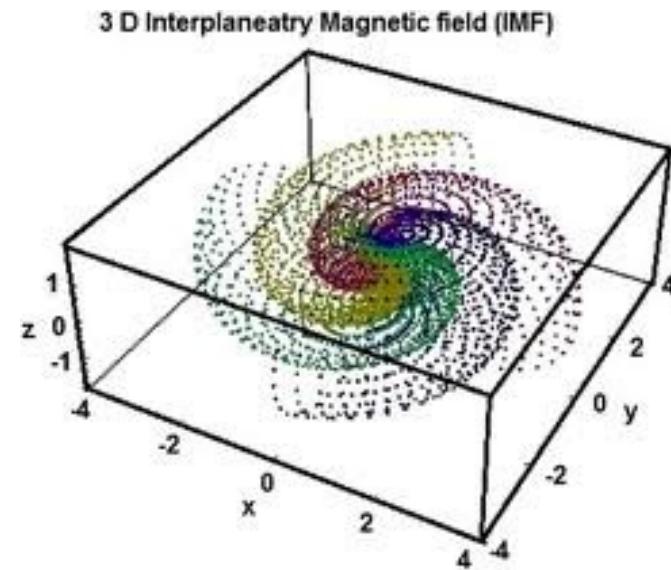


- Cambios en la pendiente espectral:
  - Viento Solar  $\rightarrow 10^9$  eV
  - Modul. Solar  $\rightarrow 10^{12}$  eV
  - 1<sup>ra</sup> rodilla  $\rightarrow 10^{15.5}$  eV
  - 2<sup>da</sup> rodilla  $\rightarrow \sim 10^{17}$  eV
  - Tobillo  $\rightarrow 10^{18.61}$  eV
  - Supresión  $\rightarrow \sim 10^{19.46}$  eV

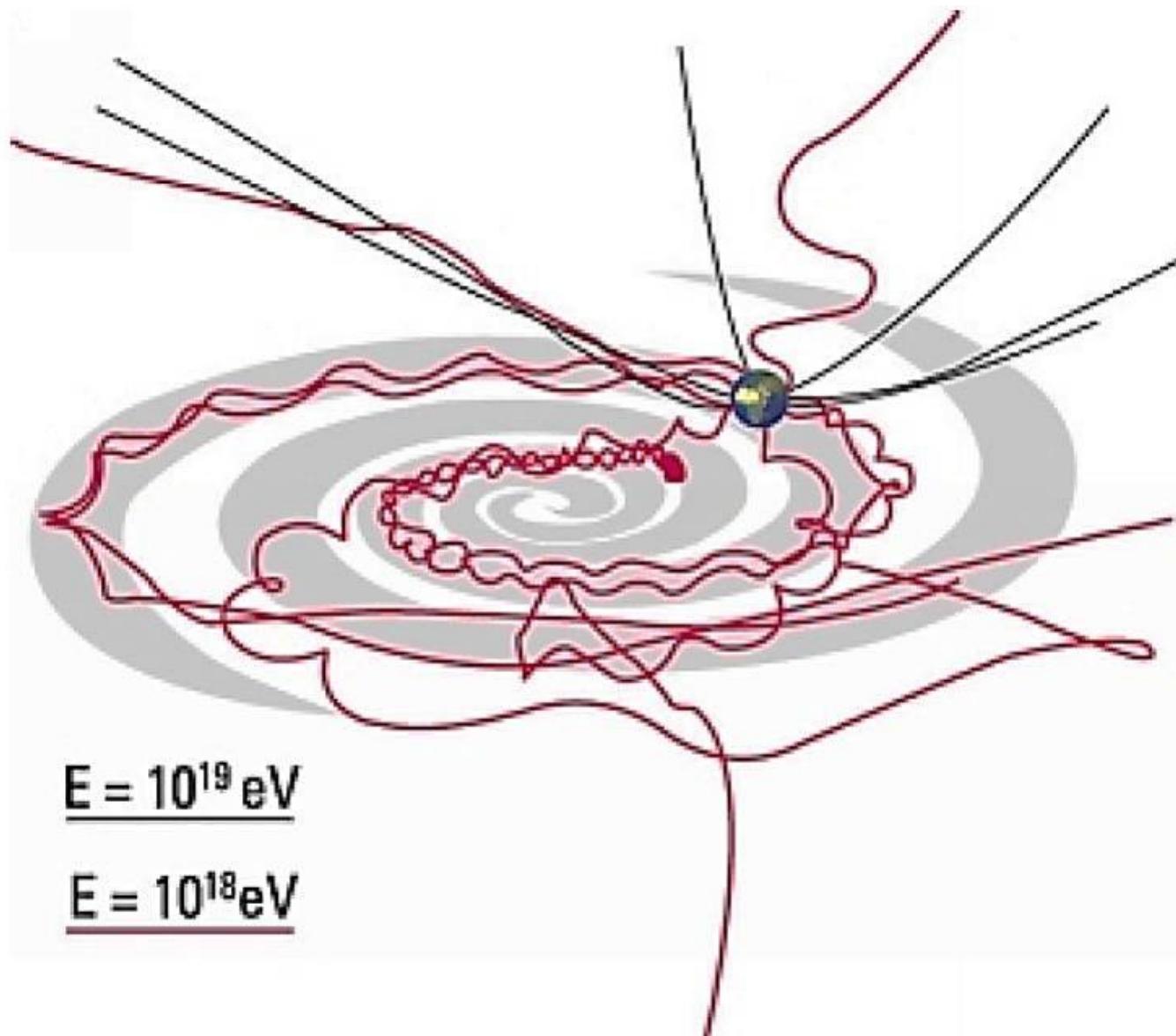
Transición entre distintos fenómenos físicos

# Propagación: Campos Magnéticos

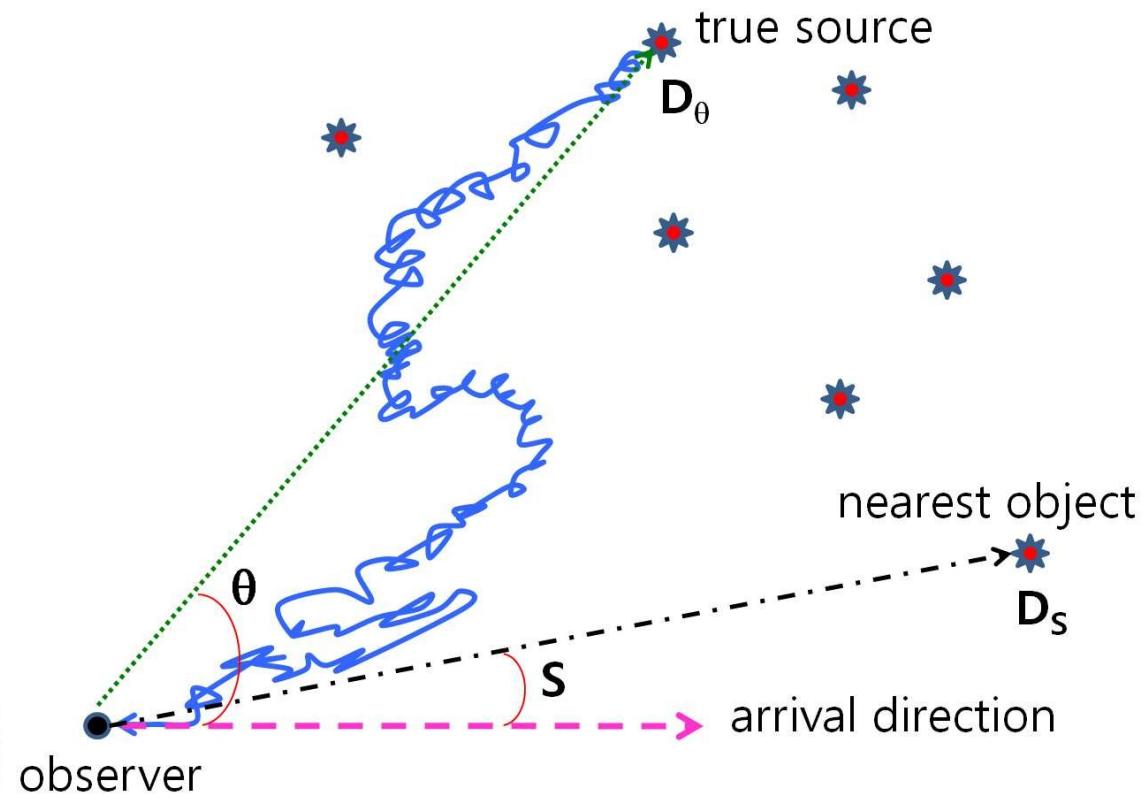
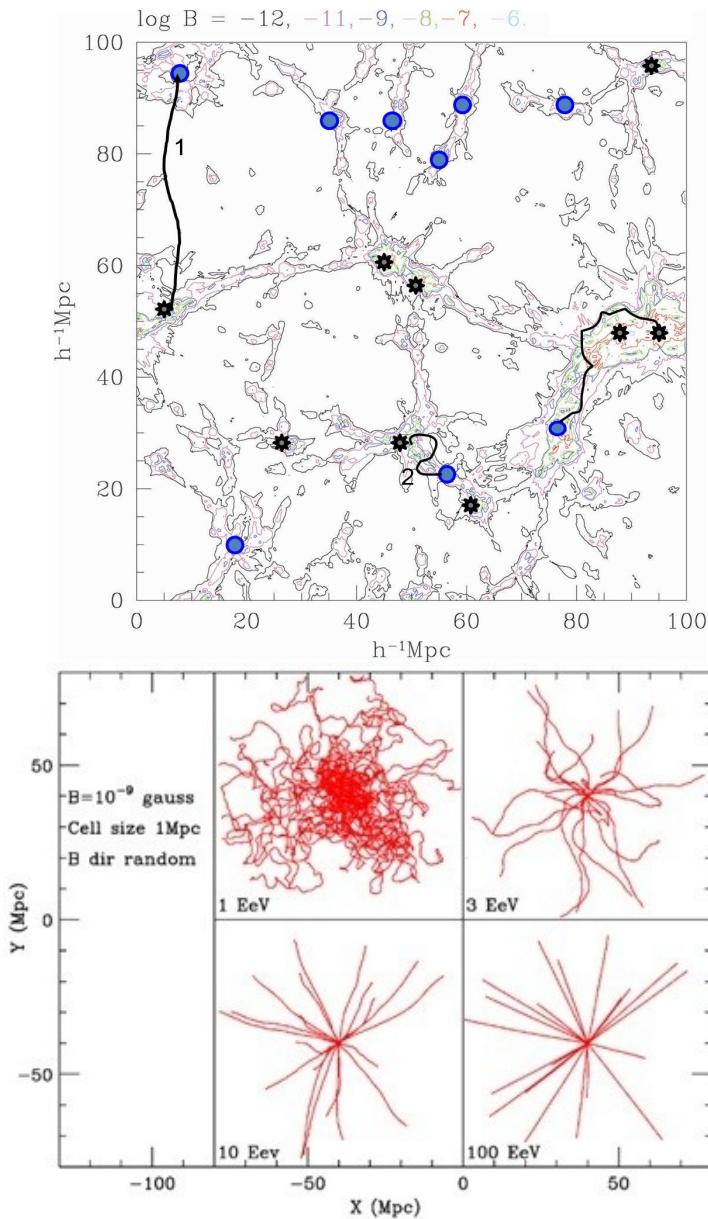
- Los campos magnéticos  $B$  deflectan su trayectoria.
- $B$ : intensidad o recorrido
- En general, se propone:
  - Campo Uniforme  $|B| \sim 2\mu G$ , siguiendo la los brazos espirales
  - Campo Turbulento: fluctuaciones sobre el campo uniforme



# Deflexiones galácticas



# Y además campos intergalácticos



**Las partículas no “apuntan” a la fuente**  
Debido a las deflexiones magnéticas

$$\text{Si } E > 20 \text{ EeV}, \Delta\theta \simeq \frac{100 \text{ EeV}}{E_p} \times 1^\circ$$

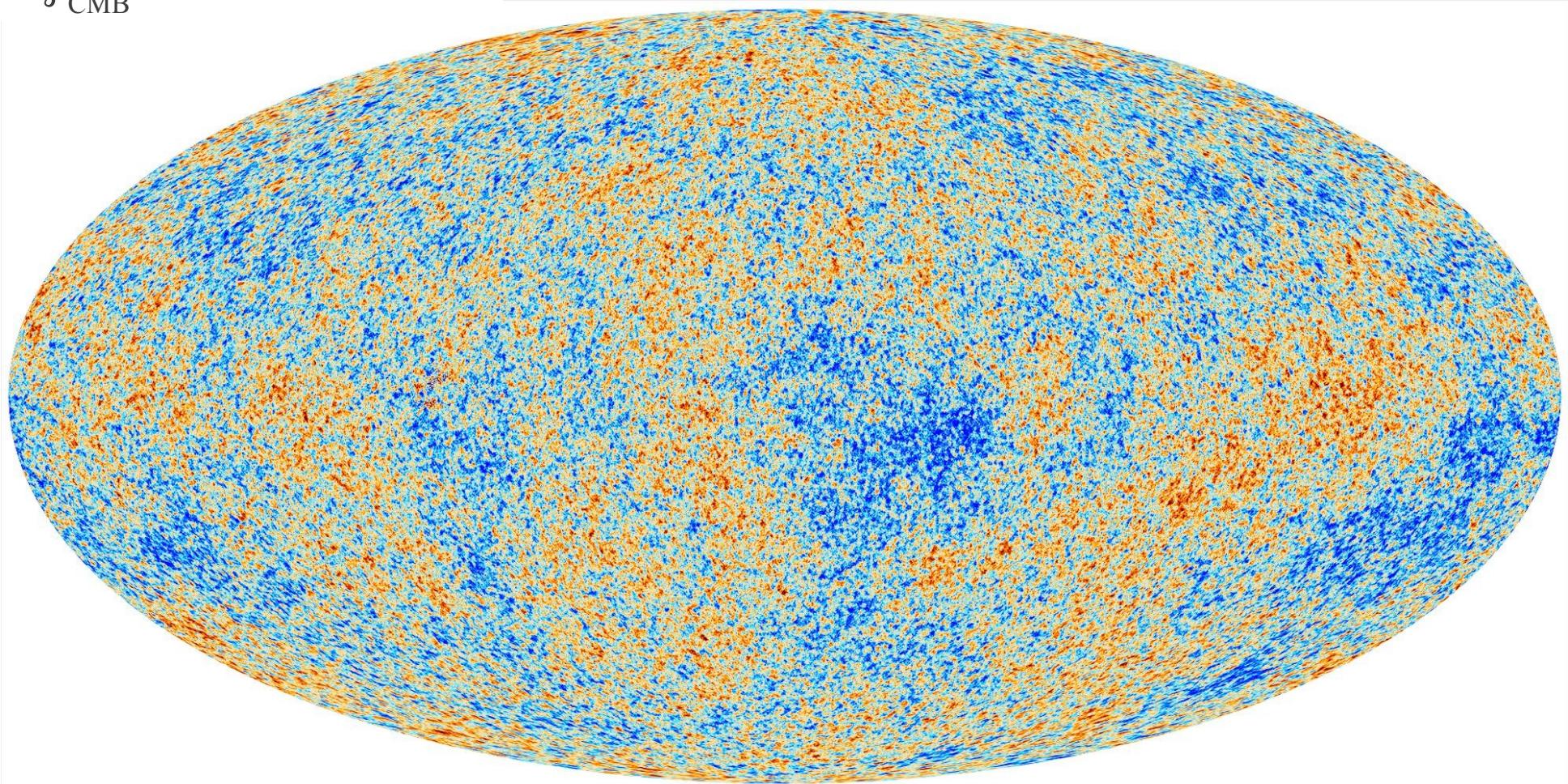
# Fondo de radiación cósmica (CMB)

$$n_{\gamma_{\text{CMB}}} = 411 \text{ cm}^{-3}$$

$$\langle E_{\gamma_{\text{CMB}}} \rangle \approx 0.6 \text{ meV}$$

¿Es el Universo transparente?

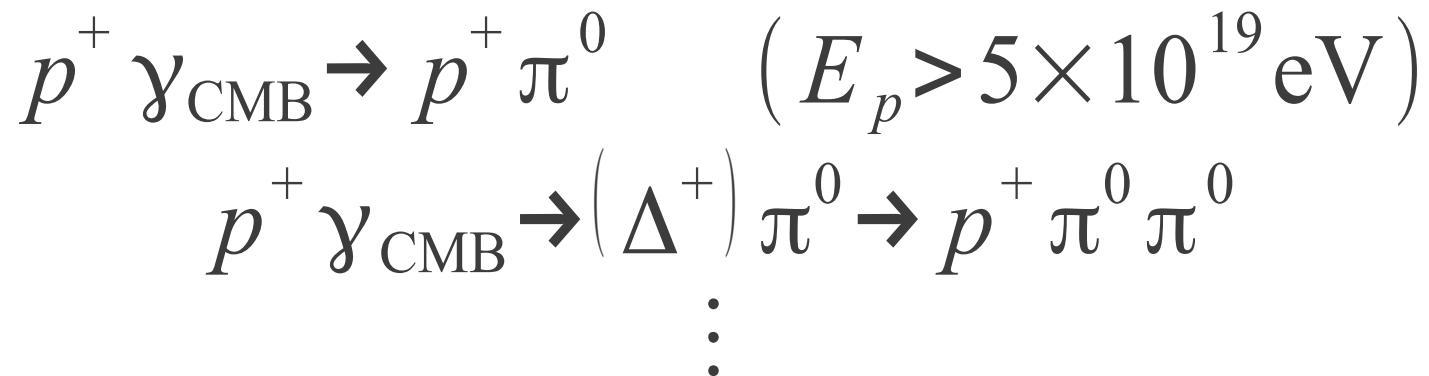
Depende de la energía a la cual miremos



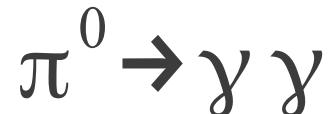
# Propagación: efecto GZK

## (Greisen-Zatsepin-Kuz'min)

- Fotoproducción de piones por interacción con el CMB



- El truco: **el protón resultante es indistinguible del original**, sólo que con energía menor
- Eventualmente, esos piones neutros decaen en fotones (los llamados fotones GZK):



