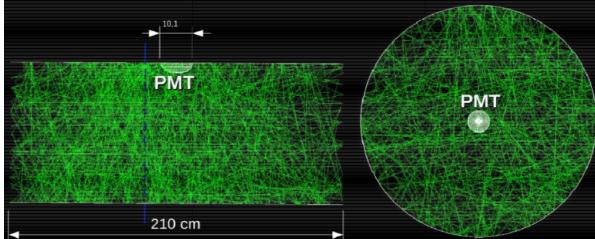


Los WCD de LAGO

Mauricio Suárez Durán
Bucaramanga, Dec. 2025



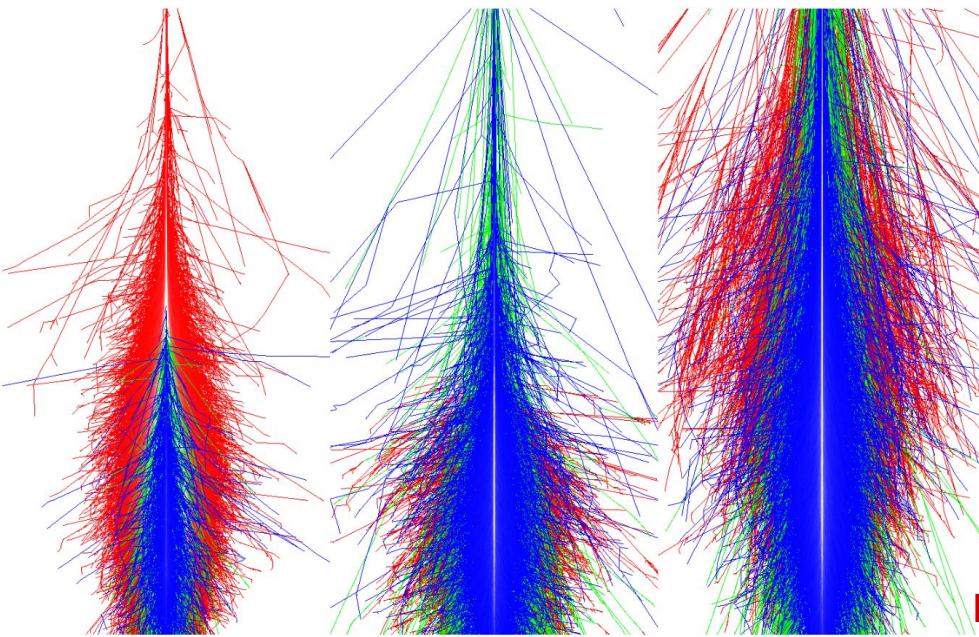
CUC UNIVERSIDAD
DE LA COSTA



Empezando por el principio: El efecto Cherenkov

¿Por qué y cómo el efecto Cherenkov condiciona la señal en los WCD?

¿Por qué y cómo el efecto Cherenkov condiciona la señal en los WCD?



EM (γ, e^\pm): 85%
MU (μ^\pm): 10%
HD ($p, n, \pi^\pm, \pi^0, K^\pm, \dots$): 5%

La radiación Cherenkov es producida por partículas relativistas que se propagan a velocidades mayores a la velocidad de la luz c en un medio (ω).

$$v > \frac{c}{\sqrt{\epsilon(\omega)}}$$

A primer orden el componente de la señal:

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

Fórmula de Frank-Tamm

A primer orden el componente de la señal:

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

Fórmula de Frank-Tamm

$$S \sim S(N_{\gamma\text{Ch}})$$

Dependiendo de cuántos fotones cherenkov produzca una partícula será el “tamaño” de la señal.

¿Cuántos fotones Cherenkov por partícula?

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

¿Cuántos fotones Cherenkov por partícula?

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

No hay dependencia con la naturaleza (tipo) de la partícula

¿Cuántos fotones Cherenkov por partícula?

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

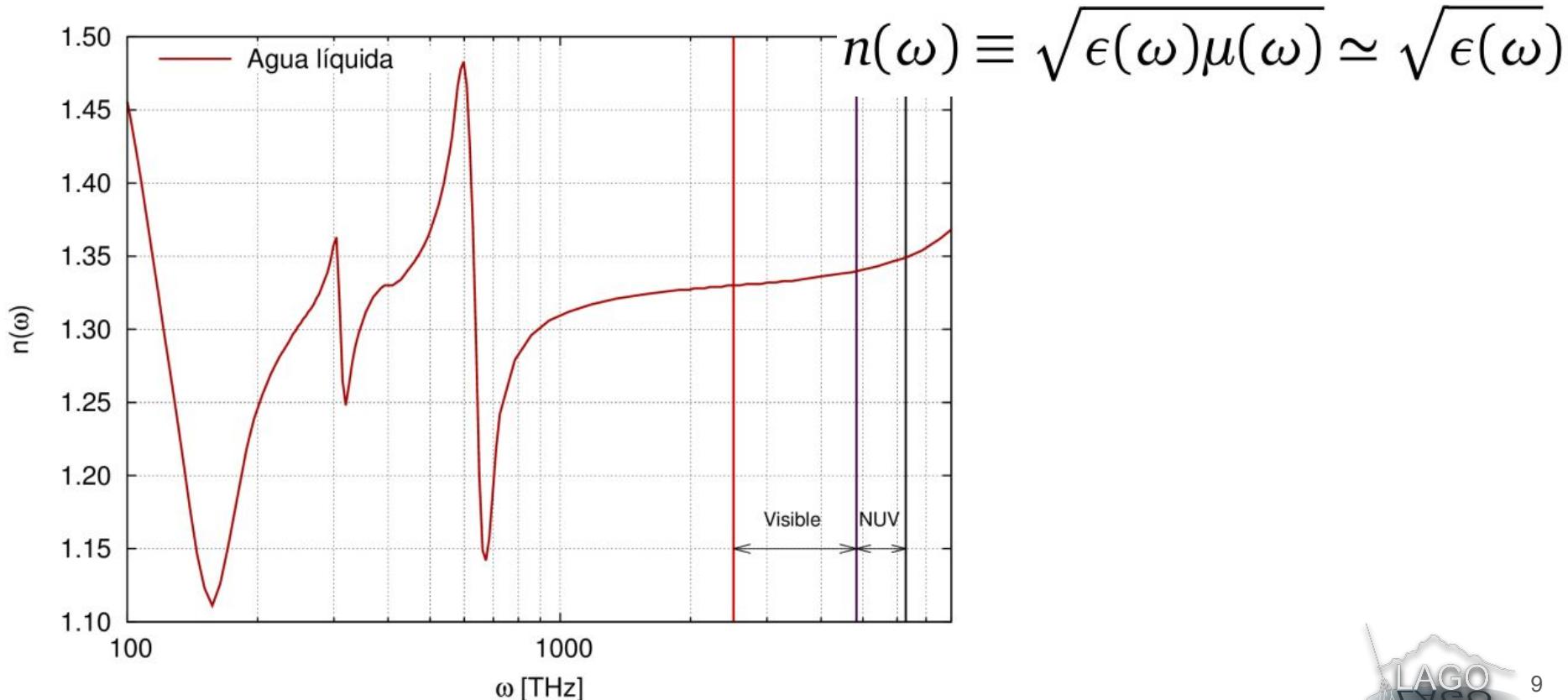
No hay dependencia con la naturaleza (tipo) de la partícula

Pero si con la distancia recorrida.

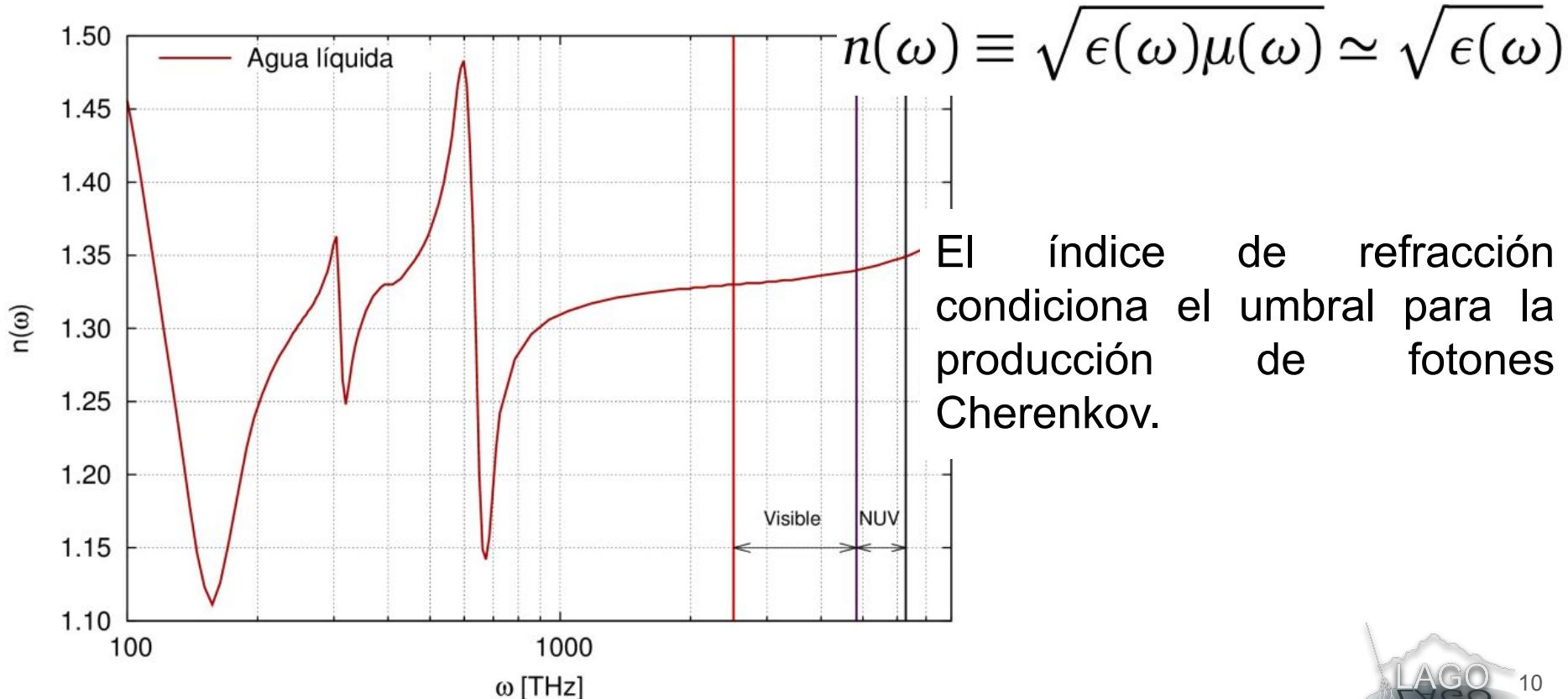
Pero si con el índice con la longitud de onda de emisión

Pero si con el índice de refracción del medio.

