

# DDAp - ITeDA+KIT

## Física de Astropartículas - 2017

- **Unidad** 03 – Técnicas de detección
- **Clase** U03-a
- **Cont** Detectores
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://github.com/asoreyh/astroparticulas>

- **Unidad 1:** Fenomenología de Astropartículas.
- **Unidad 2:** Lluvias Atmosféricas Extendidas (EAS).  
**Laboratorio:** Simulaciones en CORSIKA
- **Unidad 3:** Técnicas de detección de Astropartículas.
- **Unidad 4:** Aplicaciones en LAGO y análisis de datos.  
**Laboratorio:** Análisis de datos de meteorología del espacio y del decaimiento del muón en un detector Cherenkov en agua.



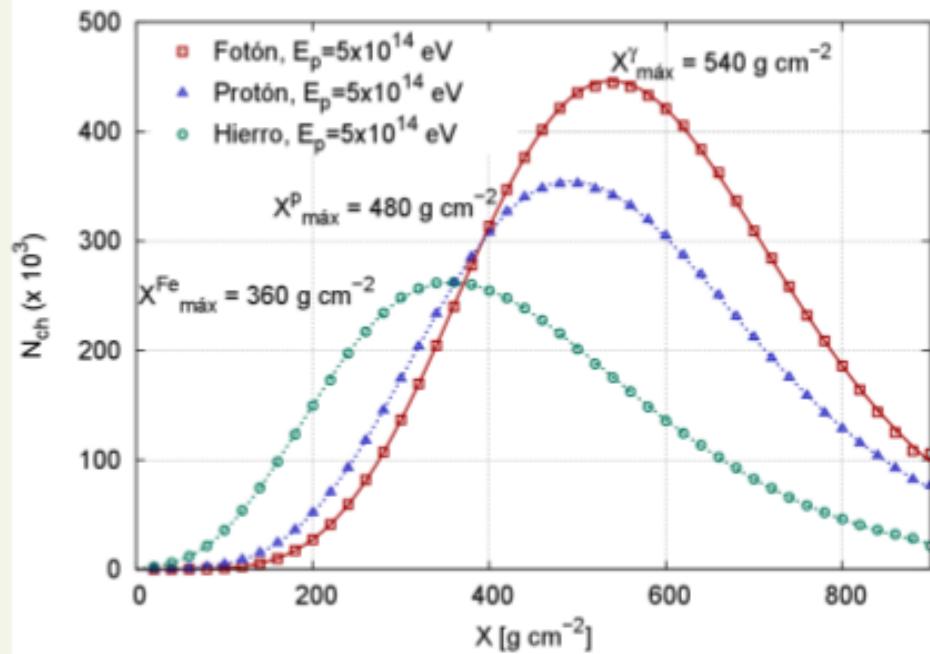
<https://github.com/lagoproject/astroparticulas>

$$E_d^{\text{atm}} + E_d^{\text{suelo}} = E_p$$

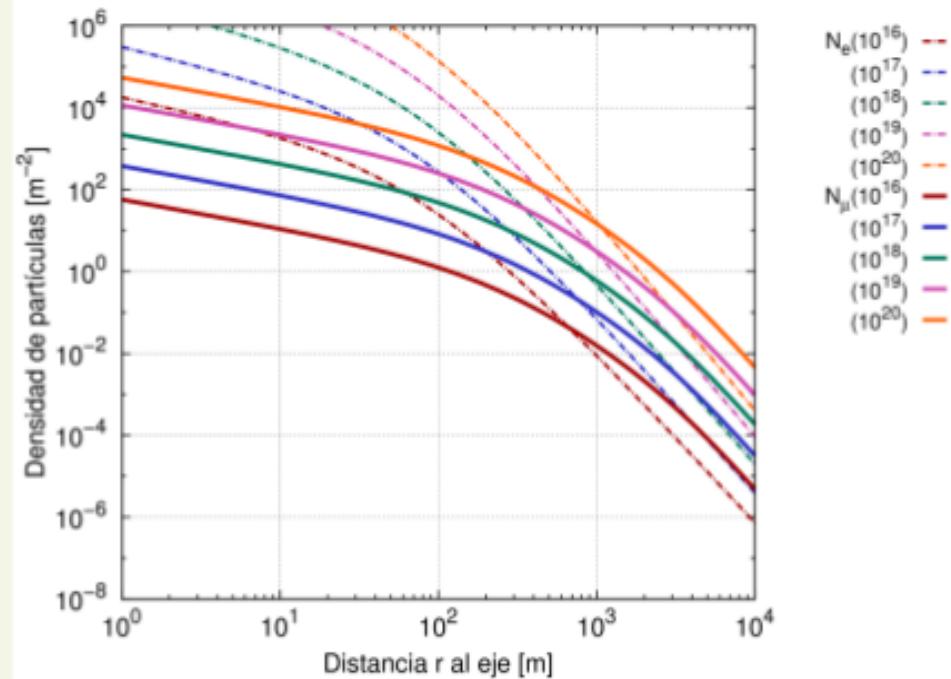
Desarrollo Longitudinal y Transversal

# La energía se conserva

$E_d^{\text{atm}} \rightarrow$  Gaisser-Hillas

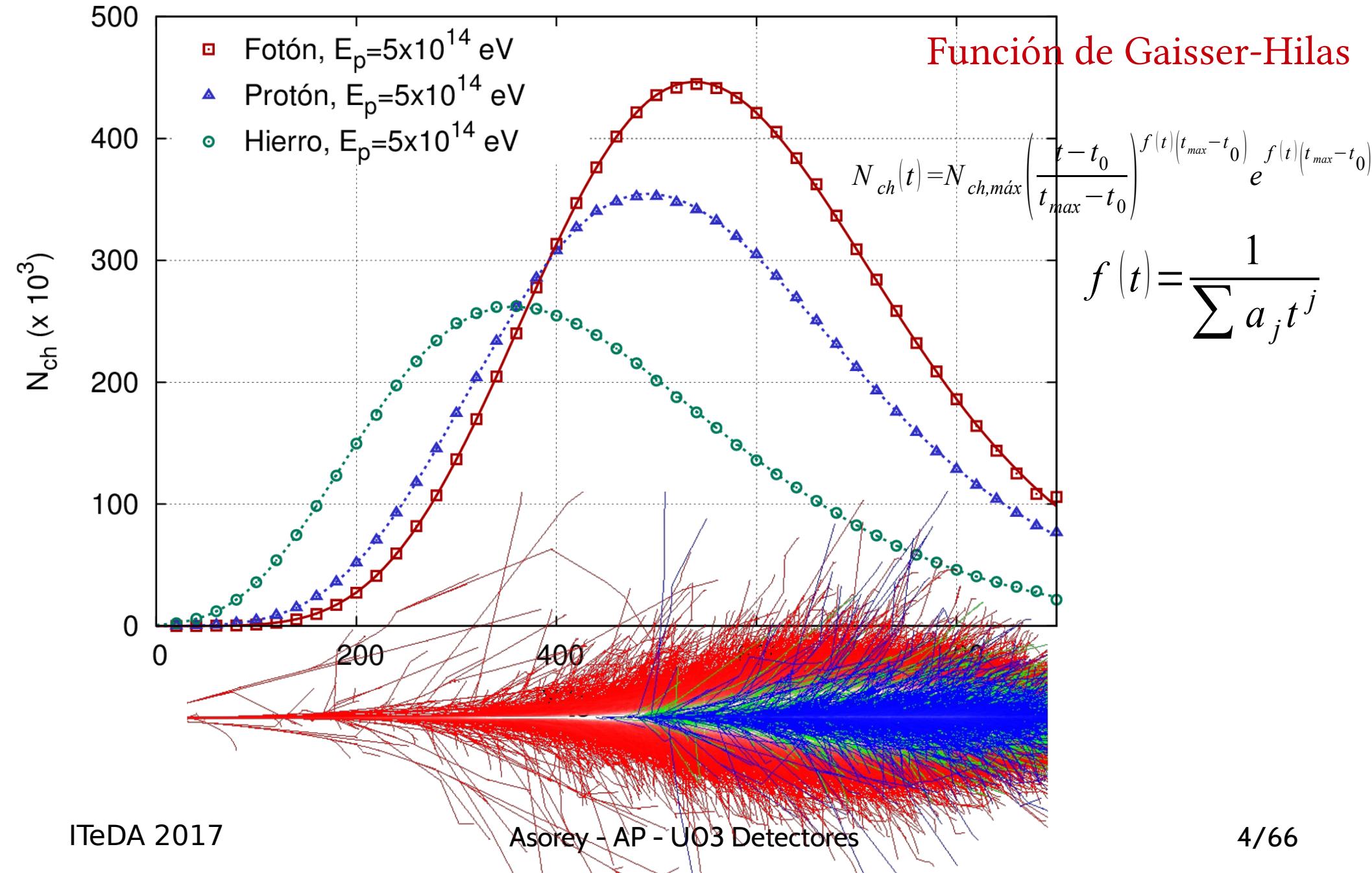


$E_d^{\text{suelo}} \rightarrow$  LDF:  $\rho_e(r)$  y  $\rho_{\mu}(r)$

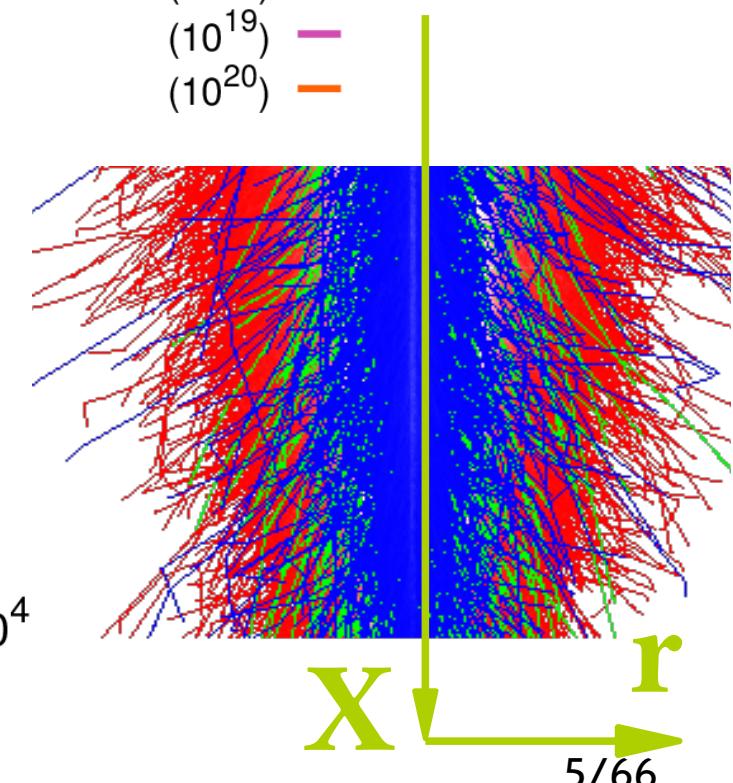
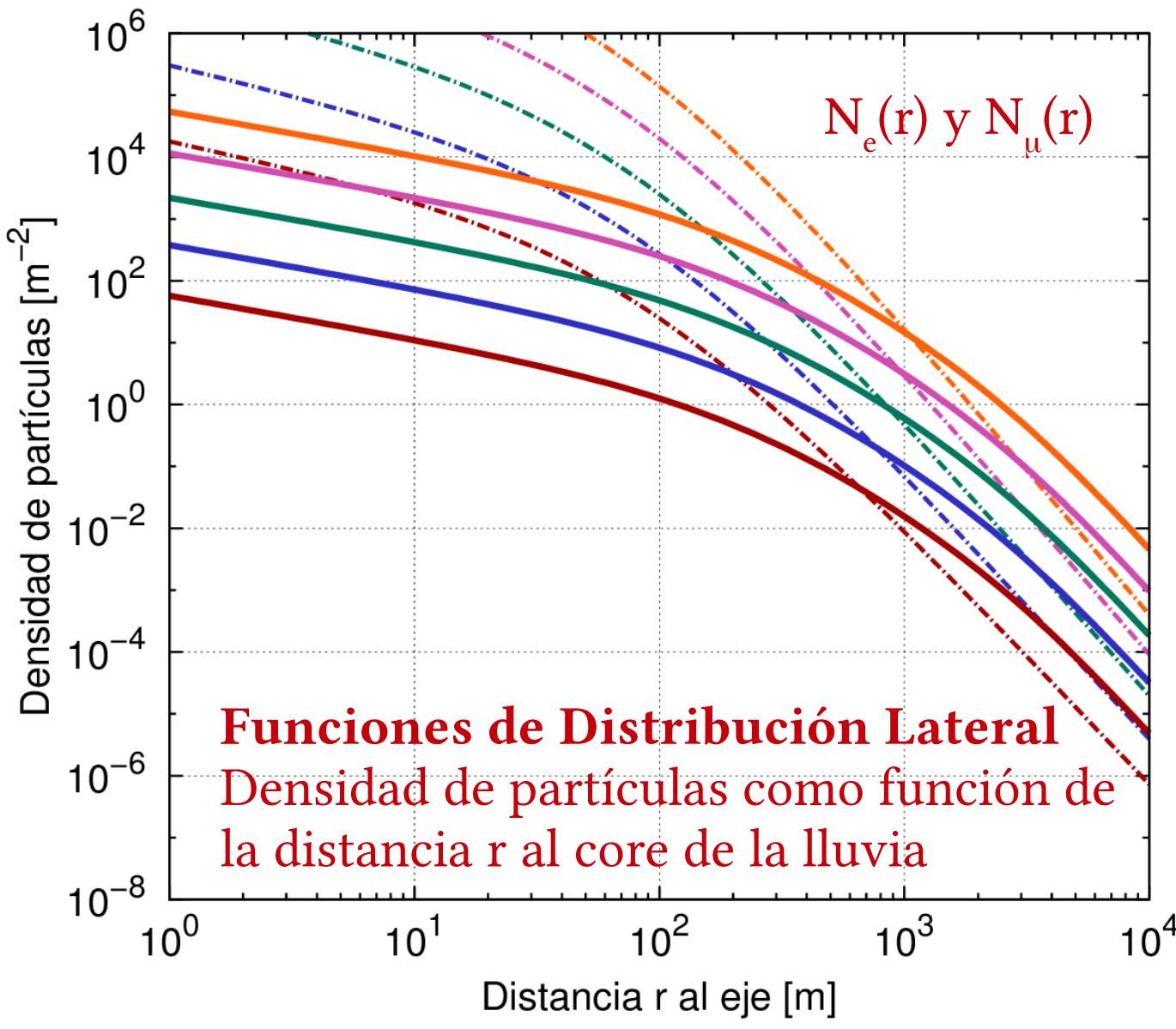


- Desarrollo longitudinal
- Desarrollo transversal
- Función Distribución Lateral
- $N_c h(X) \propto E_d(X)$
- $\rho(r) = \sum_{\mu, e, \gamma, \text{hd}} \rho_i(r) \xrightarrow{\text{Detector}} S_m(r)$

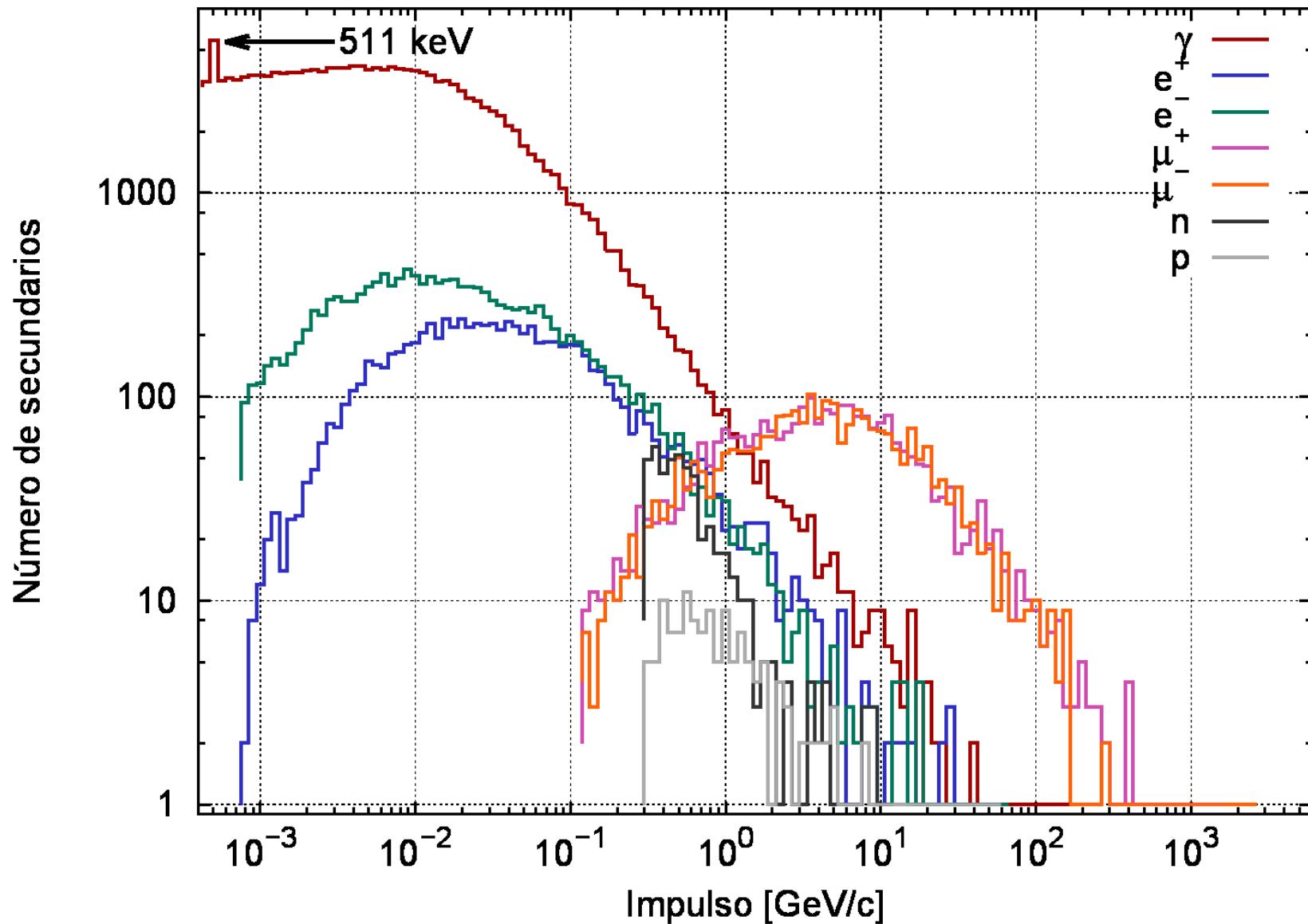
# Desarrollo longitudinal ( $t=X/X_{EM}$ )

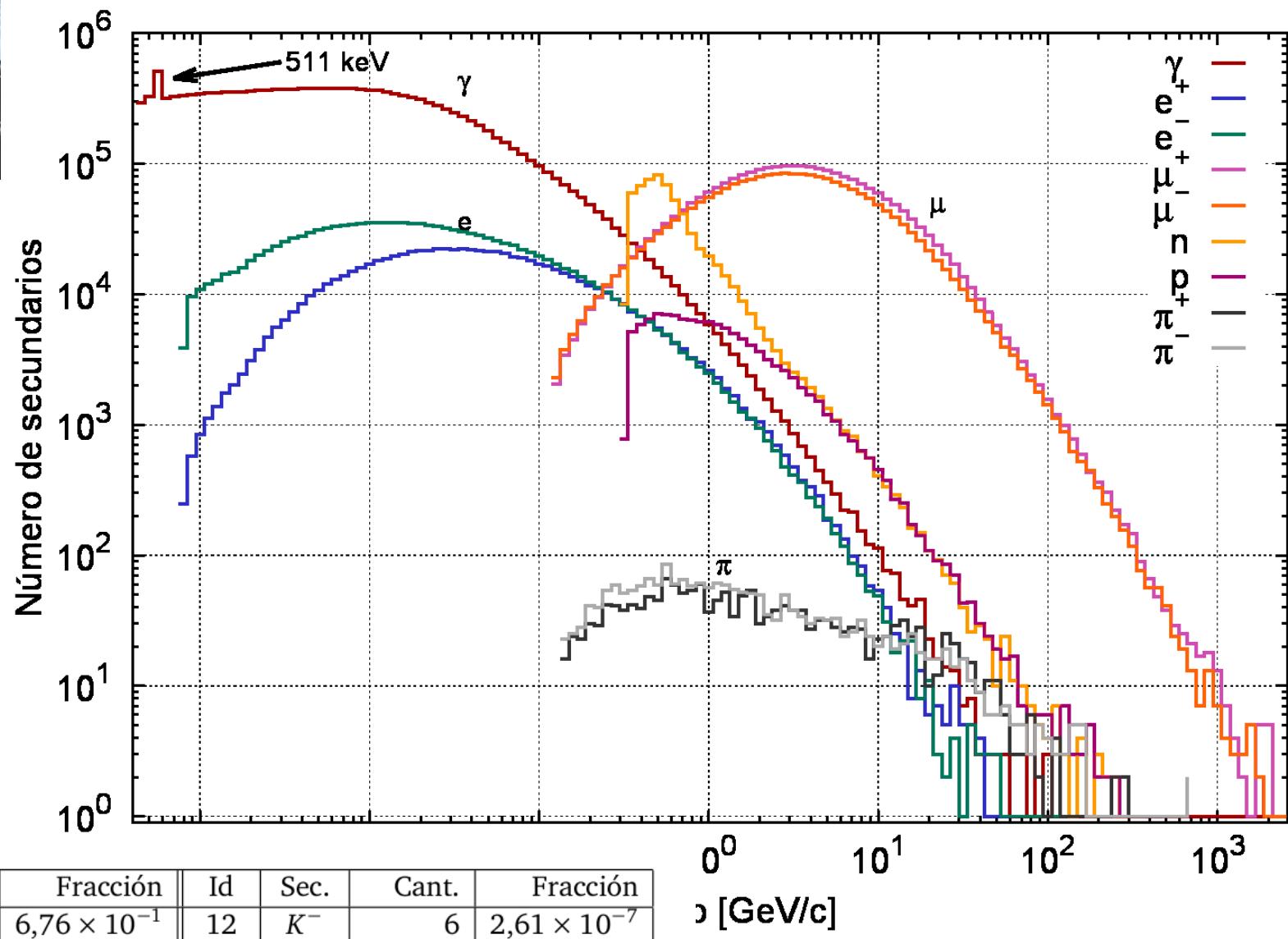


# LDF: Desarrollo transversal



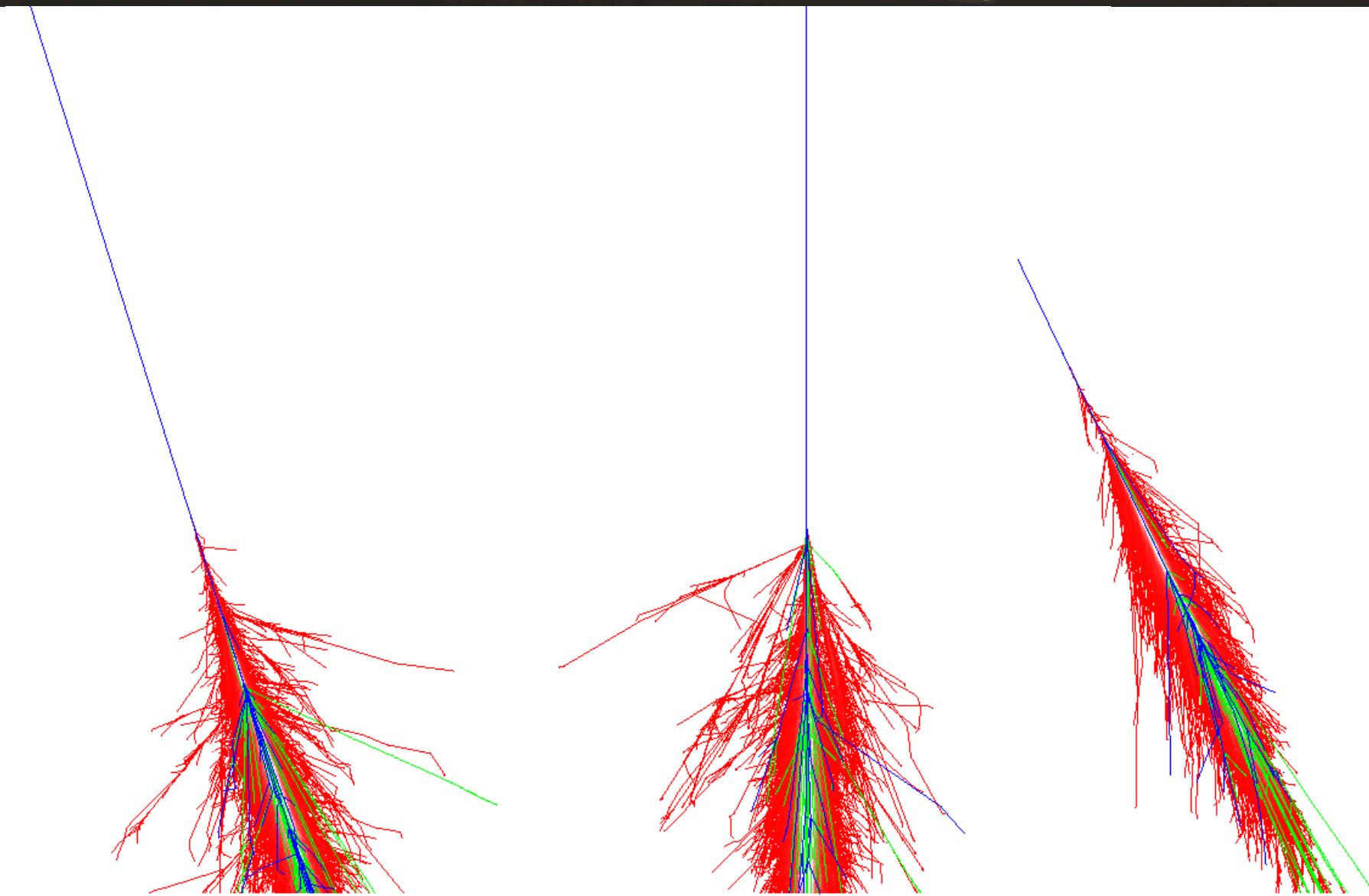
# Distribución de secundarios protón 485 TeV, 42deg



