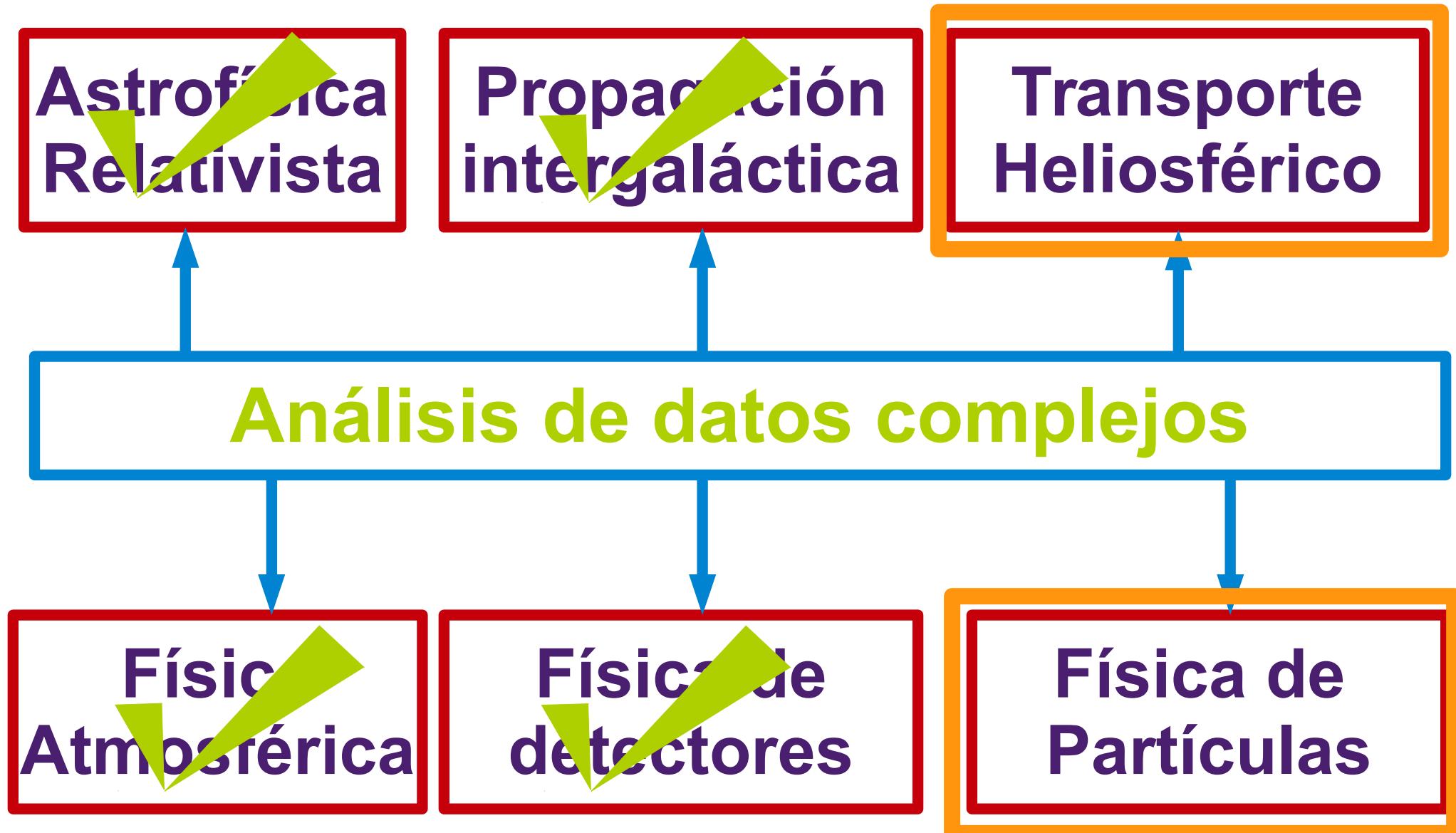


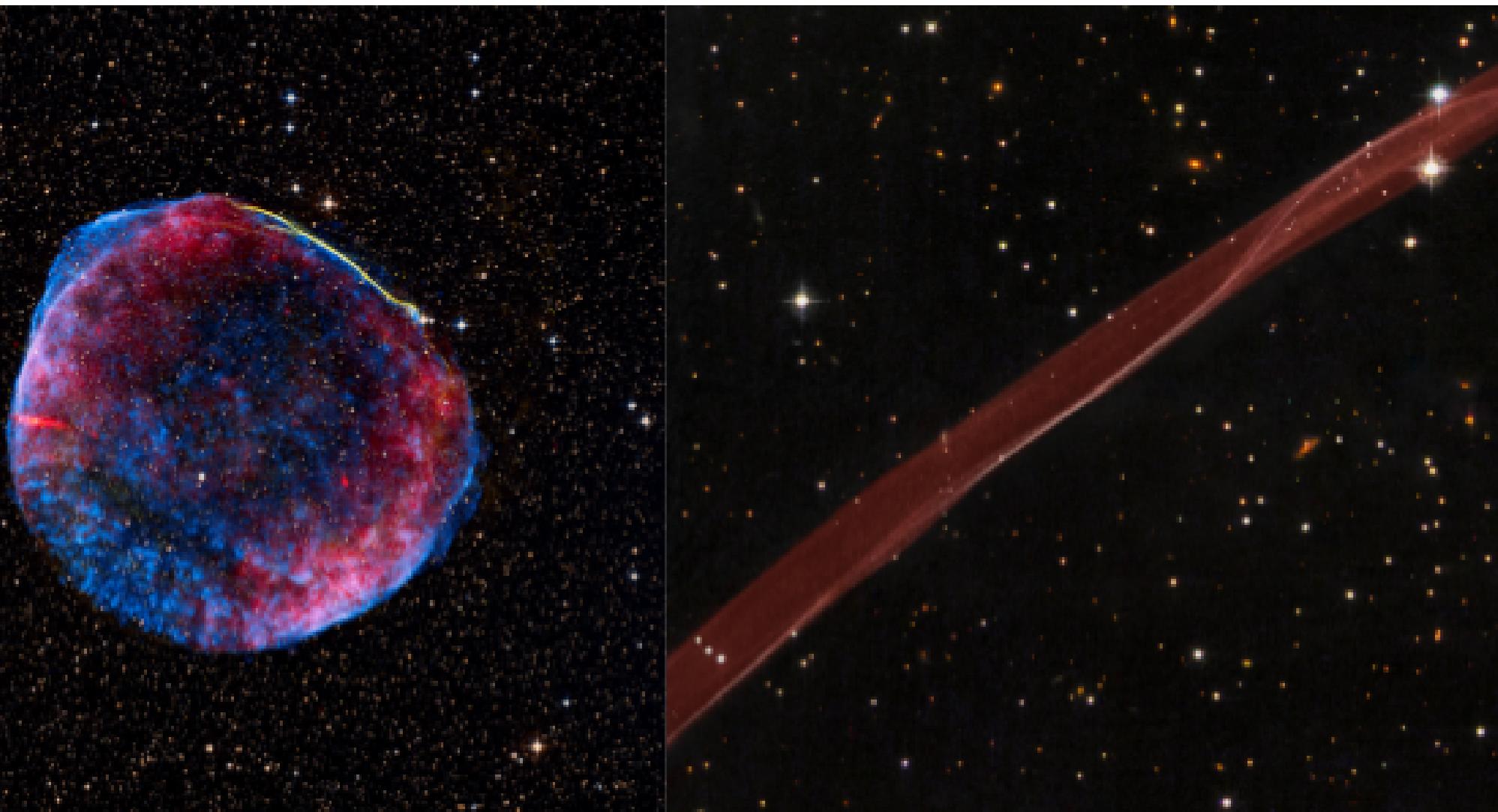
# Física de Astropartículas - 2017

- **Unidad** 04 –Algunas aplicaciones
- **Clase** UO4
- **Cont** Aplicaciones
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://github.com/asoreyh/astroparticulas>

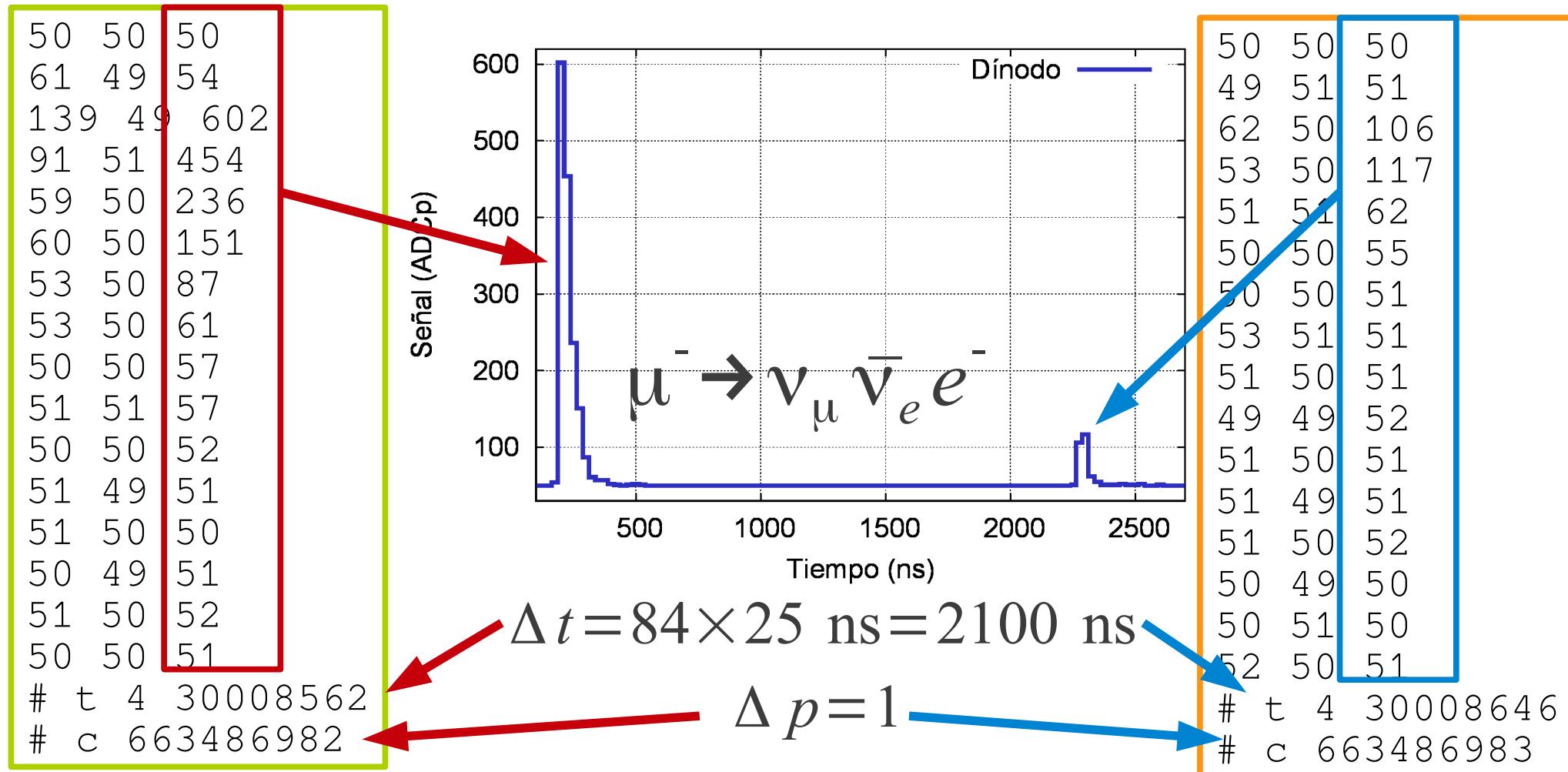


# Alcances

- Comienza en un remanente de supernova

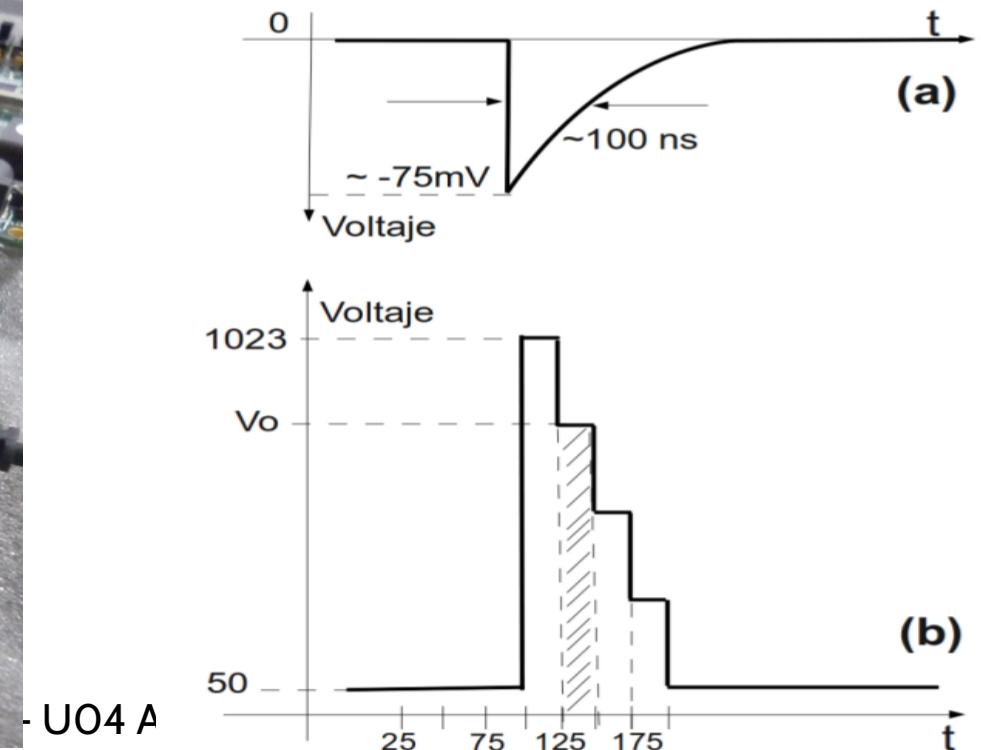
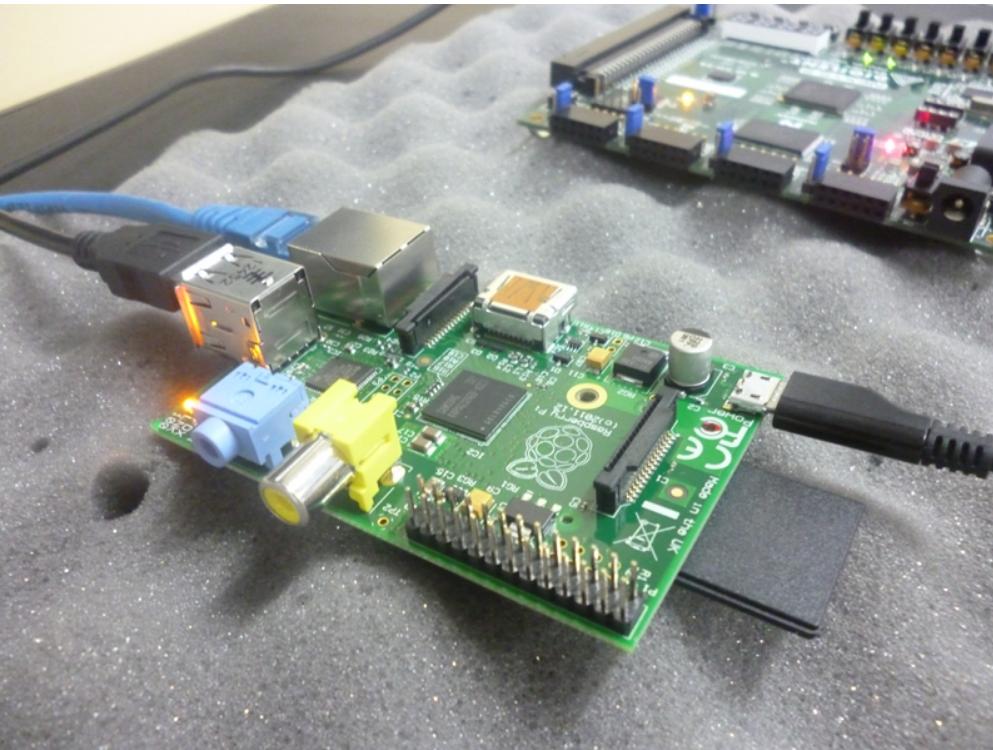


- Comienza en un remanente de supernova
- finaliza en el análisis de un archivo de datos



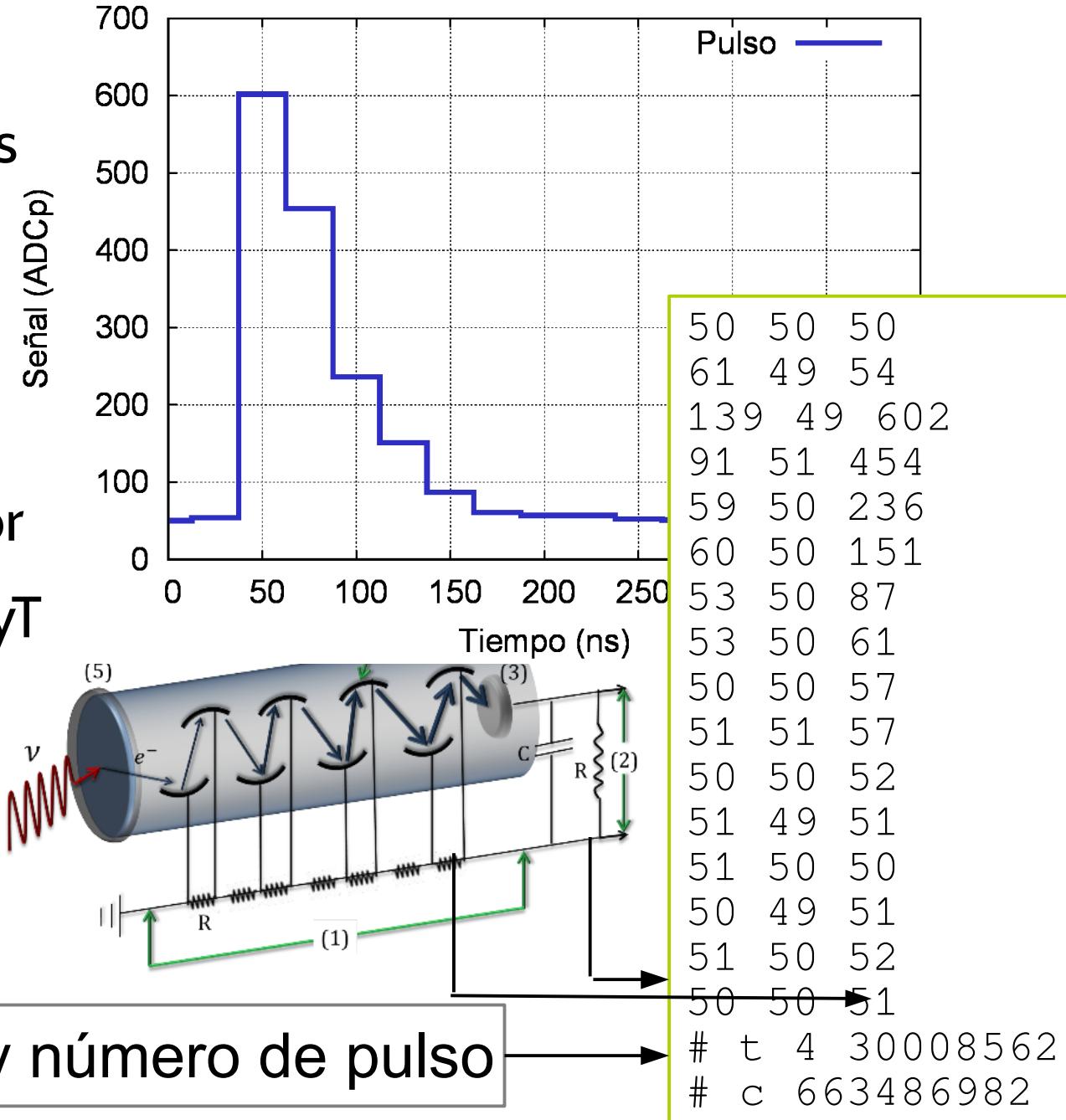
# Adquisición de datos

- 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



# Definiciones

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	

$$A_3 = 141 \text{ ACD}_q$$
$$P_3 = 67 \text{ ADC}_p$$
$$(A/P)_3 = 2.1$$
$$\Delta t_{83} = 2100 \text{ ns}$$

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

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

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

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	

- 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)

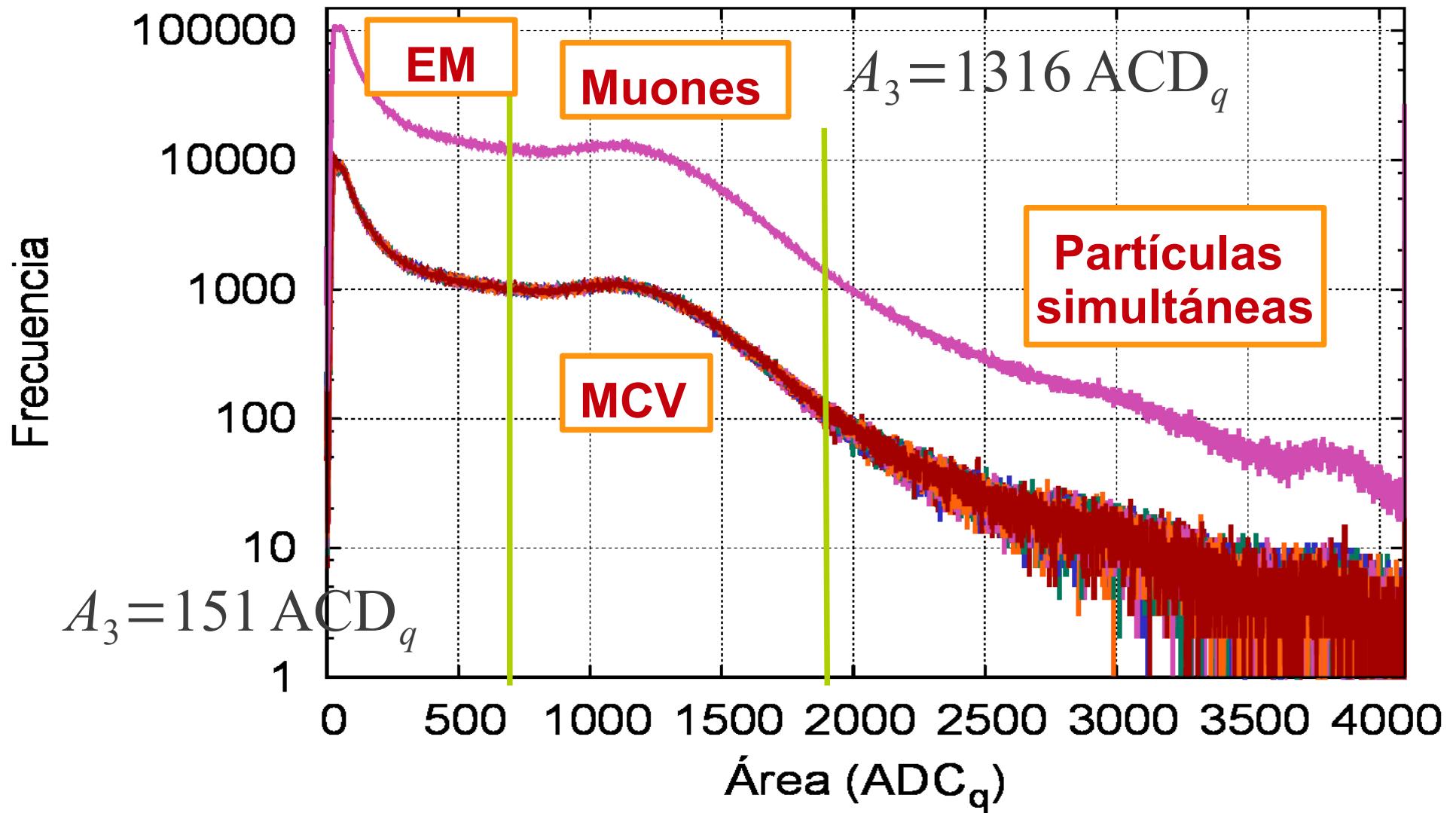
$$\Delta t_i = (\text{tag}_i - \text{tag}_{i-1}) \times 25 \text{ ns}$$



¿Cómo sería el histograma de  $A_j$ ?

