



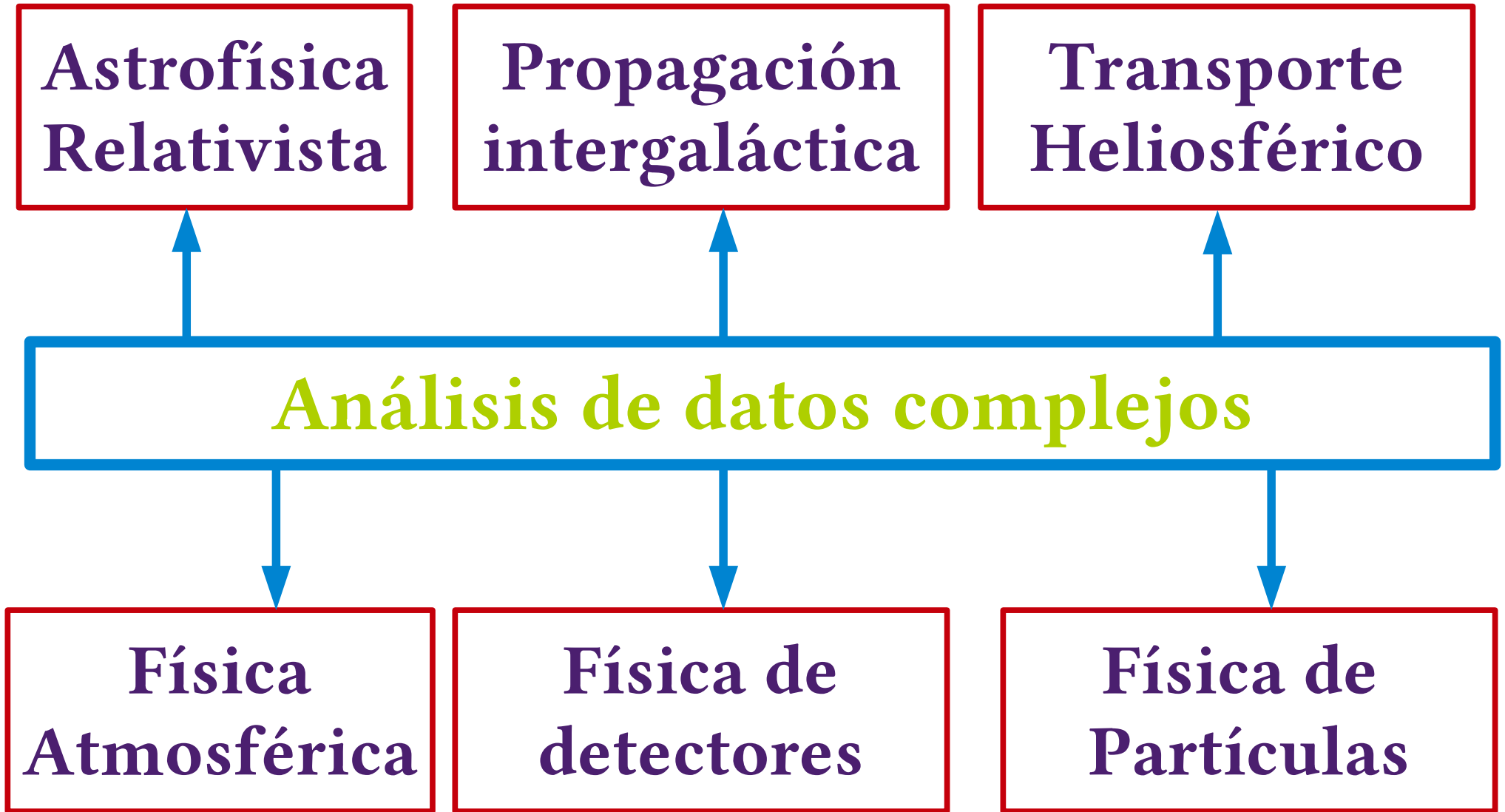
Medición de la vida media del Muón usando los detectores Cherenkov en Agua del Proyecto LAGO

**Laboratorio Detección de Partículas y Radiación (LabDPR)
Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro**

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 adaptables al curso, desde ~10 hasta ~60 horas de clase

Alcances



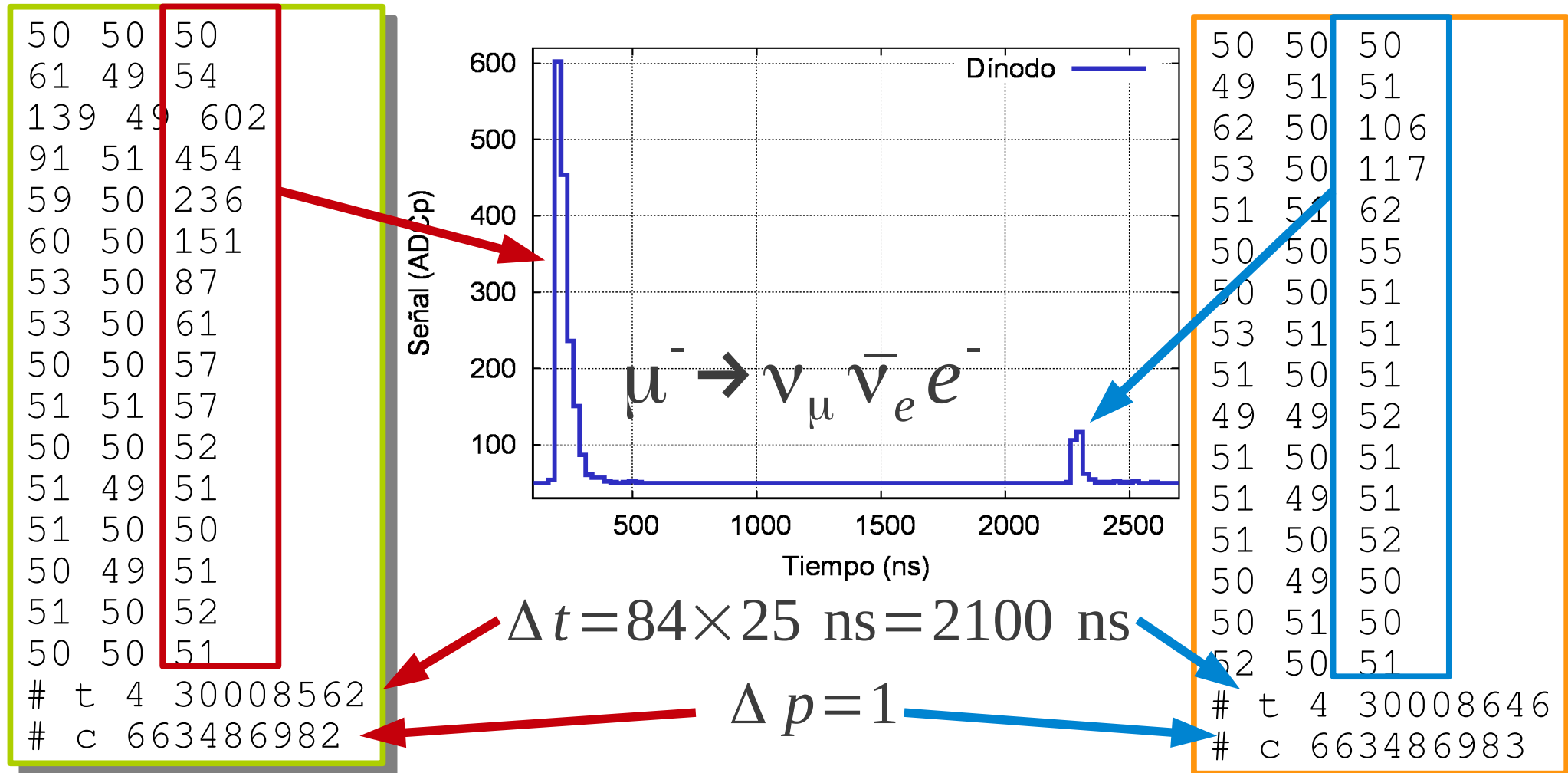
Alcances

- Comienza en un remanente de supernova

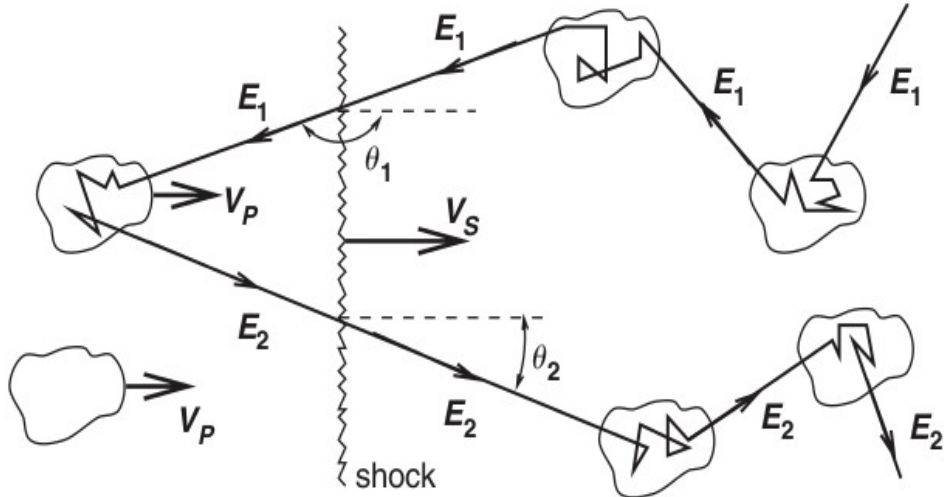


Alcances

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



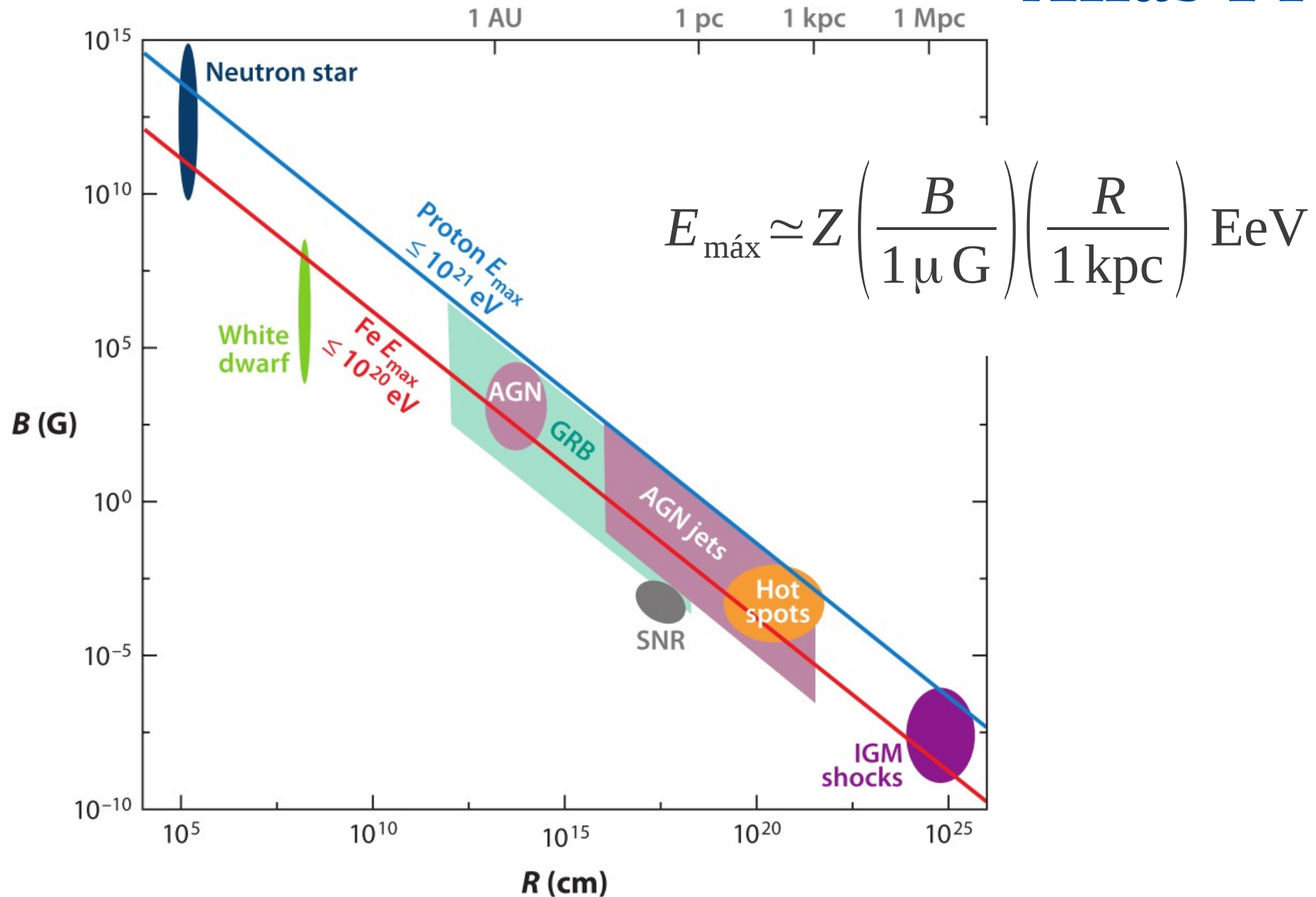
Once upon a time in a place far, far away...



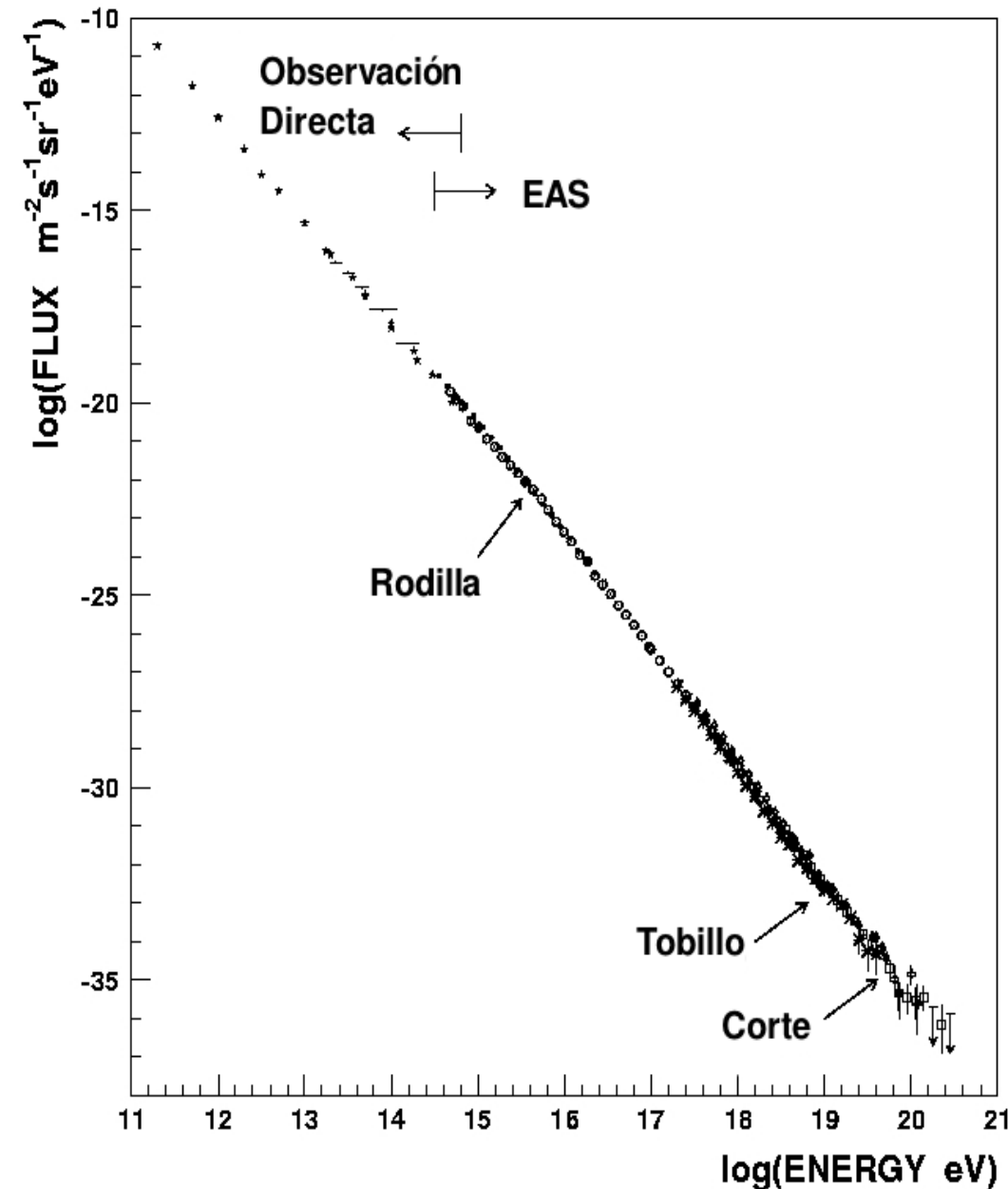
- Partículas cargadas
- $B \rightarrow$ confinación
- $E \rightarrow$ aceleración
- Si la longitud de coherencia es mayor que el radio de Larmor, la partícula va y vuelve por el frente
- Cada vez que pasa, gana energía

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

Hillas Plot



Espectro



- Espectro de energía:

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

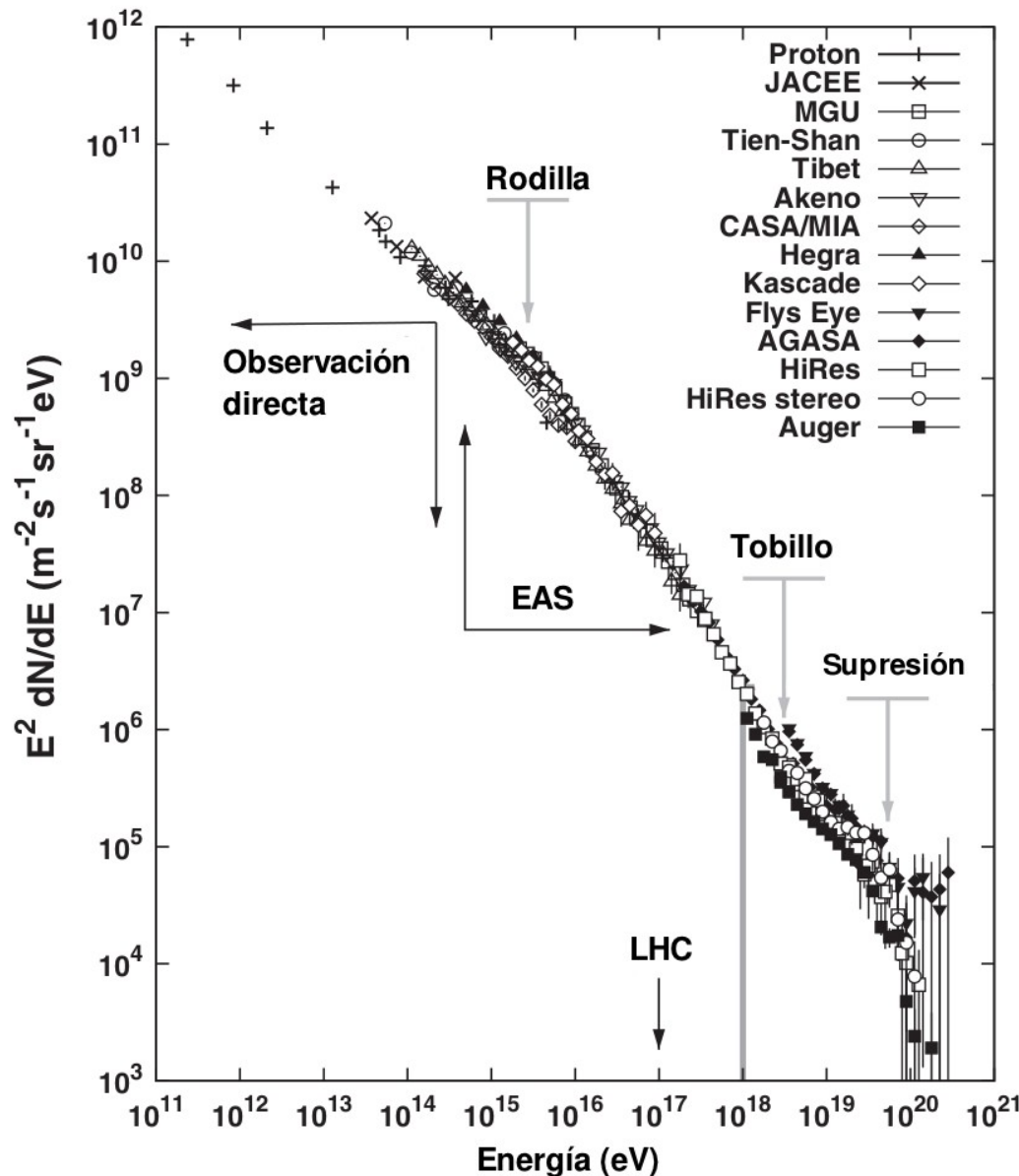
- Unidades

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

- En general:

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

Espectro $\times E^2$



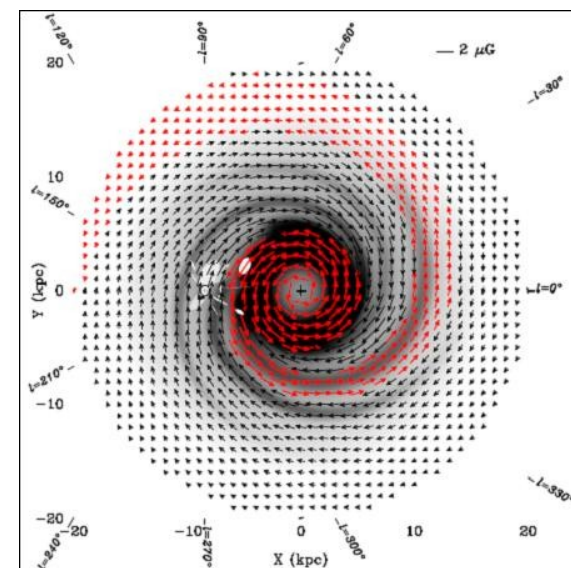
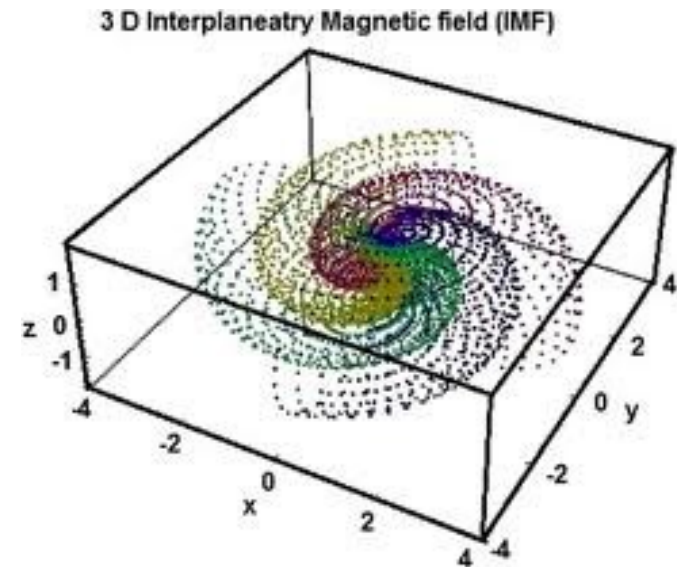
● Cambios en la pendiente espectral:

- Viento Solar $\rightarrow 10^9$ eV
- Modul. Solar $\rightarrow 10^{12}$ eV
- 1^{ra} rodilla $\rightarrow 10^{15.5}$ eV
- 2^{da} rodilla $\rightarrow \sim 10^{17}$ eV
- Tobillo $\rightarrow 10^{18.61}$ eV
- Supresión $\rightarrow \sim 10^{19.46}$ eV

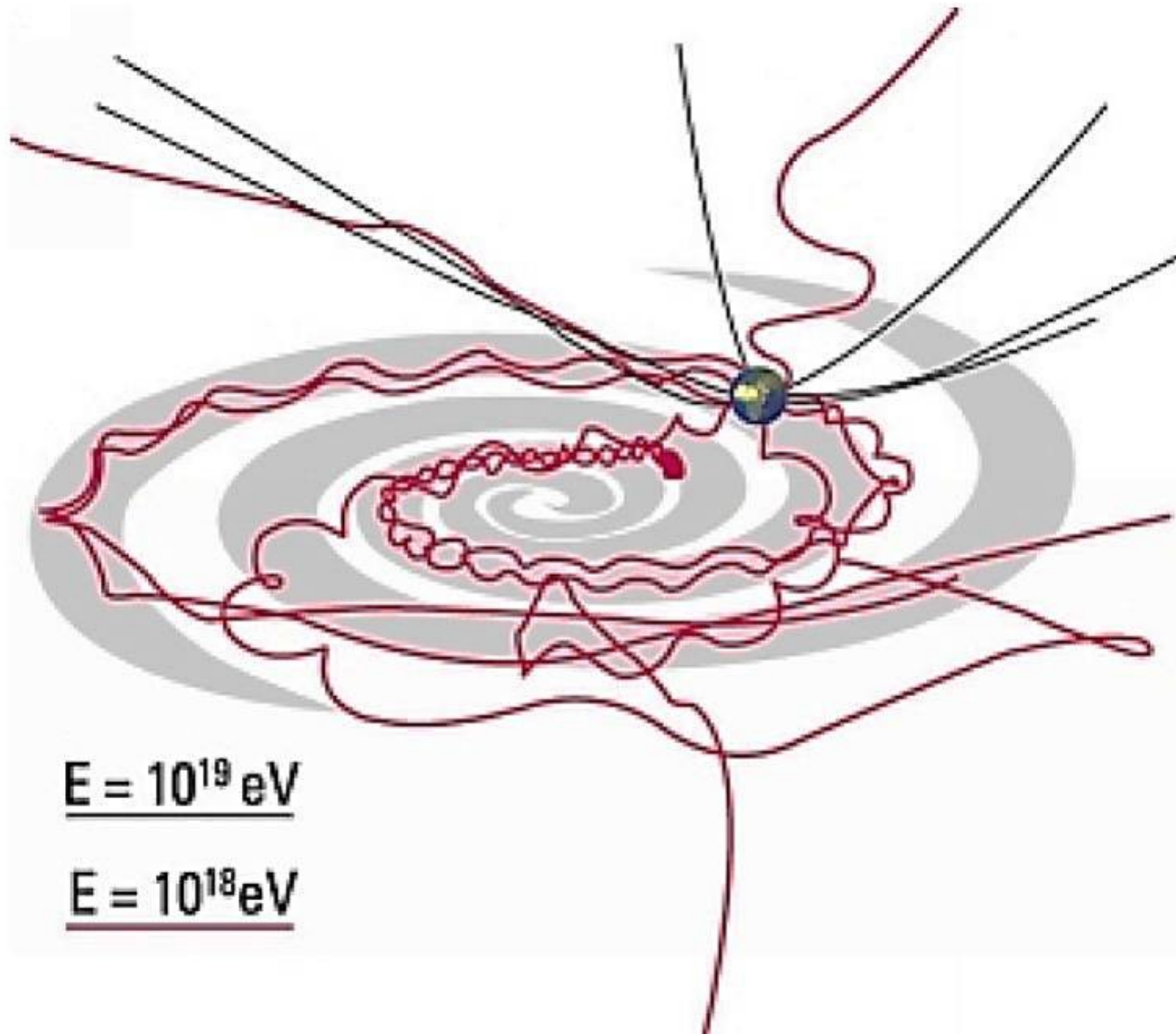
Transición entre distintos fenómenos físicos

Propagación: Campos Magnéticos

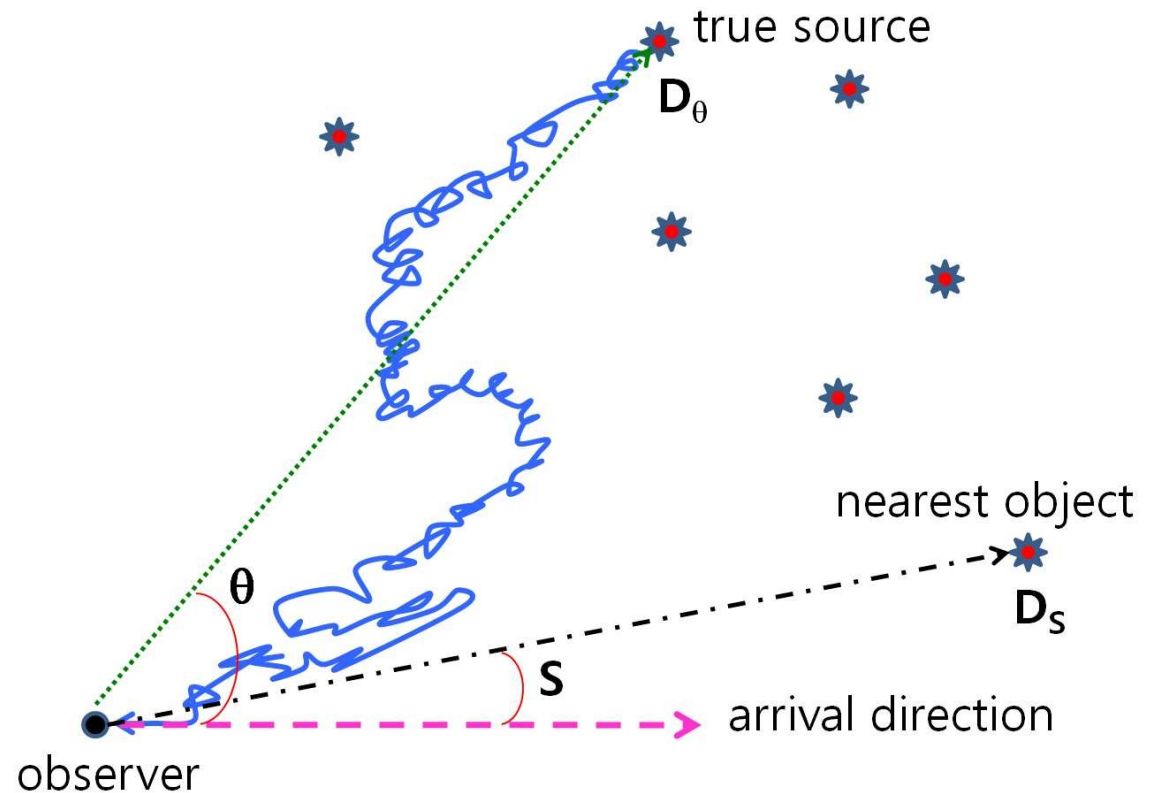
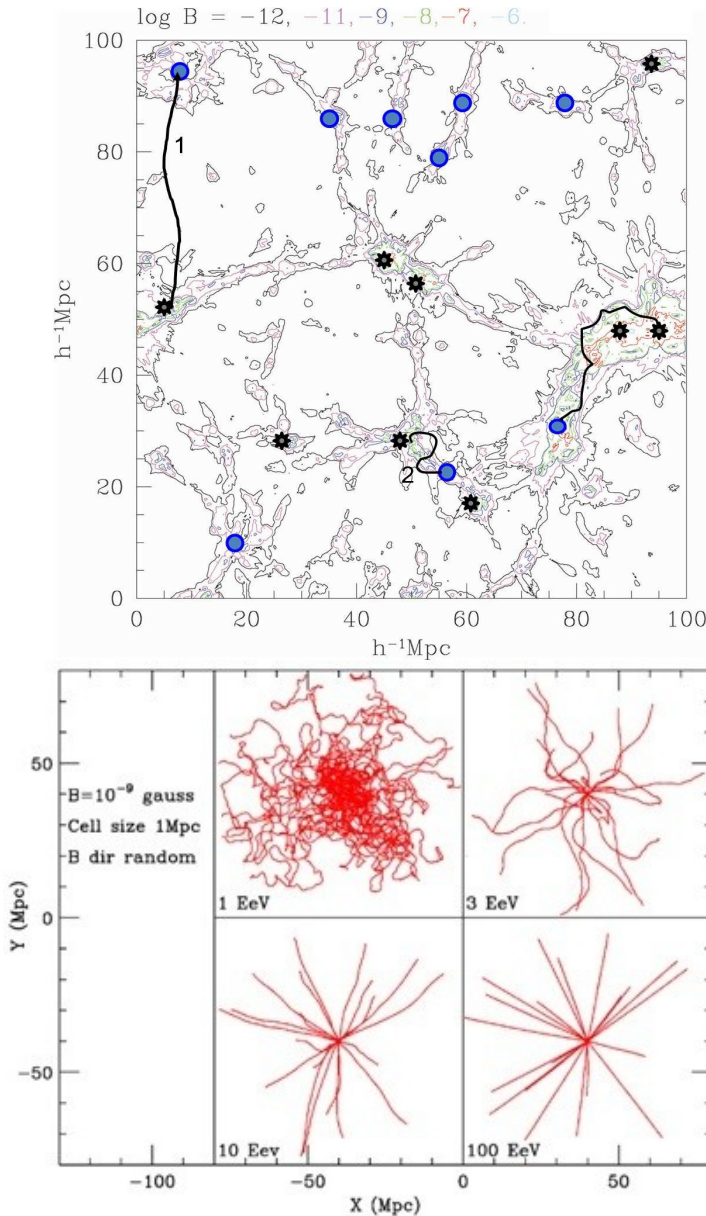
- Los campos magnéticos B deflectan su trayectoria.
- B : intensidad o recorrido
- En general, se propone:
 - Campo Uniforme $|B| \sim 2\mu\text{G}$, siguiendo la los brazos espirales
 - Campo Turbulento: fluctuaciones sobre el campo uniforme



Deflexiones galácticas



Y además campos intergalácticos



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

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

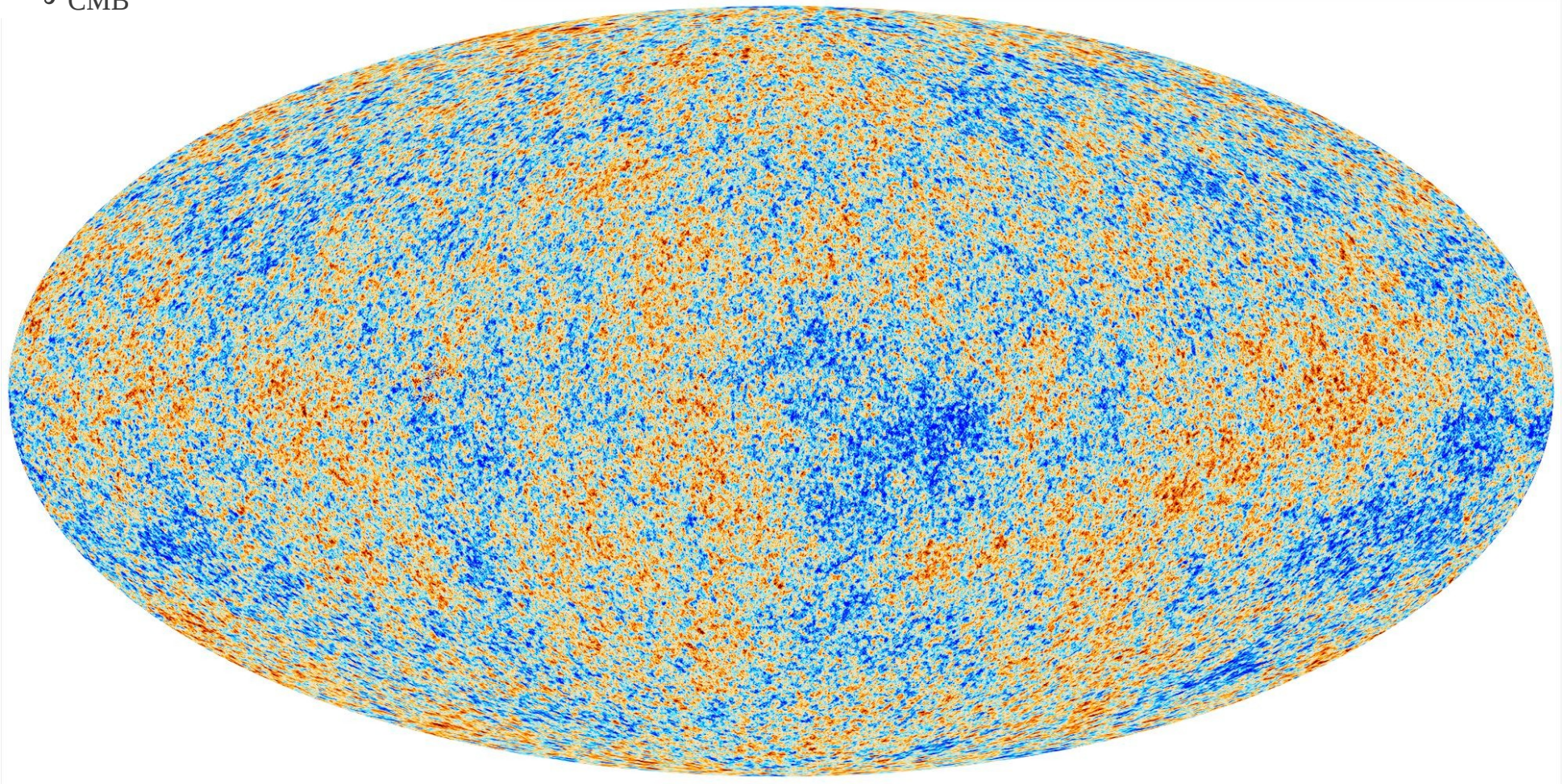
Fondo de radiación cósmica (CMB)

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

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

¿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

$$p^+ \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow p^+ \pi^0 \quad (E_p > 5 \times 10^{19} \text{ eV})$$

$$p^+ \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow (\Delta^+) \pi^0 \rightarrow p^+ \pi^0 \pi^0$$
$$\vdots$$

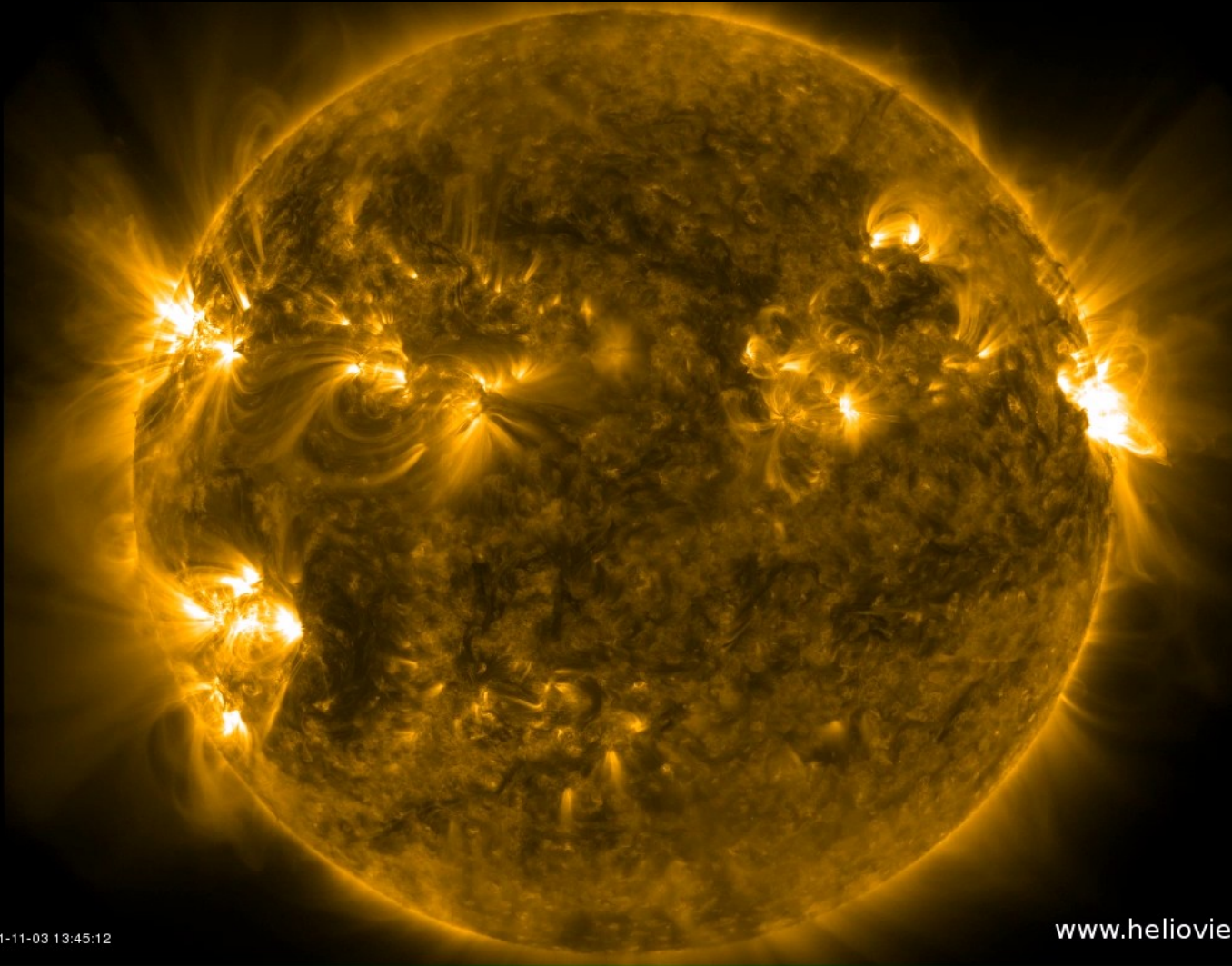
- El truco: **el protón resultante es indistinguible del original**, sólo que con energía menor
- Eventualmente, esos piones neutros decaen en fotones (los llamados fotones GZK):