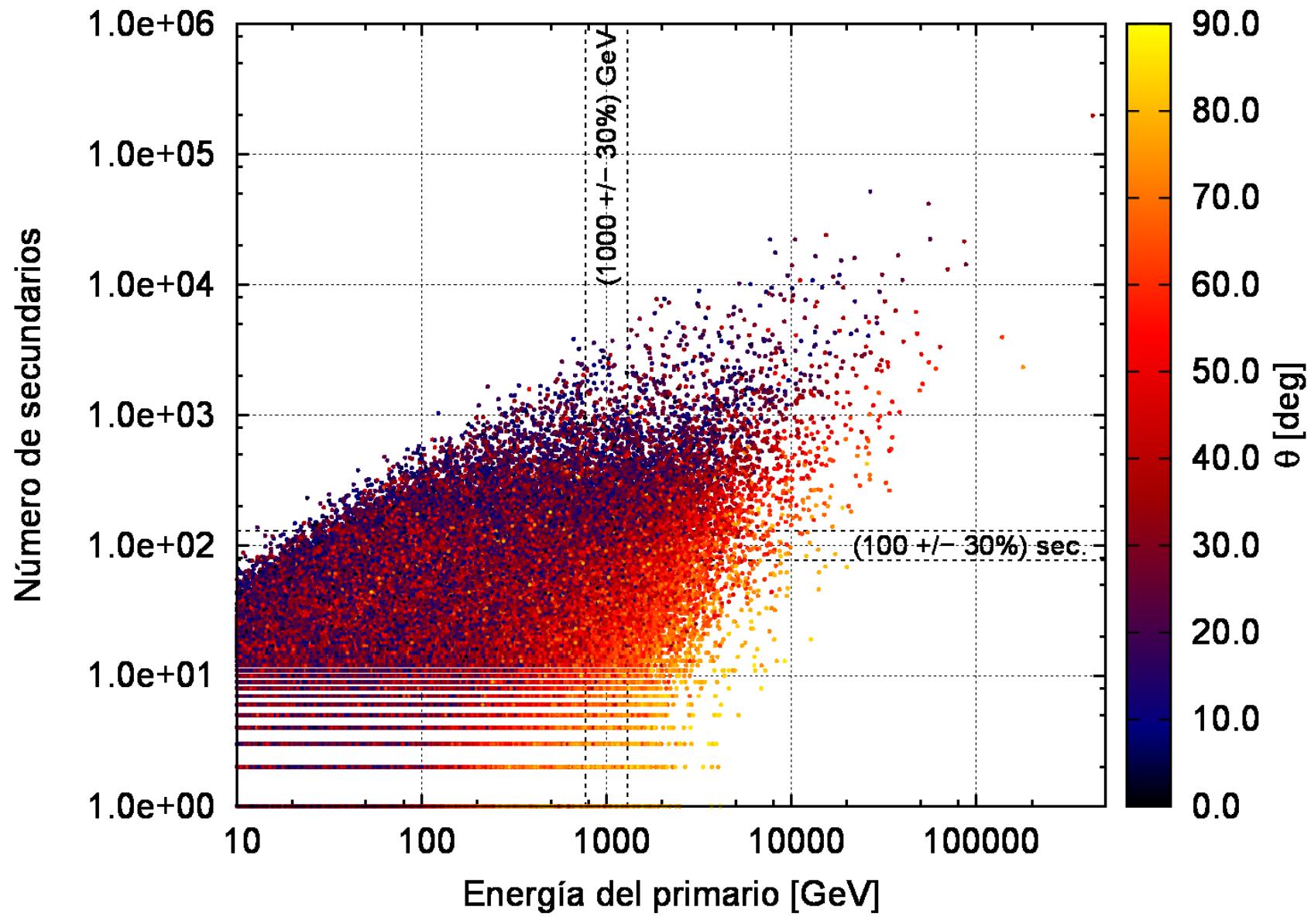


Id.	Sec.	Cant.	Fracción	Id	Sec.	Cant.	Fracción
1	$\gamma$	15535052	$6,76 \times 10^{-1}$	12	$K^-$	6	$2,61 \times 10^{-7}$
2	$e^+$	751113	$3,27 \times 10^{-2}$	13	$n$	617949	$2,69 \times 10^{-2}$
3	$e^-$	1304011	$5,67 \times 10^{-2}$	14	$p$	116291	$5,06 \times 10^{-3}$
5	$\mu^+$	2491493	$1,08 \times 10^{-1}$	15	$\bar{p}$	104	$4,52 \times 10^{-6}$
6	$\mu^-$	2176153	$9,46 \times 10^{-2}$	18	$\Lambda$	1	$4,35 \times 10^{-8}$
7	$\pi^0$	1	$4,35 \times 10^{-8}$	25	$\bar{n}$	159	$6,91 \times 10^{-6}$
8	$\pi^+$	1738	$7,56 \times 10^{-5}$	201	${}^2\text{H}_1$	99	$4,31 \times 10^{-6}$
9	$\pi^-$	1980	$8,61 \times 10^{-4}$	301	${}^3\text{H}_1$	10	$4,35 \times 10^{-7}$
10	$K_L^0$	45	$1,96 \times 10^{-6}$	302	${}^3\text{He}_2$	1	$4,35 \times 10^{-8}$
11	$K^+$	16	$6,96 \times 10^{-7}$	402	${}^4\text{He}_2$	3	$1,30 \times 10^{-7}$

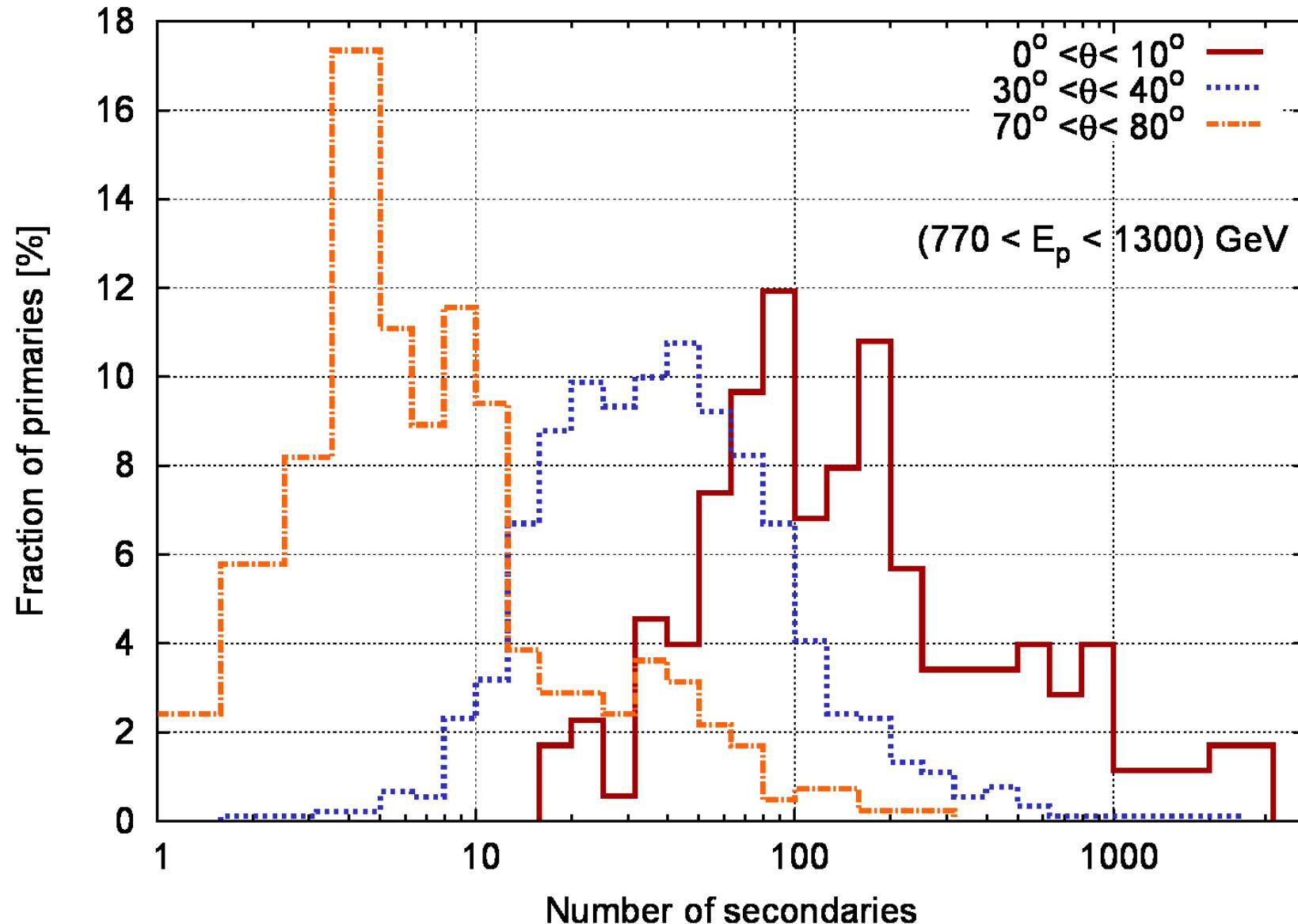
# Efecto cenital



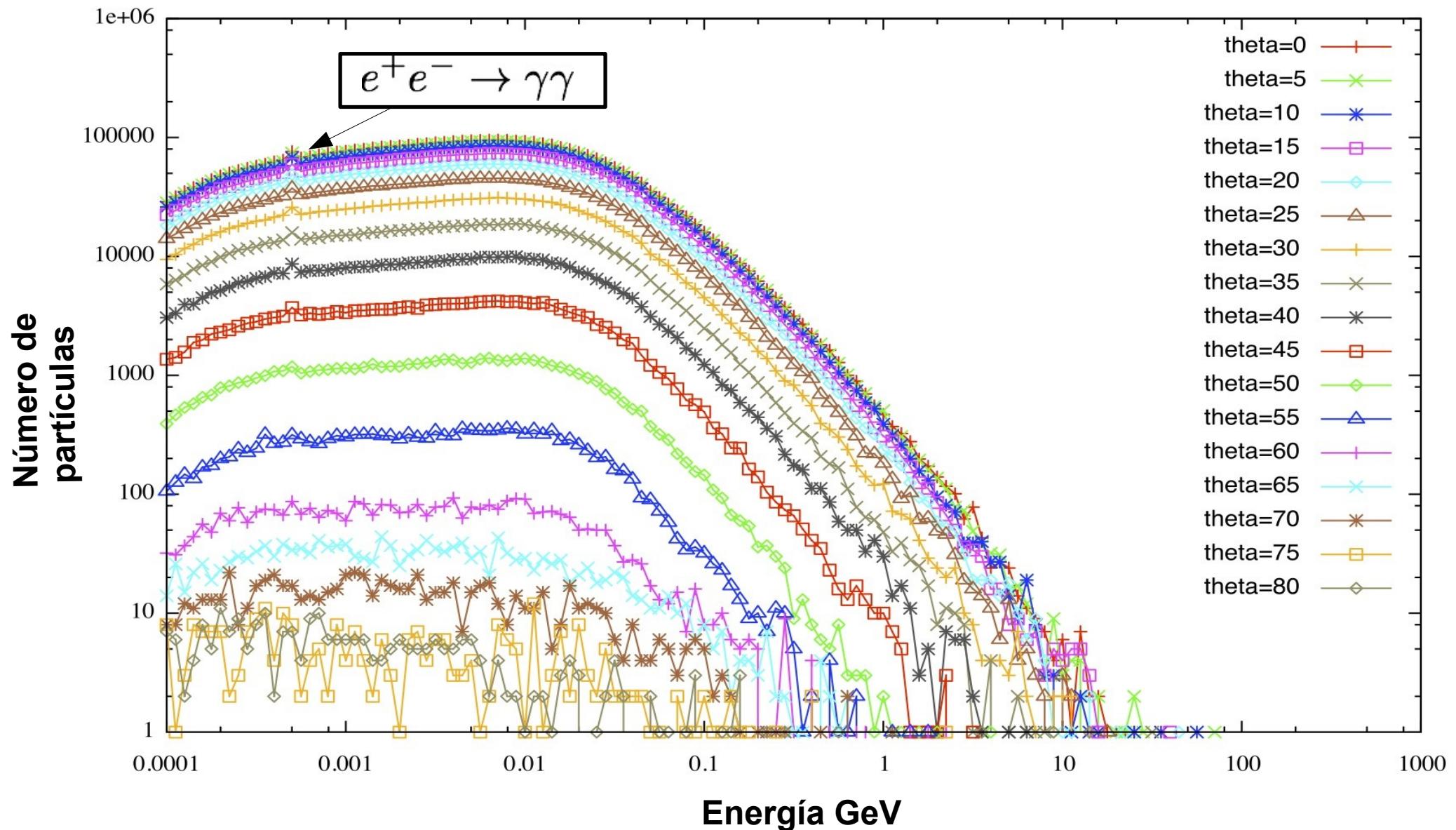
# Efecto de la absorción atmosférica



# Mayor absorción a ángulos grandes



Histograma de frecuencia para las energías de los fotones  
simulados para 3500 m.s.n.m.



Histograma de frecuencia del numero de los fotones secundarios de una lluvia iniciada por un fotón de 130 GeV respecto a su energía. Cada linea corresponde a 5000 lluvias simuladas en CORSIKA.  
(Arturo Núñez, Christian Sarmiento, HA, en preparación)

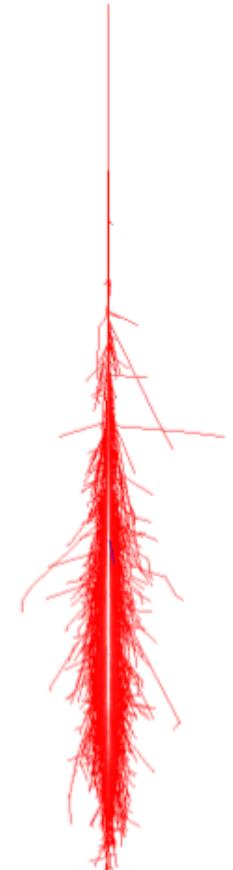
# Absorción atmosférica

12 km

12 km

12 km

12 km



2 km

$E_\nu = 1 \text{ GeV}$

2 km

$E_\nu = 5 \text{ GeV}$

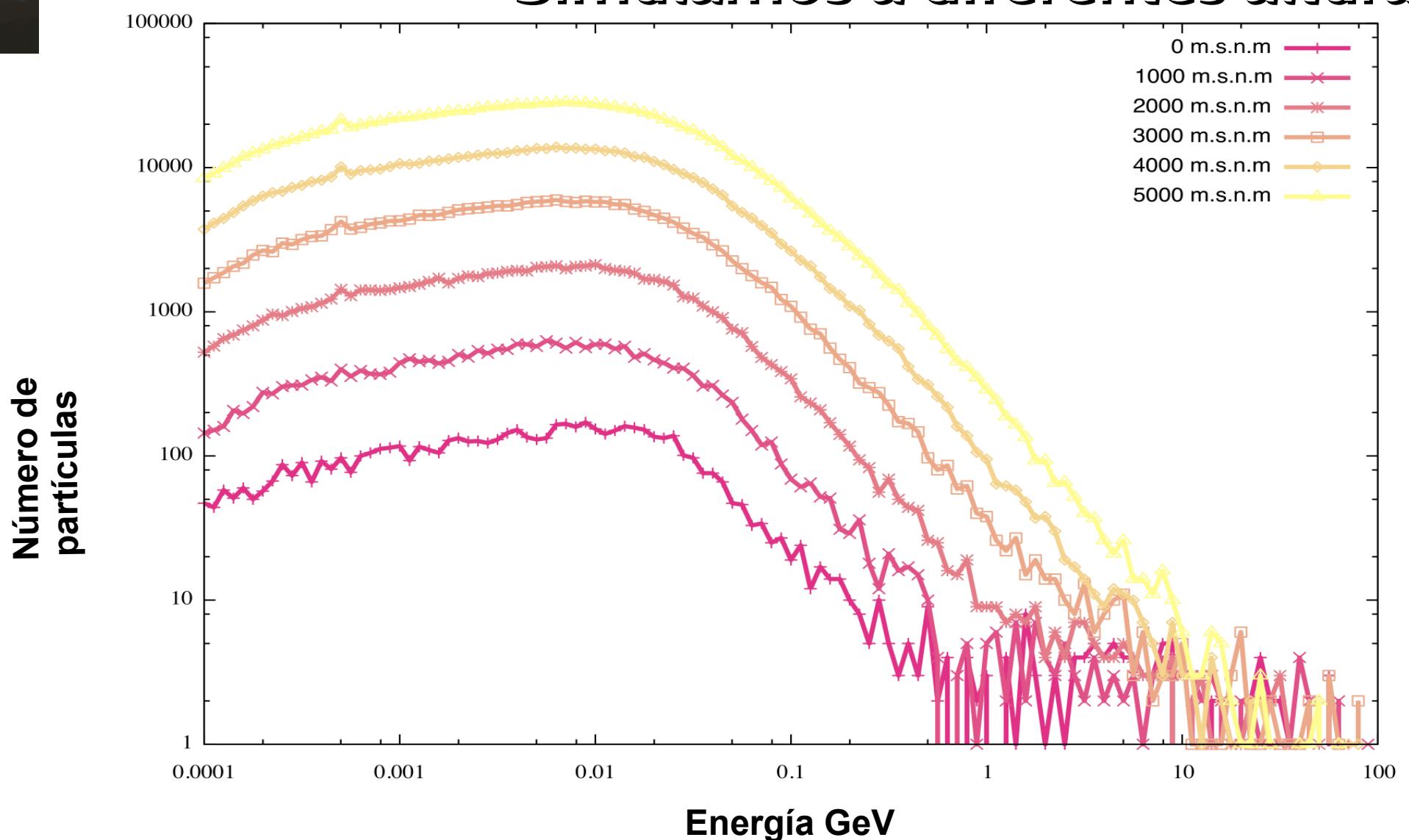
2 km

$E_\nu = 20 \text{ GeV}$

2 km

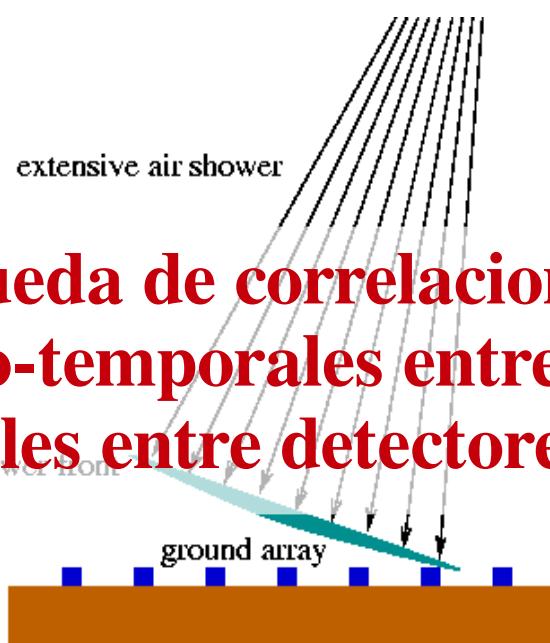
$E_\nu = 100 \text{ GeV}$

# Simulamos a diferentes alturas.



Histograma de frecuencia del numero de los fotones secundarios de una lluvia iniciada por un fotón de 130 GeV respecto a su energía. Cada linea corresponde a 5000 lluvias simuladas en CORSIKA.

# Técnicas de detección en Superficie



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

Modo “Lluvia”

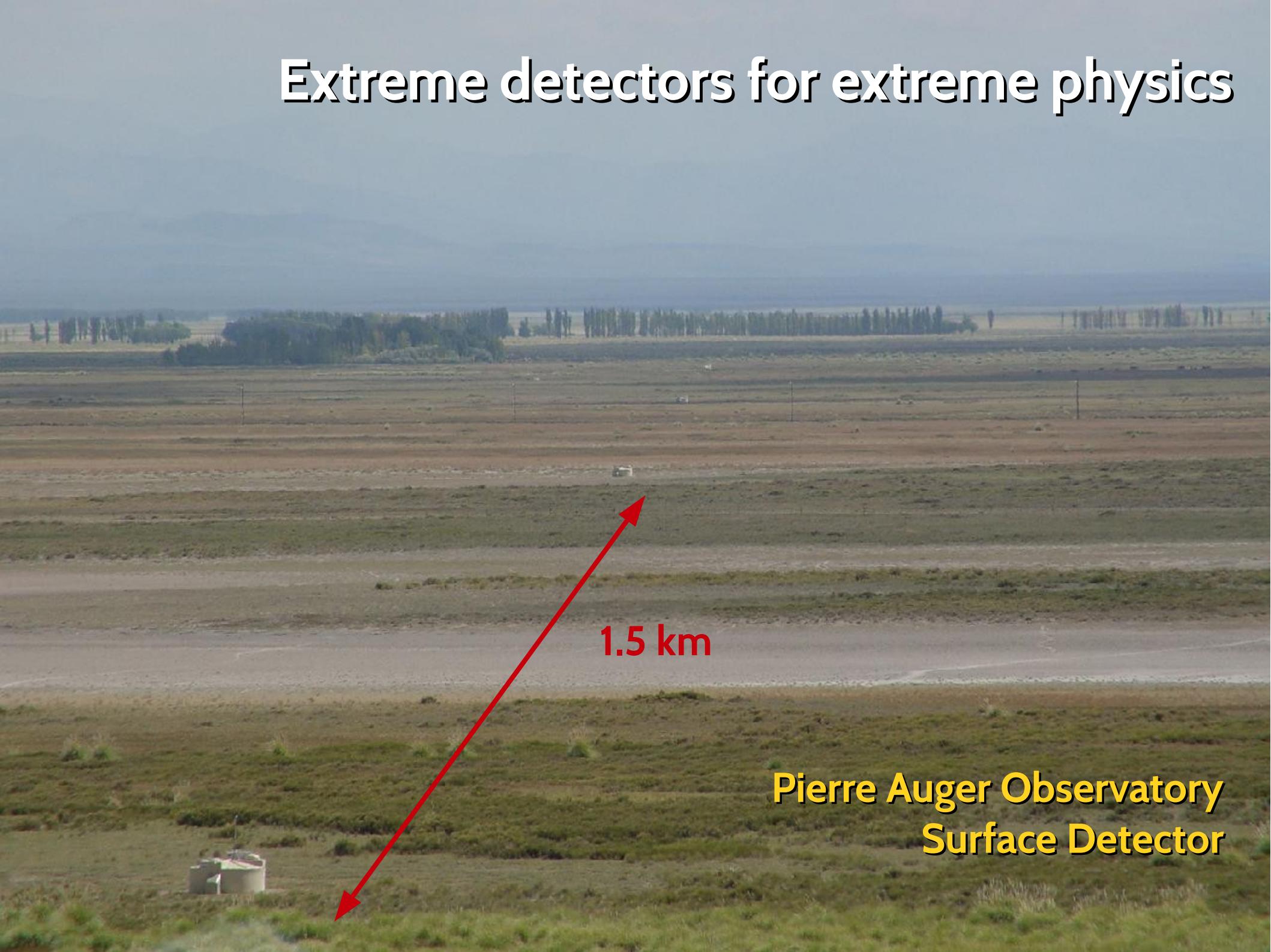


**Cálculo del flujo de  
secundarios y estudio de las  
variaciones intrínsecas**

Modo “Conteo”

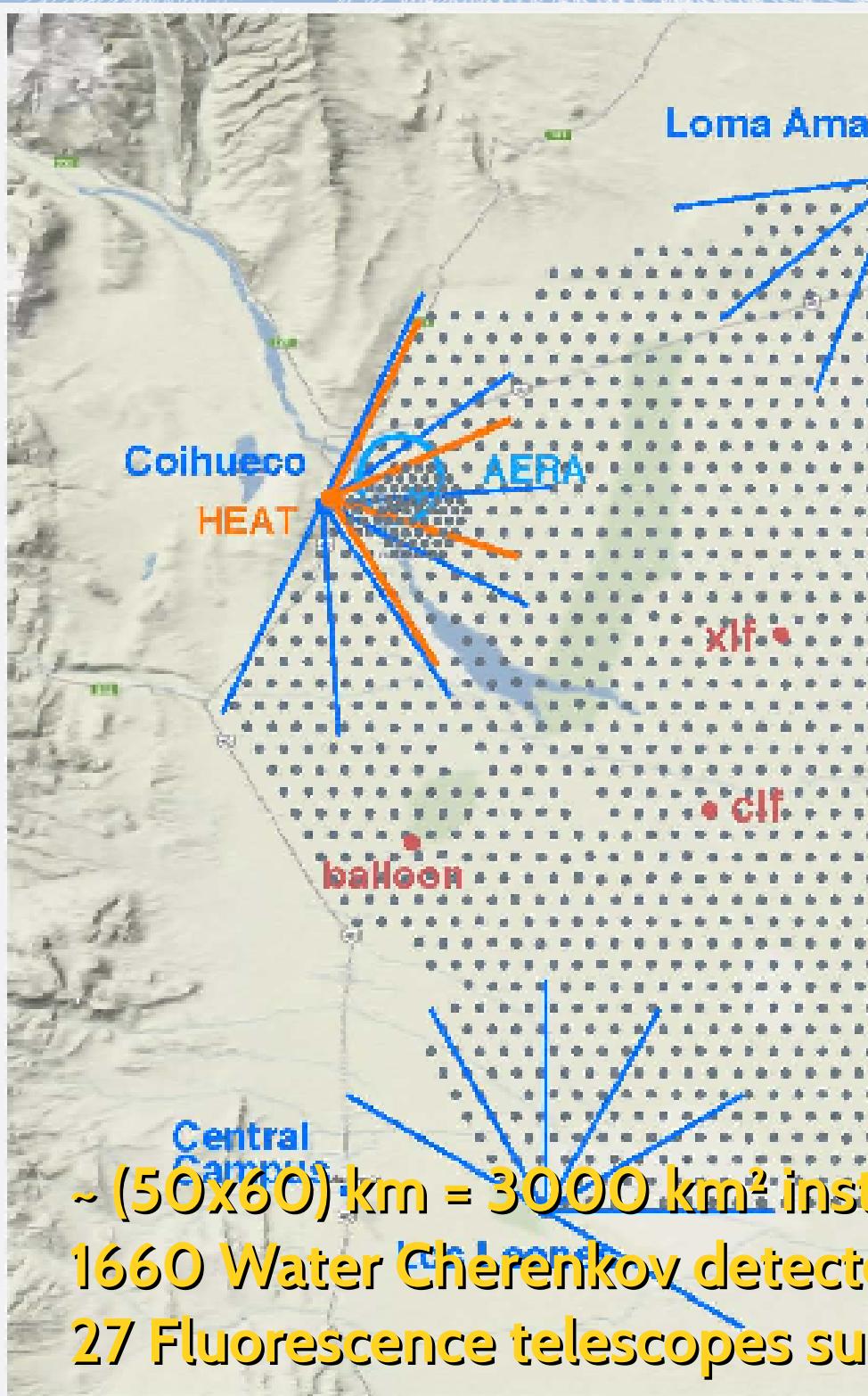
- Detectores de partículas (WCD y/o centelladores)
- Detección de señales por encima de umbrales
- Intensivo análisis de datos

