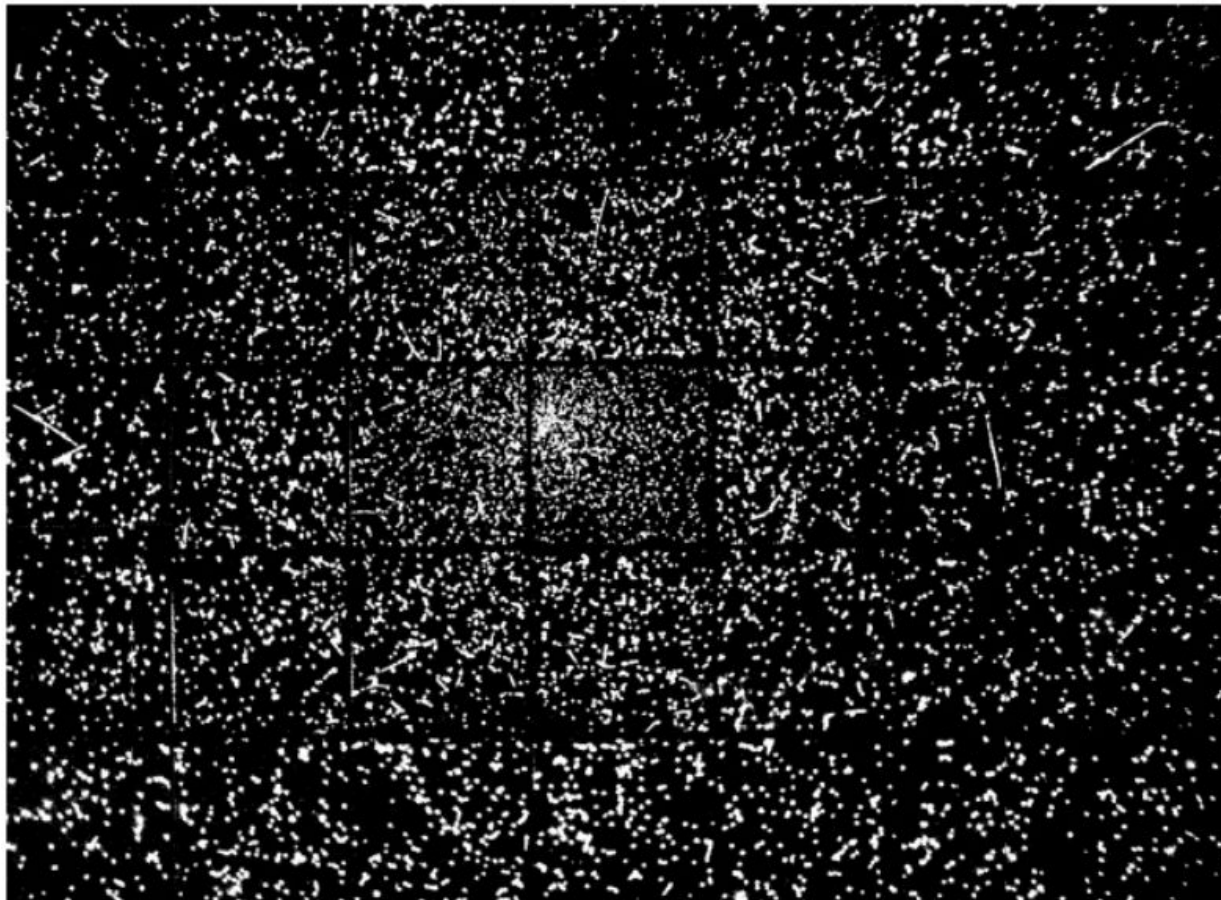


Coincidencias a nivel del suelo

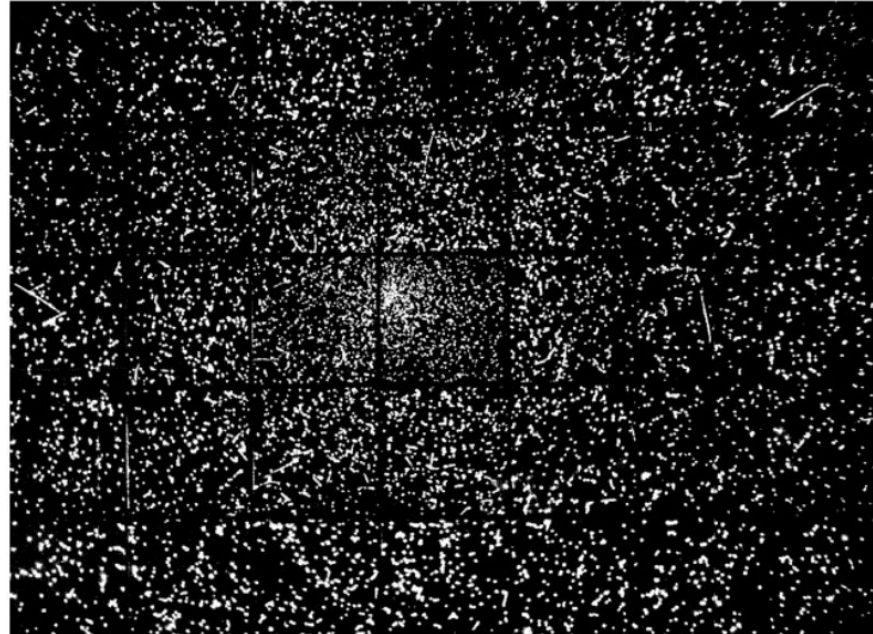
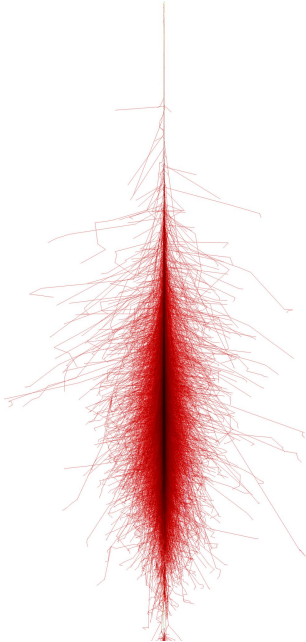
P. Auger, R. Maze y T. Grivet-Meyer en 1938:

“Hemos puesto en evidencia coincidencias entre contadores separados horizontalmente por 5 m, mostrando que algunas lluvias pueden cubrir áreas mayores a 25 m²”



Lluvias atmosféricas extendidas

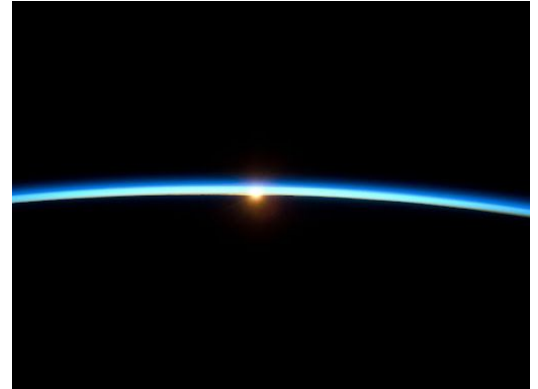
EAS, por sus siglas en inglés, son cascadas de partículas producida por la interacción de un RC primario con un núcleo de un elemento constituyente de la atmósfera



Profundidad atmosférica

profundidad atmosférica $X(l)$ como la masa de aire por unidad de área que atravesó una partícula a lo largo de la atmósfera desde el infinito hasta la posición l a lo largo de la trayectoria que describe su movimiento:

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



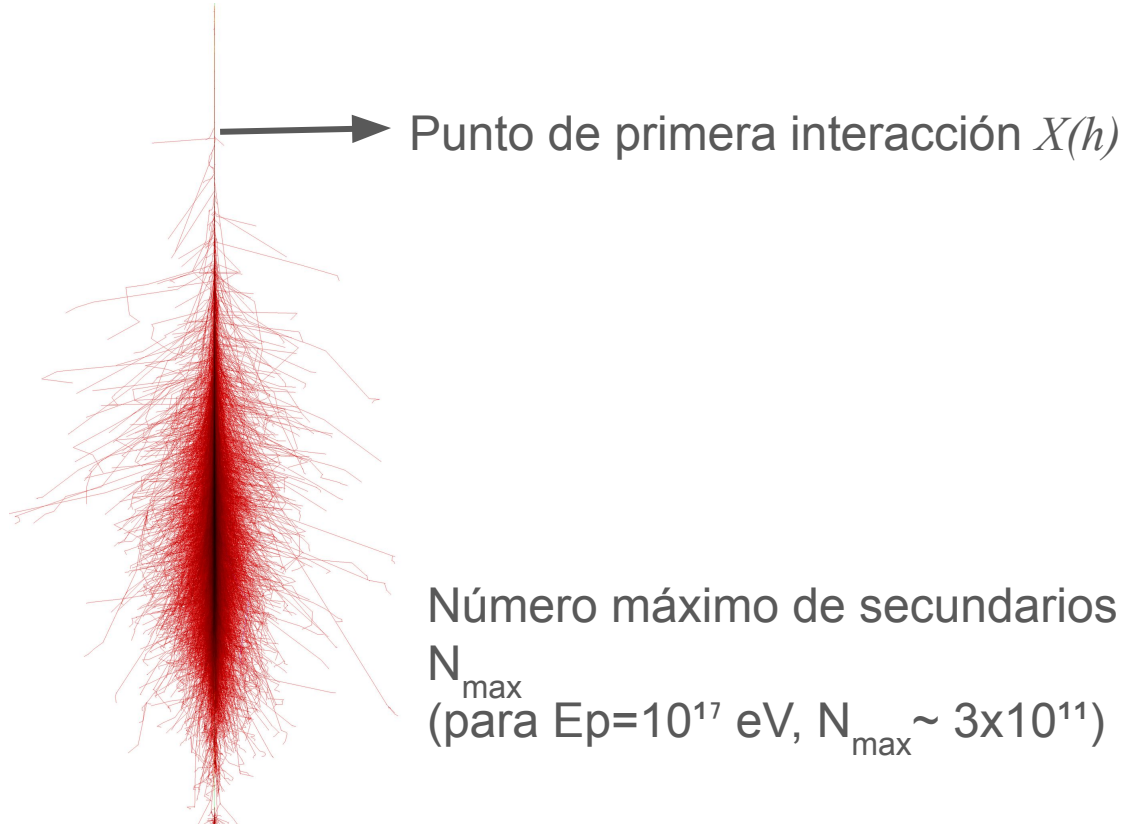
Profundidad atmosférica

profundidad atmosférica $X(l)$ como la masa de aire por unidad de área que atravesó una partícula a lo largo de la atmósfera desde el infinito hasta la posición l a lo largo de la trayectoria que describe su movimiento:

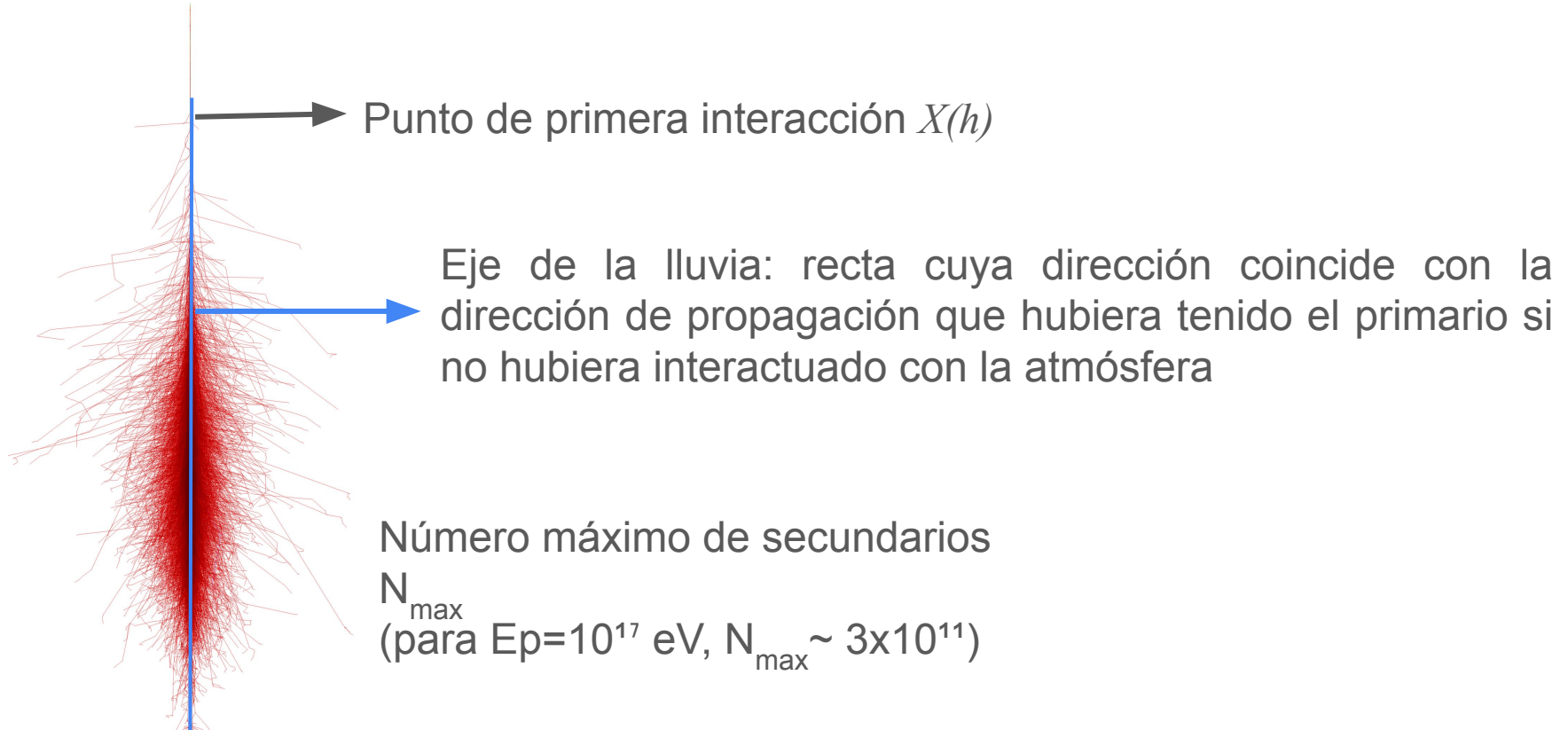
$$X(l) = \int_l^{\infty} \rho(l') dl'$$

$$X(h) = \frac{P(h)}{g(h)} \longrightarrow \text{La presión cambia localmente con el tiempo}$$