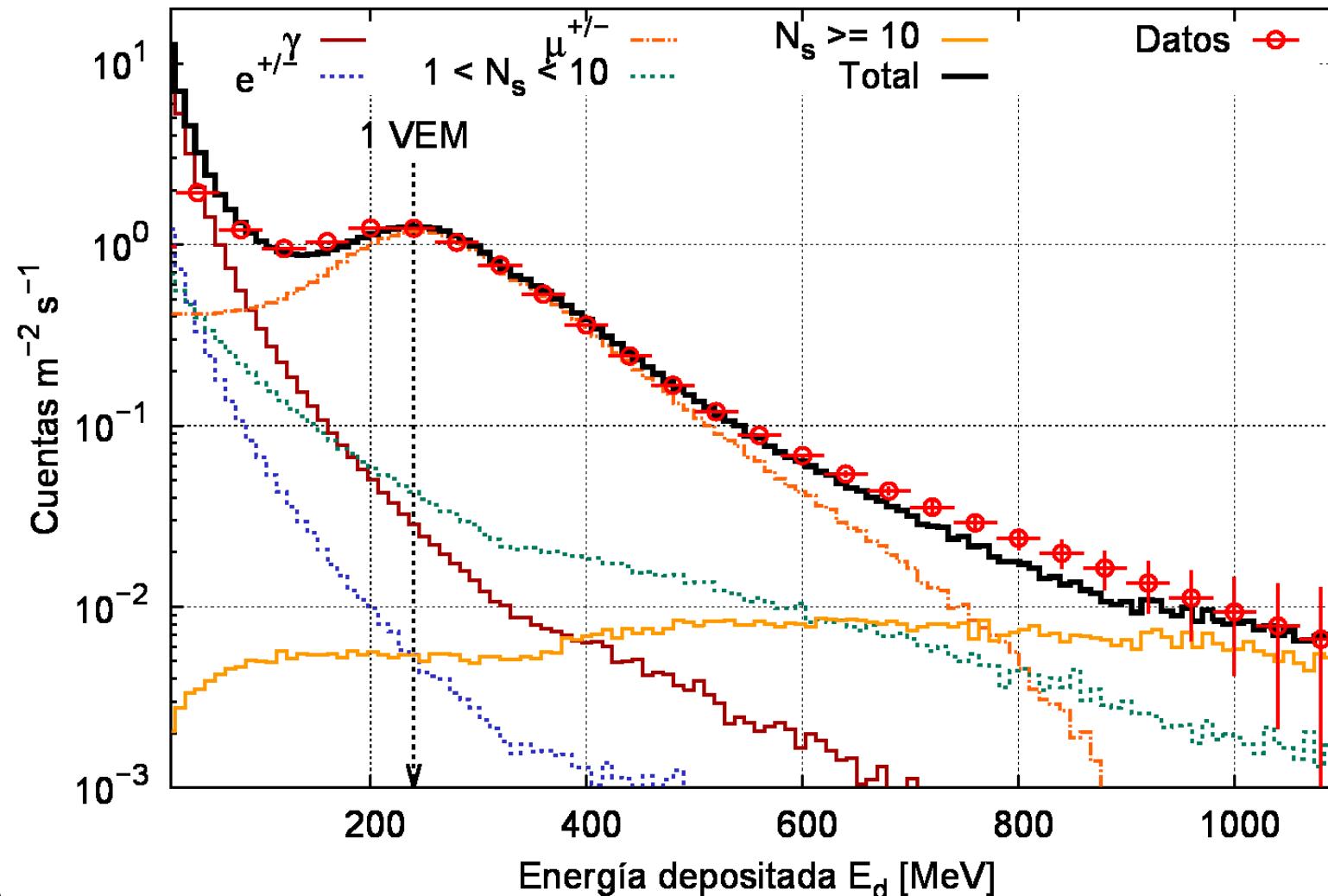
# Histograma de áreas

- Área A de cada pulso → histograma de áreas

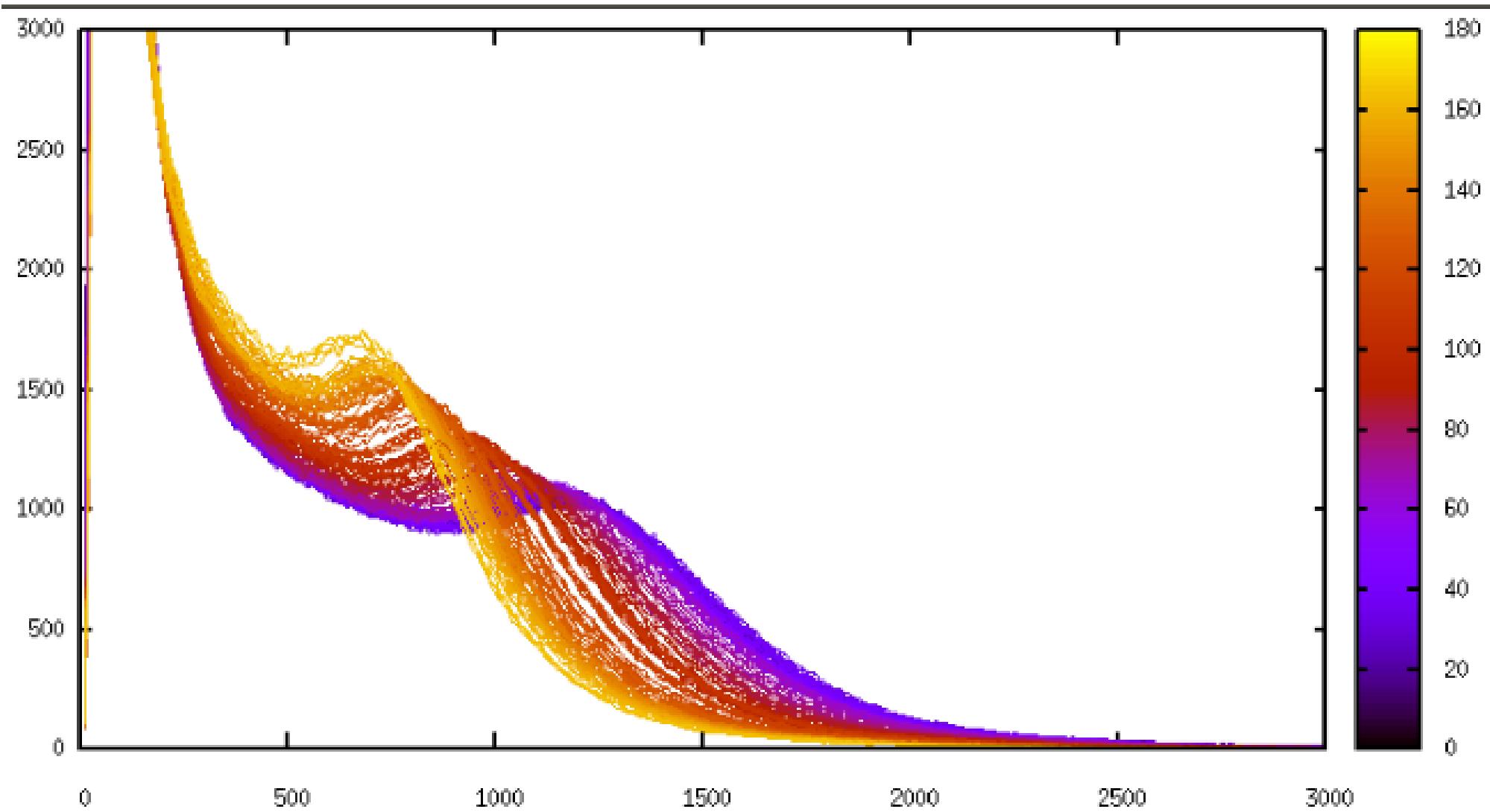


# Histograma simulado

Flujo de primarios → (CORSIKA + Sitio) → Flujo de Secundarios  
Flujo de secundarios → (G4+Detector) → Señales en el detector

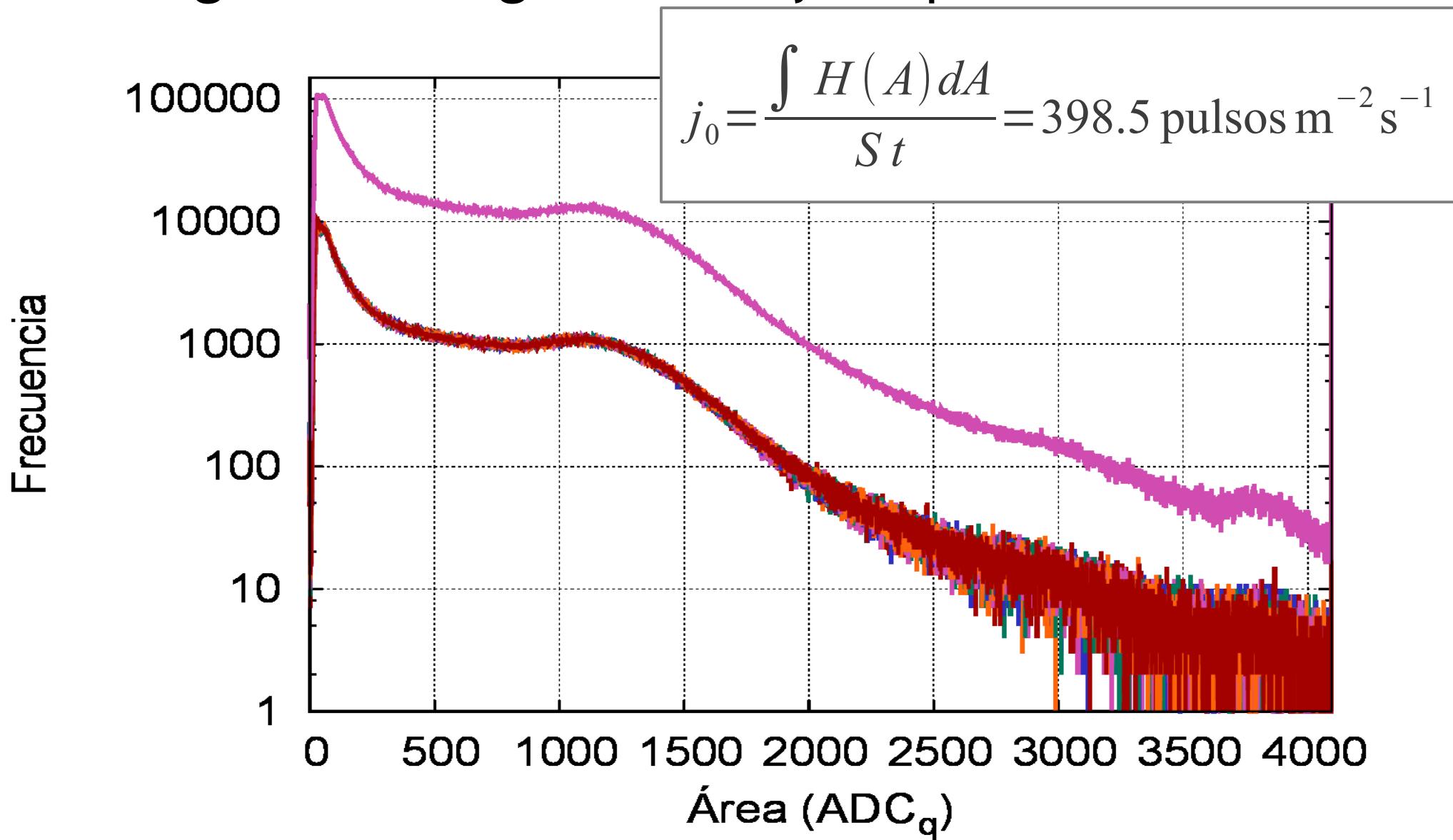


# Impacto de la calidad del agua



# 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)

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

# Vida Media del Muón



- 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

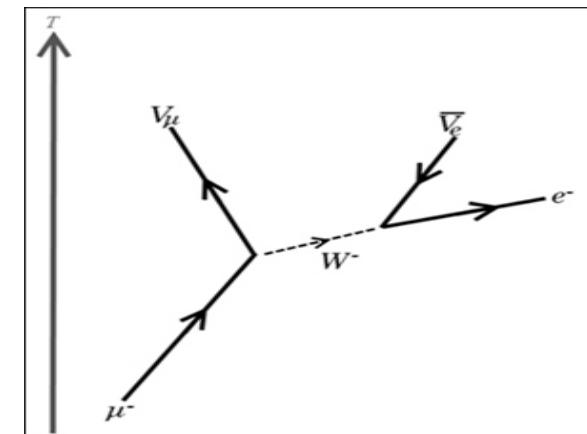
# Decaimiento del muón

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

$$\tau = \frac{1}{\Gamma} = \left( \frac{m_W}{m_\mu g_w} \right)^4 \frac{12\hbar(8\pi)^3}{m_\mu c^2}$$

$$\tau_\mu = (2197.03 \pm 0.04) \text{ ns}$$

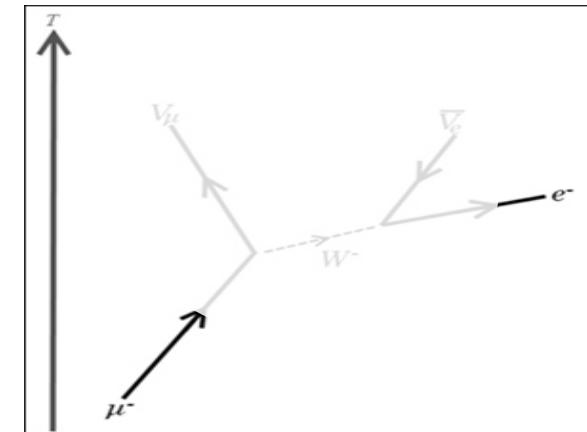
$$g_w = \frac{m_W}{\tau^{1/4} m_\mu} \left( \frac{12\hbar(8\pi)^3}{m_\mu c^2} \right)^{1/4}$$



# Decaimiento del muón

- Probabilidad baja de observar el decaimiento de un muón de alta energía

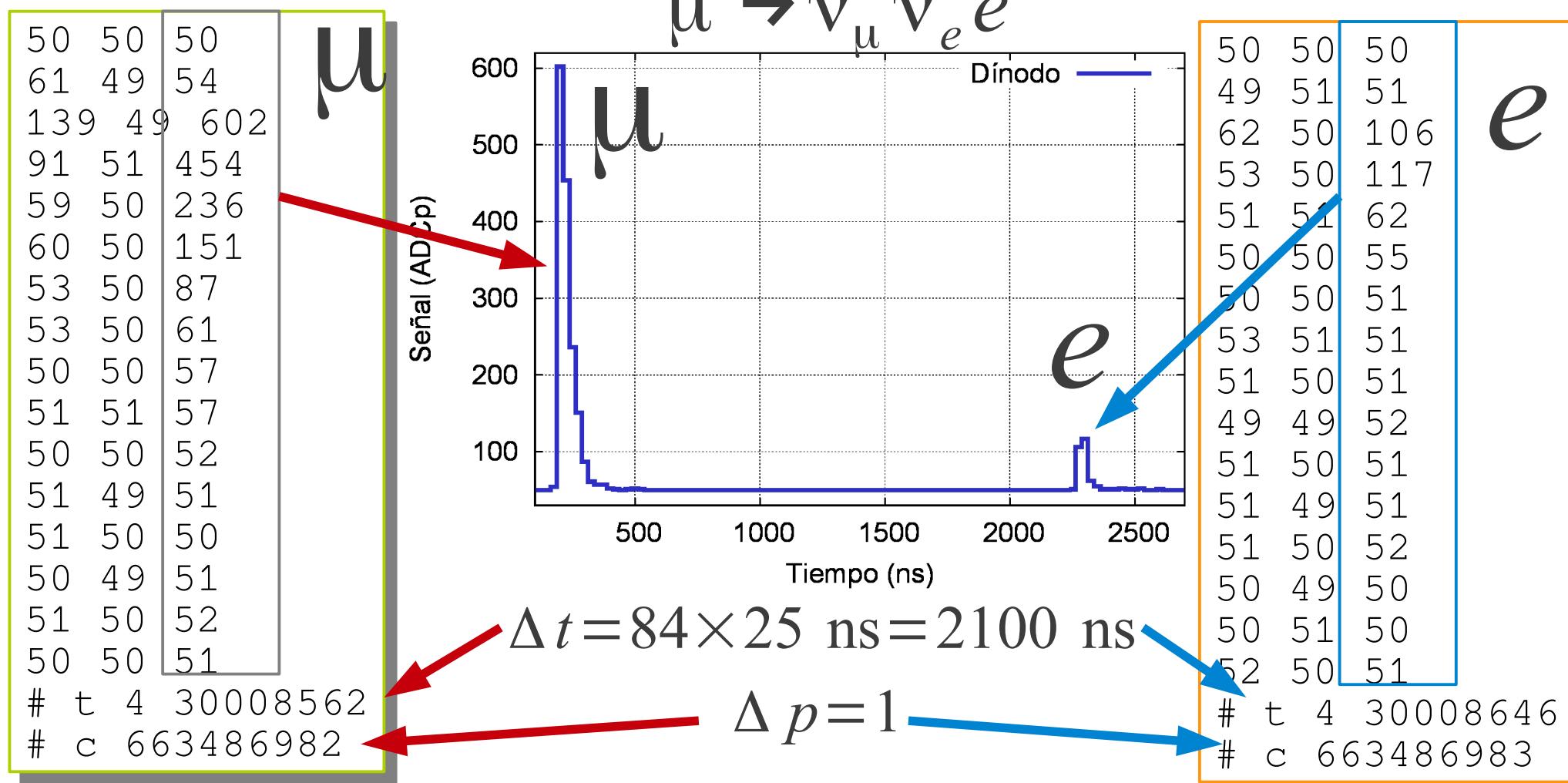
- Sin embargo, si  $E_\mu < \sim 500 \text{ MeV}$   
→ Se detiene en el interior del detector



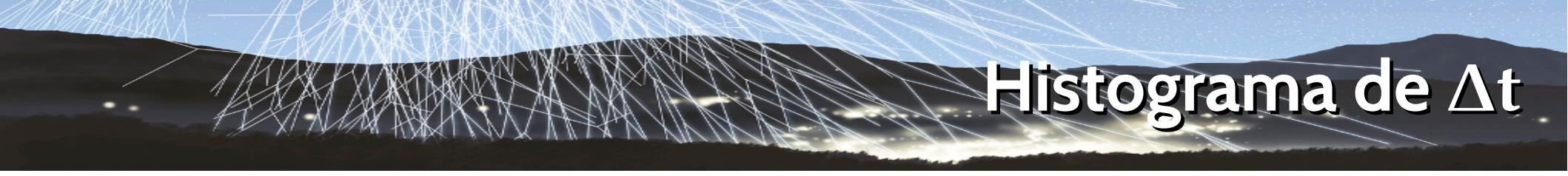
- Pulso del muón → (Decaimiento) → Pulso del electrón
- Existencia de neutrinos vía *missing energy channel*.

# Un decaimiento en los datos

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



# Histograma de $\Delta t$



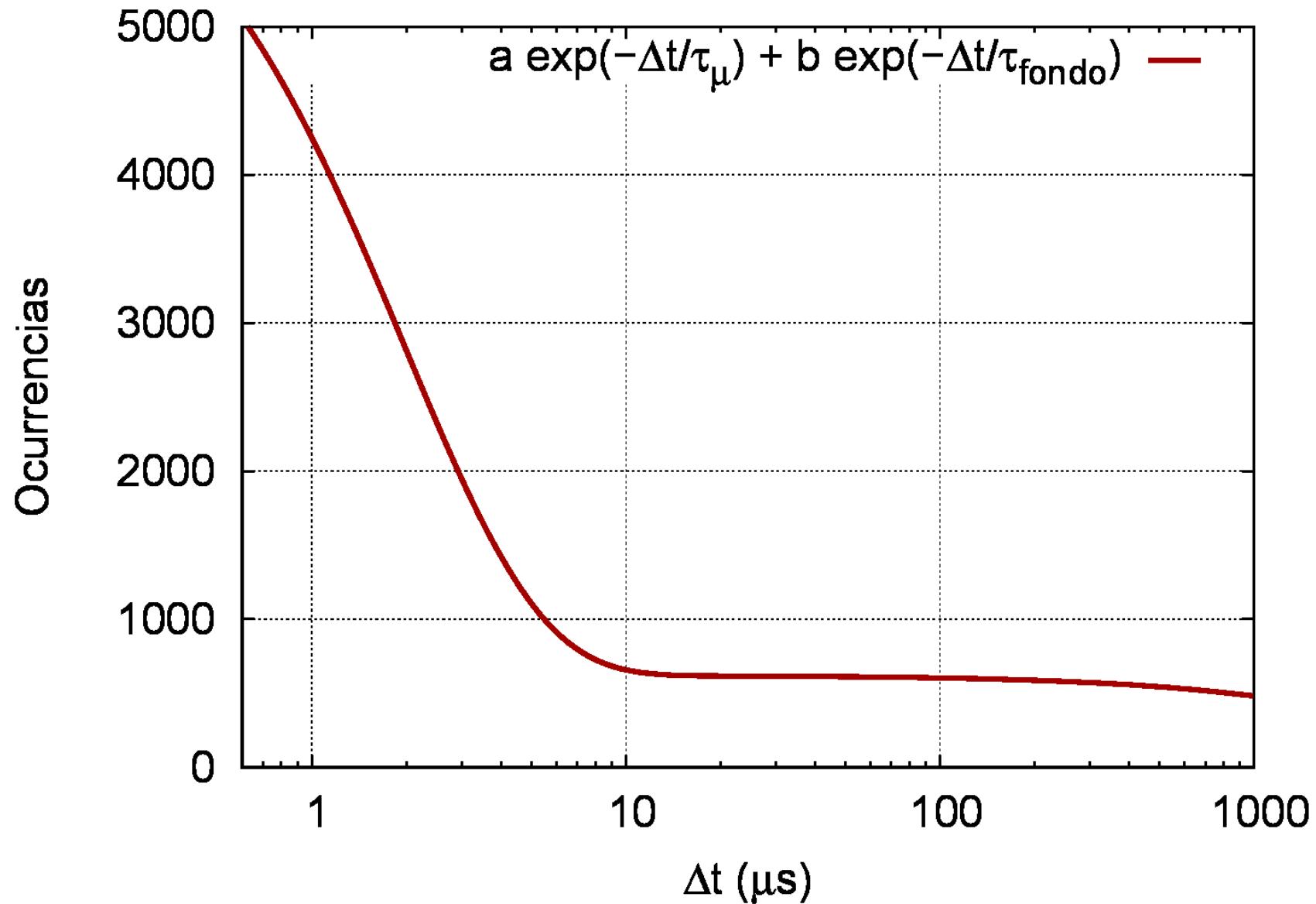
- Calculamos el  $\Delta t$  entre pulsos sucesivos
- La distribución de  $\Delta t$  es un muestreo de las distribuciones de los procesos en el interior:
  - Flujo de secundarios

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

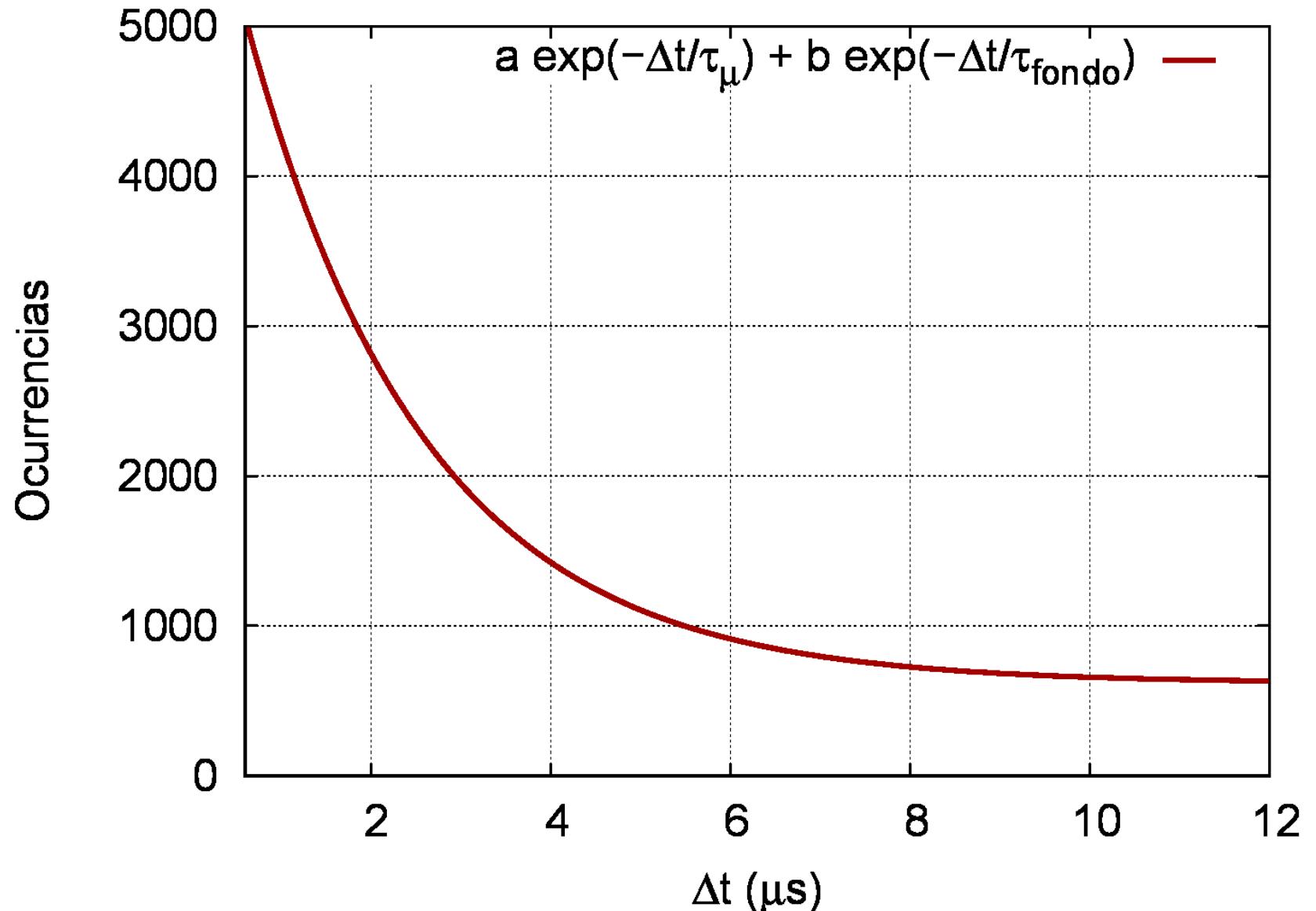
- Decaimento de los muones en el interior del detector
- Tiempos característicos muy diferentes

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

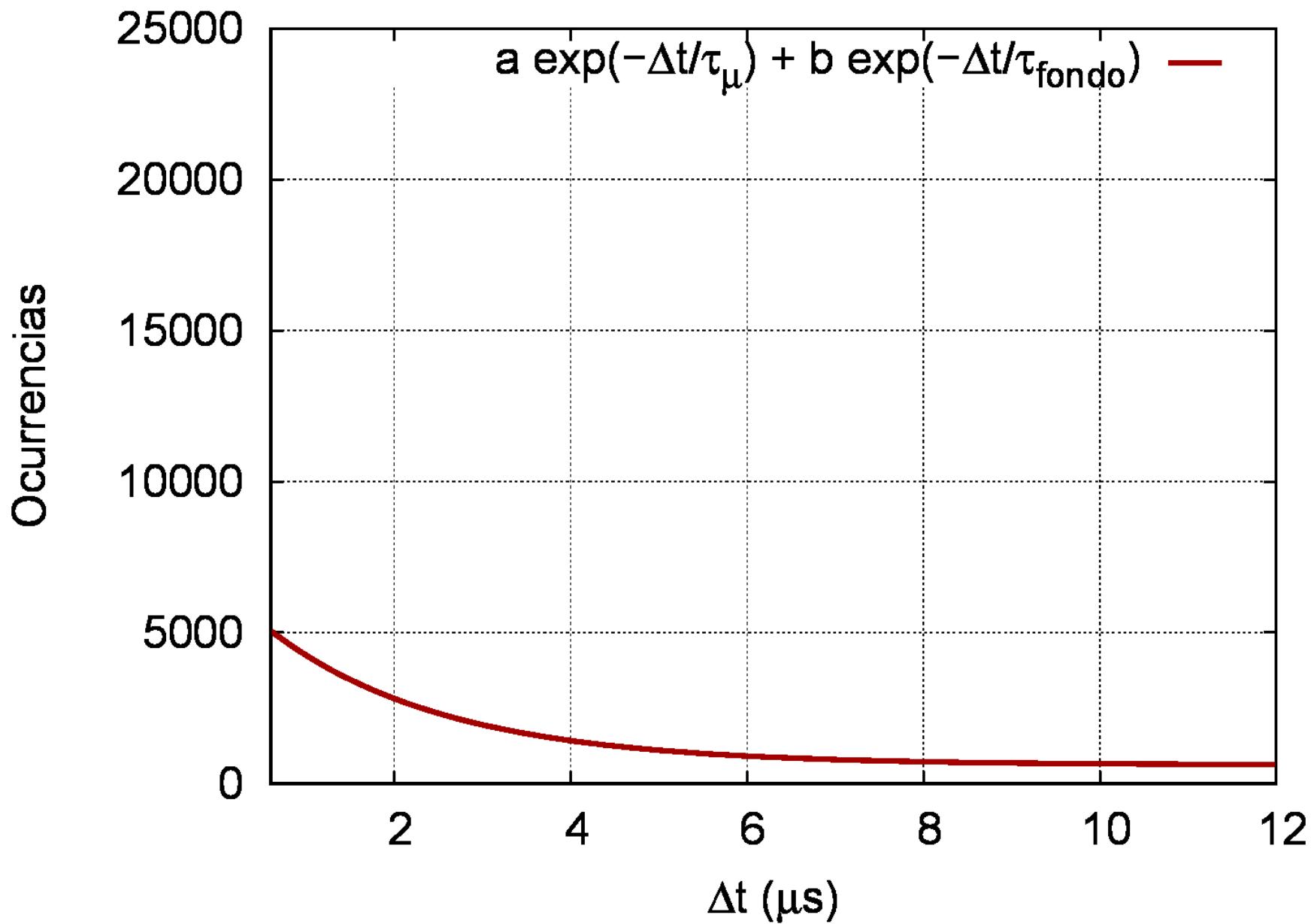
# Suma de exponenciales



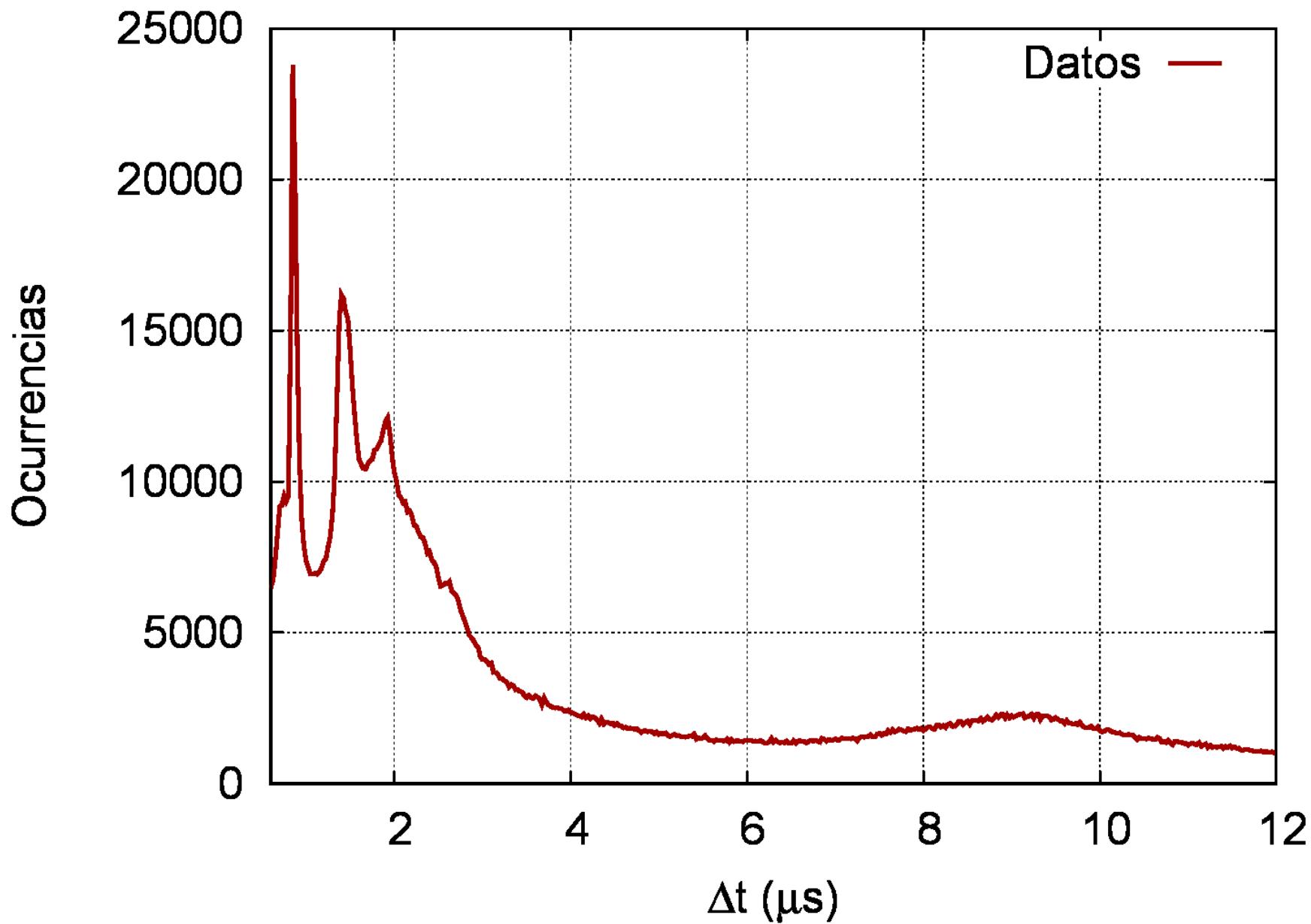
Nos concentramos en  $\Delta t \sim \tau_\mu$