# Extreme detectors for extreme physics

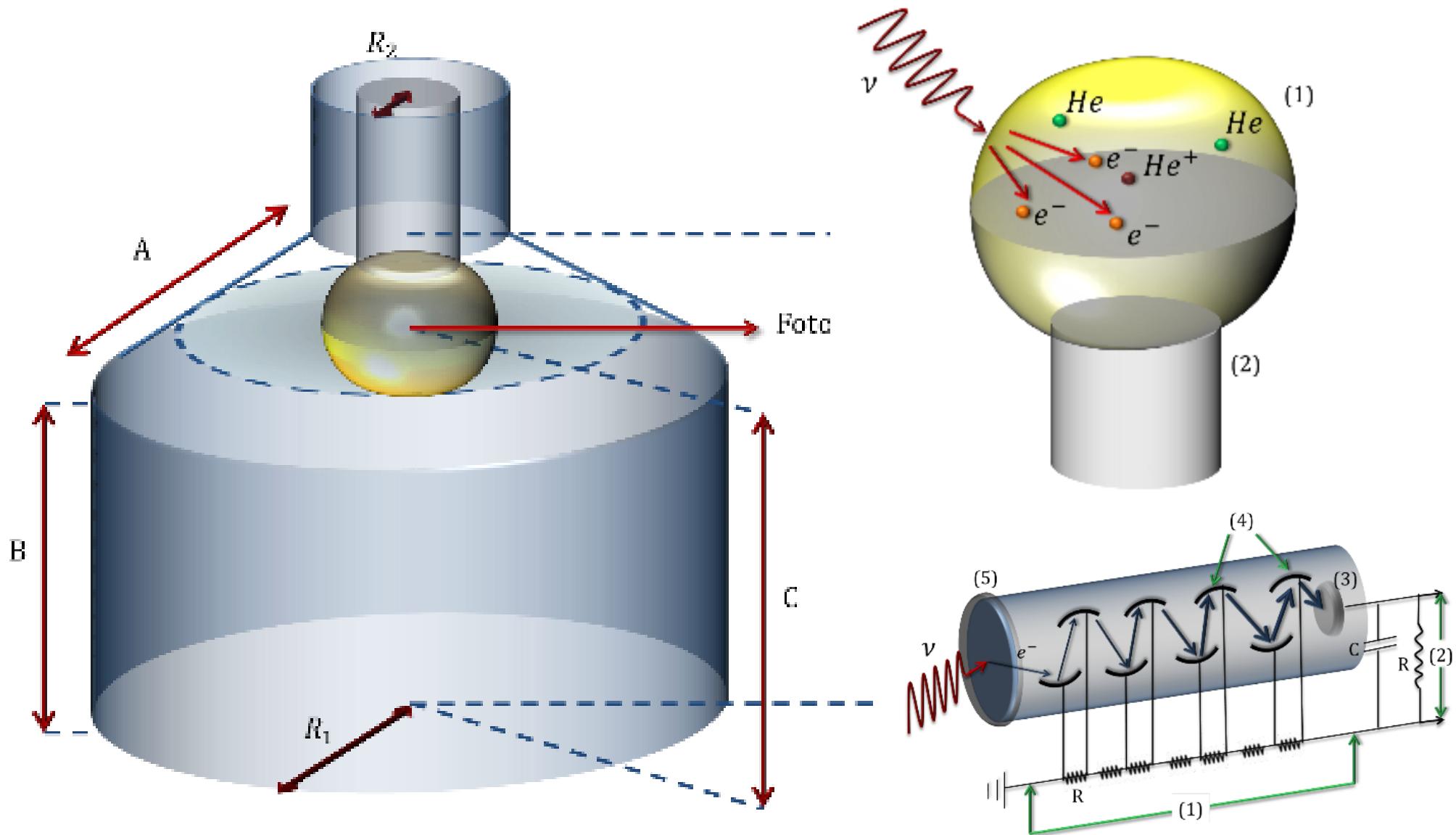


1.5 km

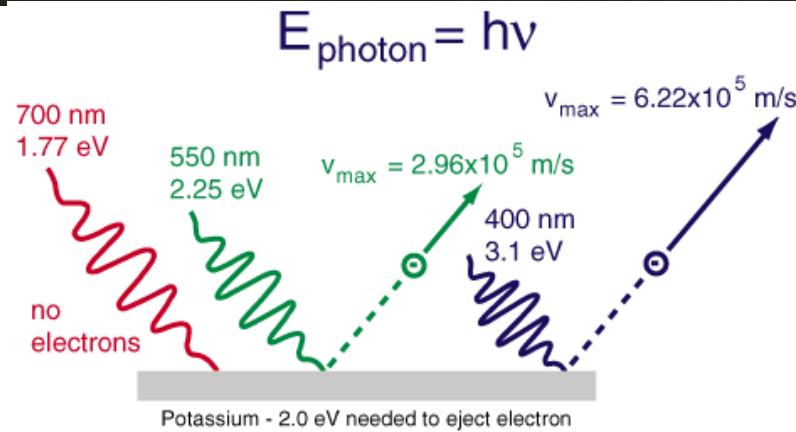
Pierre Auger Observatory  
Surface Detector



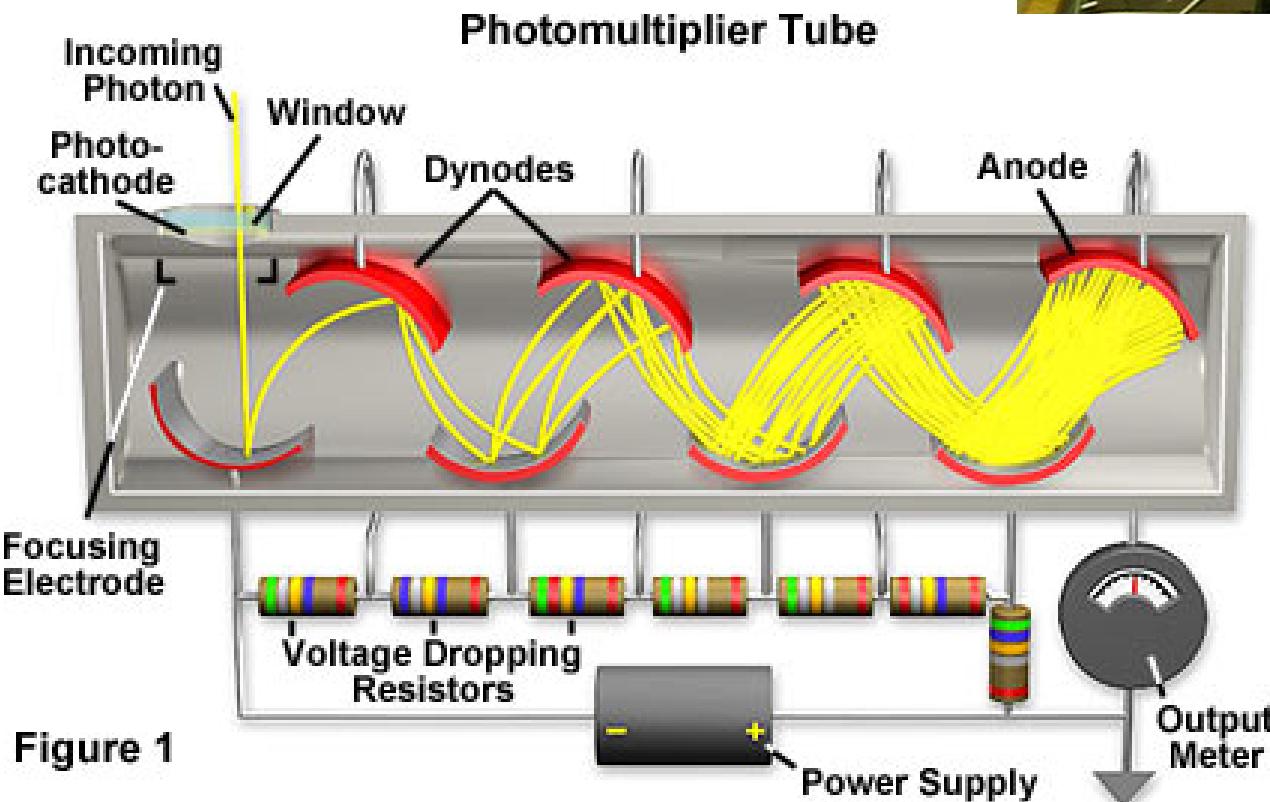
# Detectores Cherenkov en Agua (WCD)



# Fototubo, alias “PMT”



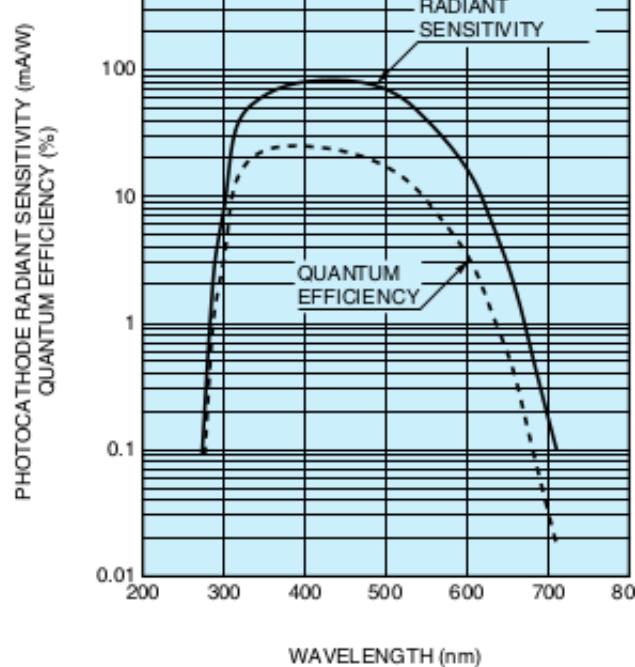
## Photoelectric effect



# Hamamatsu R5912

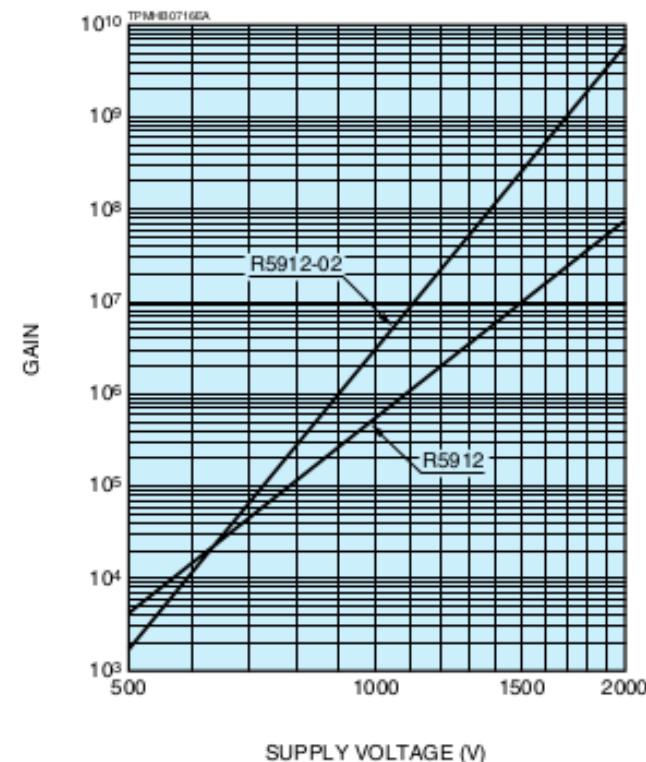
## SPECTRAL RESPONSE

- R5912, R5912-02
- R7081, R7081-20



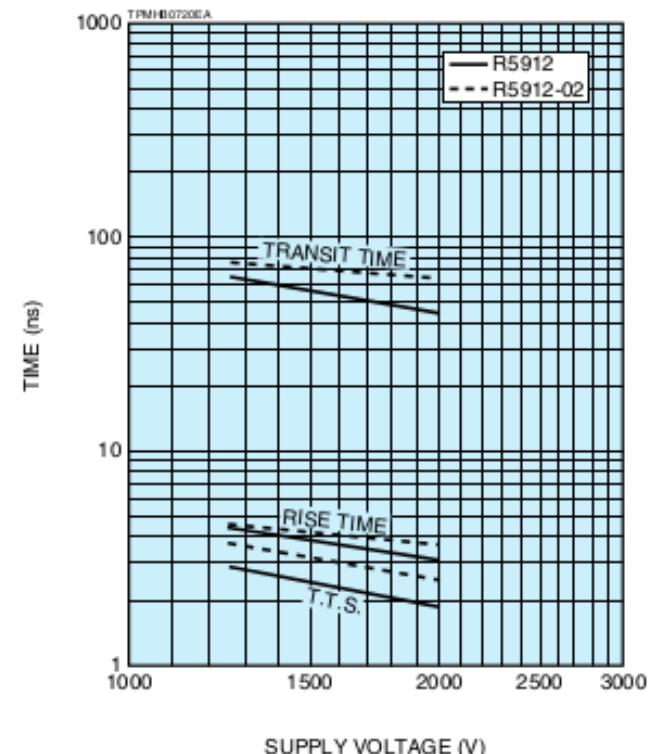
## GAIN

- R5912, R5912-02



## TYPICAL TIME RESPONSE

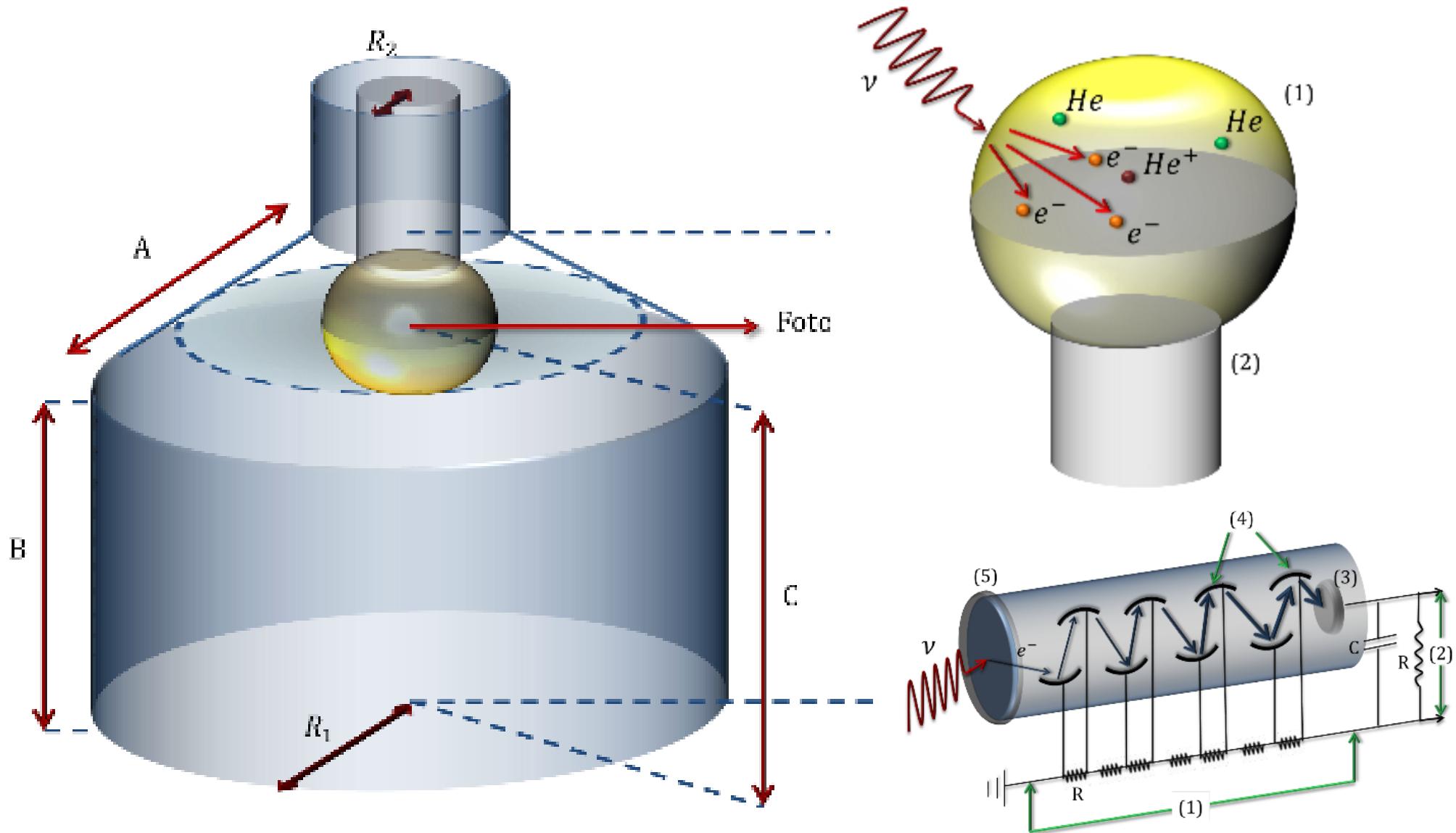
- R5912, R5912-02



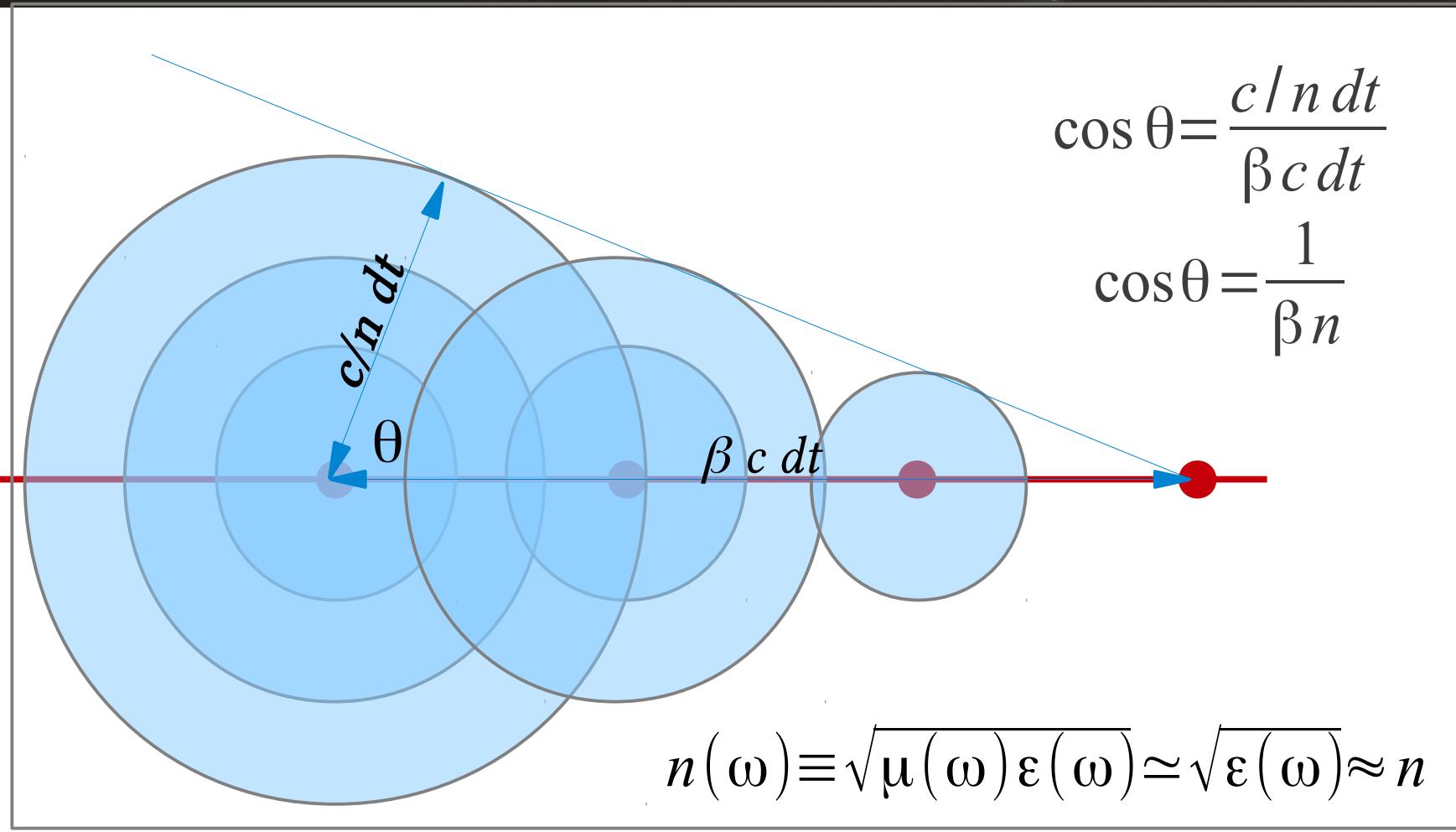
## SPECIFICATIONS

Type No.	Diameter (mm) / (inch)	Minimum Effective Area (mm)	Surface Area		Dynode		Weight (g)
			Min. (cm <sup>2</sup> )	Typ. (cm <sup>2</sup> )	Structure	Number of Stages	
R5912	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	10	approx. 1100
R5912-02	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	14	approx. 1100

# 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



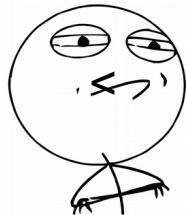
# Efecto Cherenkov, el regreso

- En un medio material ligeramente absorvente, con permitividad  $\epsilon(\omega)$  y número atómico  $\langle Z \rangle$ , una partícula con velocidad  $\beta=v/c$  produce:

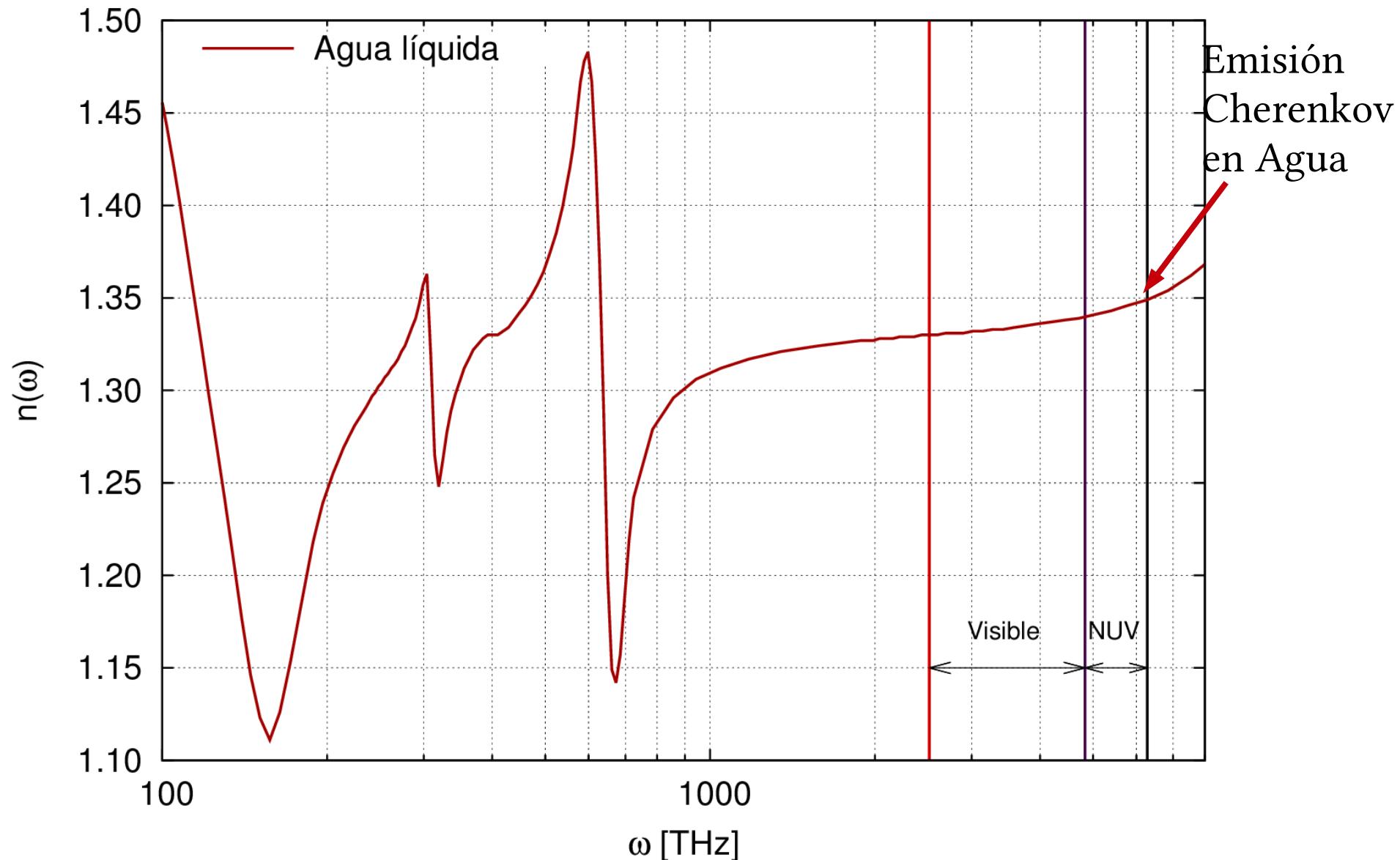
$$\left( \frac{dE}{dl} \right) = \left( \frac{Ze}{c} \right)^2 \int_{\beta^2 \epsilon(\omega) > 1} \omega \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon(\omega)} \right) d\omega \quad \text{Ecuación de Frank-Tamm}$$

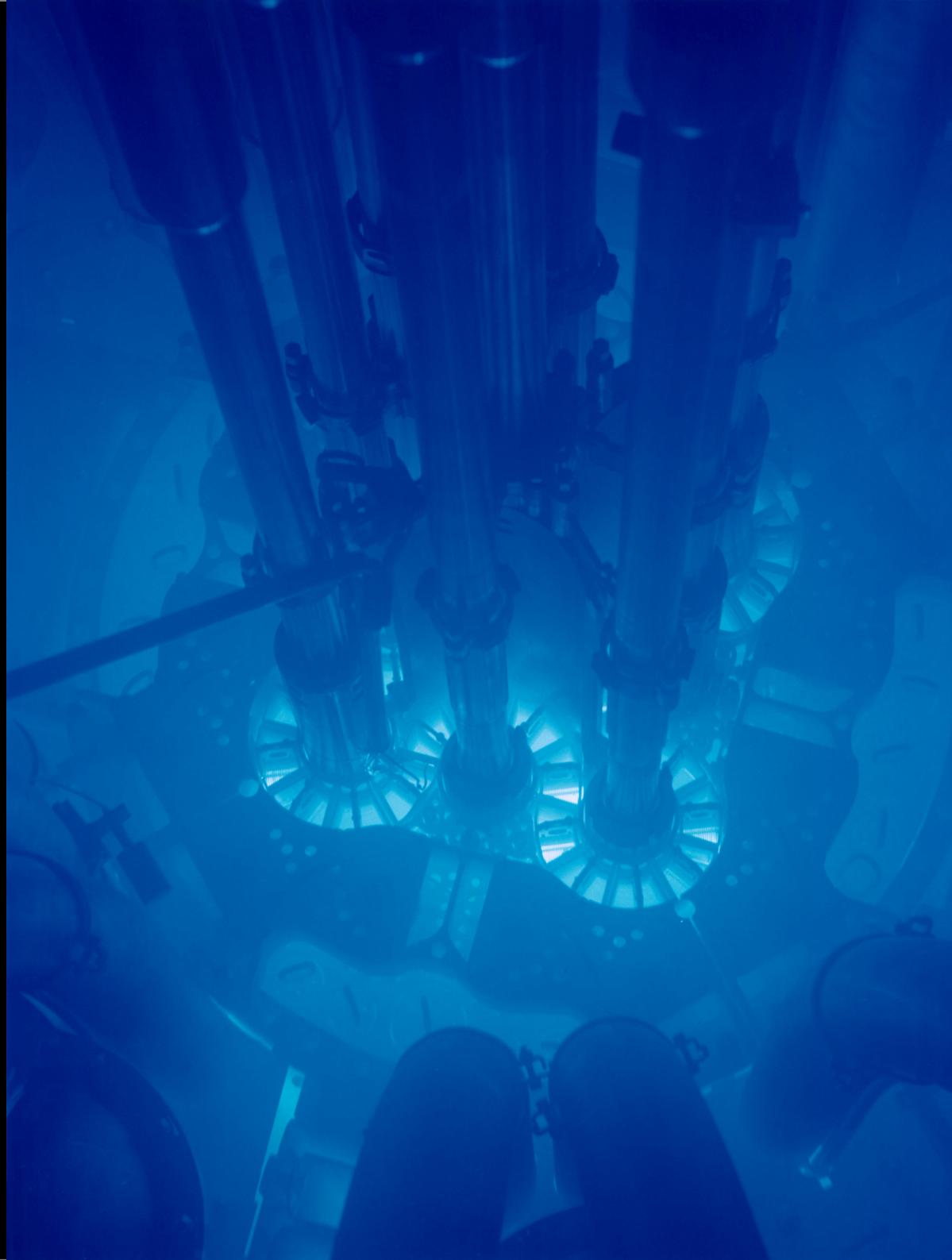
- Reagrupando e integrando, obtenemos el número  $N$  de fotones Cherenkov producidos cuando la partícula avanza  $l$  en el intervalo  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$

**CHALLENGE ACCEPTED** 
$$\frac{\Delta N}{\Delta l} = 2 \pi \alpha_{EM} \left( 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad n(\omega) \approx \sqrt{\epsilon(\omega)} \approx n$$