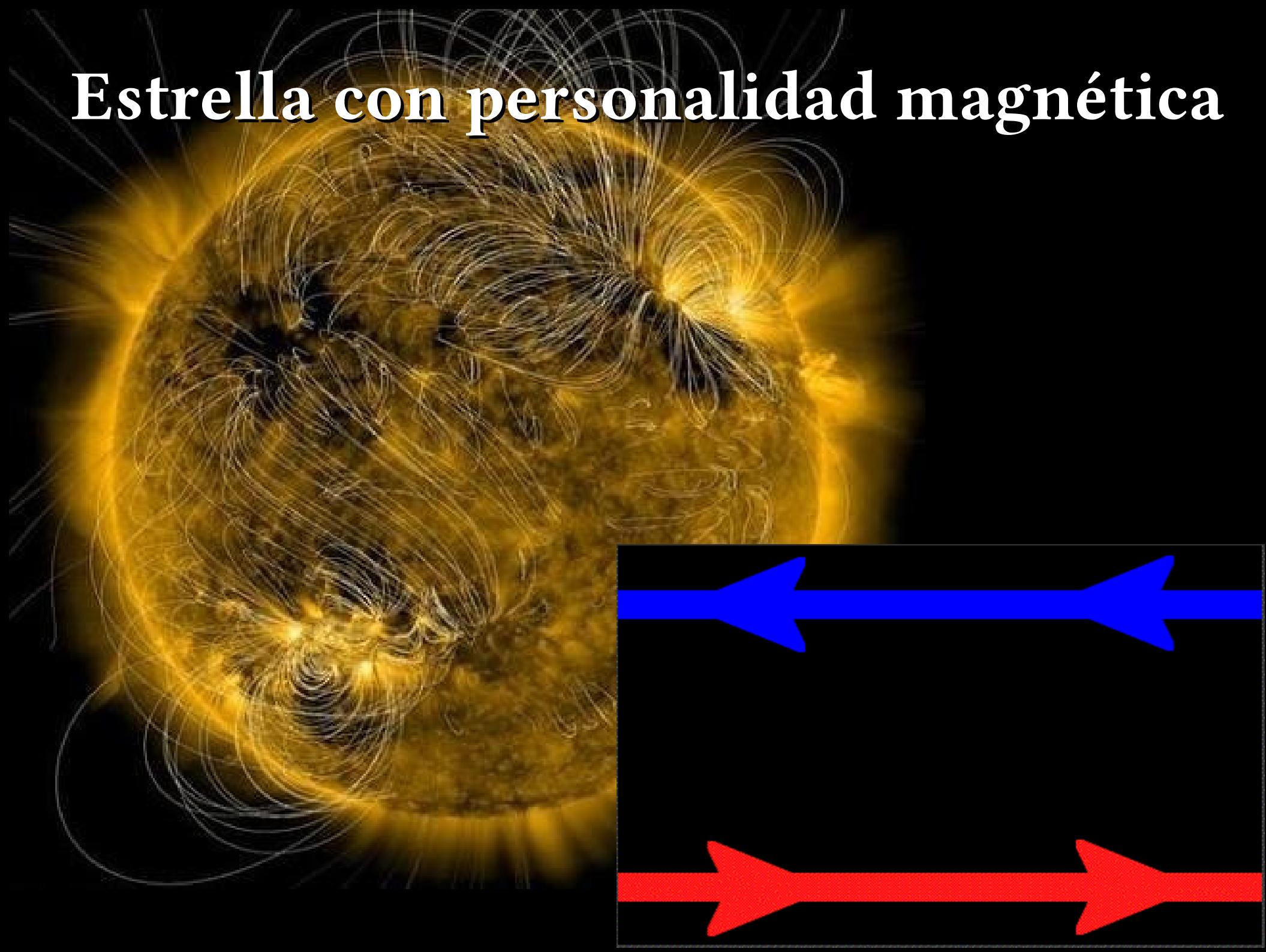
# Transporte heliosférico

A photograph showing a silhouette of a person standing on a grassy hill, looking towards a massive, bright, circular light source in the sky. The light source has a bright center and a glowing, curved outer edge, resembling a planet or a ring system. The background is a dark, orange-tinted sky.

# Una estrella en nuestro interior



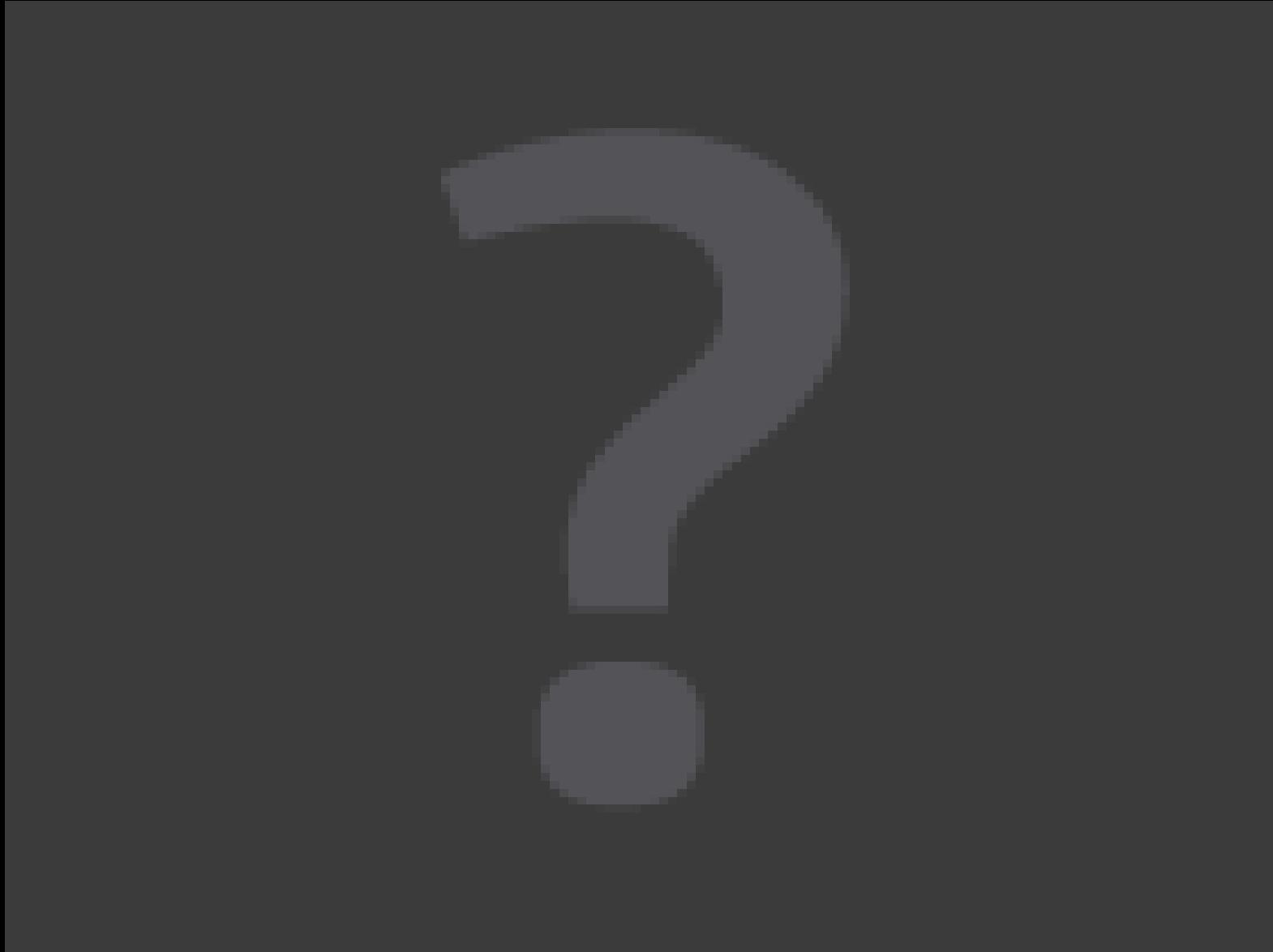
# Estrella con personalidad magnética



# Ejecciones de masa coronal (CME)



# en el espacio interplanetario (iCME)

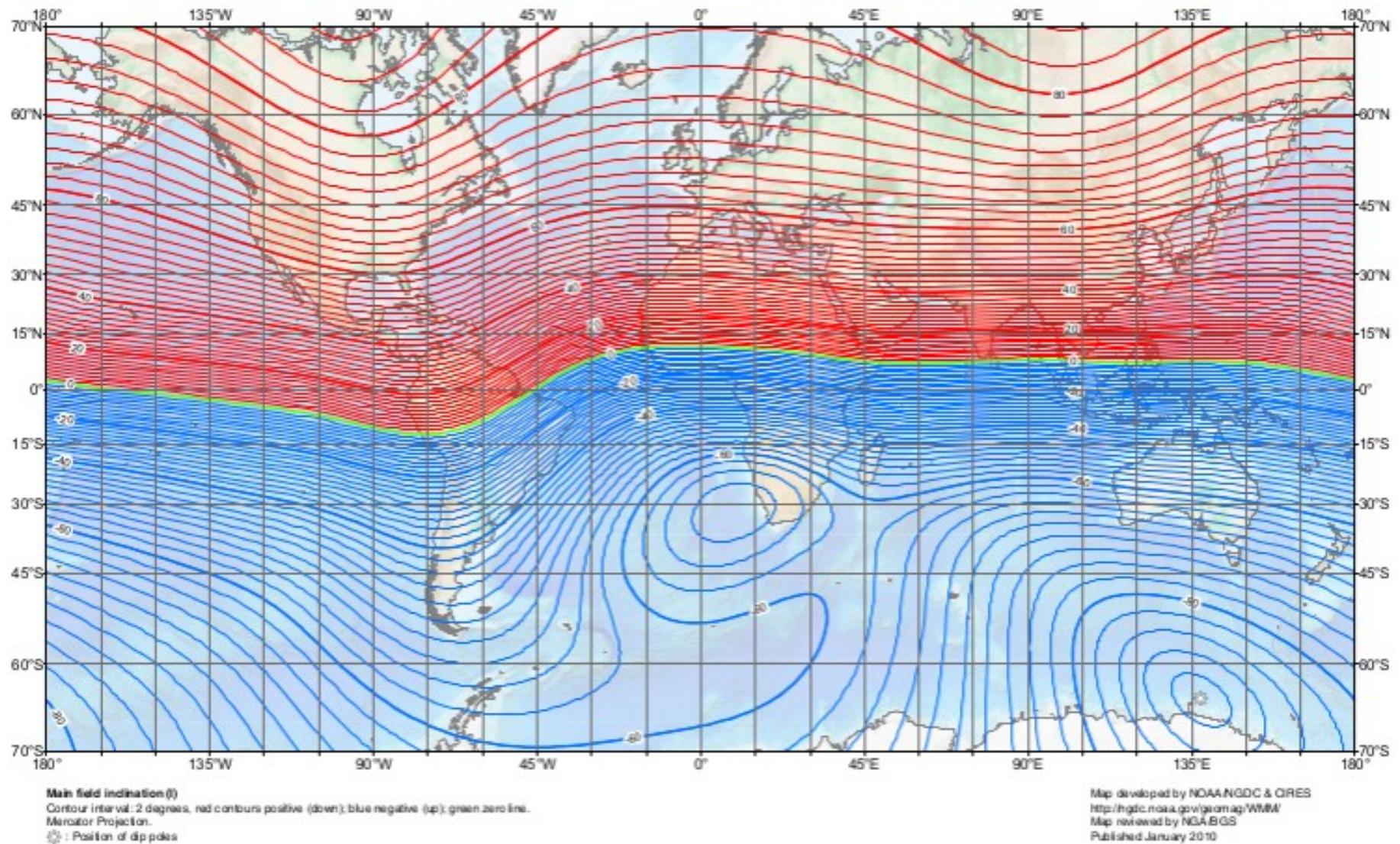


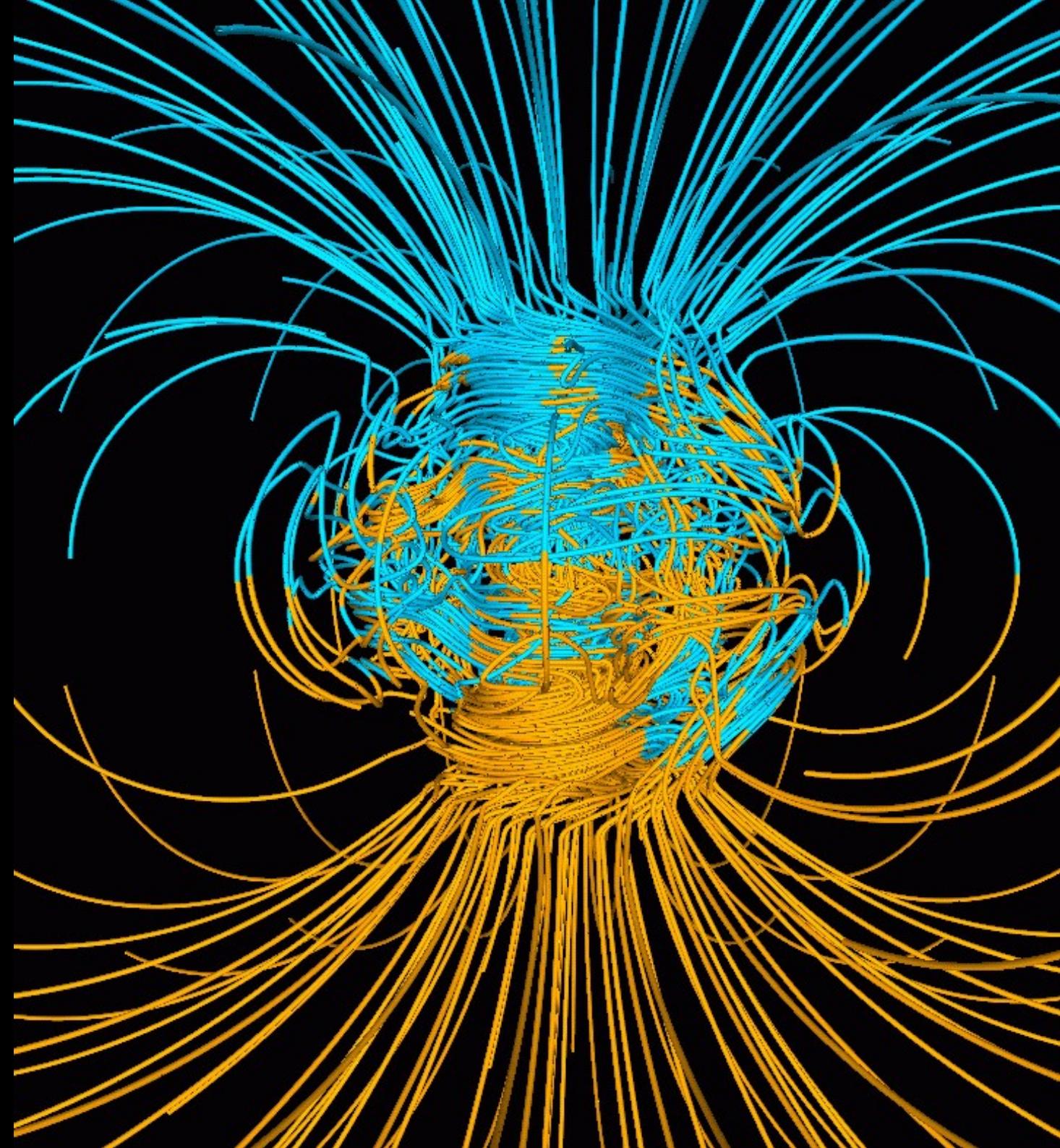
La Tierra



# Campo geomagnético: el “dipolo”

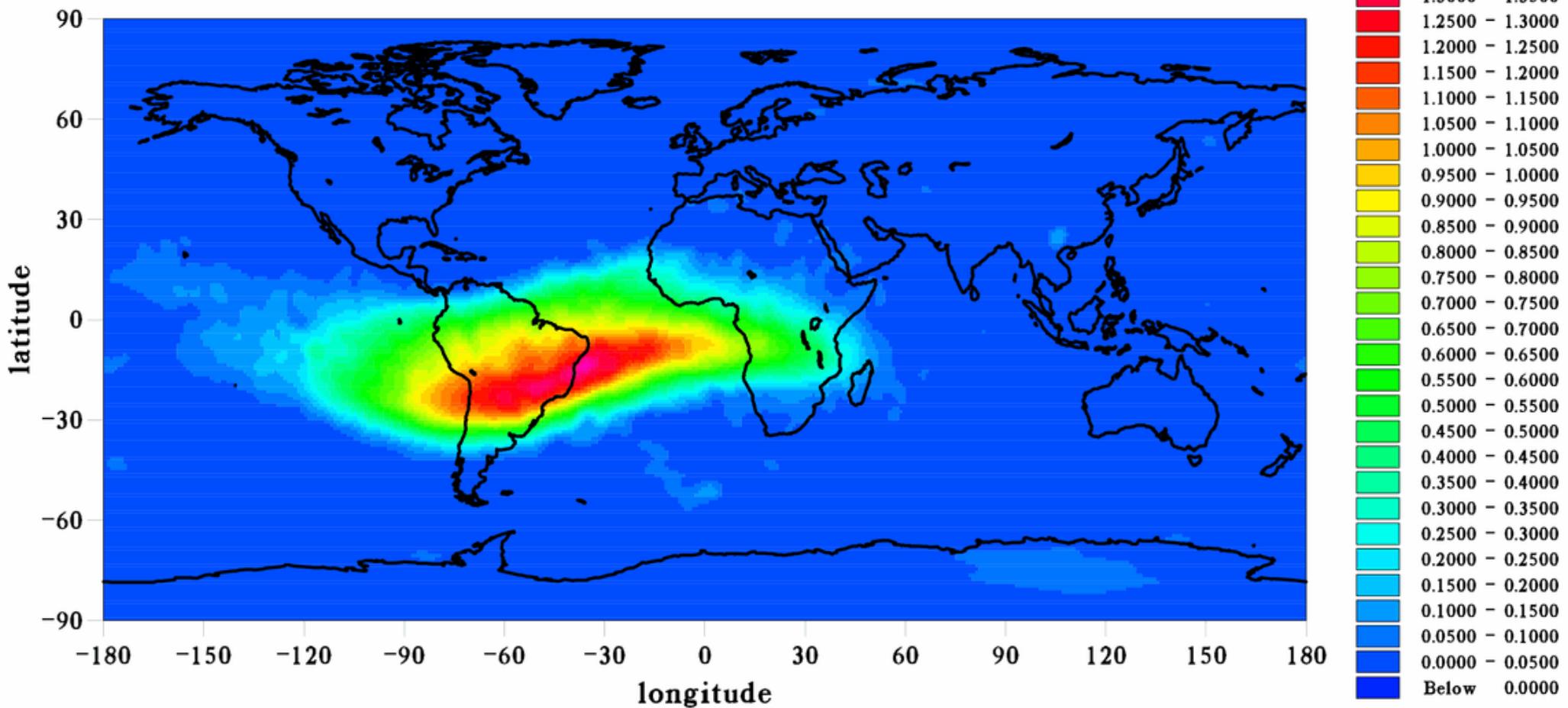
US/UK World Magnetic Model -- Epoch 2010.0  
Main Field Inclination (I)