El desarrollo de la lluvia



El desarrollo de la lluvia

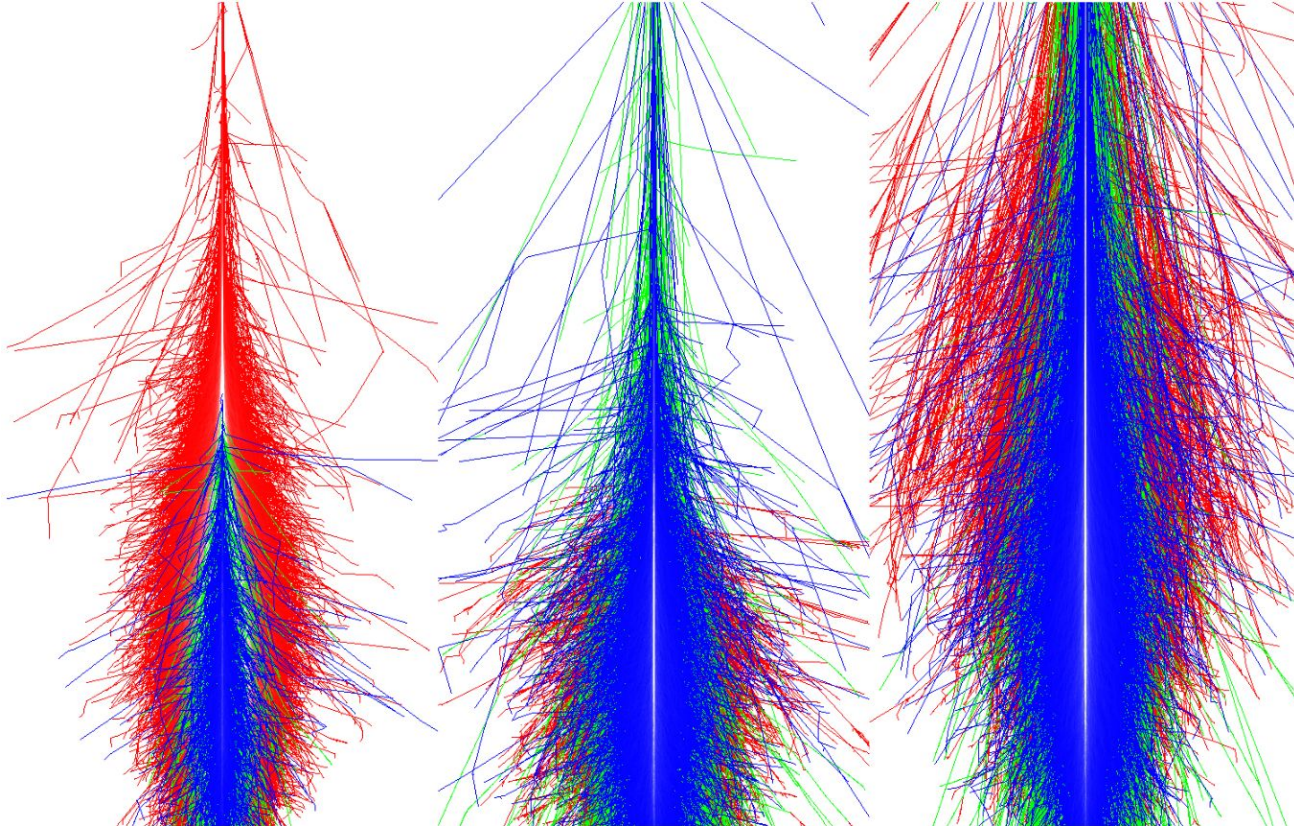


Componentes de las EAS

EM ($\gamma, e^\pm$): 85%

MU ($\mu^\pm$): 10%

HD ($p, n, \pi^\pm, \pi^0, K^\pm \dots$): 5%

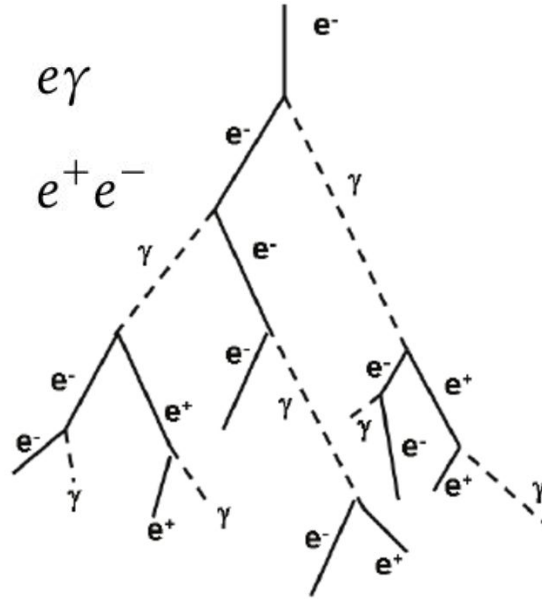


Lluvias iniciadas por un fotón o electrón

Dos canales de interacción

Bremsstrahlung $e \xrightarrow{ZY} e\gamma$

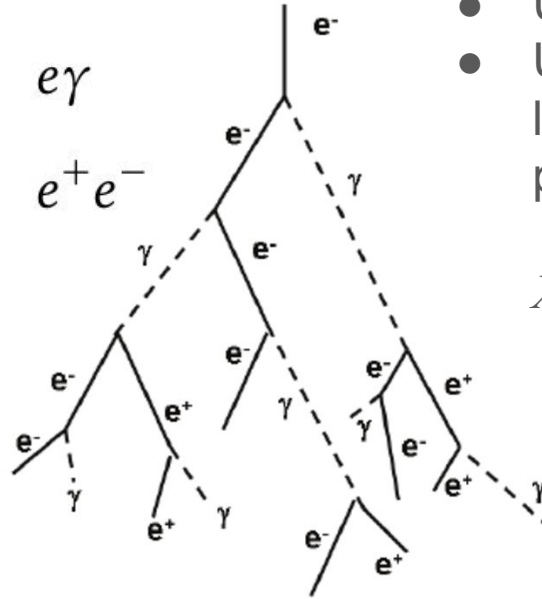
Pares $\gamma \xrightarrow{ZY} e^+e^-$



Lluvias iniciadas por un fotón o electrón

Dos canales de interacción

Bremsstrahlung $e \xrightarrow{\frac{A_Y}{Z}} e\gamma$
Pares $\gamma \xrightarrow{\frac{A_Y}{Z}} e^+e^-$