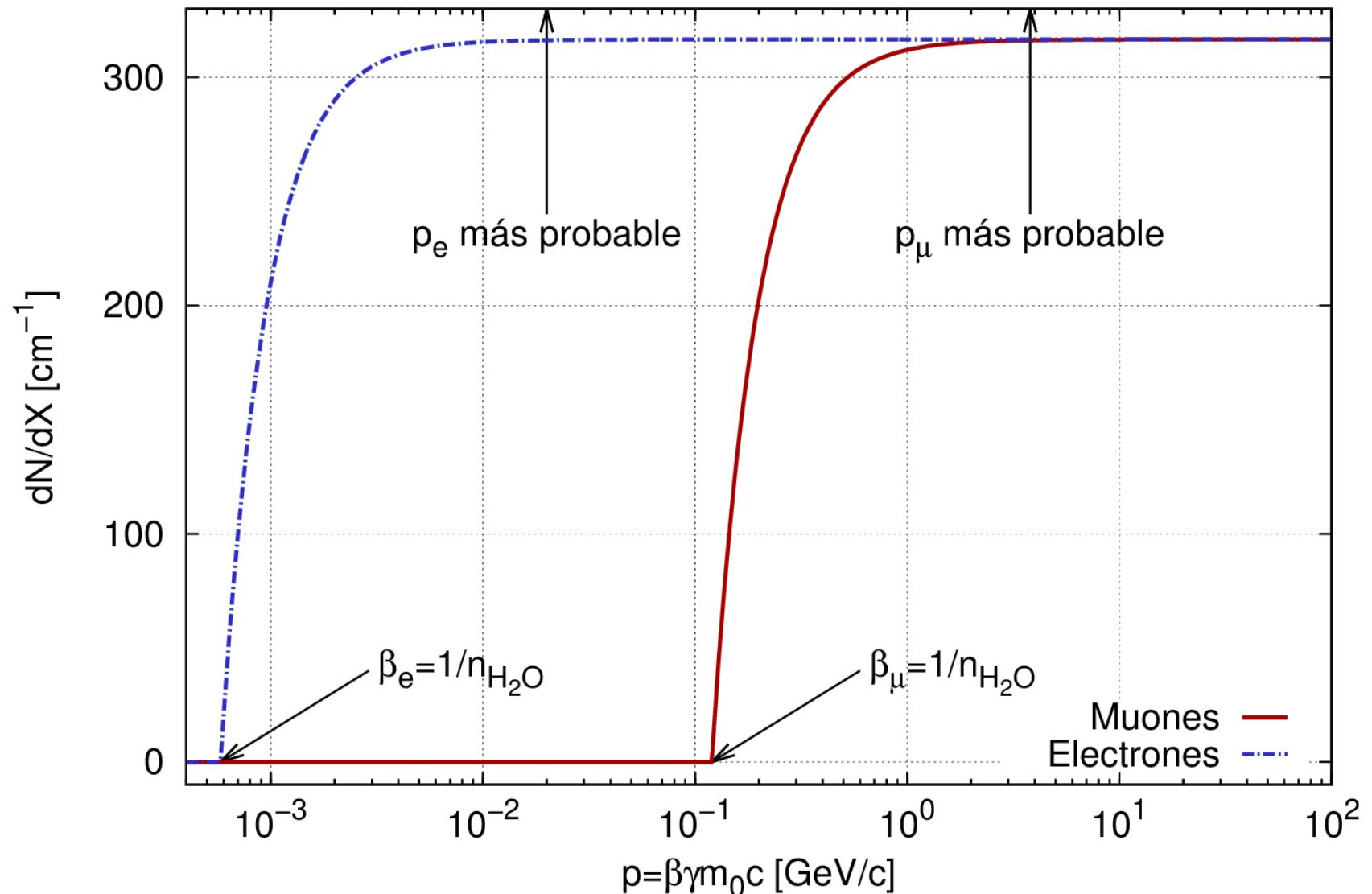


# Índice de refracción agua



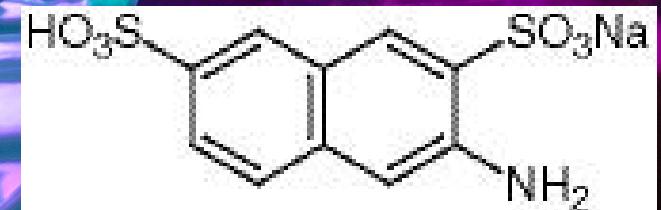
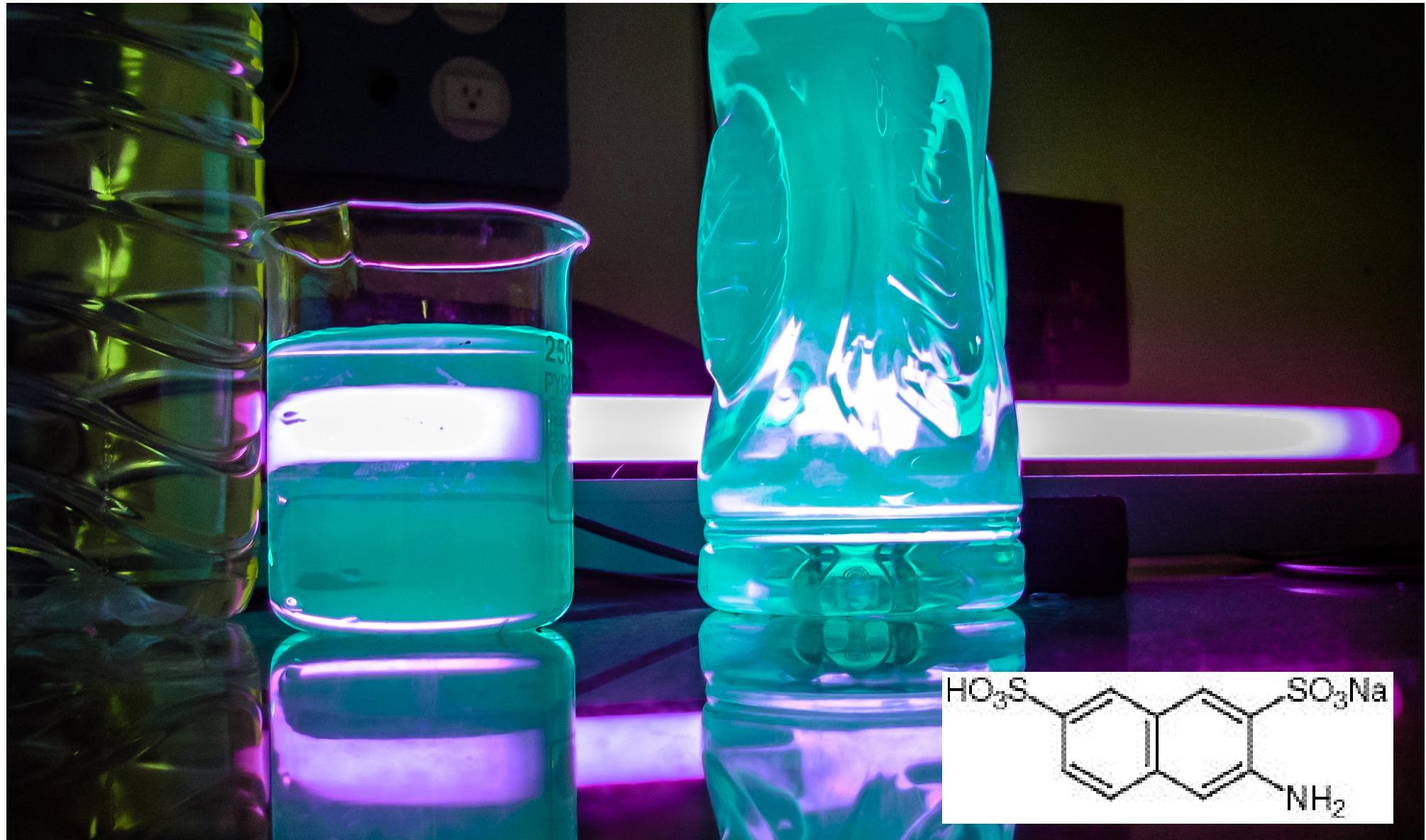


# Producción de Cherenkov en Agua



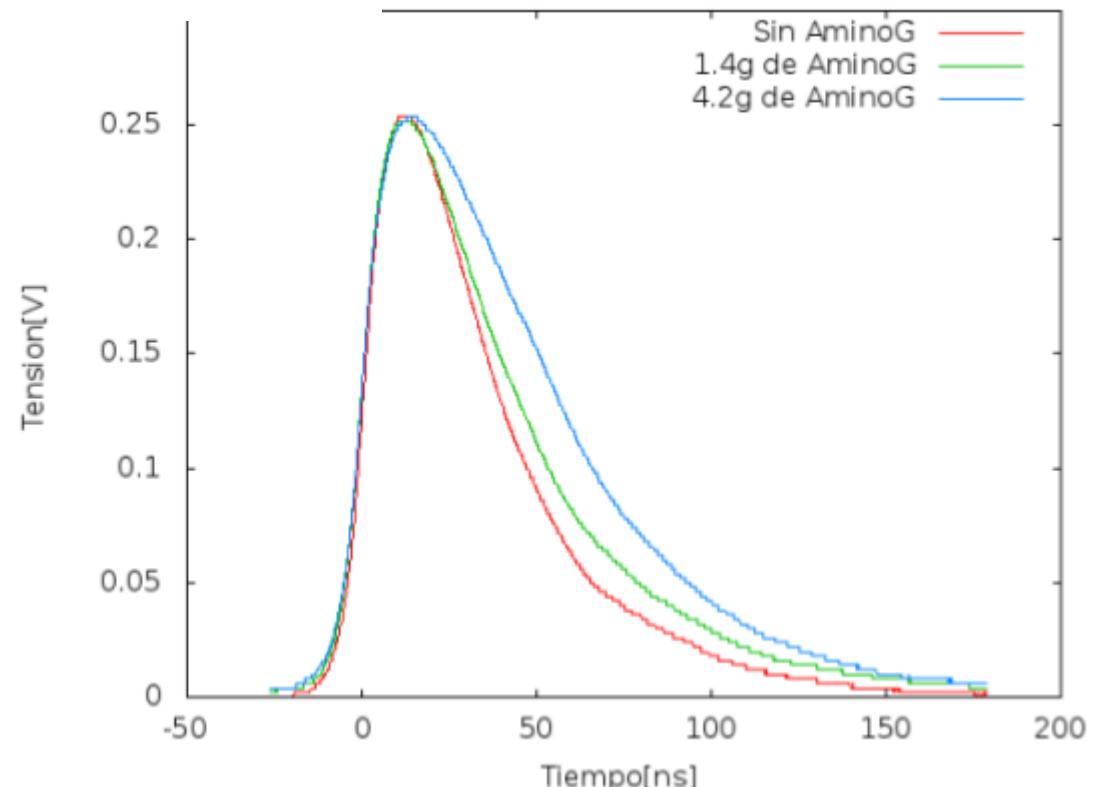
Amino-G

# 3-amino-2,7-naftalendisulfónato-ácido de sodio

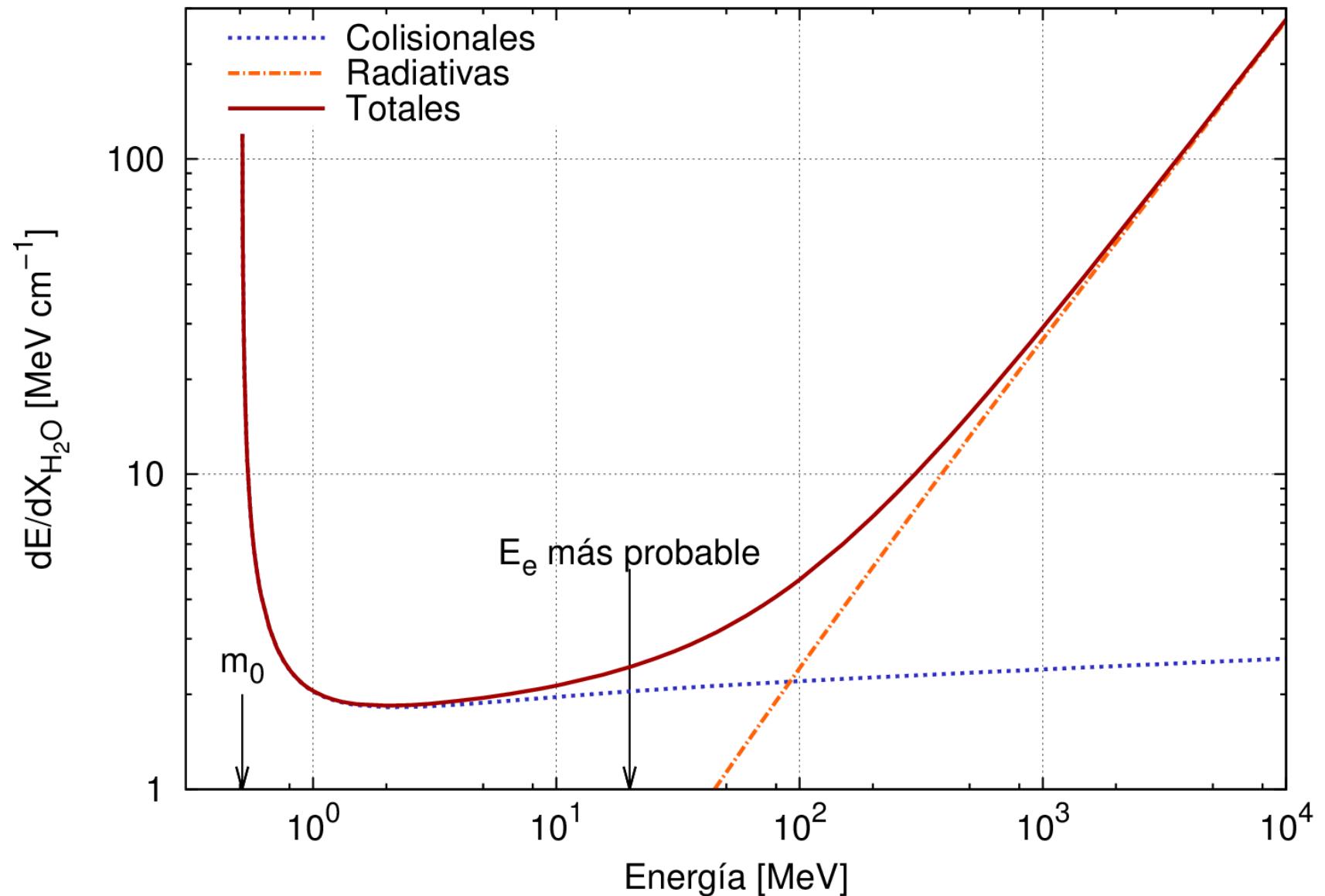


# Efecto del Amino-G

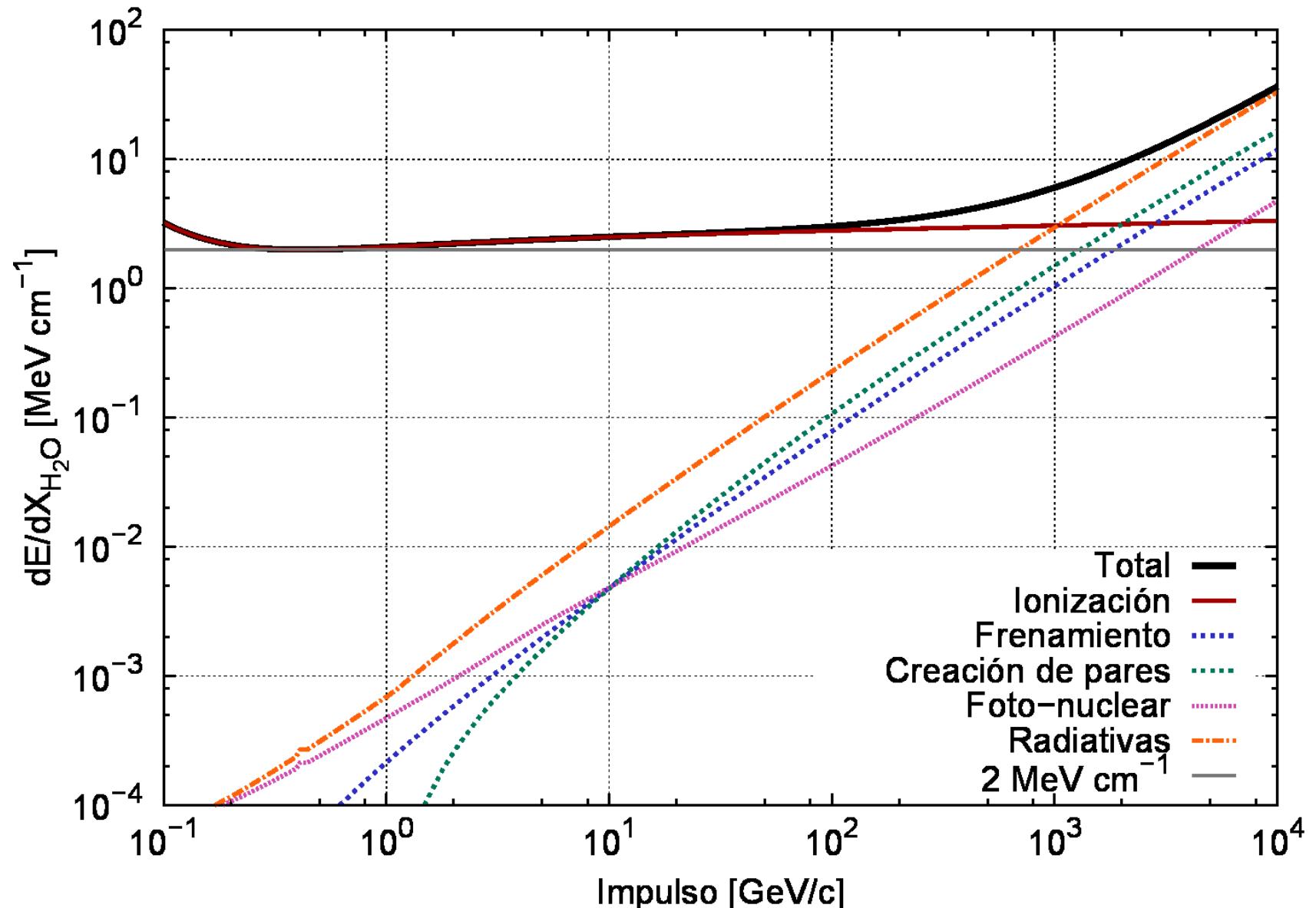
<i>Agua</i>	<i>Longitud</i> ( $\lambda[m]$ )
Sucia con 14 gr de <i>AminoG</i>	$(4,48 \pm 0,01)$
Limpia sin <i>AminoG</i>	$(6,67 \pm 0,02)$
Limpia con 1.4 gr de <i>AminoG</i>	$(8,13 \pm 0,03)$
Limpia con 4.2 gr de <i>AminoG</i>	$(10,23 \pm 0,05)$



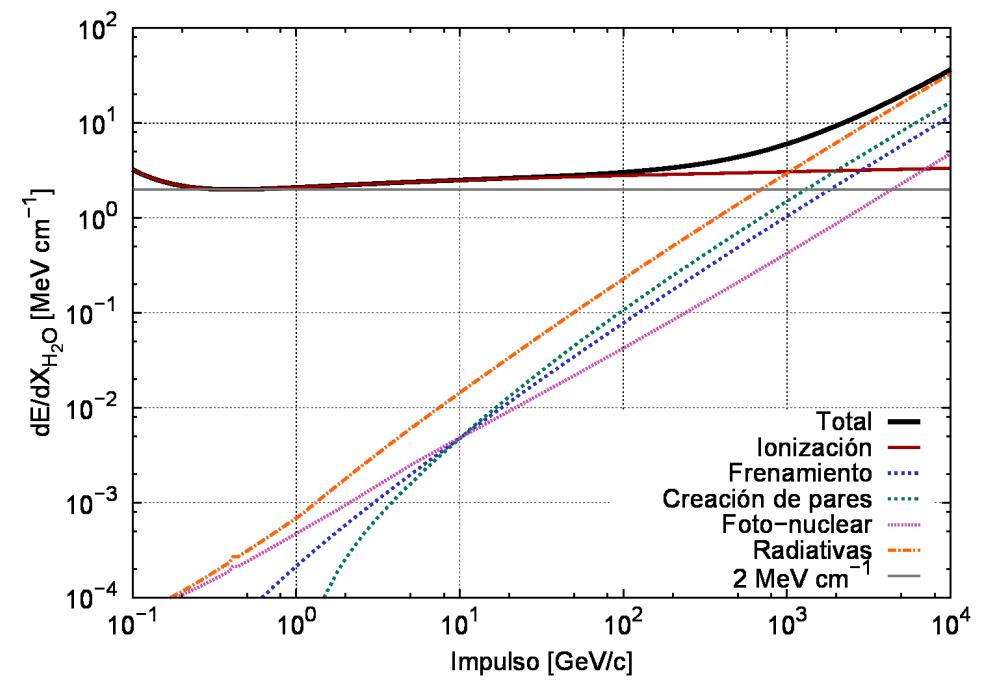
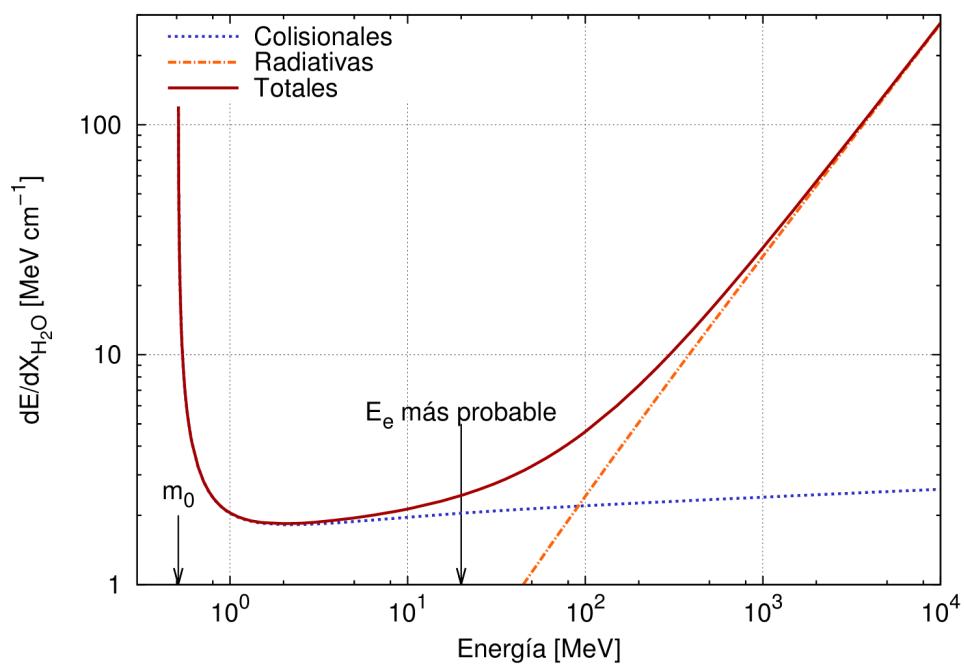
# dE/dX Electrones en Agua