# Anomalía del Atlántico Sur

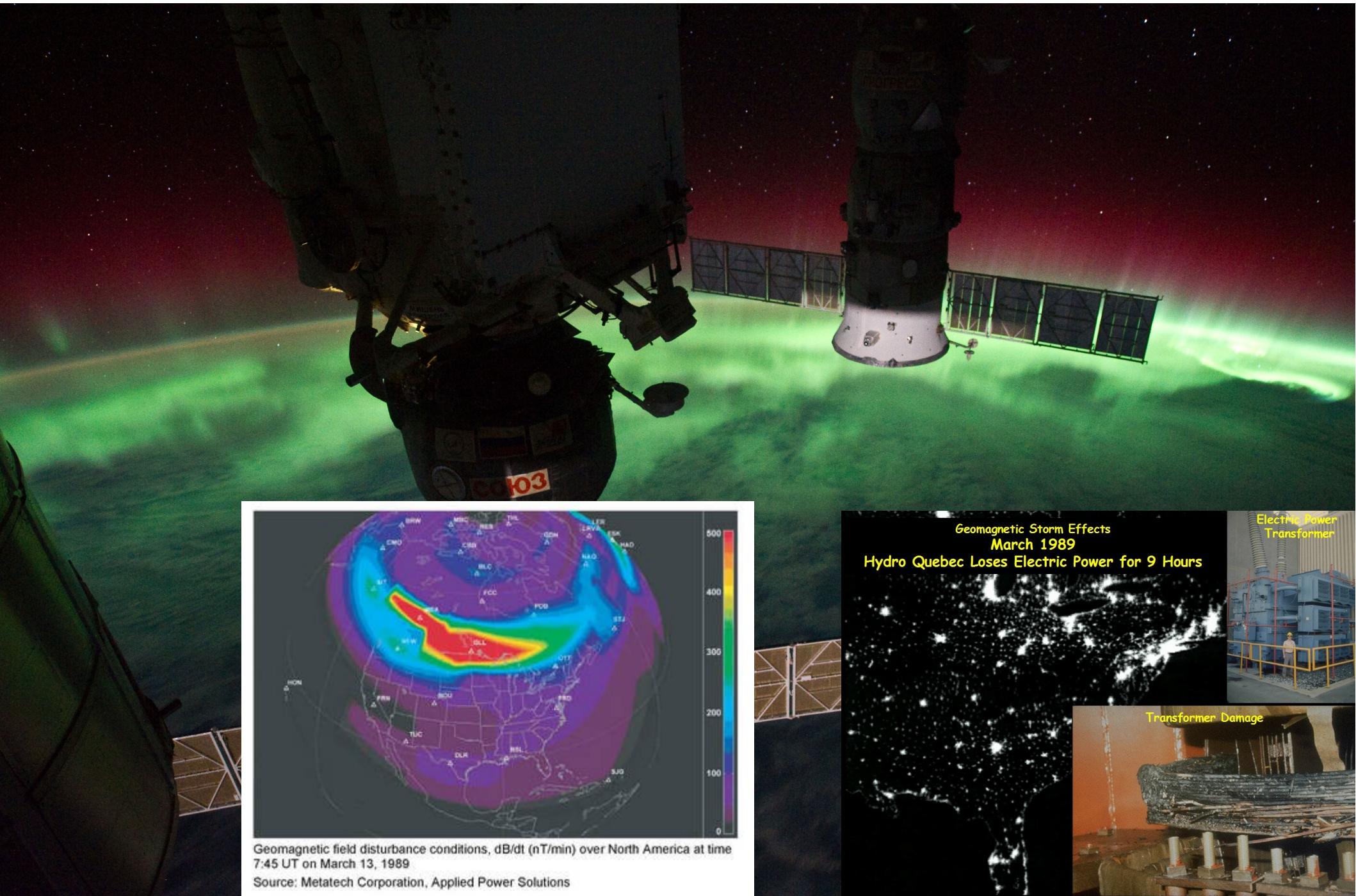
(rms : 0.2560 / moy : 0.1117 / min : 0.0010 / max : 1.4814)



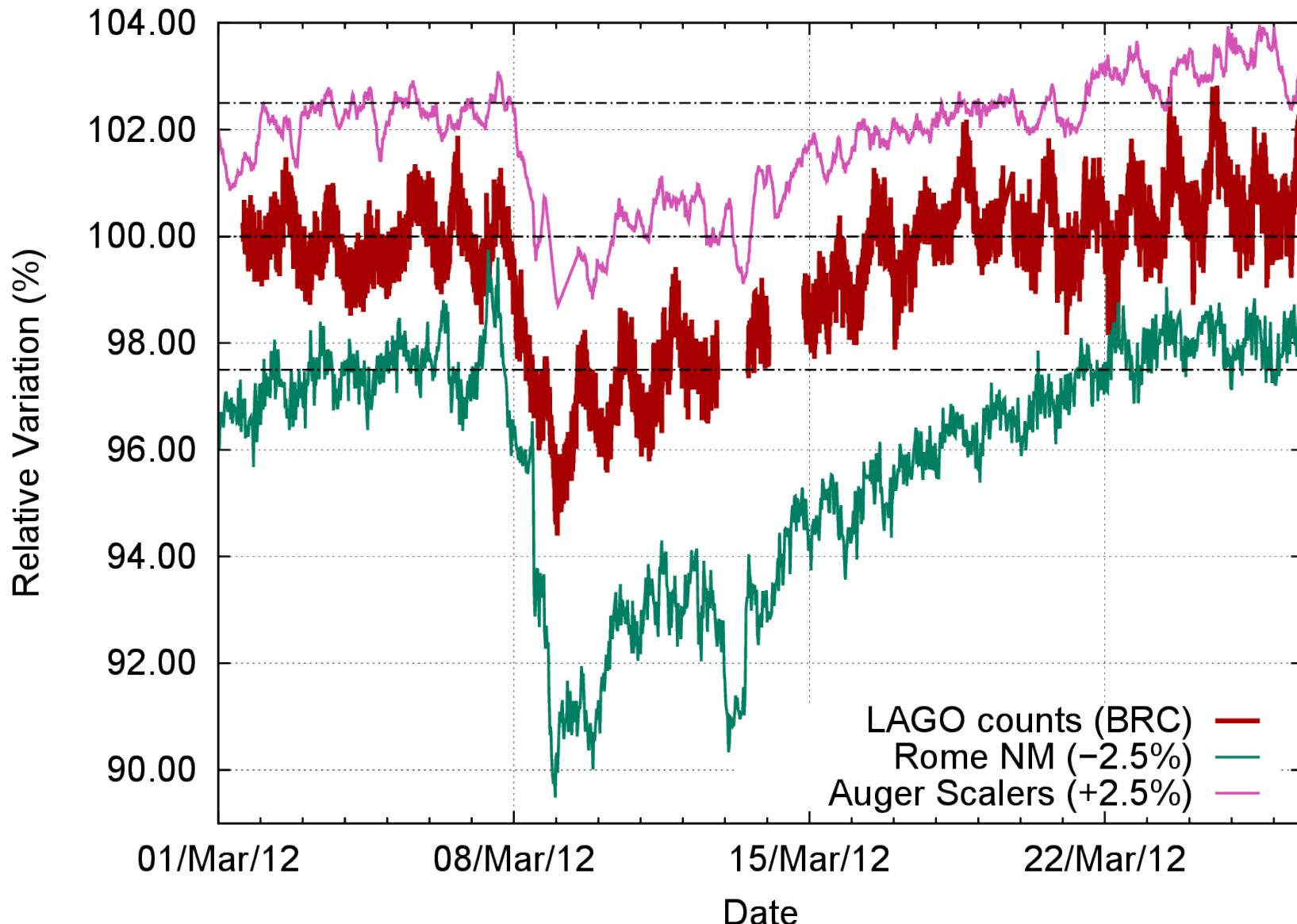
# Interacción Solar



# Clima Espacial



# El proyecto LAGO Solar



H. Asorey for the LAGO Collaboration, en Proc. ICRC2013, in press

# Interacción con la atmósfera



# Blindaje atmosférico

JON HOPKINS  
BREATHE THIS AIR  
FEATURING PURITY RING



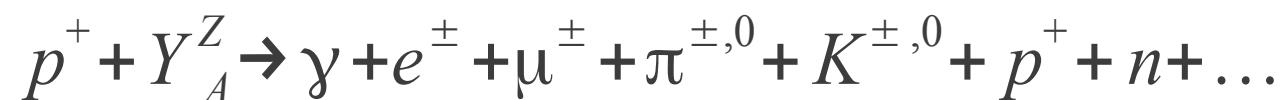
$$1 \text{ atm} = 1033 \text{ g/cm}^2 \sim 91 \text{ cm Pb}$$

**Profundidad atmosférica X:**  
Cantidad de masa atravesada en la dirección transversal para una partícula entrando a la atm.

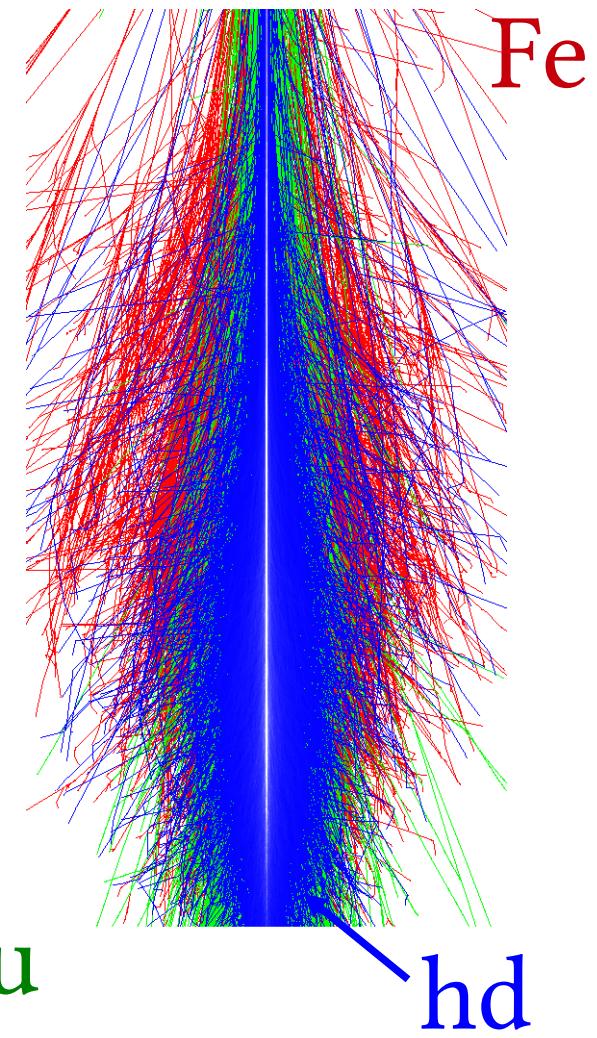
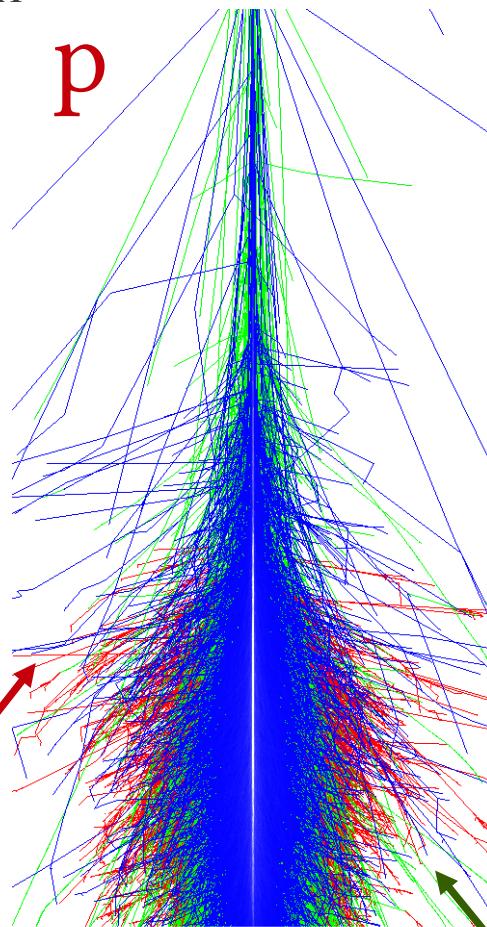
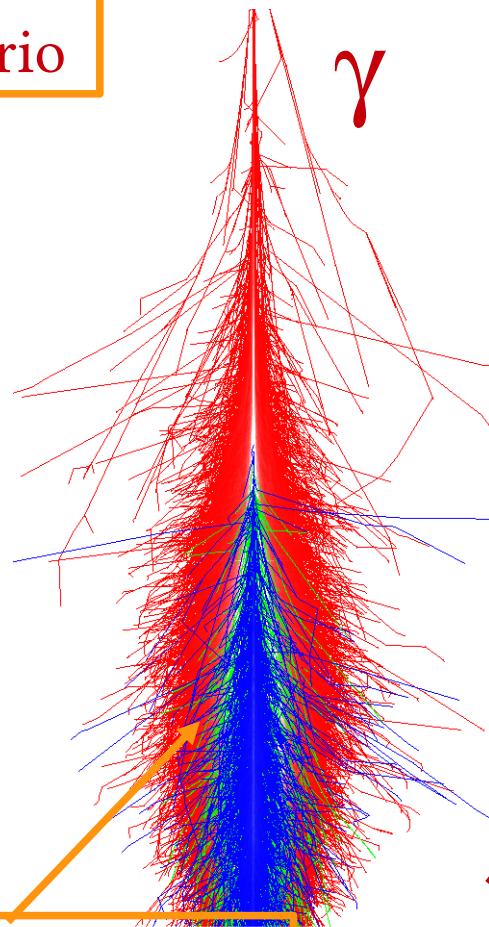
$$X(l) = \int_l^\infty \rho(l') dl'$$

# Lluvias Atmosféricas Extendidas

$E=5 \times 10^{14}$  eV



Primario



Secundarios

em

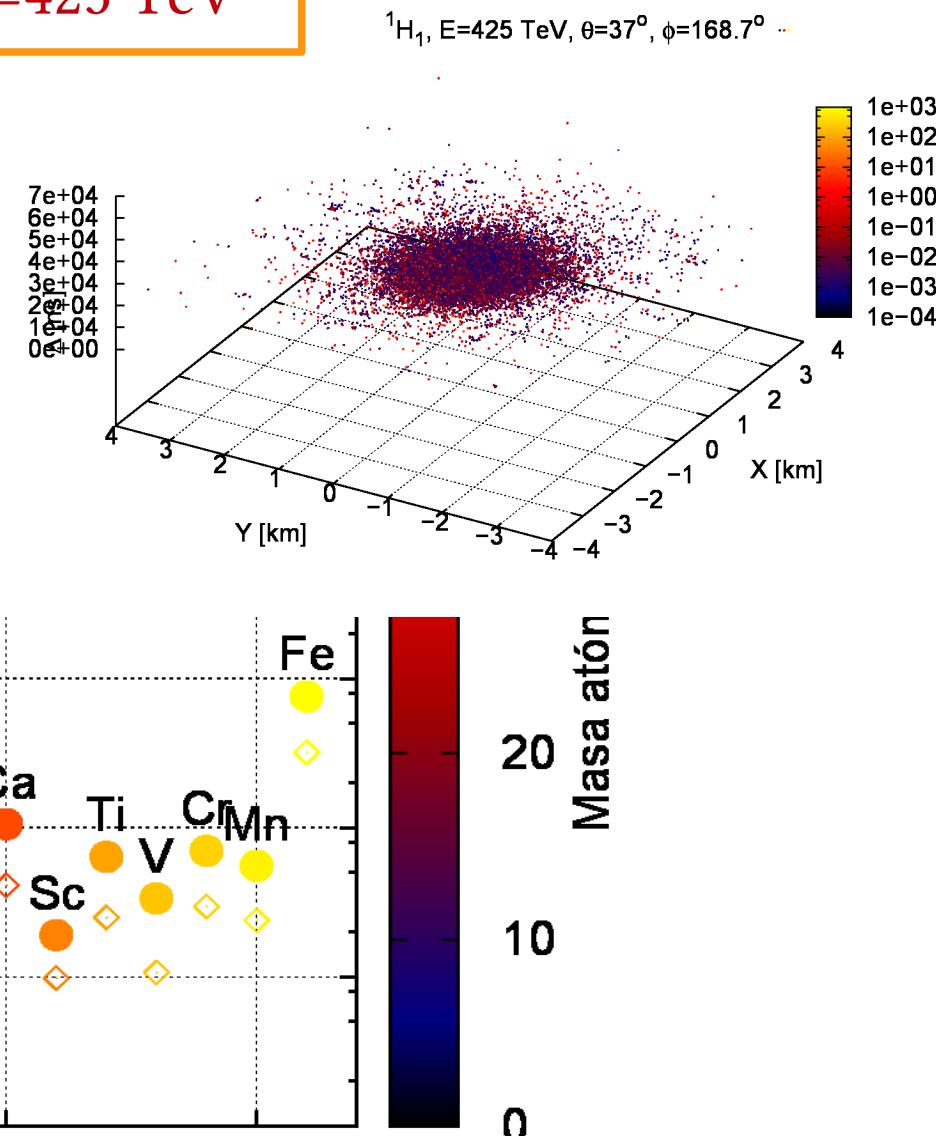
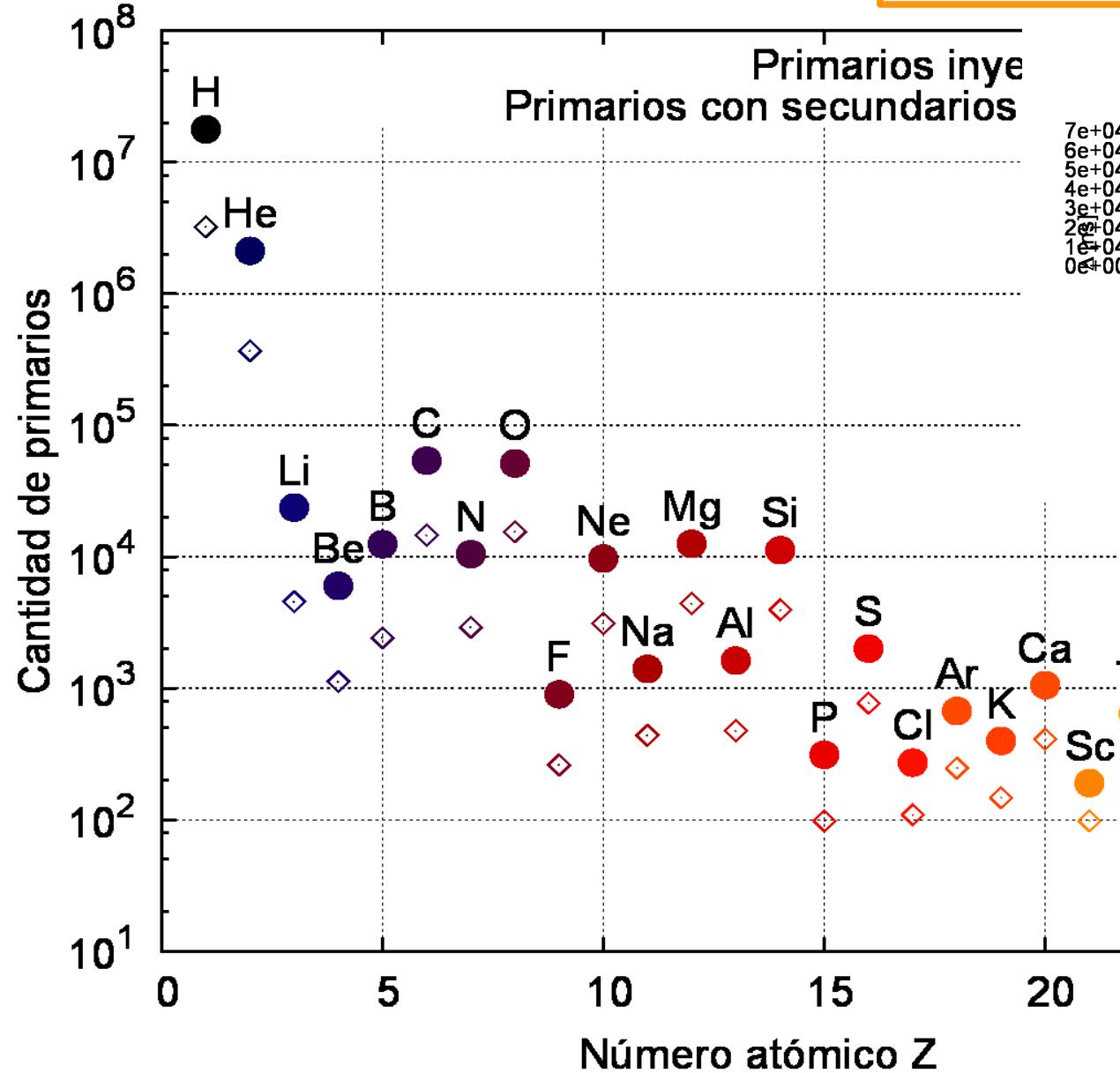
mu