Longitud de interacción electromagnética:

- Un e^- pierde ~63% por frenado
- Un fotón recorre 7/9 del camino libre medio de producción de pares

$$X_{EM} = 37,1 \text{ gcm}^{-2}$$

Lluvias iniciadas por un fotón o electrón

Dos canales de interacción

Bremsstrahlung $e \xrightarrow{\frac{A_Y}{Z}} e\gamma$
 Pares $\gamma \xrightarrow{\frac{A_Y}{Z}} e^+e^-$

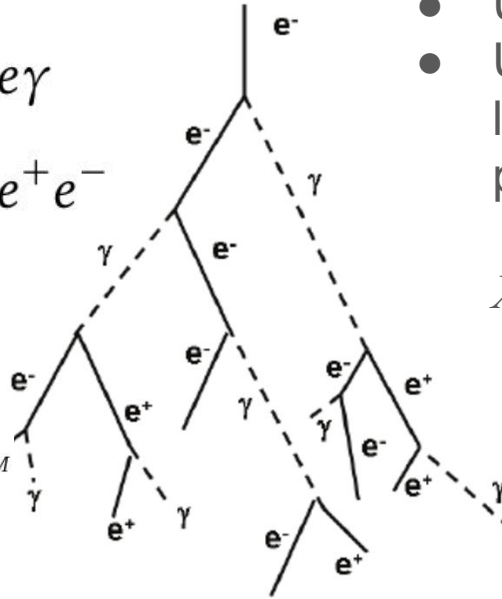
Longitud de interacción electromagnética:

- Un e^- pierde ~63% por frenado
- Un fotón recorre 7/9 del camino libre medio de producción de pares

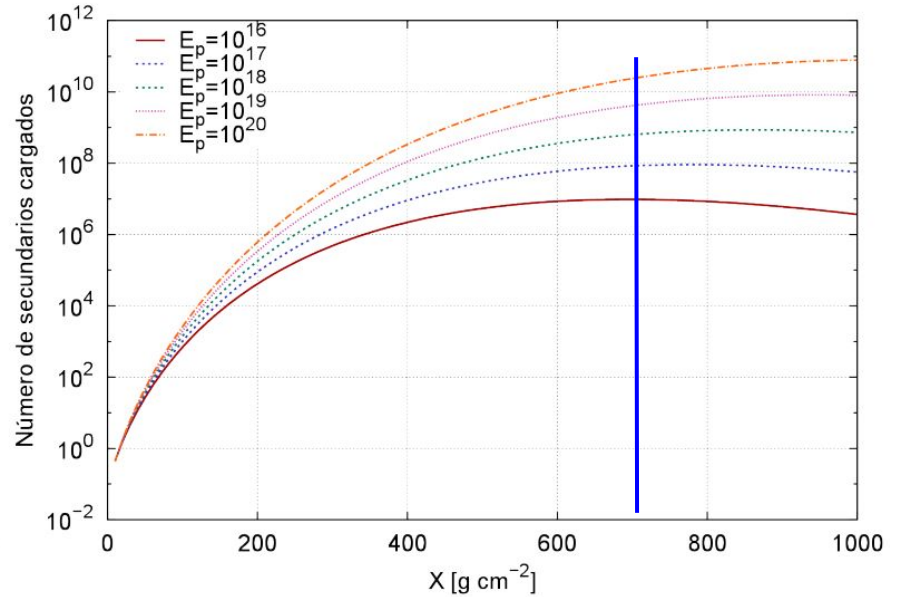
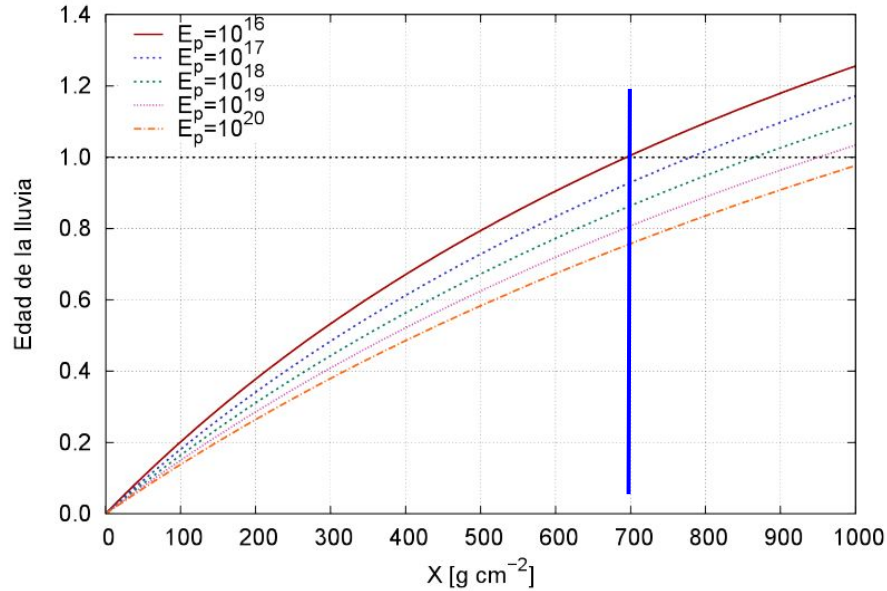
$$X_{EM} = 37,1 \text{ gcm}^{-2}$$