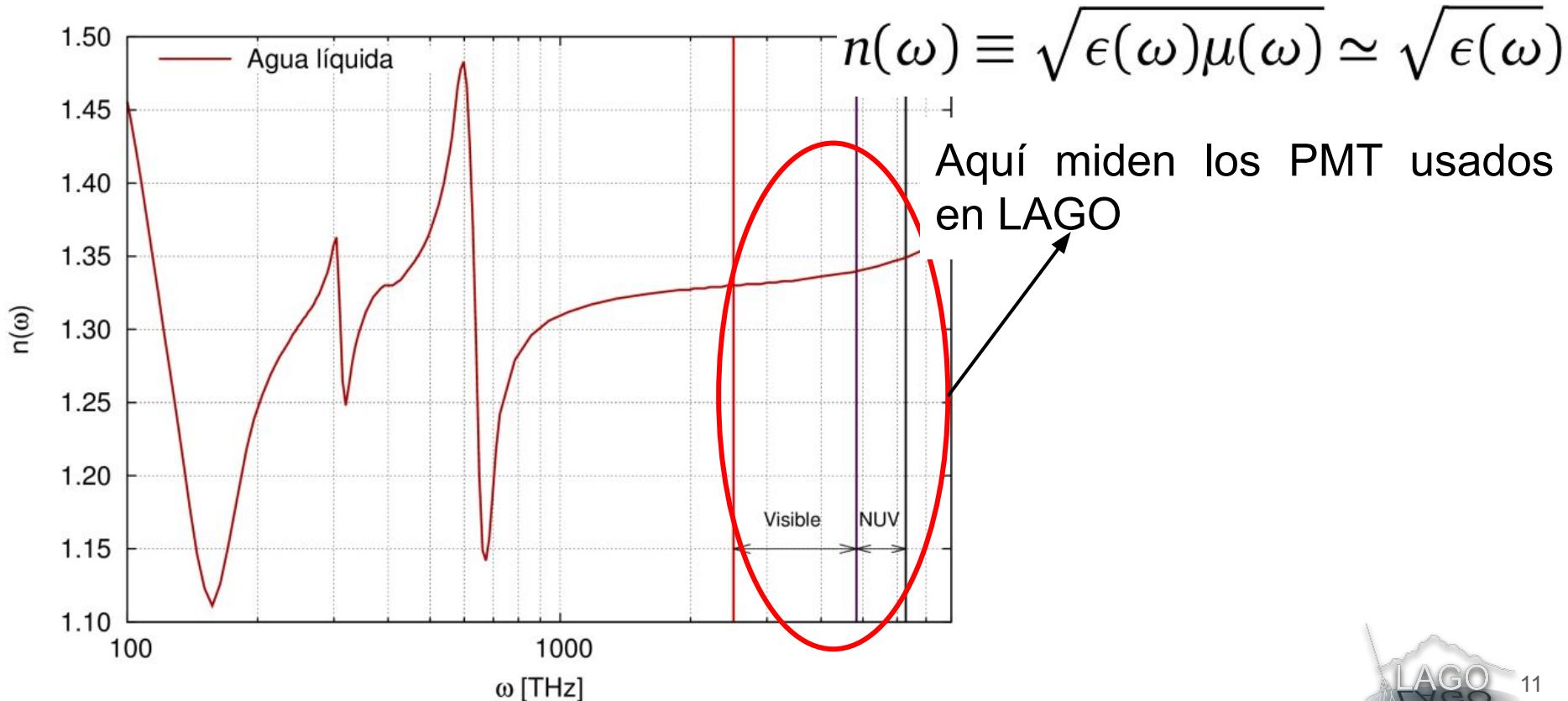
Dependencia con el índice de refracción



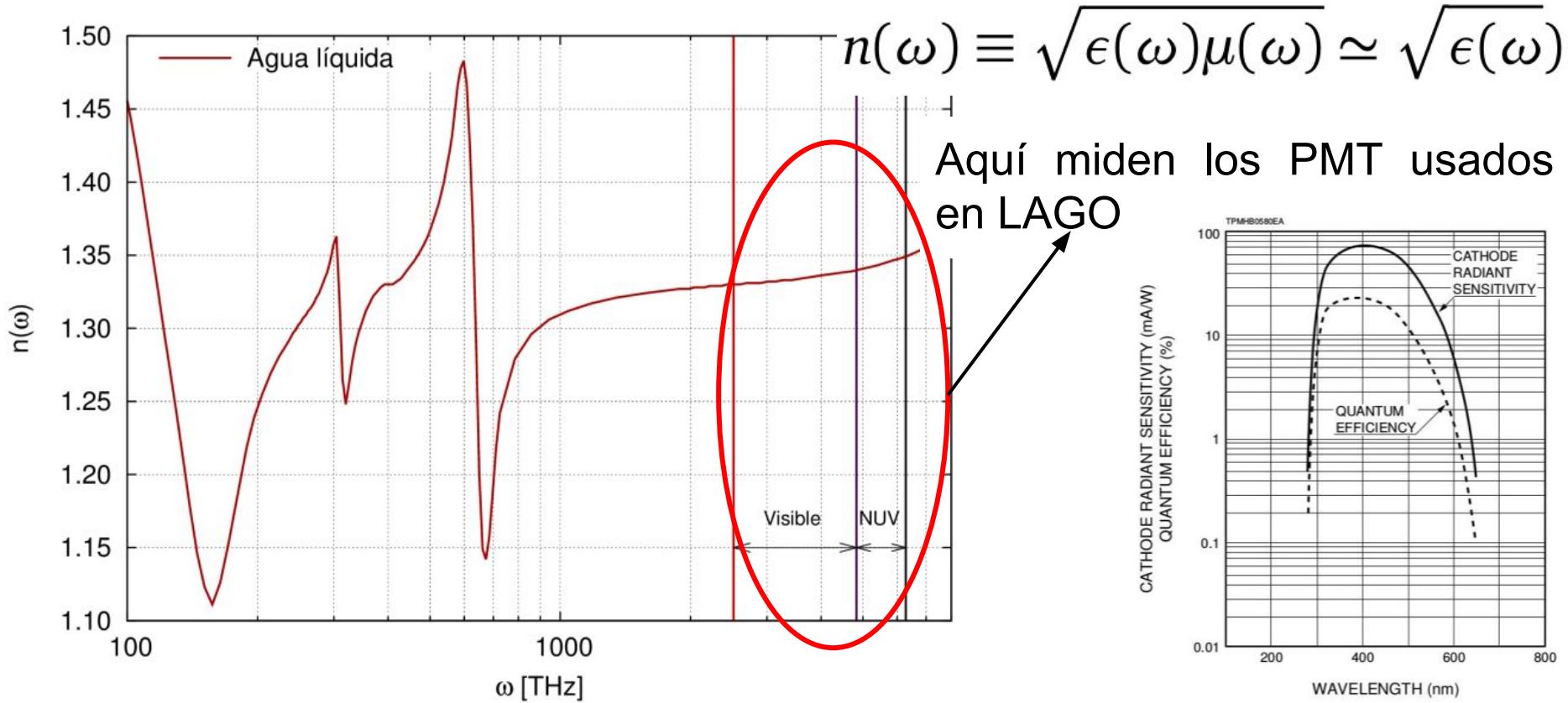
Dependencia con el índice de refracción



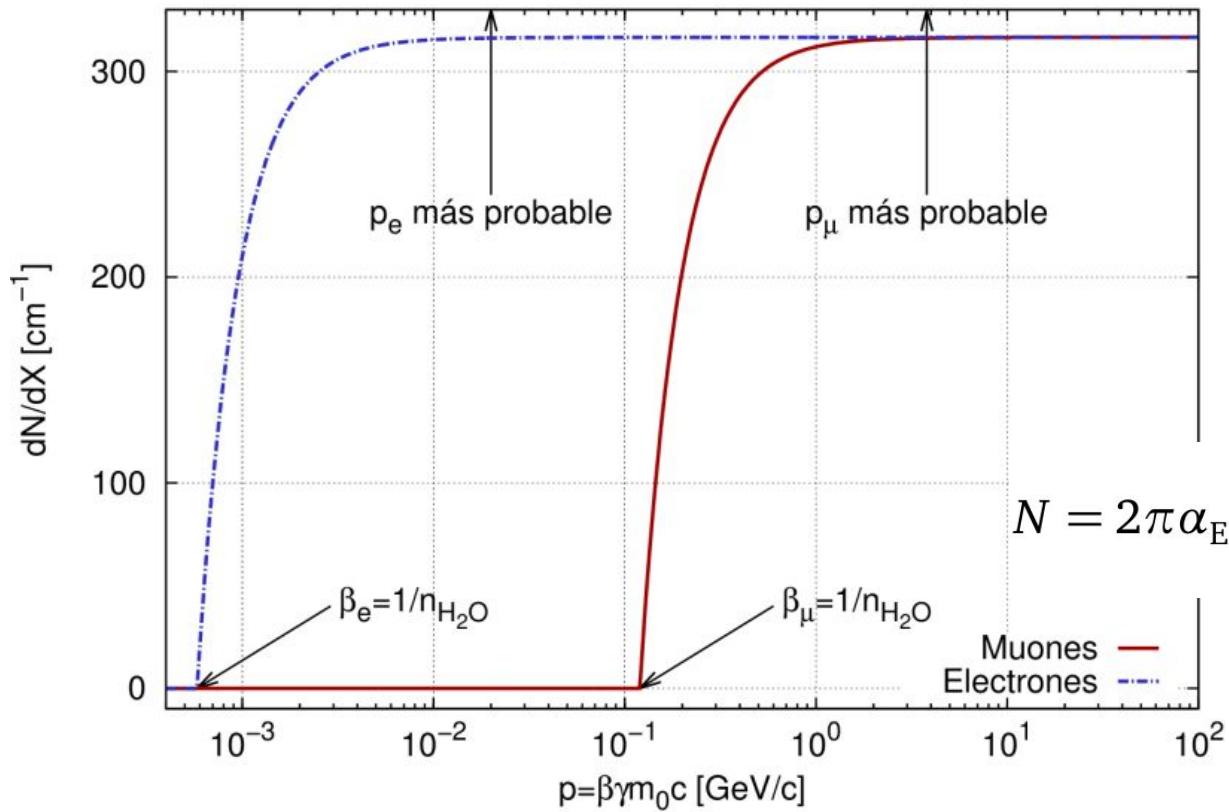
Dependencia con el índice de refracción



Dependencia con el índice de refracción

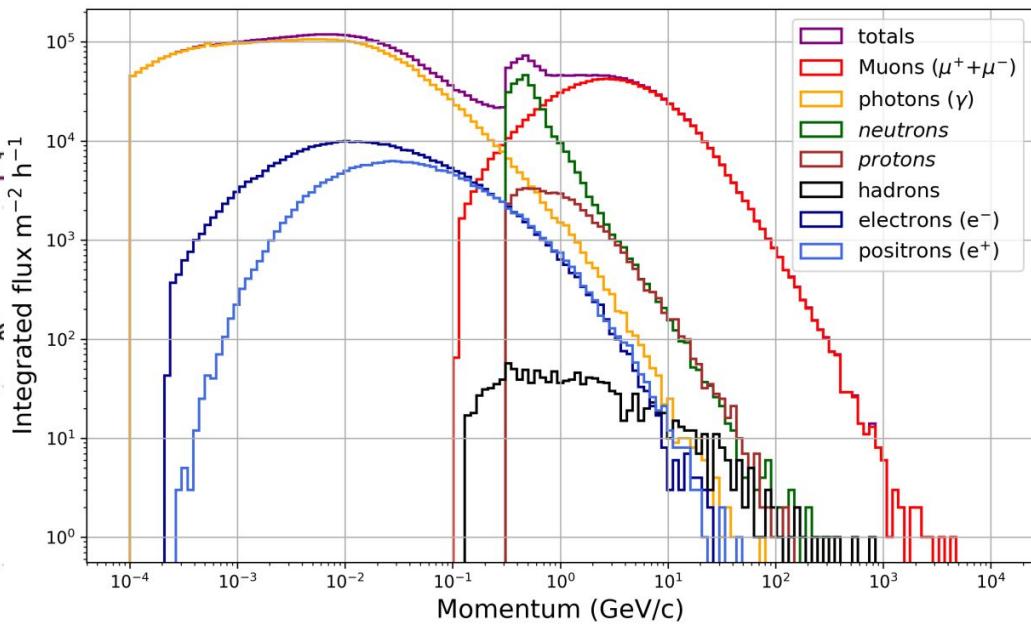
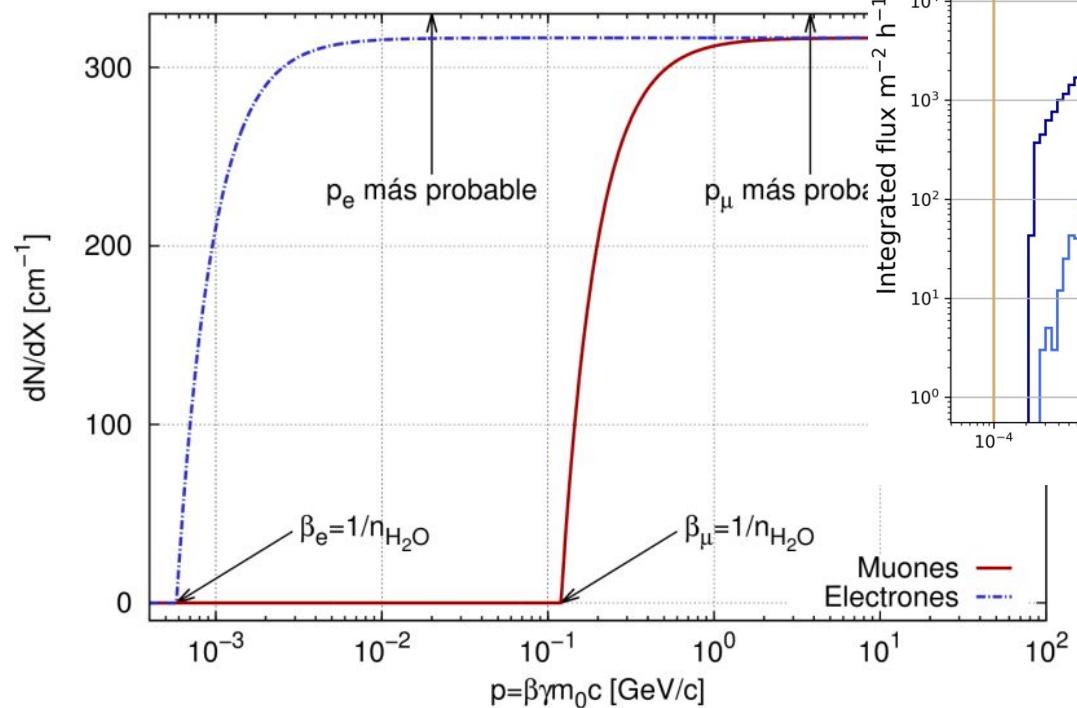


Dependencia con el momentum de la partícula



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

Dependencia con el momentum de la partícula



¿Cómo es la dependencia de las señal con el Efecto Cherenkov

La producción de fotones Cherenkov está condicionada a:

- El índice de refracción del agua.
- La distancia propagada al interior del detector.
- La energía cinética de las partículas incidentes.

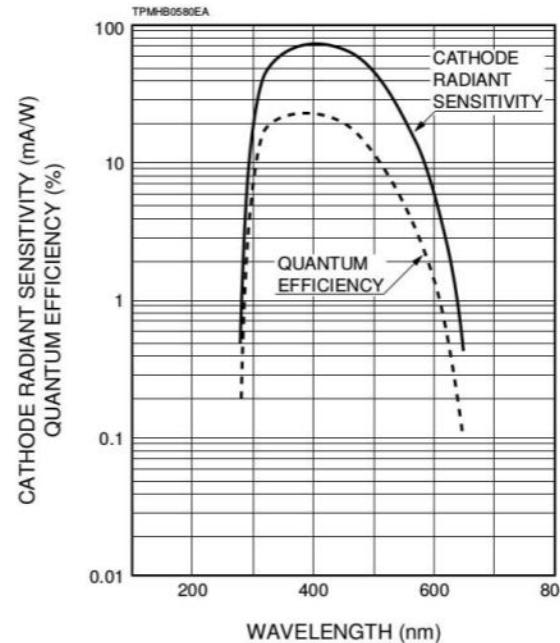
Ejemplo:

Sean un electrón y un muón con **igual momento** $p = 1 \text{ GeV}/c$. Si ambos atraviesan una **misma distancia** de 2 cm dentro de un volumen de agua, las dos partículas producirán el mismo número de fotones Cherenkov, ergo, la **misma señal**.

Ejercicio:

¿Cuántos fotones Cherenkov, entre 280 nm y 650 nm, produce una partícula relativista ($\beta \sim 1$) que cruza un metro de agua ($n=1.345$)?

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



Ejercicio:

¿Cuántos fotones Cherenkov, entre 280 nm y 650 nm, produce una partícula relativista ($\beta \sim 1$) que cruza un metro de agua ($n=1.33$)?

- Hacer una gráfica de N vs distancia recorrida; n constante.
- Hacer una gráfica de N vs n (1.34 a 1.35); distancia recorrida constante.
- ¿Tendría sentido hacer una gráfica de N vs n para otros índices de refracción, por ejemplo de 1.30 a 1.34?