hd

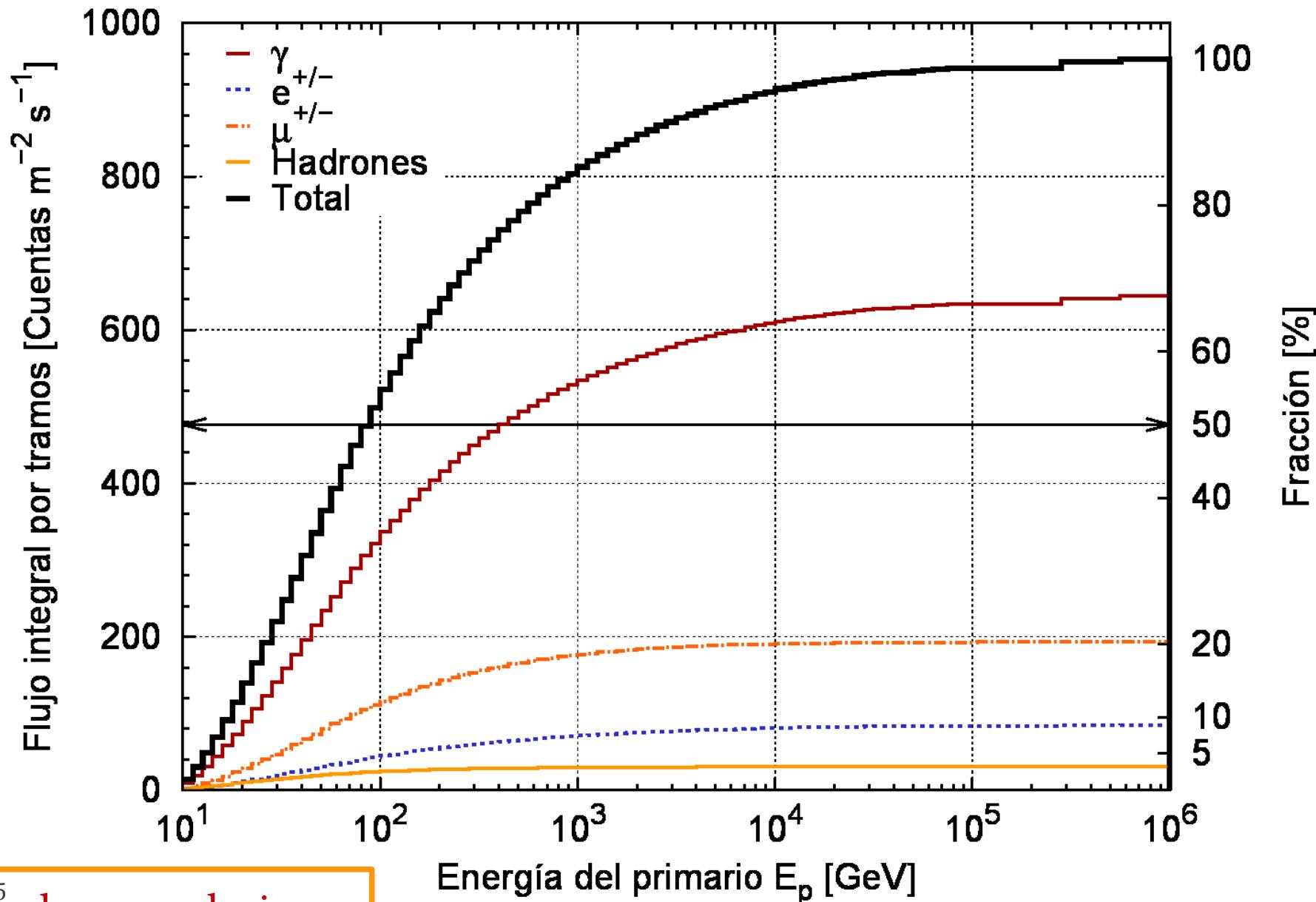
Desarrollo dependiente de la composición del primario

# Primarios y secundarios

${}^1\text{H}_1$ , E=425 TeV



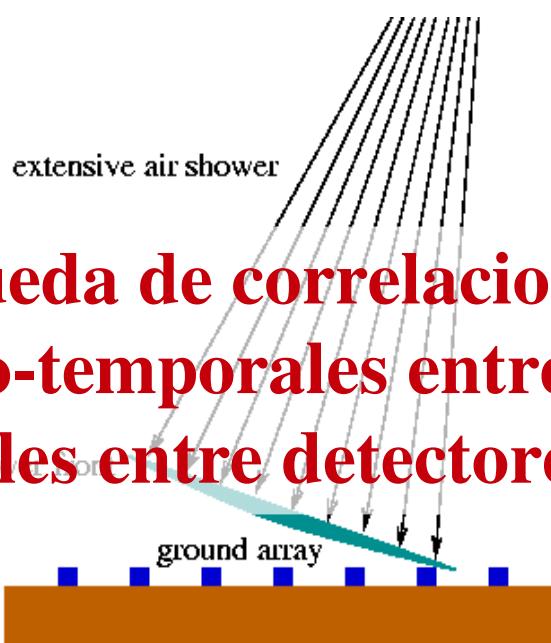
# Primarios y secundarios



# Detectores



# Técnicas de detección en Superficie



**Búsqueda de correlaciones  
espacio-temporales entre las  
señales entre detectores**

Modo “Lluvia”

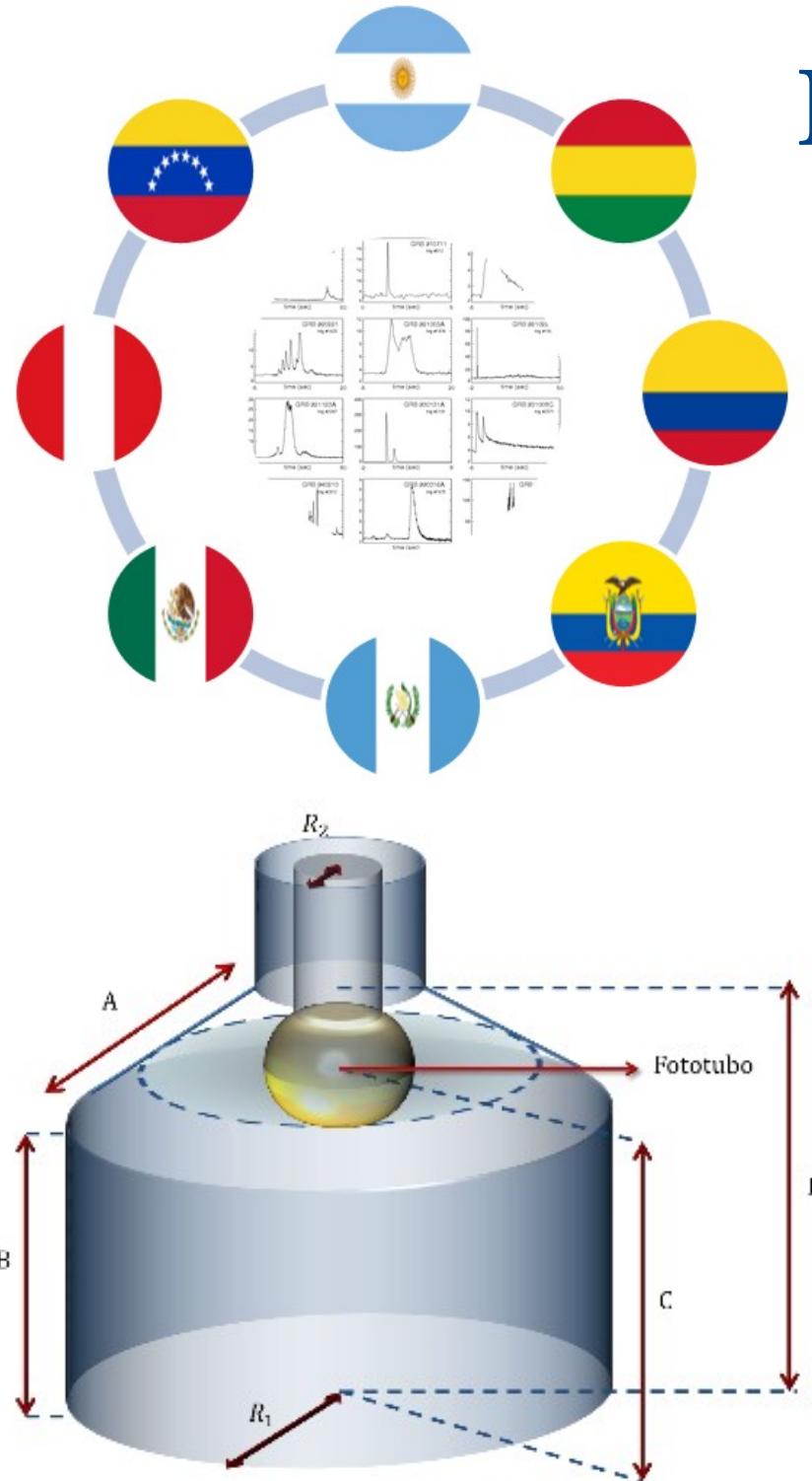


**Cálculo del flujo de  
secundarios y estudio de las  
variaciones intrínsecas**

Modo “Conteo”

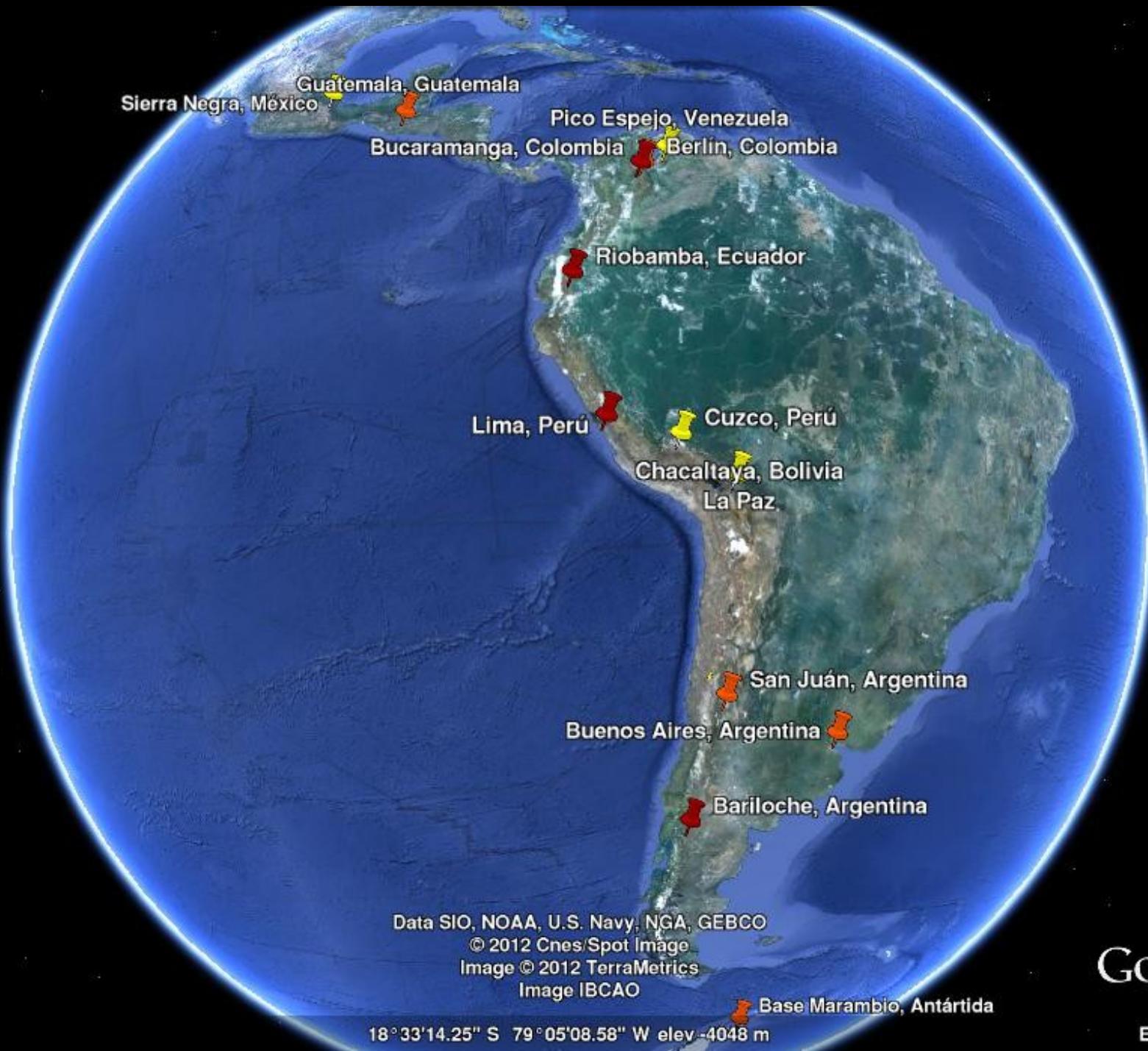
- Detectores de partículas (WCD y/o centelladores)
- Detección de señales por encima de umbrales
- Intensivo análisis de datos

# LAGO



- 8 países
- 80 científicos y estudiantes
- Detección en tierra componente de alta energía de GRBs
- Flujo de secundarios como marcador de la Actividad Solar
- Tanques comerciales de 2 a 10 m<sup>3</sup> de capacidad
- Recubrimiento interior
- Fototubos para detectar la radiación Cherenkov

# Los sitios LAGO



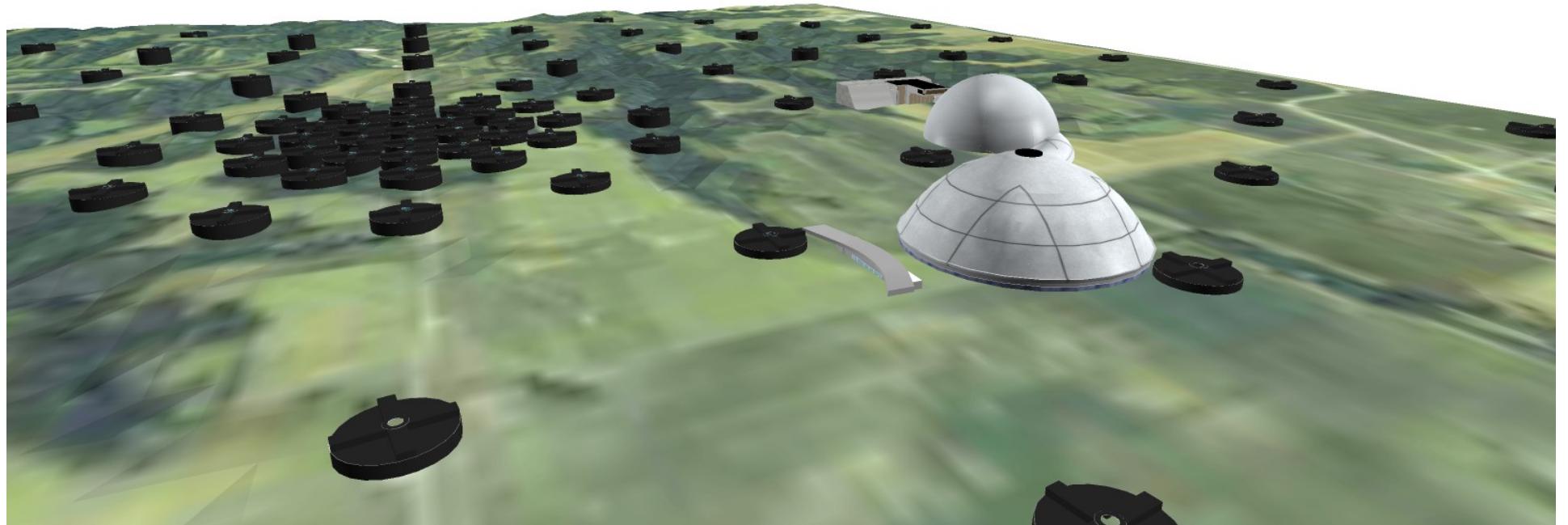
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
© 2012 Cnes/Spot Image  
Image © 2012 TerraMetrics  
Image IBCAO