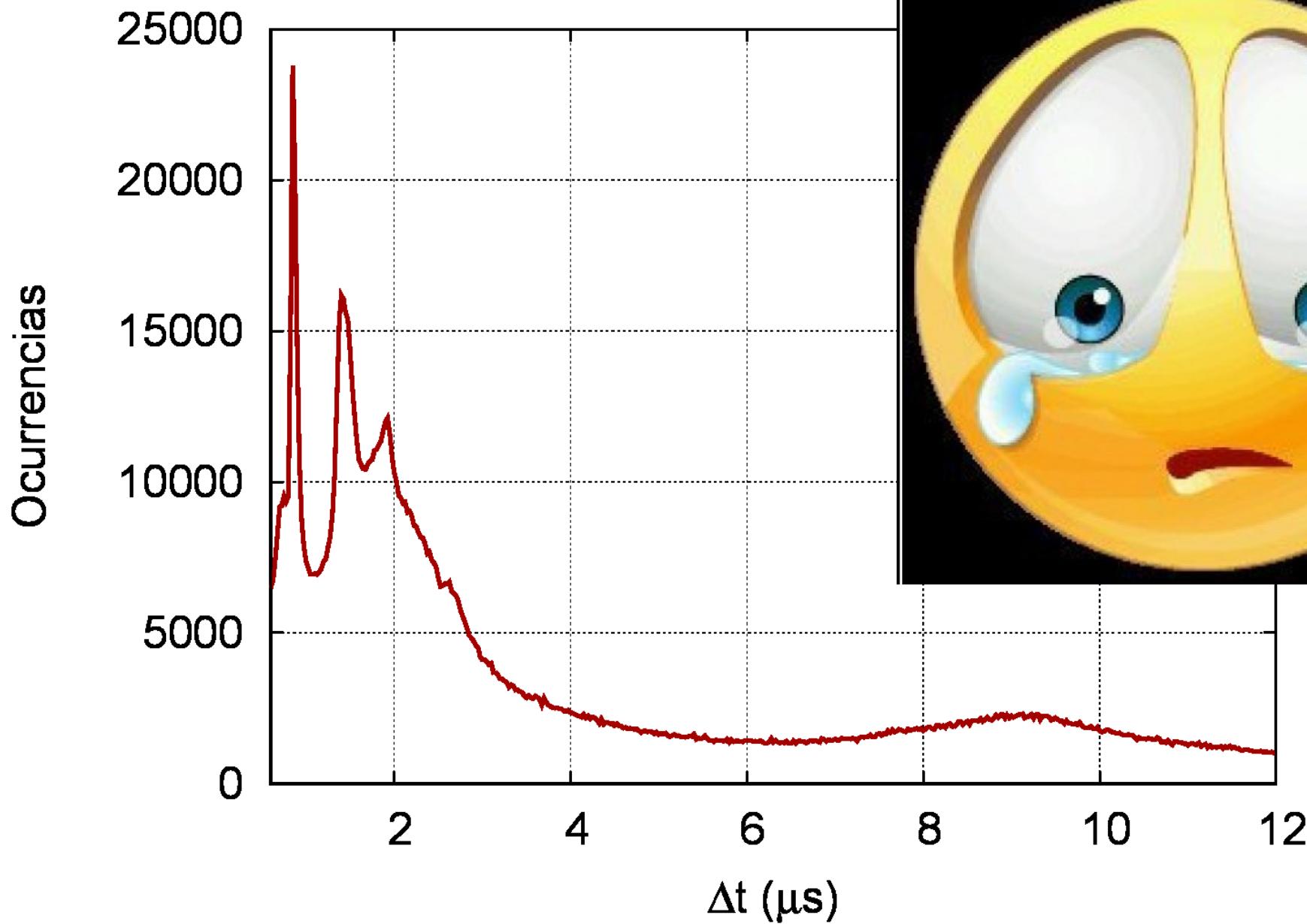
# Teórica vs Experimental



# Teórica vs Experimental



# Teórica vs Experimental

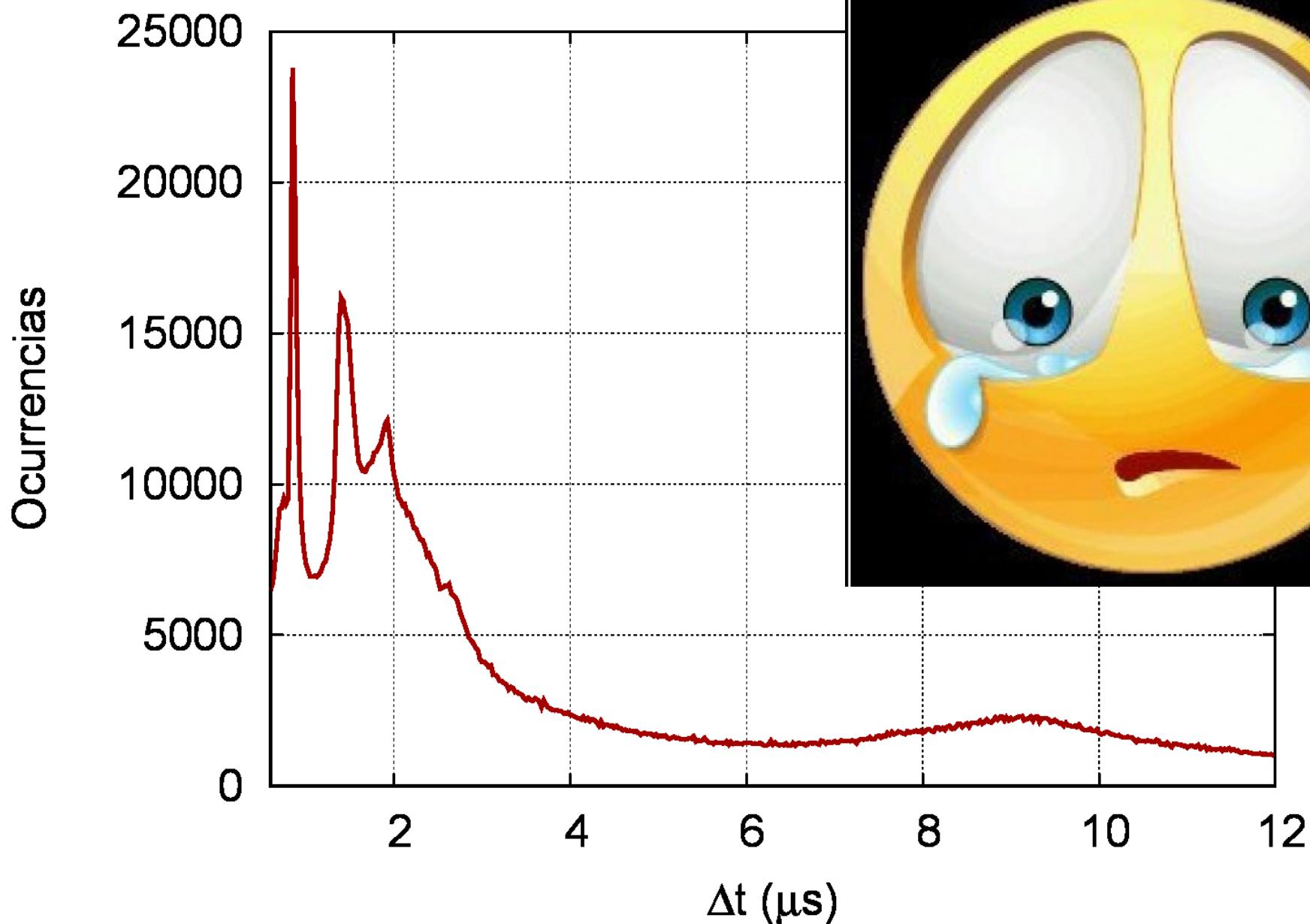




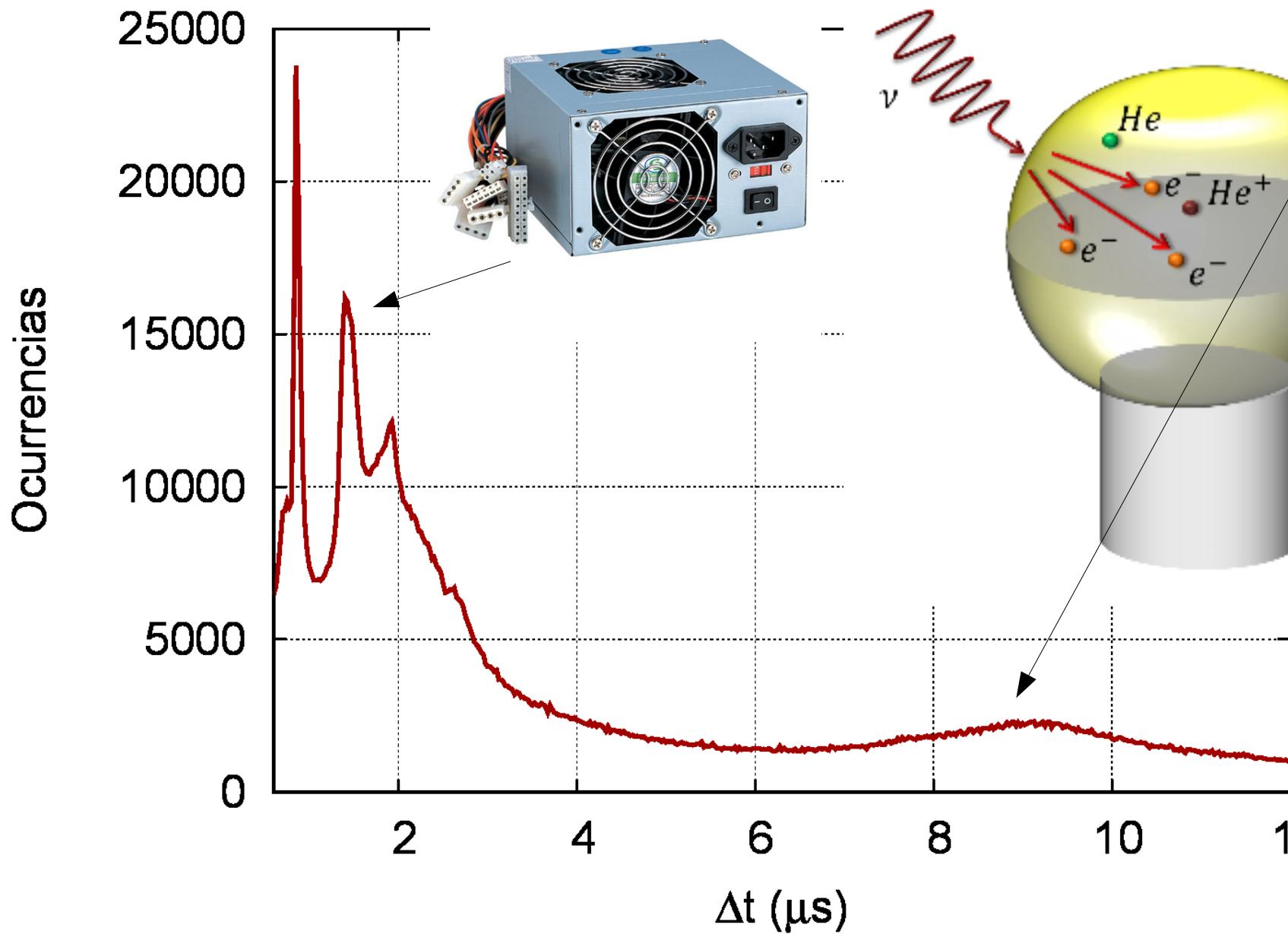
# ¿Qué significan esos picos?

- 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 photoelectrón ioniza al Helio
    - El ión  $\text{He}^+$  migra hacia el photocátodo
    - El ión produce un nuevo photoelectrón
    - El photoelectrón es un pulso nuevo
    - !!!El tiempo entre pulsos depende de la geometría del PMT!!!

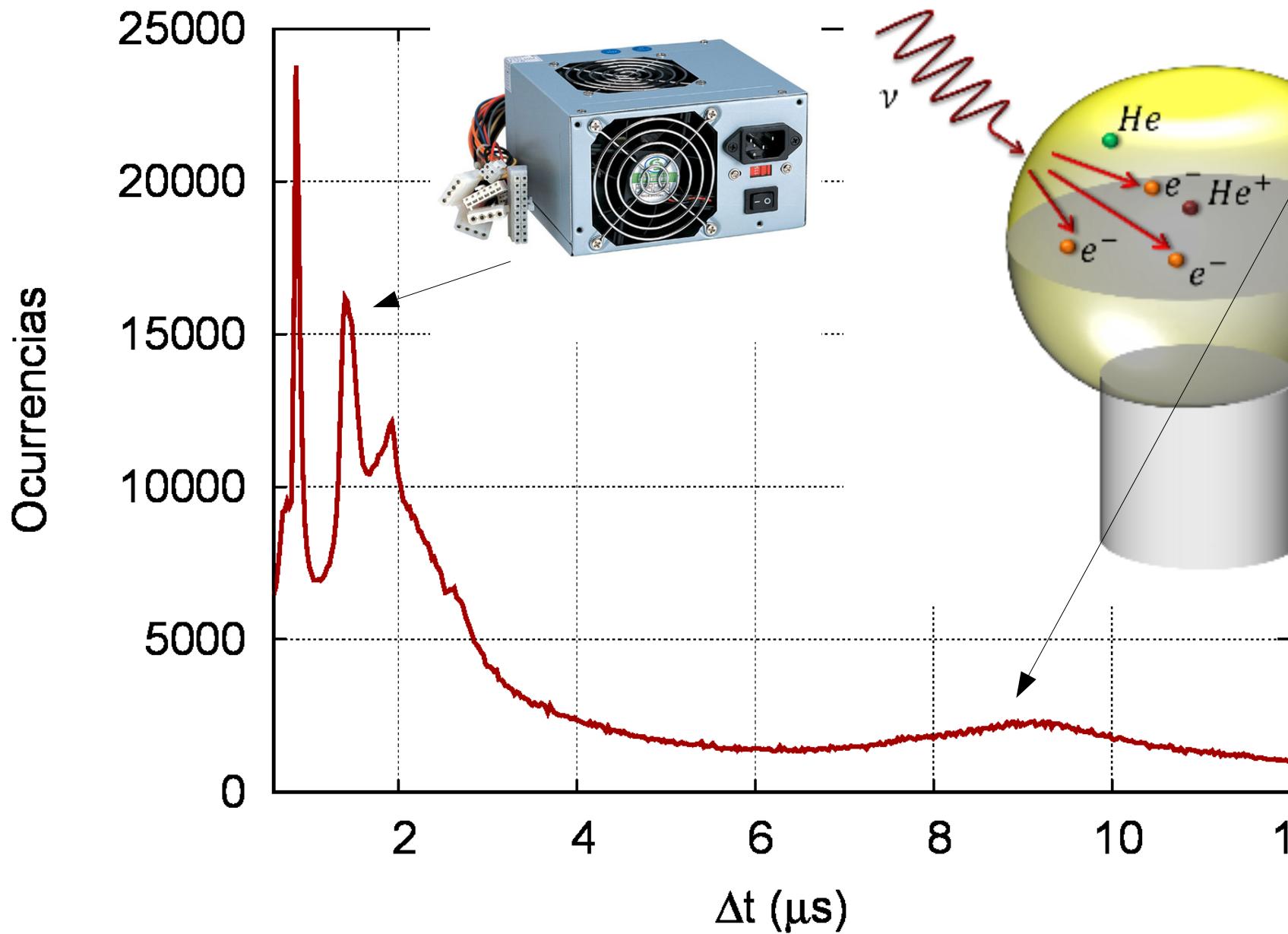
# El experimento contraataca



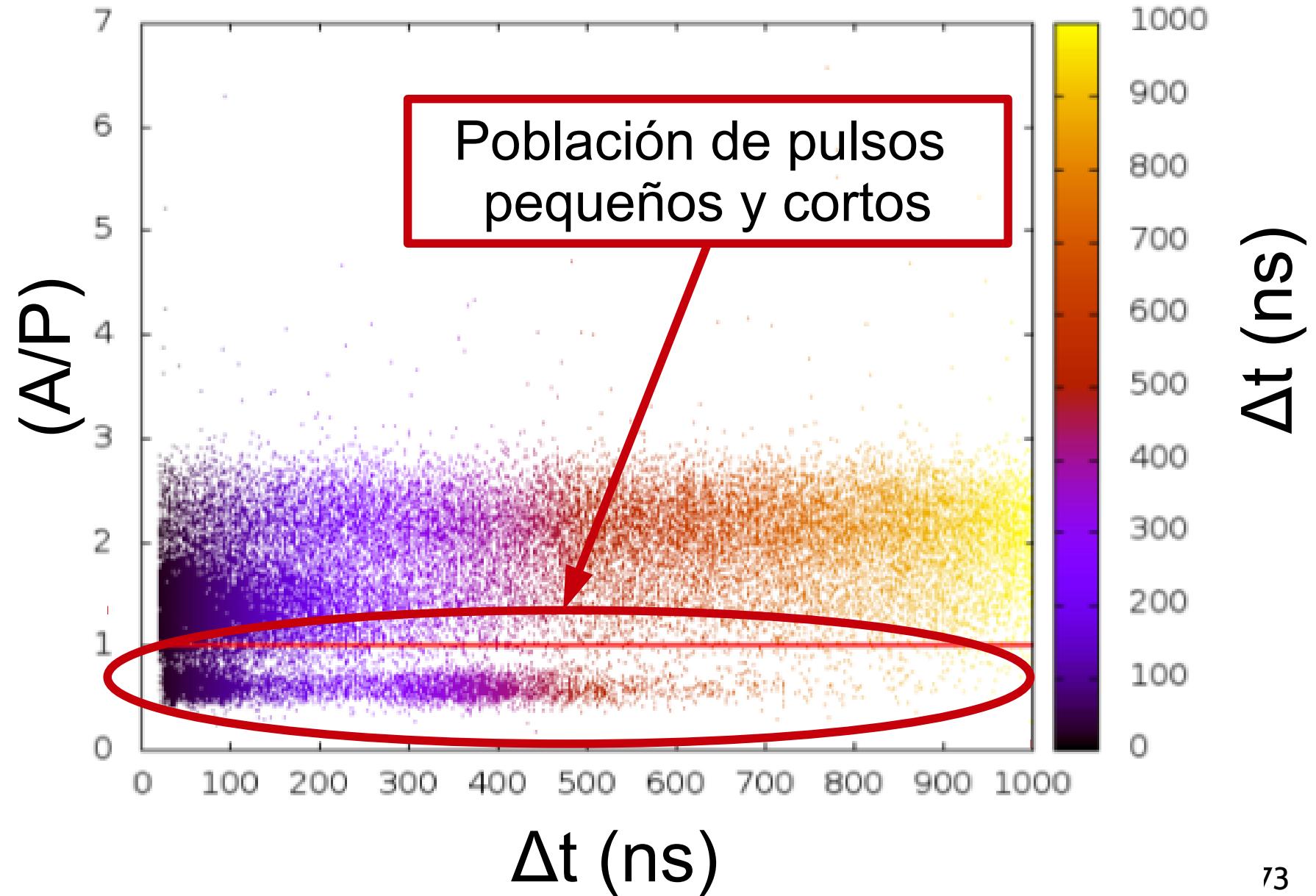
# El experimento contraataca



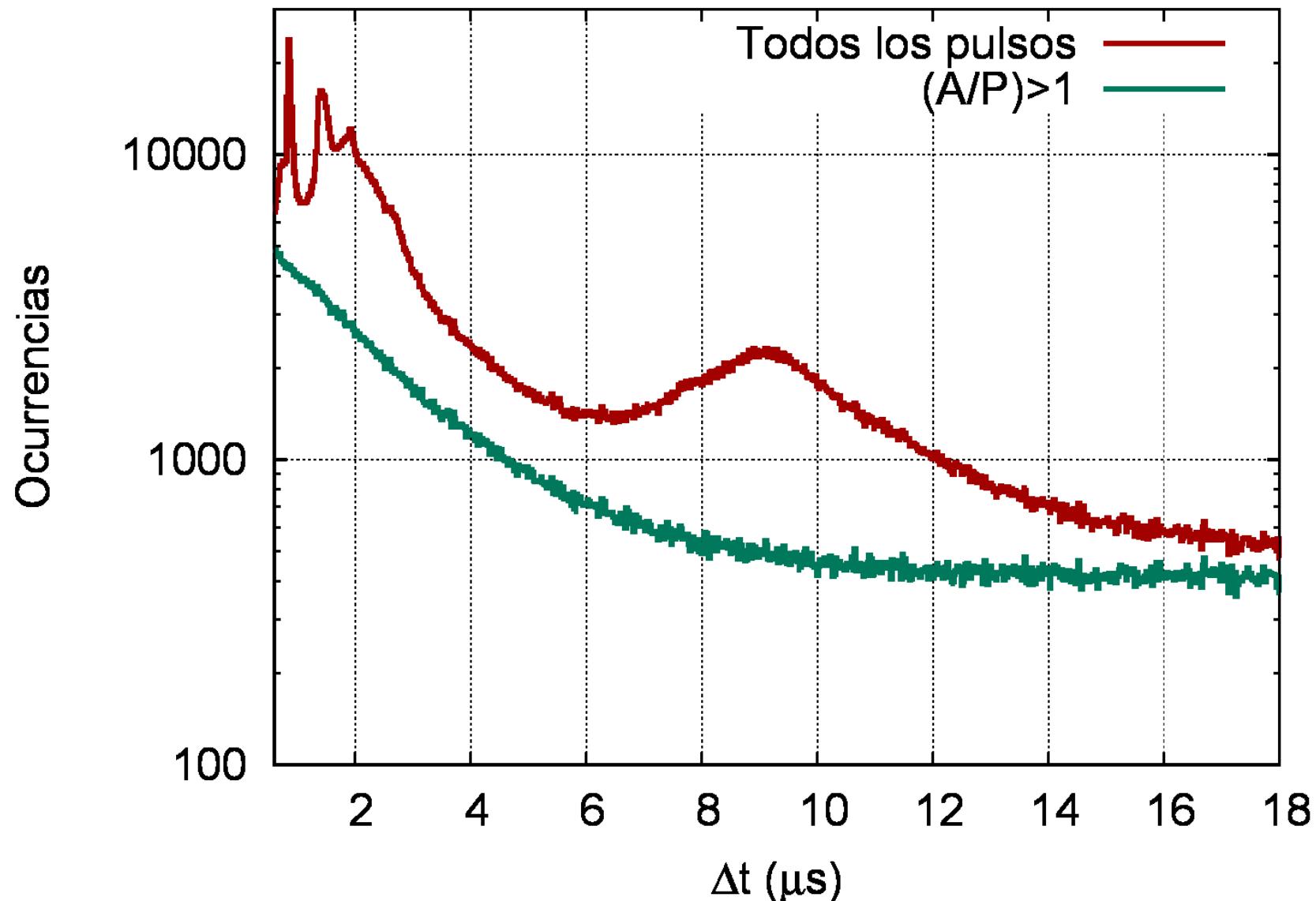
# El experimento contraataca



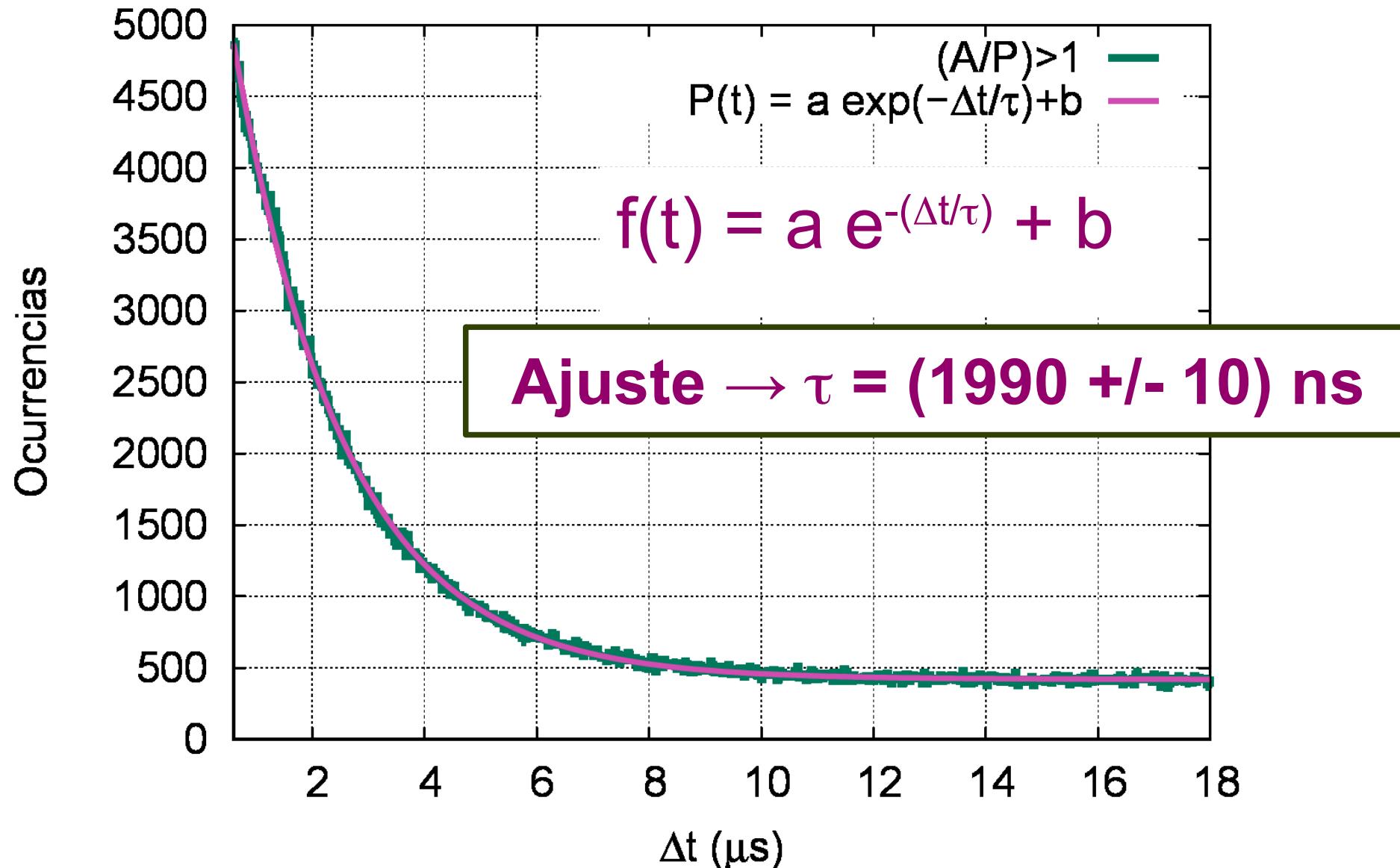
# Área/pico vs dt



# Solución: Quitar picos si $A/P < 1$ , o imponer una segunda condición de trigger



# 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
- $\lambda_{\text{obs}} = (N^+ \lambda^+ + N^- \lambda^-) / (N^+ + N^-)$
- Se puede medir la relación  $N^+/N^-$