Volviendo a las componentes de la señal:

Asumiendo que:

- lambda_1 y lambda_2 están fijos (sensibilidad del PMT)
- Un índice de refracción constante, visible-UV

Entonces

$$S \sim S(N_{\gamma\text{Ch}}) \sim S(N_{\gamma\text{Ch}}(l))$$

Geometría del detector

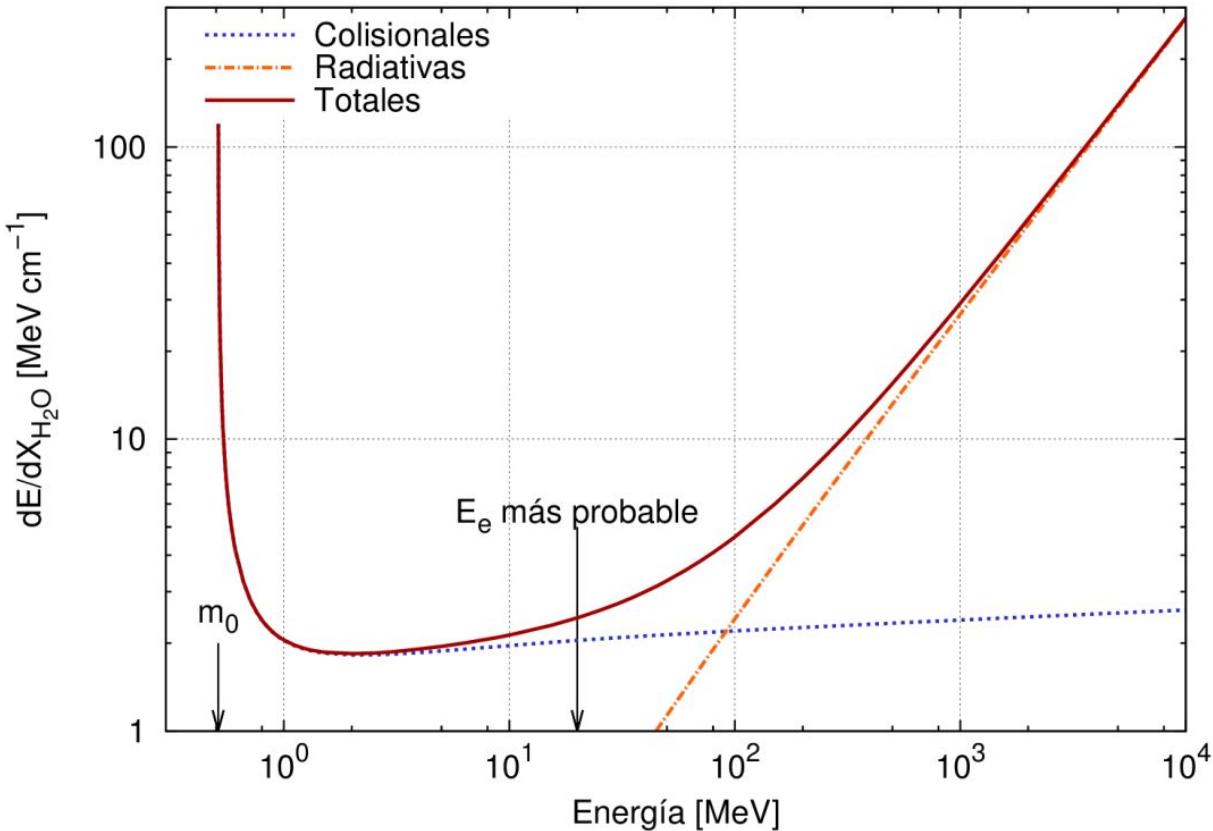
Pero... ¿y el poder de frenado?

Pero... ¿y el poder de frenado?

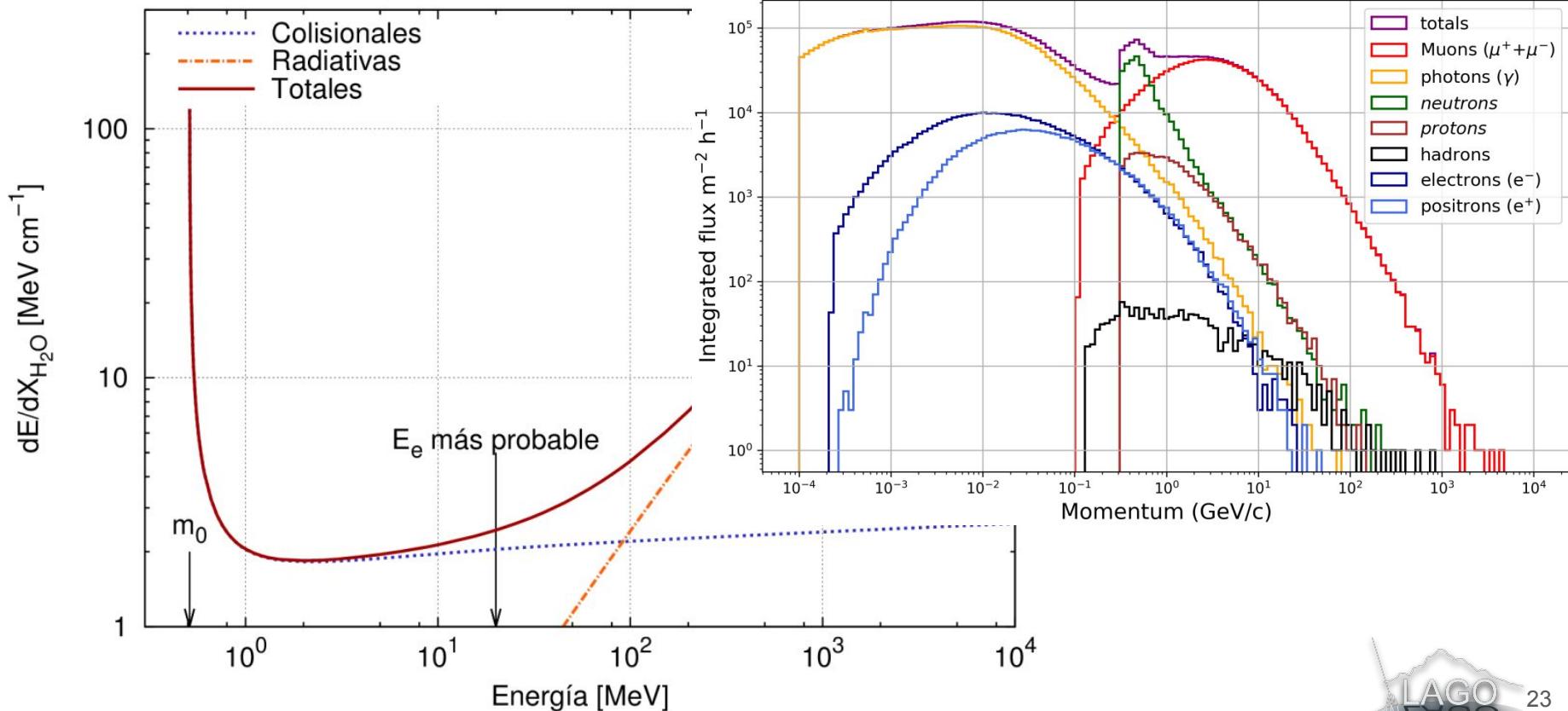
Es la pérdida de energía $-dE/dx$ de una partícula cargada al recorrer una unidad de longitud dx en un medio.

En otras palabras, aquí sí importa la naturaleza de la partícula.

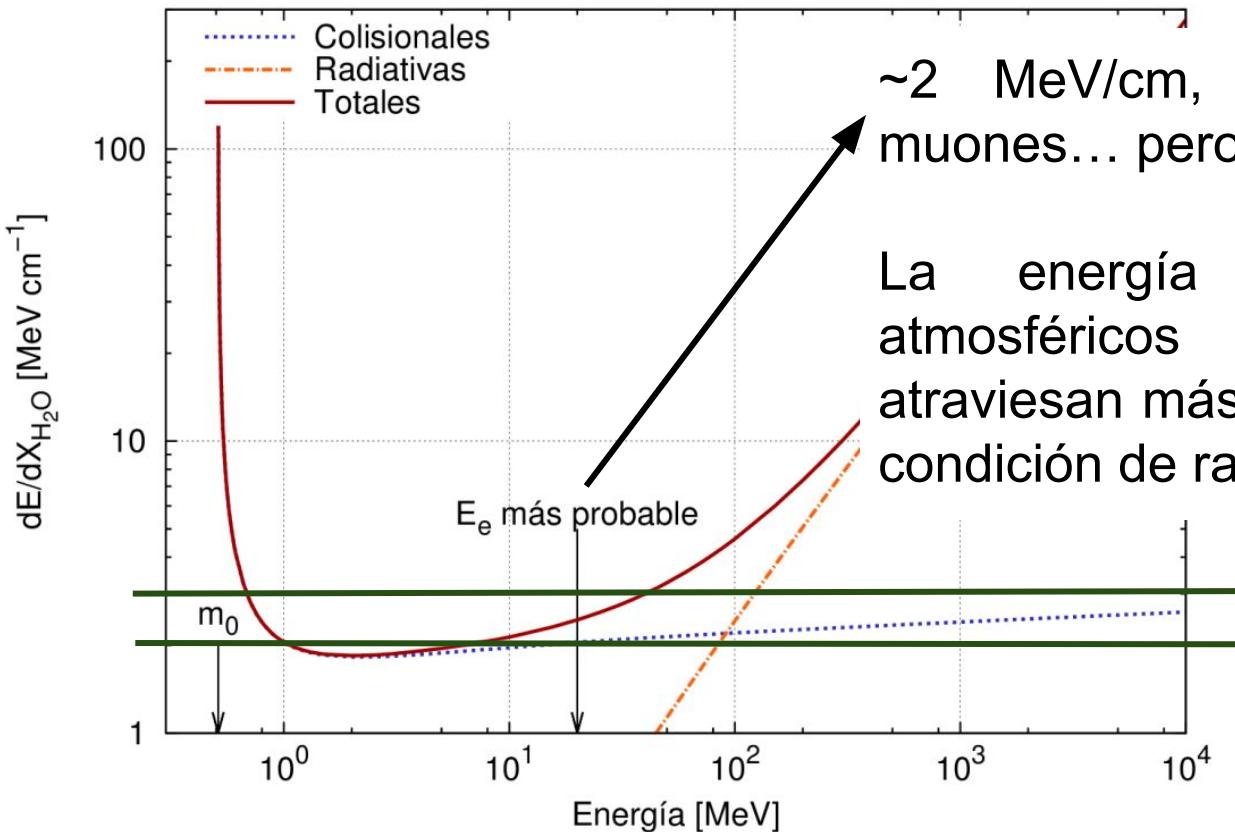
Poder de frenado para electrones



Poder de frenado para electrones



Poder de frenado para electrones



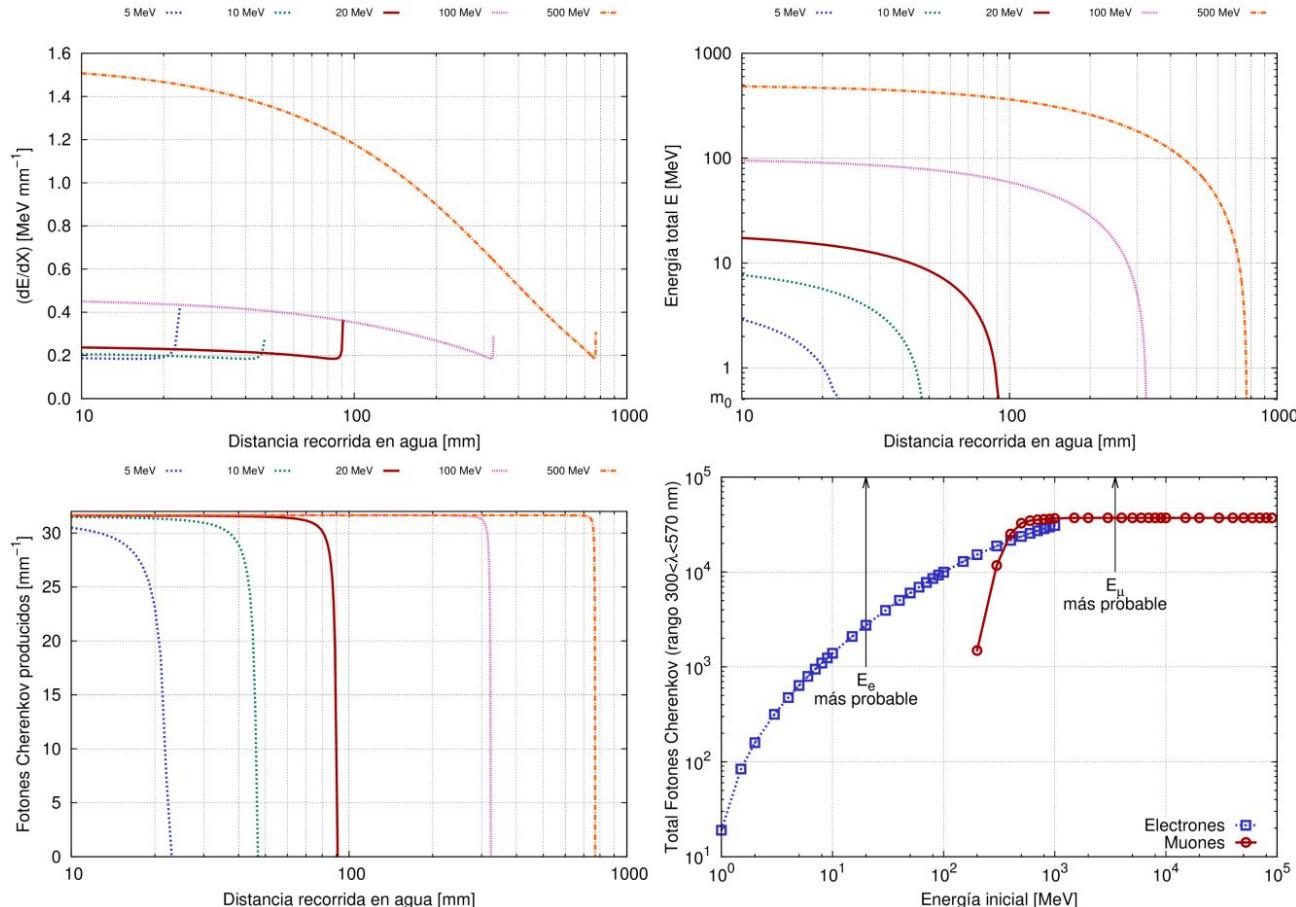
~2 MeV/cm, lo mismo que para muones... pero....