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$

Transporte heliosférico



Una estrella en nuestro interior



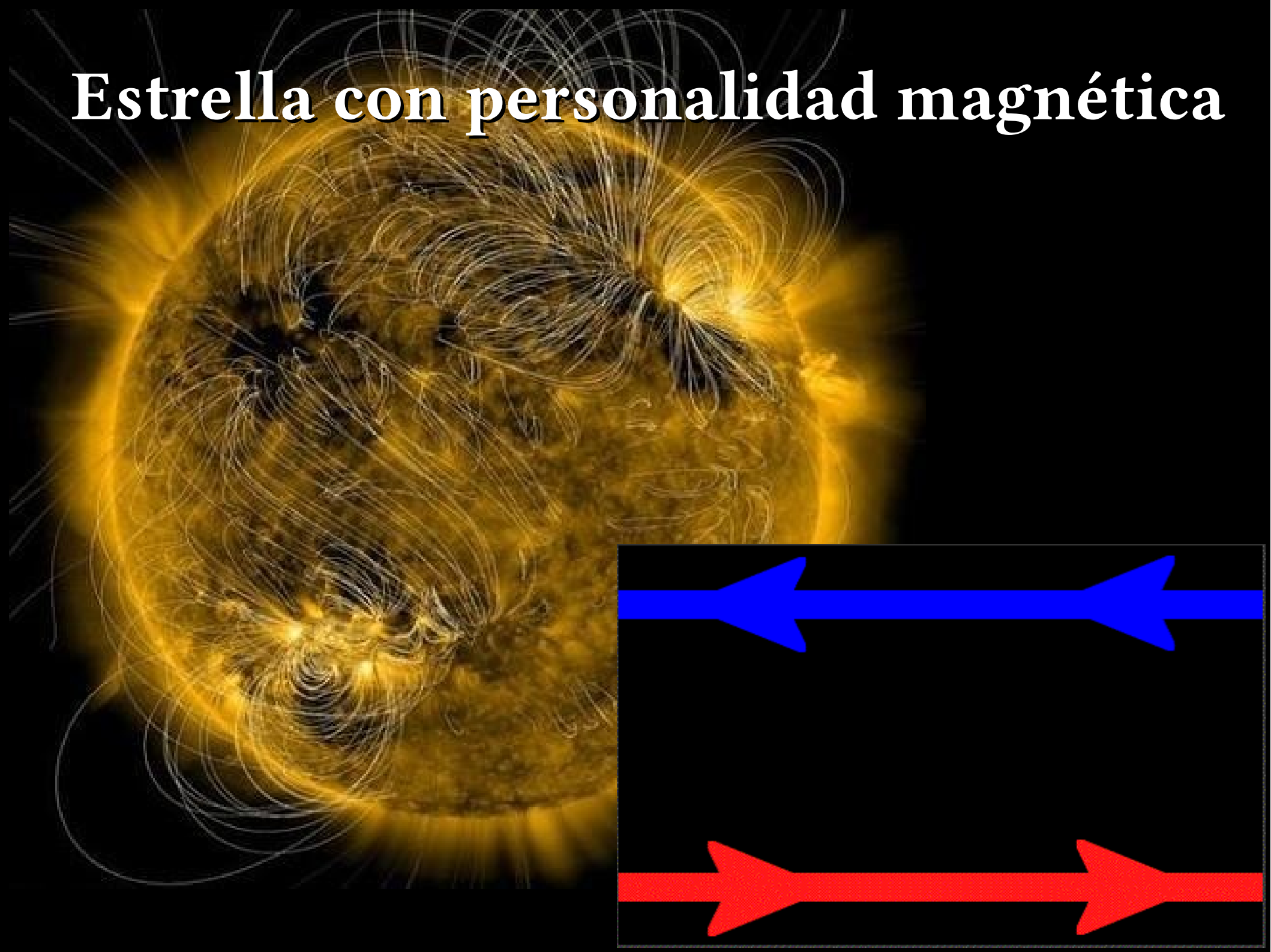
AIA 171

2011-11-03 13:45:12

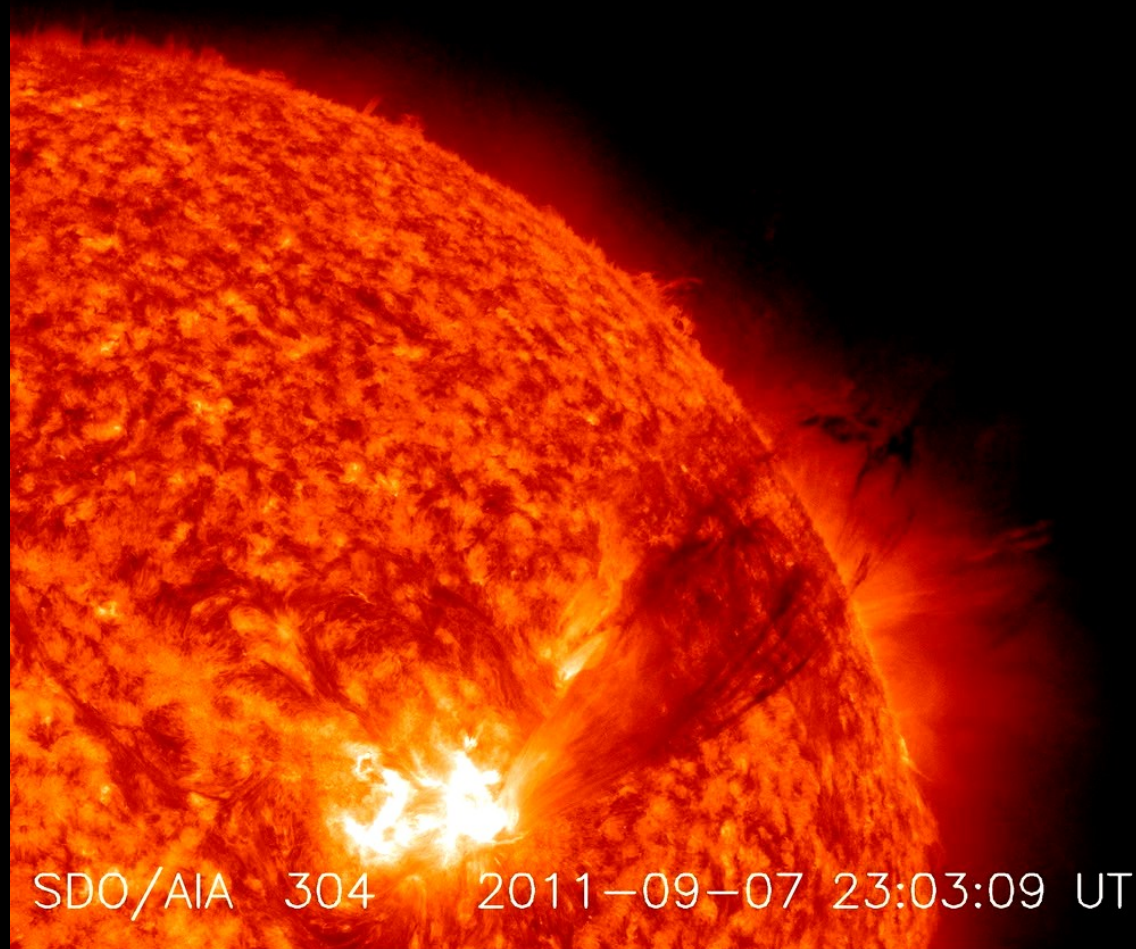
www.helioviewer.org



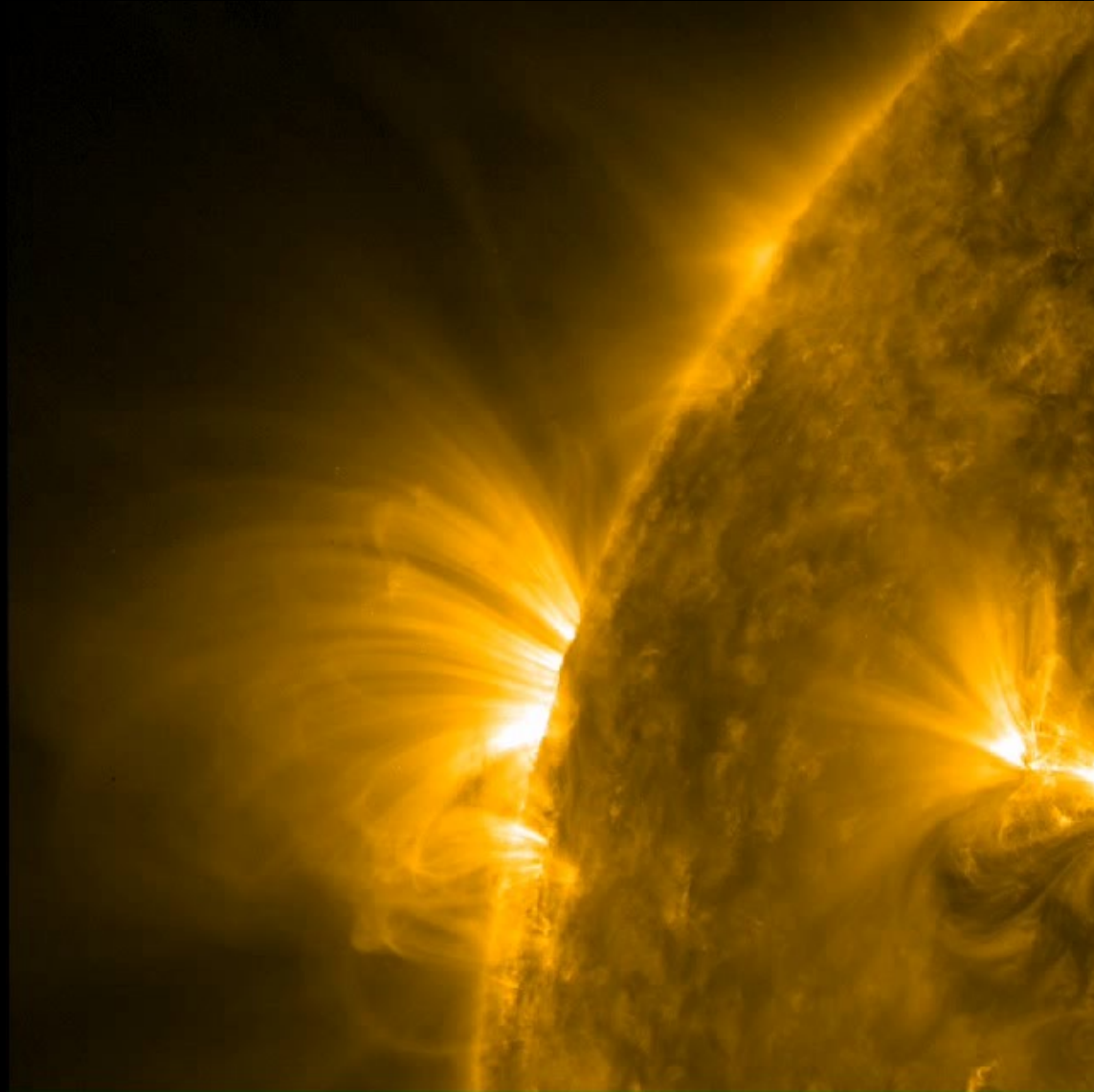
Estrella con personalidad magnética



Eyecciones de masa coronal (CME)



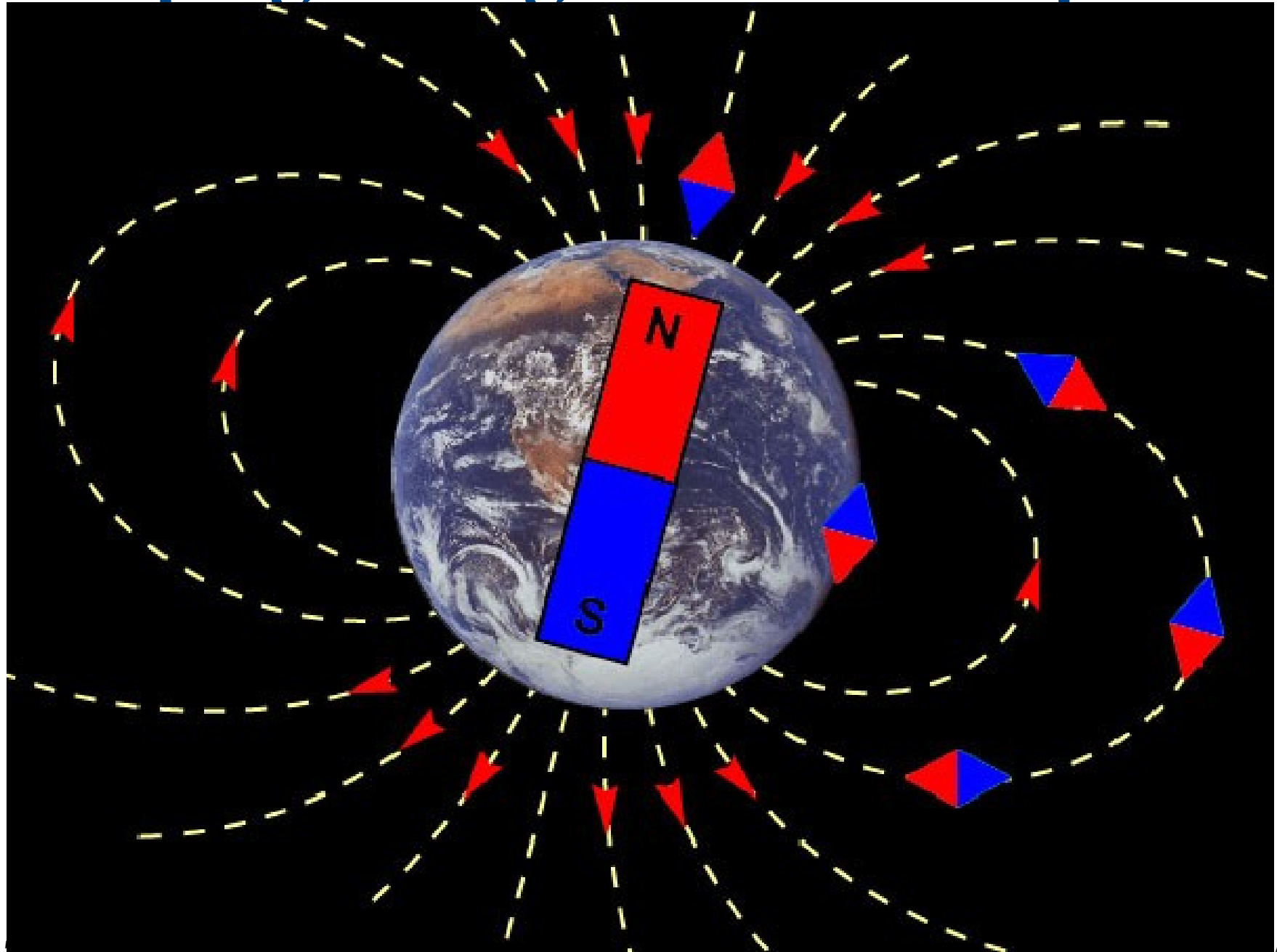
en el espacio interplanetario (iCME)

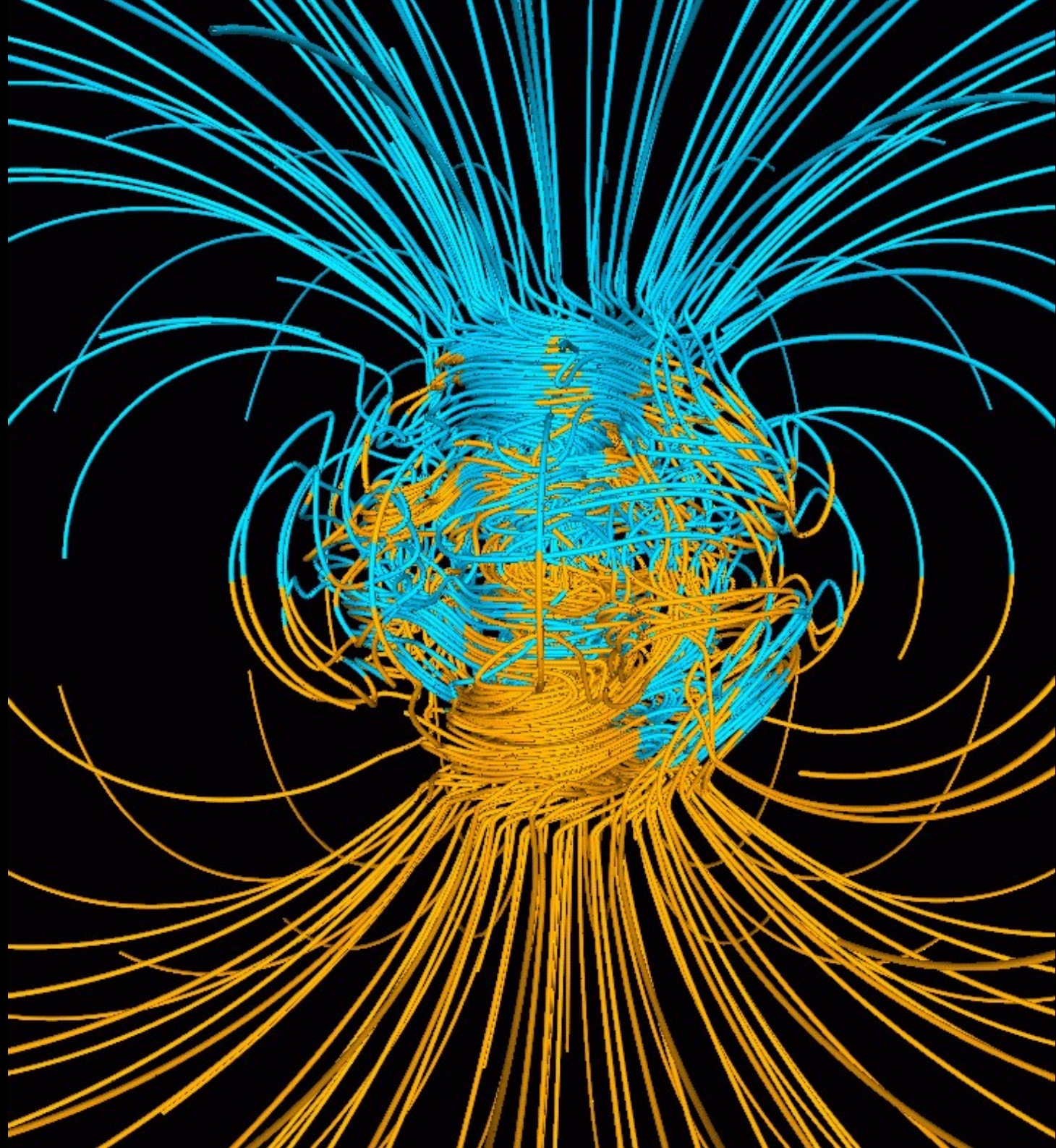


La Tierra



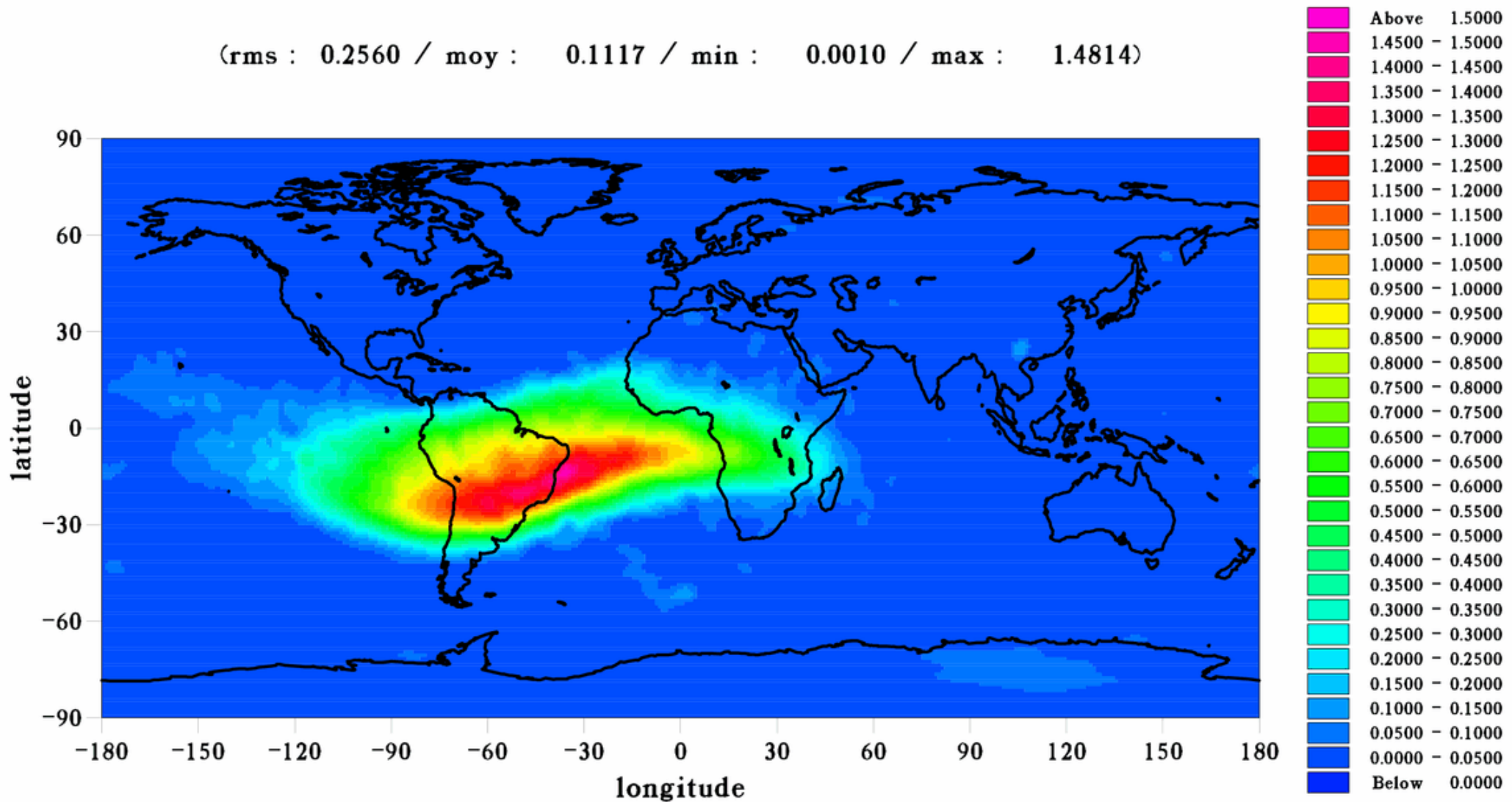
Campo geomagnético: el “dipolo”