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

**Sólo decaen los que no son absorbidos**  
 $\tau_{\mu^-} < \tau_0$

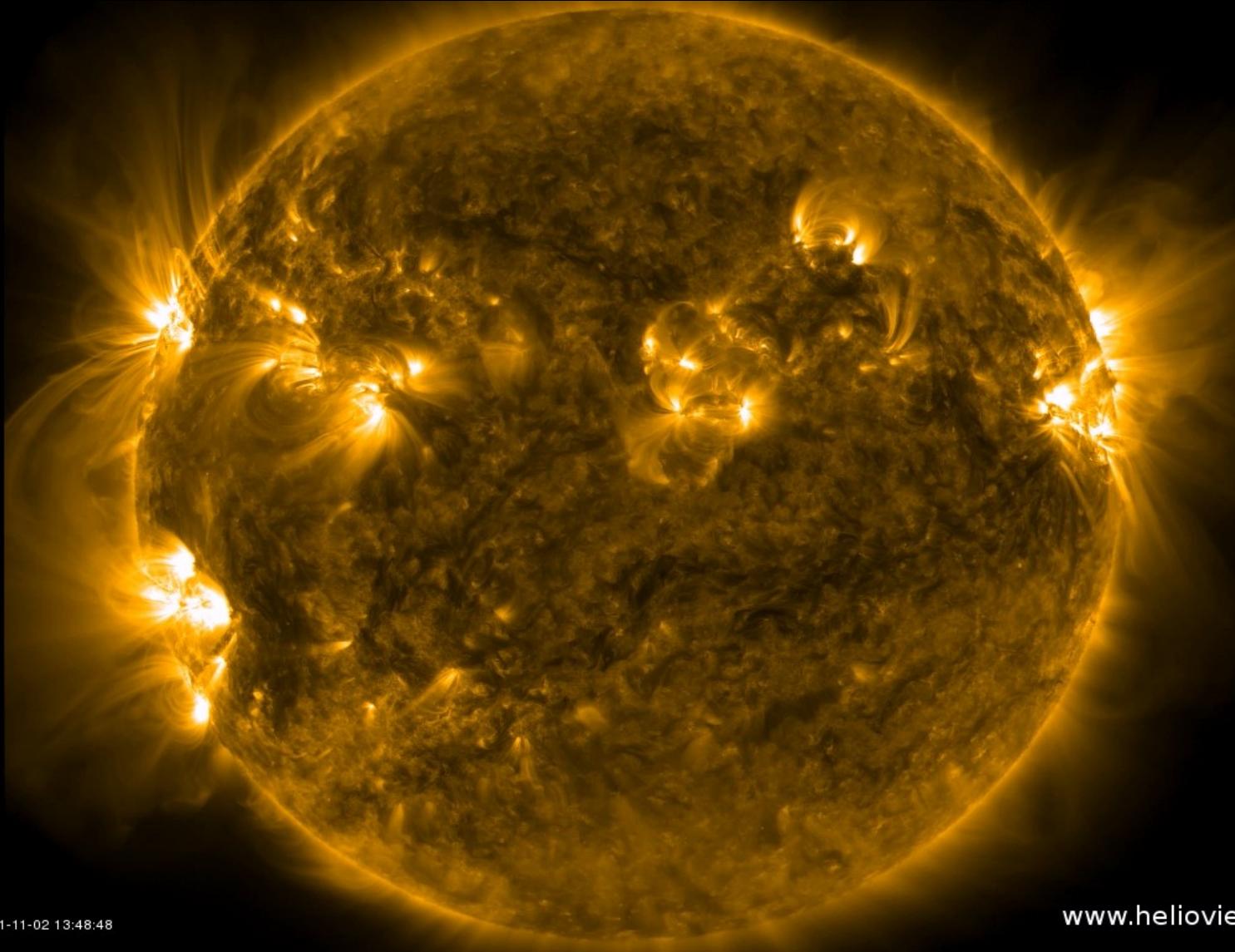
# Vida Media del muón en su Universidad

- 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

# Clima Espacial y RC



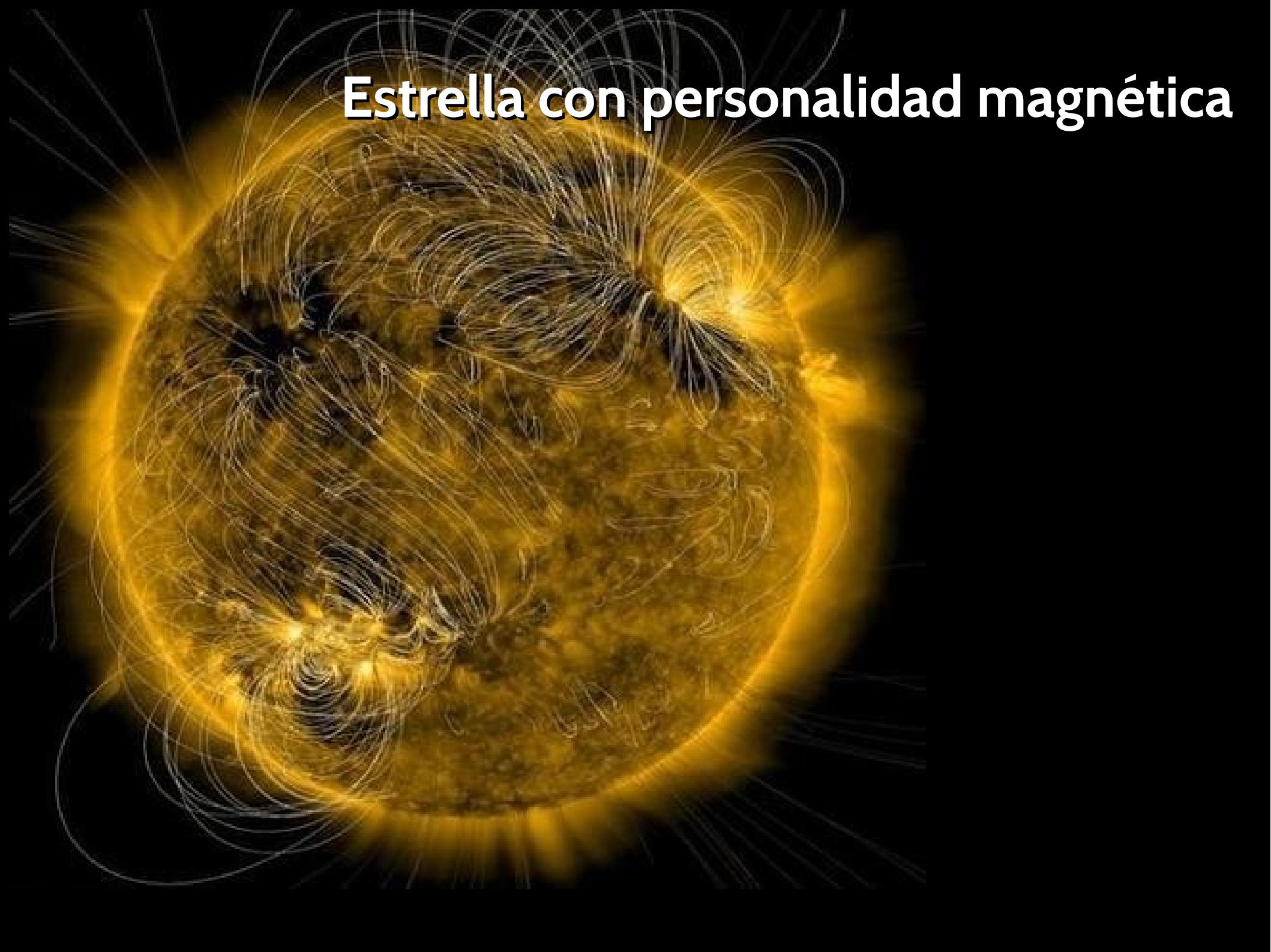
# Nuestra Estrella, el Sol



AIA 171

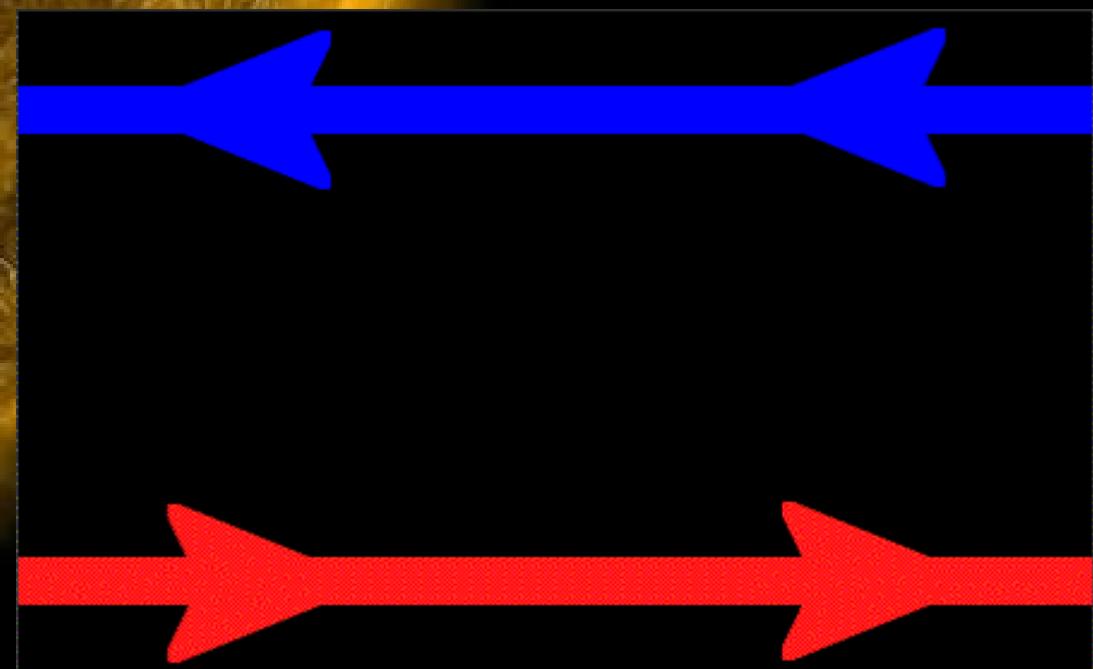
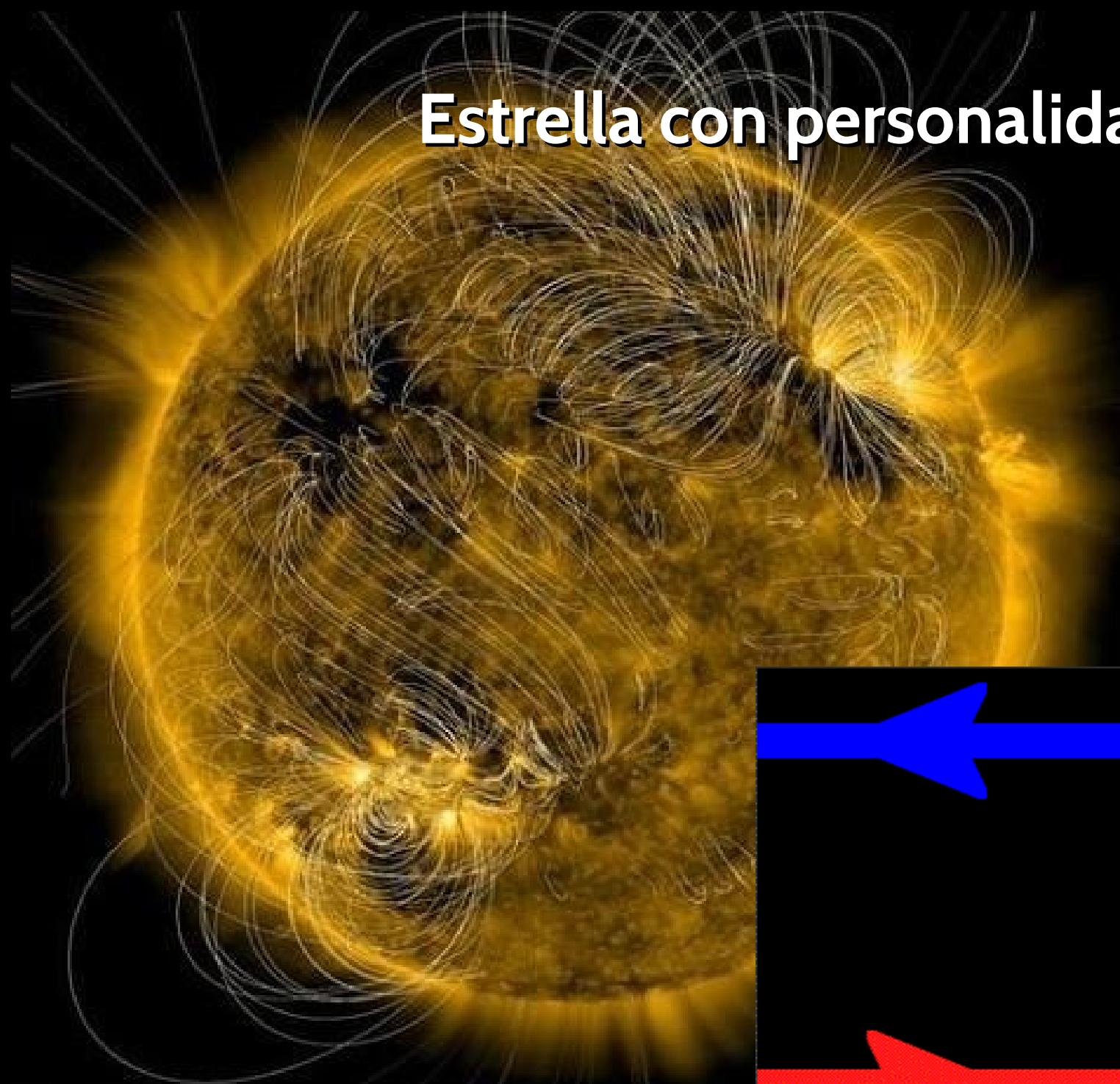
2011-11-02 13:48:48

[www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org) 

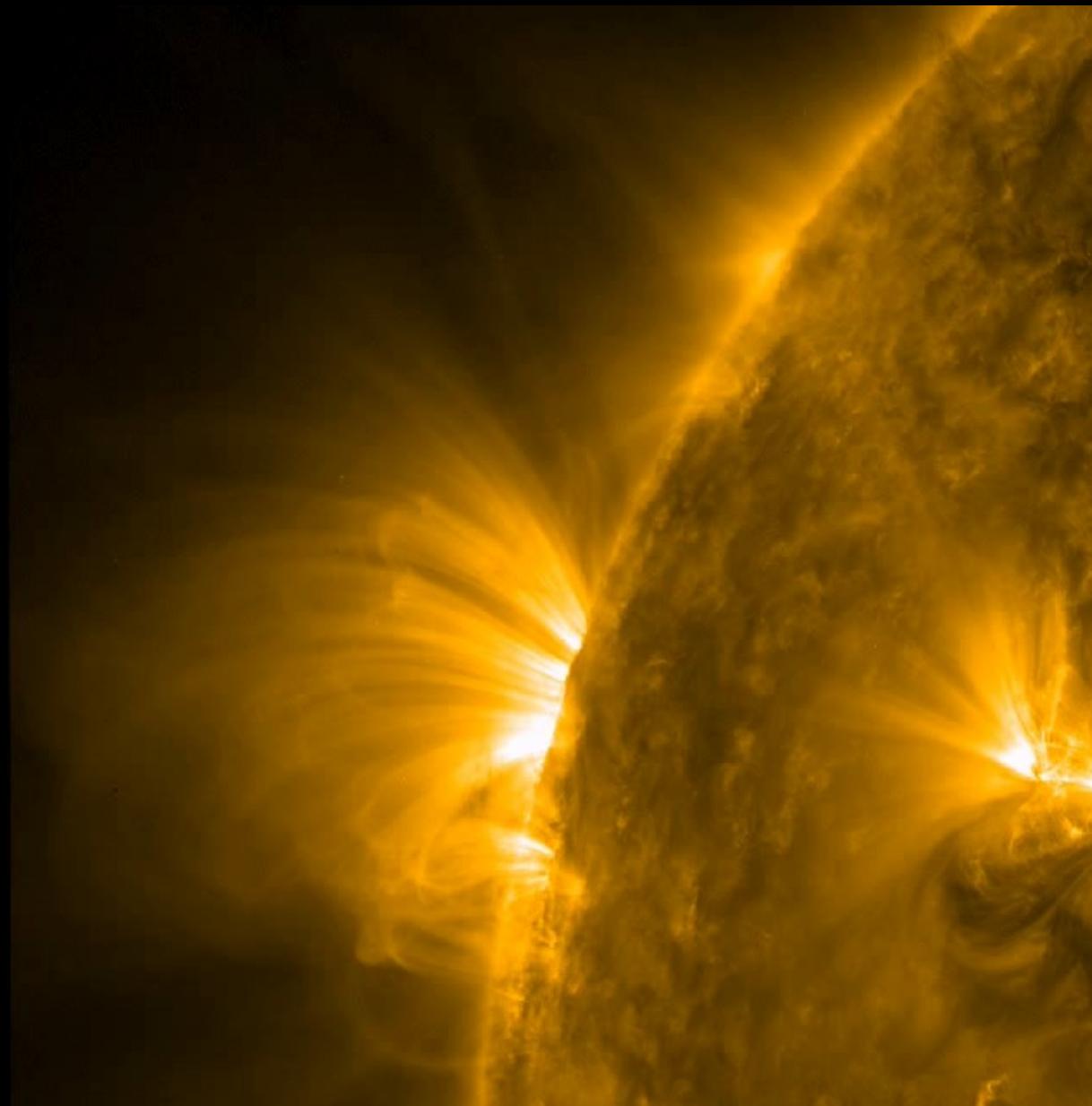
A detailed scientific illustration of a star's surface. The star is depicted in shades of yellow and orange, with a complex network of dark, swirling magnetic field lines superimposed on it. These lines form intricate loops and concentrations, particularly around the poles and equator. Intense, bright yellow and white regions, representing solar flares or active zones, are visible along the field lines. The background is a deep black, suggesting the void of space.

# Estrella con personalidad magnética

# Estrella con personalidad magnética



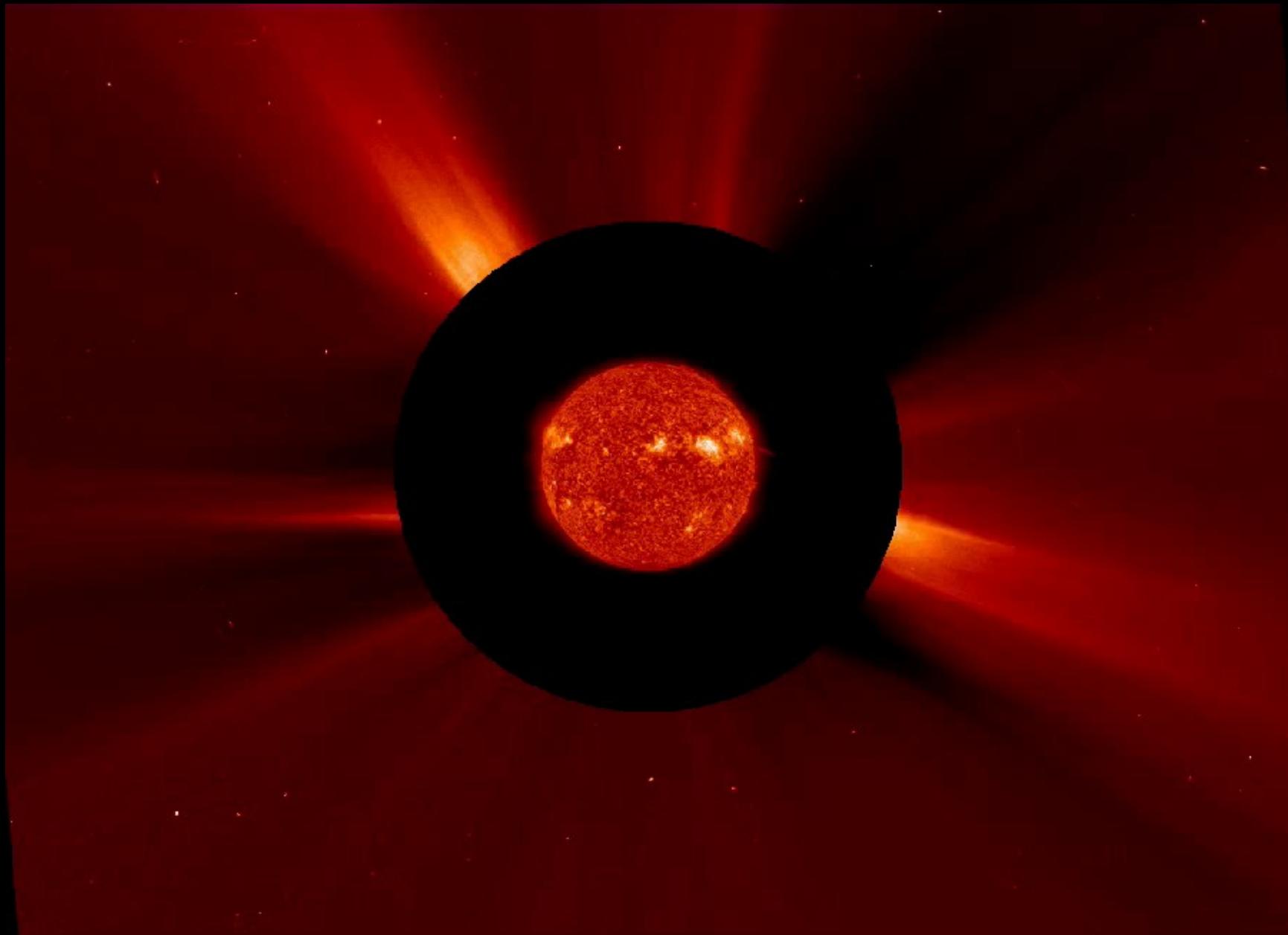
# Eyecciones de masa coronal (CME)



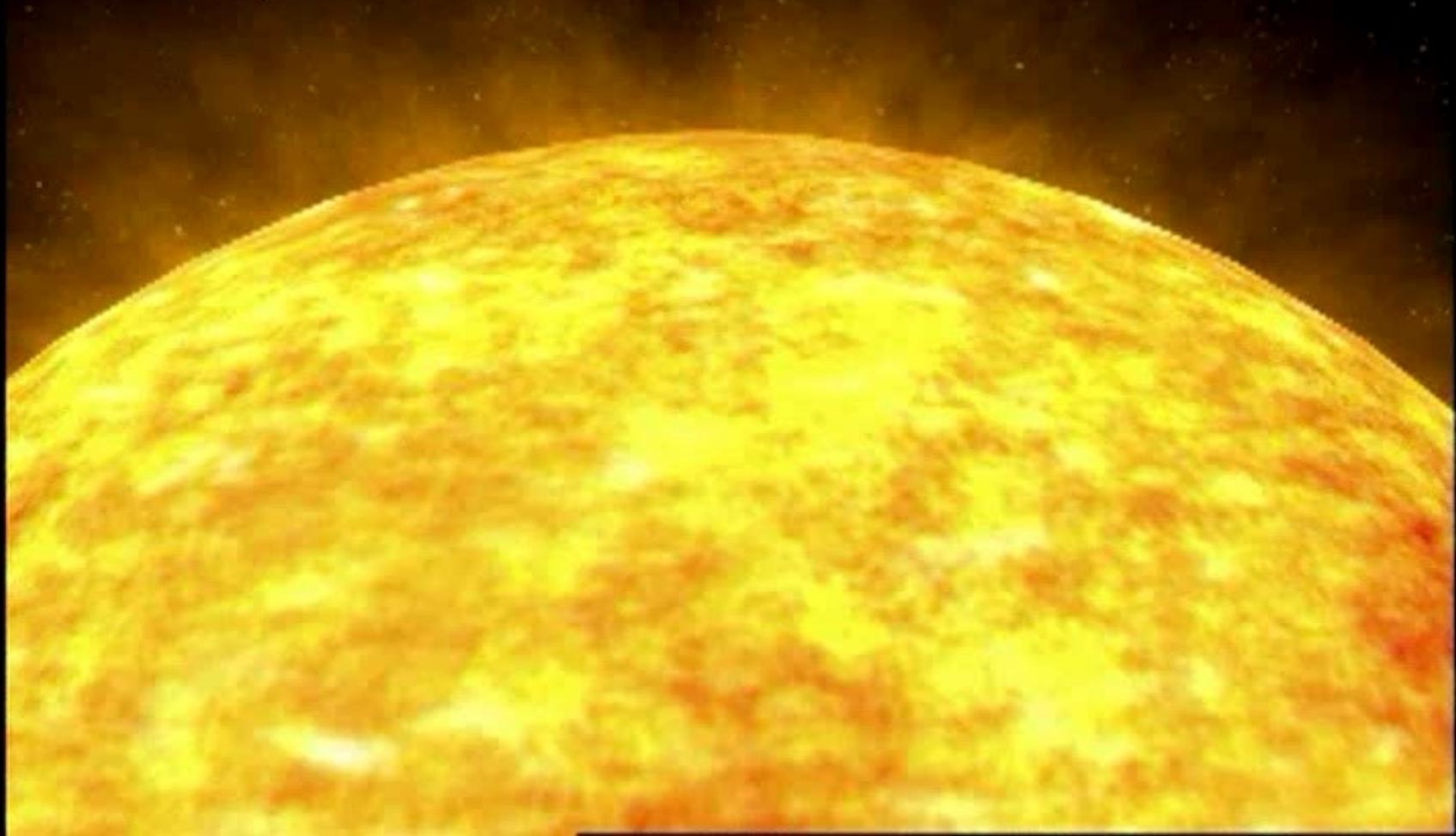
# Eyecciones de masa coronal (CME)



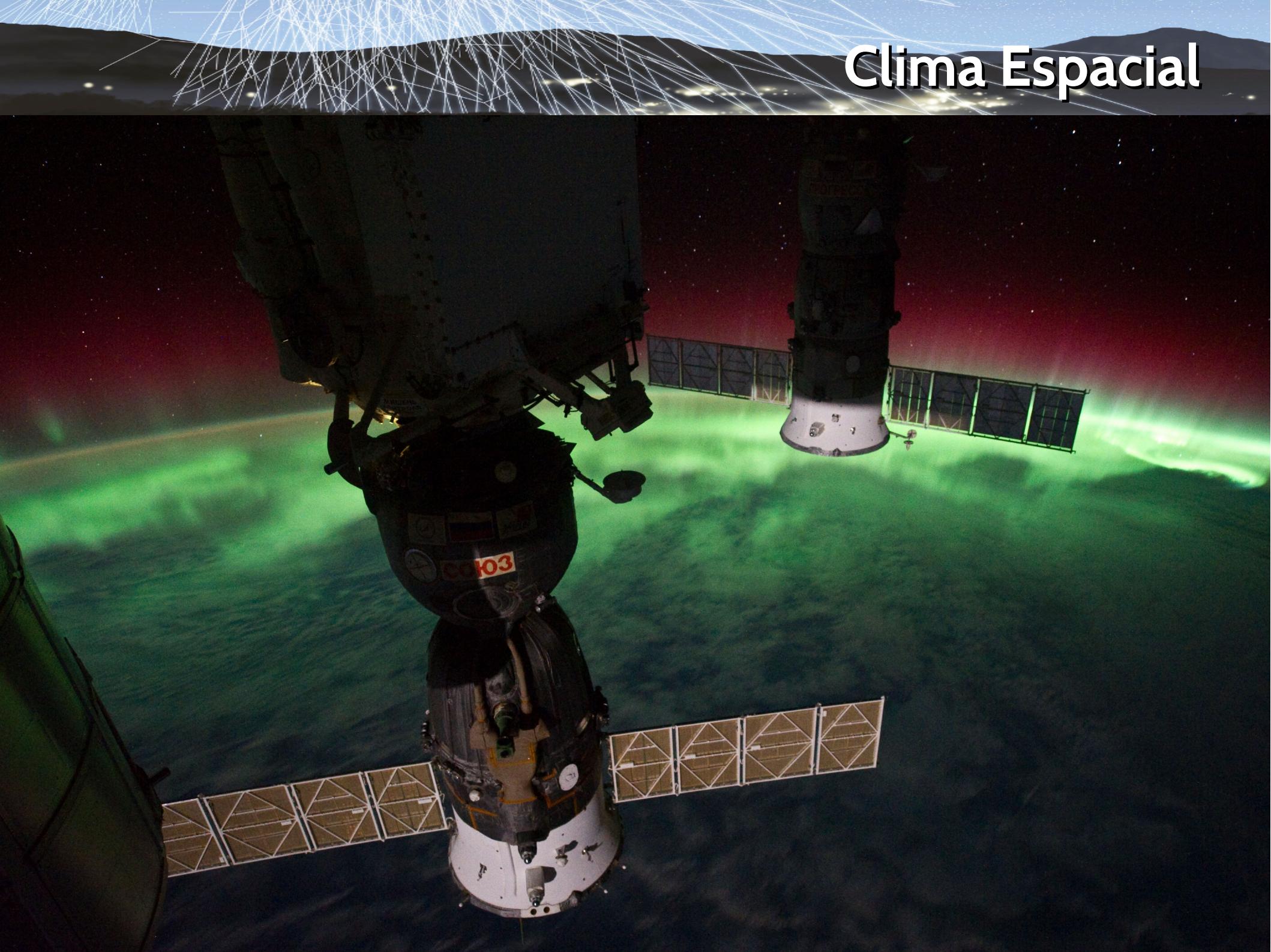
# en el espacio interplanetario (iCME)