18° 33'14.25" S 79° 05'08.58" W elev -4048 m

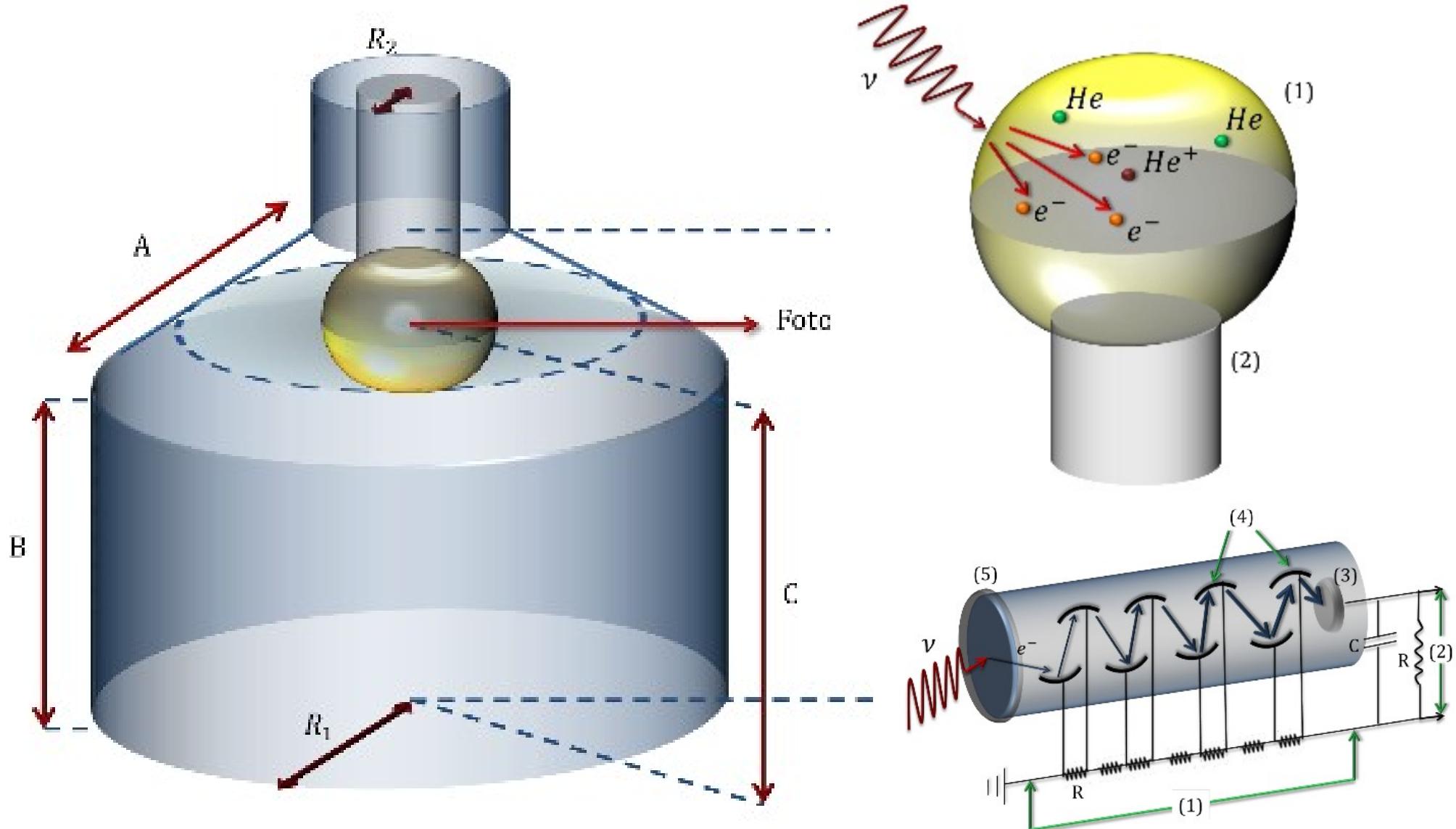
Google earth

Eye alt 10069.43 km

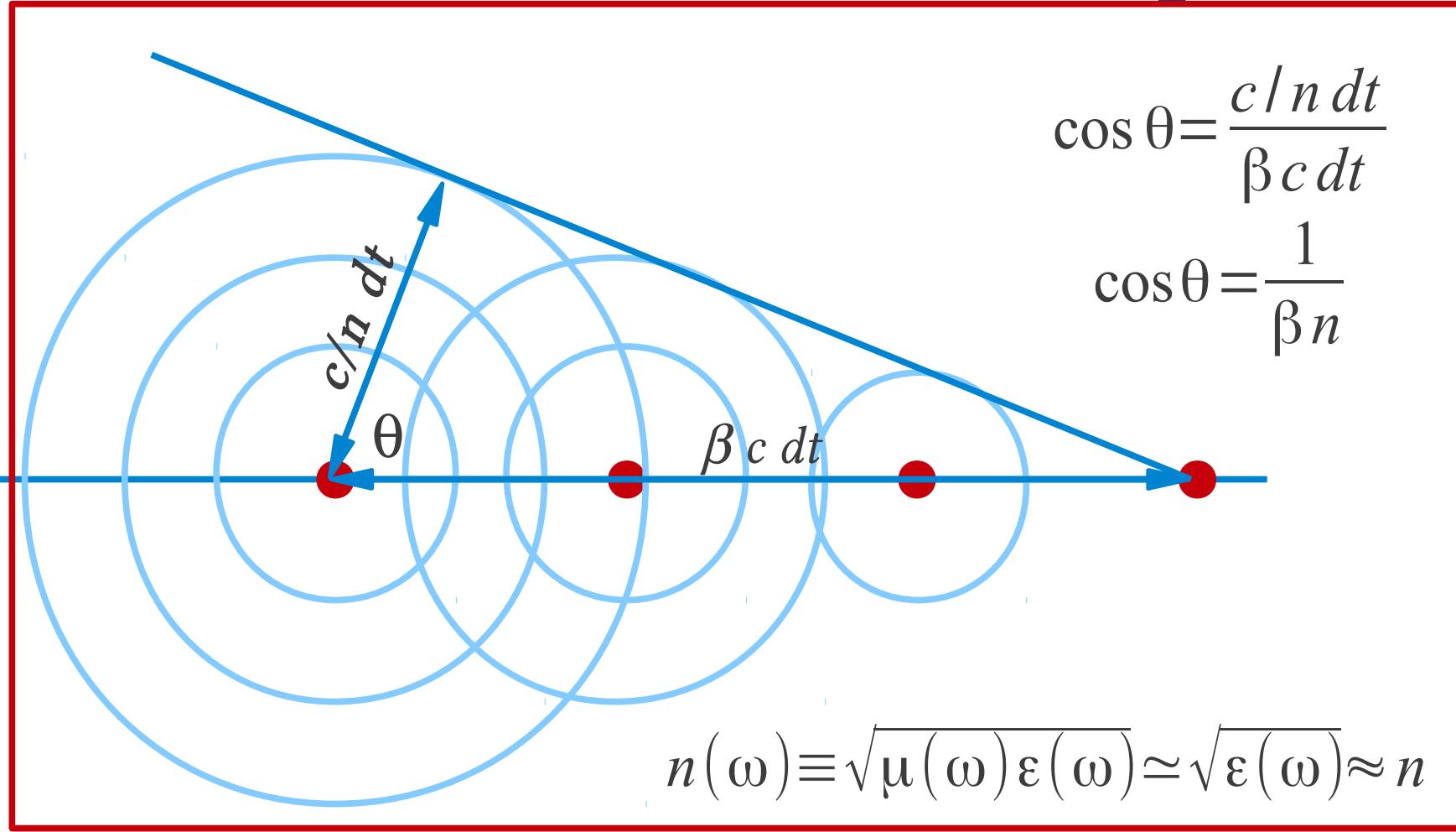
# Un Observatorio de Rayos Cósmicos en el Oriente Colombiano



# Detectores Cherenkov en Agua (WCD)



# Efecto Cherenkov simplificado

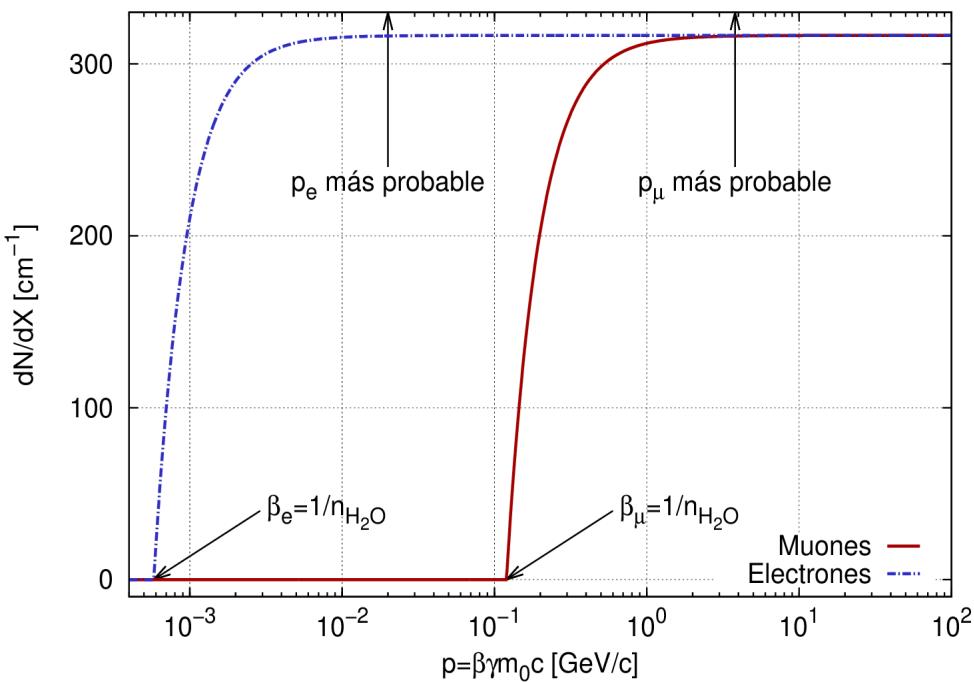


- Medio material con índice de refracción  $n = \text{cte}$
- Partícula cargada con velocidad  $\beta c > (c/n)$

# Barrera del sonido



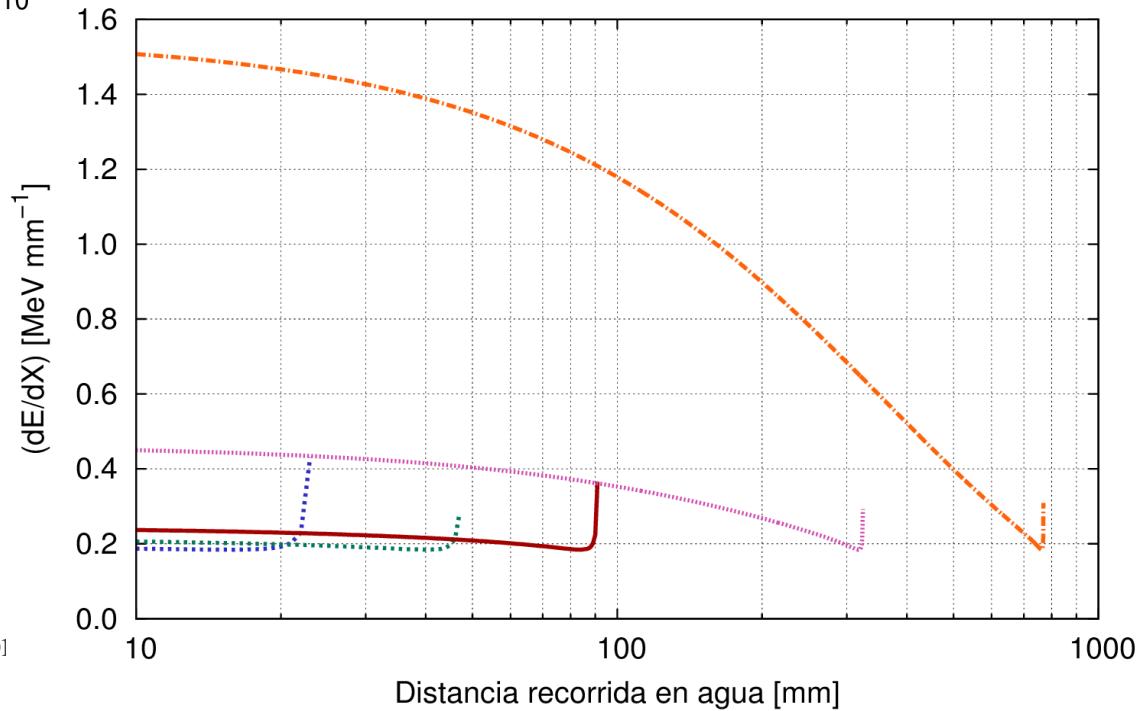
# Efecto Cherenkov



Fotones Cherenkov

$$\left( \frac{dE}{dl} \right) = \left( \frac{Ze}{c} \right)^2 \int_{\beta^2 \epsilon(\omega) > 1} \omega \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon(\omega)} \right) d\omega$$

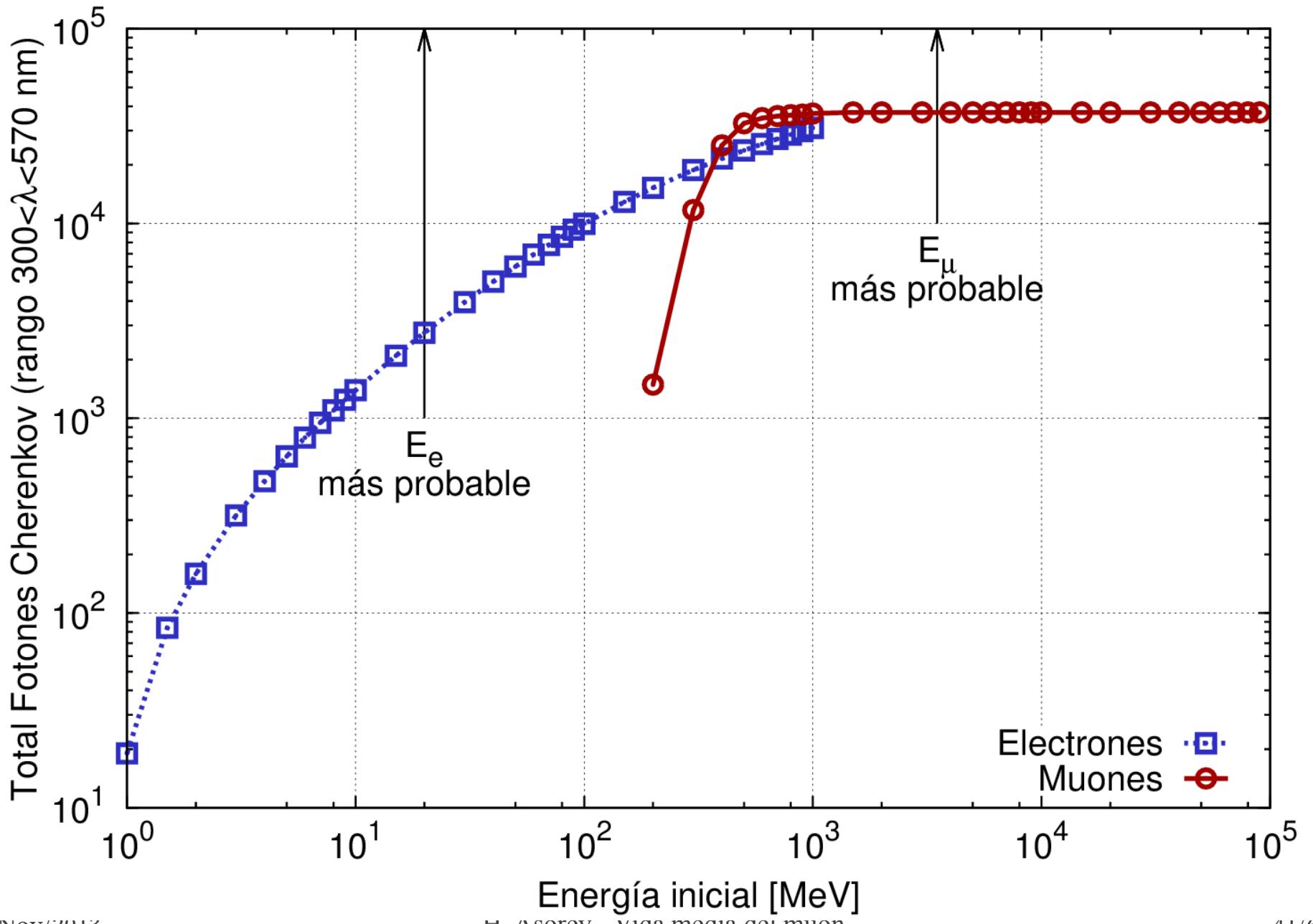
$$\frac{\Delta N}{\Delta L} = 2 \pi \alpha_{EM} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$



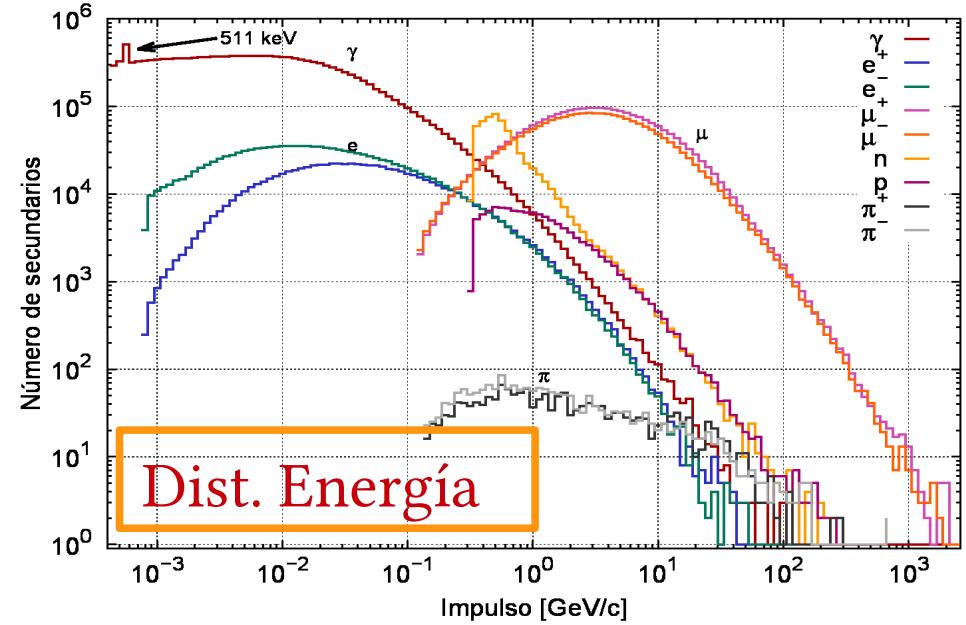
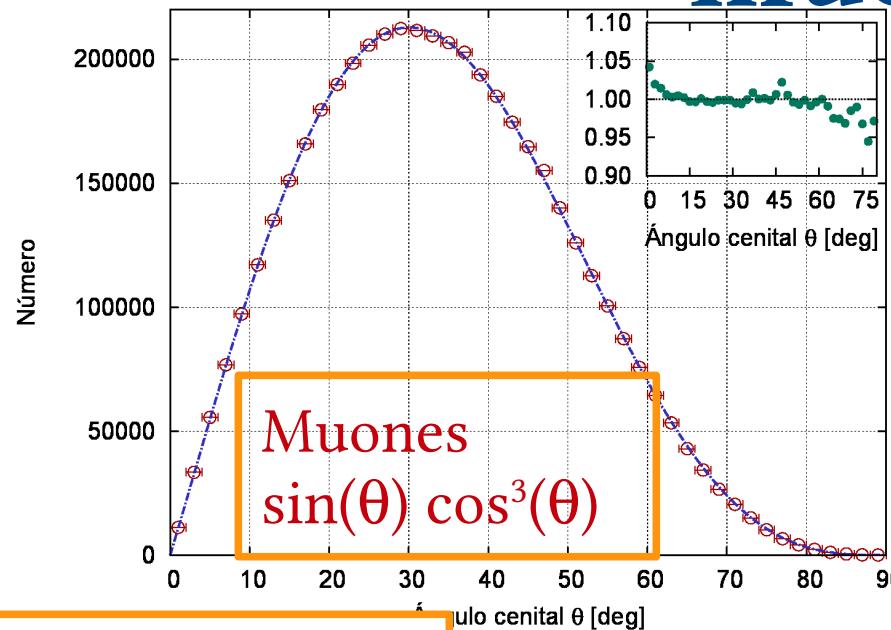
Rango  $e^{+/-}$  en agua