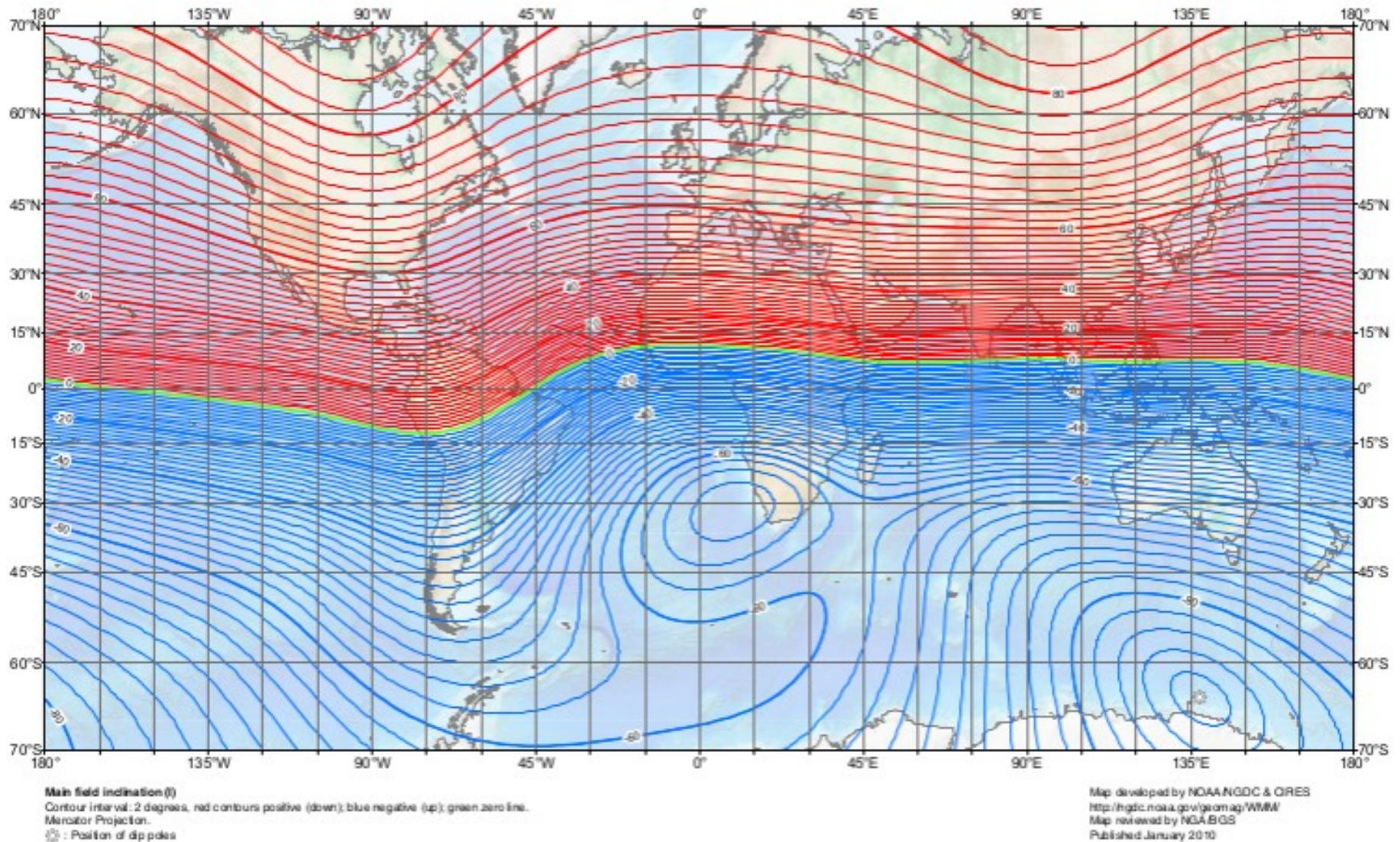
Anomalía del Atlántico Sur

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



Campo geomagnético: el “dipolo”

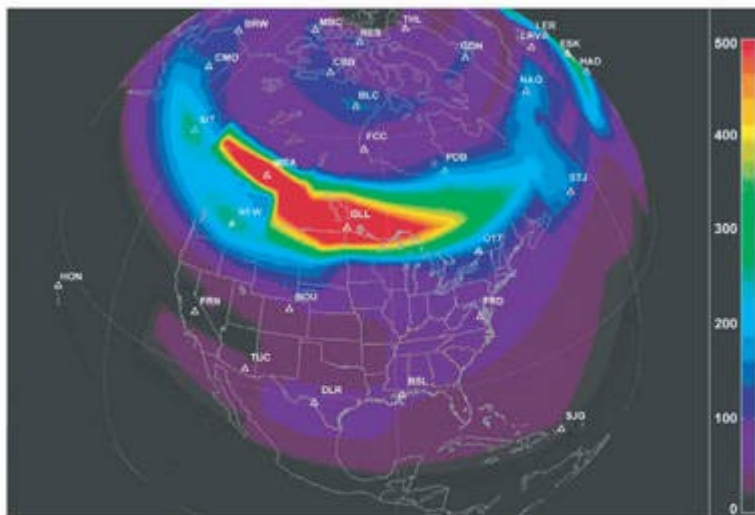
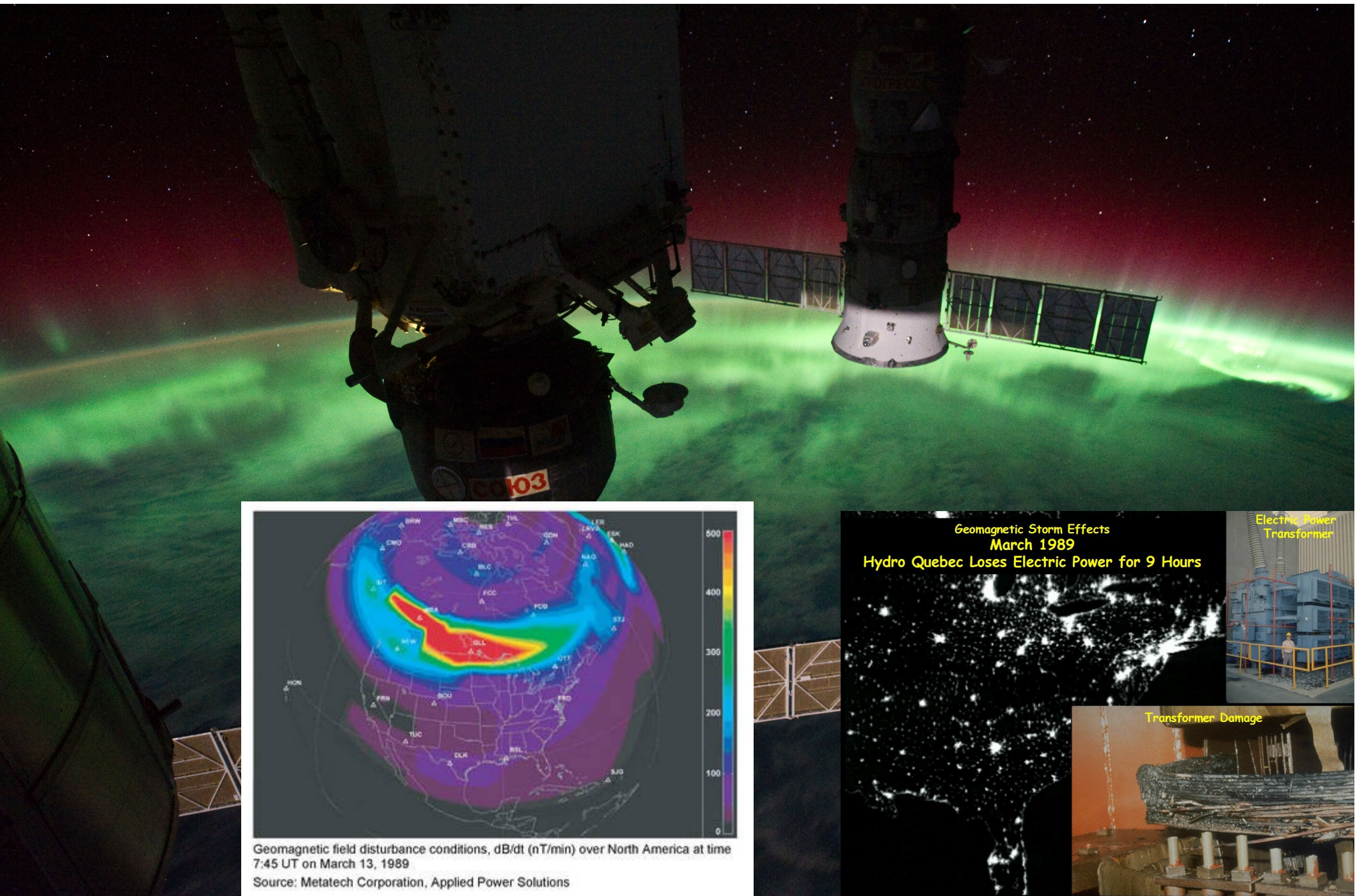
US/UK World Magnetic Model -- Epoch 2010.0
Main Field Inclination (I)



Interacción Solar



Clima Espacial



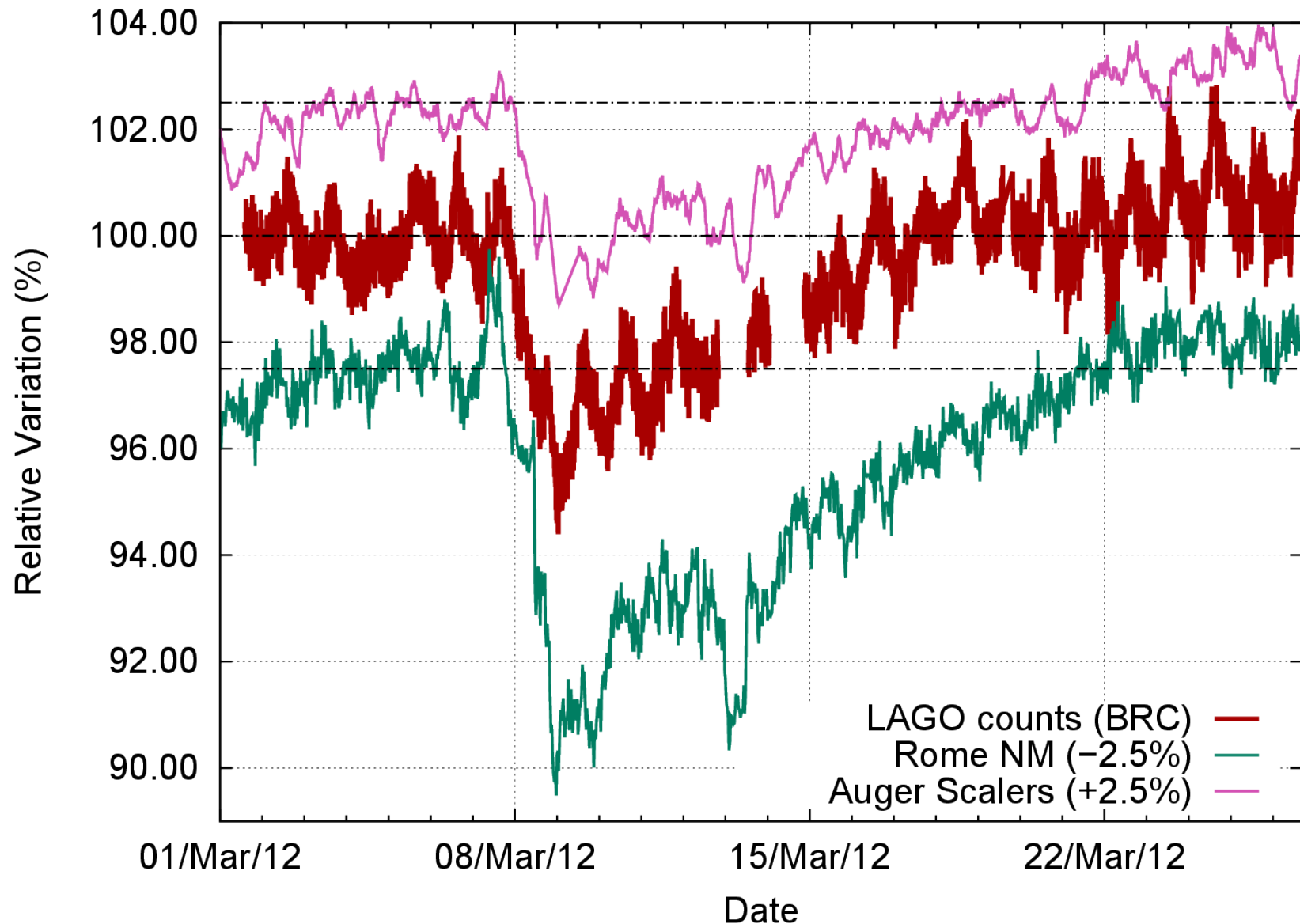
Geomagnetic field disturbance conditions, dB/dt (nT/min) over North America at time 7:45 UT on March 13, 1989

Source: Metatech Corporation, Applied Power Solutions

Geomagnetic Storm Effects
March 1989
Hydro Quebec Loses Electric Power for 9 Hours