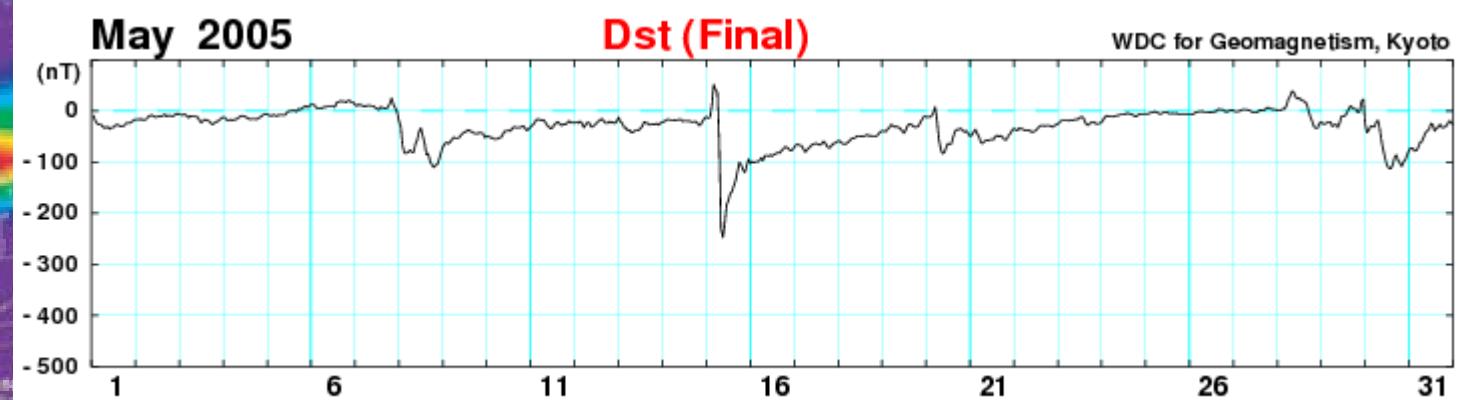
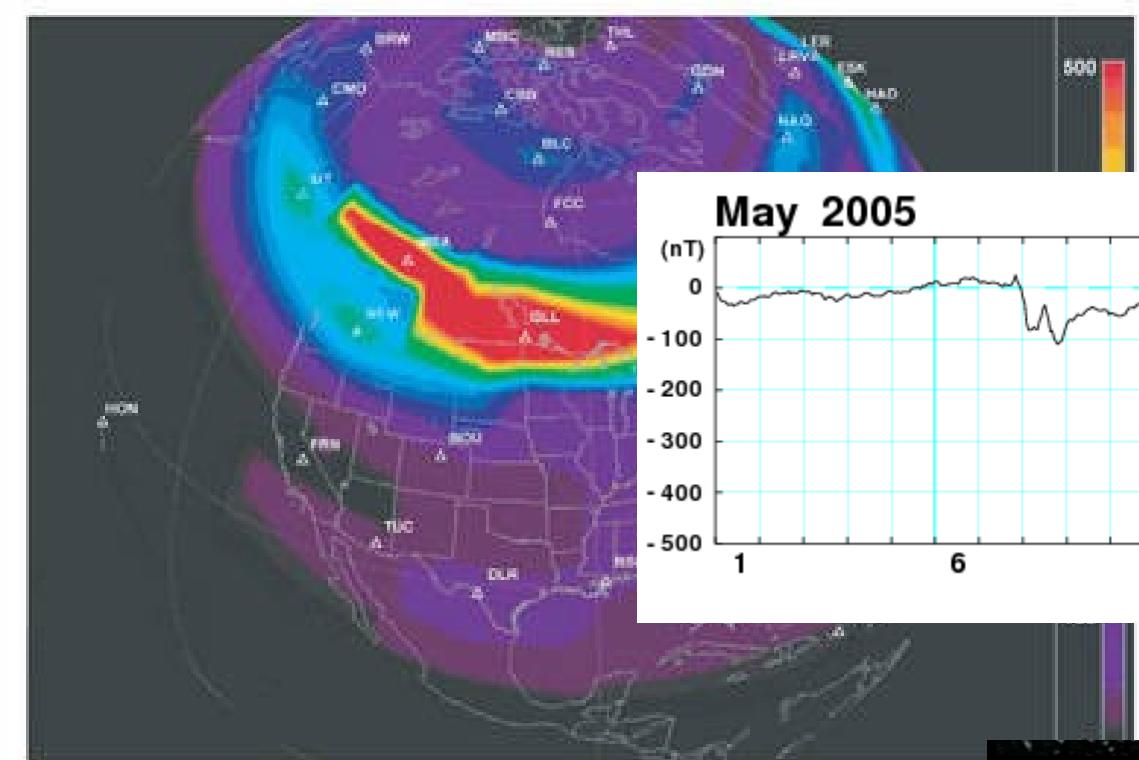
y al llegar a la Tierra



# Clima Espacial



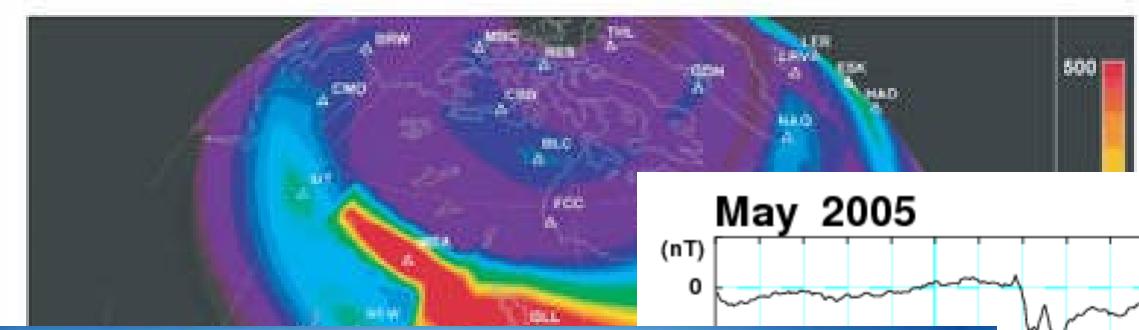
# Clima Espacial



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



# Clima Espacial

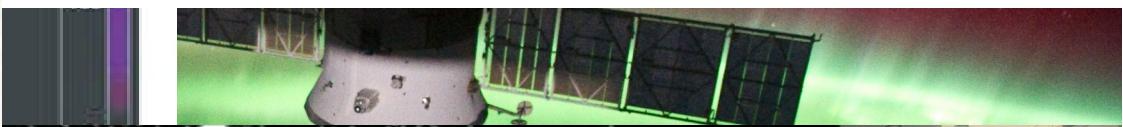
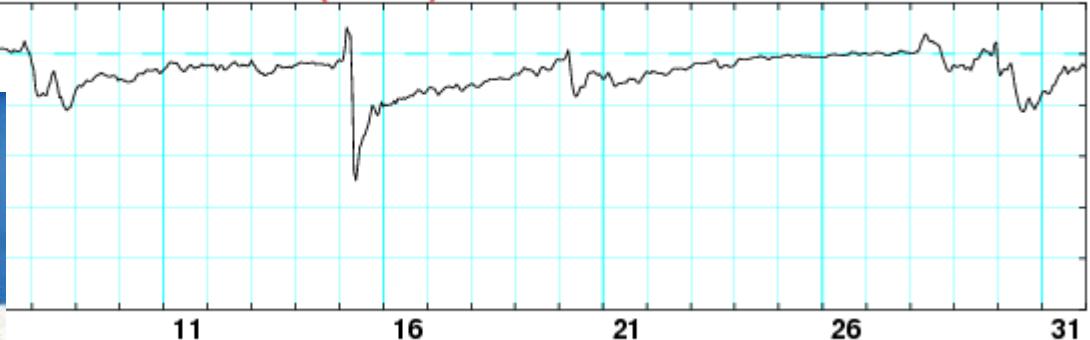


May 2005  
(nT)



Dst (Final)

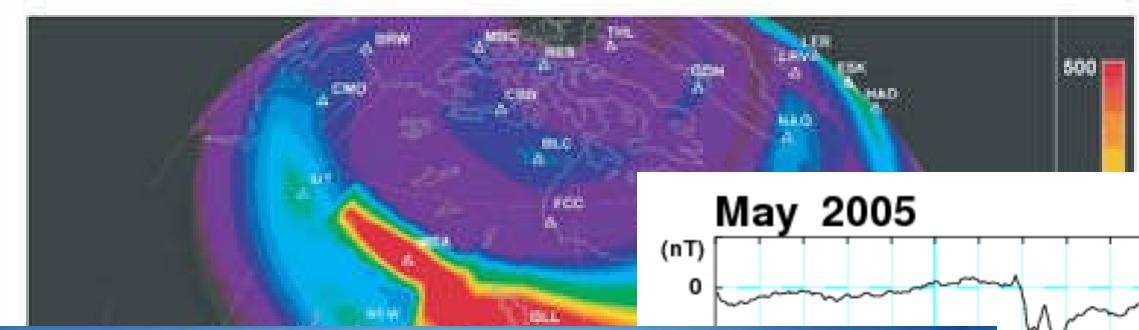
WDC for Geomagnetism, Kyoto



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



# Clima Espacial

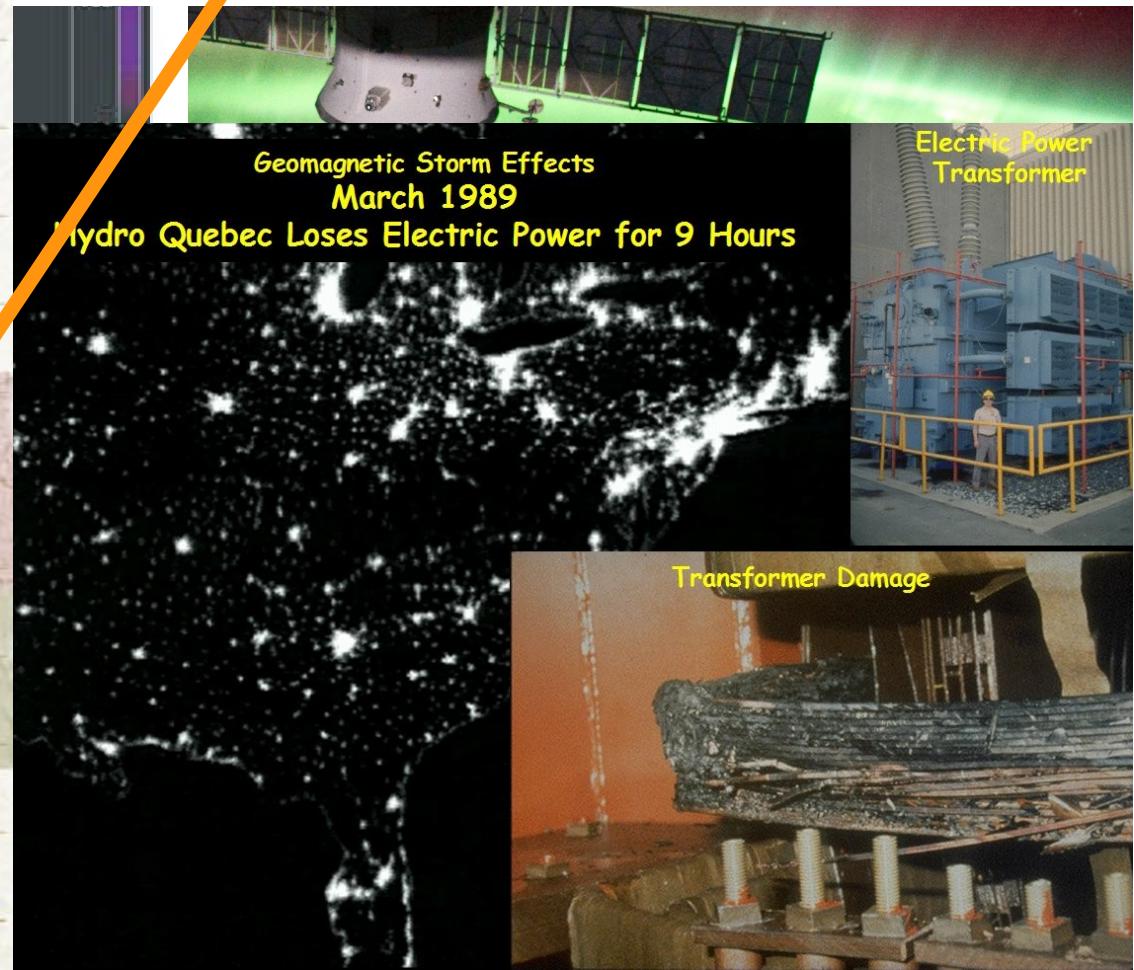


May 2005  
(nT)



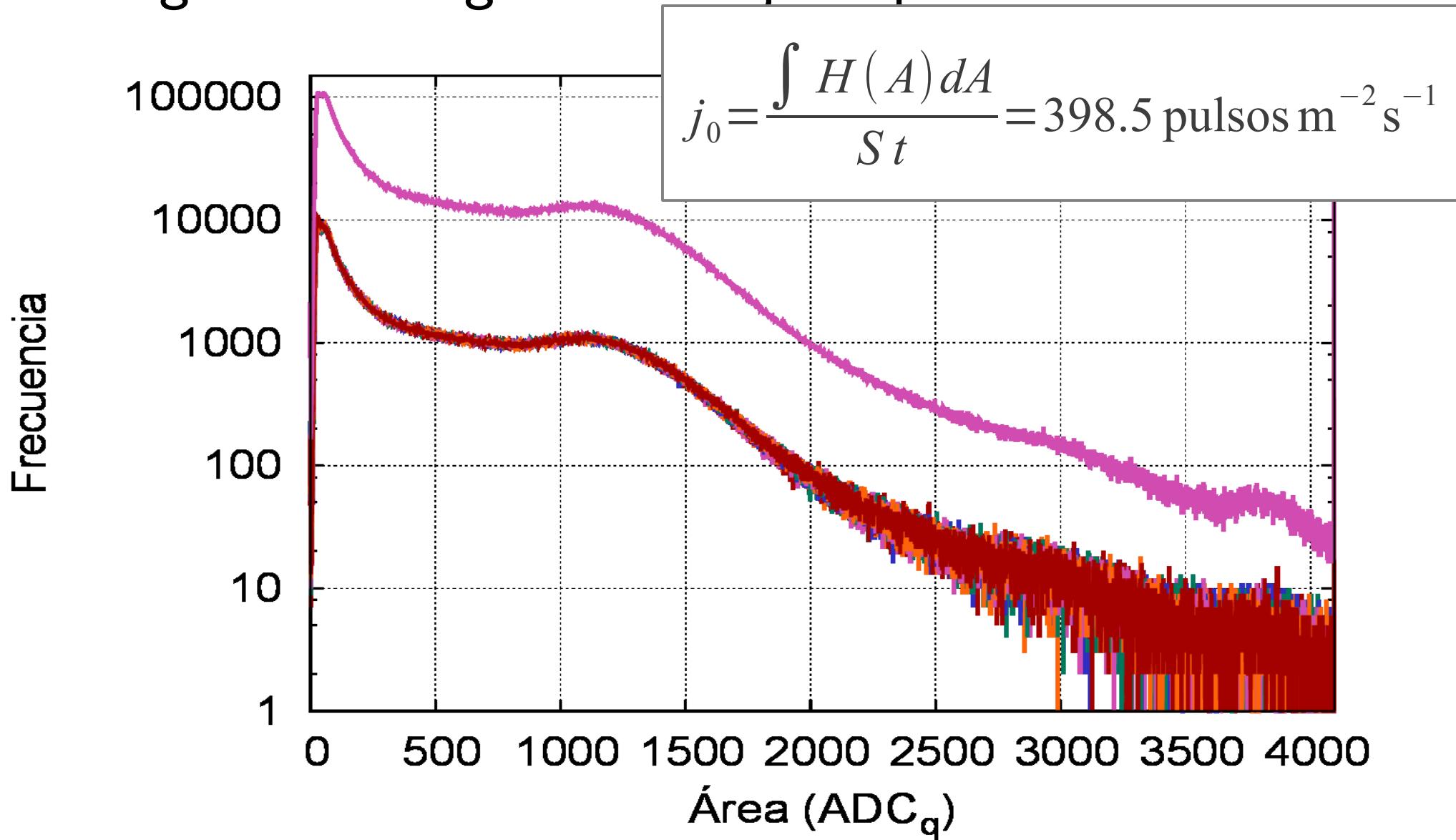
Dst (Final)

WDC for Geomagnetism, Kyoto

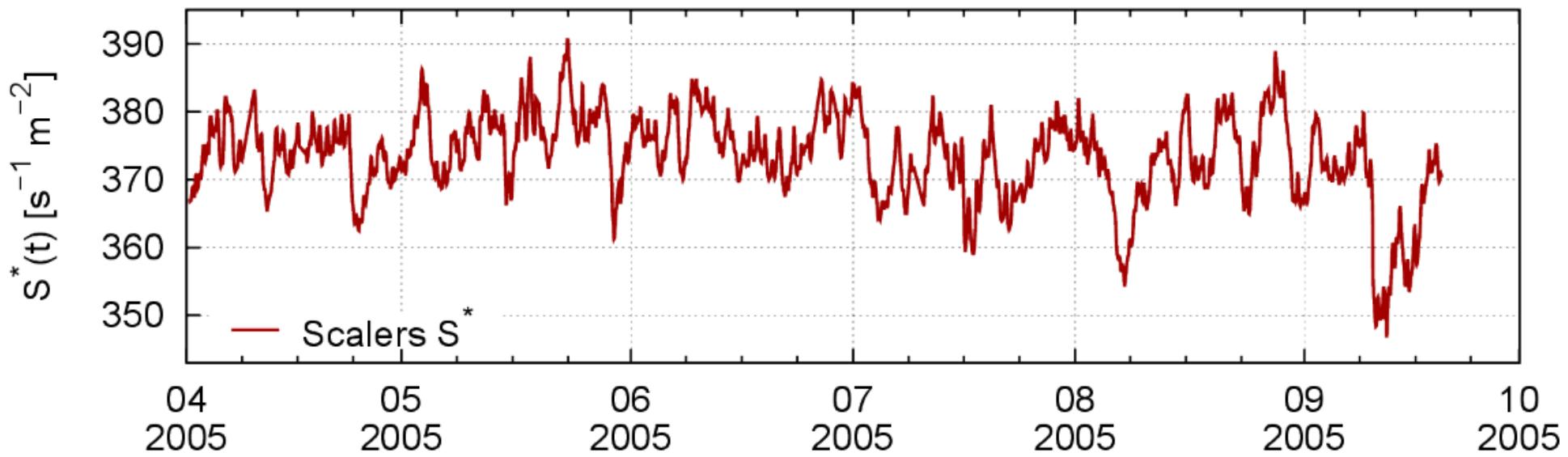


# LAGO Space Weather: How to...

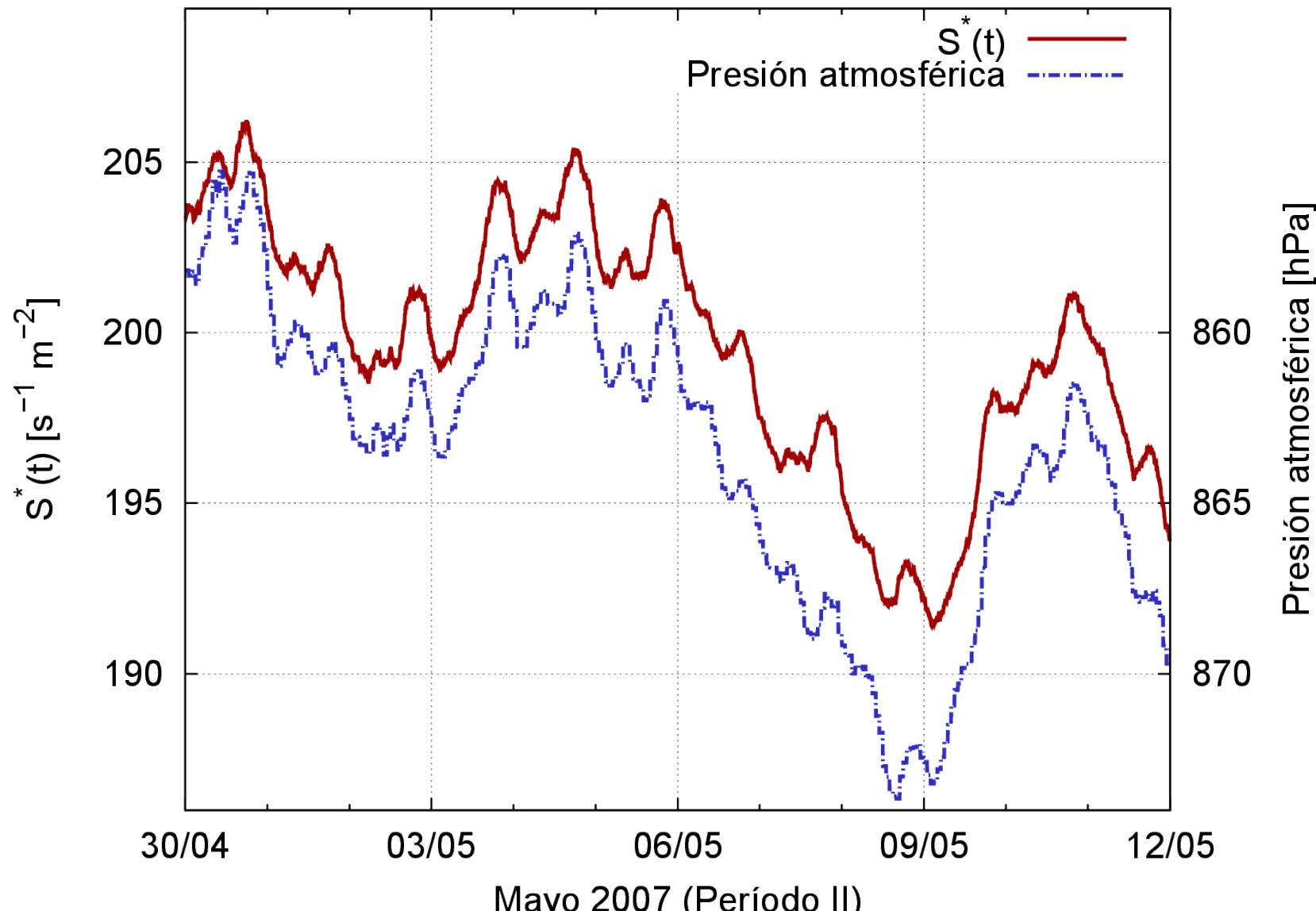
- Integral del histograma → Flujo de partículas