$$\left( \frac{dE}{dL} \right) = f(E)$$

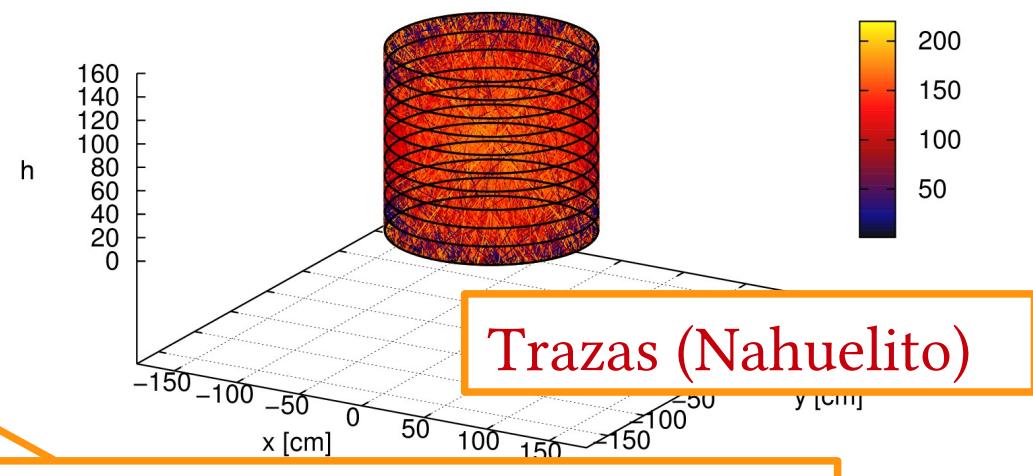
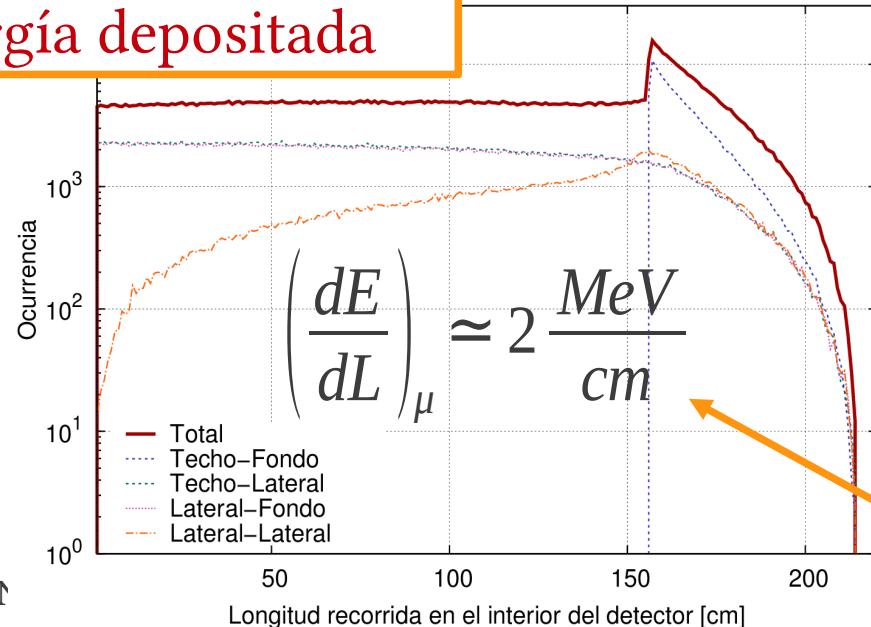
# Producción Cherenkov



# Respuesta del detector para muones



Energía depositada



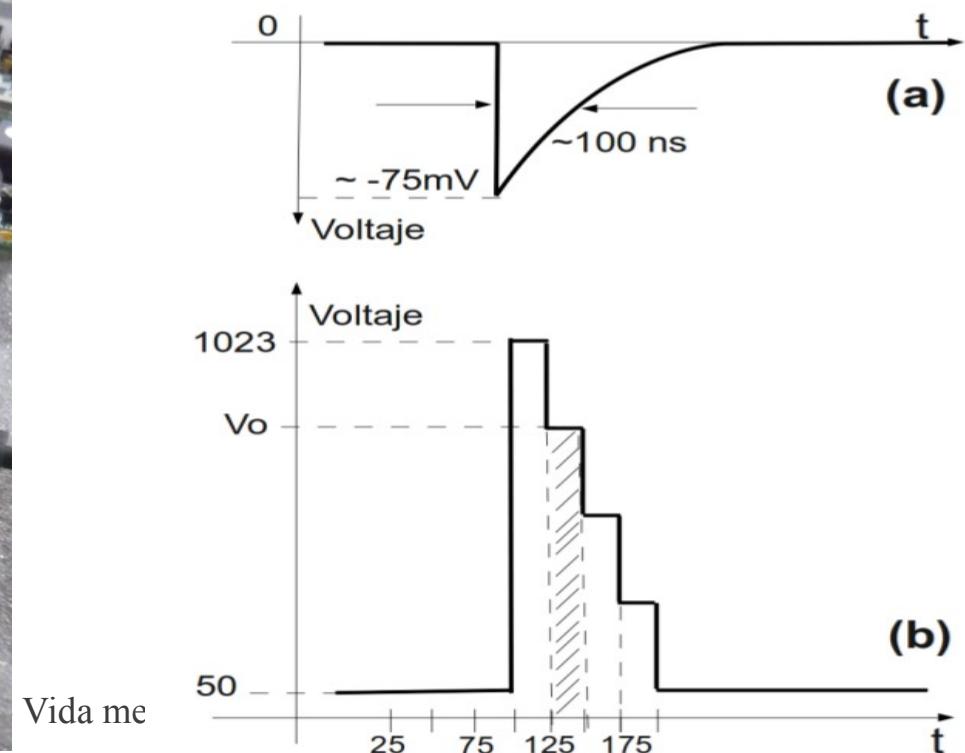
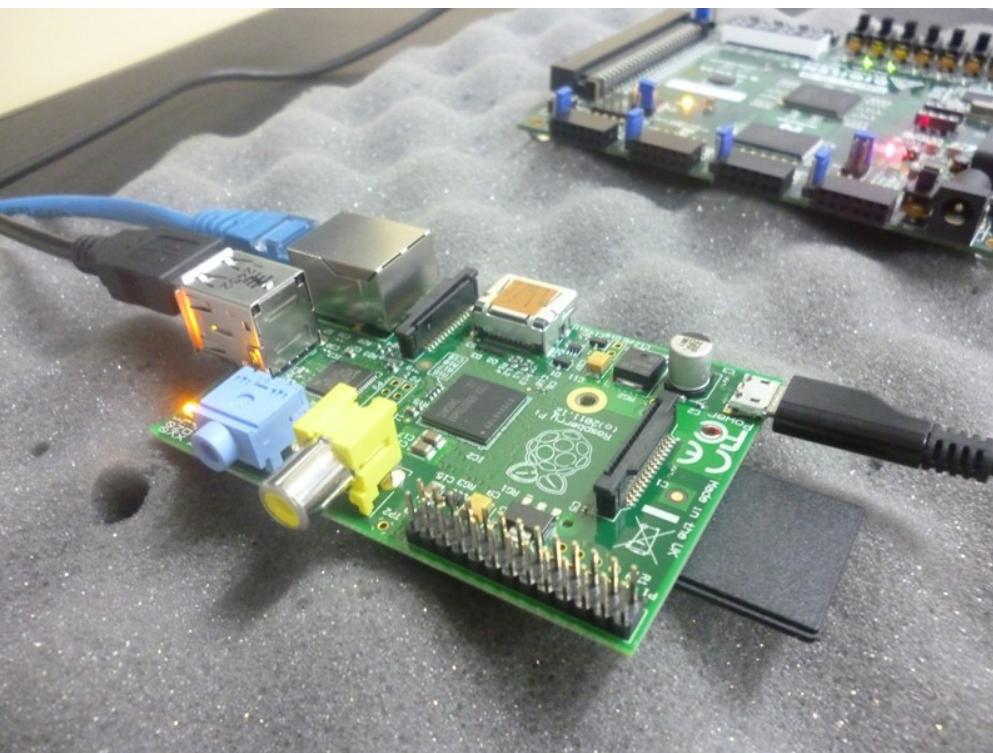
MIP (Min. Ionization Particle)

# Datos

Datos

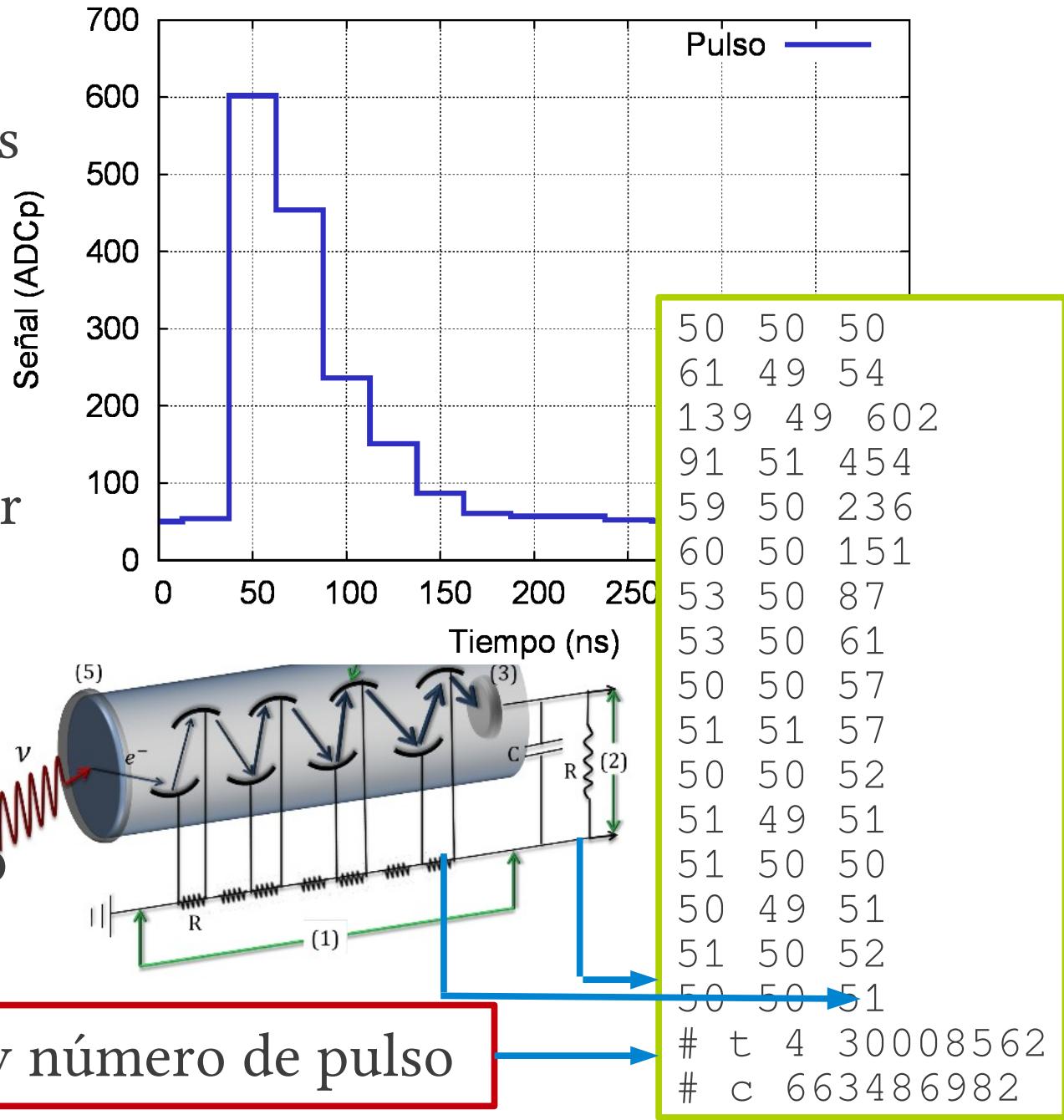
# Adquisición de datos

- Señales analógicas (pulsos) en el PMT
- Amplificación de la señal
- Hasta tres canales independientes
- Digitalización FADC 10 bits a 40 MHz (25 ns)



# Estructura típica de un pulso

- Datos:
  - Tres canales de señales digitalizadas
- Metadatos
  - Id del Detector
  - Telemetría del detector
  - Datos atmosféricos, PyT
  - Datos monitoreo GPS
- Una hora por archivo



50	50	50
61	49	54
139	49	602
91	51	454
59	50	236
60	50	151
53	50	87
53	50	61
50	50	57
51	51	57
50	50	52
51	49	51
51	50	50
50	49	51
51	50	52
50	50	51
# t 4	30008562	
# c	663486982	

$$A_3 = 151 \text{ ACD}_q$$

$$P_3 = 117 \text{ ADC}_p$$

$$(A/P)_3 = 1.3$$

$$\Delta t_{83} = 2100 \text{ ns}$$

50	50	50
49	51	51
62	50	106
53	50	117
51	51	62
50	50	55
50	50	51
53	51	51
51	50	51
49	49	52
51	50	51
51	49	51
51	50	52
50	49	50
50	51	50
52	50	51
# t 4	30008646	
# c	663486983	

# Definiciones

$$A_3 = 1316 \text{ ACD}_q$$

$$P_3 = 552 \text{ ADC}_p$$

$$(A/P)_3 = 2.4$$

- Pulso canal j

$$V_j(t)$$

- Pico

$$P_j = \max[V_j(t) - 50]$$

- Área ← Energía depositada

$$A_j = \left( \int_0^{400 \text{ ns}} [V_j(t) - 50] dt \right) > 0$$

- Área sobre Pico:

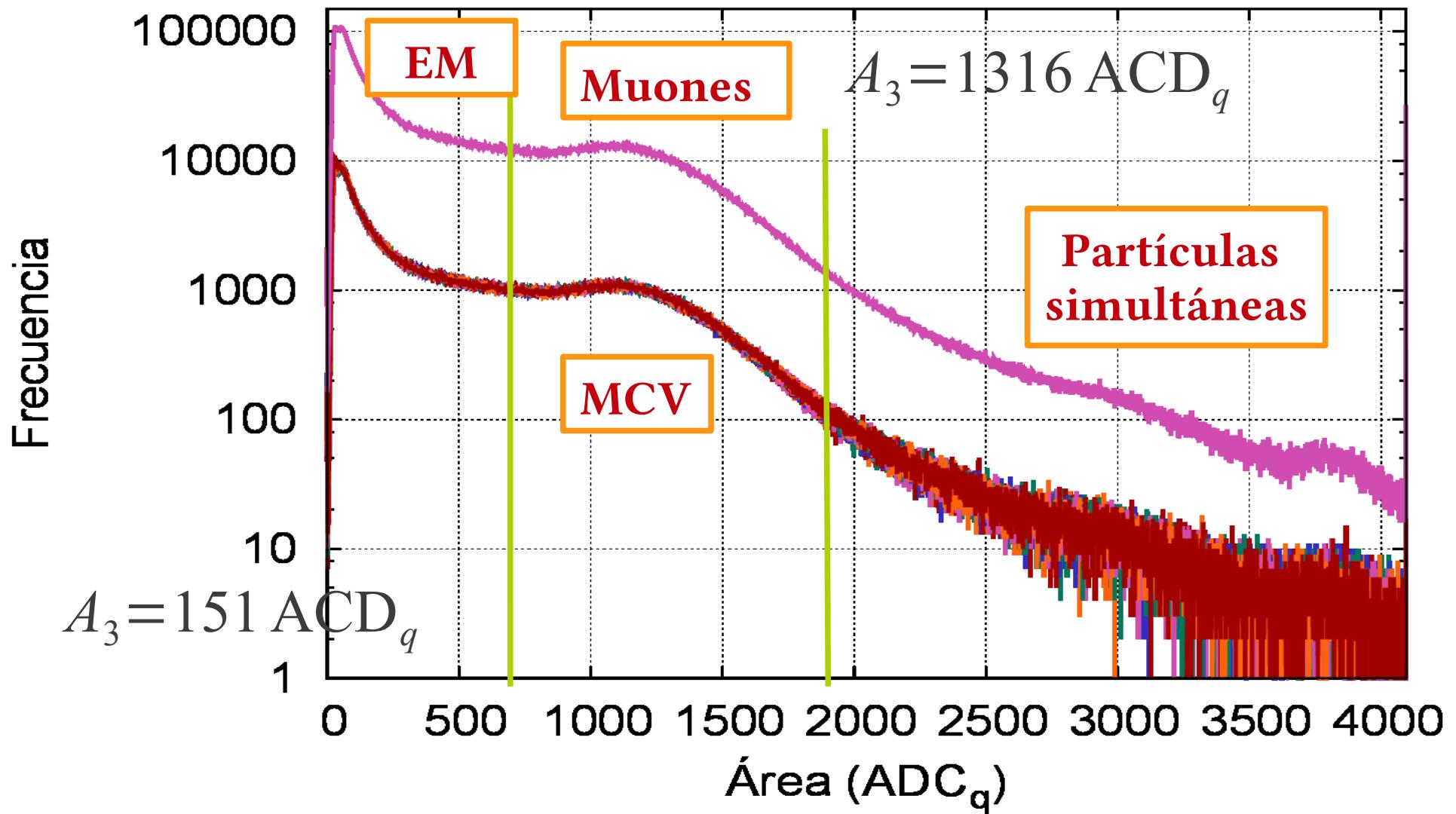
$$(A/P)_j = A_j / P_j$$

- Δt (independiente de j)