La energía típica de muones atmosféricos es de GeV, luego atraviesan más de 1 m manteniendo la condición de radiación Cherenkov.

Señal y poder de frenado

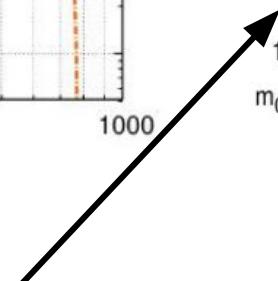
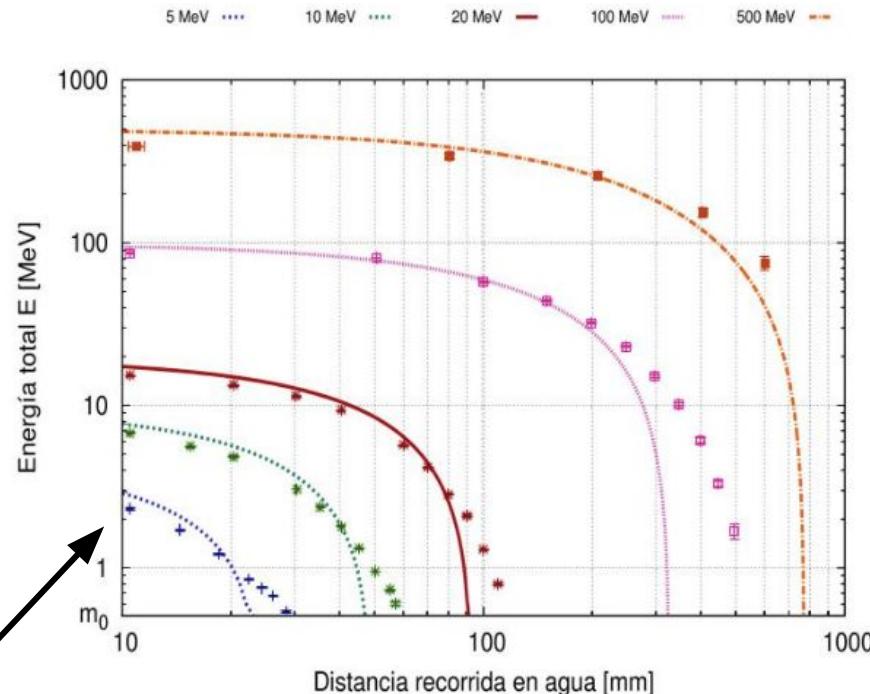
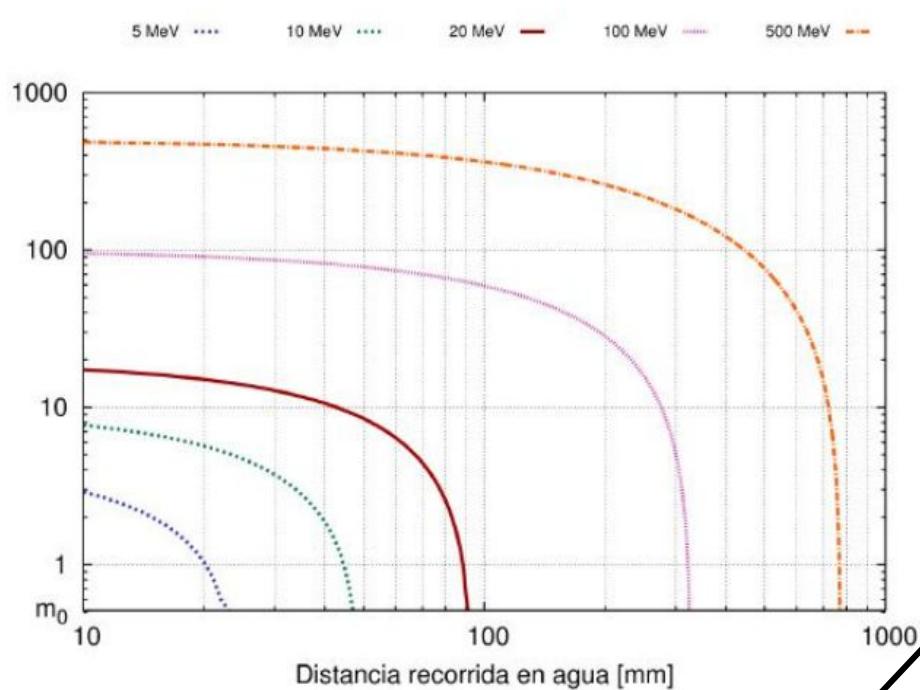
El WCD sólo registra la emisión de luz Cherenkov en el detector, no la energía depositada. Sin embargo, algunos muones pueden perder toda su energía en el instrumento, termalizarse, y decaer (**espectro de Michel**).

Producción Cherenkov para e^-



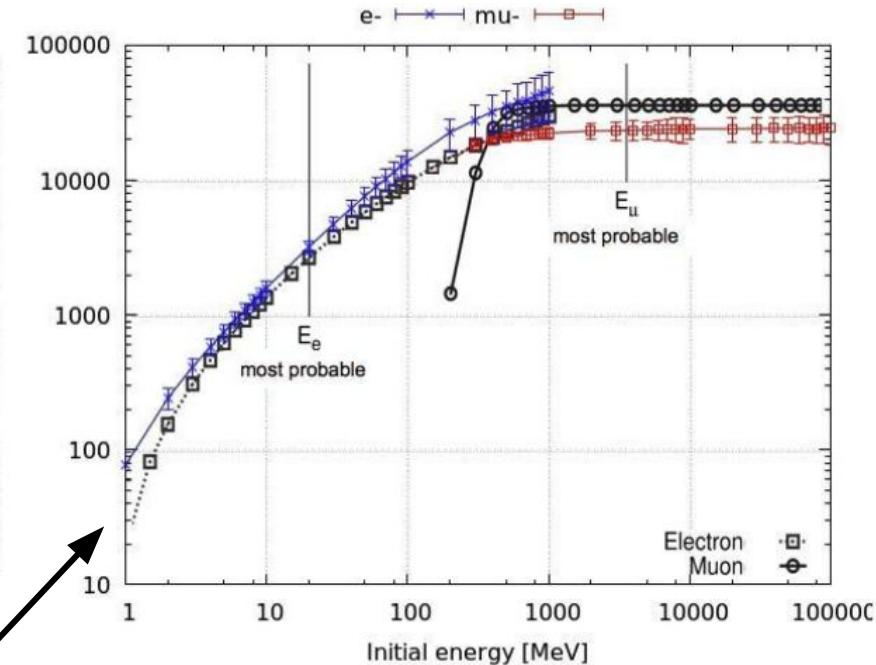
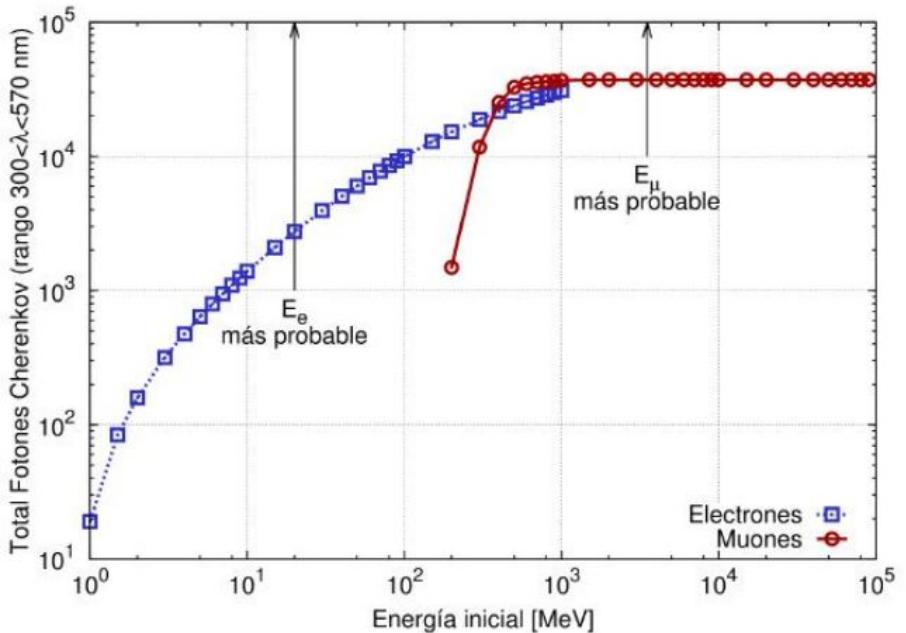
Producción Cherenkov para e^-

Energía total E [MeV]



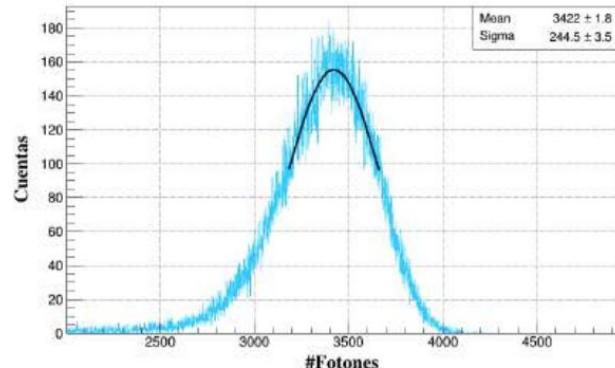
Tesis de Andrei Motta

Producción Cherenkov para e⁻

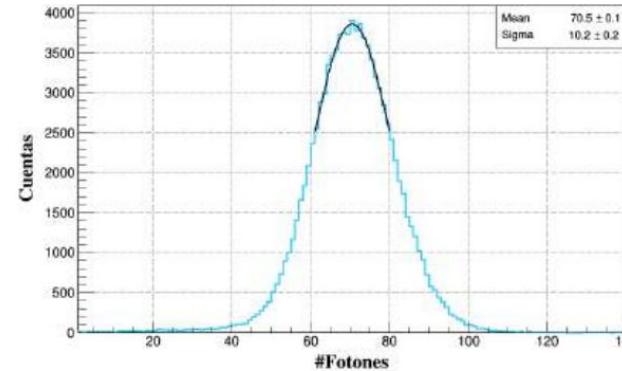


Tesis de Andrei Motta

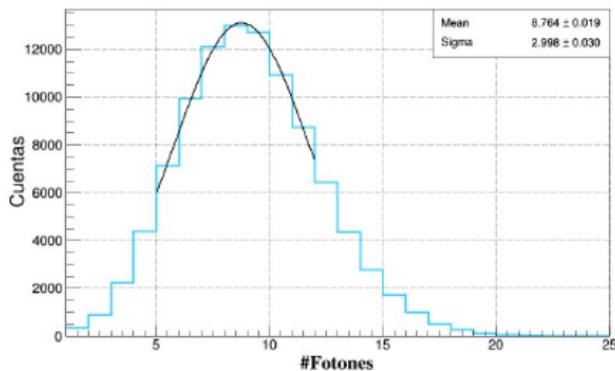
Producción Cherenkov para e⁻



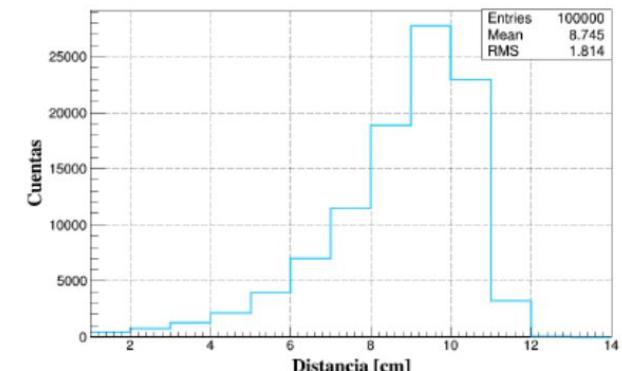
a)



b)