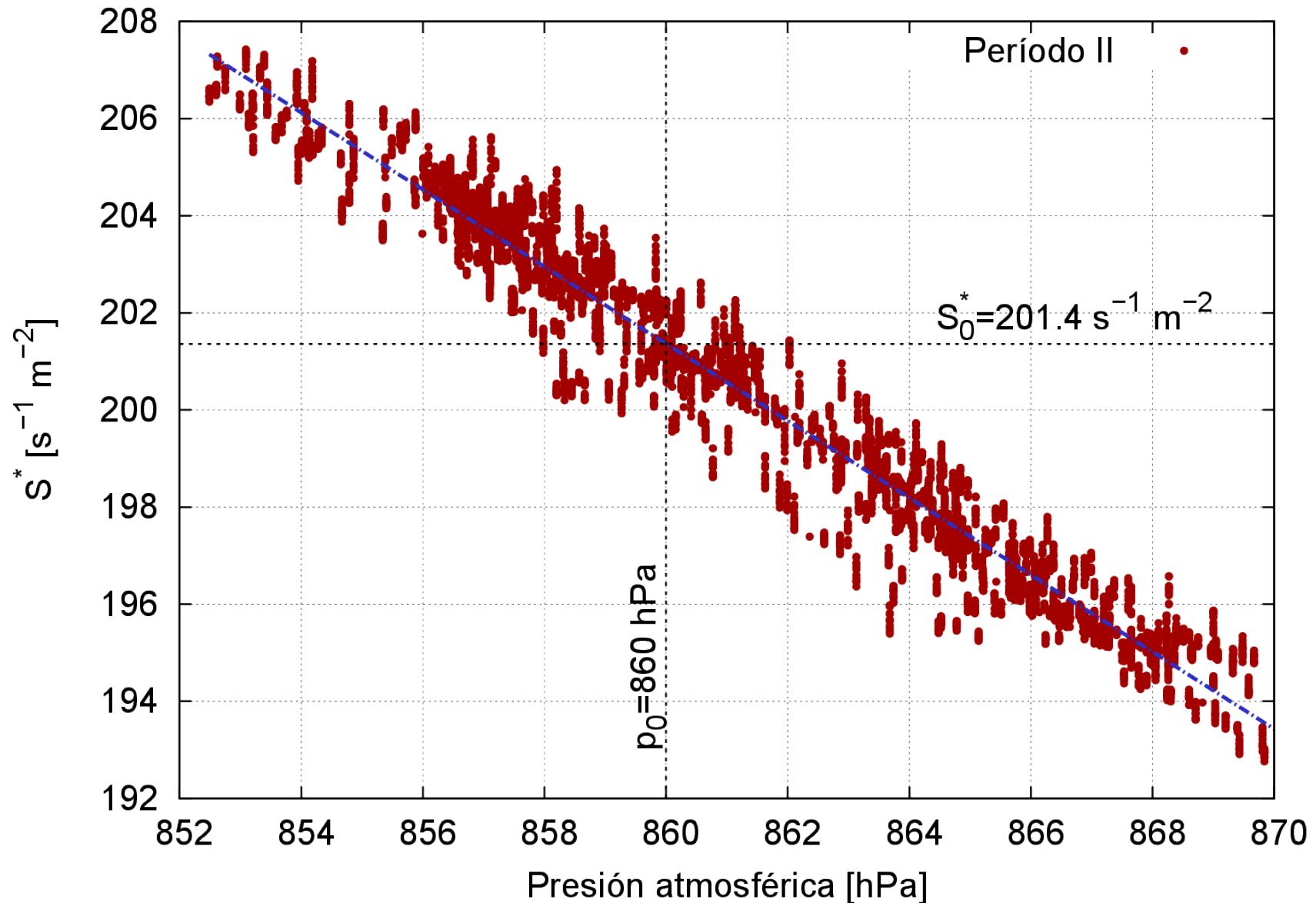
# Flujo de secundarios en el detector



# Flujo vs (-)presión (anticorrelación)

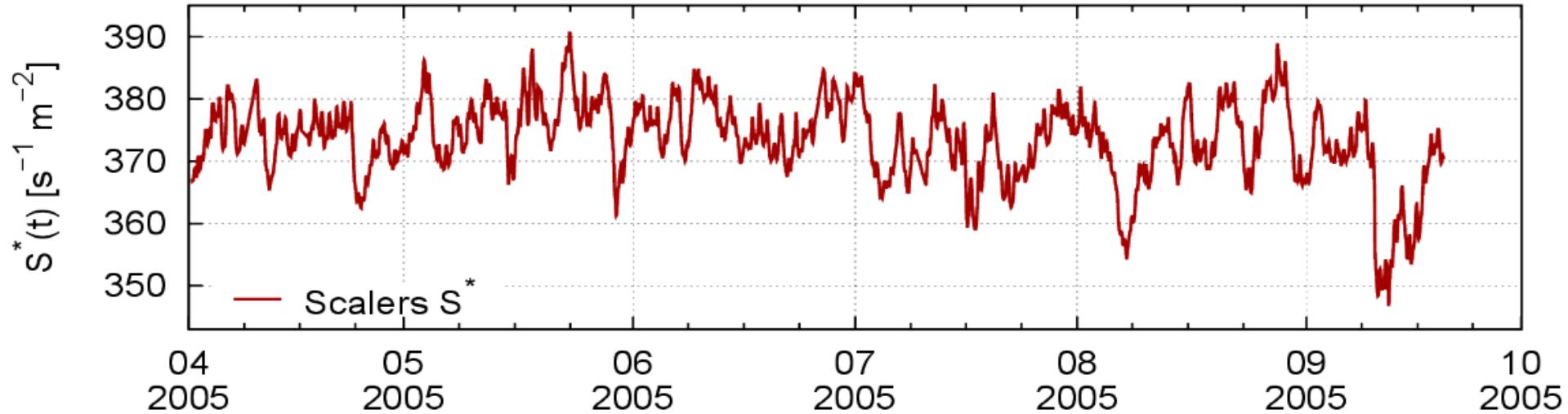


# Anticorrelación Flujo vs Patm

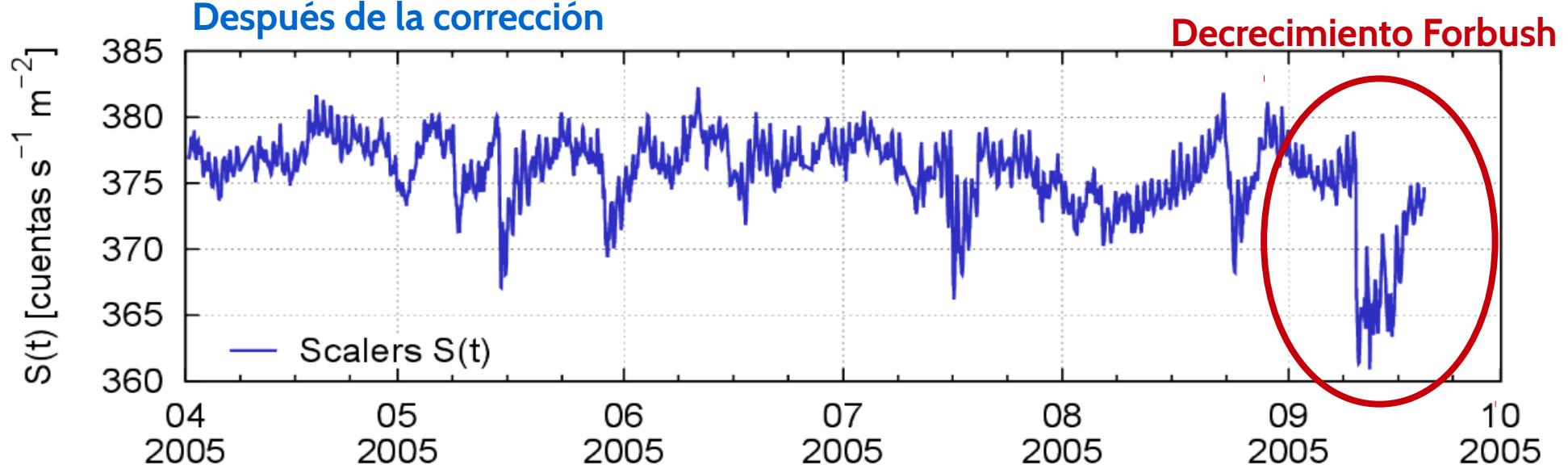


# Flujo de secundarios en el detector

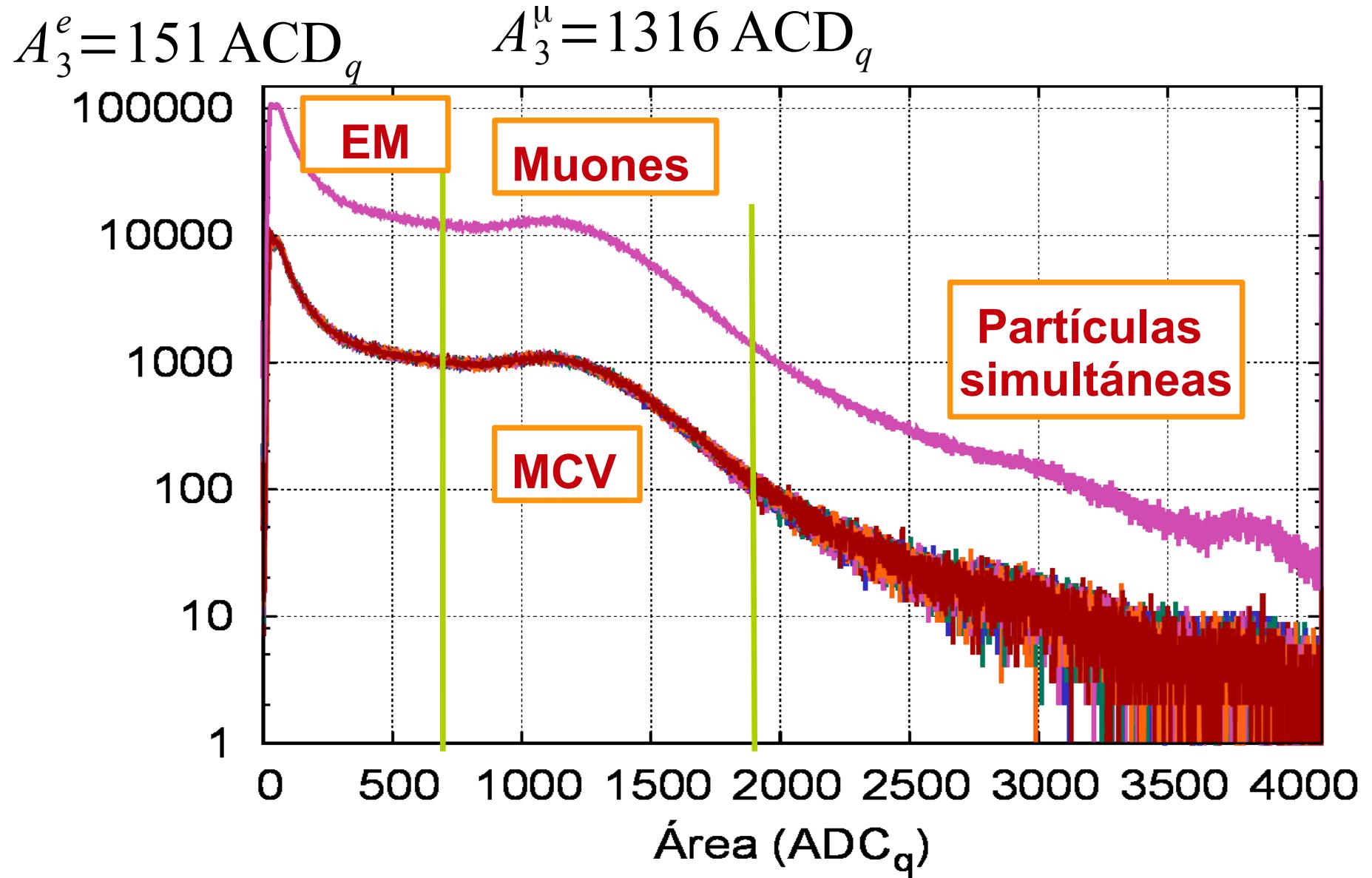
Antes de corregir por efectos atmosféricos



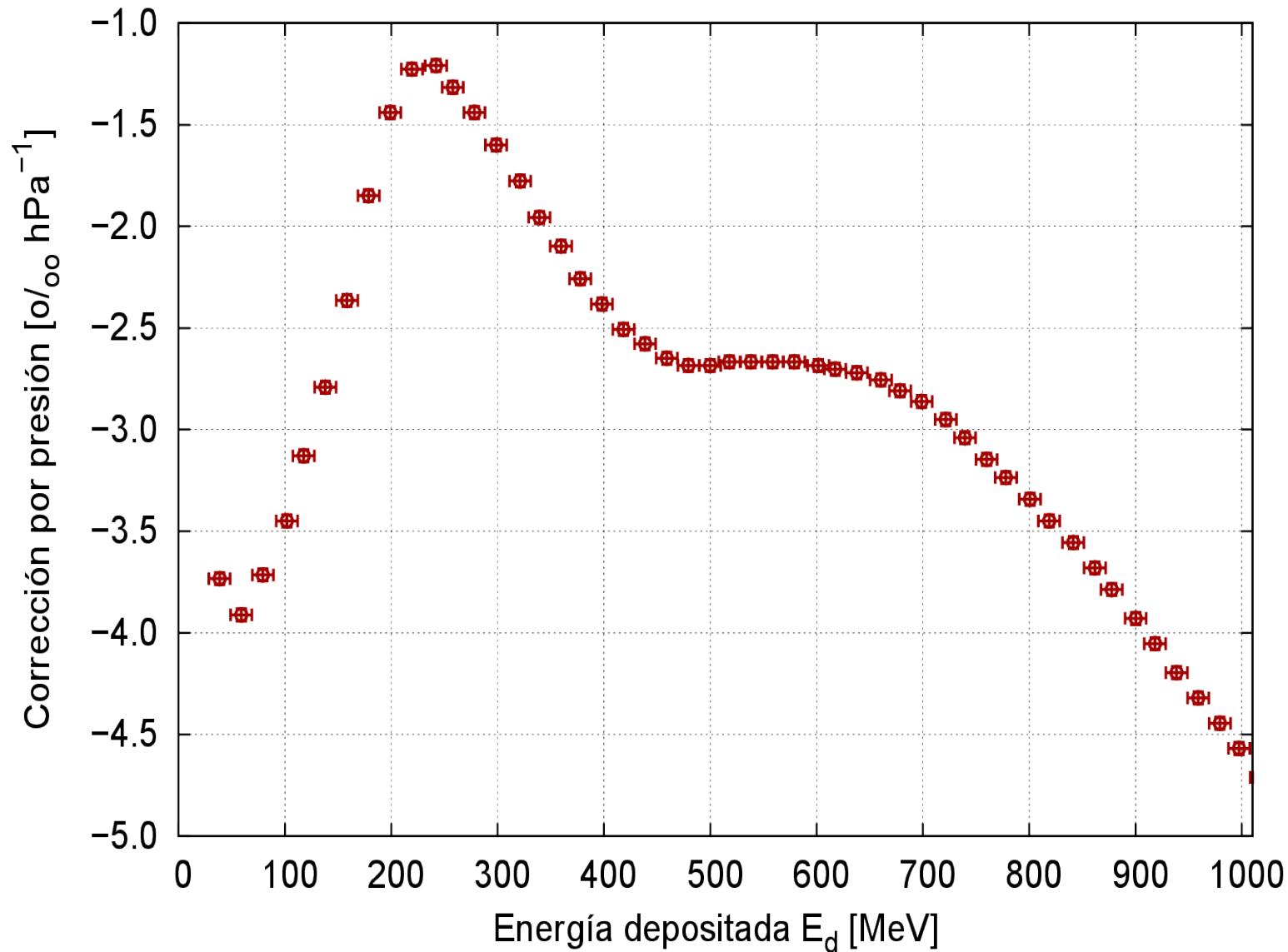
Después de la corrección



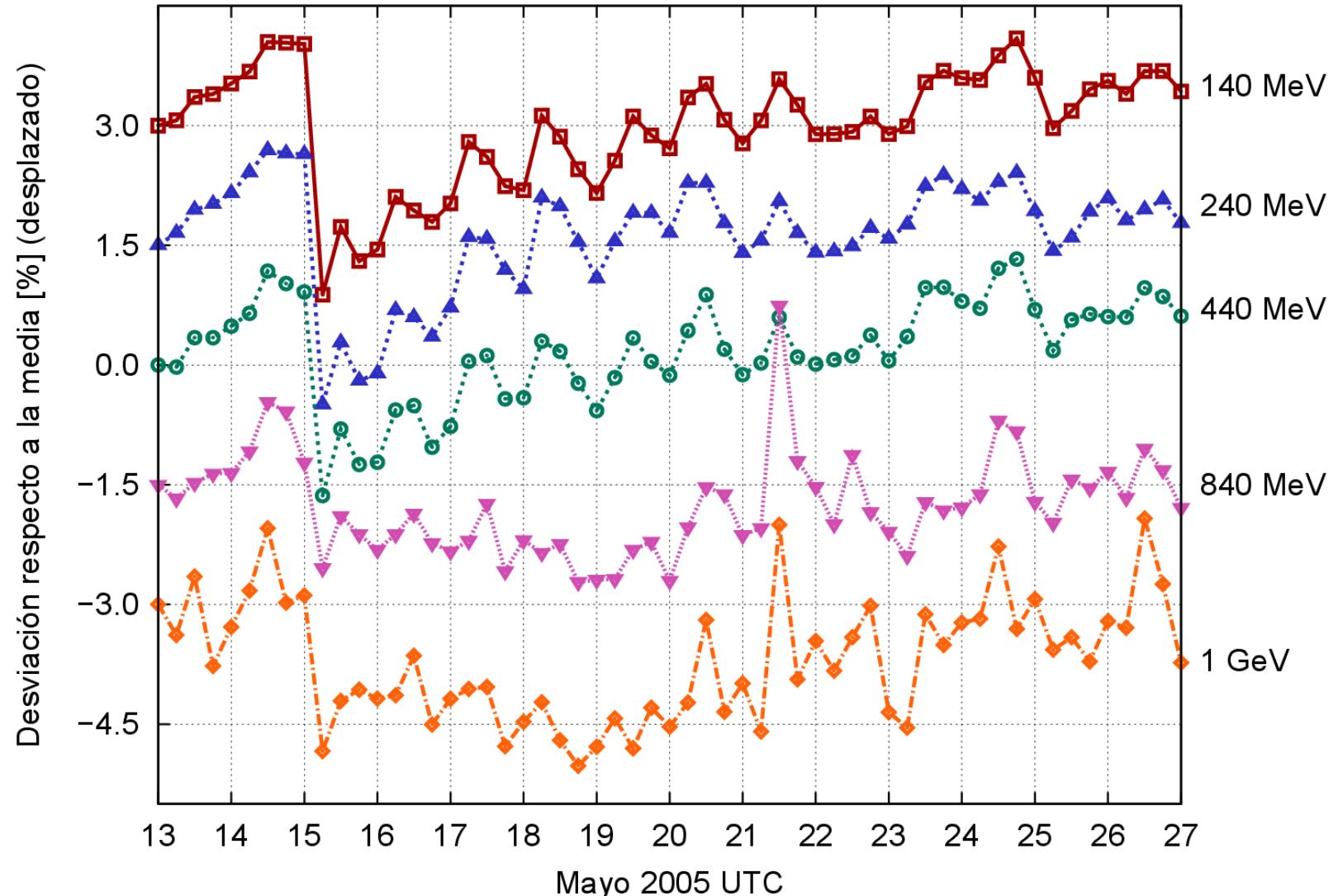
# Flujo (Integral) por bandas



# Corrección de presión por bandas



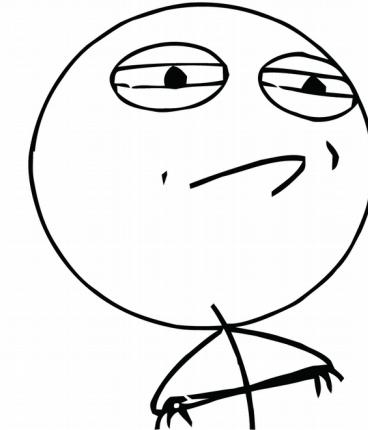
# “Tomografía” del Forbush



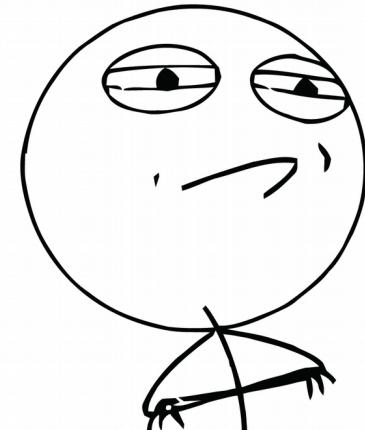
# Hoja de ruta programa LAGO Space Weather

**CHALLENGE ACCEPTED**

- Simular flujo en cada sitio
- Efectos geomagnéticos
- Simulación del detector: LagoSym + G4
- Caracterización del flujo de partículas y sir
- Análisis de datos
  - Obtener los datos!
- Correlación con presión → Conteo LAGO
- Publicación y liberación parcial
- Realizar análisis sobre histogramas
- Automatizar el proceso para todos los siti



**CHALLENGE ACCEPTED**



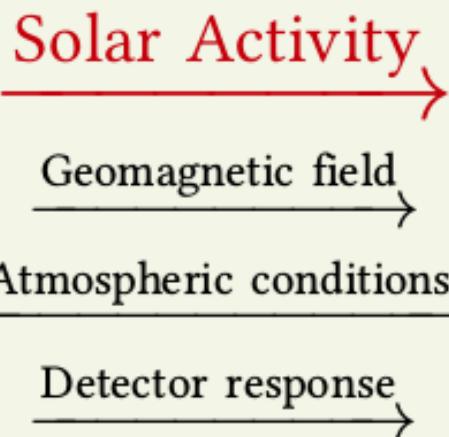
# The LAGO Space Weather Program

via Solar modulation of low energy cosmic rays

## Connections

### CR Flux

- ... Modulated flux
- ... Primaries
- ... Secondary particles



Modulated flux ...

Primaries ...

Secondary particles ...

## Signals

## Synergy

Flux variation of signals at detector level  $\Leftrightarrow$  Solar Activity

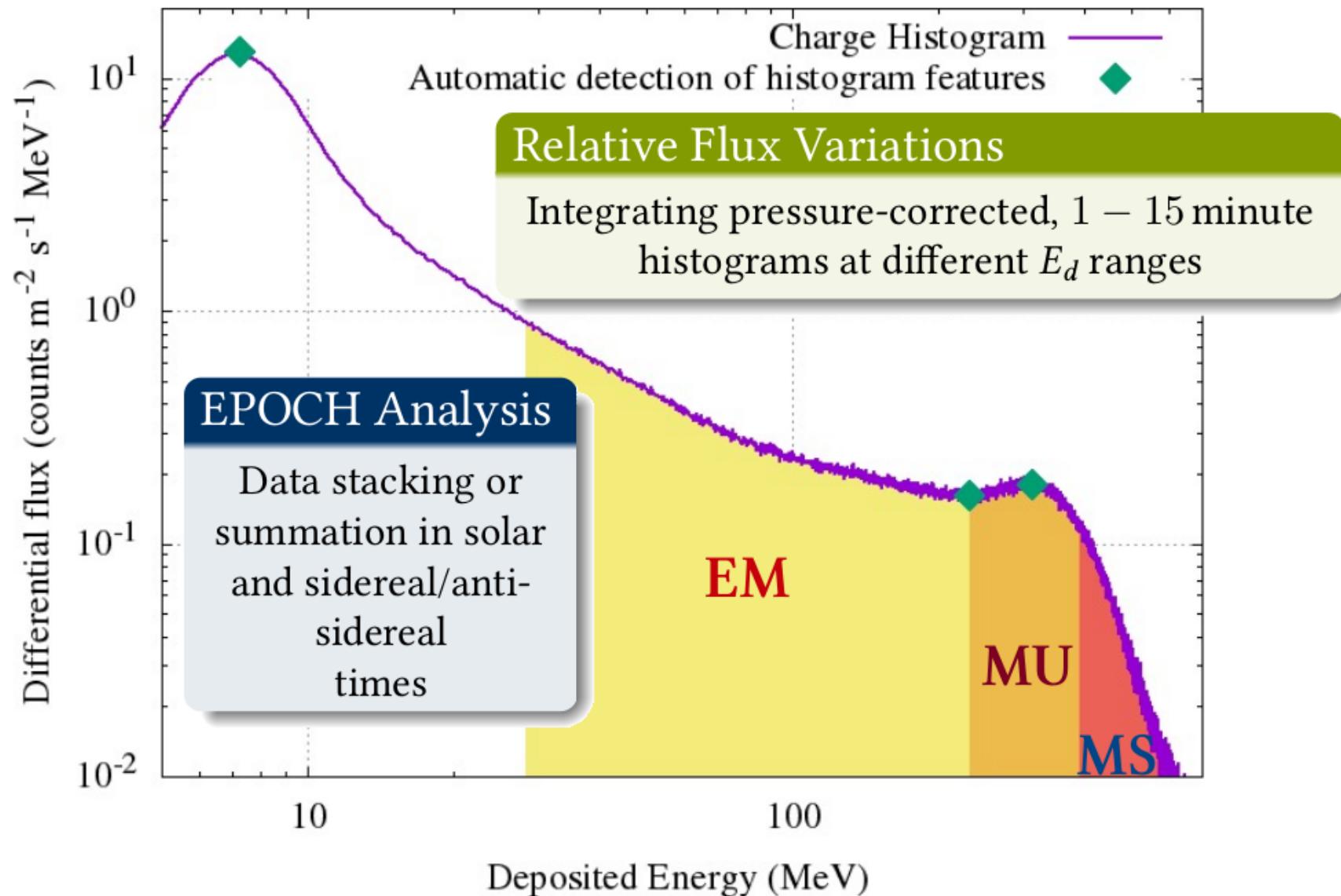
## LAGO Capabilities: Multi-spectral analysis

Simultaneous measurements of secondary particles at ground level at different altitudes and  $R_c$  in three bands: EM,  $\mu$ , and multi-particles dominated

# Análisis MSAT (*multispectral analysis technique*)

## Data

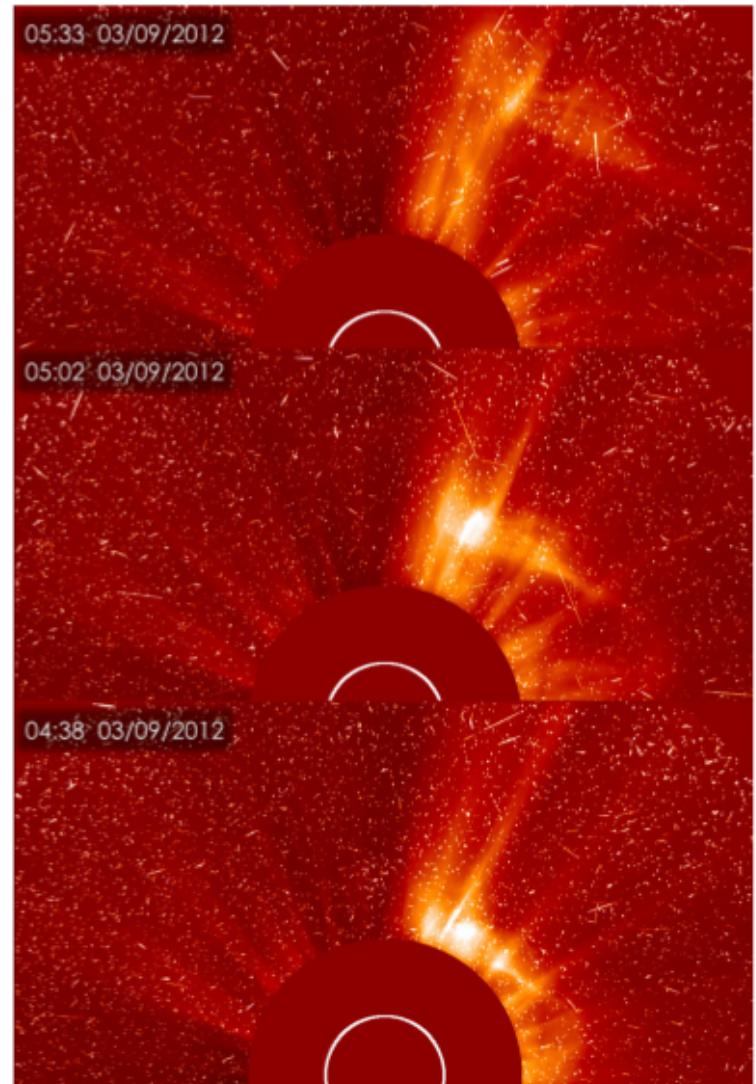
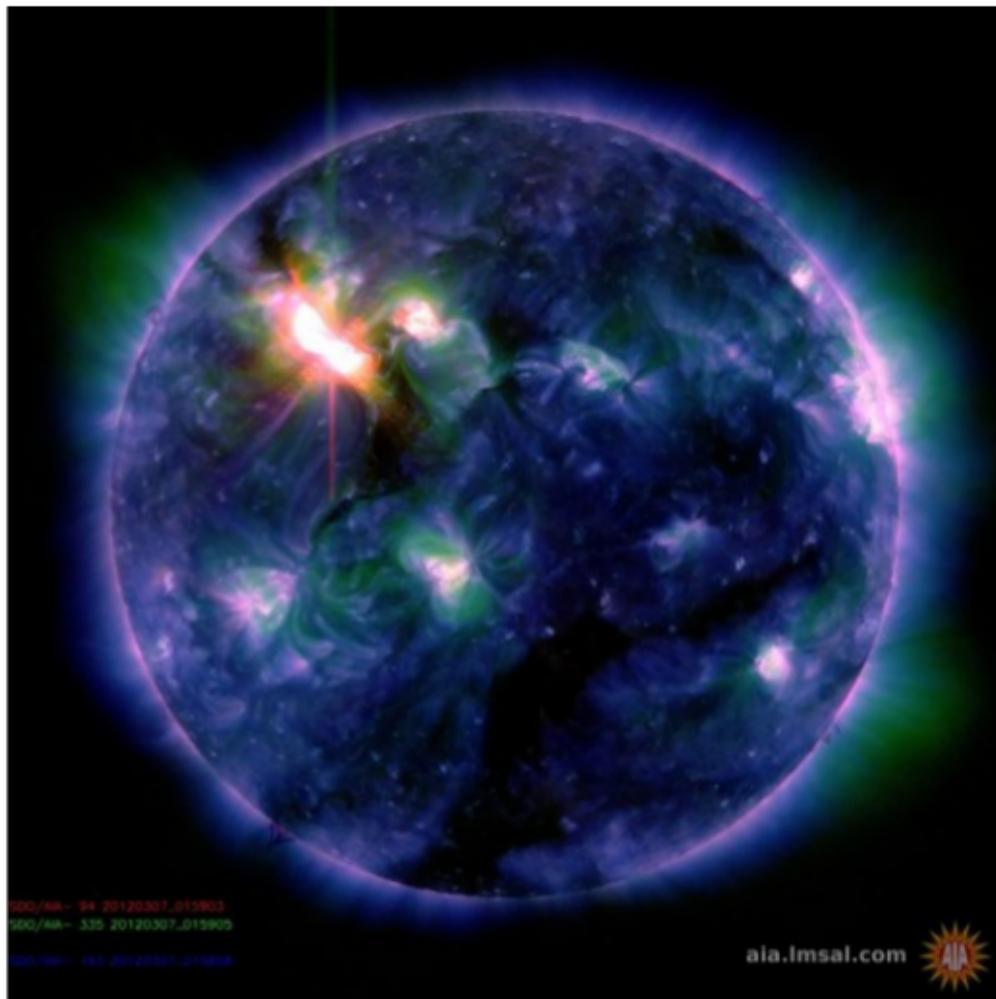
Charge integrated pulse histogram  $\xrightarrow[\text{simulations}]{\text{Detector response}}$  deposited energy  $E_d$