$$\Delta t_i = (\text{tag}_i - \text{tag}_{i-1}) \times 25 \text{ ns}$$

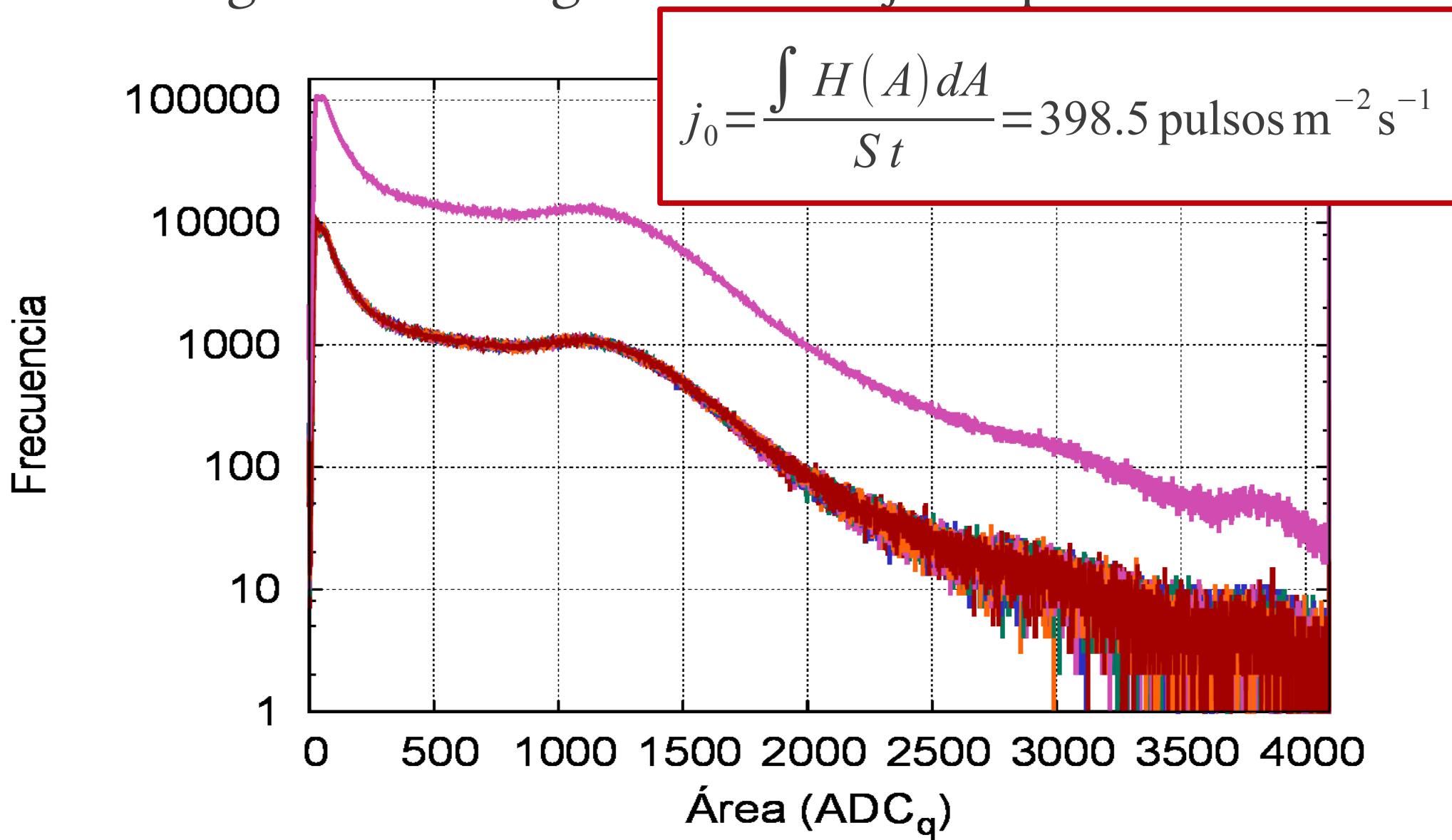
# Histograma de áreas

- Área A de cada pulso → histograma de áreas



# Histograma de áreas

- Integral del histograma → Flujo de partículas



# Distribución temporal de señales

- Poisson: sucesos independientes que ocurren a una tasa constante ← Flujo total de secundarios

$$P(x, t) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}$$

- Distribución para el tiempo entre dos pulsos ( $\Delta t$ )

- No tener pulsos en tiempo  $\Delta t$ , recibir el 1<sup>er</sup> pulso en  $\Delta t + dt$

$$P(\Delta t) \propto e^{-\lambda \Delta t}$$

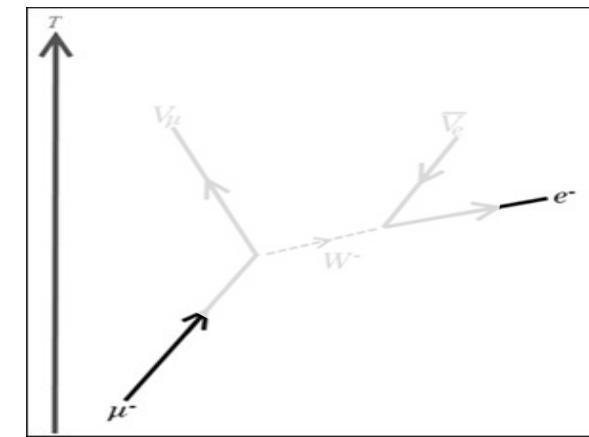
Distribución Exponencial

- Propiedad: “falta de memoria” (memorylessness)

$$P(t > (l+m) | t > l) = P(t > m)$$

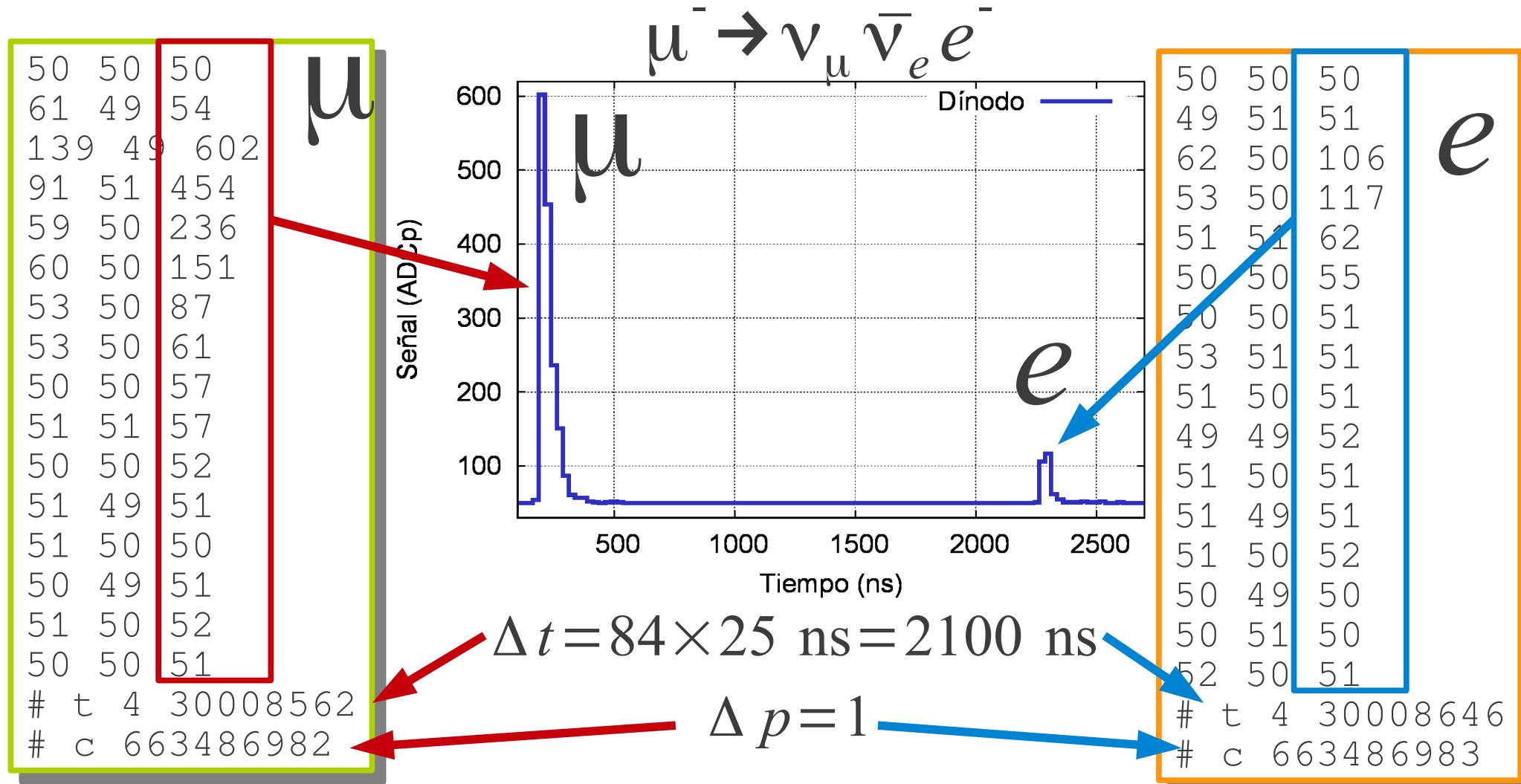
# Decaimiento del muón

- Proceso electrodébil
  - La vida del muón está “protegida” por la elevada masa de los mediadores W
- $$(\lambda_\mu)^{-1} \equiv \tau_\mu = (2197.03 \pm 0.04) \text{ ns}$$
- Probabilidad baja de observar el decaimiento de un muón de alta energía
  - Sin embargo, si  $E_\mu < \sim 500 \text{ MeV} \rightarrow$  Se detiene en el interior del detector
  - Pulso del muón  $\rightarrow$  (Decaimiento)  $\rightarrow$  Pulso del electrón



# Un decaimiento en los datos

- Dos pulsos consecutivos: ingreso del muón, aparición del electrón



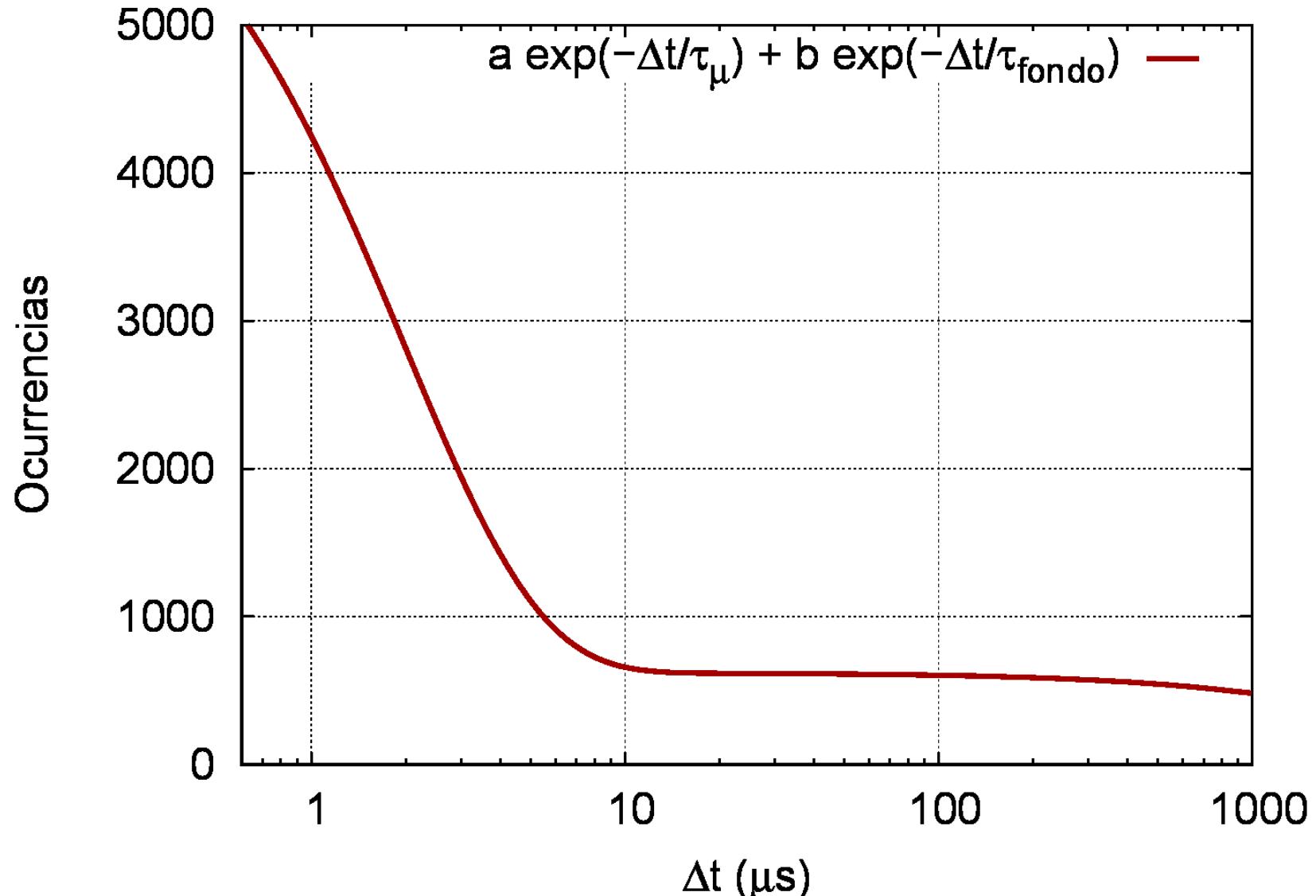
# Histograma de $\Delta t$

- Calculamos el  $\Delta t$  entre pulsos sucesivos
- La distribución de  $\Delta t$  es un muestreo de las distribuciones de los procesos en el interior:
  - Flujo de secundarios

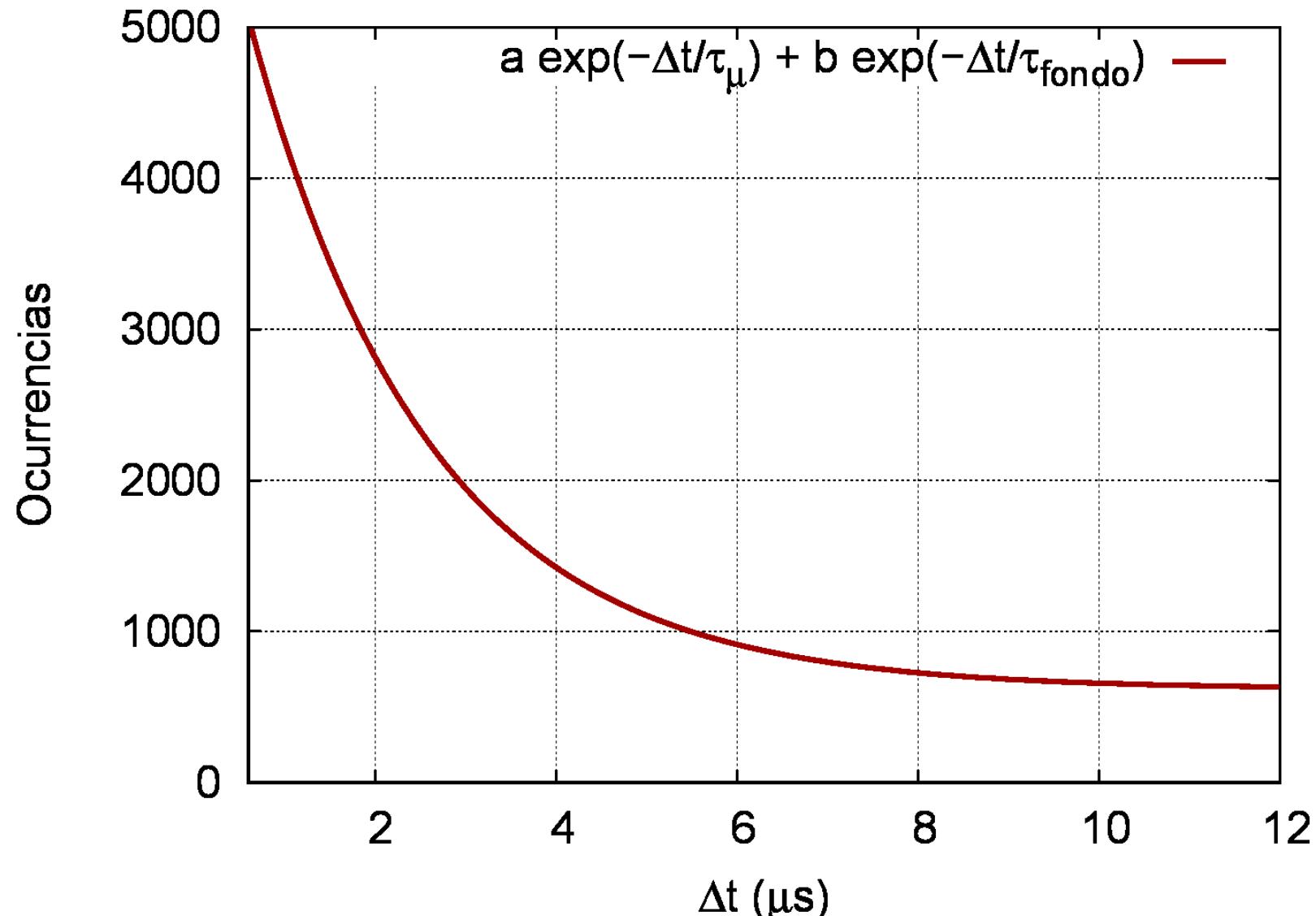
$$(\lambda_{\text{fondo}})^{-1} \equiv \tau_{\text{fondo}} \simeq 2.5 \text{ ms} = 2.5 \times 10^3 \mu\text{s}$$

- Decaimento de los muones en el interior del detector
- $(\lambda_\mu)^{-1} \equiv \tau_\mu \simeq 2.2 \mu\text{s}$
- Tiempos característicos muy diferentes