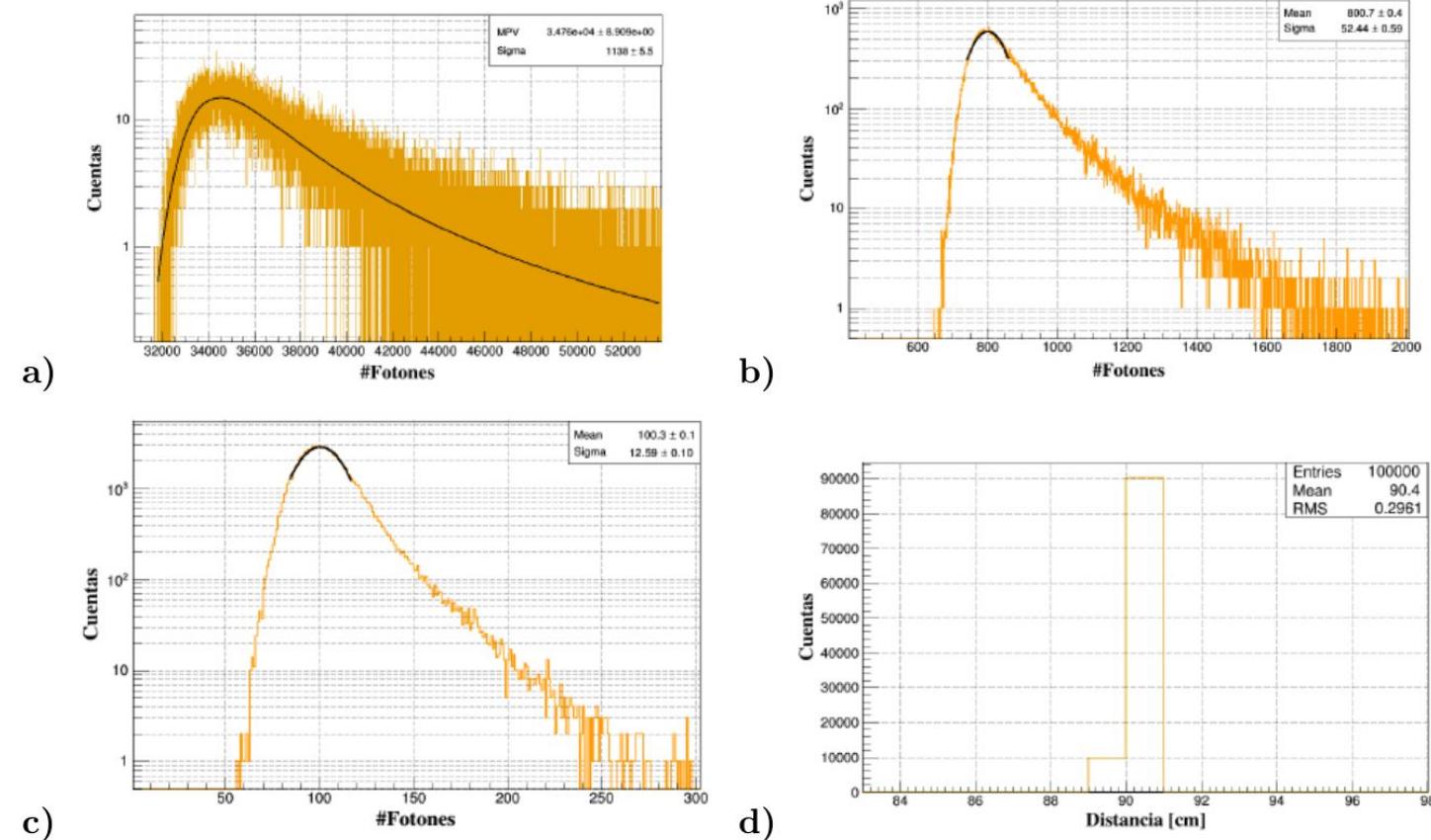
c)



d)

Tesis de Andrei Motta

Producción Cherenkov para e⁻

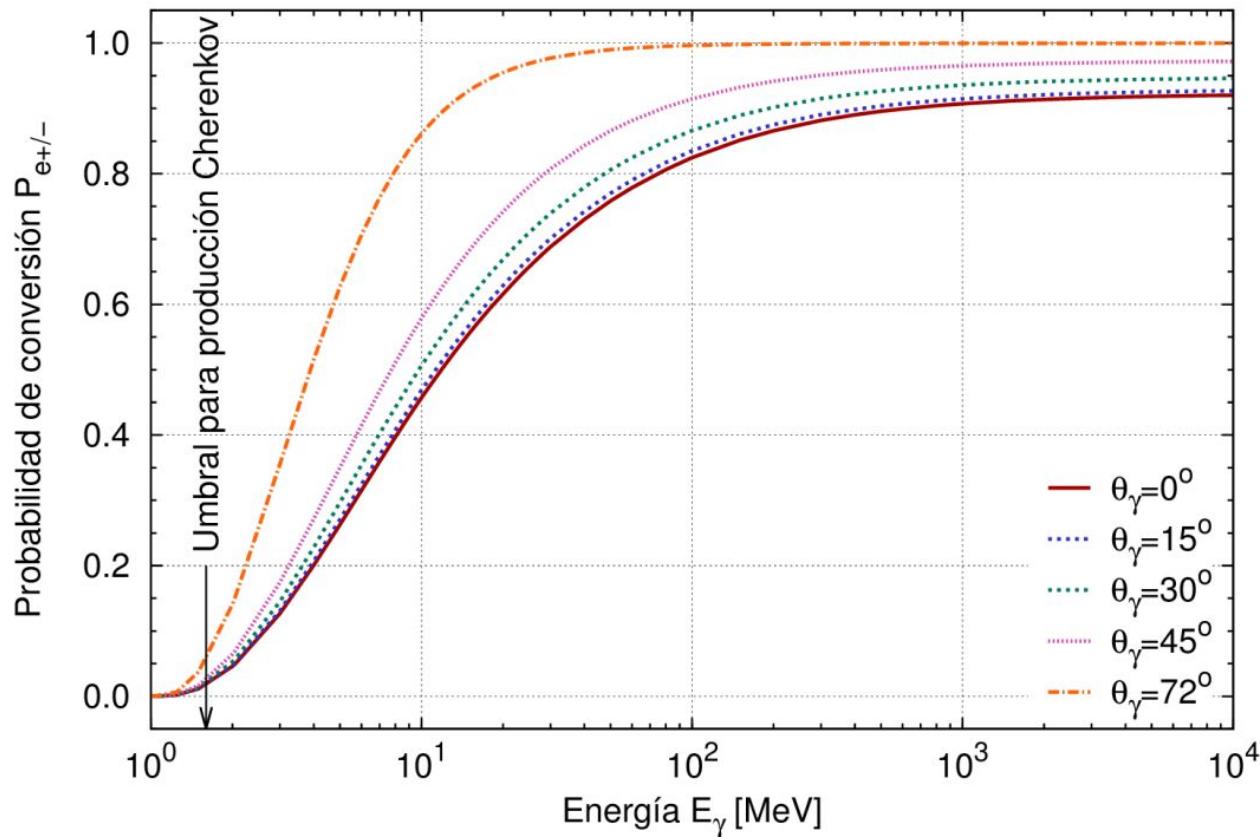


Tesis de Andrei Motta

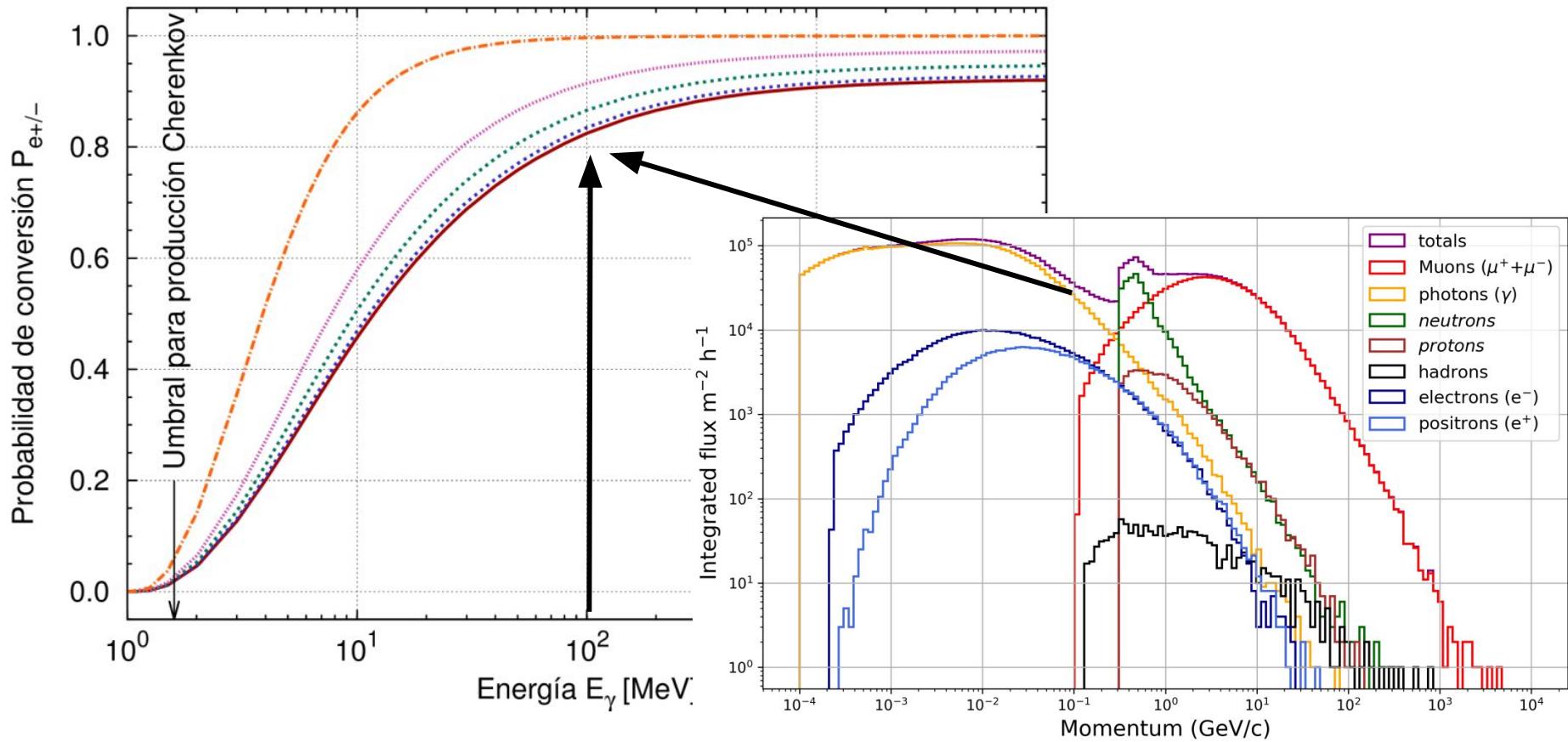
Detección de fotones

La producción de pares al interior del WCD puede dar origen a electrones y positrones con momentum suficiente para producir fotones Cherenkov.

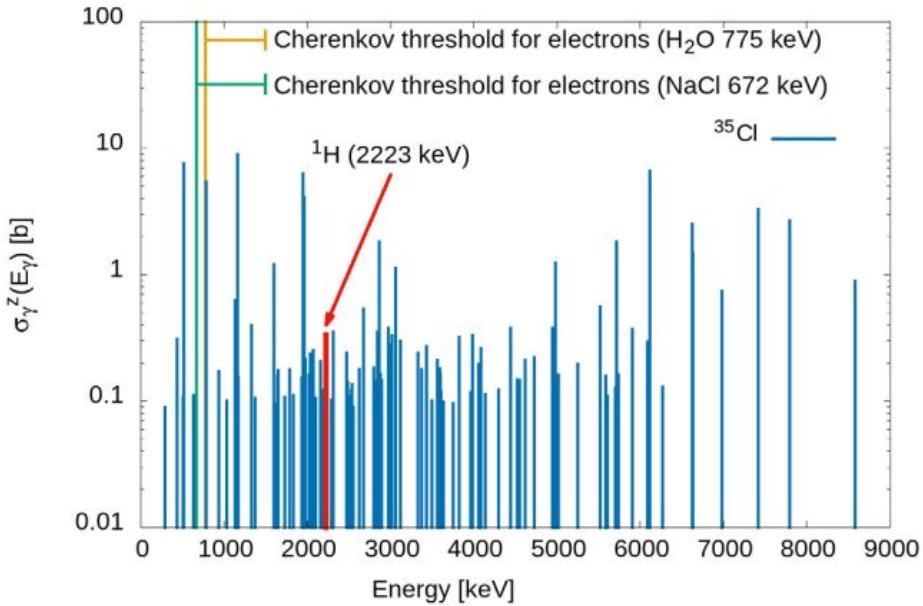
Detección de fotones



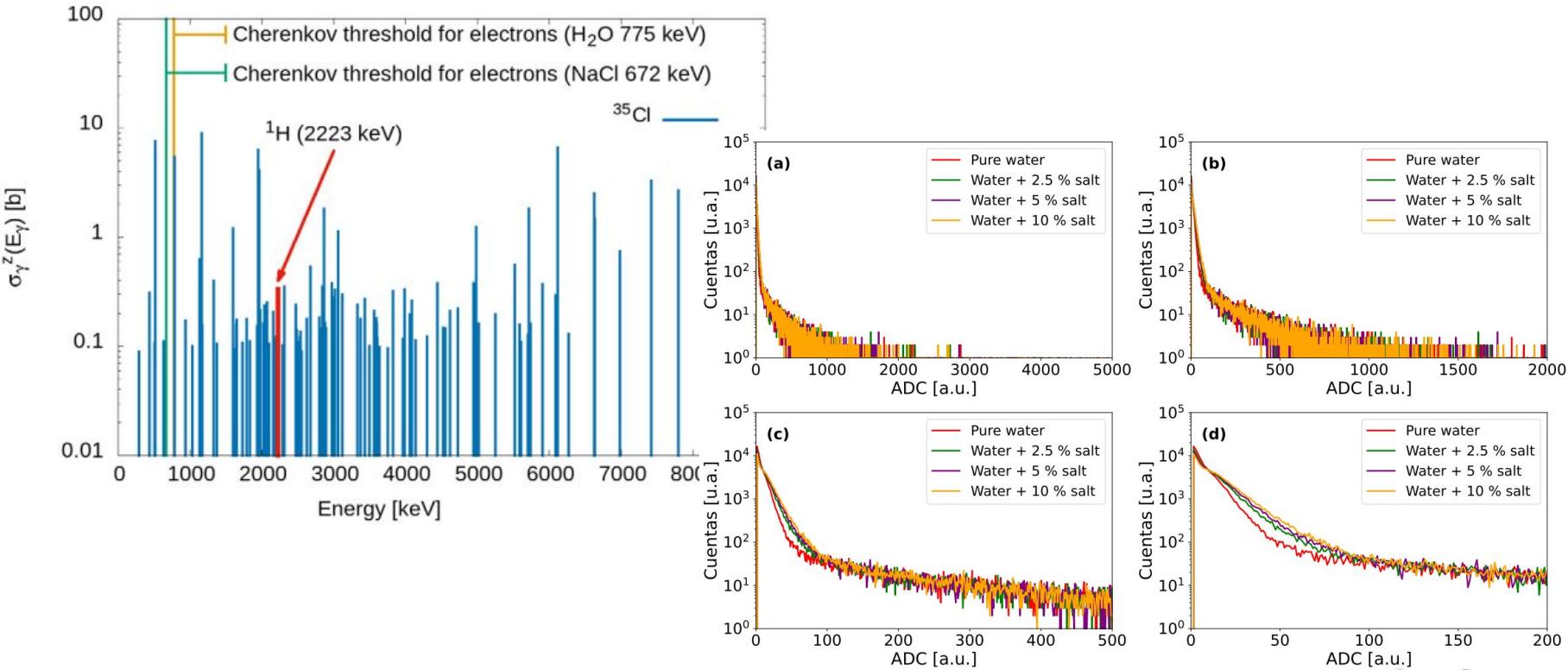
Detección de fotones



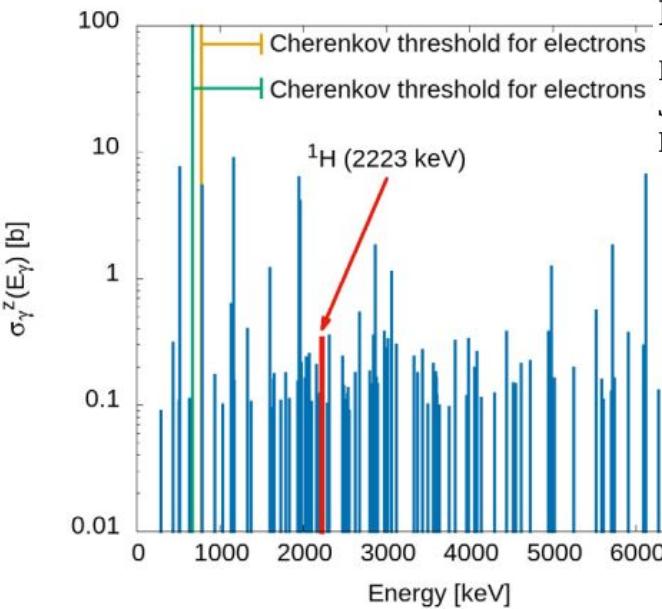
En el caso del “modo detección neutrones”