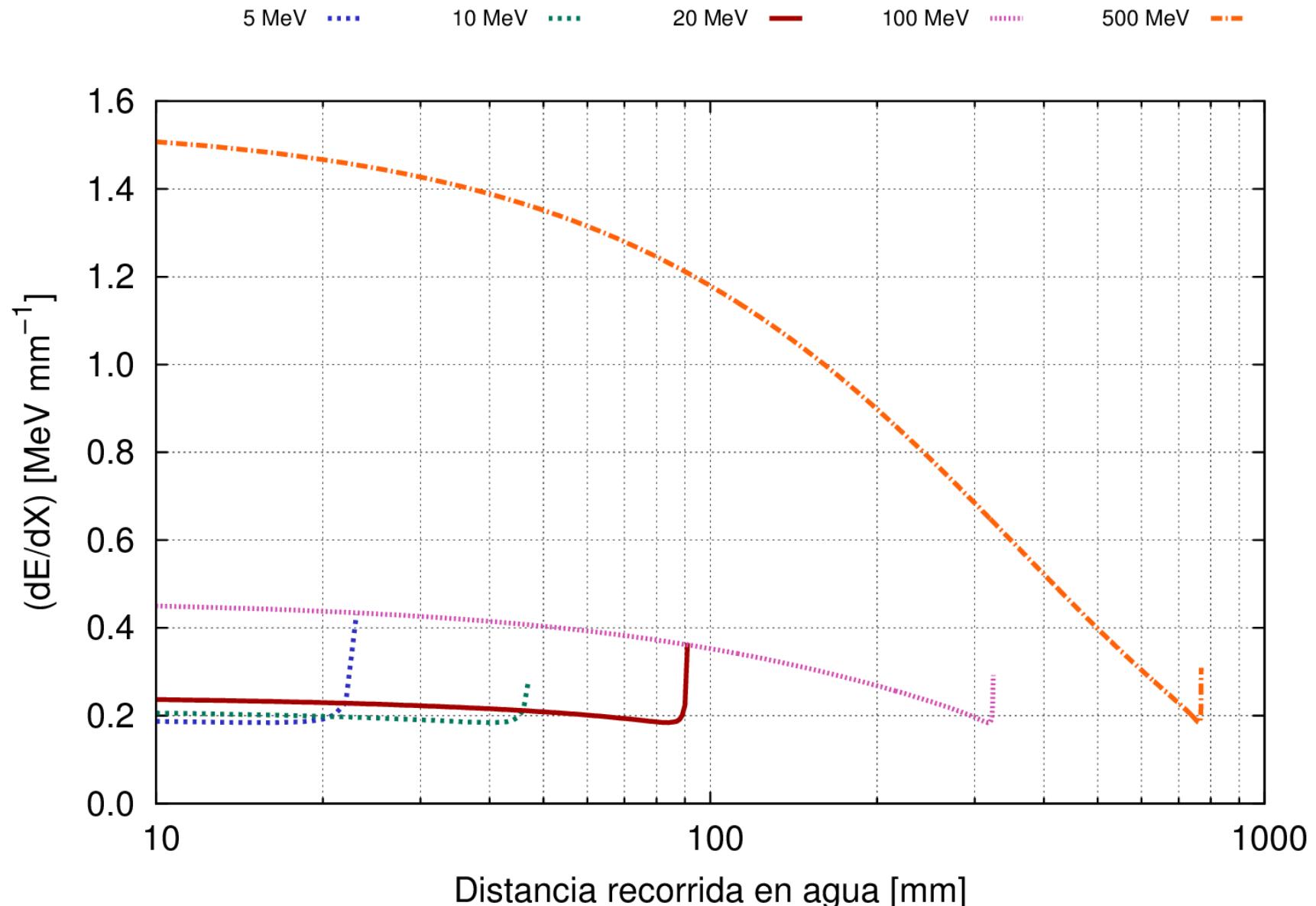
# dE/dX Muones en agua



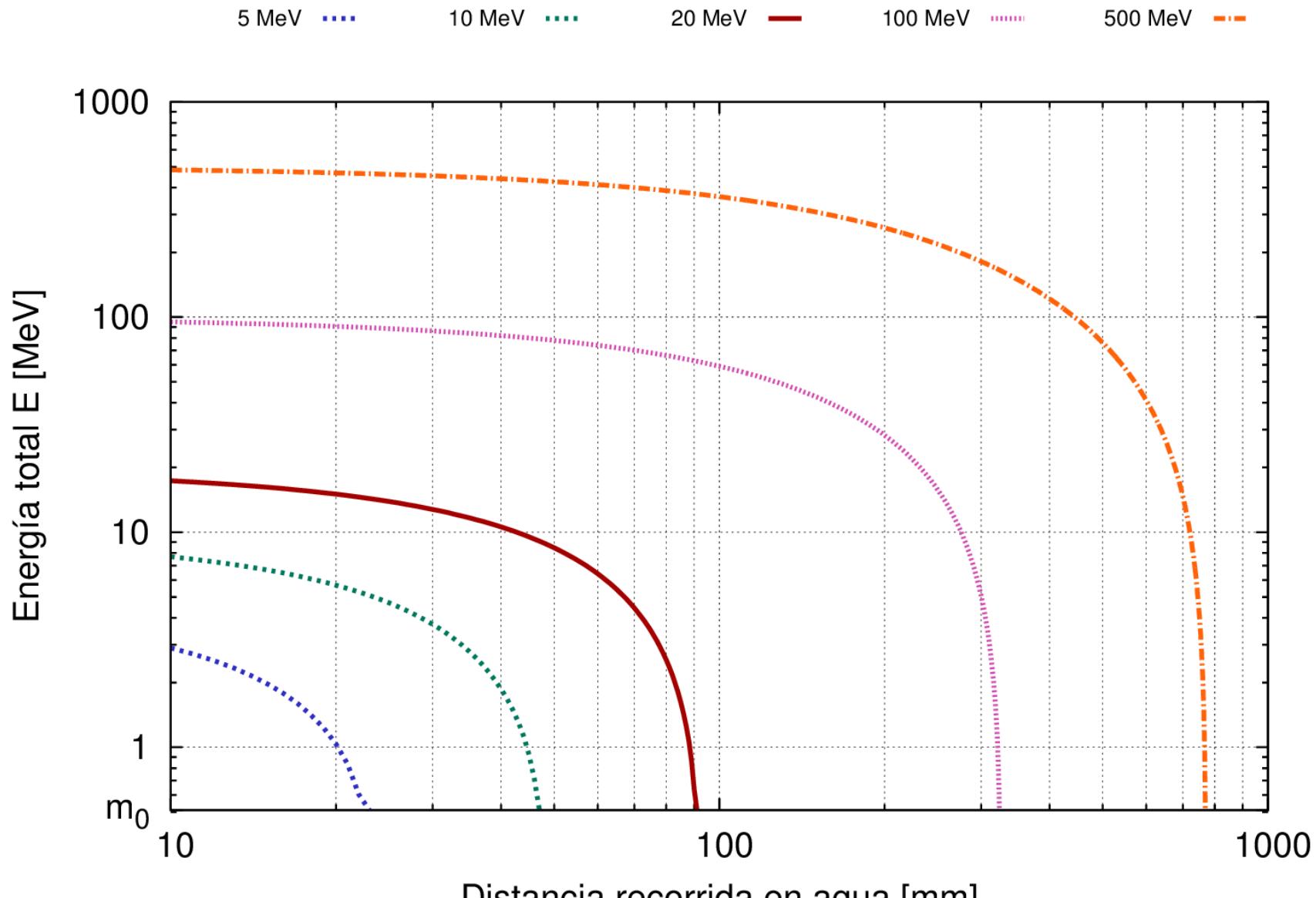
# dE/dX electrones vs muones en agua



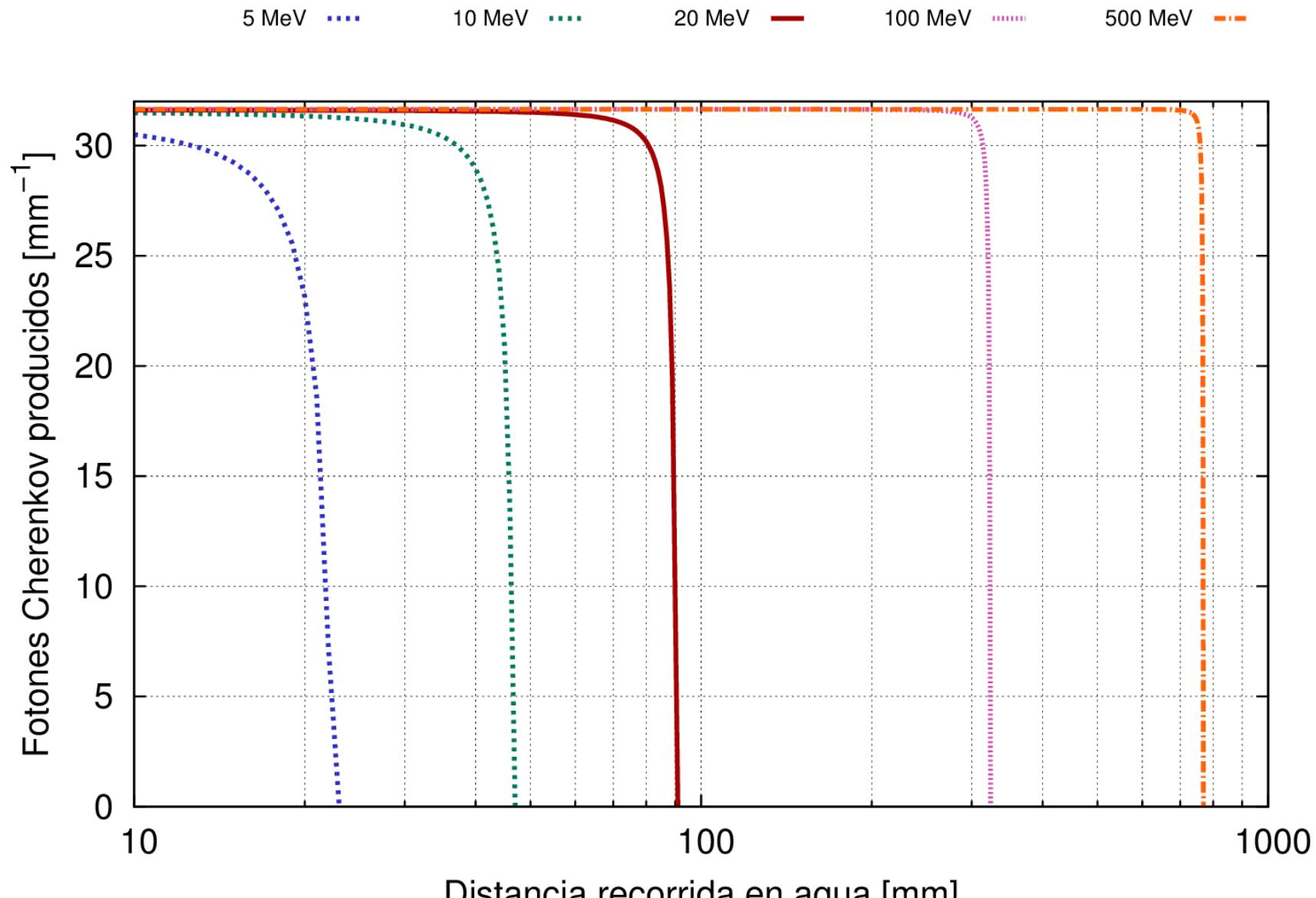
# Poder de frenado



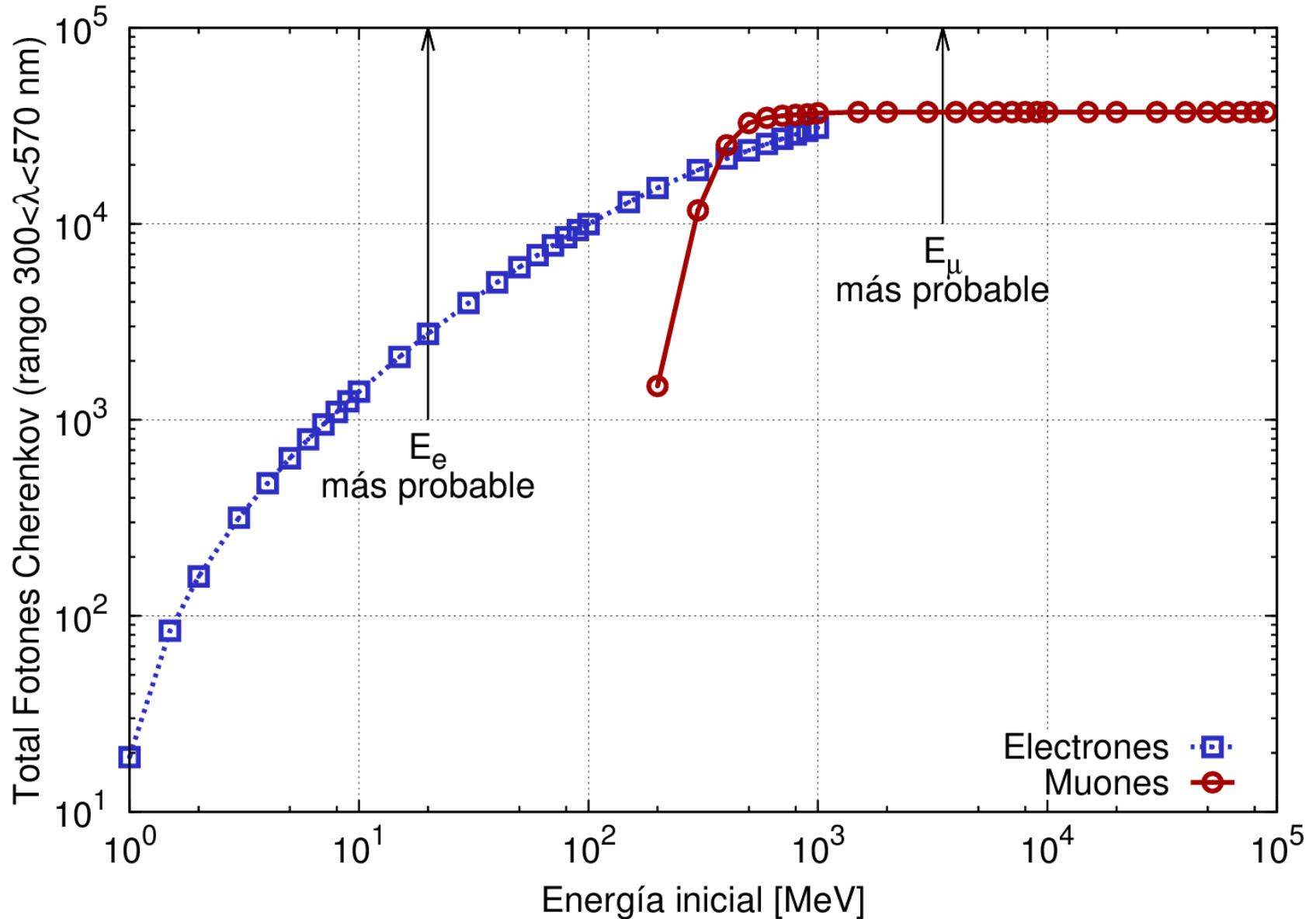
# Rango de electrones en agua



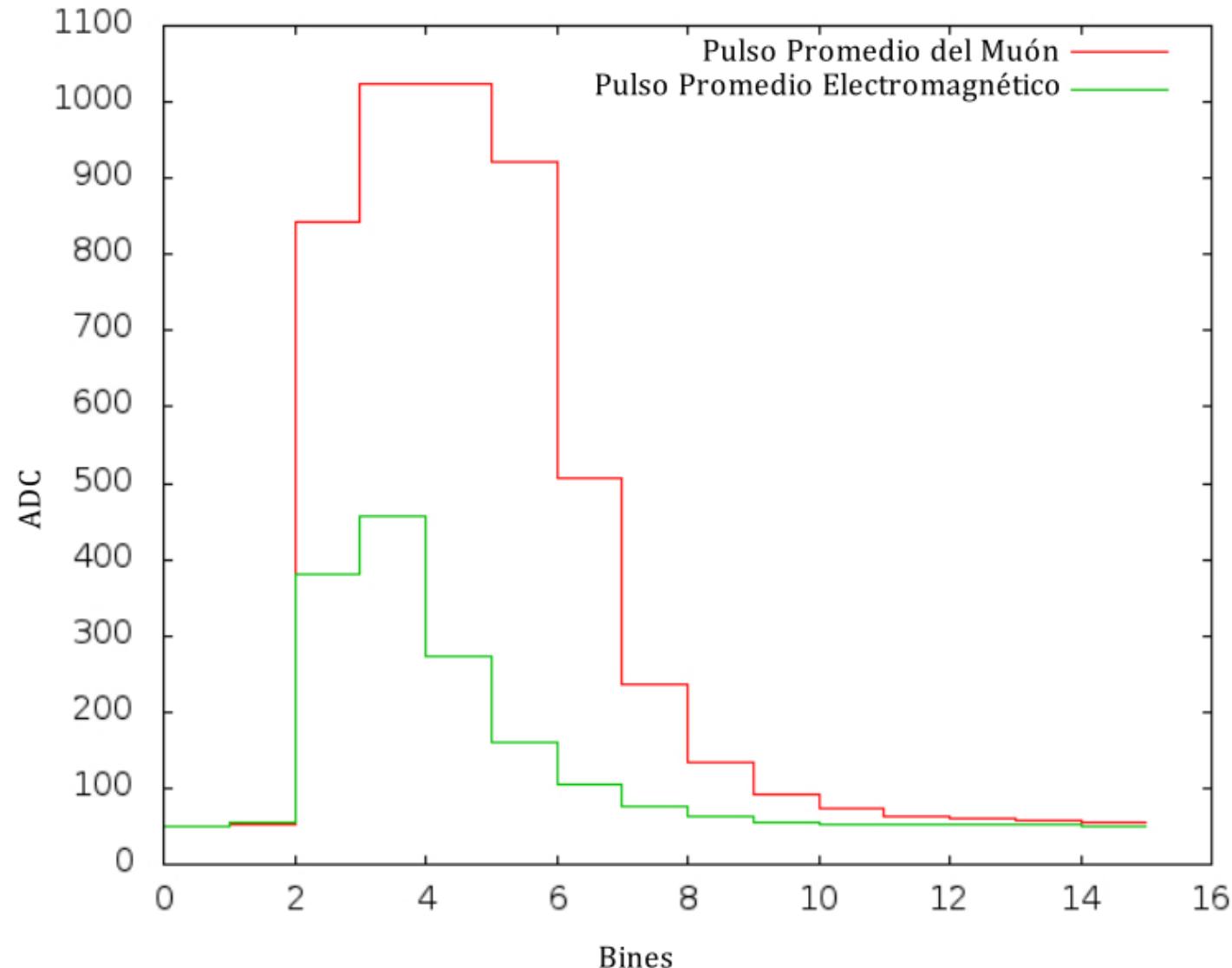
# Producción de Cherenkov en agua



# Producción Cherenkov



# ¿Será verdad? Señales en el detector WCD

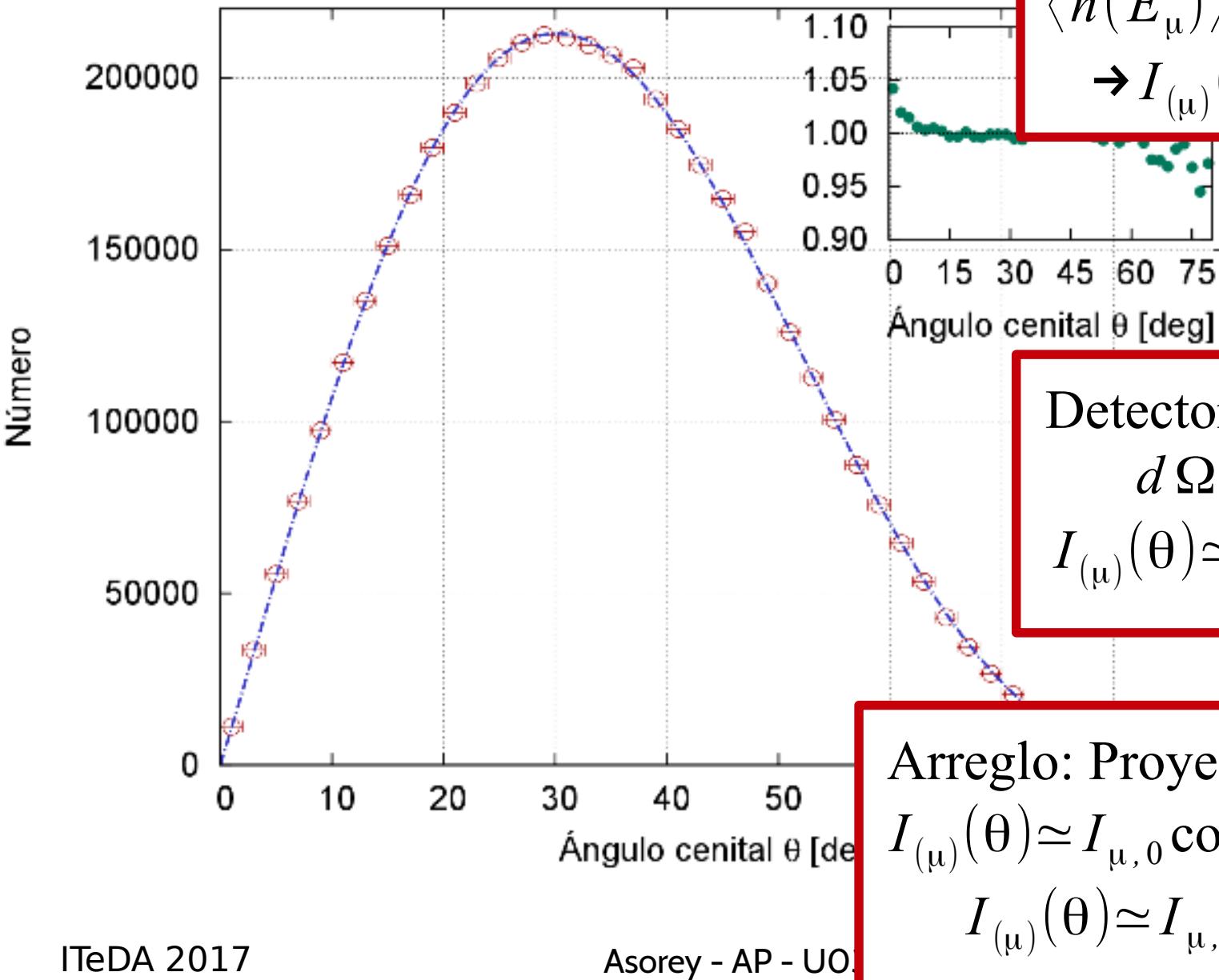


Telescópio de muones

$$I_{(\mu)}(\theta) = I_{\mu,0} \cos^{n(E_\mu)}(\theta)$$

$$\langle n(E_\mu) \rangle = (1.97 \pm 0.02) \simeq 2$$

$$\rightarrow I_{(\mu)}(\theta) \simeq I_{\mu,0} \cos^2(\theta)$$



Detector volumétrico: flujo

$$d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\phi$$

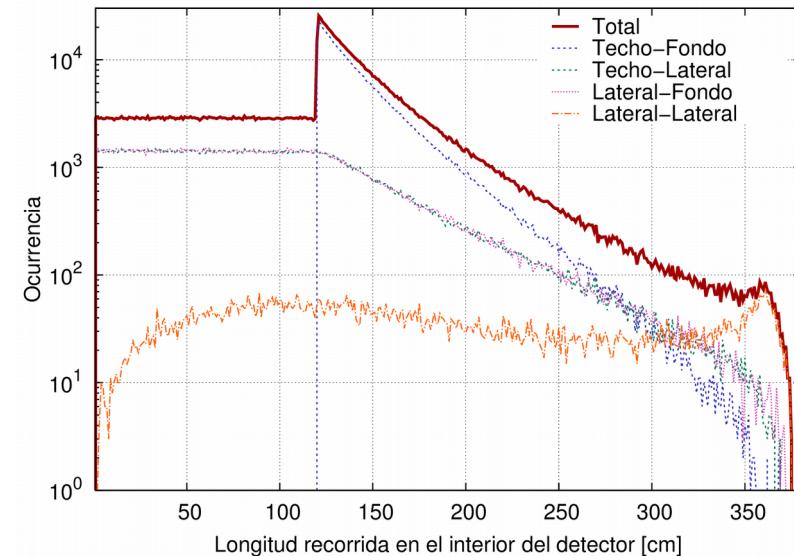
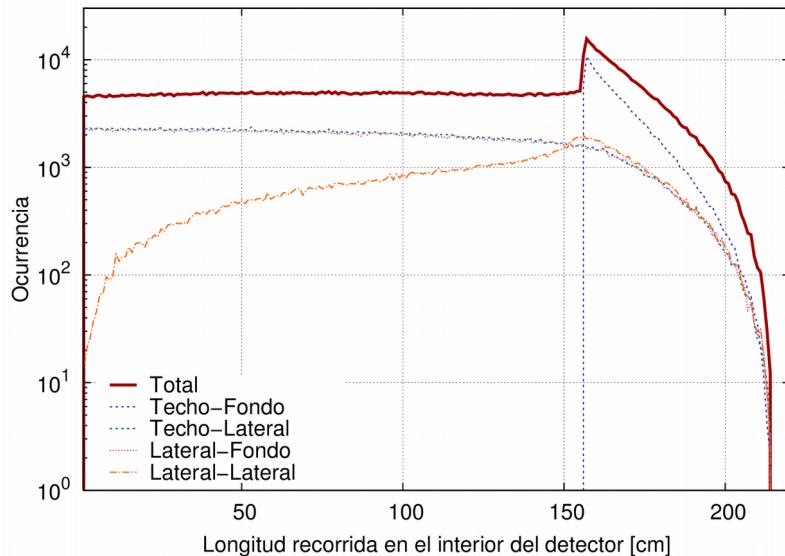
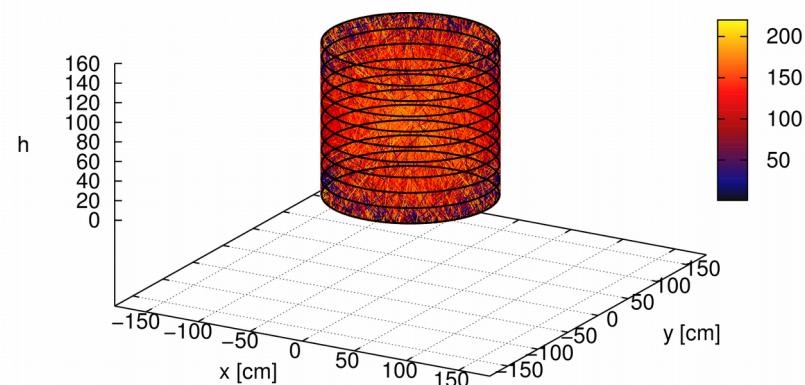
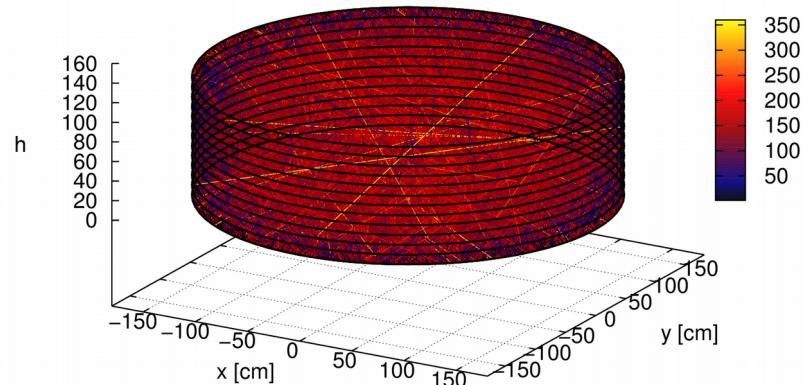
$$I_{(\mu)}(\theta) \simeq I_{\mu,0} \cos^2(\theta) \sin(\theta)$$

Arreglo: Proyección y flujo

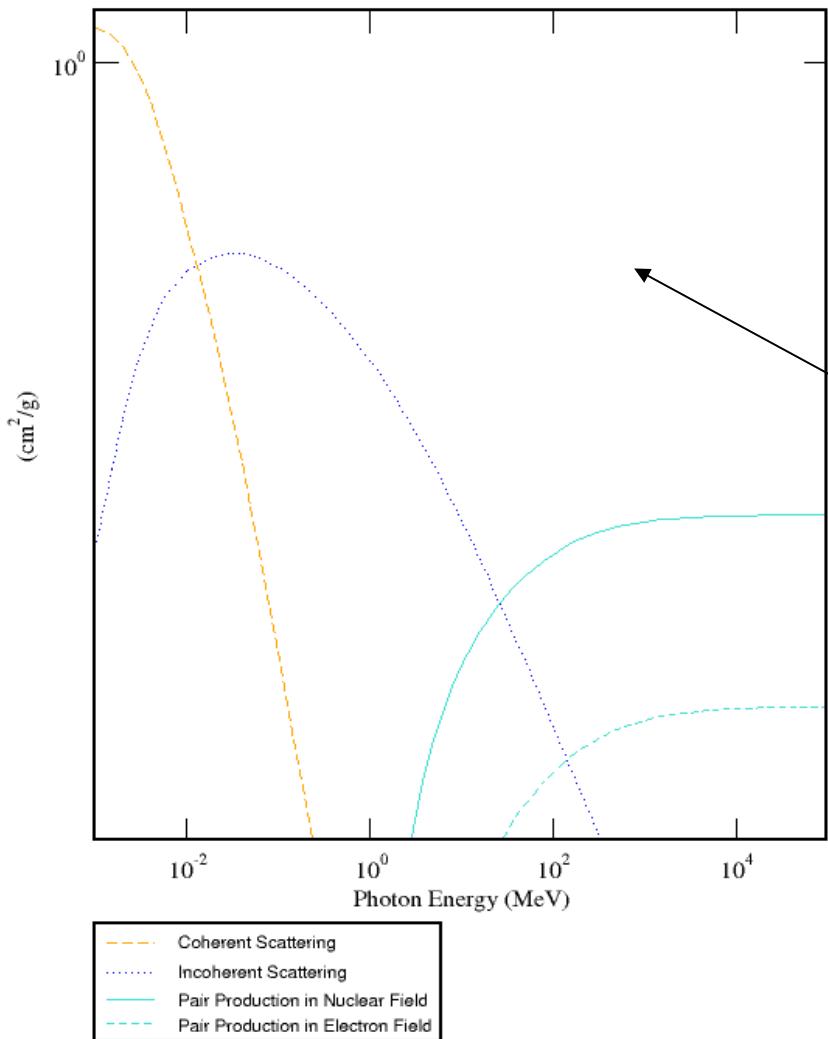
$$I_{(\mu)}(\theta) \simeq I_{\mu,0} \cos^2(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta)$$

$$I_{(\mu)}(\theta) \simeq I_{\mu,0} \cos^3(\theta) \sin(\theta)$$

# Para los muones: sólo importa la longitud recorrida en el detector



# ¿Qué pasa con los fotones?

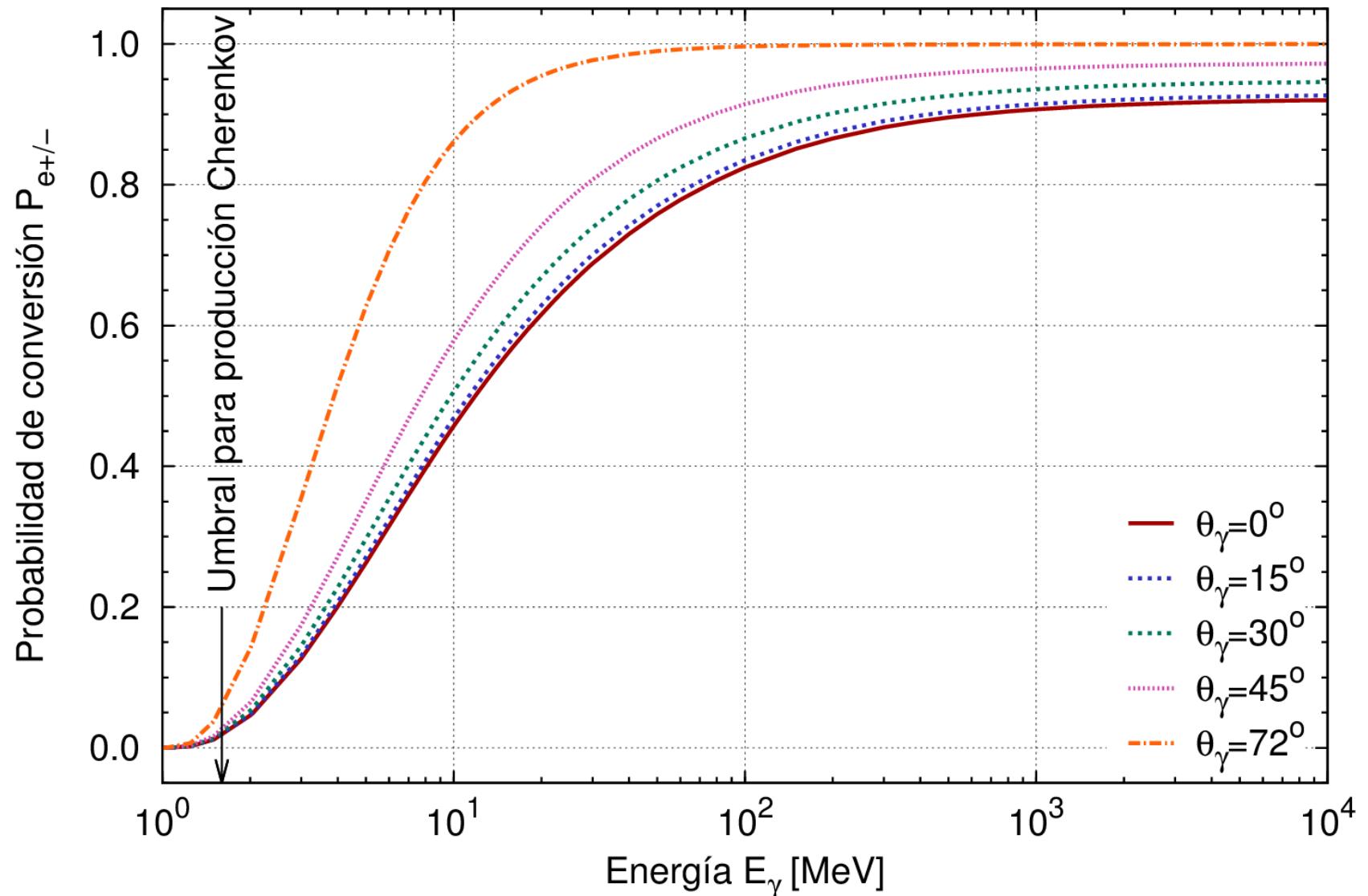


Partículas sin carga → No  
hay Cherenkov

Pero hay dos efectos  
 adicionales:

- 1) Producción de pares: un fotón puede producir un par que produzca señal
- 2) Compton: por scattering compton un electrón puede ser promovido

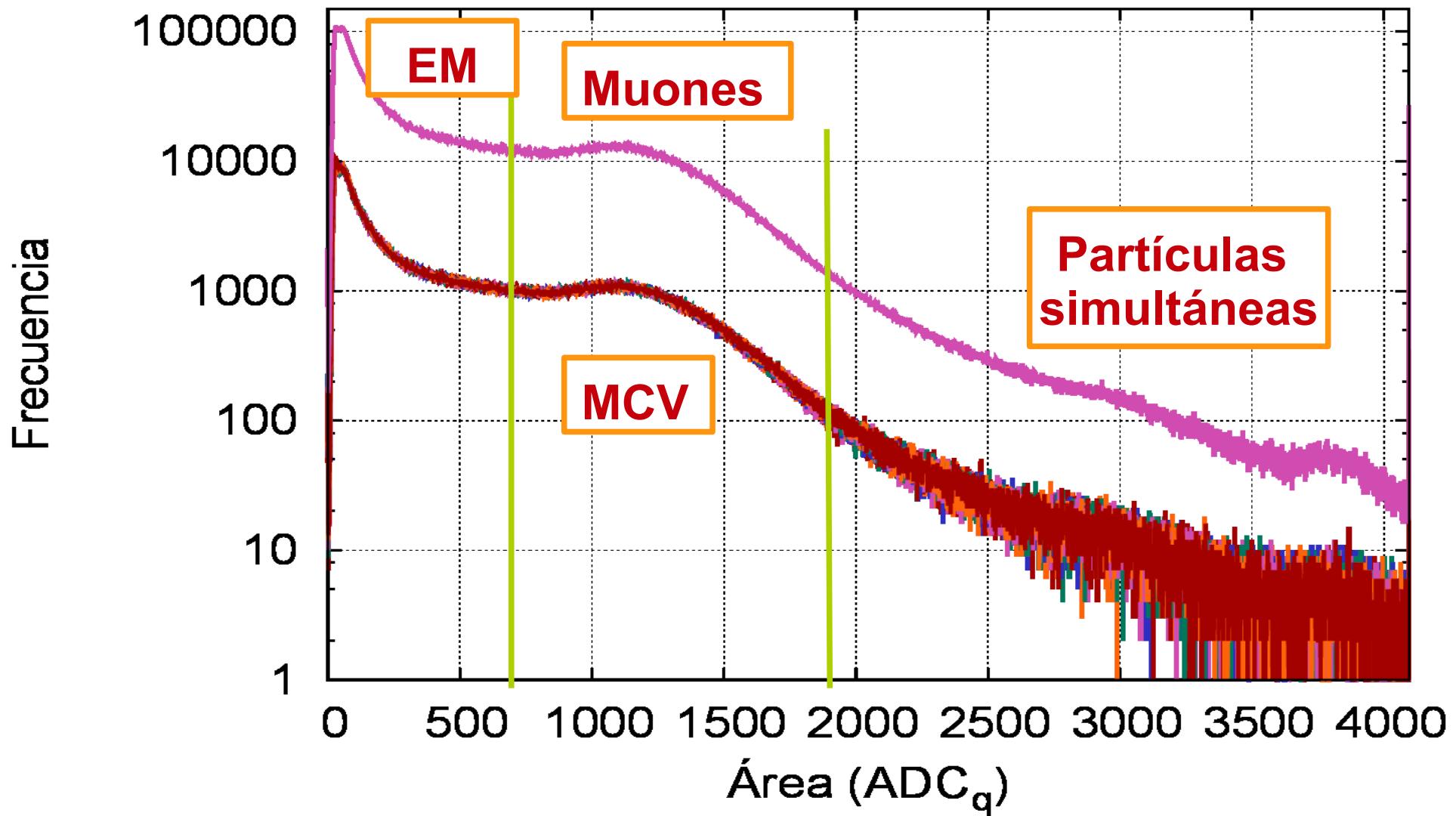
# Detector Cherenkov d=3.6m, d=1.2 m



# ¿Cómo sería el histograma de señales?

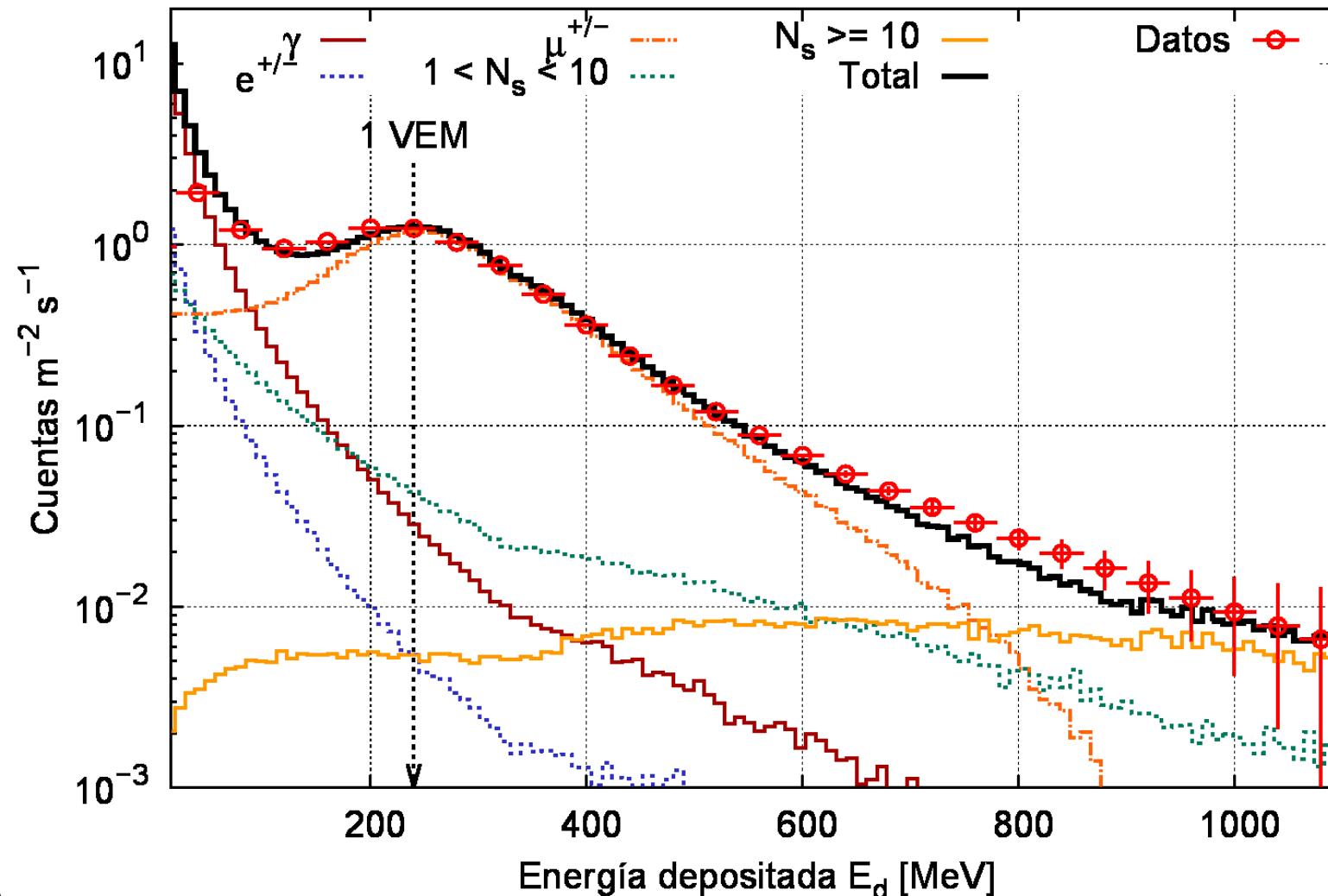
# Histograma de áreas

- Área A de cada pulso → histograma de áreas

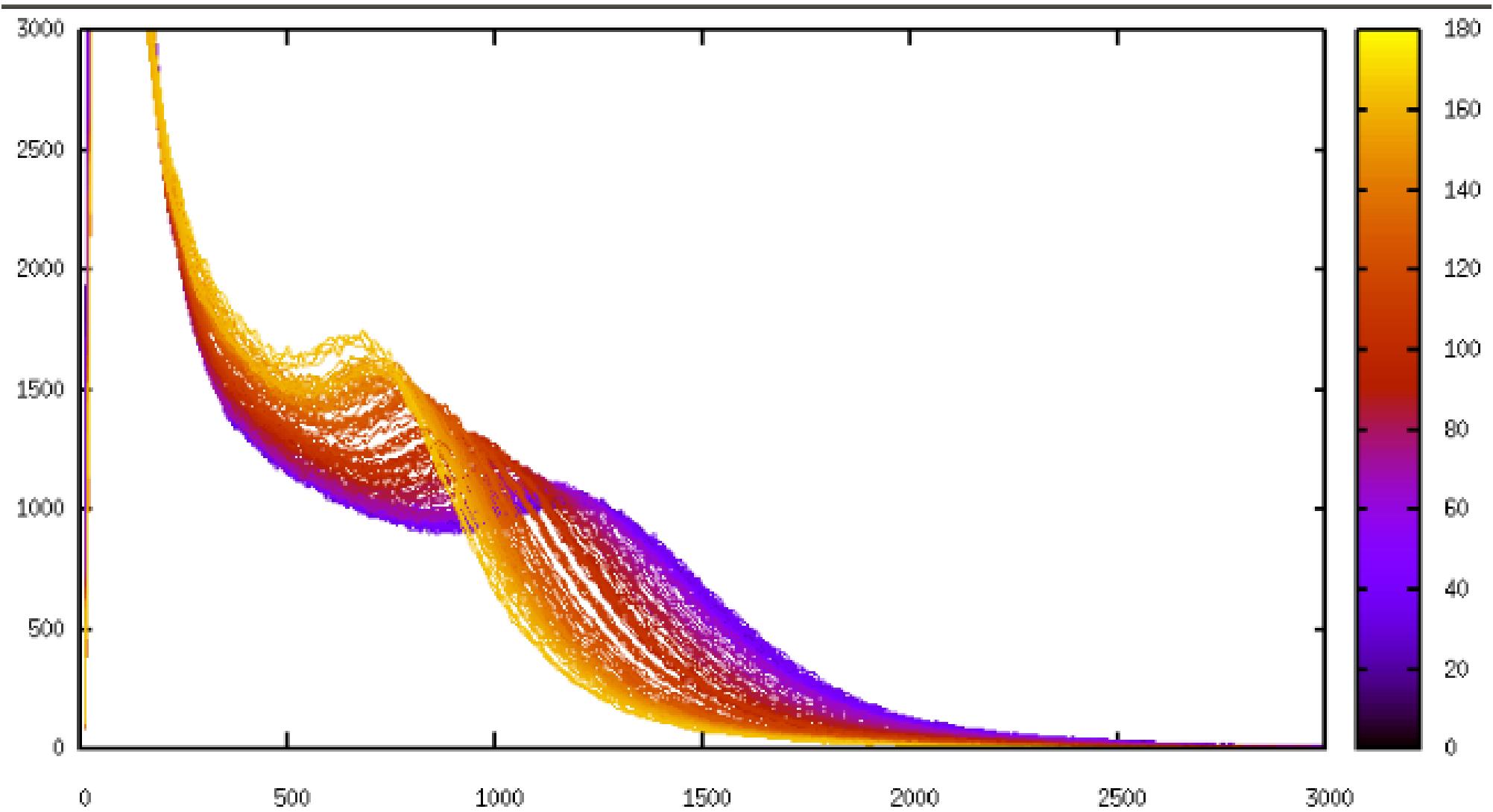


# Histograma simulado

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



# Impacto de la calidad del agua





# Reconstrucción de eventos

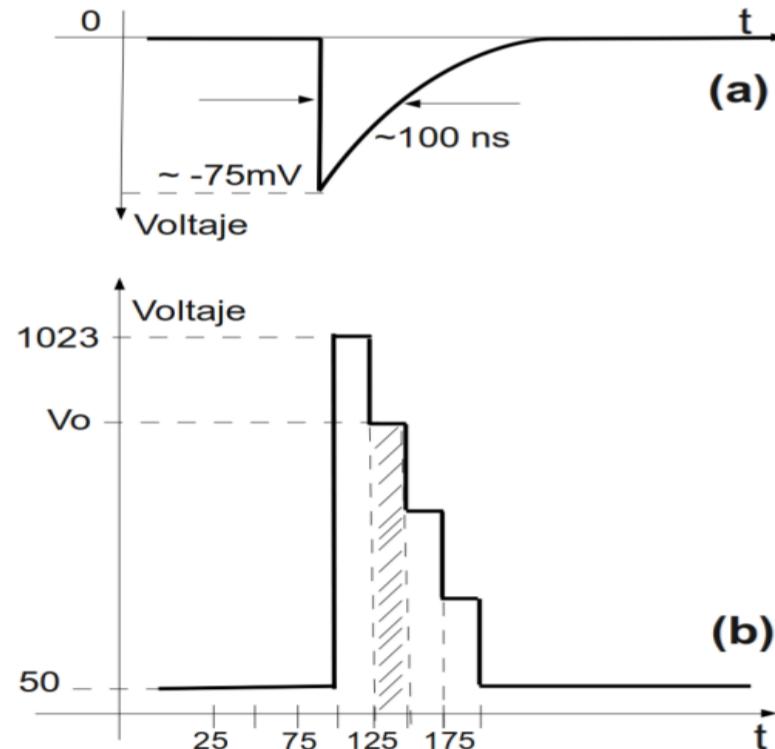
- *conjunto de técnicas y algoritmos necesarios para obtener los parámetros del rayo cósmico incidente, esencialmente:*
    - *su dirección de arriba, dada por la dupla  $(\theta, \varphi)$ ,*
    - *la energía del primario  $E_p$ ,*
    - *la composición del primario  $Z_p$ ,*
- a partir de las señales registradas en los detectores de superficie.*

# Bases de la reconstrucción de eventos

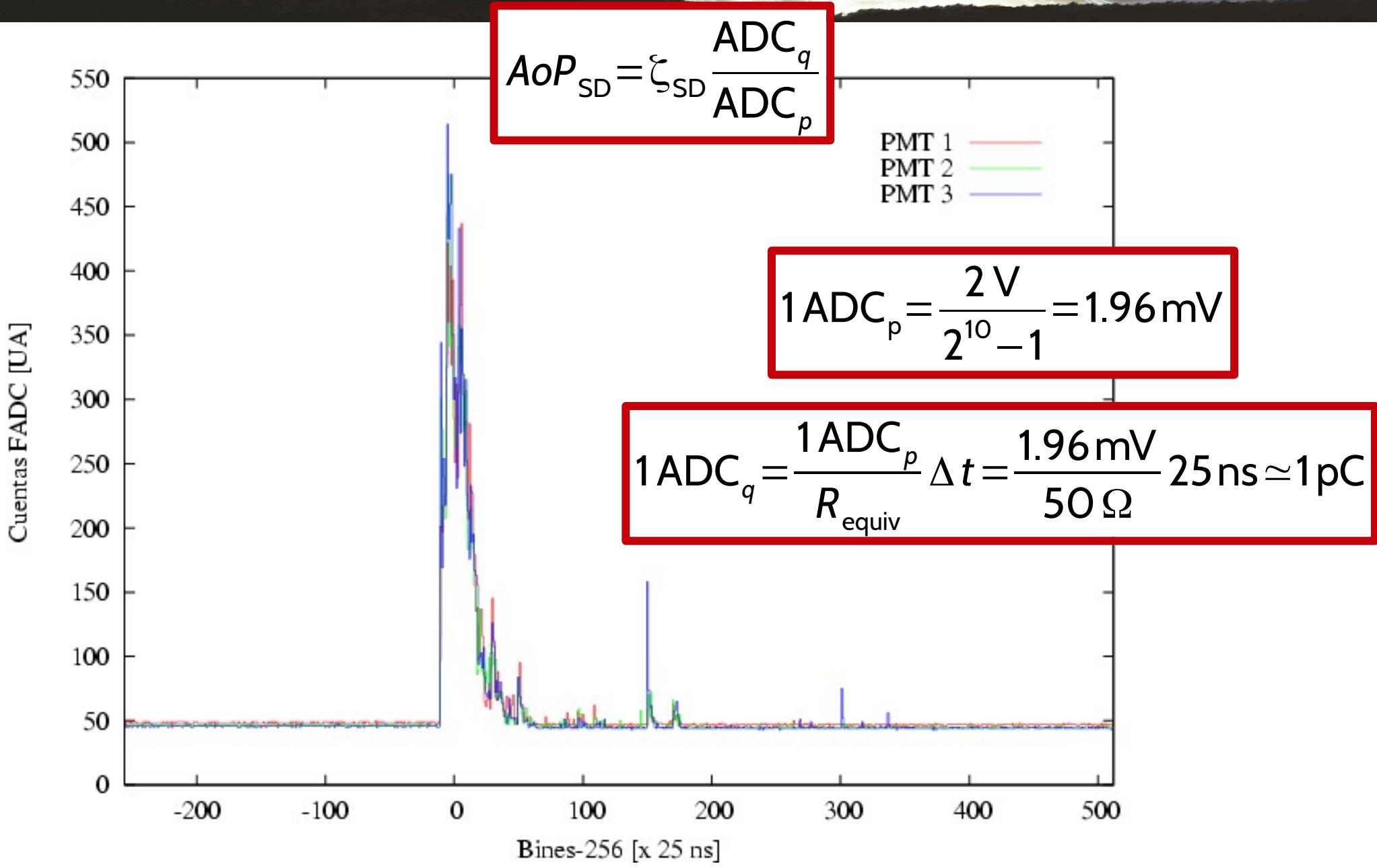
- evento → candidato a rayo cósmico
- En Auger, al menos tres estaciones contiguas y no alineadas disparadas
- Condición de disparo → Triggers:
  - local: **T1** → **T2** (THR, ToT, MOP, ToTd,...) ← reduce el ancho de banda de comms (100 Hz → 20 Hz por estación)
  - global: **T3** (→ 3 T2 contiguos no alineados) ← **EVENTO**
  - físico: **T4** (→ verifica la condición causal de propagación) ← elimina verduras
  - calidad: **T5** (→ verifica los cortes de calidad requeridos) ← los que usamos para hacer física (6T5, 5T5, 4T5BAR, 4T5C1...)

# Calibración de las estaciones

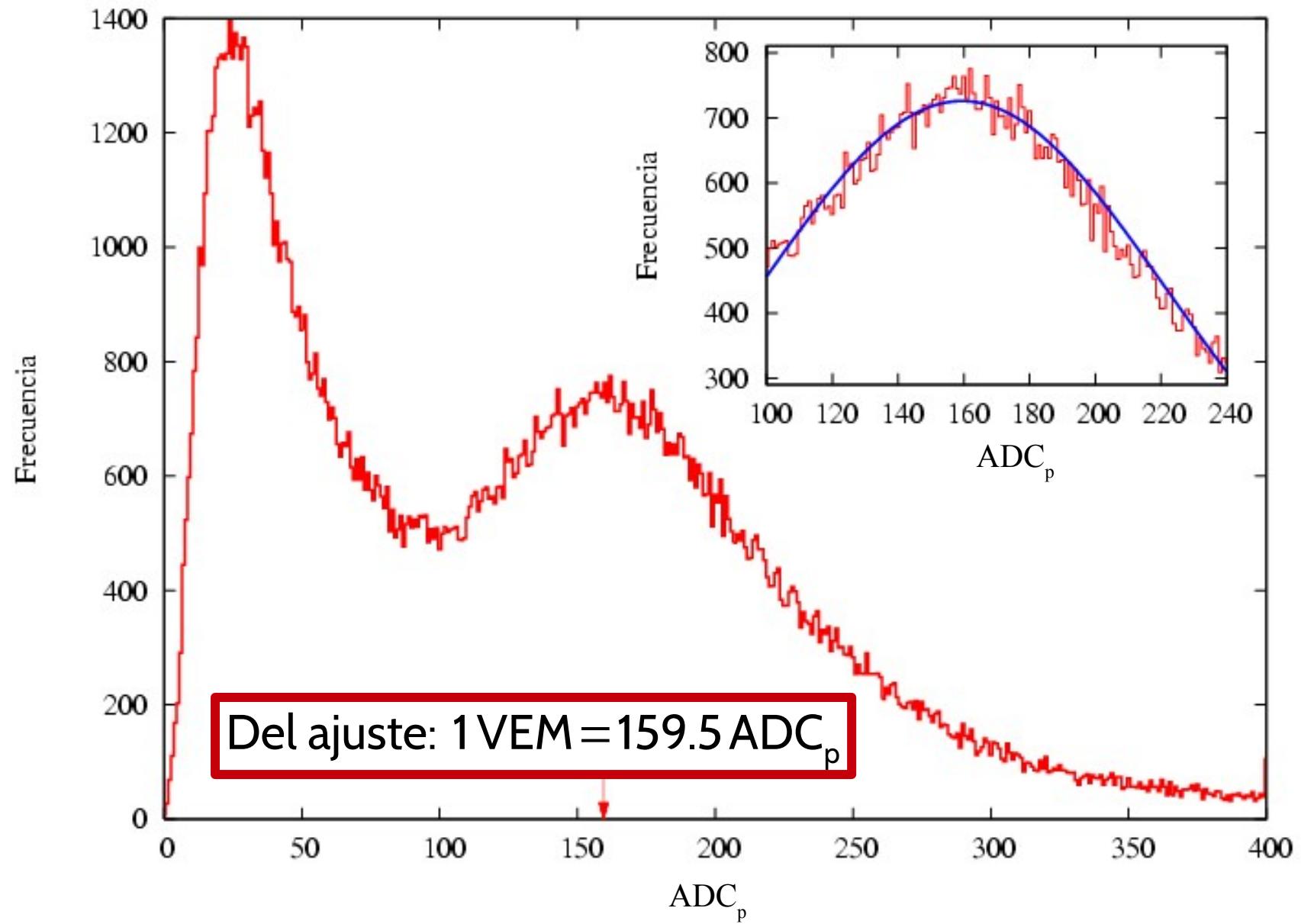
- ¿Cuál es la unidad de señal? → Depende que cosa definimos por señal →  $V$  [mV],  $Q$  [pC],  $E_d$  [J], ....
- En Auger, se mide todo eso, pero de manera indirecta
- La electrónica digitaliza las señales: 10 bits, 40 Mhz



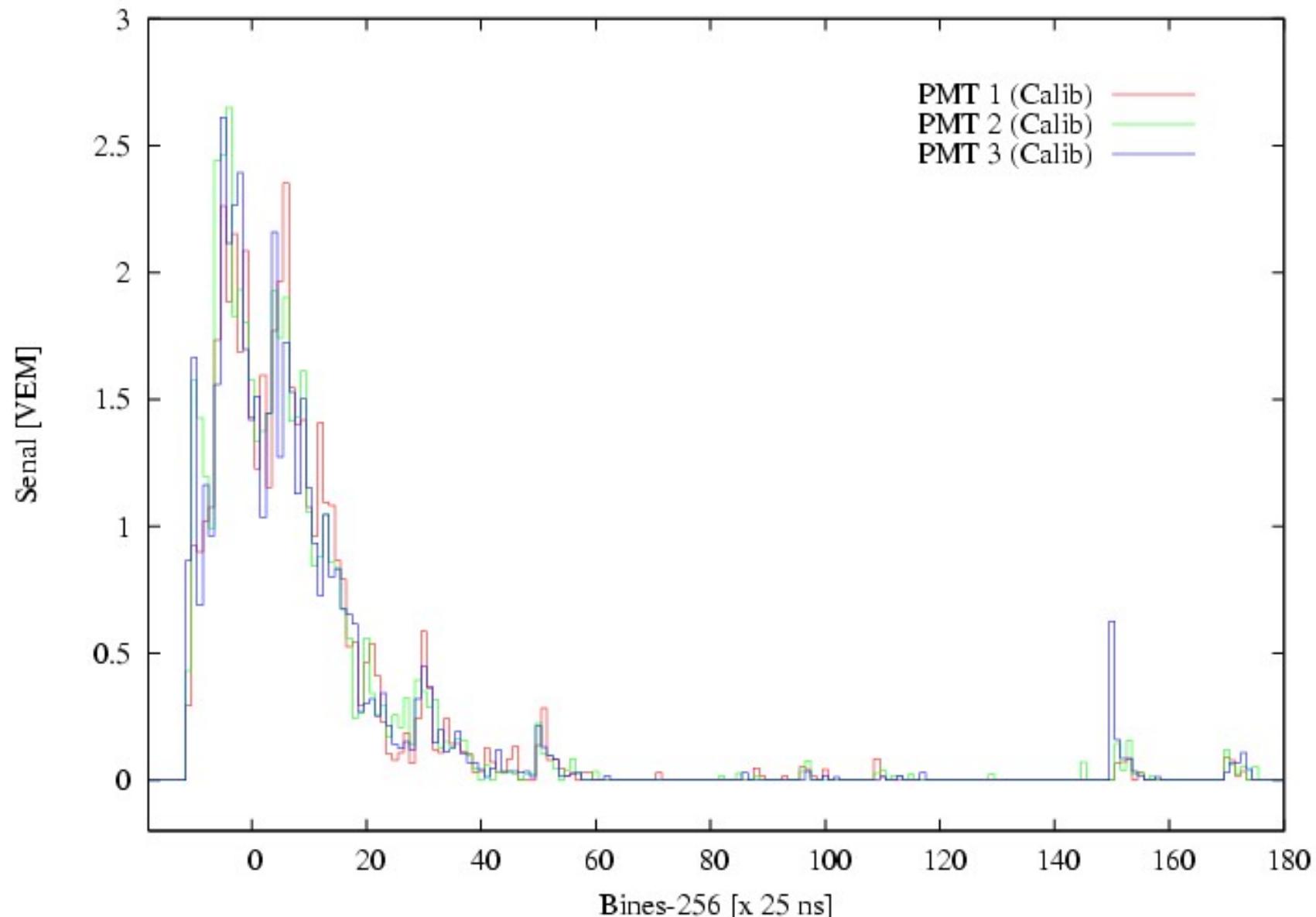
# ADC<sub>p</sub> → Voltaje, ADC<sub>q</sub> → Carga (integrar pulso)