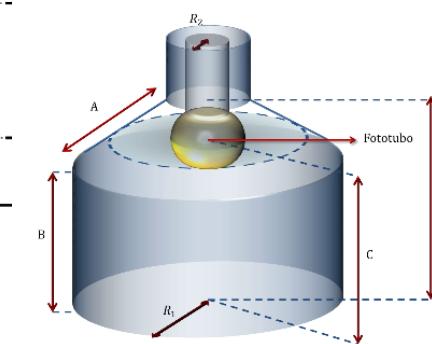
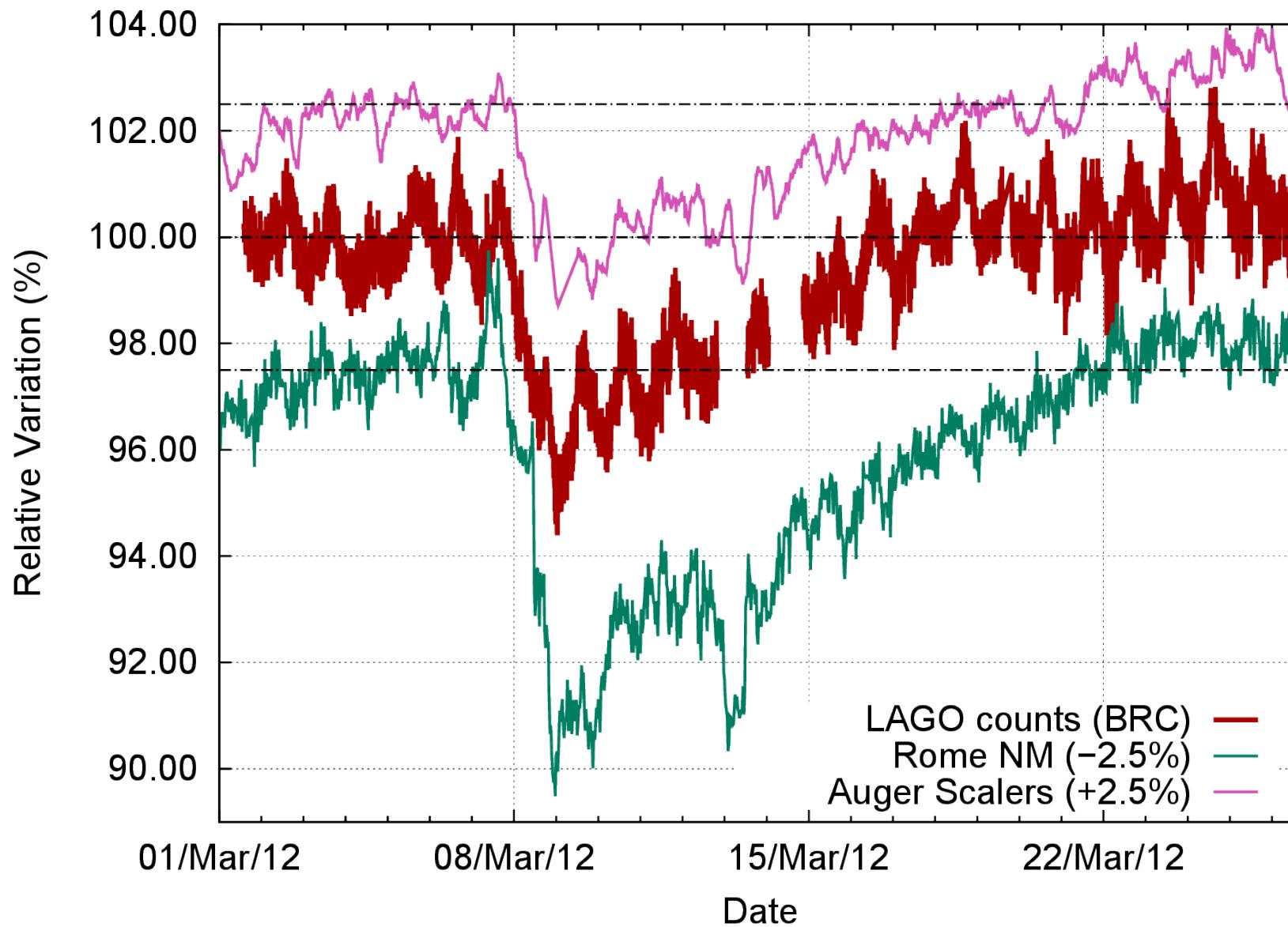
# Un caso concreto

## March/2012: Solar eruptive event

07/March: X5.4 major solar flare + Halo CME/iCME towards earth + Geomagnetic storm

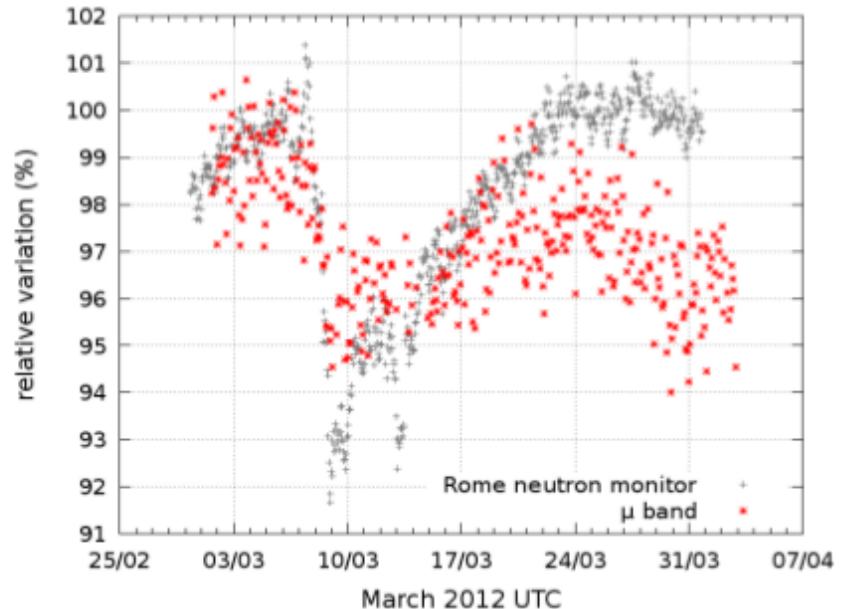
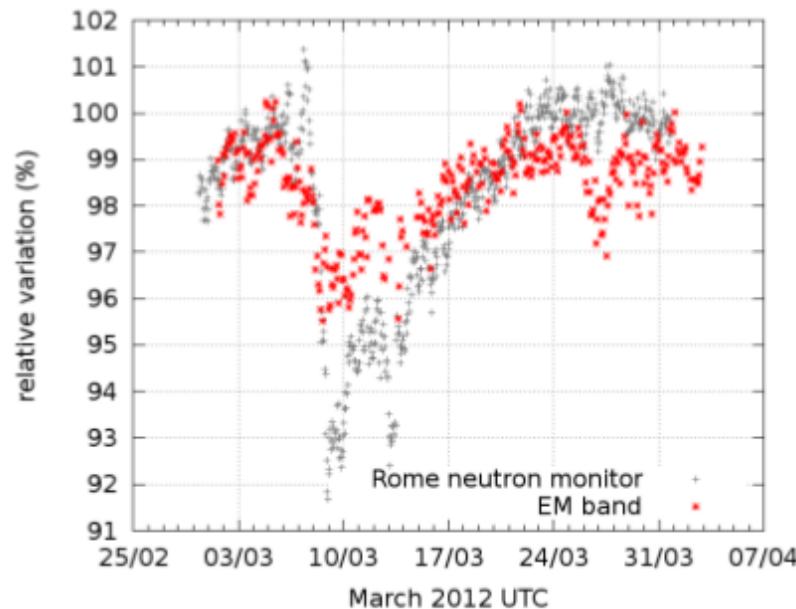


# El Programa LAGO Space Weather

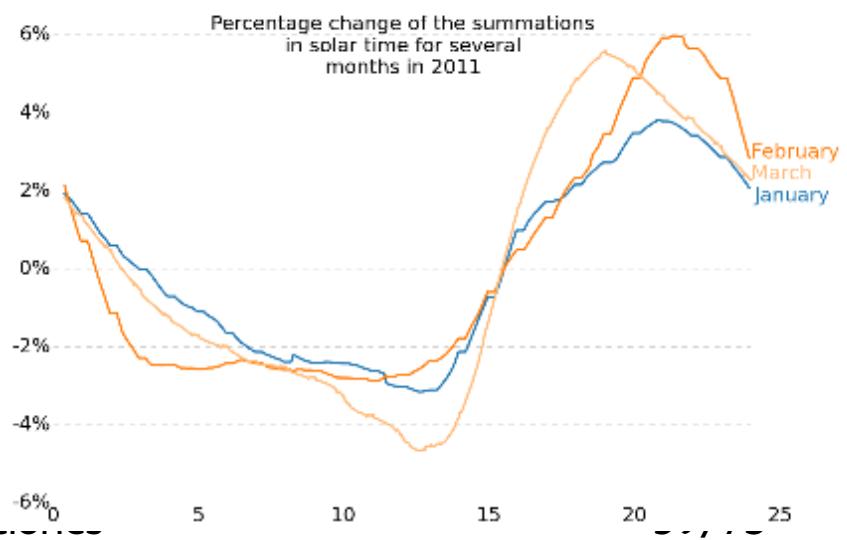
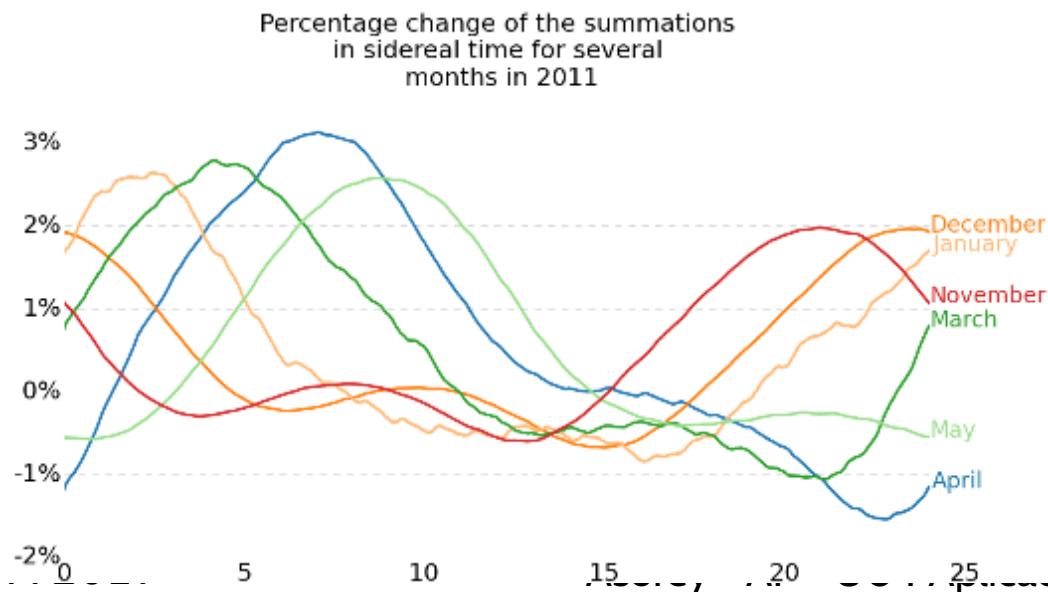


# Space Weather Phenomena at single WCD (Underway)

- Multi-spectral analysis of the March/08/2012 Forbush event:



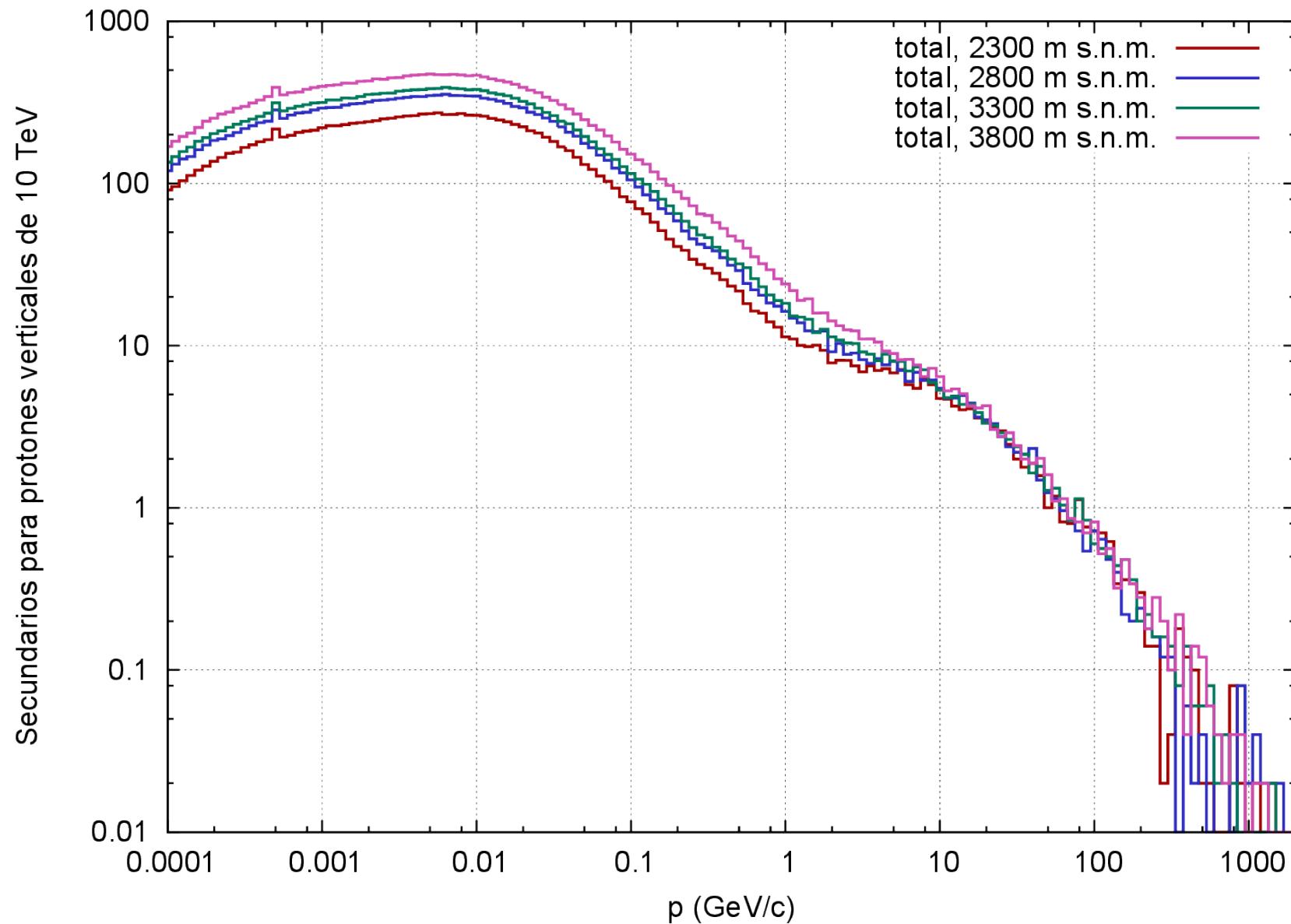
- EPOCH Analysis in Solar and Sidereal times: Solar Daily Modulation



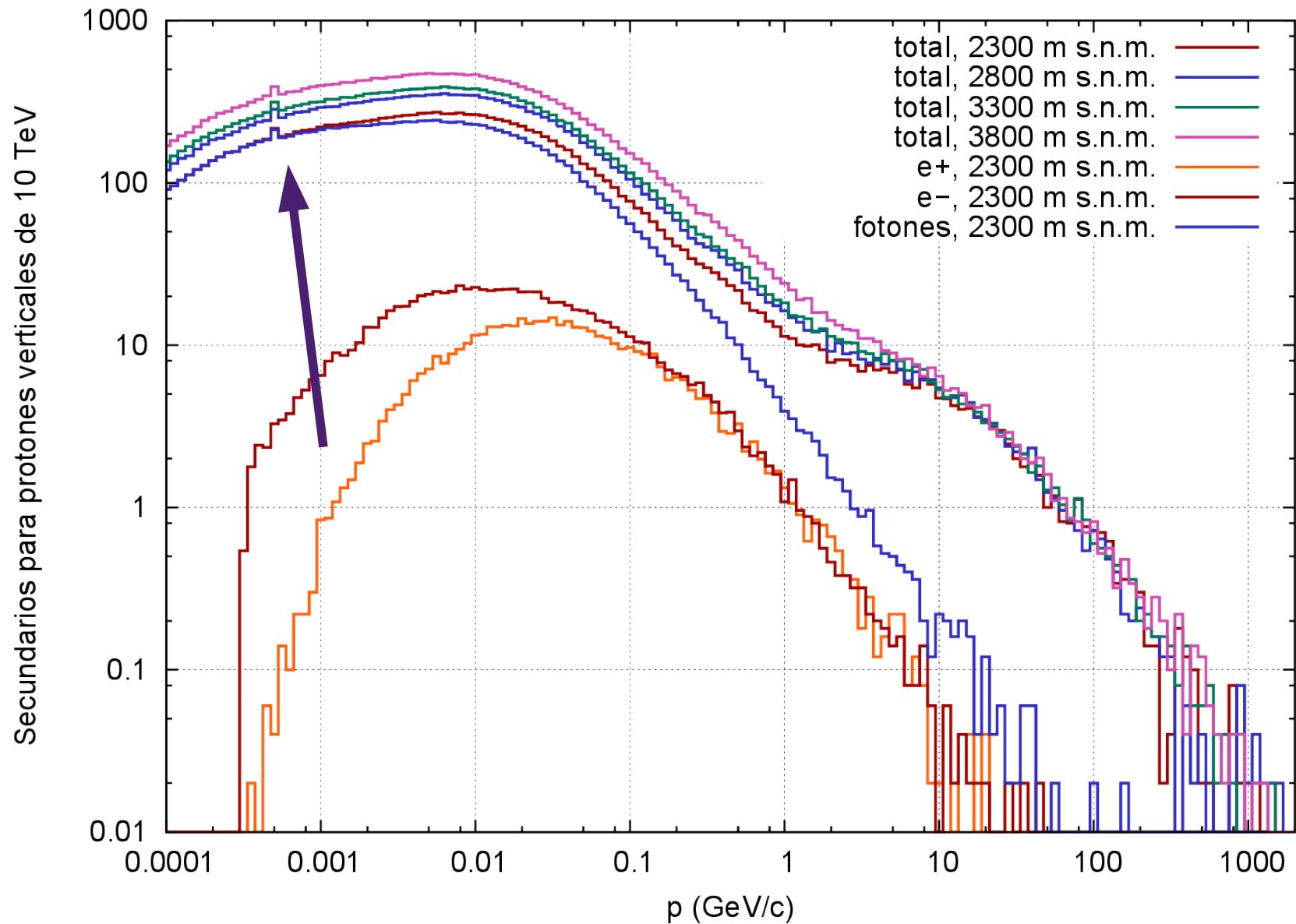
## Detailed simulation chain

- Directional rigidity cut-off at each site  $R(\varphi, \lambda, \theta, \phi)$
- Primary flux at the top of the atmosphere (CORSIKA simulations for each site  $(\varphi, \lambda, h)$ )
  - ▶ Measured spectra for all nuclei  $1 \leq Z_p \leq 26, 1 \leq A_p \leq 56$
  - ▶  $(R(\theta, \phi) \times Z_p) \leq (E_p/\text{GeV}) \leq 10^6, 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
  - ▶ Integrated primary flux:  $\sim 10^7 - 10^8 \text{ hour}^{-1} \text{ m}^{-2}$  ( $\gtrsim 5$  hours at each site)
- Secondary flux at detector level
- Detector response:
  - ▶ Fast and Simple *LAGOFast™* detector simulation
  - ▶ Detailed *GEANT4* model
  - ▶ First attempts on *FLUKA*

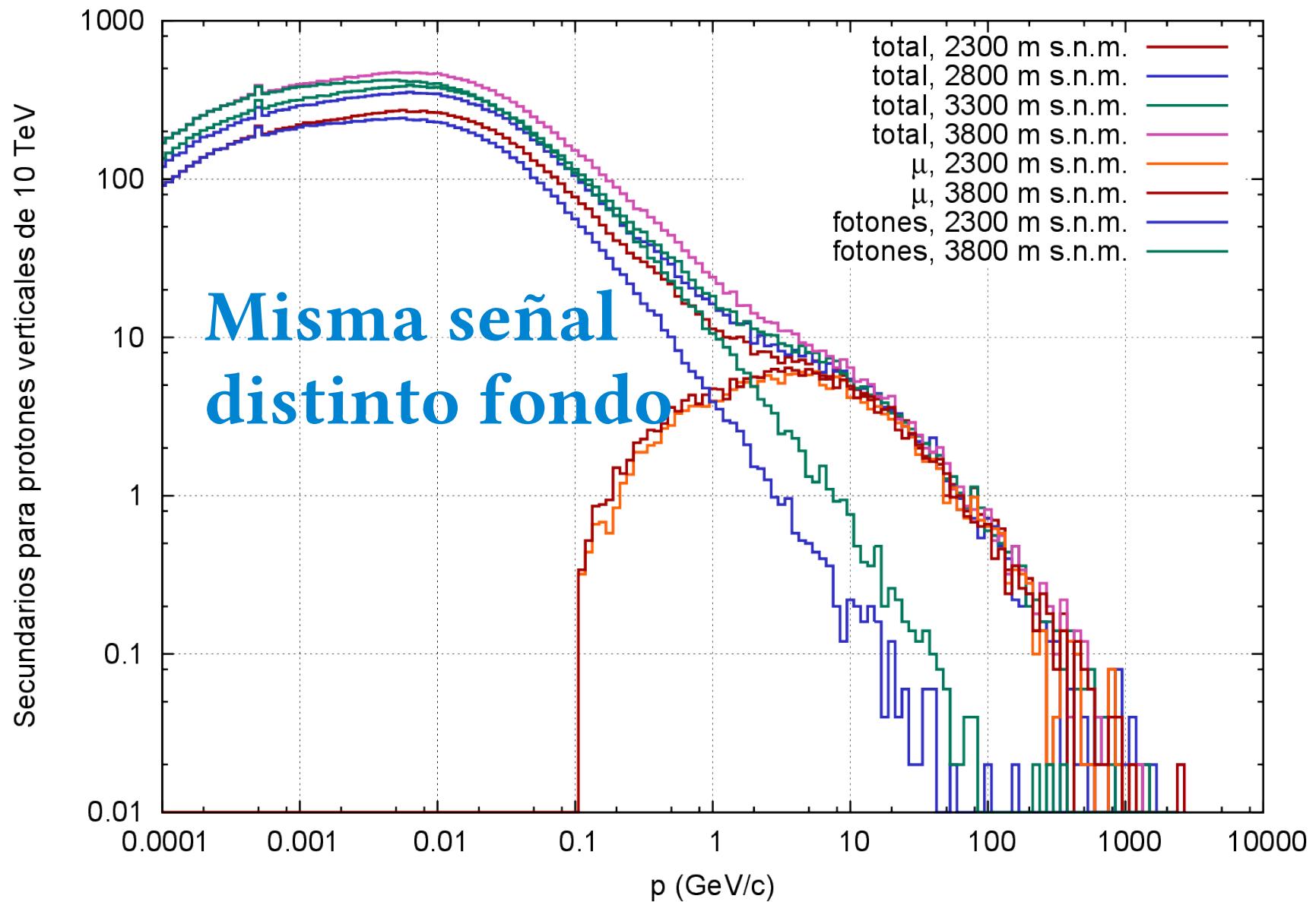
# Simulación alturas



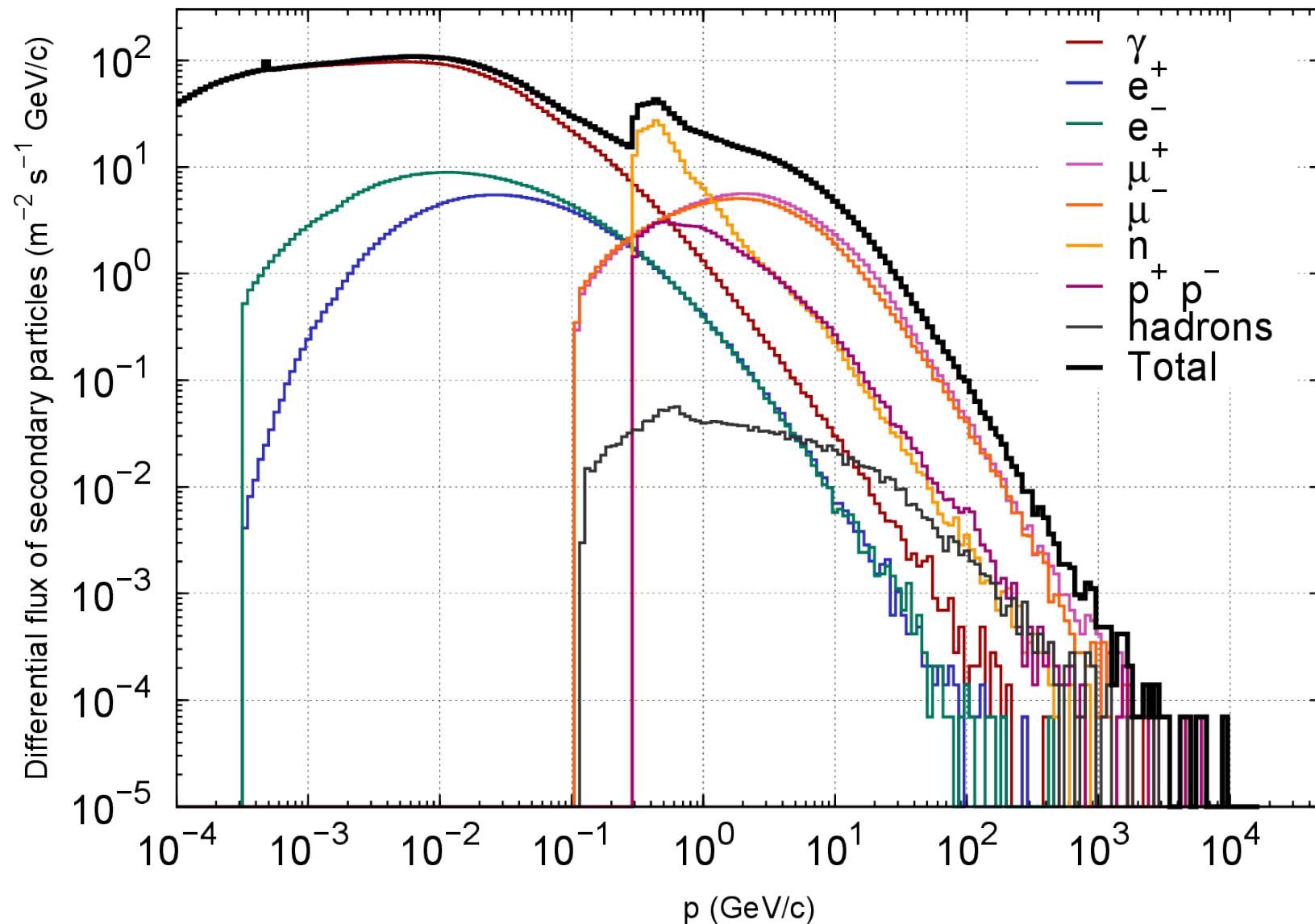
$e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$