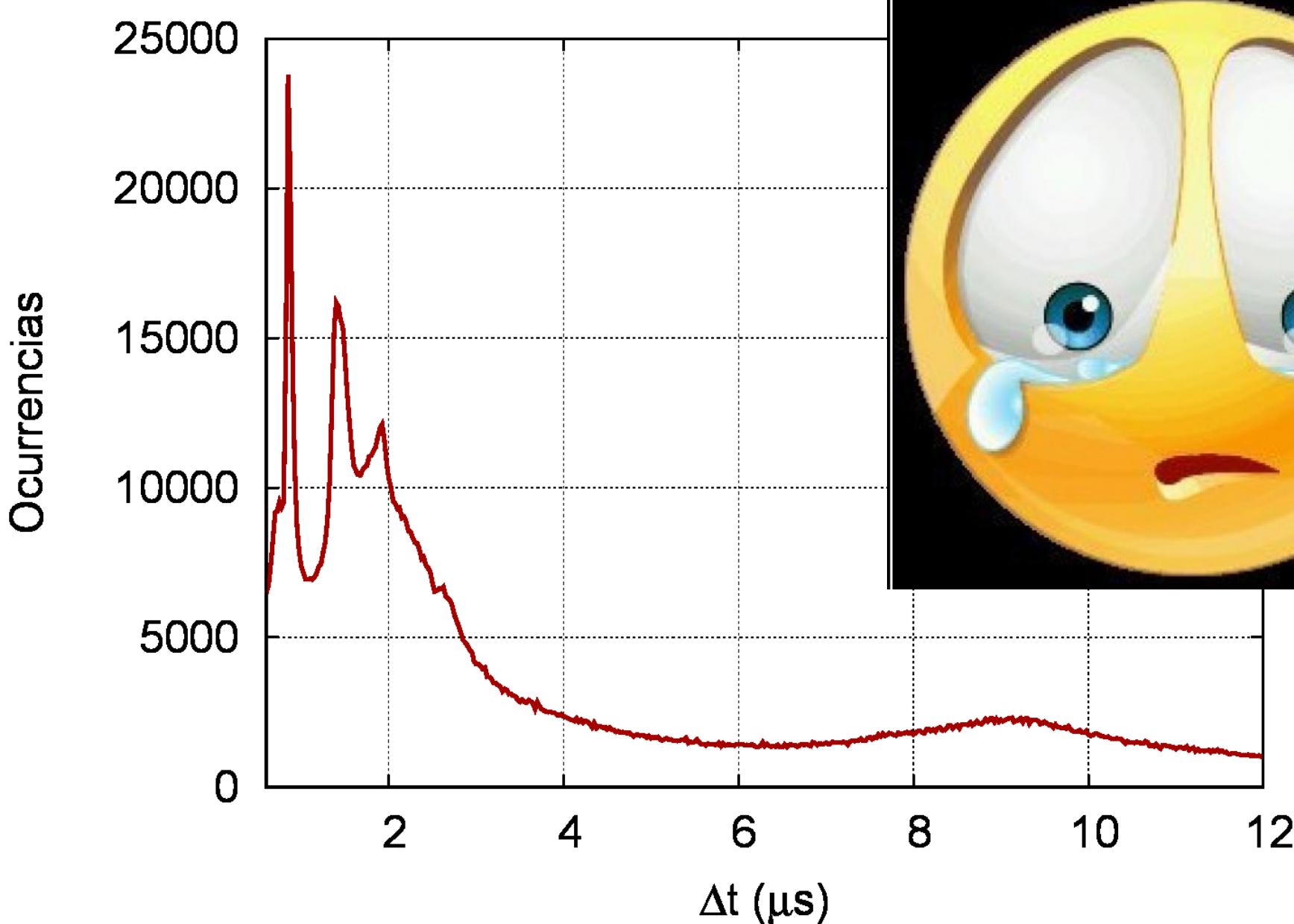
# Suma de exponenciales



# Nos concentraremos en $\Delta t \sim \tau_\mu$



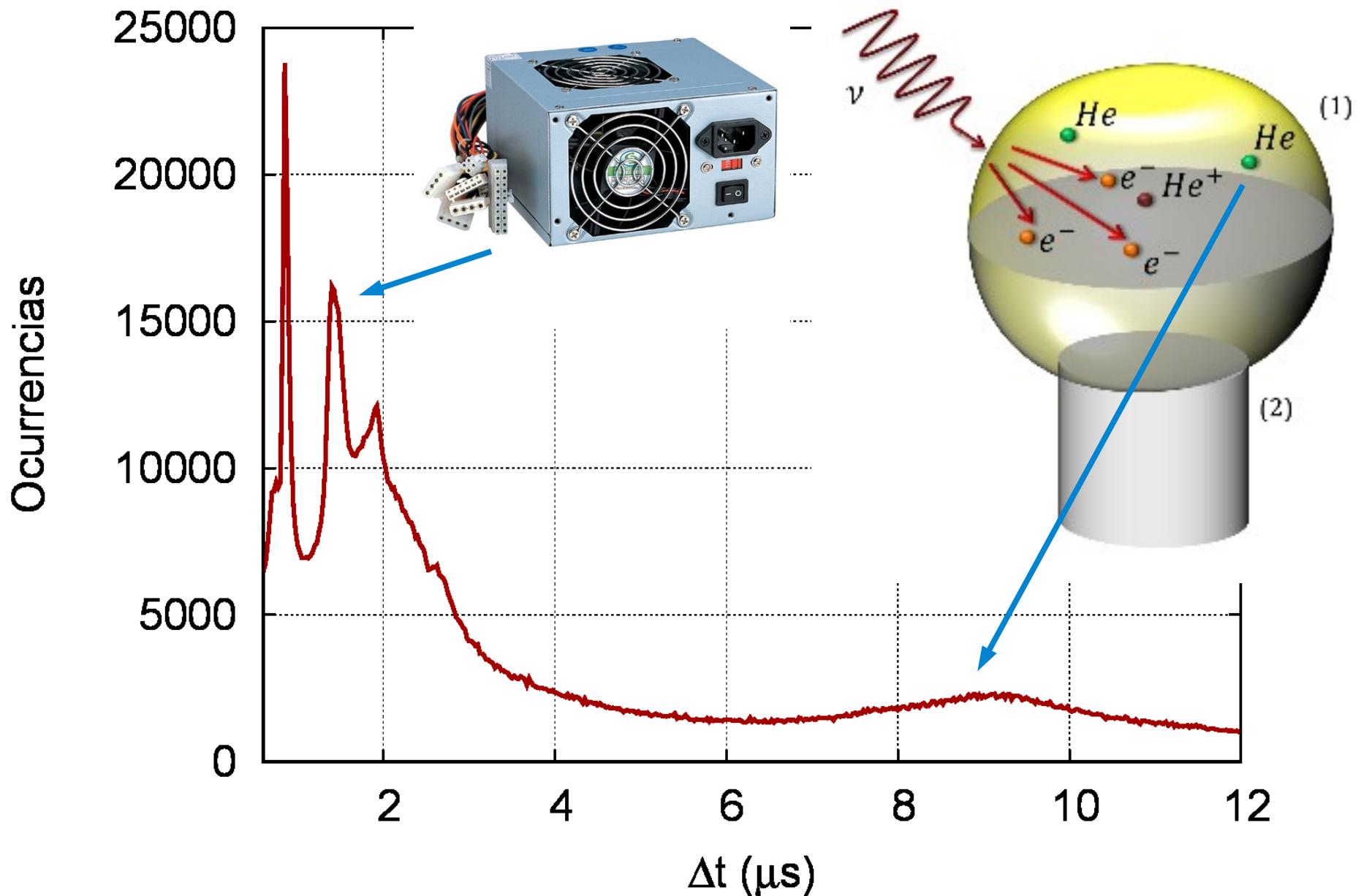
# Teórica vs Experimental



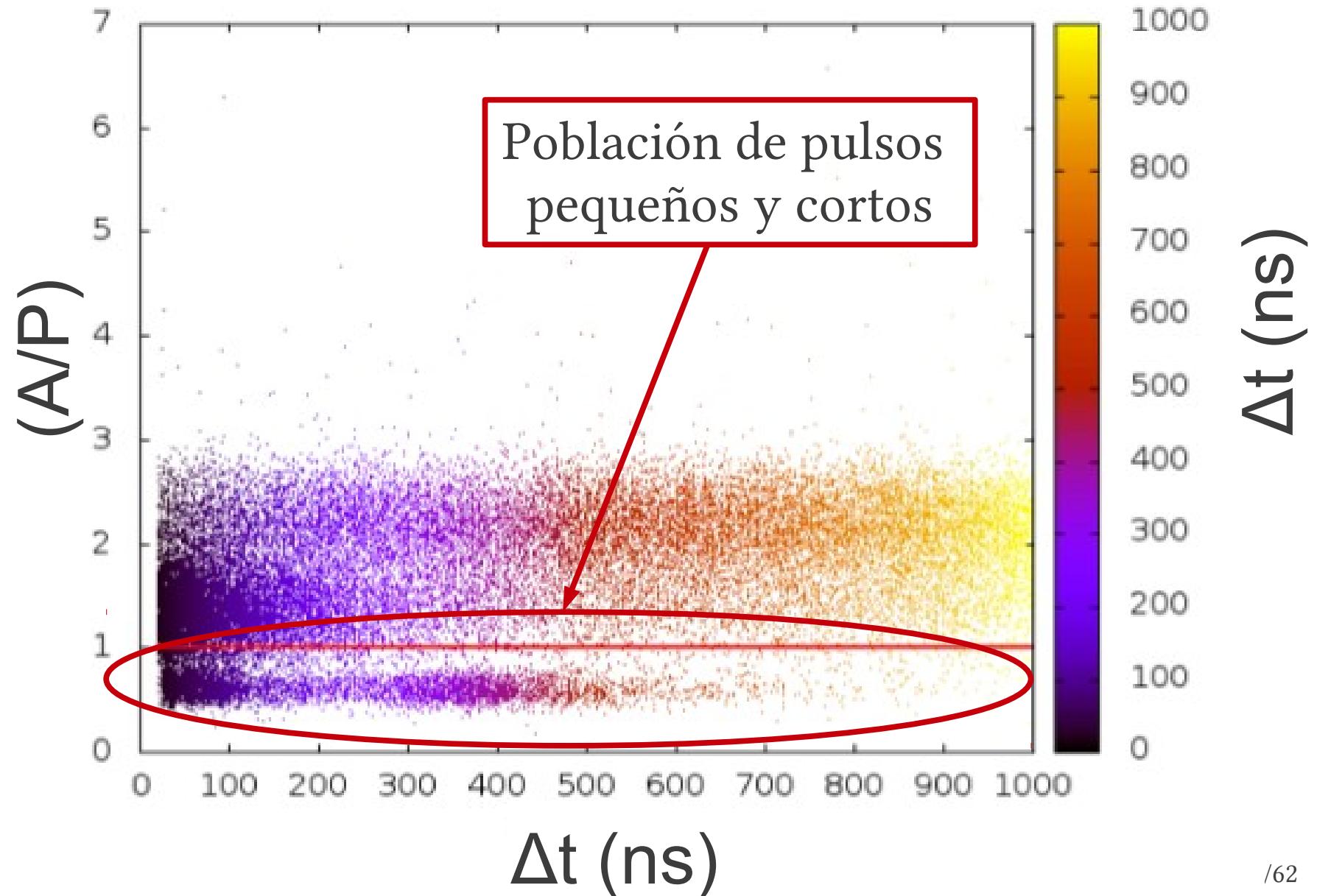
# ¿Qué significan esos picos?

- Un pico en el histograma de tiempos significa que hay sucesos que ocurren a un “rate” constante
  - Pensemos en un reloj: tengo un pulso cada segundo
- Aquí tenemos una distribución en torno a un valor
  - ¿Relojes? ← Fuentes conmutadas
  - ¿Propagación? ← “Afterpulses”:
    - Un fotoelectrón ioniza al Helio
    - El ión  $\text{He}^+$  migra hacia el fotocátodo
    - El ión produce un nuevo fotoelectrón
    - El fotoelectrón es un pulso nuevo
    - ¡¡El tiempo entre pulsos depende de la geometría del PMT!!!

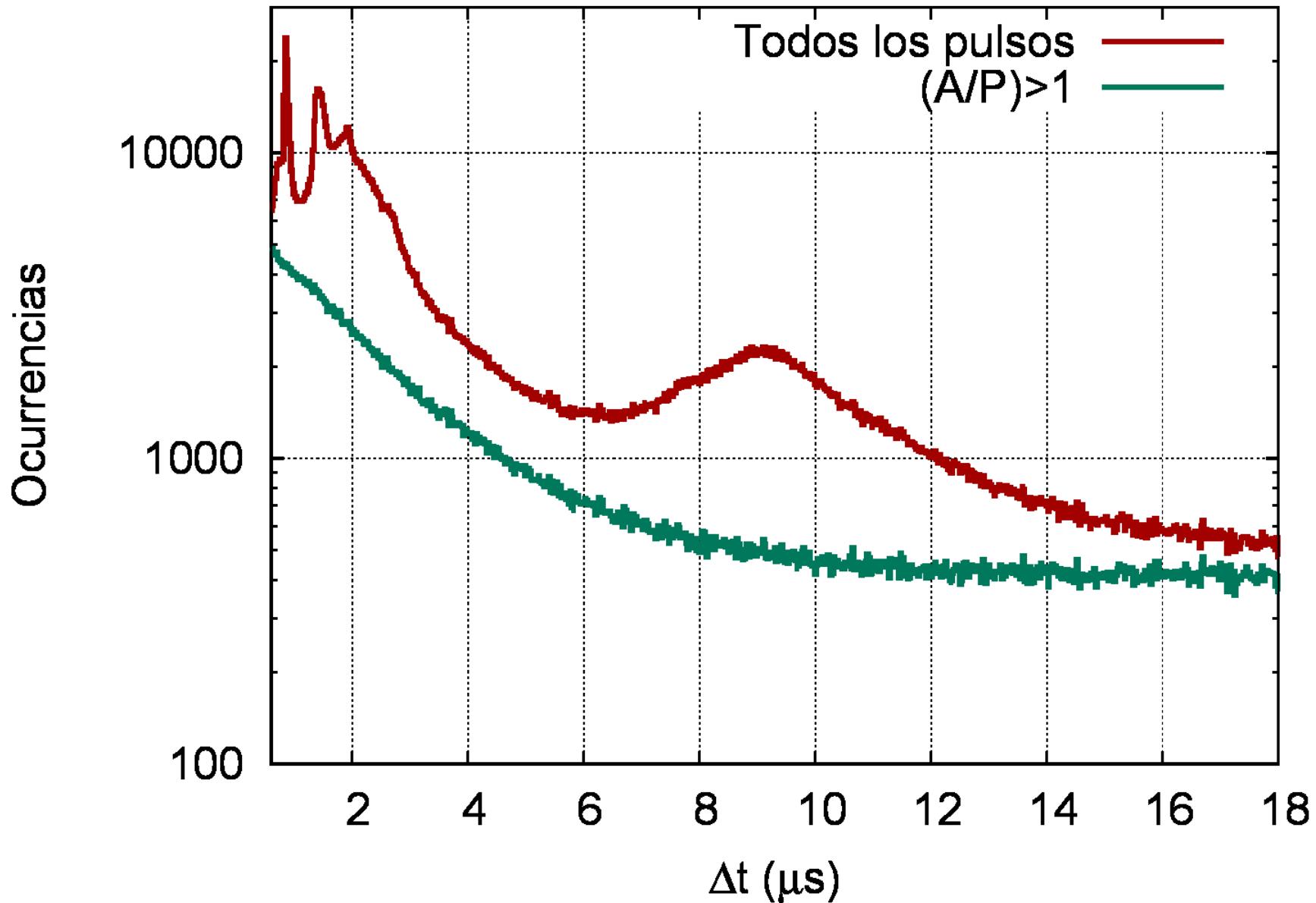
# El experimento contraataca



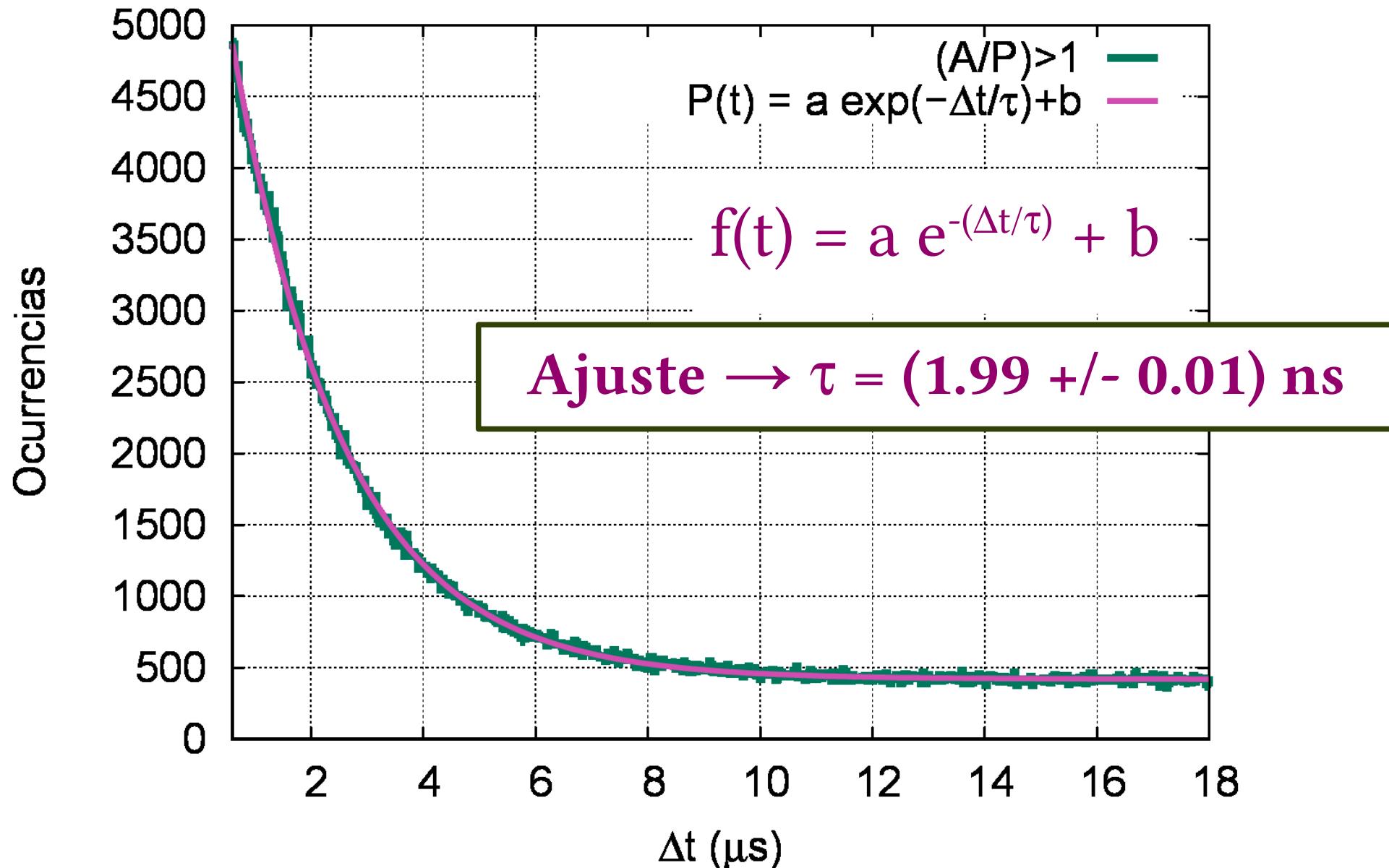
# Área/pico vs dt



# Solución: Quitar si $(A/P) < 1$



# Diferencia de tiempo entre pulsos



# Muón en el agua

- Muón en agua

- $\mu^+ \rightarrow$  Libre

- $\mu^- \rightarrow$  Prob. de captura nuclear (similar a la c.e.):

- $\propto Z^4$  del medio

- Alta absorción en  $^{35}\text{Cl}$  y  $^{36}\text{Cl}$  (lejía, lavandina, NaClO)

- Procesos que compiten para el  $\mu^-$ :

- Decaimiento
    - Captura

Tiempo Decaimiento muon negativo  
**Ajuste**  $\rightarrow \tau_{\mu^-} = (1.86 \pm 0.02) \mu\text{s}$

**Sólo decaen los que no son absorbidos**

$$\tau_{\mu^-} < \tau_0$$

- $\lambda_{\text{obs}} = (N^+ \lambda^+ + N^- \lambda^-) / (N^+ + N^-)$

- Se puede medir la relación  $N^+/N^-$

# Muito obrigado

- Vida media en agua (transparencia) y efecto de impurezas
- Relación  $N^+/N^-$  como función de la altura
- Mediciones relativistas
- Espectro de Michel del electrón resultante
  - Medición indirecta de la existencia del neutrino (energía faltante)
- Constante de acoplamiento electrodébil ( $\tau_\mu \propto g_F$ )
- Caracterización de los “afterpulses” de los PMT
- Distribución de señales en el fondo y su variación → Solar
- Medir otras partículas con fuentes (Fuente de neutrones Am-Be)
- Técnicas de análisis de datos complejos