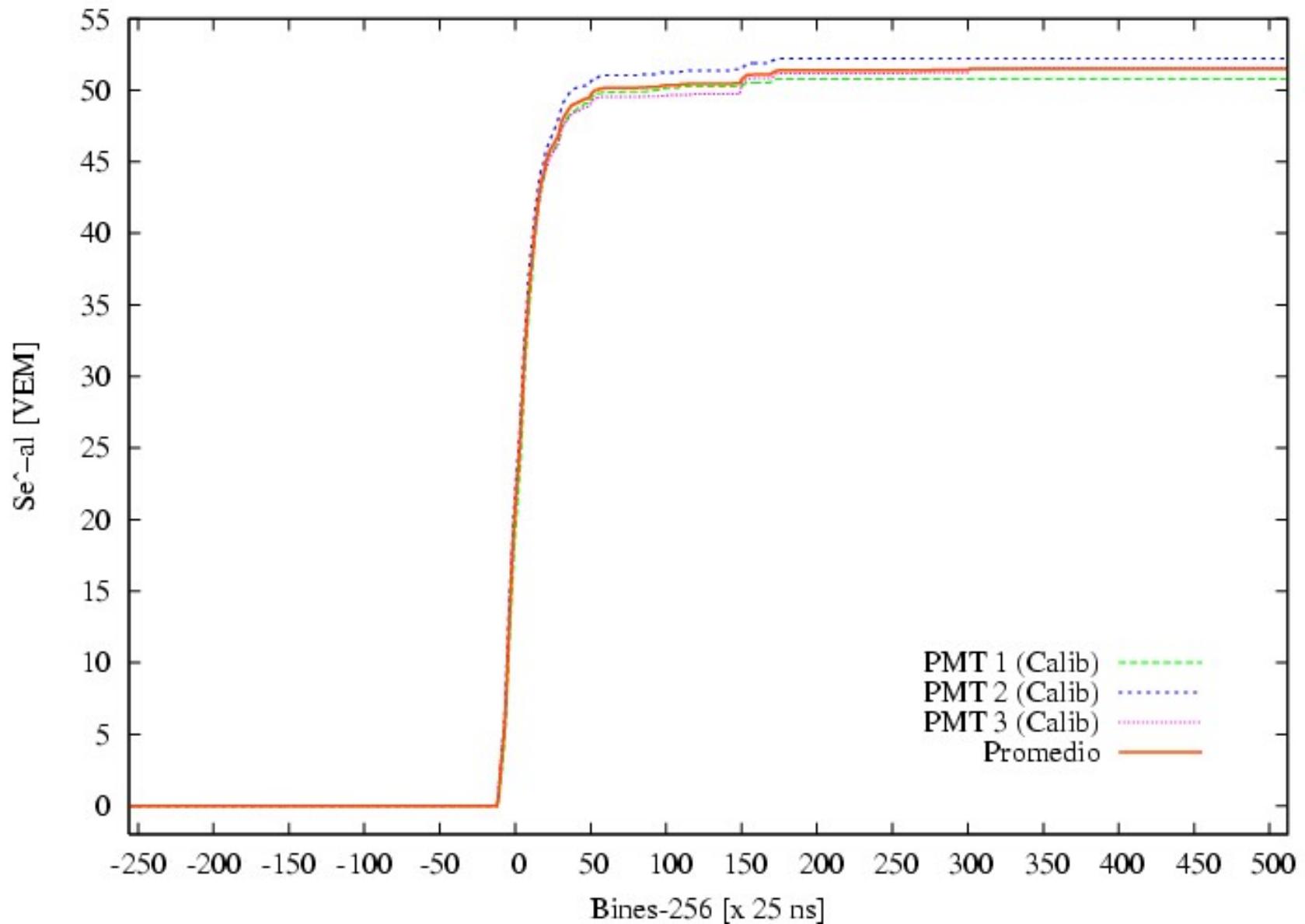
# Histograma de calibración → VEM Vertical (and Central) Equivalent Muon



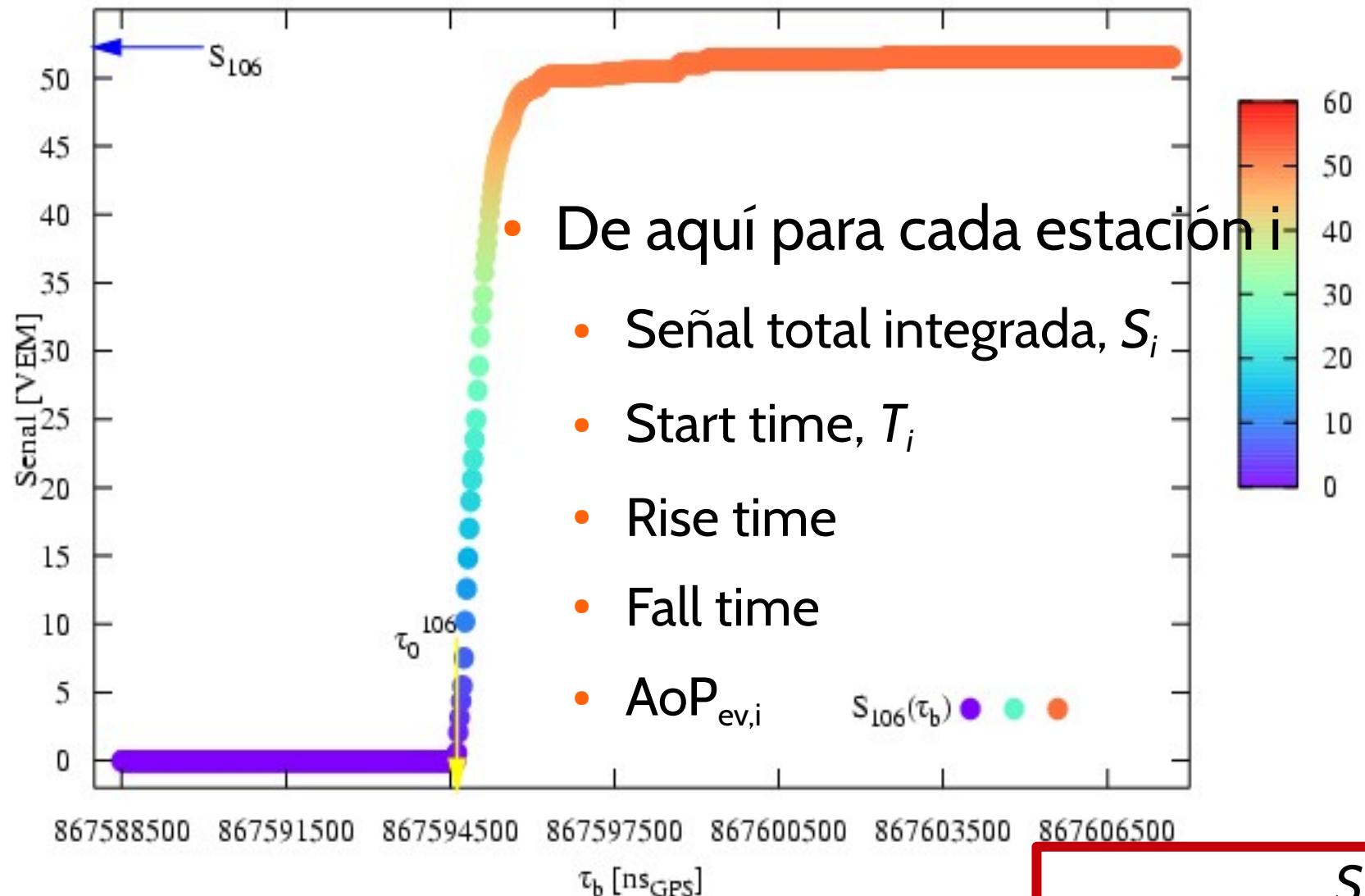
# Restando la línea de base y convirtiendo a VEM



# Señal integrada



# Señal integrada y tiempos corregidos



$$AoP_{ev,i} = \frac{S_i}{\max(V_i(t))}$$

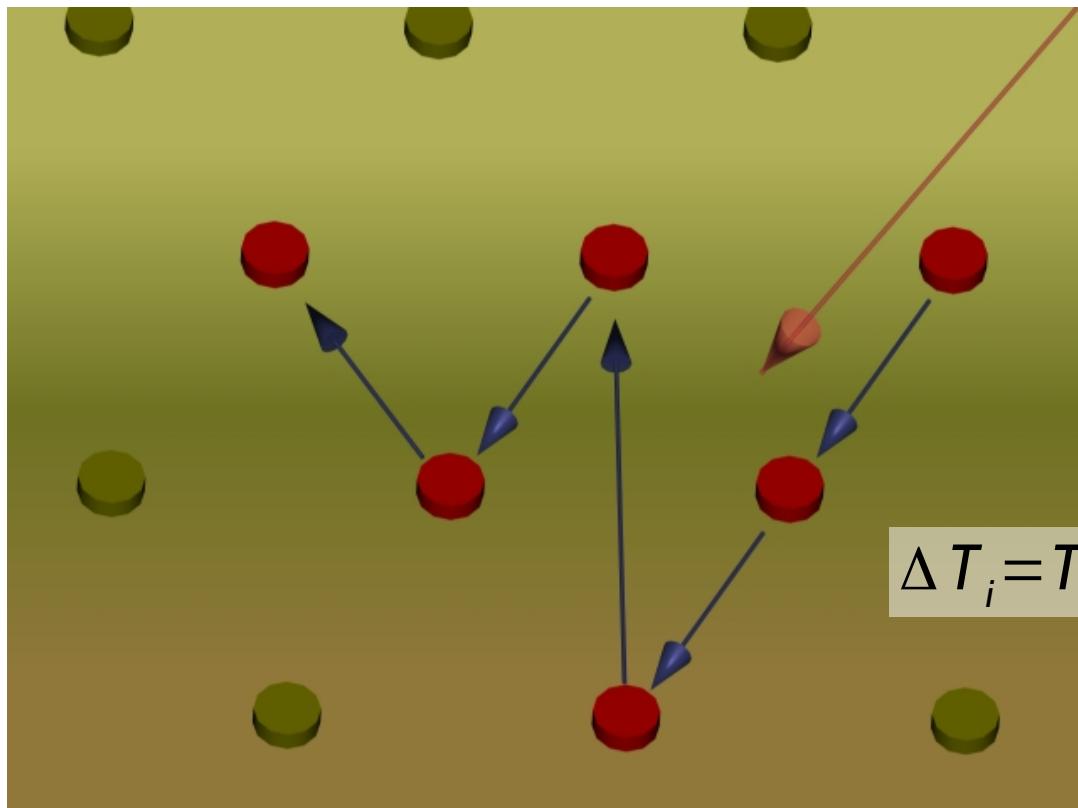


# Clasificación de estaciones

1. **Activas:** estaciones que pueden ser utilizadas para la reconstrucción;
2. **Ambiguas:** estaciones para las cuales, por su cercanía a las estaciones activas, no es posible definir previo a la reconstrucción si pueden ser utilizadas o no durante la misma;
3. **Casuales:** estaciones que corresponden a coincidencias casuales y no serán utilizadas para la reconstrucción;
4. **Solitarias:** estaciones disparadas que no tengan ninguna estación T2 a menos de 1800 m o sólo una a menos de 5000 m;
5. **Silenciosas:** estaciones operativas que no han sido disparadas, y que se encuentran cerca de las estaciones activas del evento<sup>6</sup>
6. **Malas:** estaciones que por diversas razones no pueden ser usadas para la reconstrucción del evento: la segunda estación de los llamados dobletes<sup>7</sup>, o estaciones muy lejanas, o estaciones mal calibradas o que presenten un mal funcionamiento.

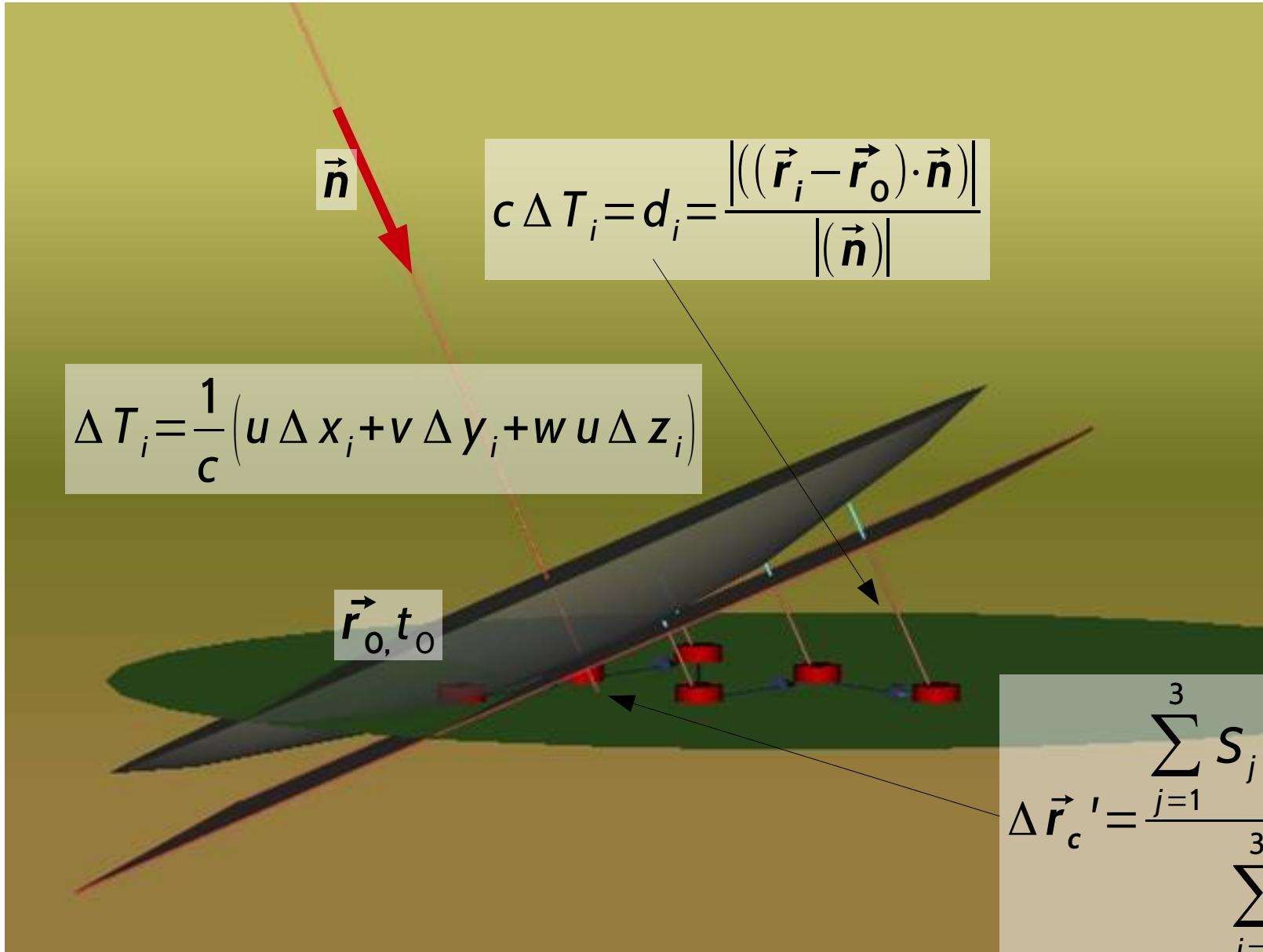
# Tiempos y señales

- Hasta aquí, tenemos incognitas:  $(\theta, \varphi), E_p, Z_p, r_c, R_c, \dots$
- ... y datos:  $S_i, T_i, r_i$ ,
- Podemos referenciar los tiempos al mínimo  $T_i$ , entonces

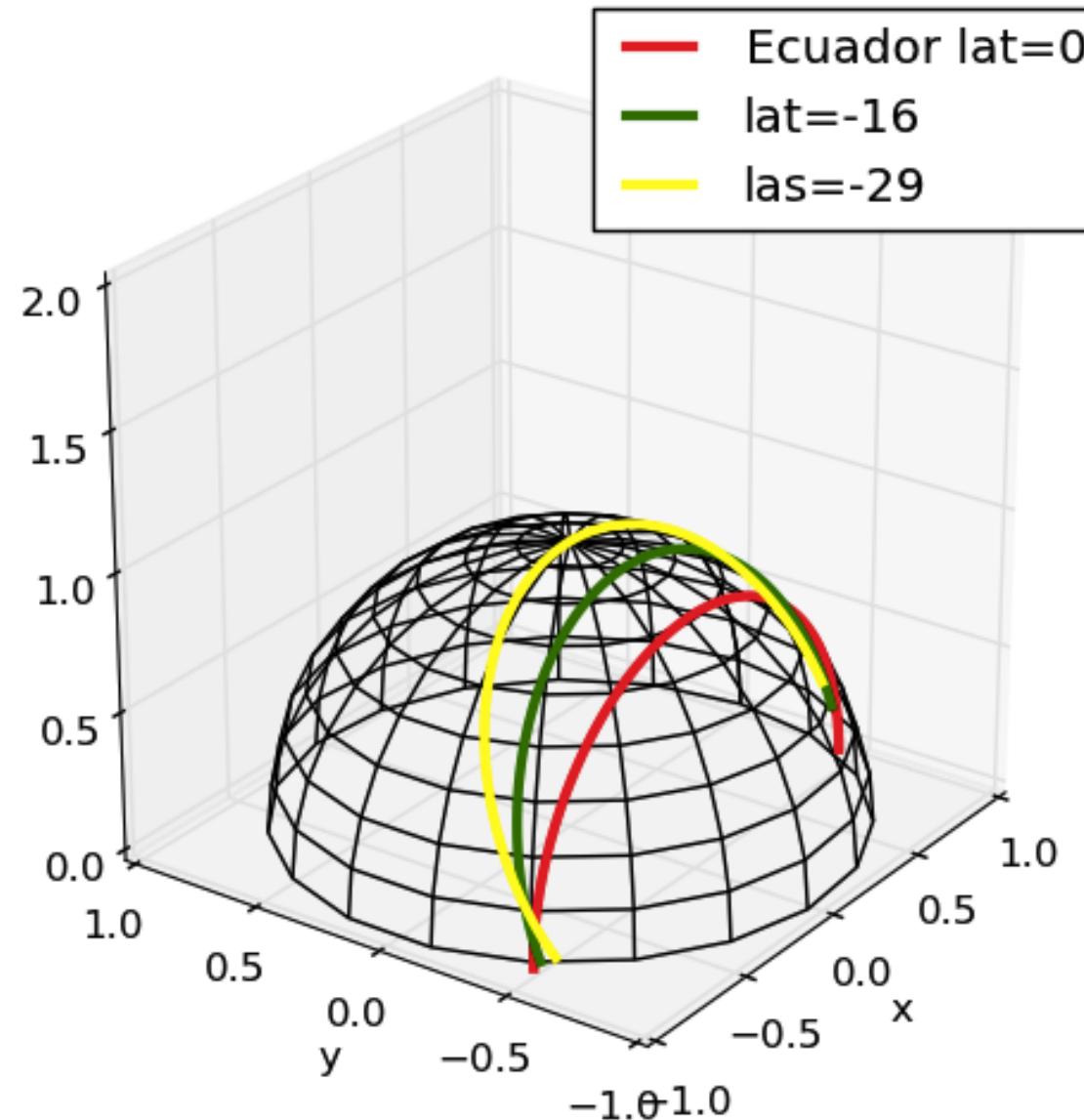


$$\Delta T_i = T_i - T_0, \quad T_0 = \min(T_i) \forall i \text{ en activas}$$

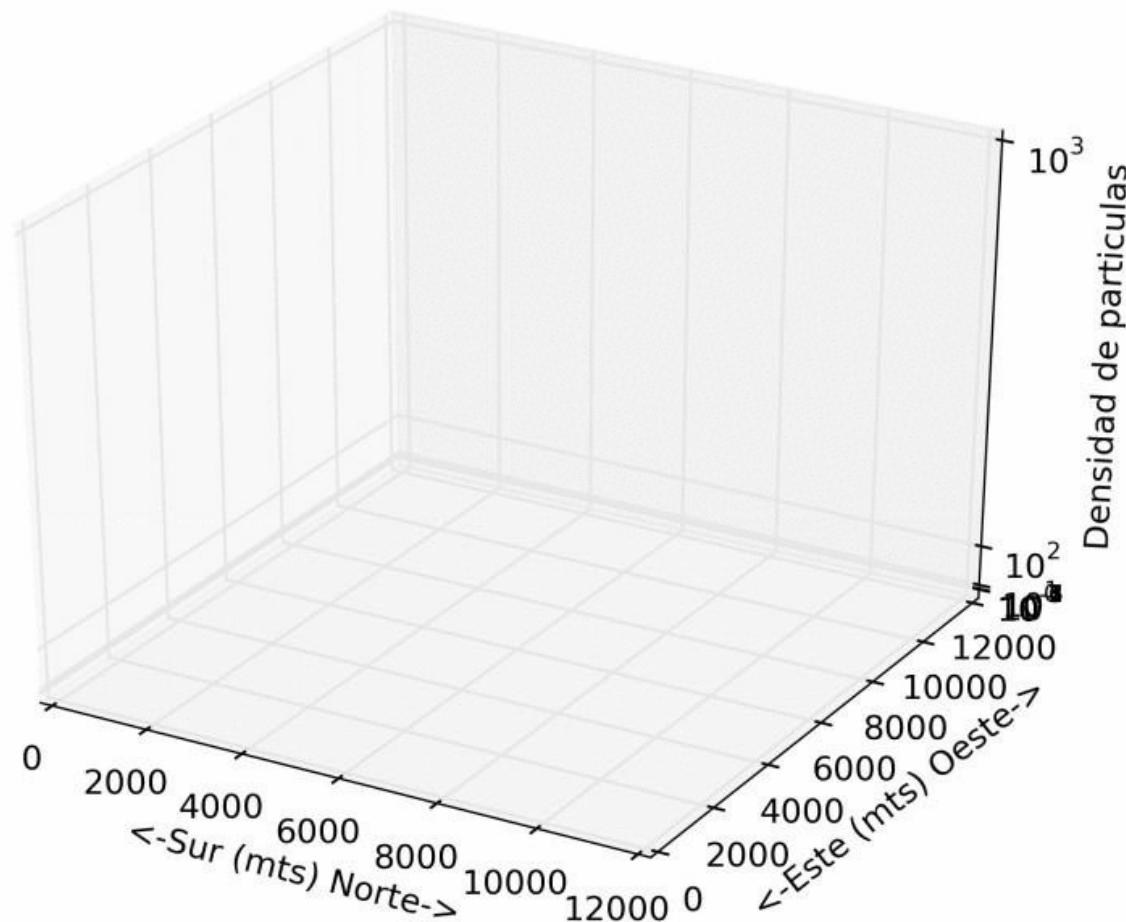
# Reconstrucción plana y reconstrucción curva



# Un ejemplo, Centro Galáctico @ Chacaltaya (BO)



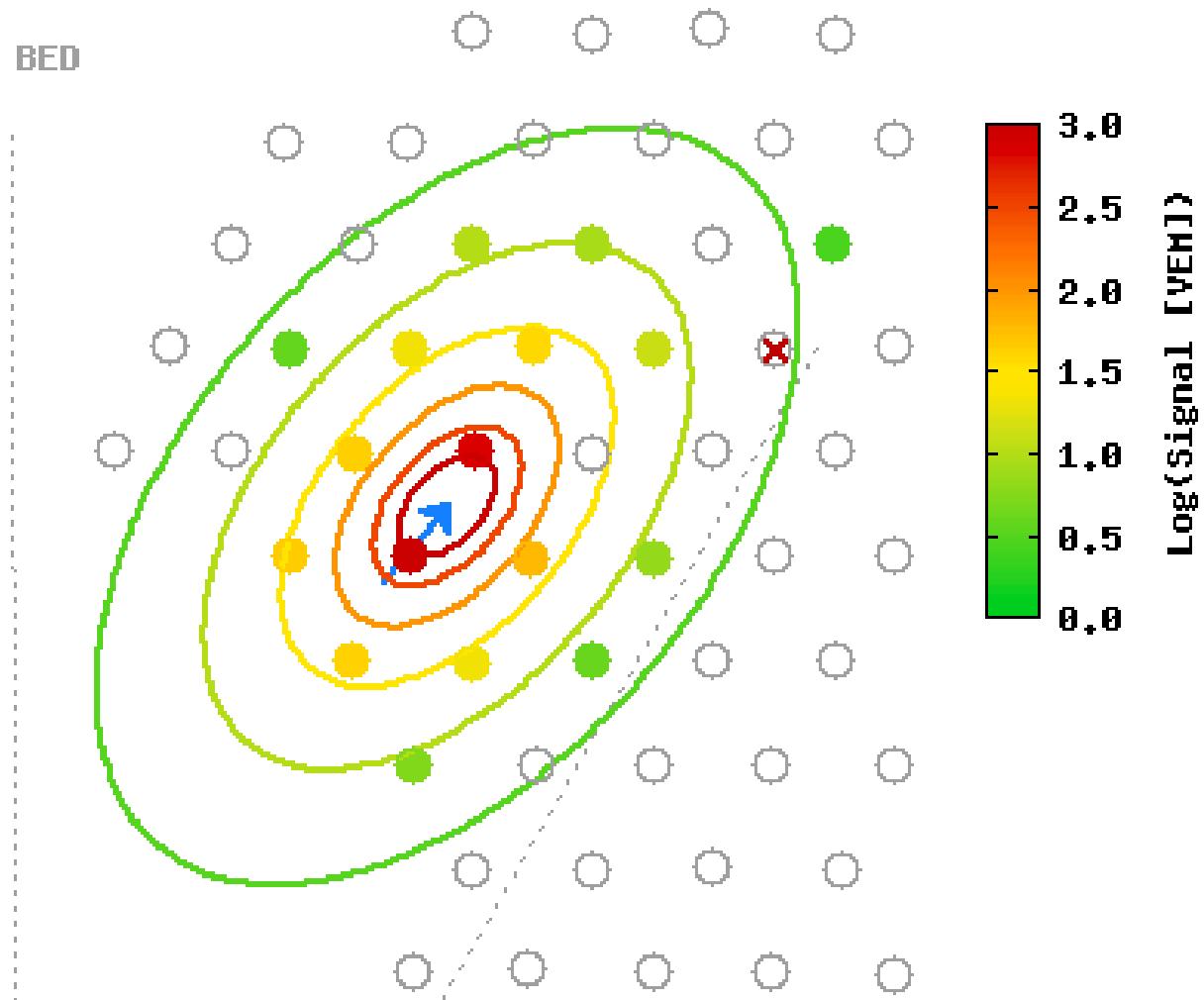
# 5000 lluvias para cada dirección (AN, CSC, HA, en preparación)