El proyecto LAGO Solar



Interacción con la atmósfera



Blindaje atmosférico



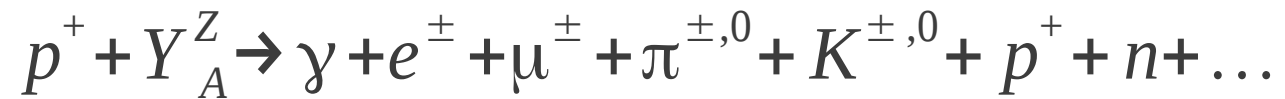
1 atm = 1033 g/cm² ~ 91 cm Pb

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

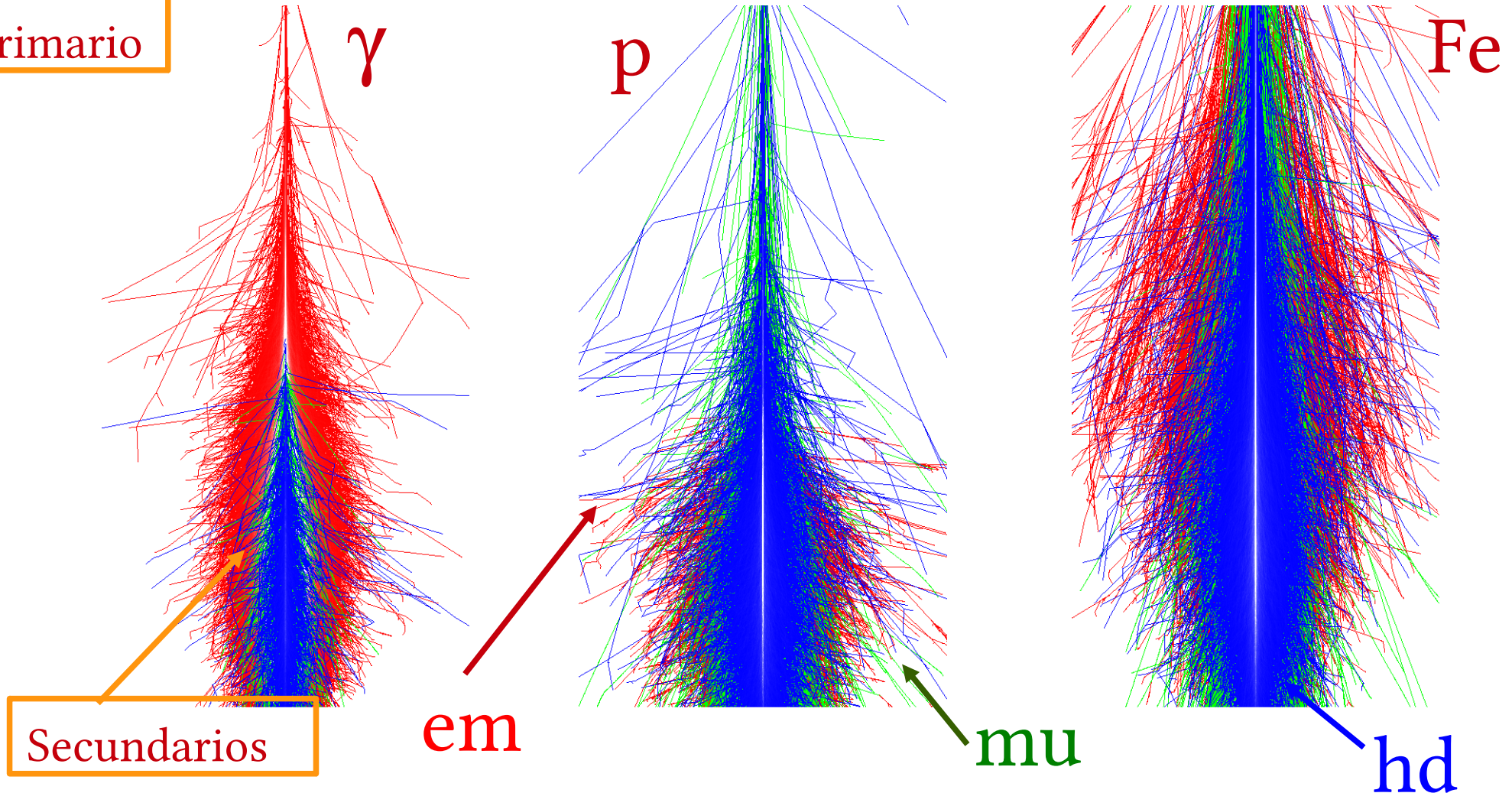
$$X(l) = \int_l^{\infty} \rho(l') dl'$$

Lluvias Atmosféricas Extendidas

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



Primario

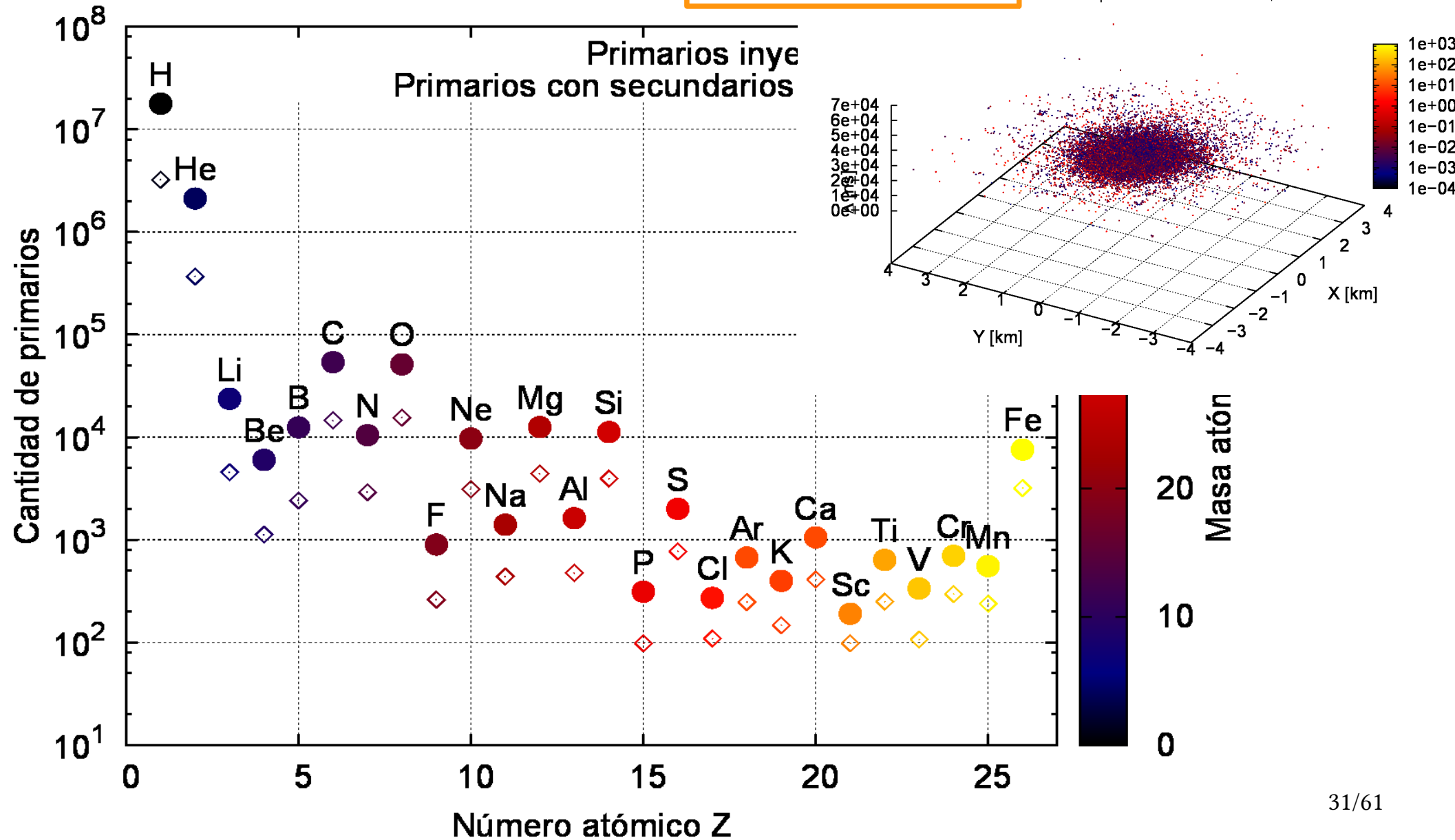


Desarrollo dependiente de la composición del primario

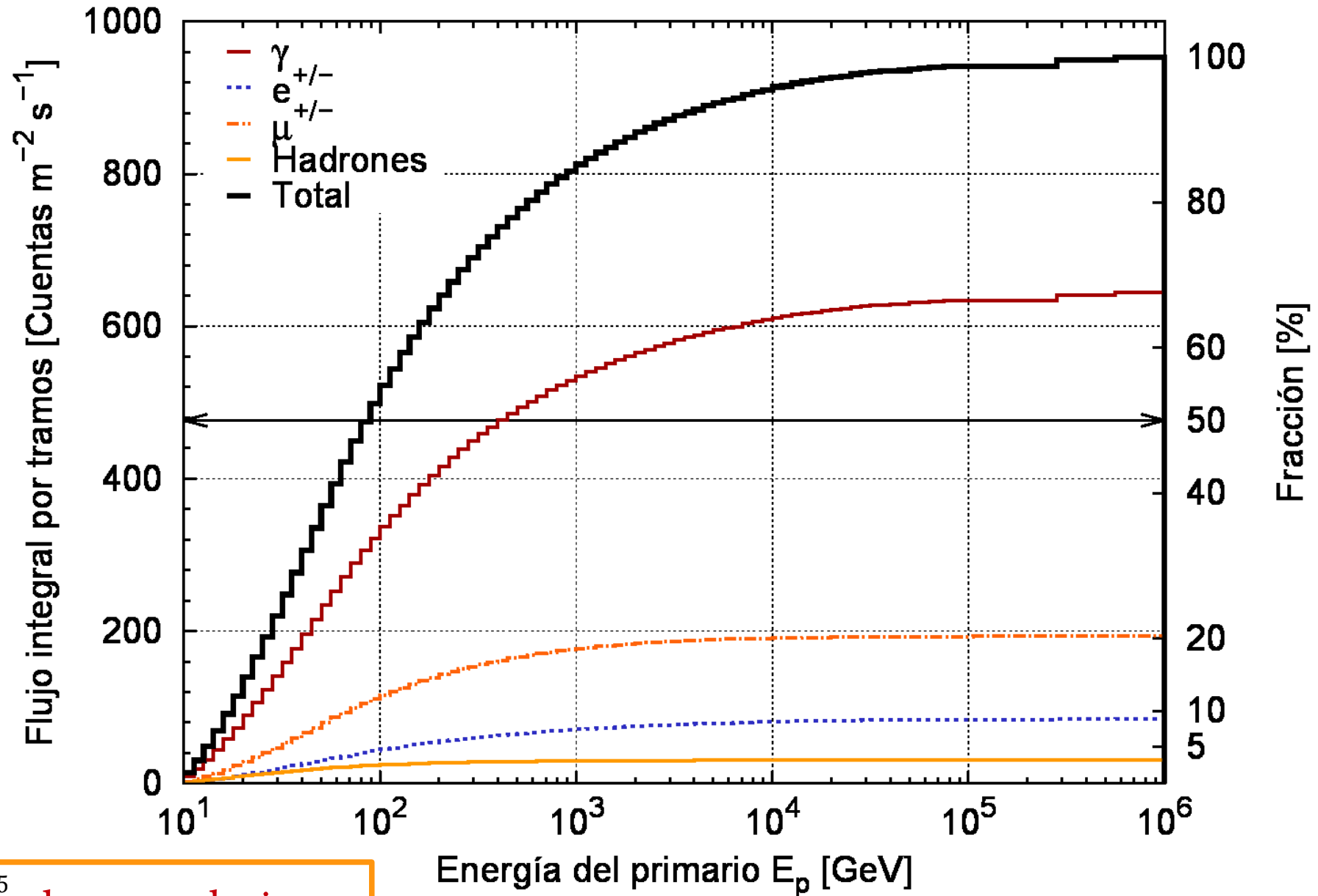
Primarios y secundarios

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

$^1\text{H}_1$, E=425 TeV, $\theta=37^\circ$, $\phi=168.7^\circ$



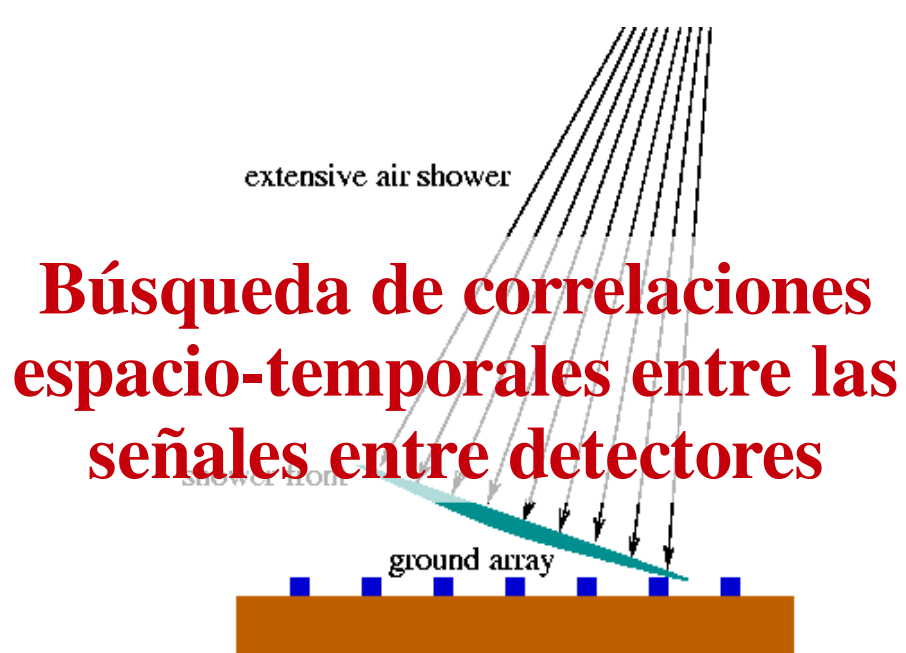
Primarios y secundarios



Detectores



Técnicas de detección en Superficie



Modo "Lluvia"

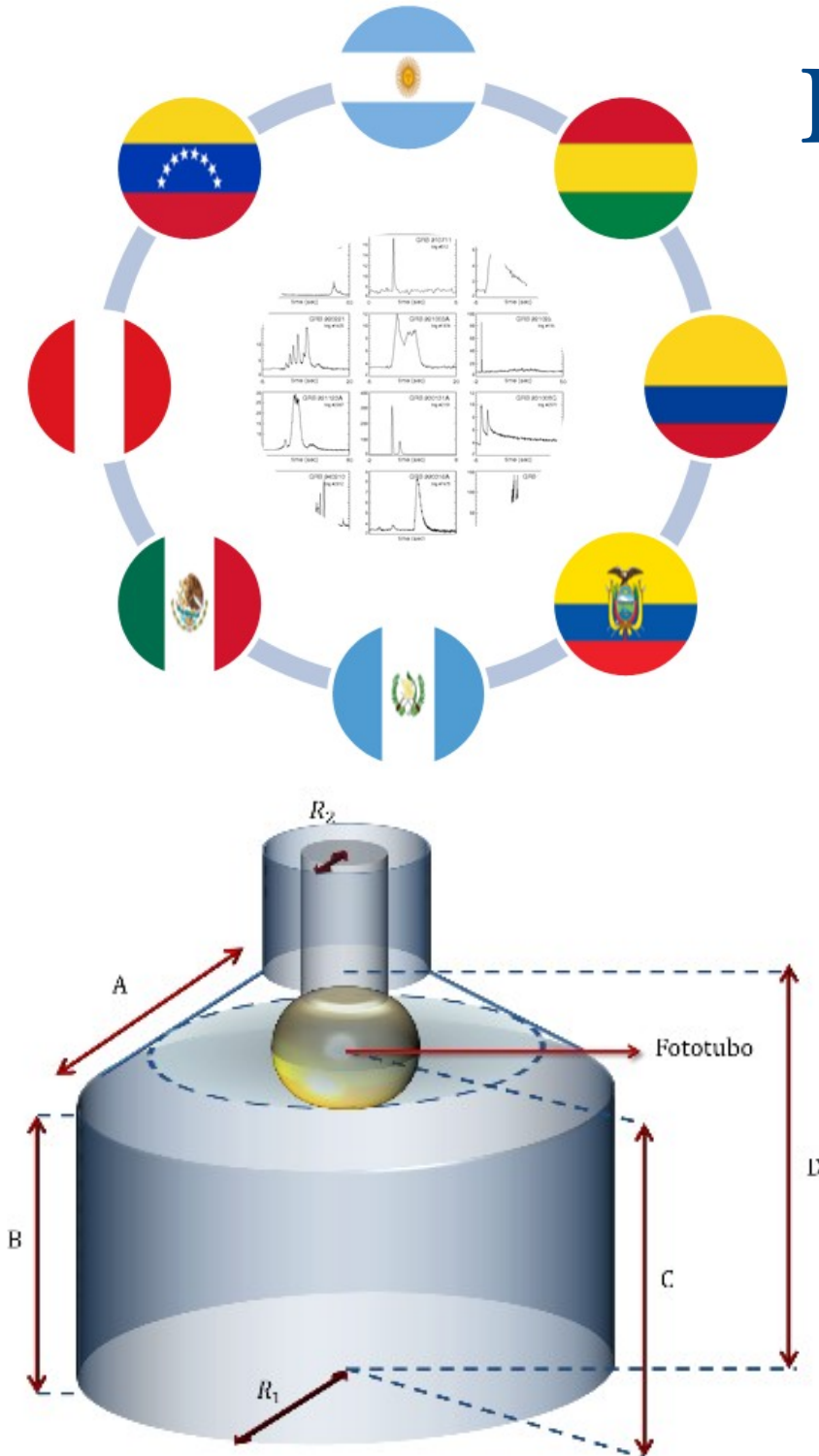


Modo "Conteo"

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

LAGO

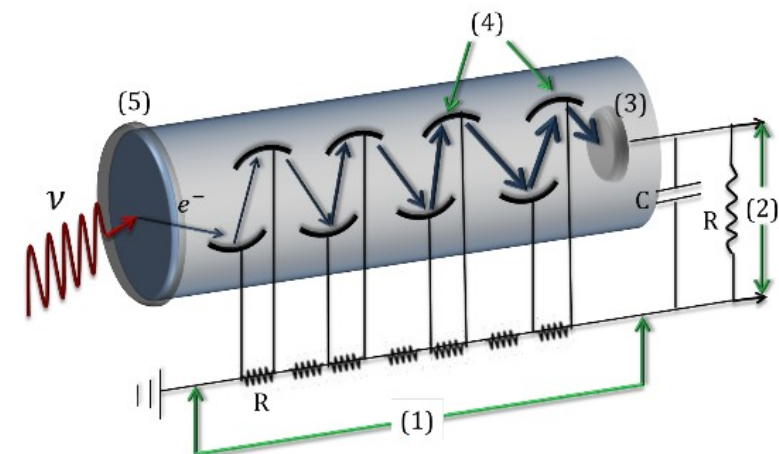
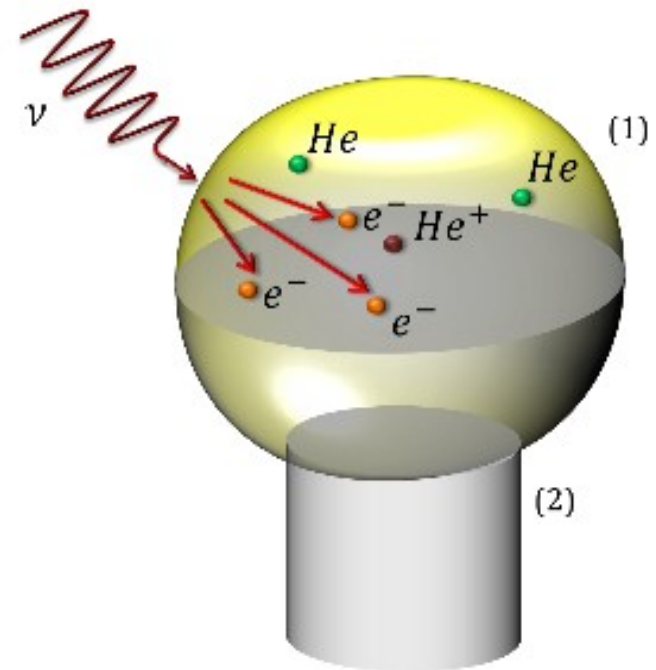
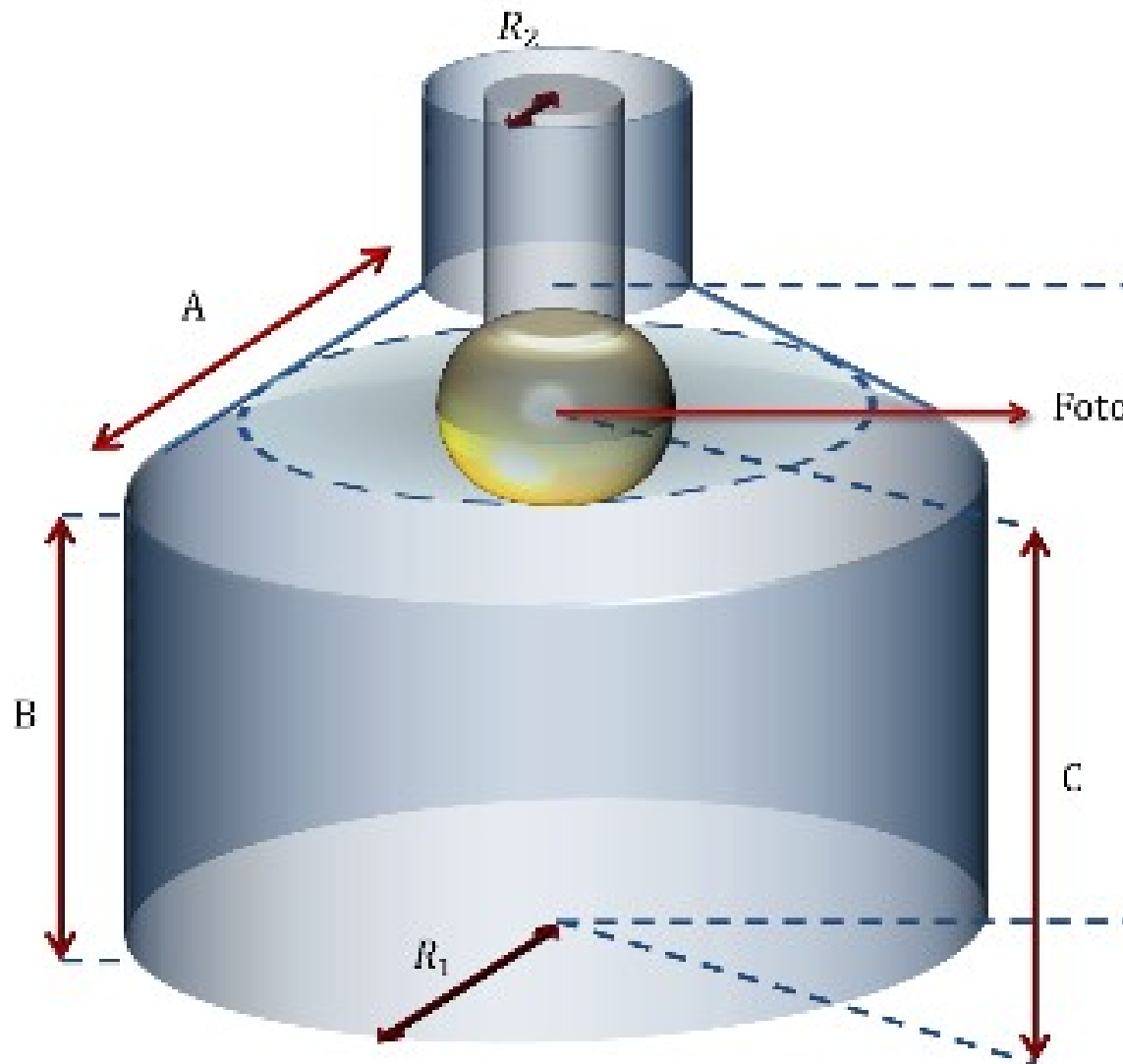
- 8 países
- 80 científicos y estudiantes
- Detección en tierra componente de alta energía de GRBs
- Flujo de secundarios como marcador de la Actividad Solar
- Tanques comerciales de 2 a 10 m³ de capacidad
- Recubrimiento interior
- Fototubos para detectar la radiación Cherenkov



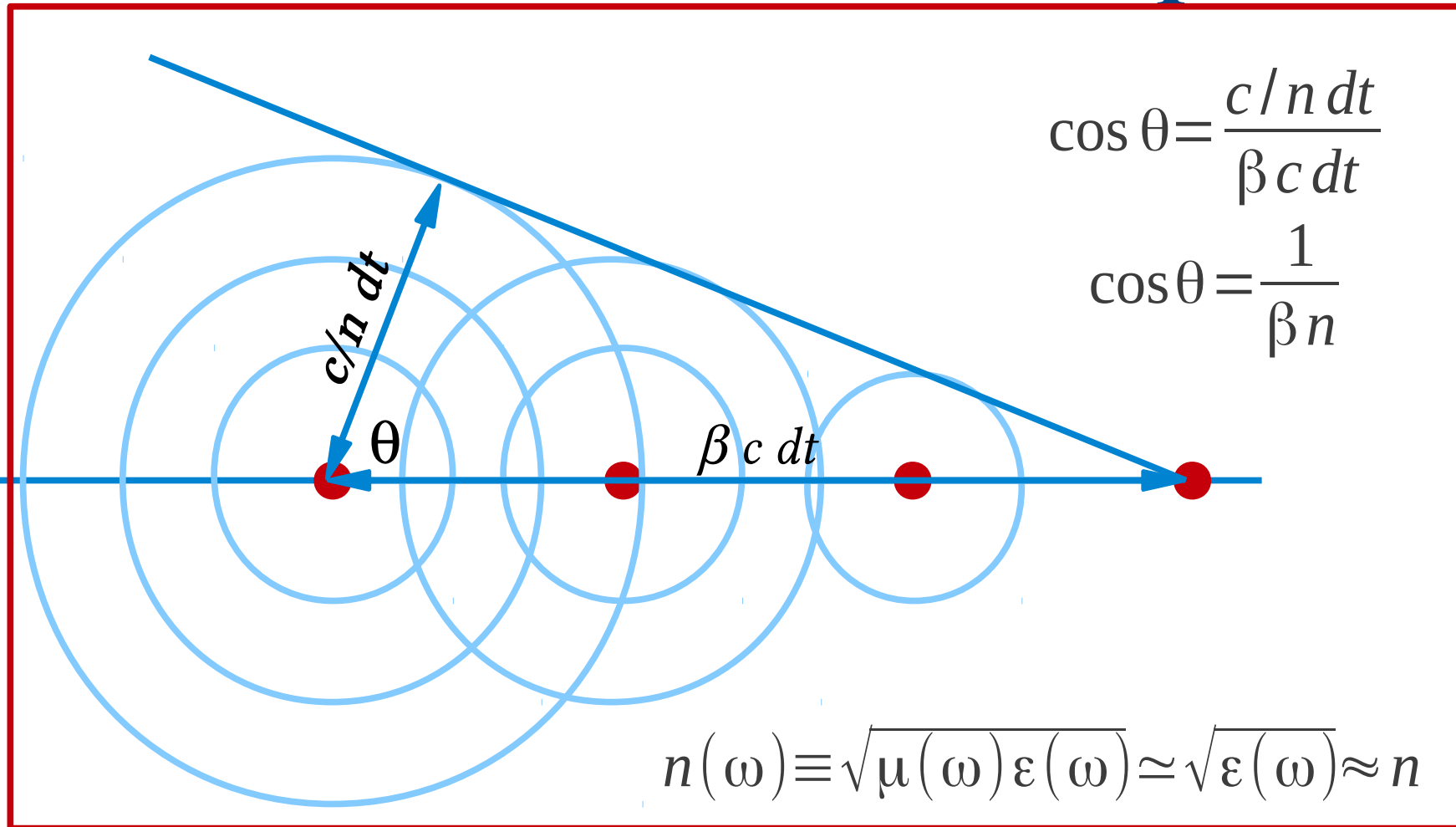
Los sitios LAGO



Detectores Cherenkov en Agua (WCD)