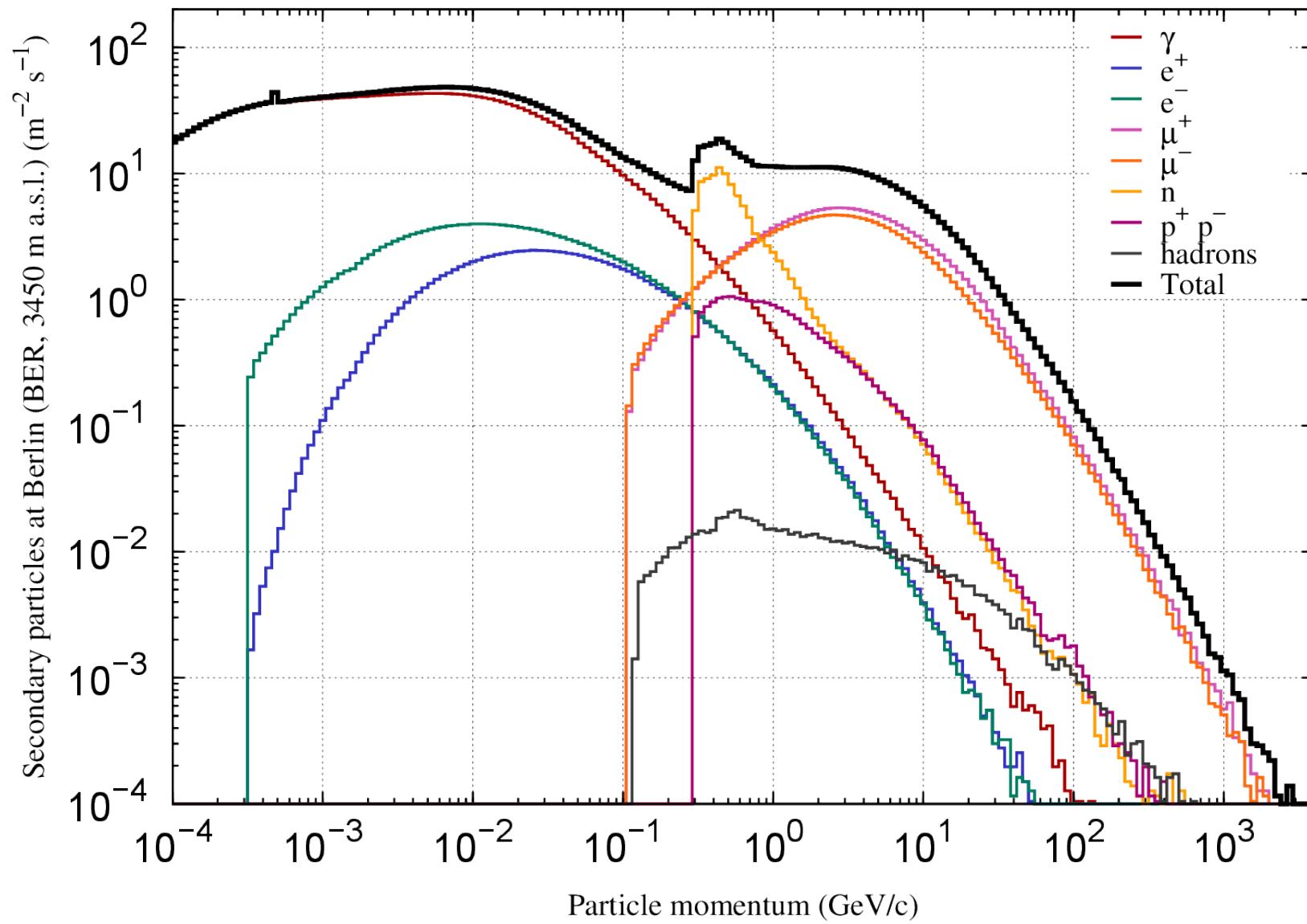
# Joroba del muón



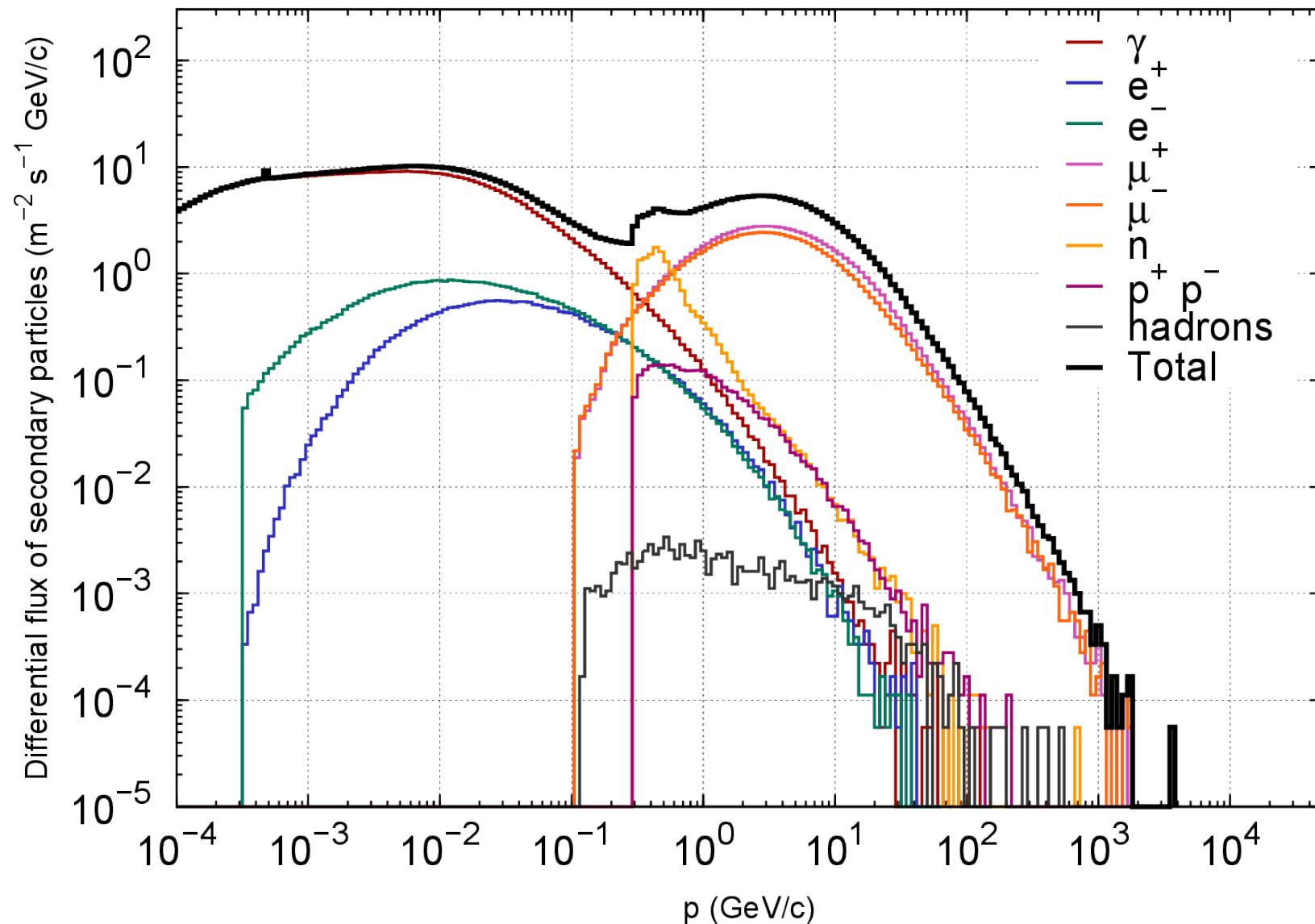
# Chacaltaya, Bolivia, 5300 msnm



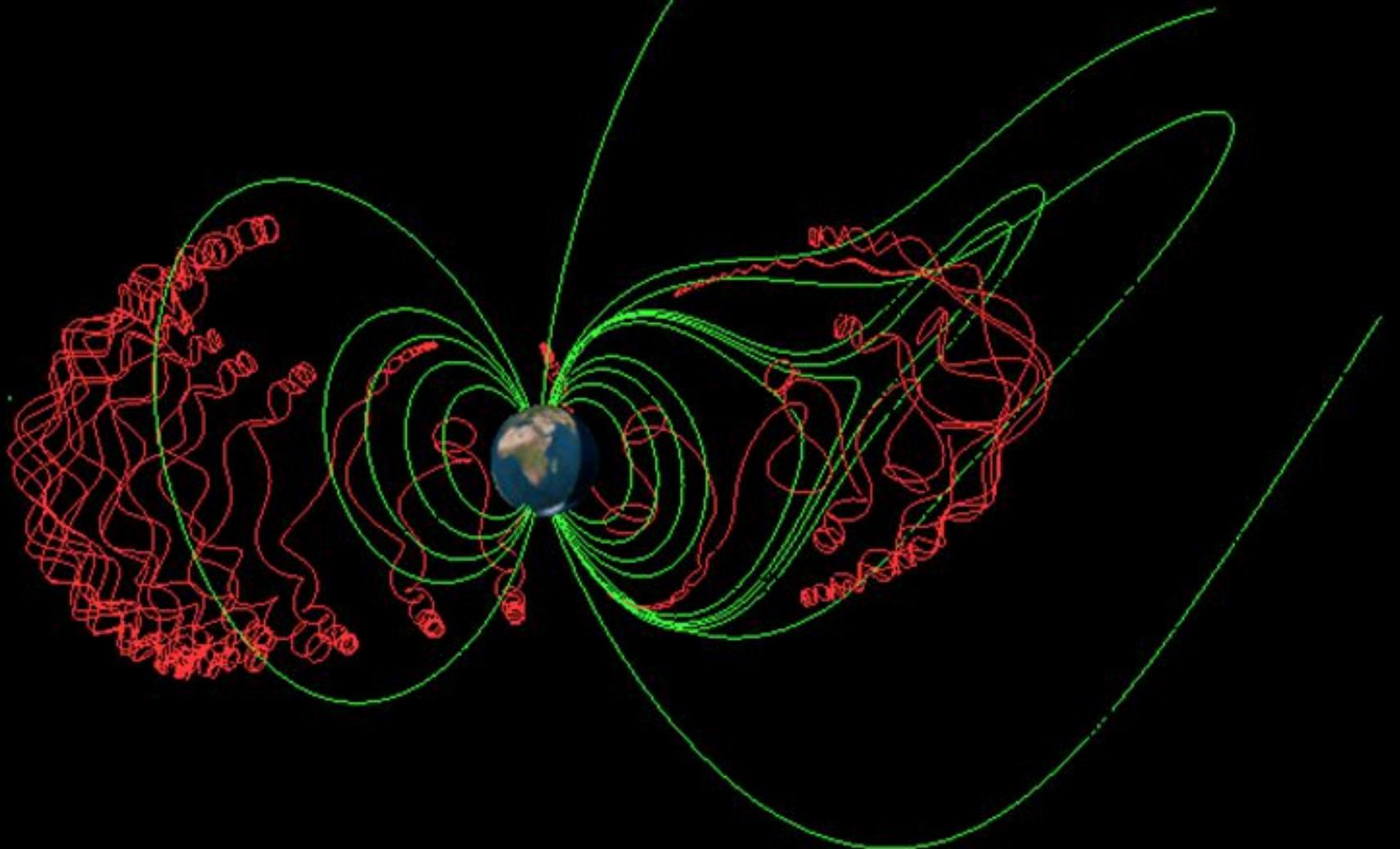
# Berlín, Colombia, 3450 msnm



# Bariloche, Argentina, 850 msnm



# MAGCOS (próximamente en la wiki)



# Rigidez geomagnética

- A partir de la ecuación de Lorentz

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{eZ}{c} (\vec{v} \times \vec{B}) \rightarrow \frac{d\vec{I}_v}{ds} = \frac{eZ}{pc} (\vec{I}_v \times \vec{B}) \equiv \frac{1}{R_m} (\vec{I}_v \times \vec{B})$$

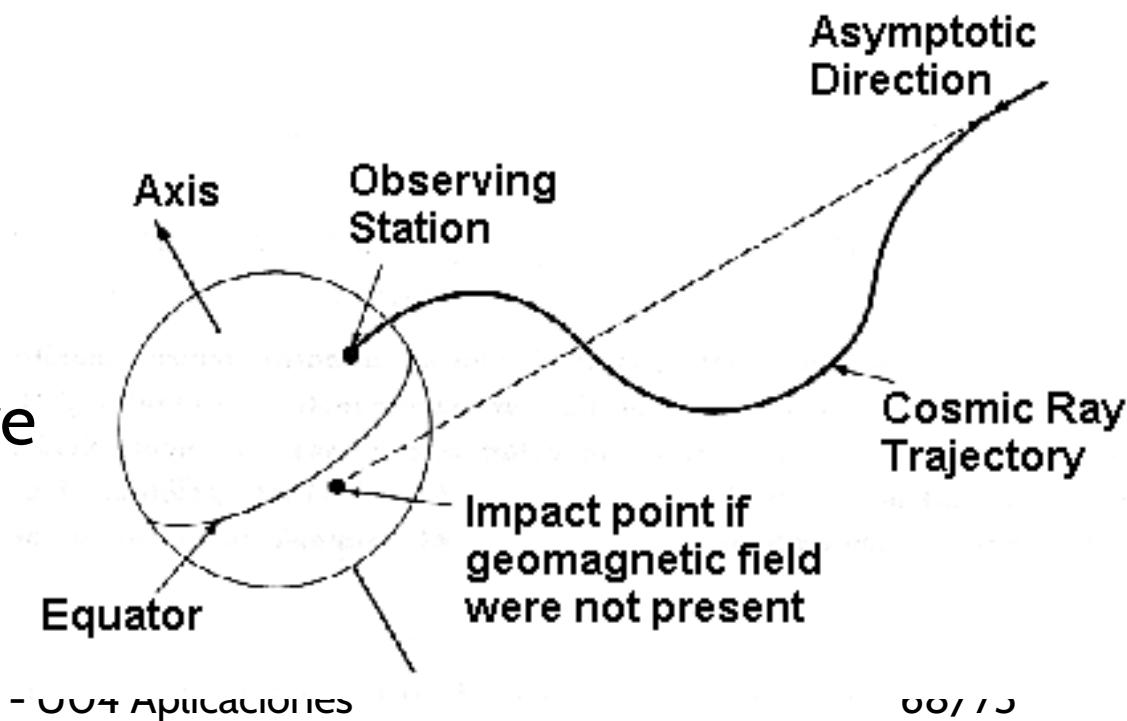
- La rigidez magnética se define entonces como

$$R_m = \frac{pc}{Ze}$$

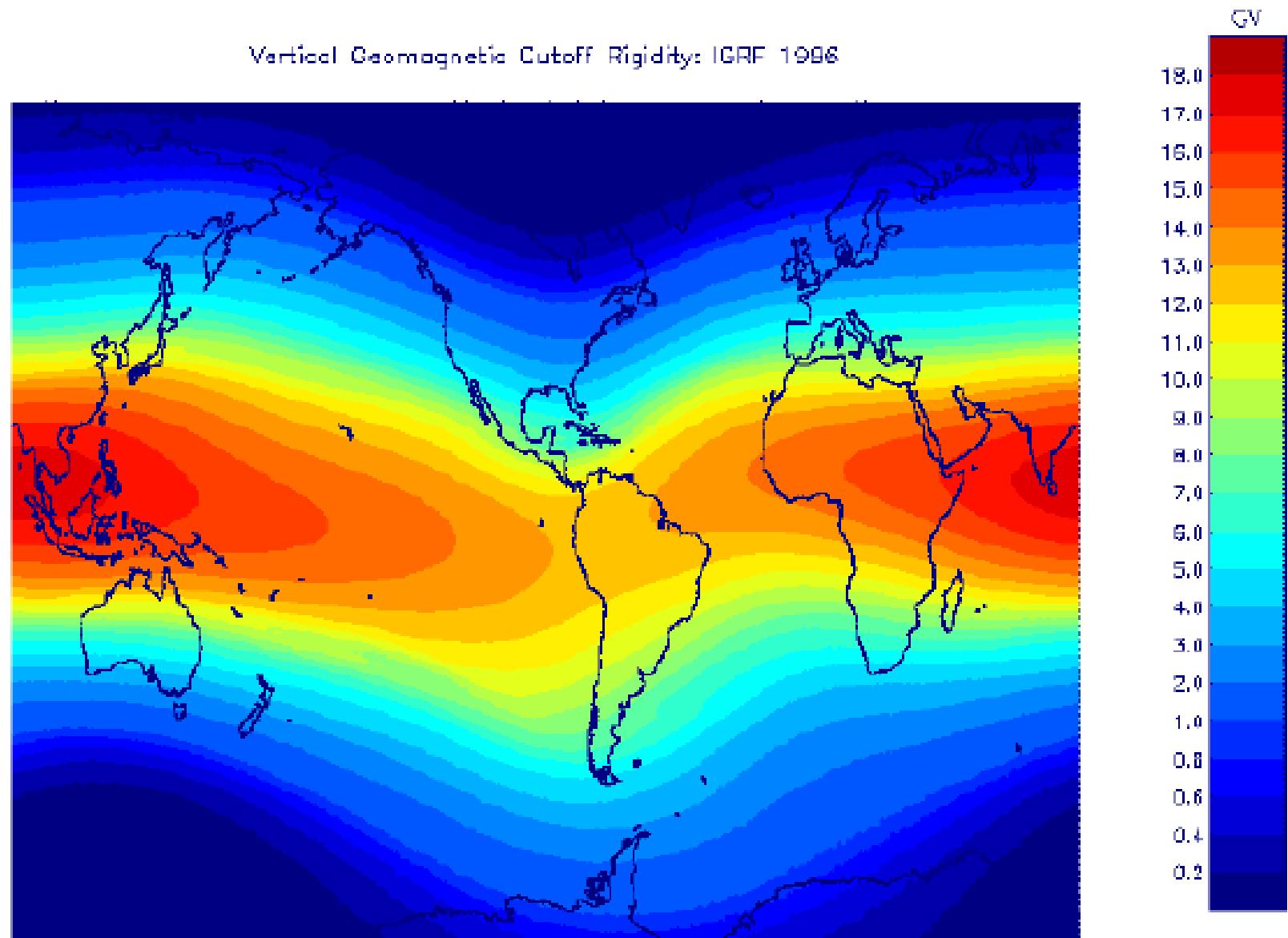
- La rigidez geomagnética es la rigidez inducida por el campo magnético terrestre

$$Rm(\theta, \lambda, h, t) = \frac{pc}{Ze}$$

rey - AP - 004 Aplicaciones

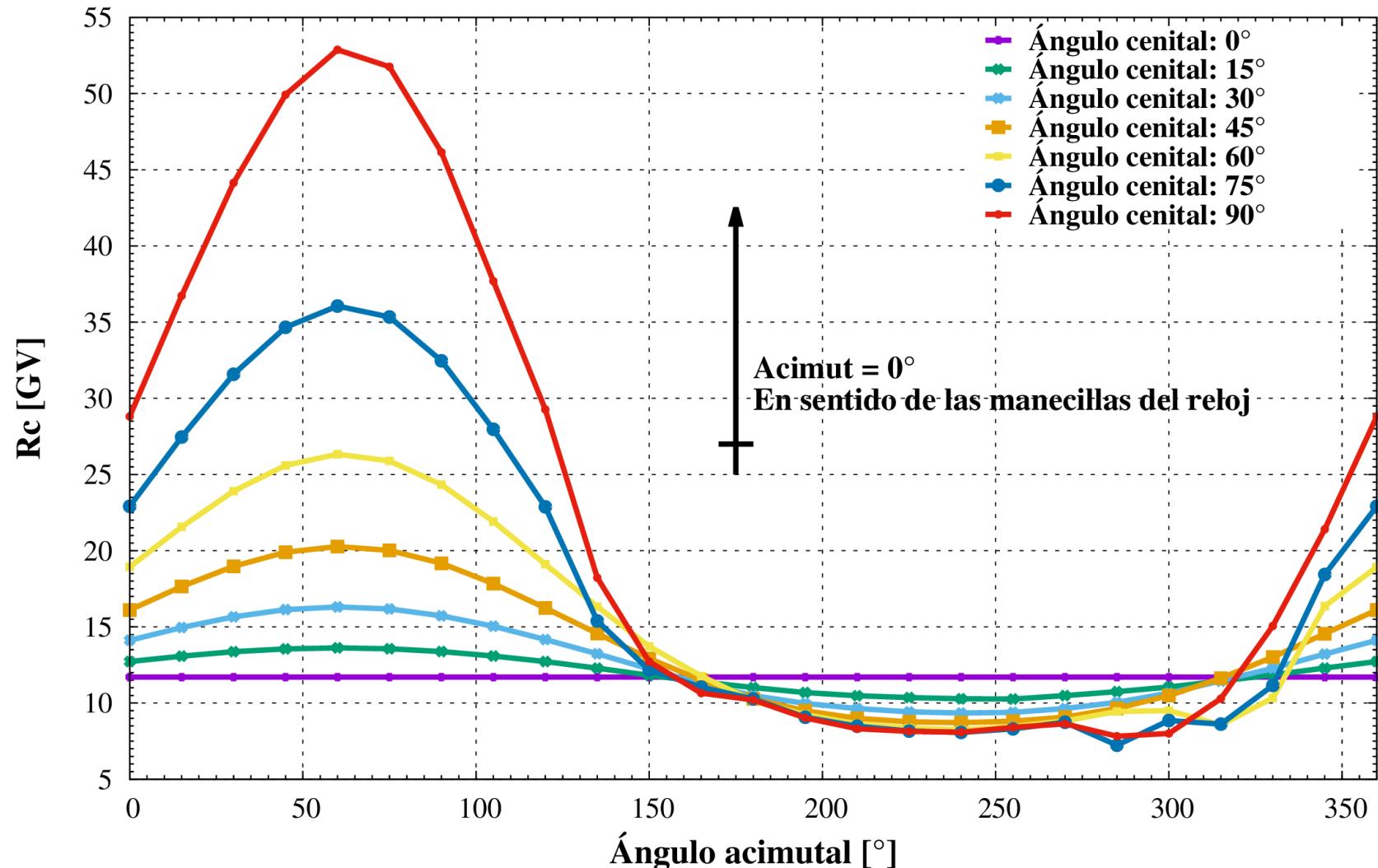


# Calculo de la rigidez geomagnetica local



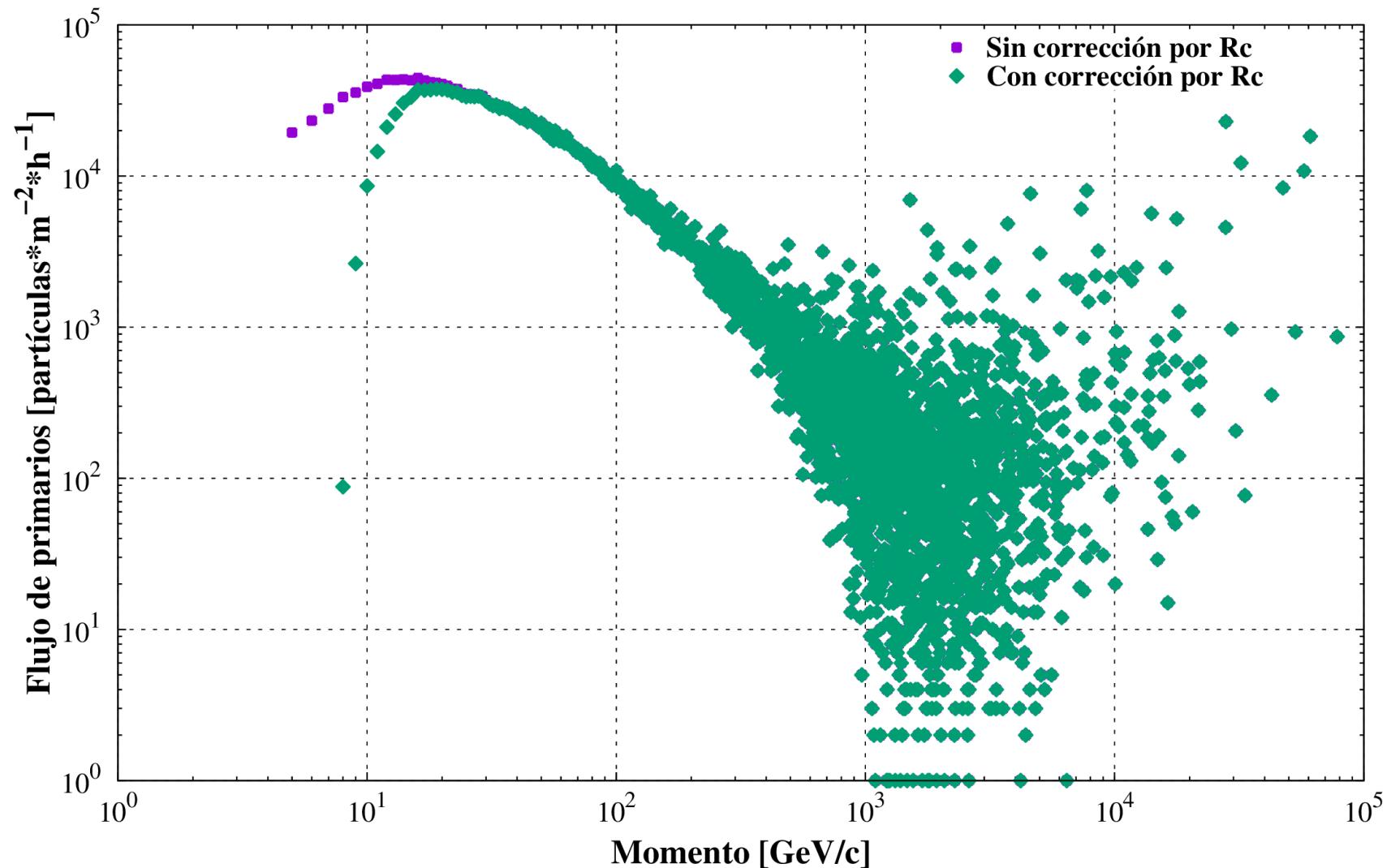
# Rigidez direccional en un sitio LAGO

Rigidez de Corte (Rc) a 112.8 km sobre la ciudad de Bucaramanga como Función del ángulo cenital y acimutal



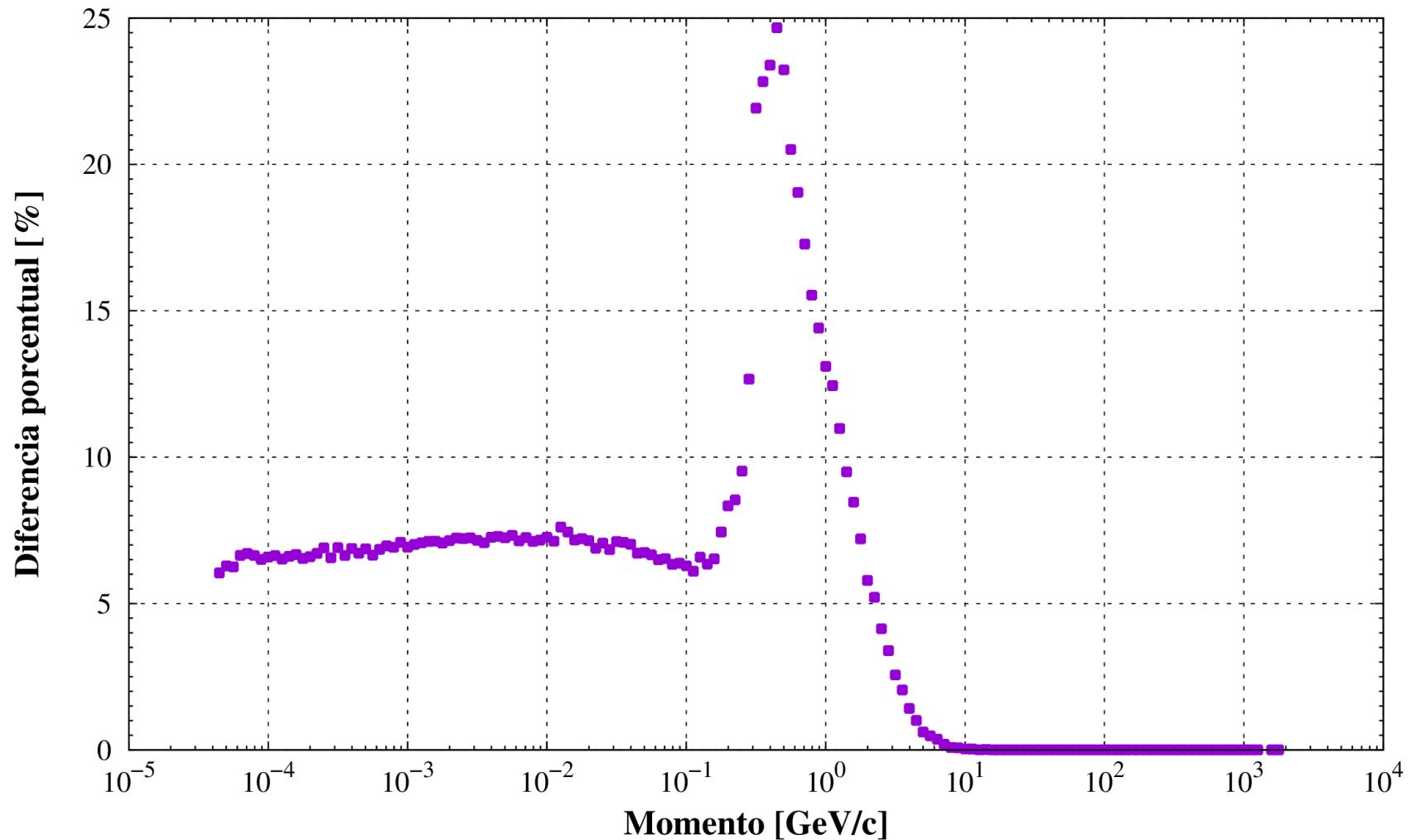
# Efecto de la rigidez en la fluencia de primarios

Espectro de rayos cósmicos primarios a 112.8 km s.n.m. sobre Bucaramaga sin corrección por campo geomagnético (morado) y con corrección (verde)



# Efecto de la rigidez en la fluencia de secundarios

Diferencia porcentual entre flujo de secundarios producidos por una hora de flujo e rayos cósmicos sin y con corrección por campo geomagnético  
(Bucaramanga, 956 m s.n.m.)



# Incluso para el campo dinámico!