$$N_{\text{máx}} = \frac{E_0}{E_c^{\text{EM}}} \rightarrow \frac{E_0}{E_c^{\text{EM}}} = 2^{X_{\text{máx}}^{\text{EM}}/\lambda_{EM}}$$

$$X_{\text{máx}}^{\text{EM}} \sim \log_2 \left(\frac{E_0}{E_c^{\text{EM}}} \right)$$



Lluvias iniciadas por un fotón o electrón



Radio de Molière

X_m a la dispersión en la dirección transversal que experimenta un electrón con energía igual a E_c^{EM} luego de atravesar una cantidad de materia igual a X_{EM} , y está dado por:

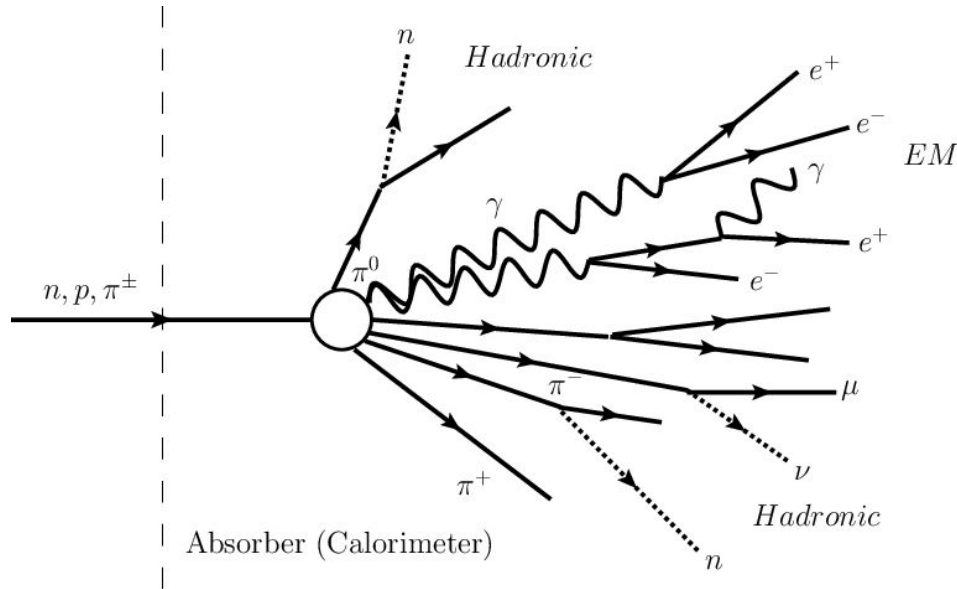
$$X_m = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha_{EM}} \frac{m_e c^2}{E_c^{EM}}} X_{EM} \simeq 9,3 \text{ g cm}^{-2}$$

Experimentalmente se verifica que aproximadamente el 90 % de la energía depositada por la cascada se encuentra contenida en un cilindro de radio X_m

$$R_m(h) \equiv \frac{X_m}{\rho(h)}$$

Al nivel del mar y en condiciones atmosféricas estándar, $R_m \sim 78 \text{ m}$.