Efecto Cherenkov simplificado

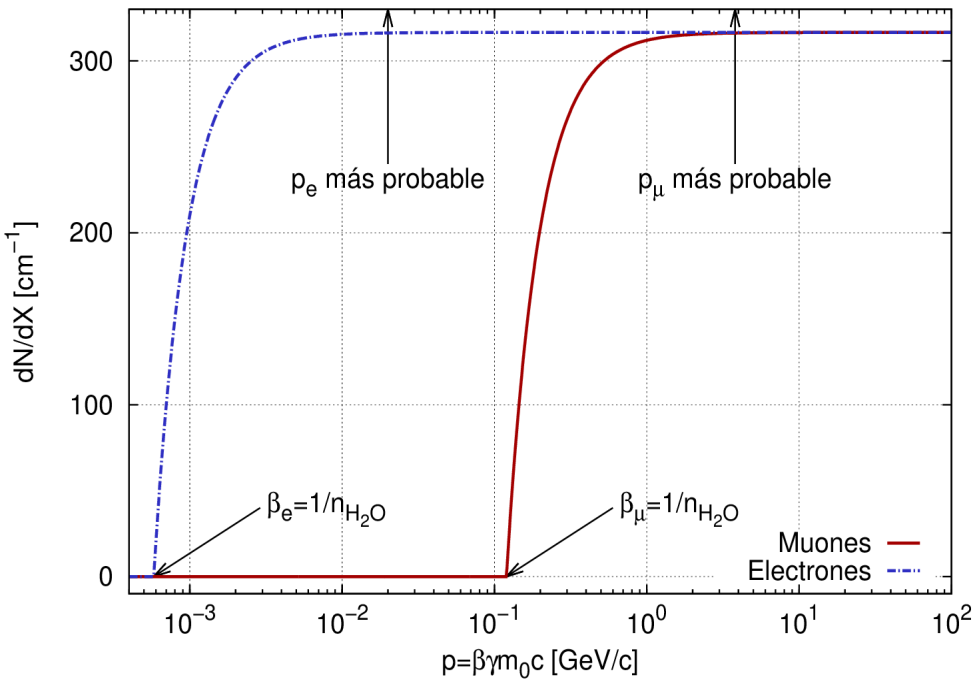


- Medio material con índice de refracción $n = \text{cte}$
- Partícula cargada con velocidad $\beta c > (c/n)$

Barrera del sonido



Efecto Cherenkov



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

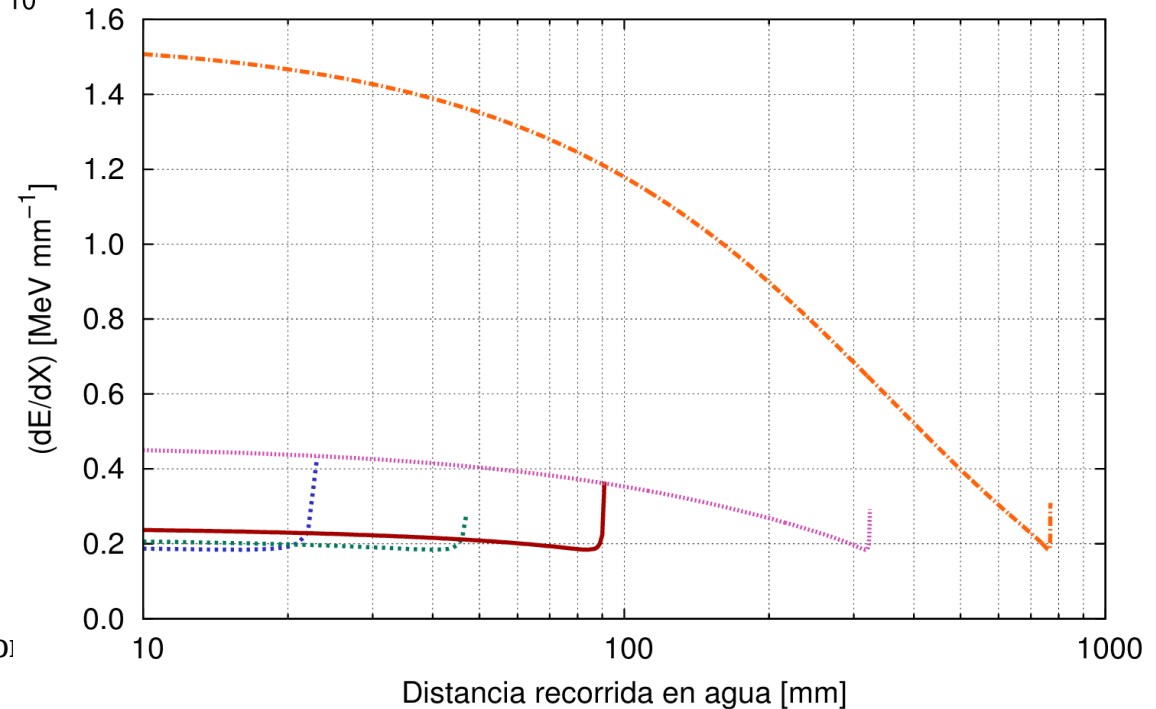
$$\frac{\Delta N}{\Delta L} = 2 \pi \alpha_{EM} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)$$

5 MeV 10 MeV 20 MeV 100 MeV 500 MeV

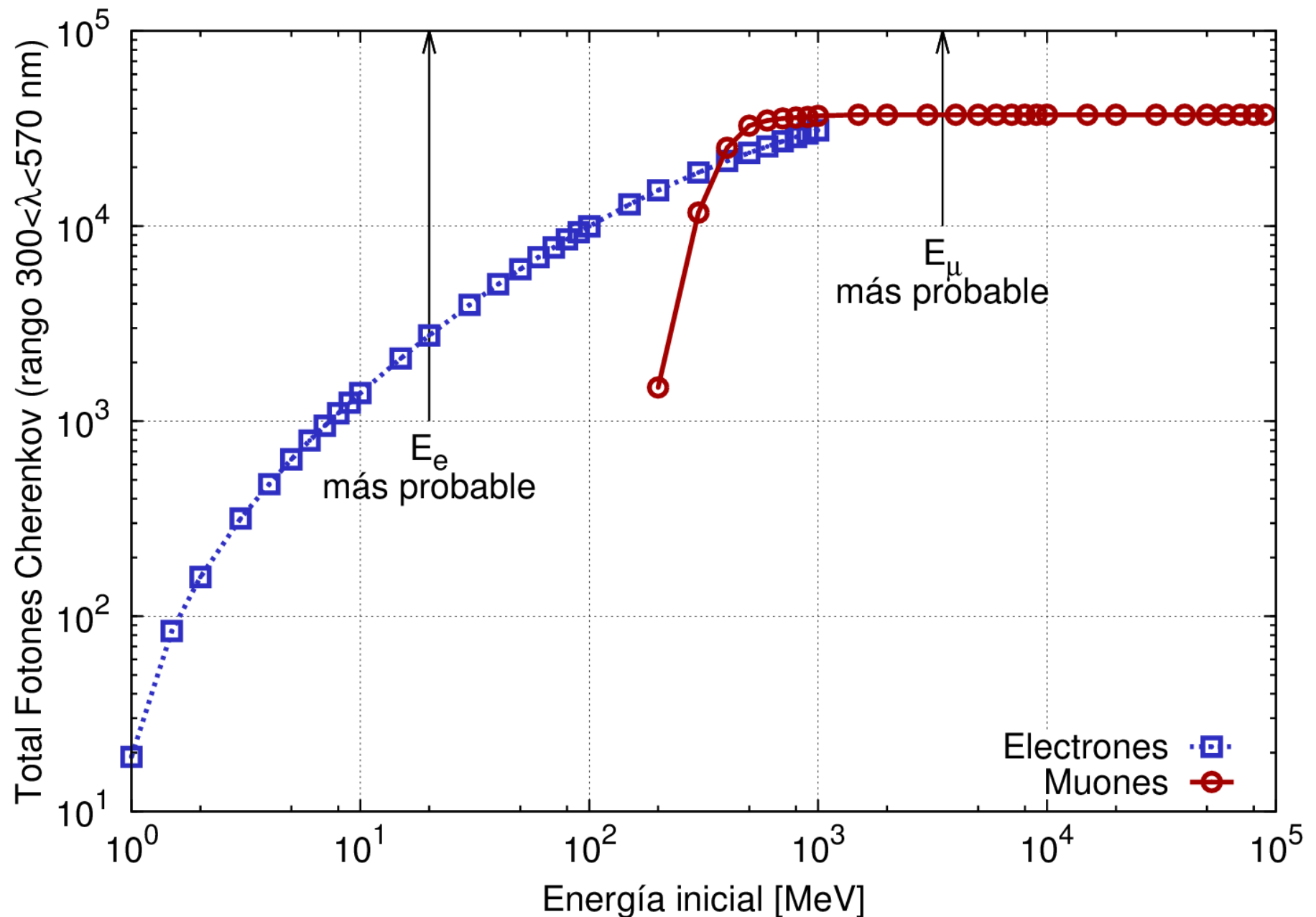
Fotones Cherenkov

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

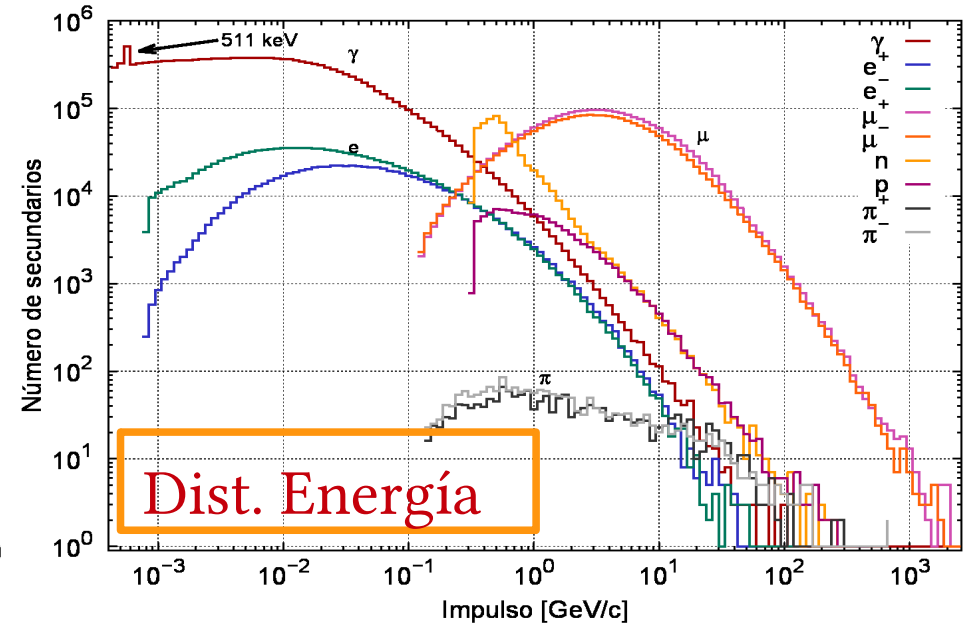
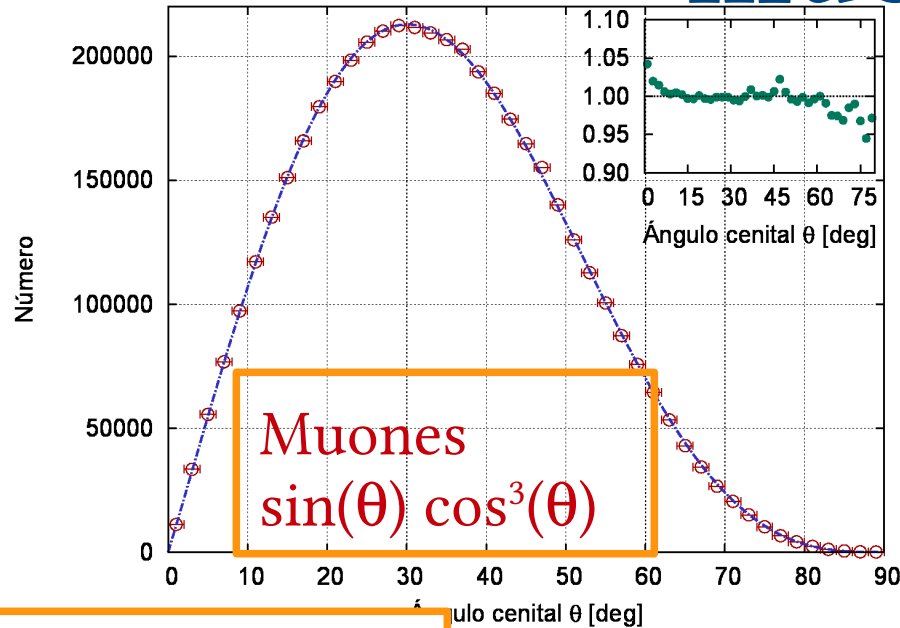
$$\left(\frac{dE}{dL}\right) = f(E)$$



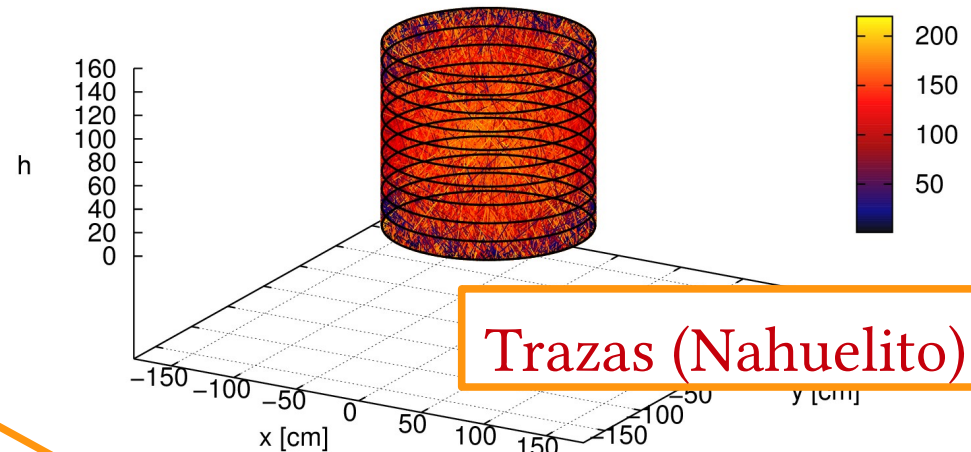
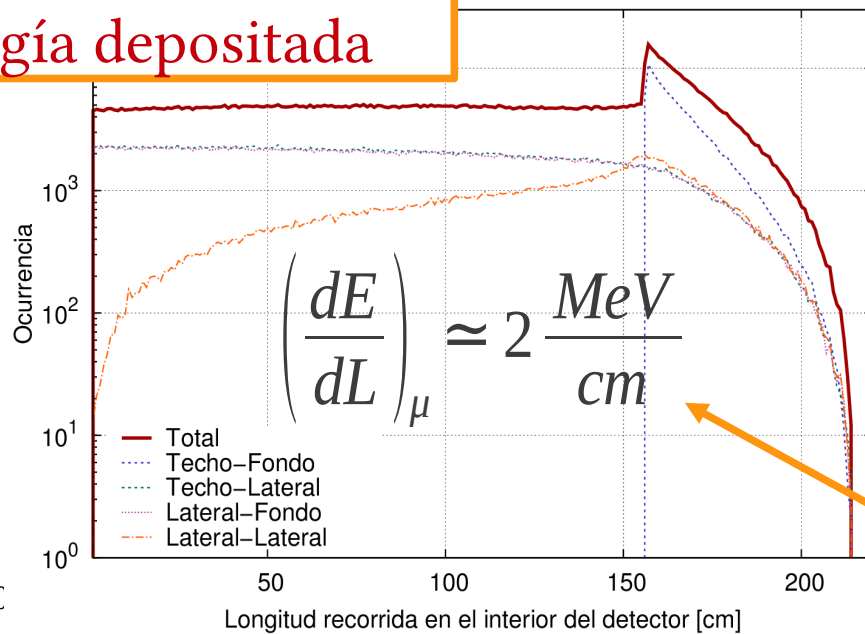
Producción Cherenkov



Respuesta del detector para muones



Energía depositada

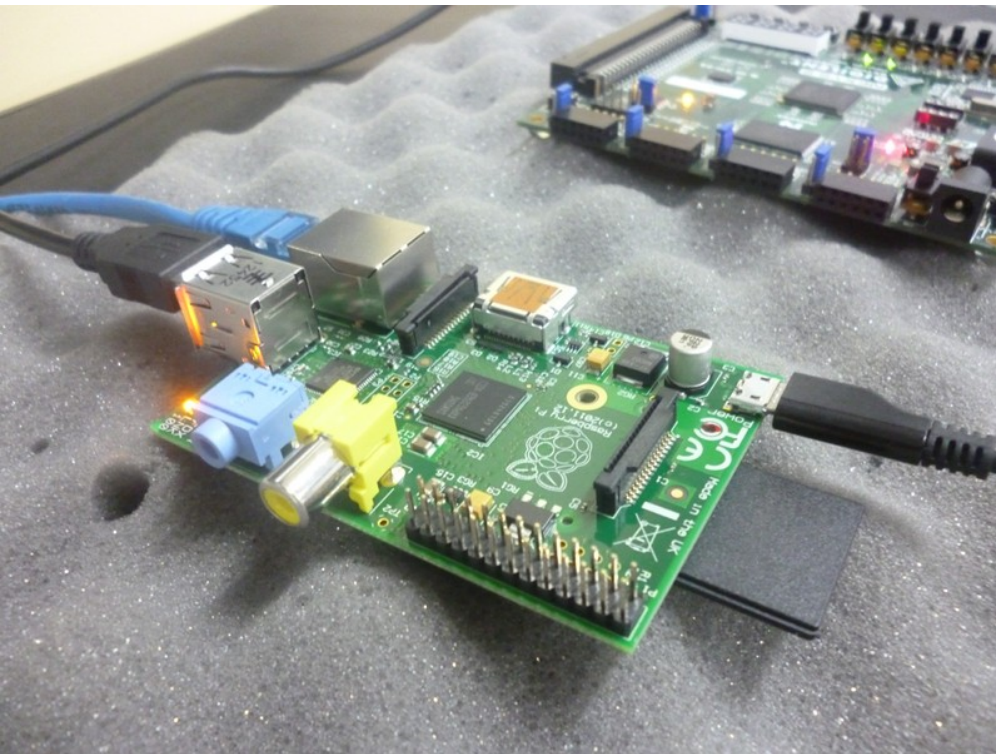


MIP (Min. Ionization Particle)

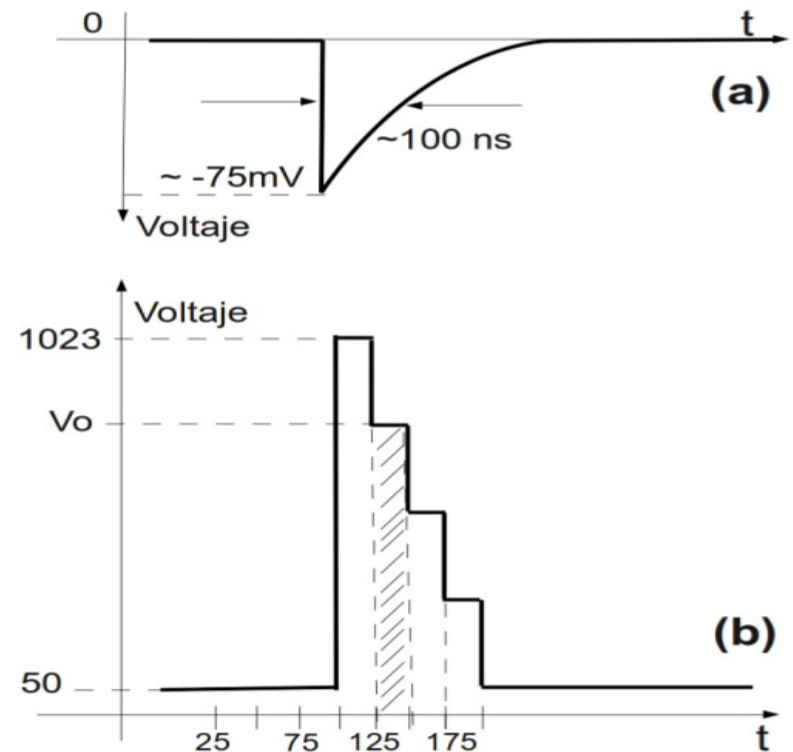
Datos

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)