En el caso del “modo detección neutrones”

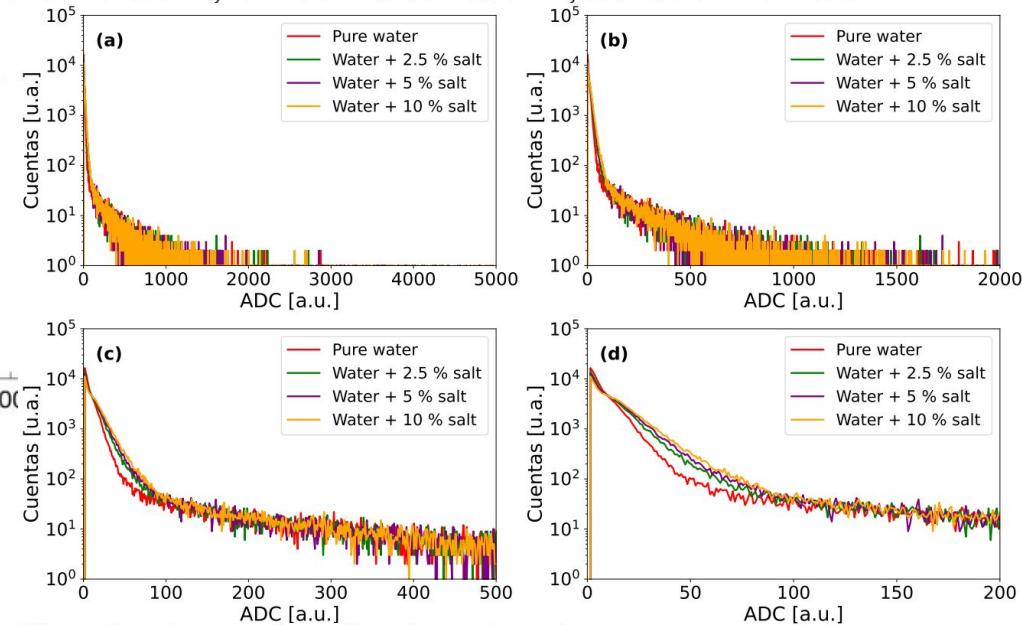


En el caso del “modo detección neutrones”



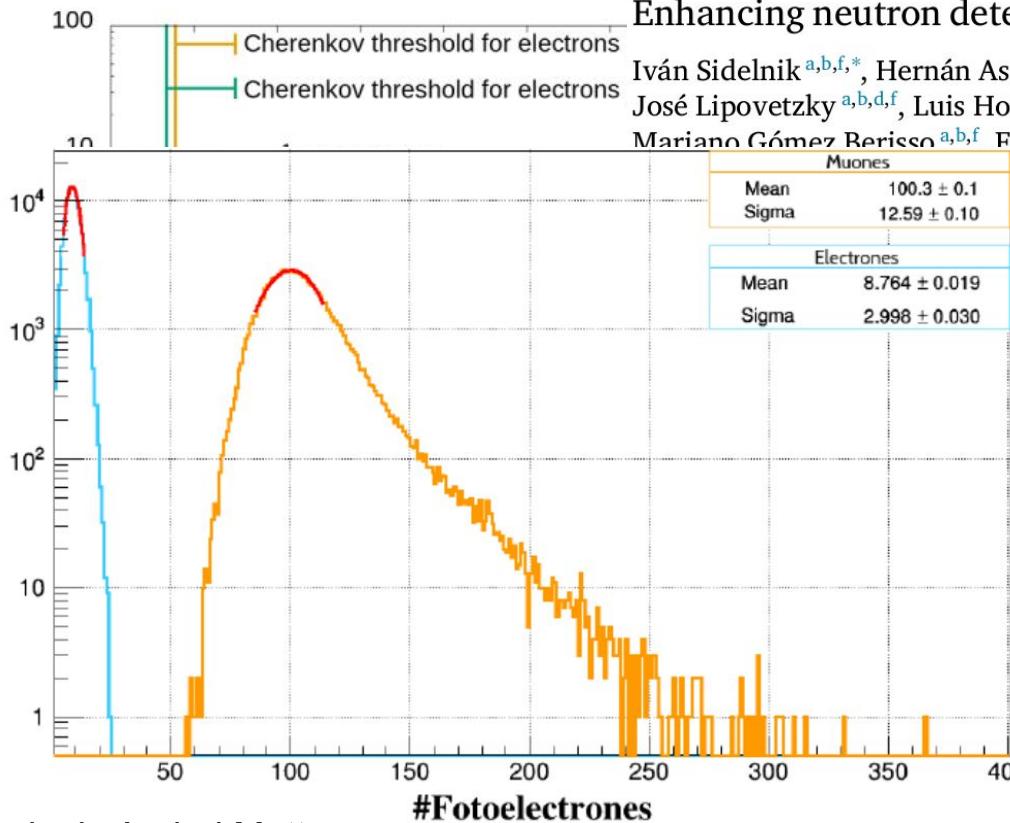
Enhancing neutron detection capabilities of a water Cherenkov detector

Iván Sidelnik ^{a,b,f,*}, Hernán Asorey ^{b,d,e,f}, Nicolás Guarin ^b, Mauricio Suárez Durán ^c, José Lipovetzky ^{a,b,d,f}, Luis Horacio Arnaldi ^{b,d,f}, Martín Pérez ^{b,d,f}, Miguel Sofo Haro ^{a,b,f}, Mariano Gómez Berisso ^{a,b,f}, Fabricio Alcalde Bessia ^{a,b,f}, Juan Jerónimo Blostein ^{a,b,f}



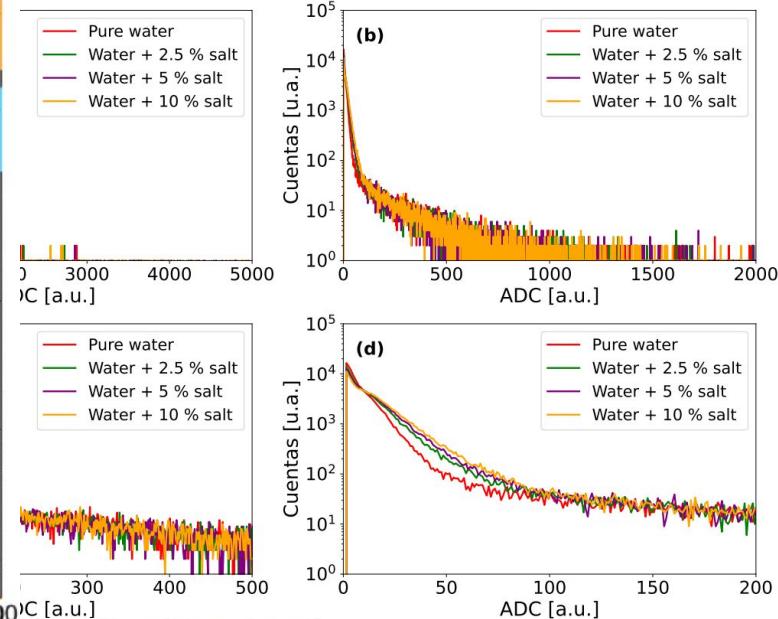
Enhanced water Cherenkov detector for soil moisture detection

En el caso del “modo detección neutrones”



Enhancing neutron detection capabilities of a water Cherenkov detector

Iván Sidelnik ^{a,b,f,*}, Hernán Asorey ^{b,d,e,f}, Nicolás Guarin ^b, Mauricio Suárez Durán ^c, José Lipovetzky ^{a,b,d,f}, Luis Horacio Arnaldi ^{b,d,f}, Martín Pérez ^{b,d,f}, Miguel Sofo Haro ^{a,b,f}, Mariano Gómez Berisso ^{a,b,f}, Fabrizio Alcalde Bessia ^{a,b,f}, Juan Jerónimo Blostein ^{a,b,f}



for soil moisture detection

Tesis de Andrei Motta

J. Betancourt^{a,b}, C. Sarmiento-Cano^{a,c}, I. Sidelnik^{d,e}, H. Asorey^f, Y. Domínguez-Ballesteros^a, L. Miranda-Leuro^a, Luis A. Núñez^{a,g}

En síntesis: la geometría es clave

En síntesis: la geometría es clave

Y el diseño también es importante: el efecto del Tyvek

La señal, o pulso, registrada/o es:

La convolución de la geometría del detector, las características ópticas del Tyvek, la absorción en el agua, la probabilidad de conversión en fotoelectrones, y finalmente la respuesta característica del PMT.

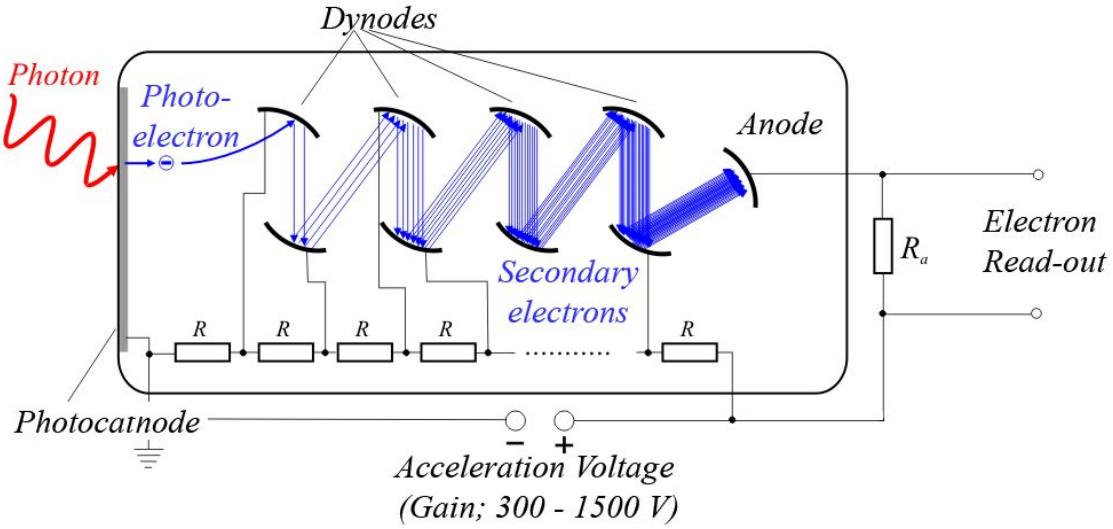
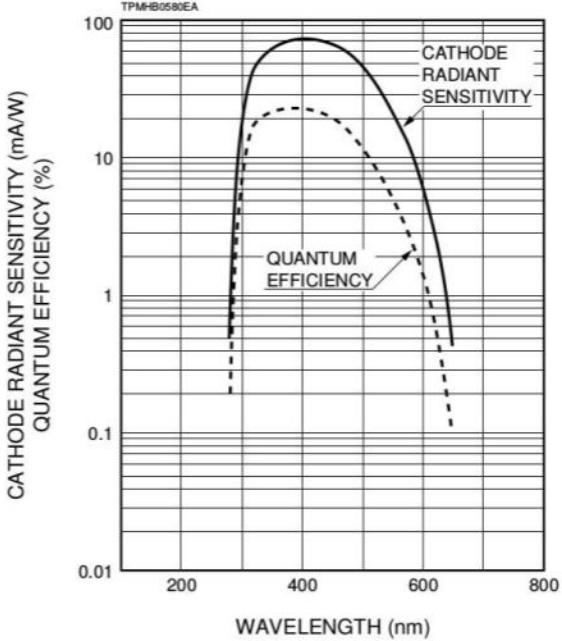
Simulación