Lluvias iniciadas por un hadrón



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad [99,99\%]$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \quad [0,01\%]$$

Origen componente muónica

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad [98,8\%]$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^- \quad [1,2\%]$$

Origen de la componente EM

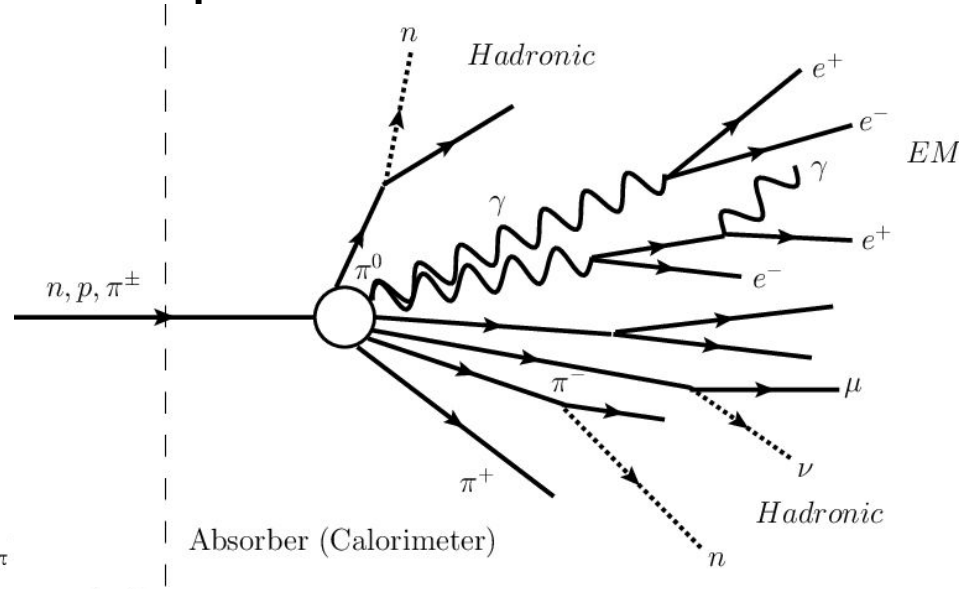
Lluvias iniciadas por un hadrón: Heitler-Matthews

En el modelo de Heitler–Matthews para la **cascada hadrónica**, la suposición estándar es:

- en cada interacción hadrón–aire se producen n_{tot} piones,
- con fracciones isospín-simétricas: $\sim 2/3$ cargados ($\pi^\pm$) y $\sim 1/3$ neutros (π^0)

Es decir, la cascada produce N_{ch} cargados y $\frac{1}{2} N_{ch}$ neutros en promedio.

Lluvias iniciadas por un hadrón: Heitler-Matthews



X_{max} : Punto en el que la componente EM alcanza su máximo desarrollo.

$$N_\mu = (N_{ch})^{\beta_\pi}$$

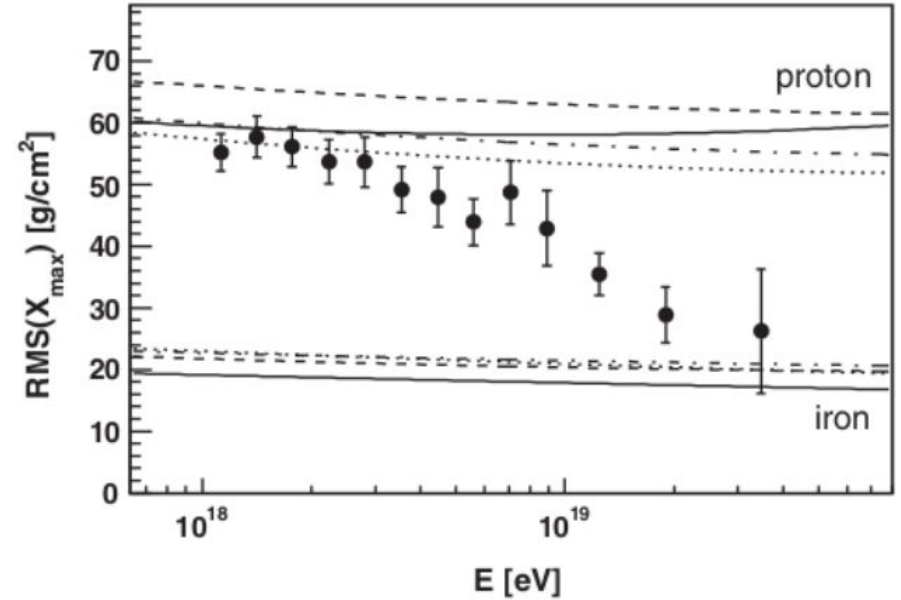
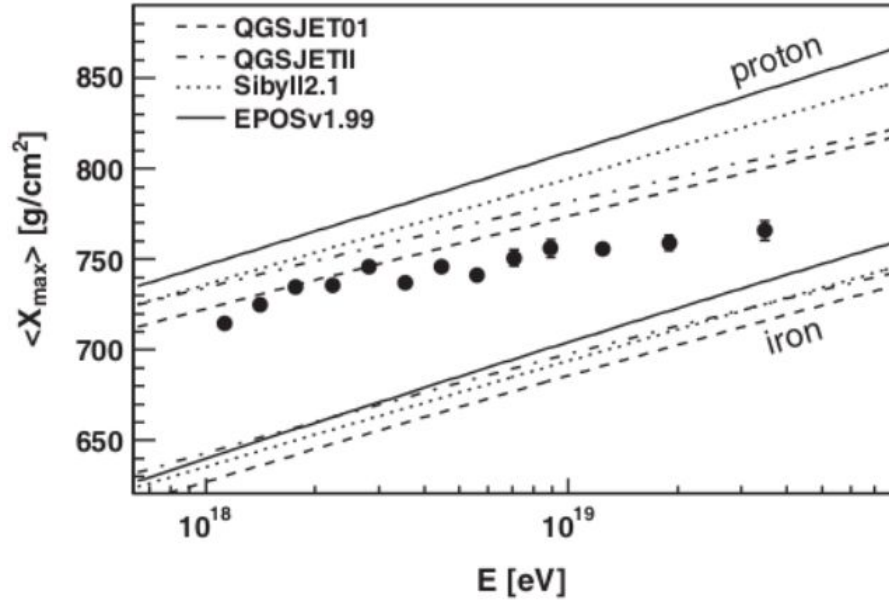
$$\log_{10} N_\mu = \beta_\pi \log_{10} \left(\frac{E_p}{E_\pi} \right)$$