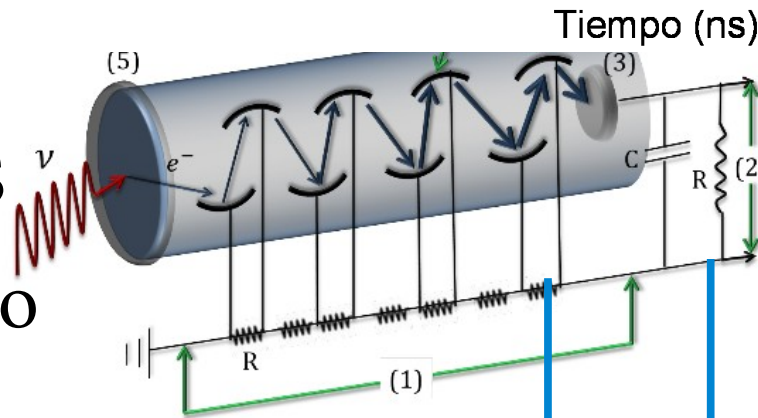
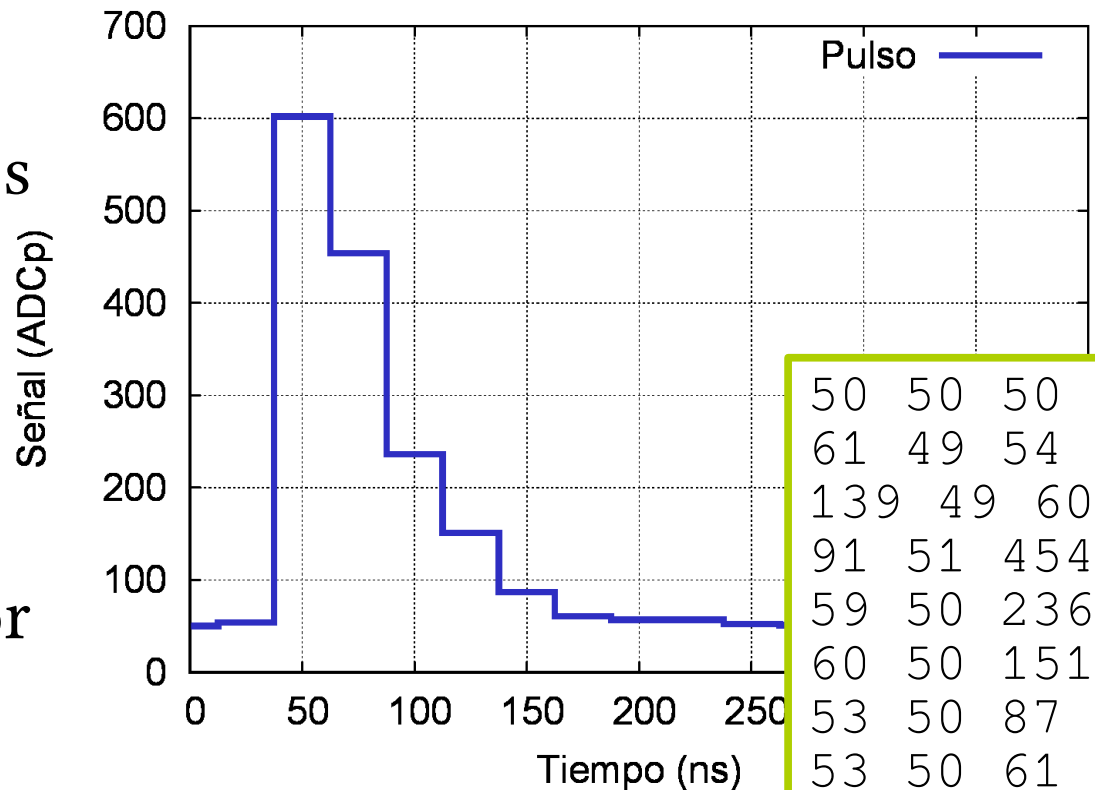


Vida me



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

Tag temporal y número de pulso

#	t	4	30008562
#	c	663486982	

Definiciones

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

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

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

- Pulso canal j

$$V_j(t)$$

- Pico

$$P_j = \text{máx} [V_j(t) - 50]$$

- 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)

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

```
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
```

```
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
```

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

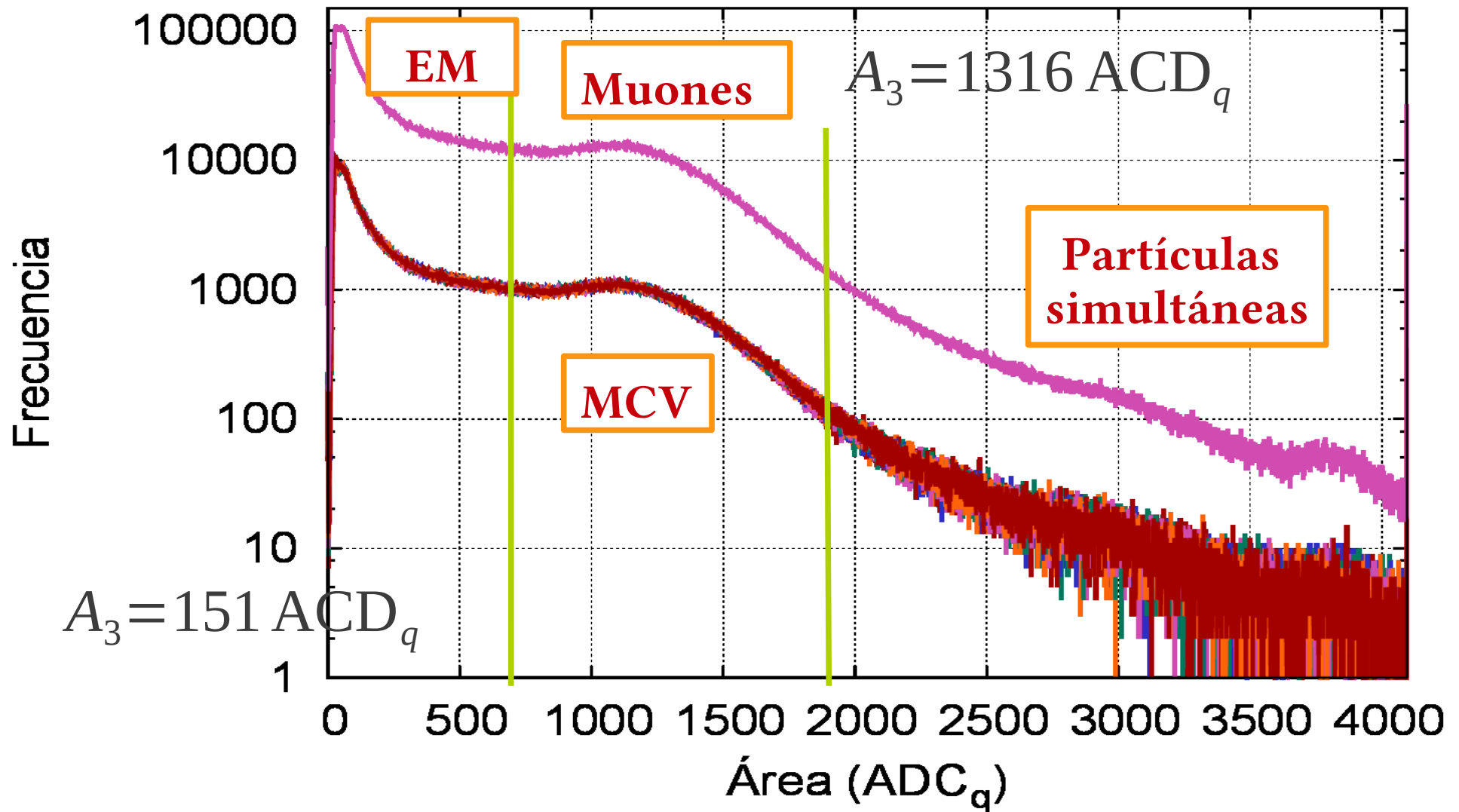
$$P_3 = 117 \text{ ADC}_p$$

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

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

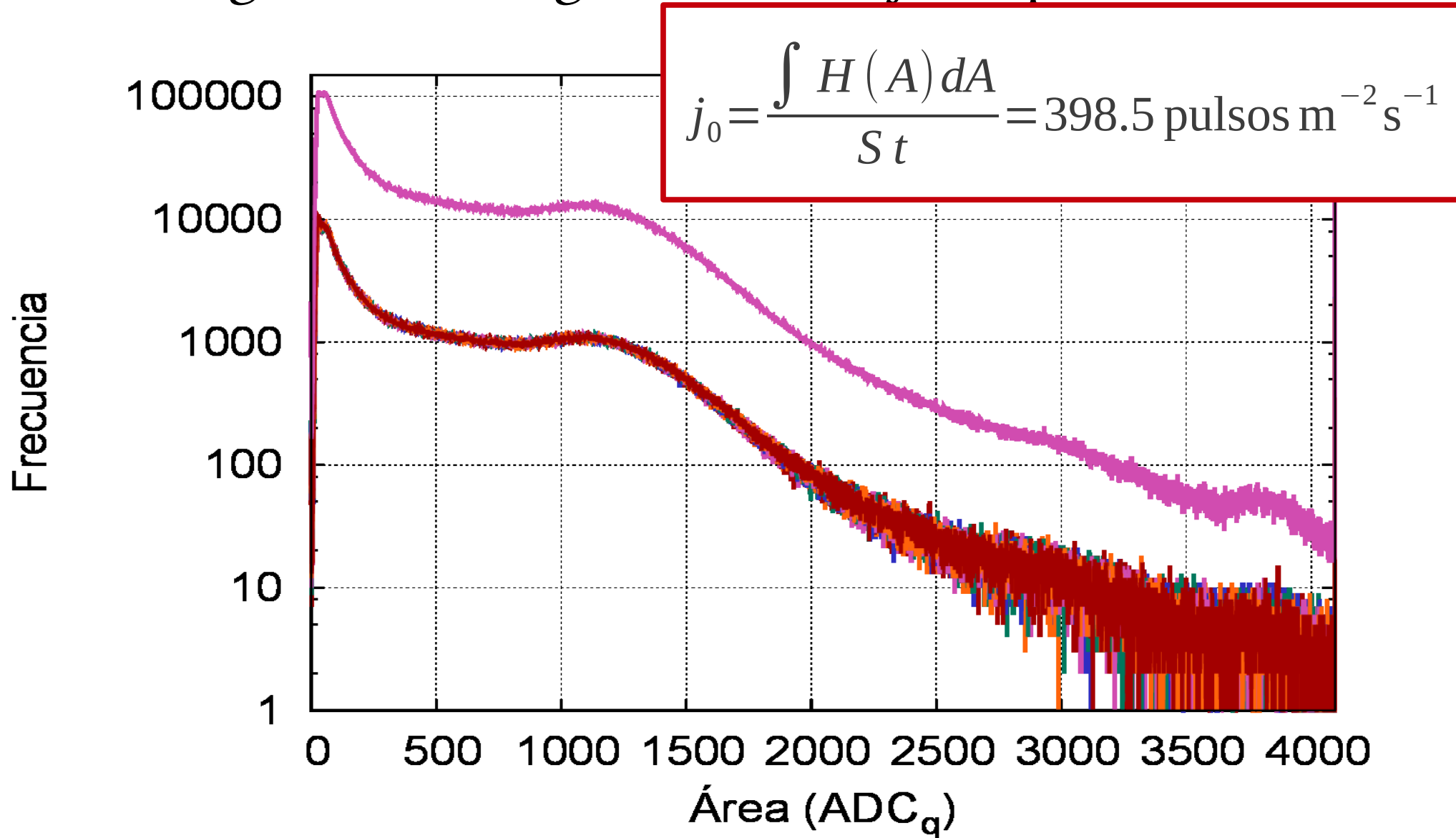
Histograma de áreas

- Área A de cada pulso $\rightarrow$ 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 (Δt)
 - No tener pulsos en tiempo Δt , recibir el 1^{er} pulso en $\Delta t + dt$

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

Distribución
Exponencial

- Propiedad: “falta de memoria” (memorylessness)

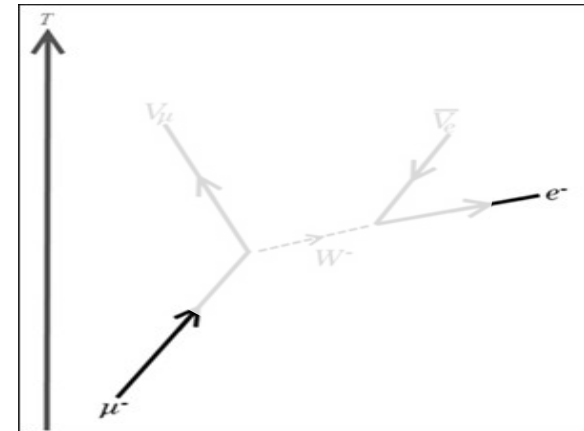
$$P(t > l + m | t > l) = P(t > m)$$

Decaimiento del muón

- Proceso electrodébil
- La vida del muón está “protegida” por la elevada masa de los mediadores W

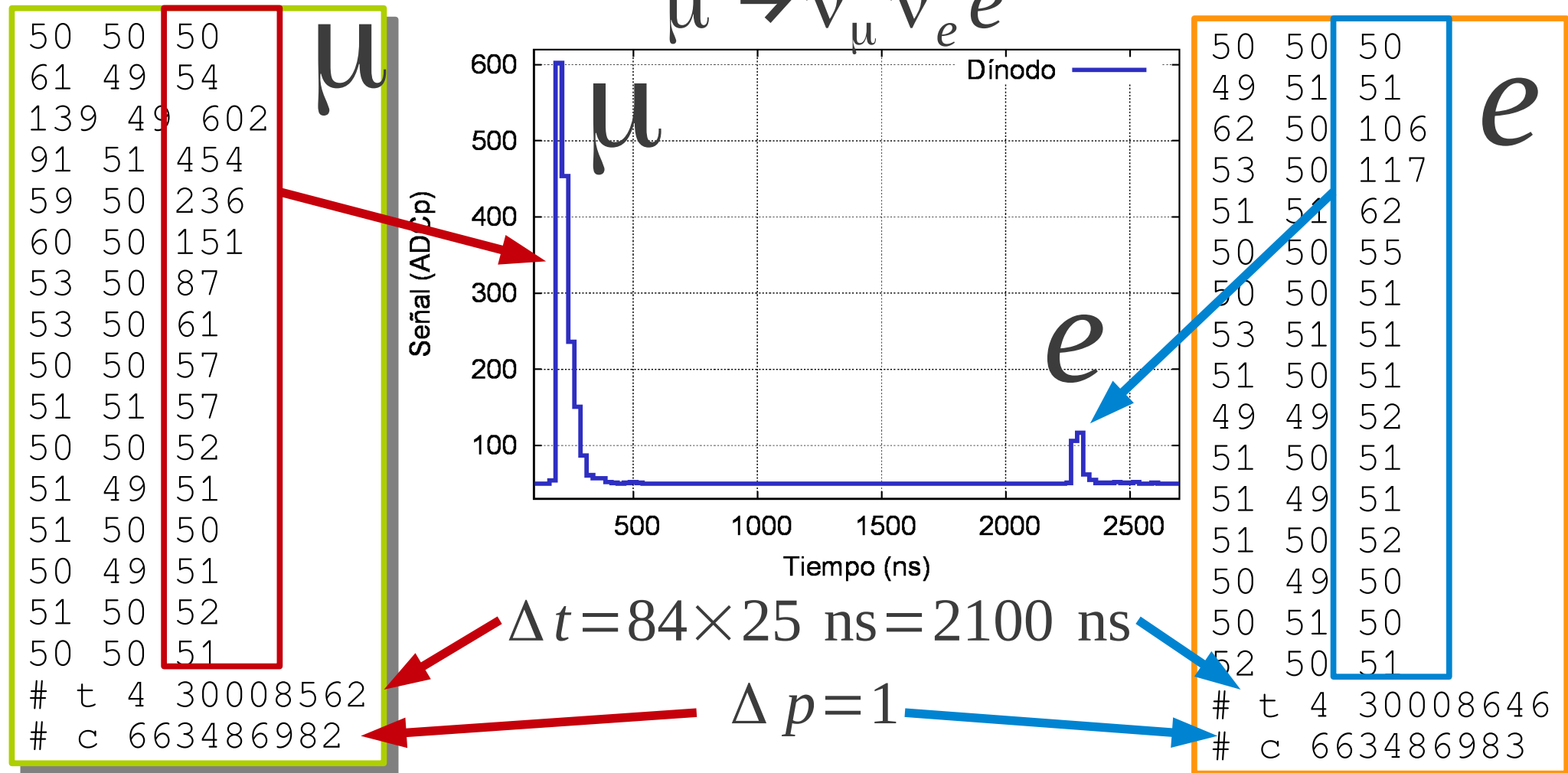
$$(\lambda_\mu)^{-1} \equiv \tau_\mu = (2197.03 \pm 0.04) \text{ ns}$$

- 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 Δt

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

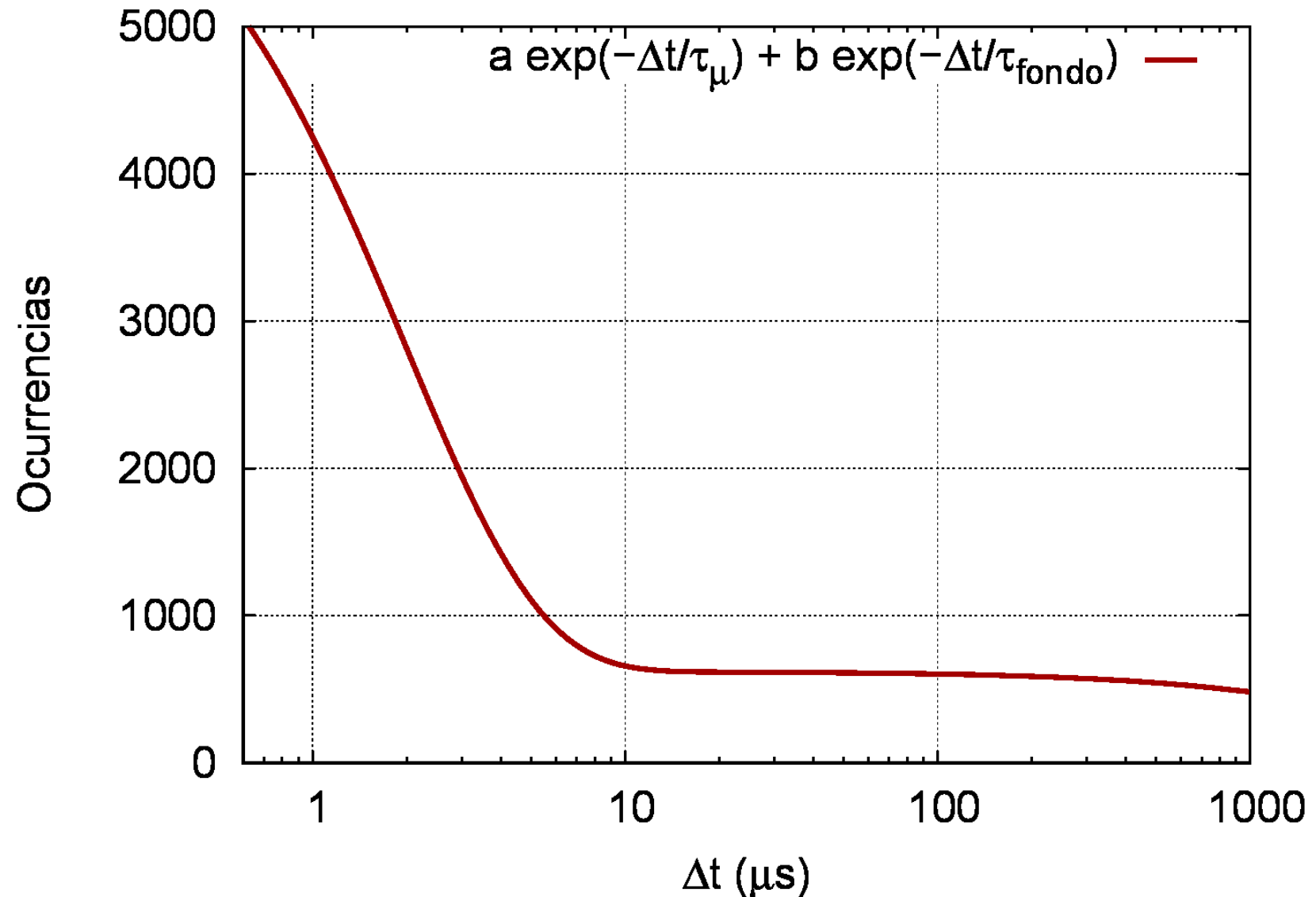
$$\left(\lambda_{\text{fondo}}\right)^{-1} \equiv \tau_{\text{fondo}} \simeq 2.5 \text{ ms} = 2.5 \times 10^3 \mu \text{ s}$$

- Decaimiento de los muones en el interior del detector

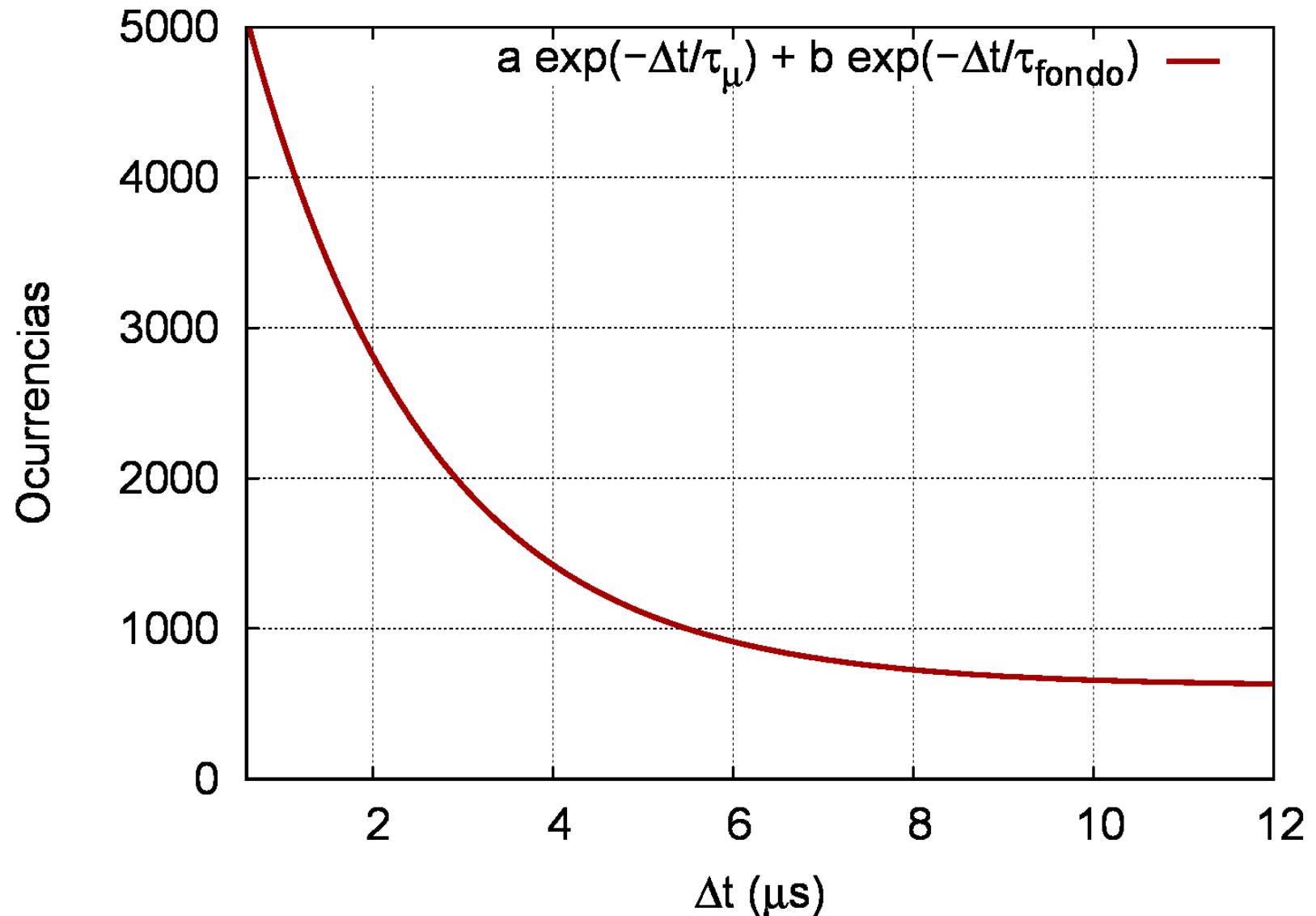
$$\left(\lambda_{\mu}\right)^{-1} \equiv \tau_{\mu} \simeq 2.2 \mu \text{ s}$$