La importancia de la difuminación de los fotones Cherenkov

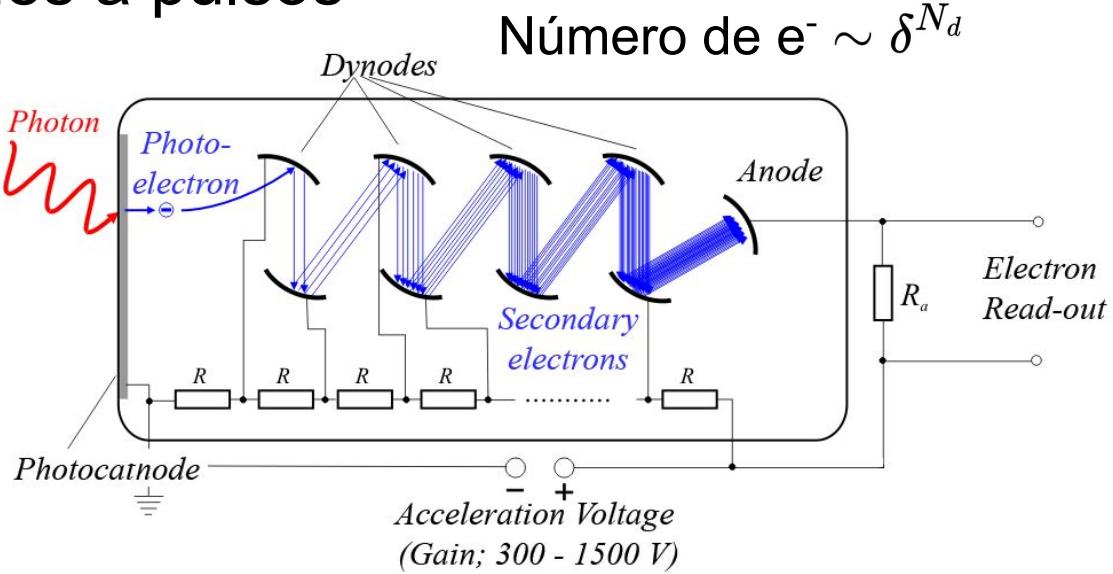
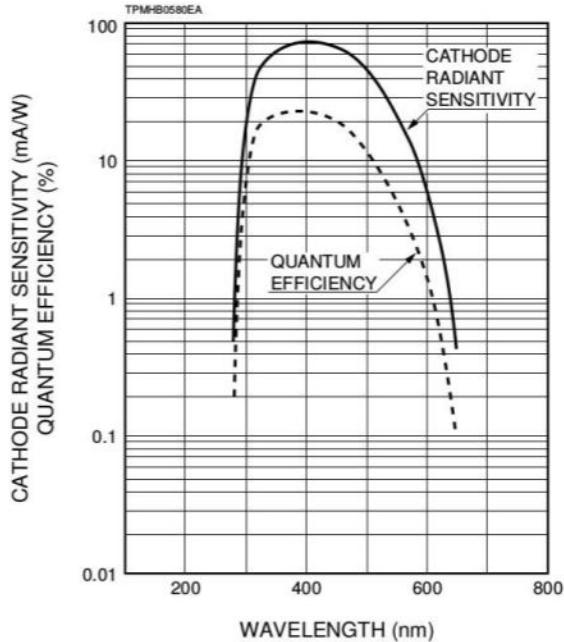
Qué opción nos conviene más:

- ¿Un efecto especular?
- ¿Un efecto difuminador?
- ¿Por qué?

Señal: De fotoelectrones a pulsos



Señal: De fotoelectrones a pulsos

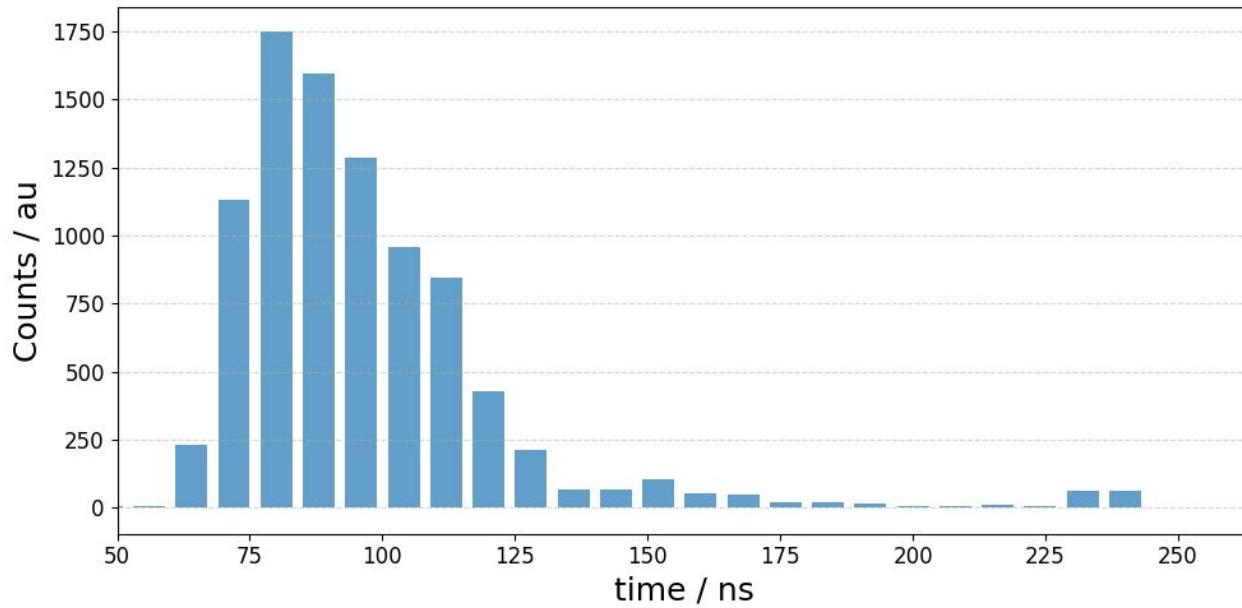


$$\text{Número de } e^- \sim \delta^{N_d}$$

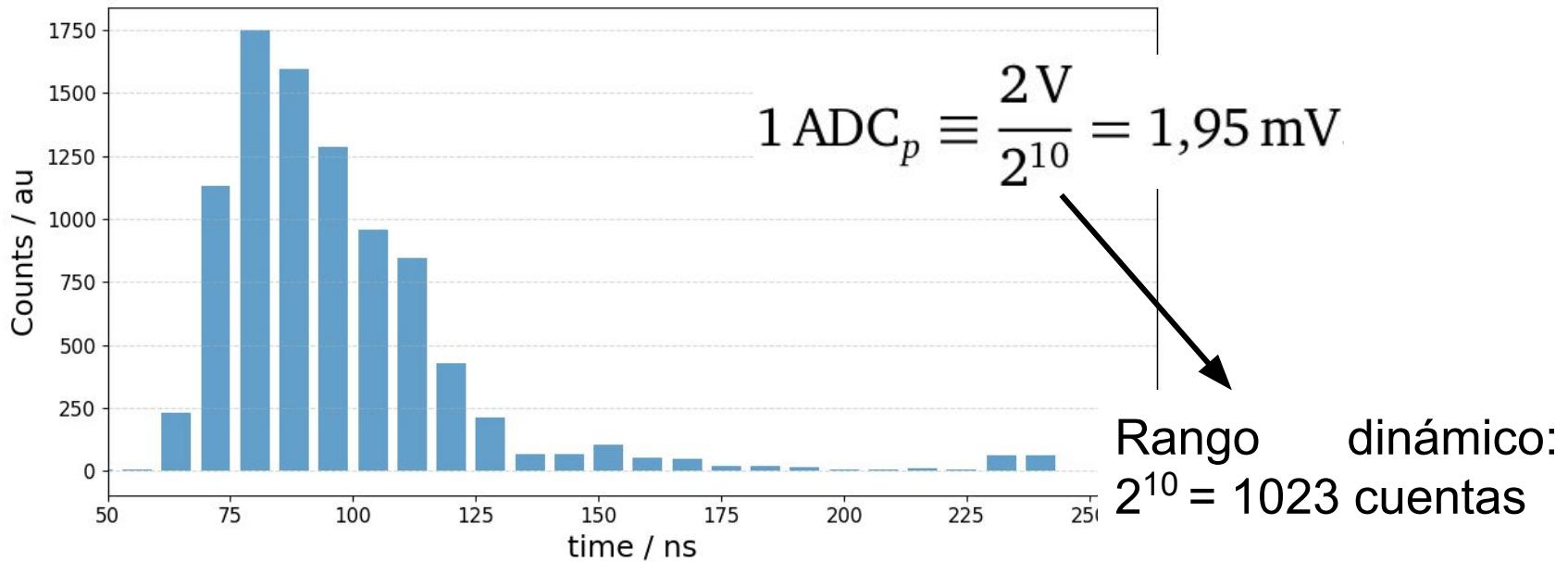
Respuesta estimada a un fotoelectrón (8 etapas)

$$V_{\max} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 10^7}{10^{-8} \text{ s}} \quad 50 \Omega \simeq 8 \text{ mV.}$$

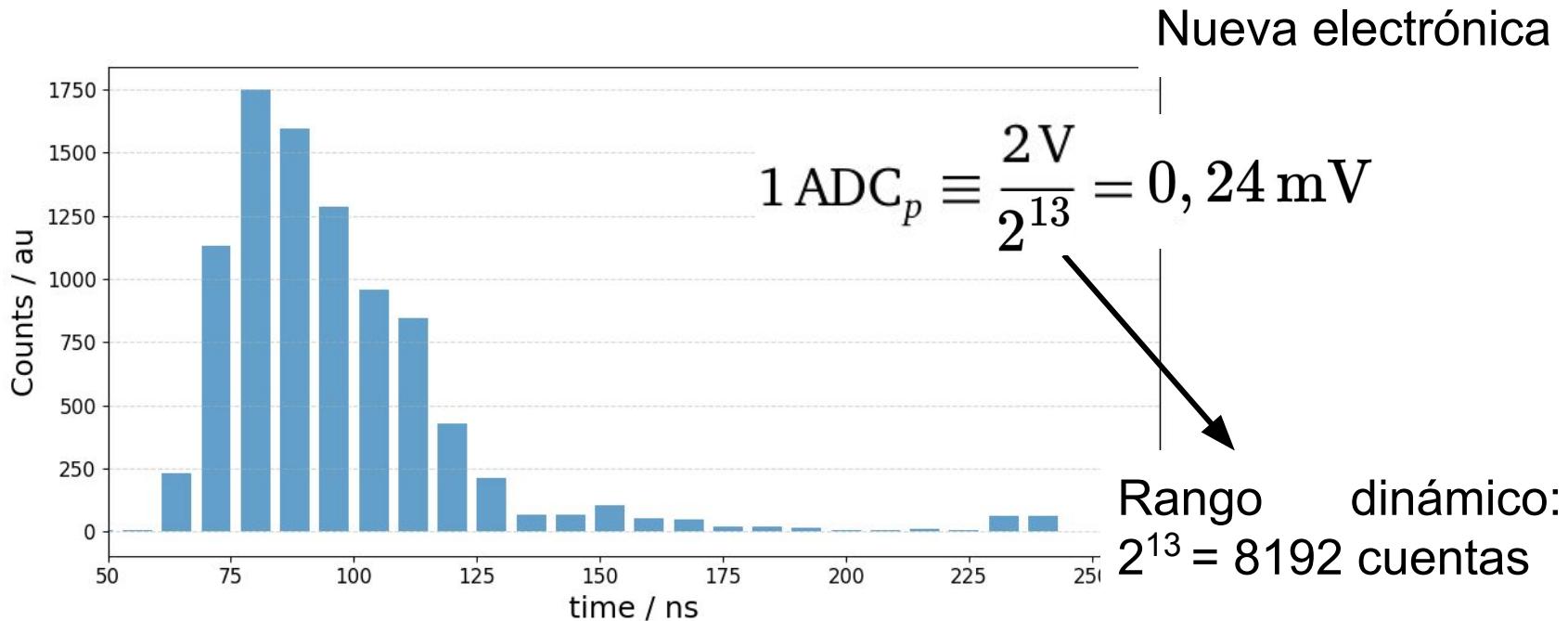
De los fotoelectrones a la electrónica



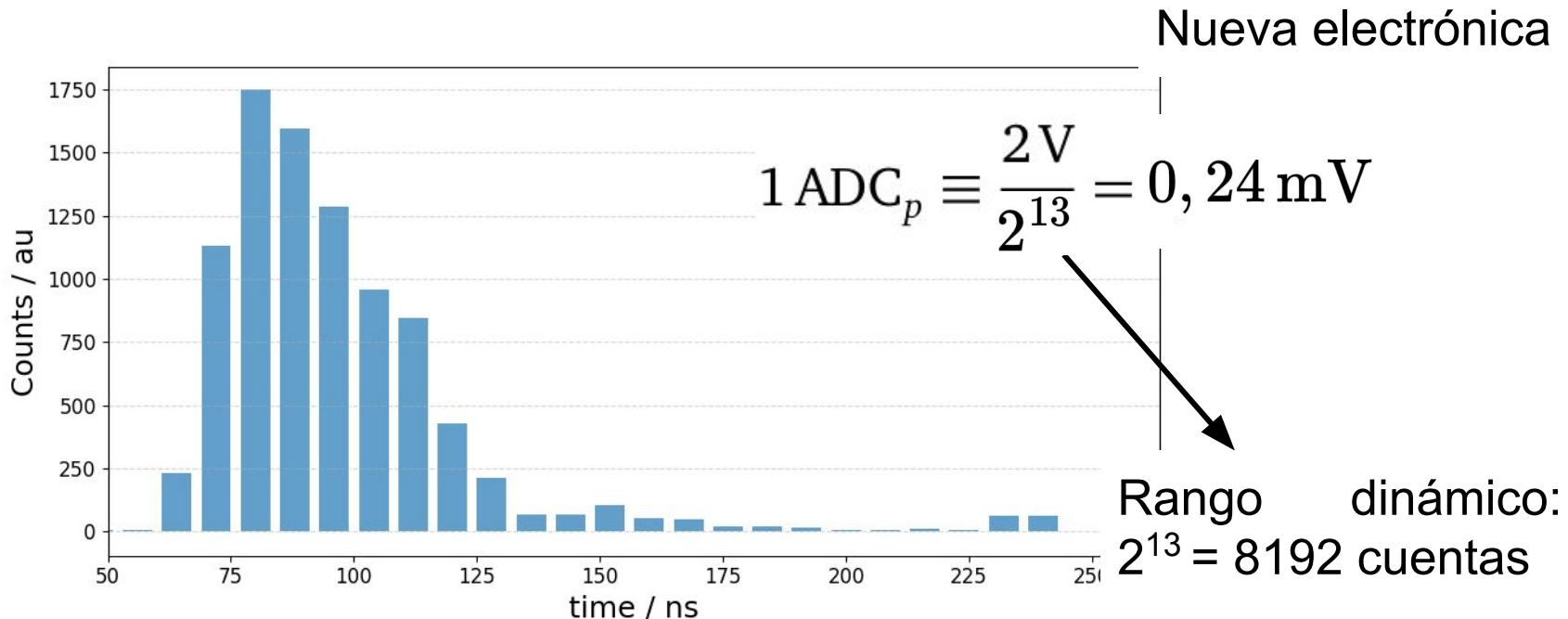
De los fotoelectrones a la electrónica



De los fotoelectrones a la electrónica



De los fotoelectrones a la electrónica



$$ADC_q \sim \sum_{\text{bin}_i=0}^{32} (ADC_p)_{\text{bin}_i} * \Delta t$$

¿ADCq como métrica de calibración?