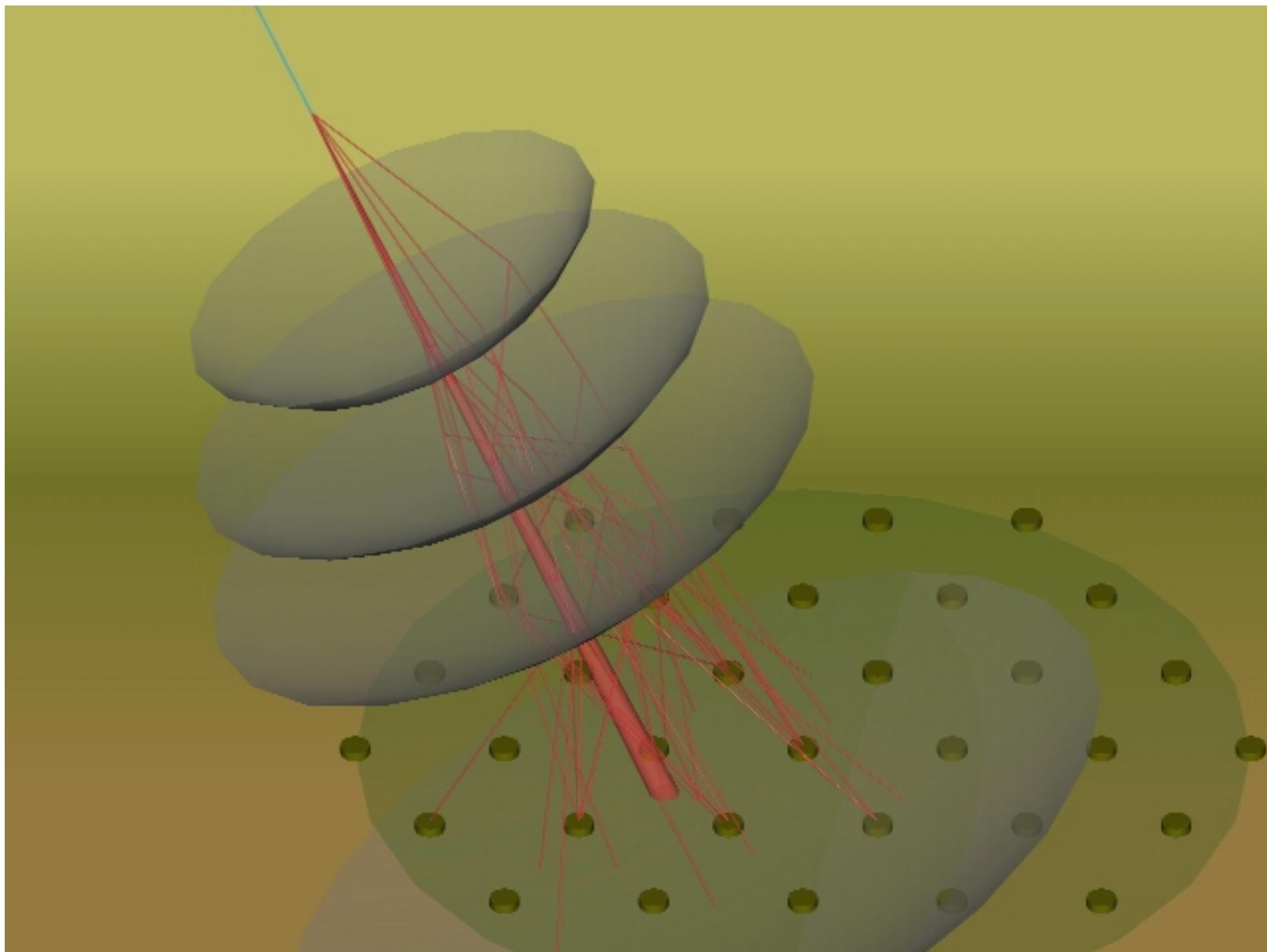
MakeAGIF.com

# Conviene trabajar en el plano de la lluvia

$$r_i^s = \sqrt{(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi)^2 \cos^2 \theta + (-x_i \sin \varphi + y_i \cos \varphi)^2}$$

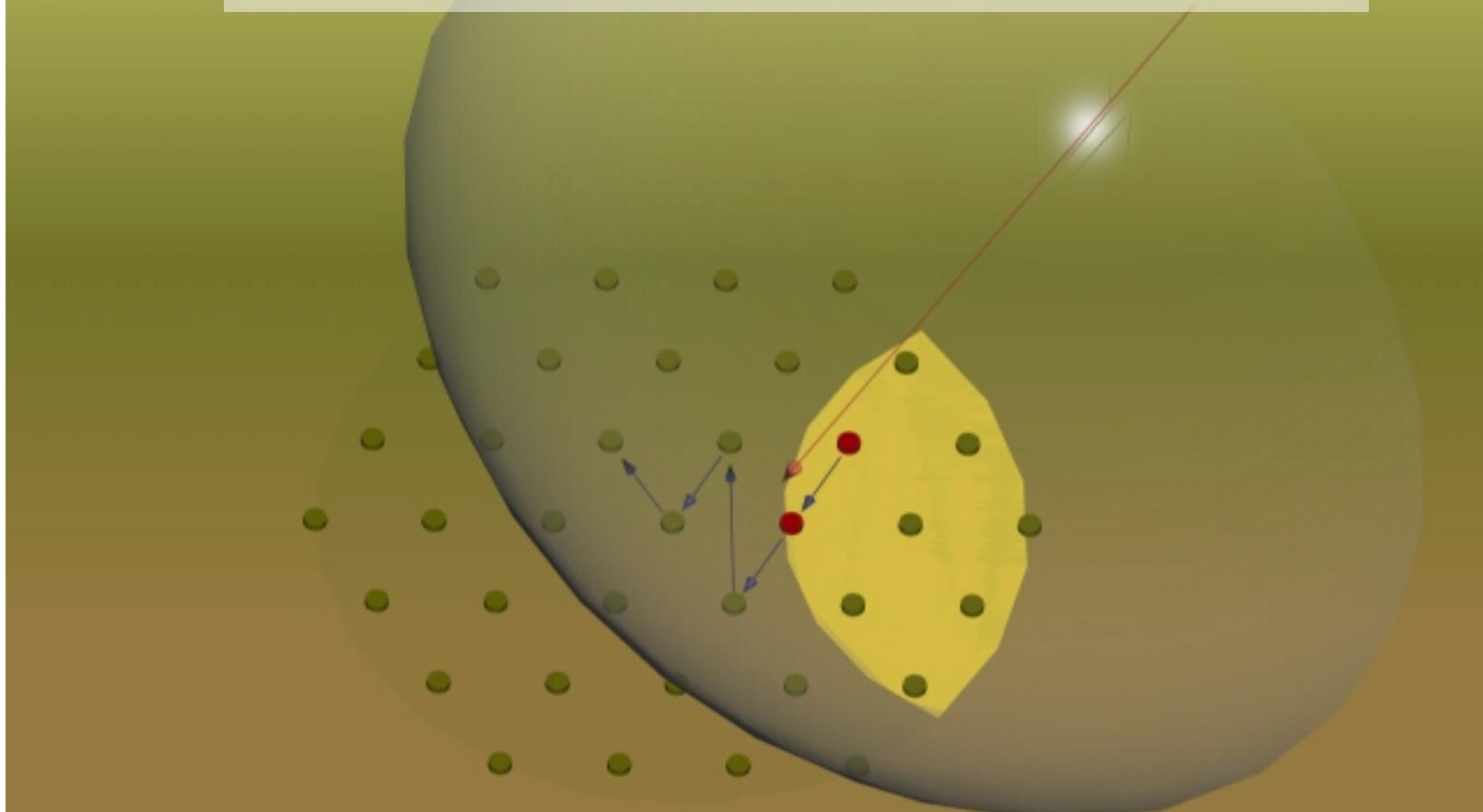


Curvatura

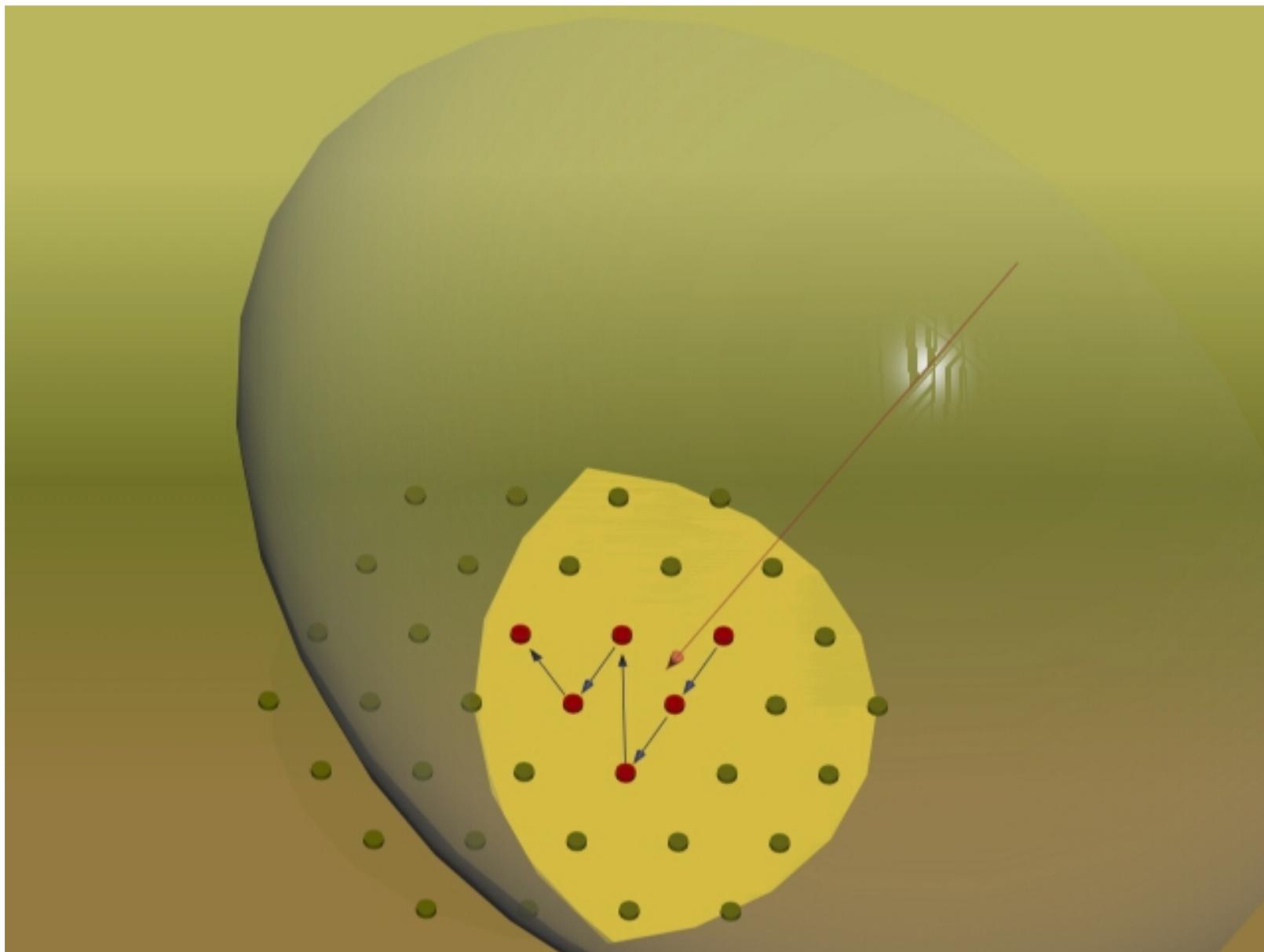


# Curvatura

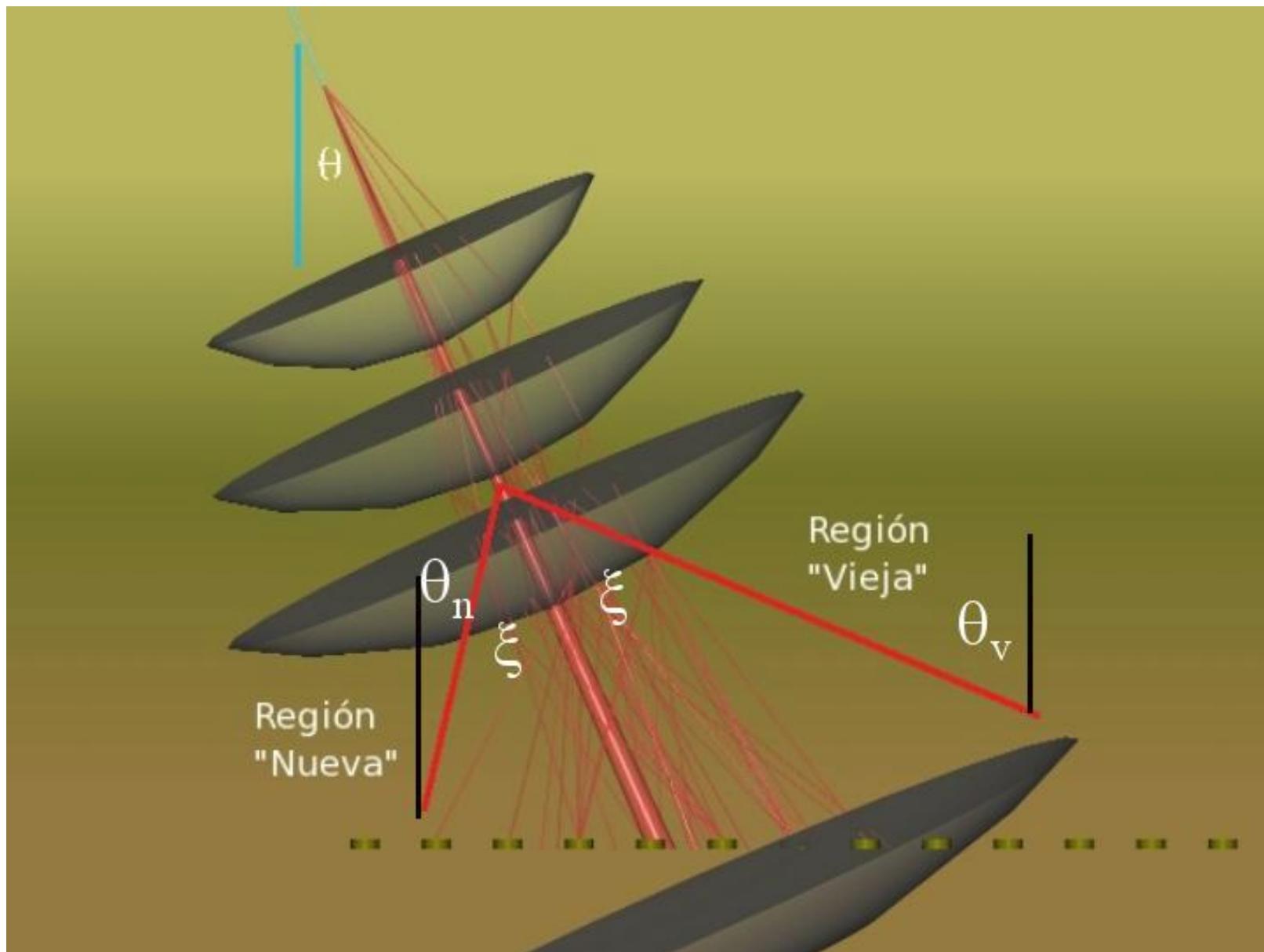
$$\Delta T_i^s = \frac{1}{c} \left( \sqrt{(x_i - Ru)^2 + (y_i - Ru)^2 + (z_i - Ru)^2} \right) - \dots$$
$$\dots - \frac{1}{c} \left( \sqrt{(x_0 - Ru)^2 + (y_0 - Ru)^2 + (z_0 - Ru)^2} \right)$$



Curvatura



# Asimetrías



# Y las señales?

$$\rho(r) \equiv \sum_i \rho_i(r) \xrightarrow{\text{Respuesta del detector}} S_m(r)$$

- La señal esperada será el valor de la LDF a una distancia  $r$  en el frente de la lluvia:

$$S_e(r) \equiv \text{LDF}_{\text{shower}}(r) \rightarrow \text{LDF}_{\text{det}}(r, \theta)$$

Varios tipos:

- **Power law:**  $S_e(r, \theta) = S_e(r_0) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\beta(\theta)}$ ,  $\beta(\theta) = a + b(\sec \theta - 1)$ ,  $a = 4.74$ ,  $b = 1.24$
- **NKG:**

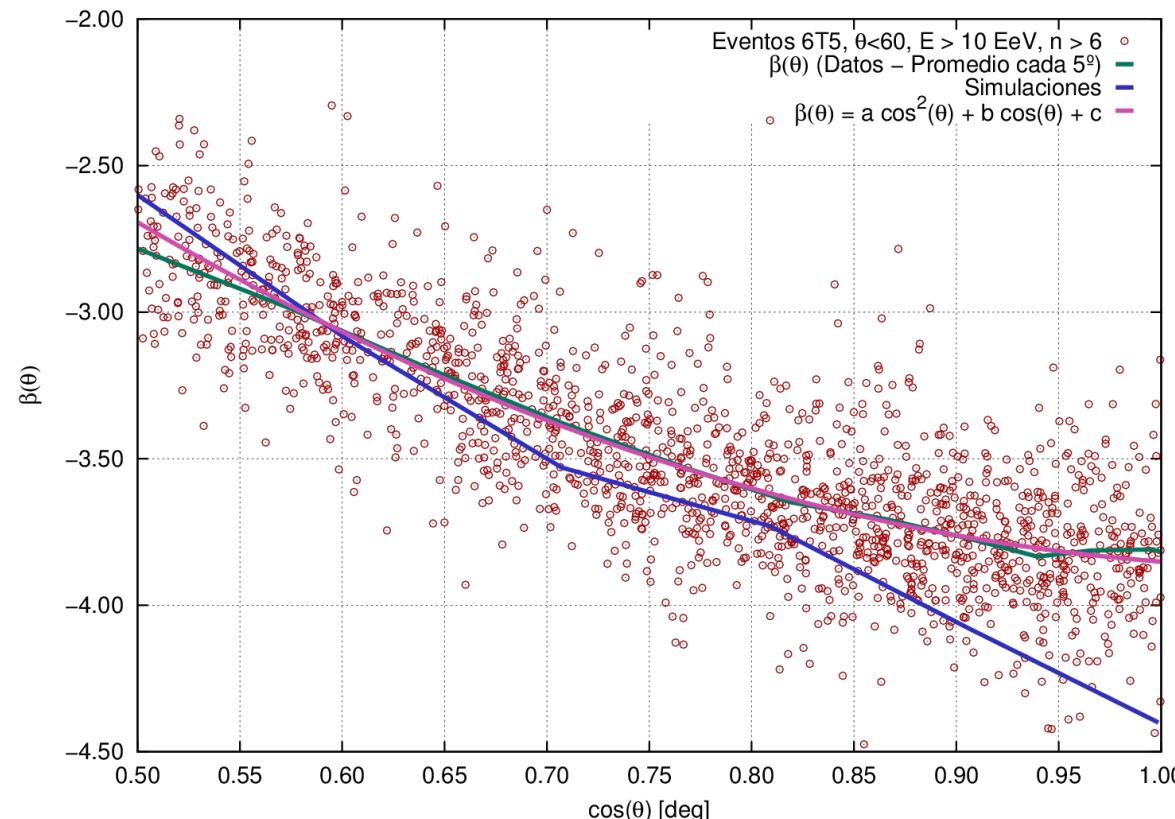
$$S_e(r, \theta) = S_e(r_0) \left(\frac{r}{r_1}\right)^{\beta(S_e(r_0), \theta)} \left(\frac{r+r_2}{r_1+r_2}\right)^{\beta(S_e(r_0), \theta)+\gamma}, \quad r_0 = r_1 = 1000 \text{m}, r_2 = 700 \text{m}; \gamma = 0;$$

$$\beta = [a_0 + a_1 \ln S_e(r_0)] + [b_0 + b_1 \ln S_e(r_0)] \sec(\theta) + [c_0 + c_1 \ln S_e(r_0)] \sec^2(\theta)$$

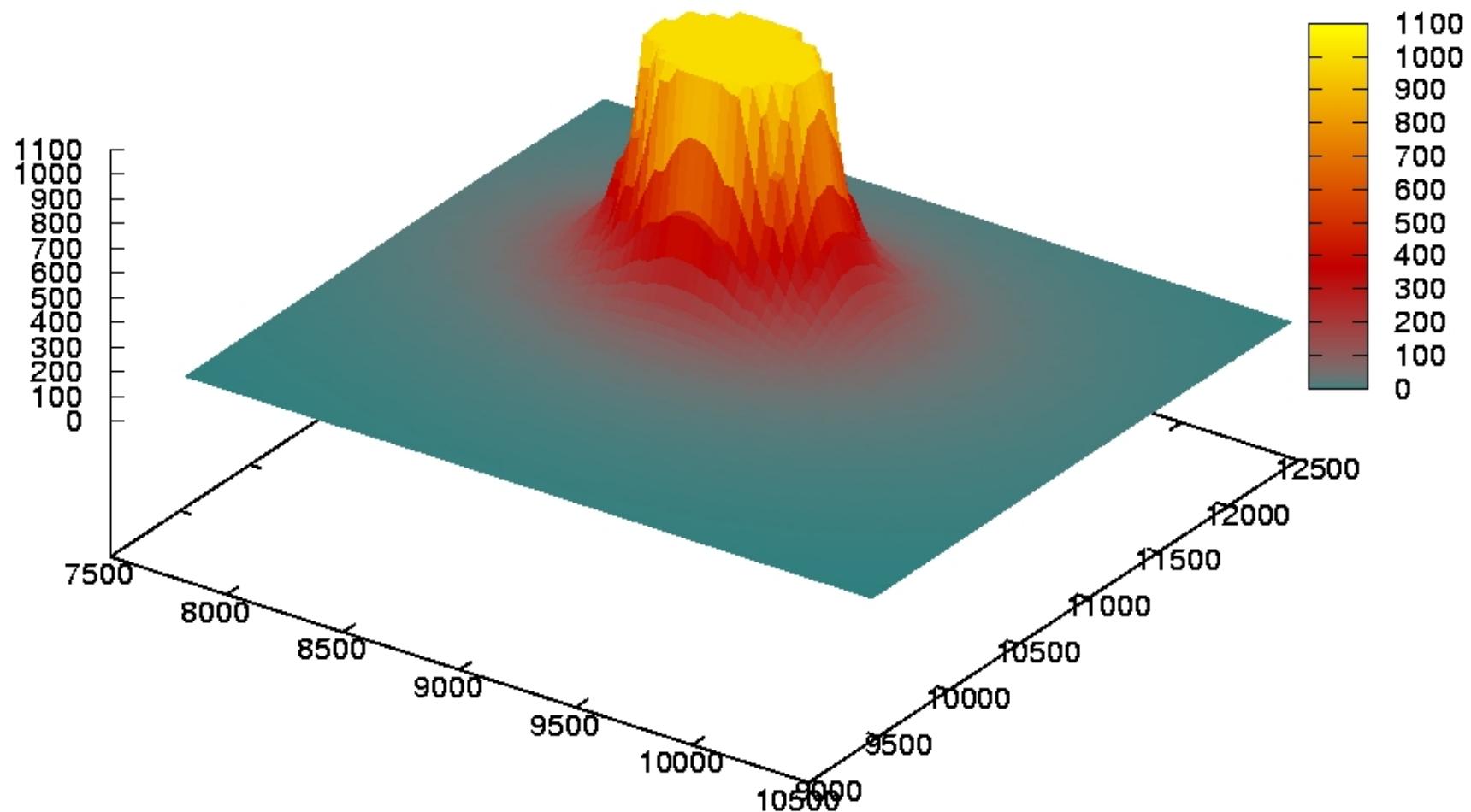
- Log-log parabola

$$S_e(r, \theta) = S_e(r_0) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\beta(\theta) + \gamma(\theta) \ln(r/r_0)}, \quad r_0 = 1000 \text{ m}$$

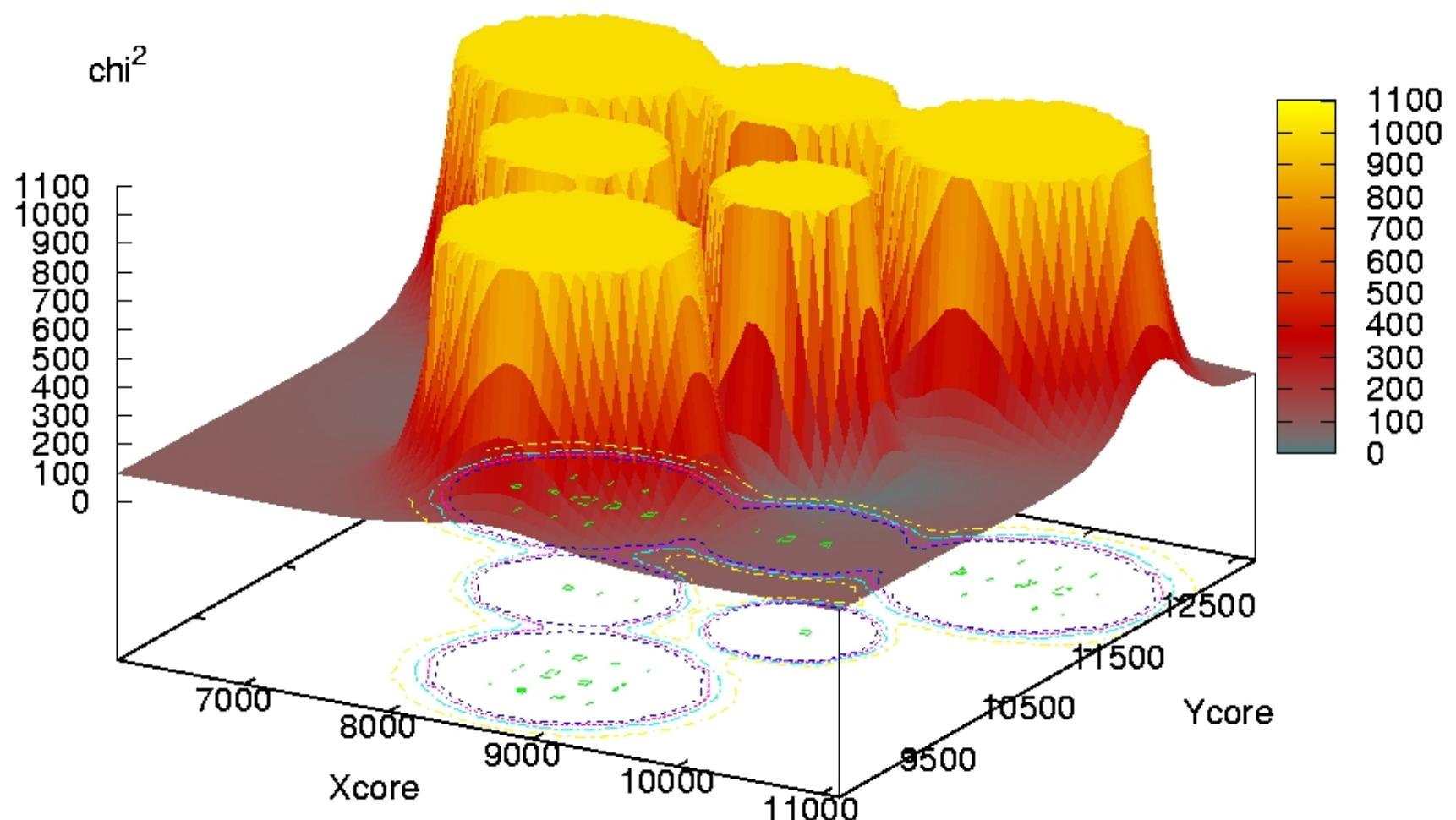
$$\beta(\theta) = 3.5 \cos^2 \theta - 7.6 \cos \theta + 0.2$$



# Señal esperada $S_e(r)$ . log-log parabola



# Minimización paramétrica



$$\chi_S^2 = \sum_{j=1}^{N_{\text{act}}} \frac{(S_j(r) - S_e(r))^2}{\sigma_j^2}, \quad \sigma_j = 1.06 \sqrt{S_j}$$