- Tiempos característicos muy diferentes

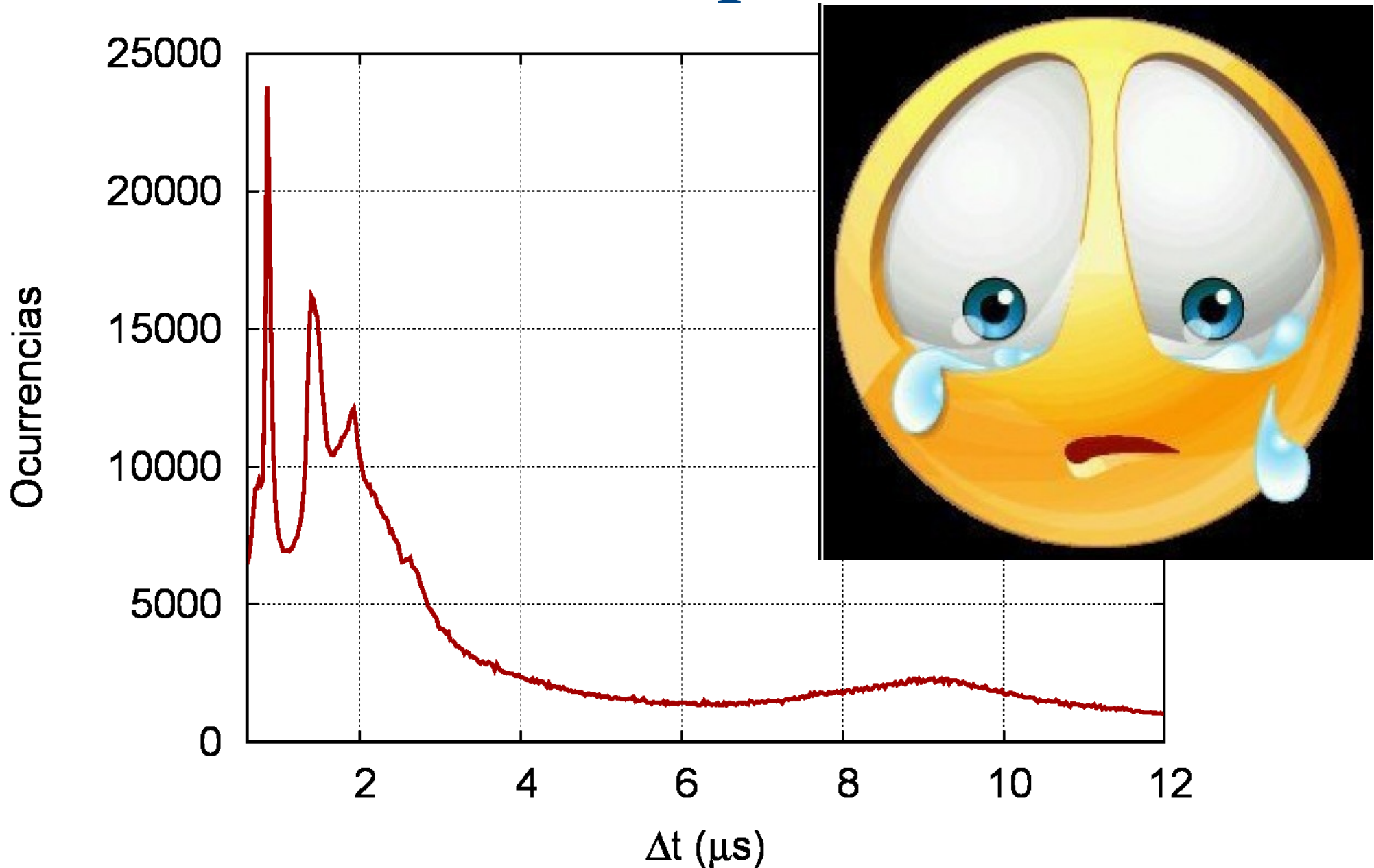
Suma de exponenciales



Nos concentramos en $\Delta t \sim \tau_\mu$



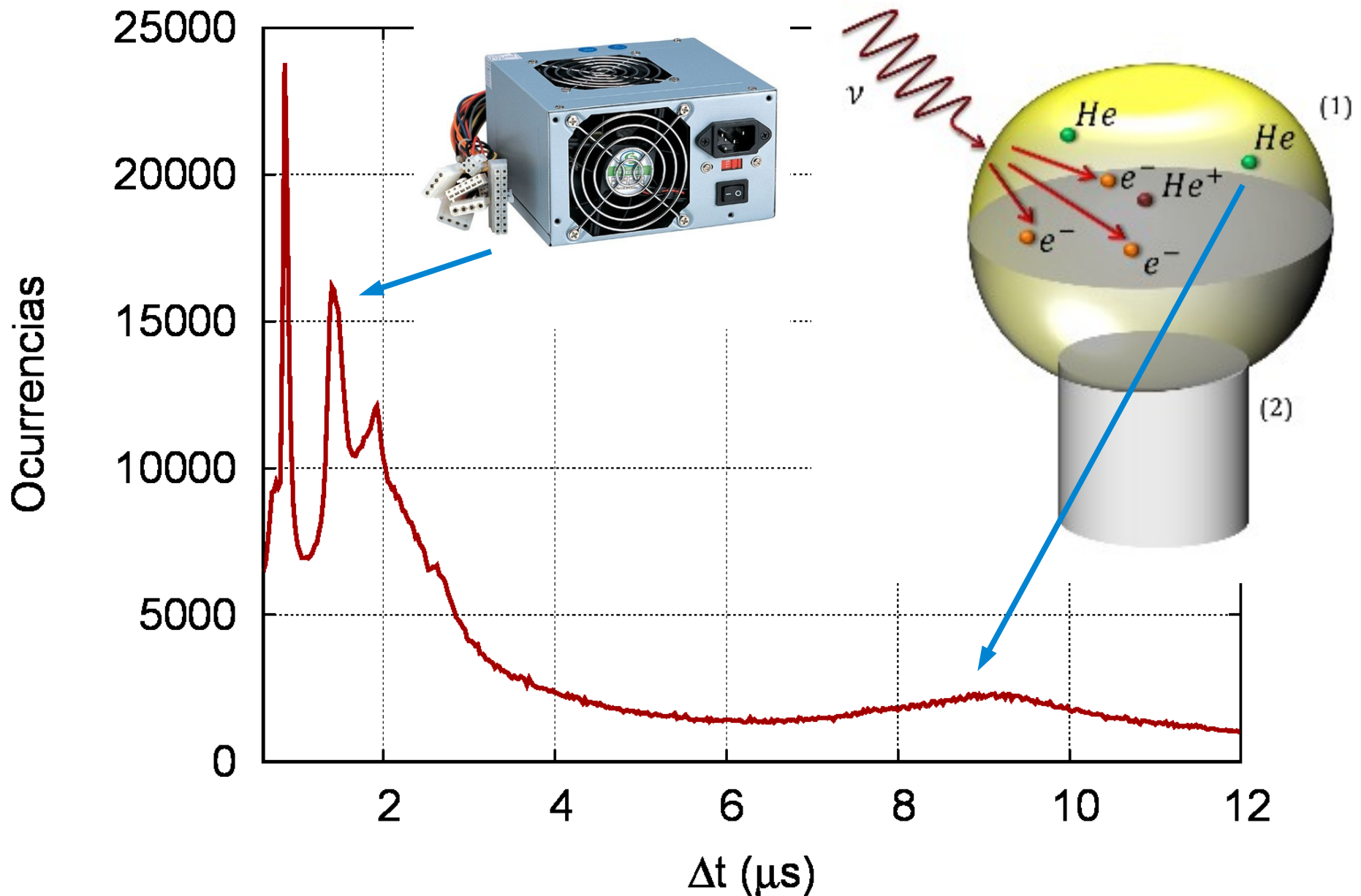
Teórica vs Experimental



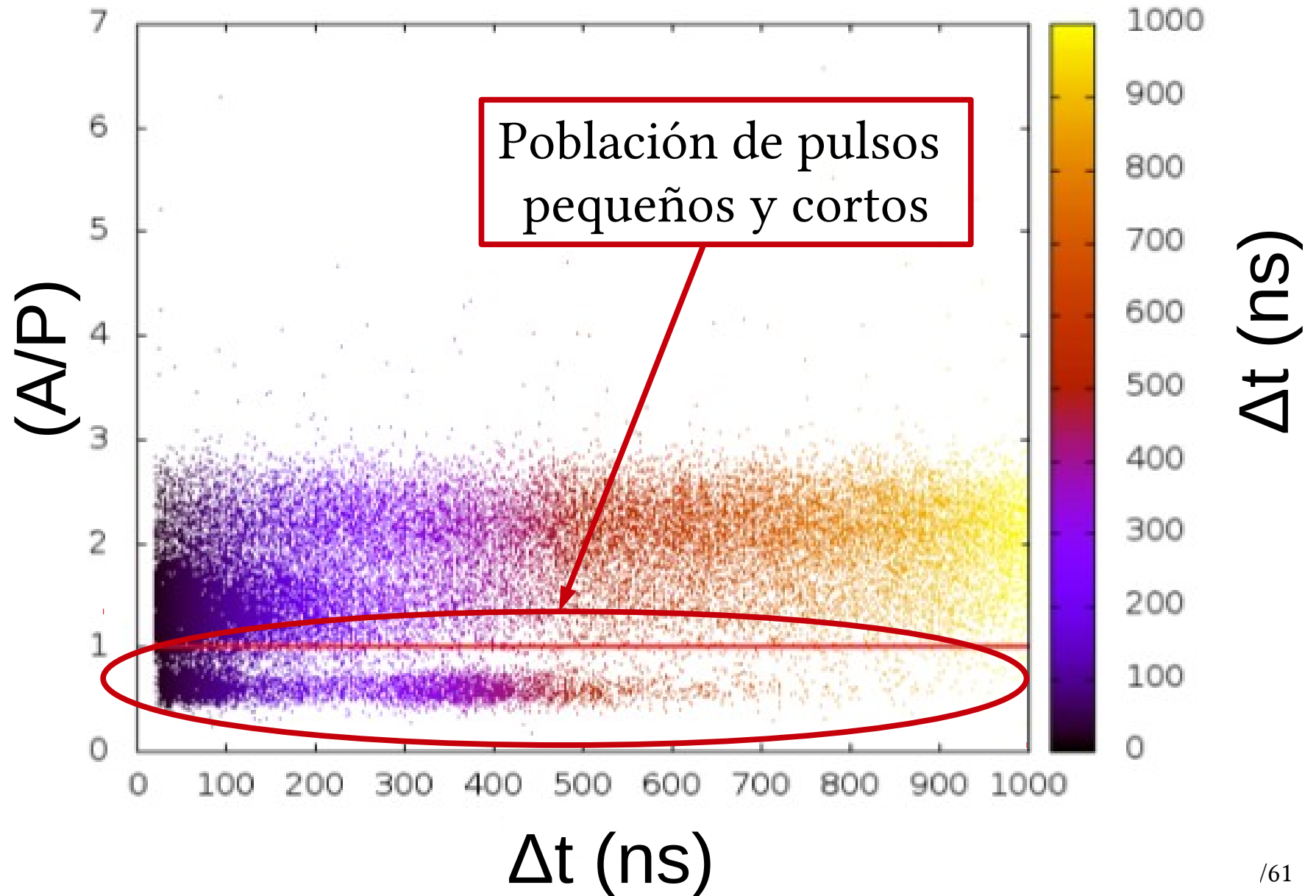
¿Qué significan esos picos?

- 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 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!!!

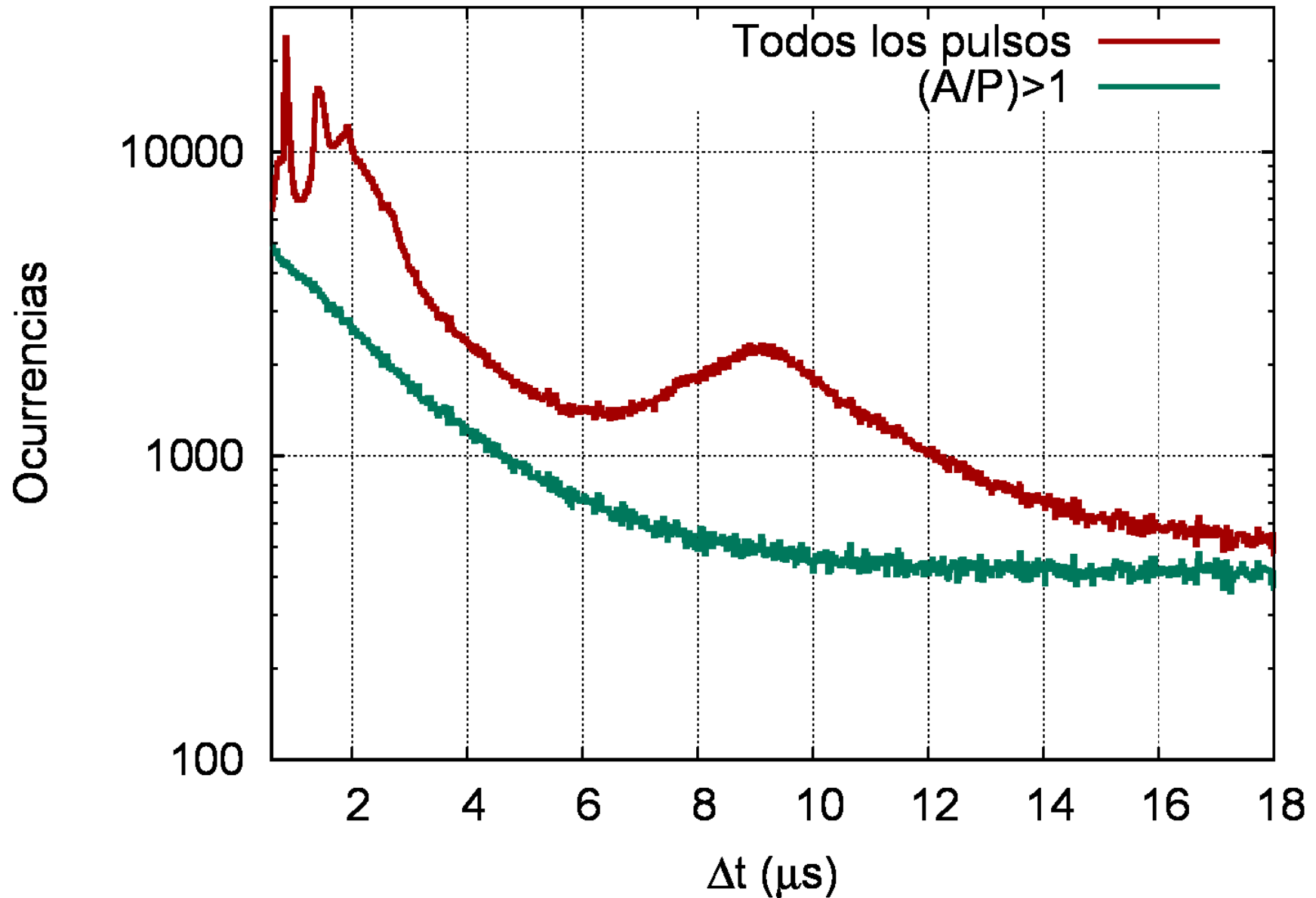
El experimento contraataca



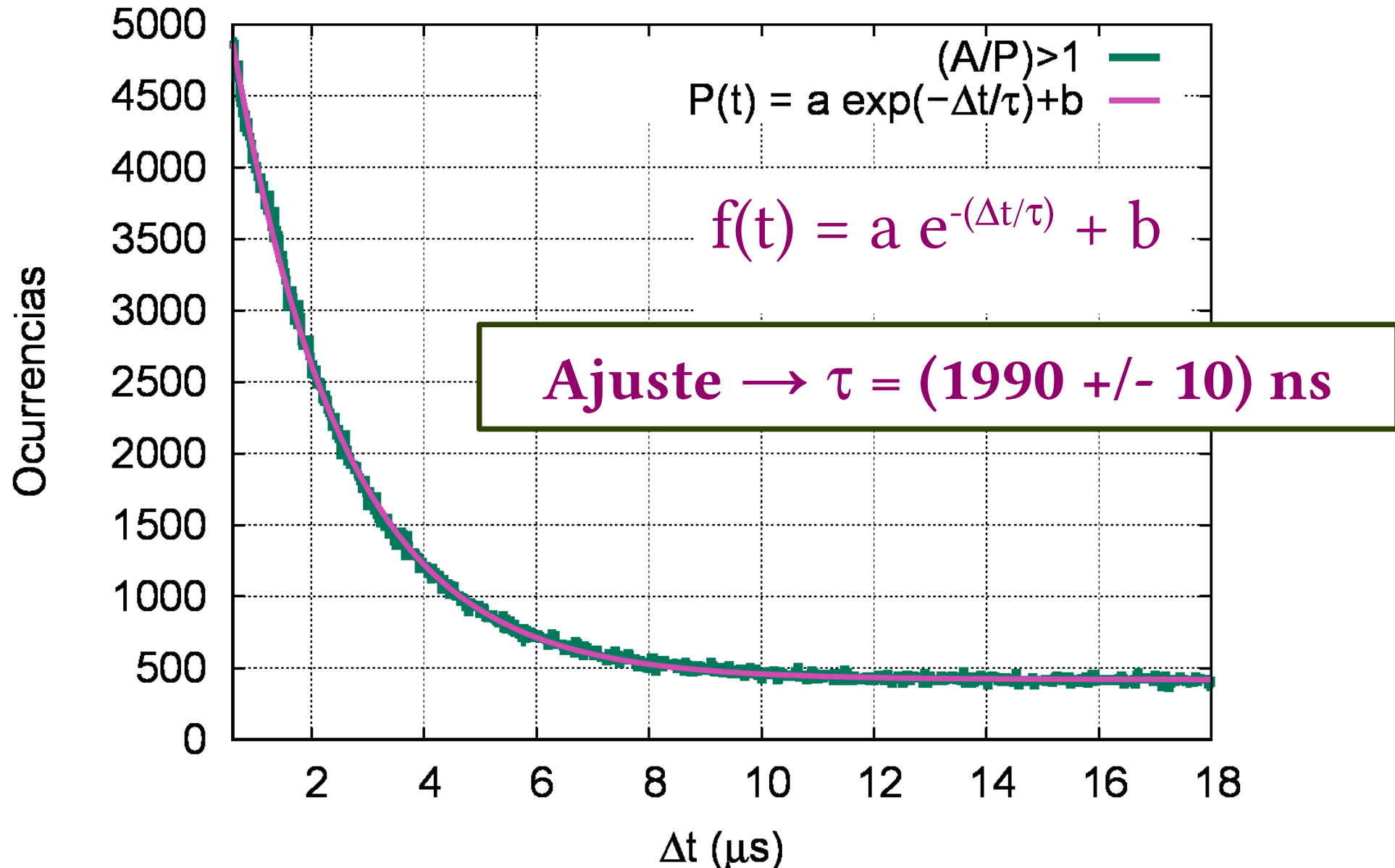
Área/pico vs Δt



Solución: Quitar si $(A/P) < 1$



Diferencia de tiempo entre pulsos



Muón en el agua

- Muón en agua

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

- $\mu^+ \rightarrow$ Libre
- $\mu^- \rightarrow$ Prob. de captura nuclear (similar a la c.e.):
 - $\propto Z^4$ del medio
 - Alta absorción en ^{35}Cl y ^{36}Cl (lejía, lavandina, NaClO)
- Procesos que compiten para el μ^- :

- Decaimiento
- Captura

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^-