¿ADCq cómo métrica de calibración?

En el observatorio Pierre Auger:

Definición 4.7

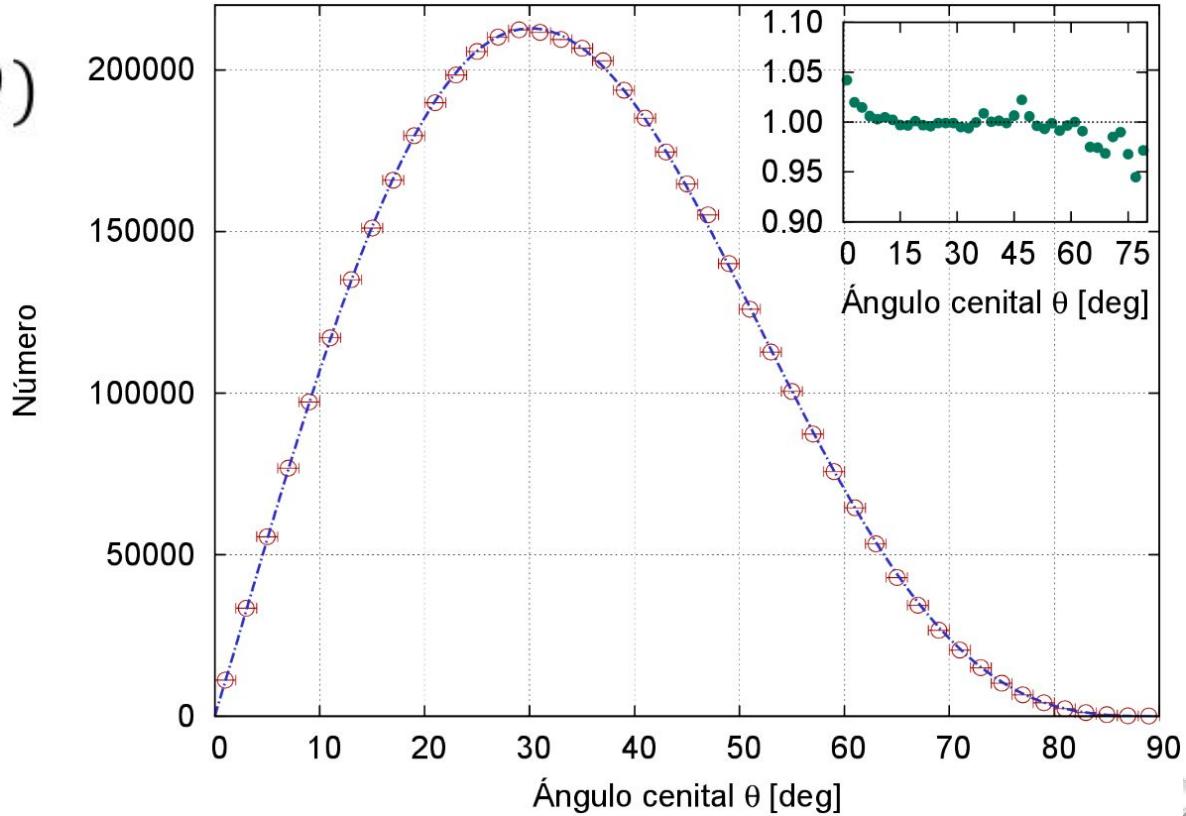
VEM_q o simplemente VEM (*por vertical-equivalent muon*) a la carga total depositada por un muón que atraviesa completamente a una estación del detector SD en forma vertical por el centro de la misma, en adelante llamado MCV (*muón central y vertical*).

Muones atmosféricos como fuente para VEM

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$$

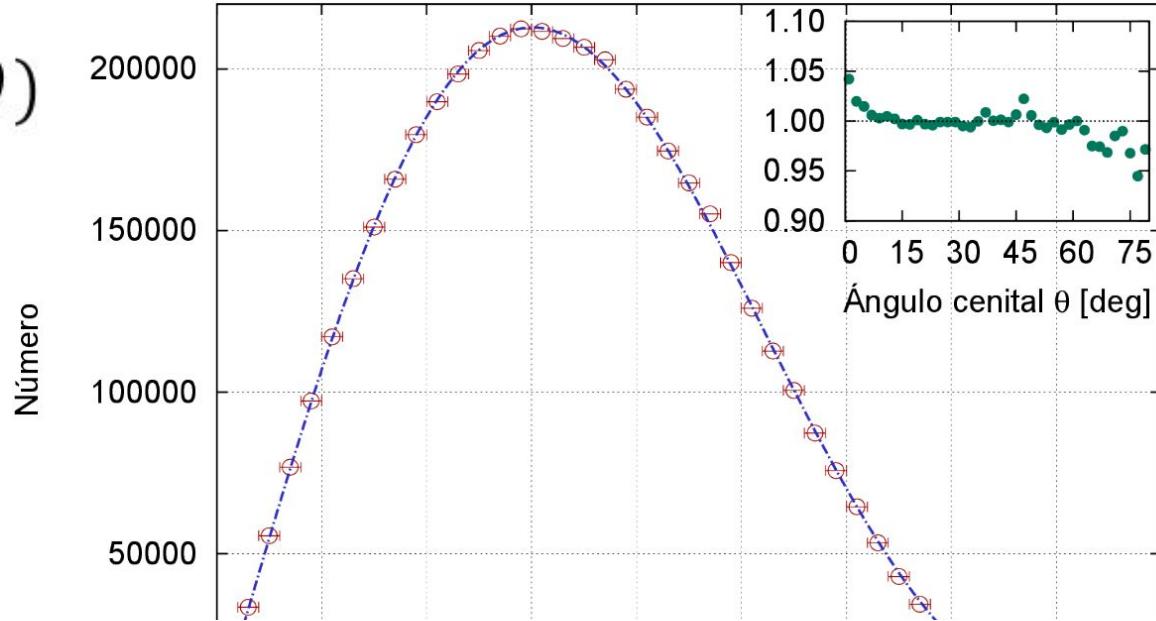
Muones atmosféricos como fuente para VEM

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$$



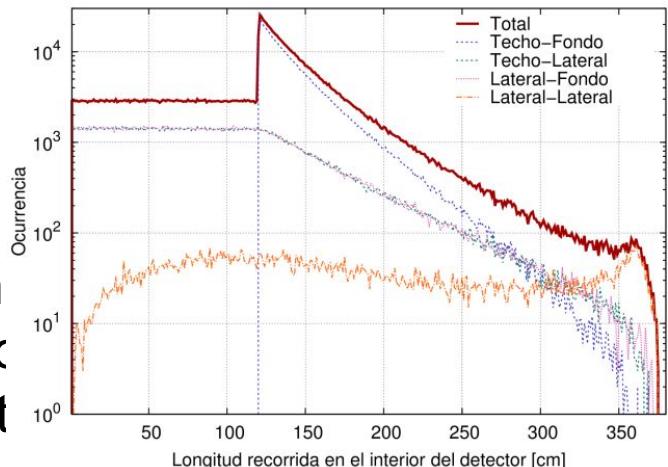
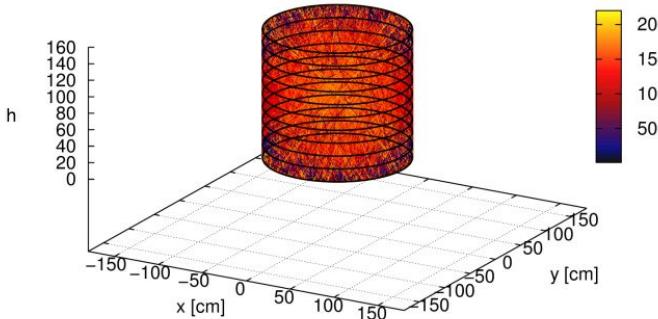
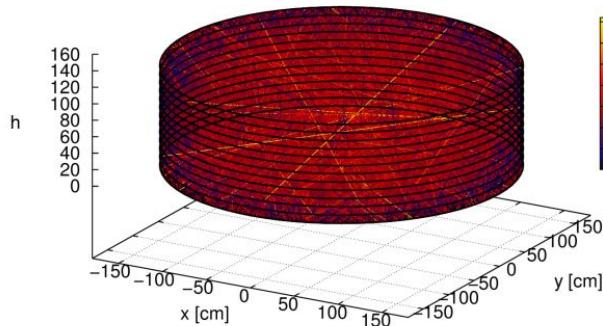
Muones atmosféricos como fuente para VEM

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$$

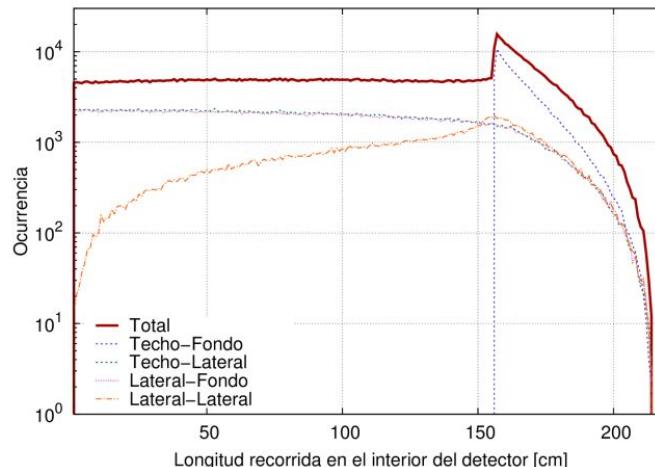


La señal producida en el detector sólo depende de la longitud de la trayectoria recorrida, dependerá entonces de la convolución de la geometría de la estación con la distribución angular del flujo de muones.

Muones atmosféricos como fuente para VEM

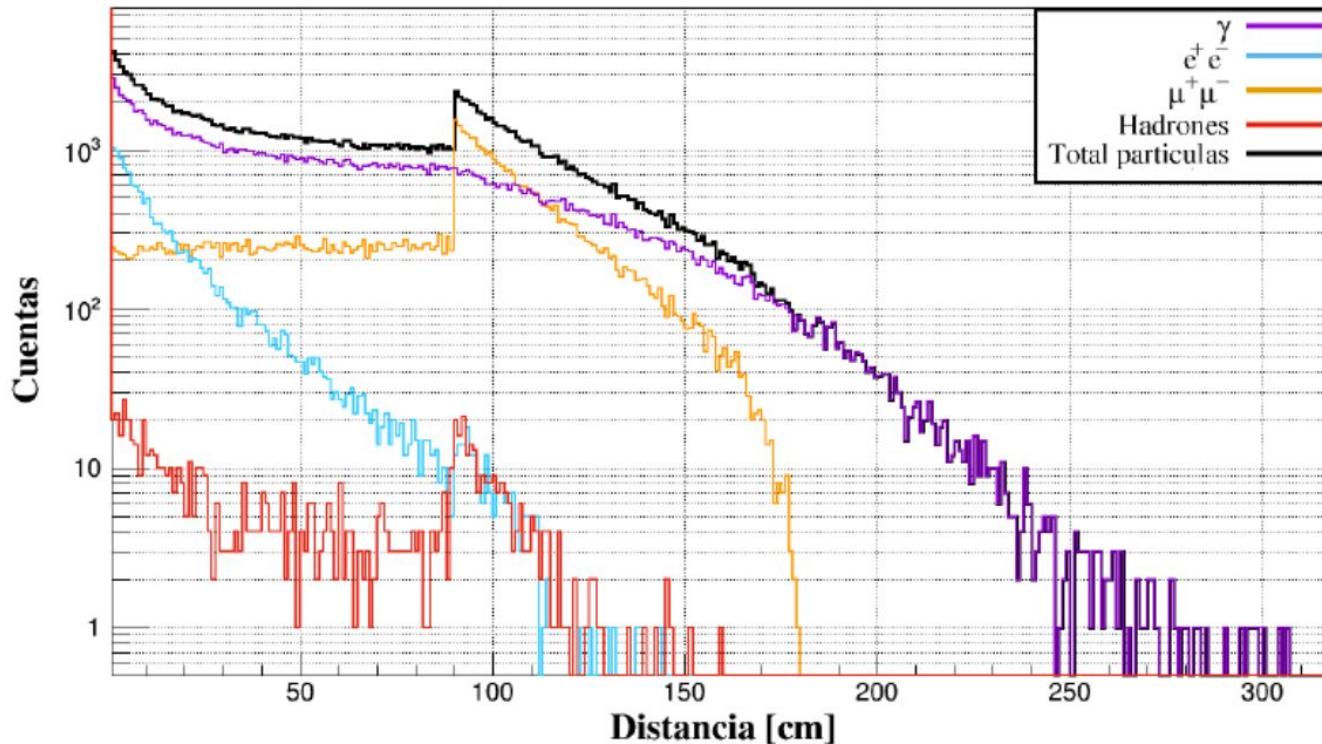


La señal
trayectorias
geometrías



d de la
de la
uones.

Muones atmosféricos como fuente para VEM



Resultados Andrei, WCD Chitaga

Ejercicio:

Construir la distribución de trazas (longitudes recorridas) por muones atmosféricos (usar resultados de las simulaciones) en el interior de sus respectivos detectores.

Preguntas?