$$N_\mu = \left(\frac{E_p}{E_\pi} \right)^{\beta_\pi} \quad \beta \equiv \frac{\ln(10)}{\ln(1.5N_{ch})}$$

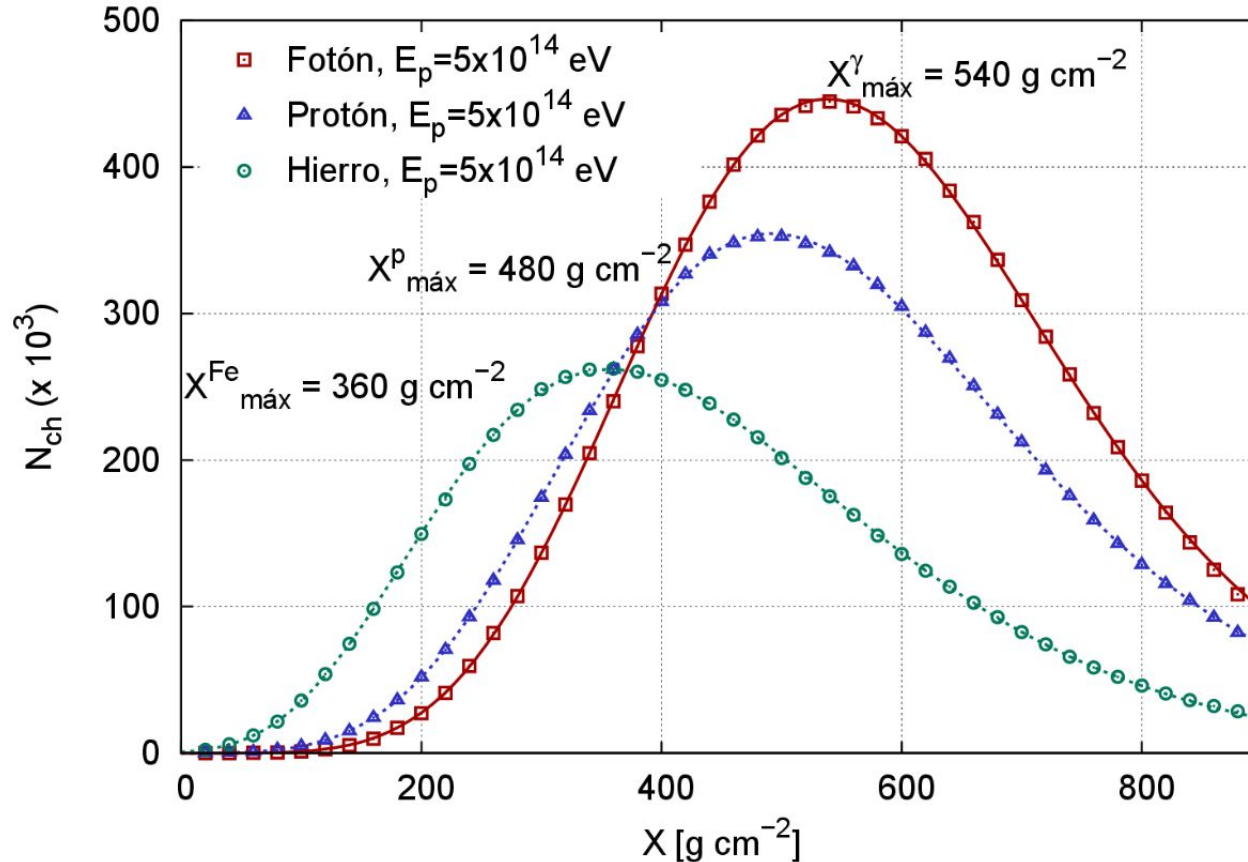
$$X_{max}^H = X_0 + X_{max}^{EM} - 126 \text{ g cm}^{-2}$$

$$X_{max}^H = X_0 + X_{max}^{EM} - X_{EM} [\ln(3N_{ch}) + \ln A]$$

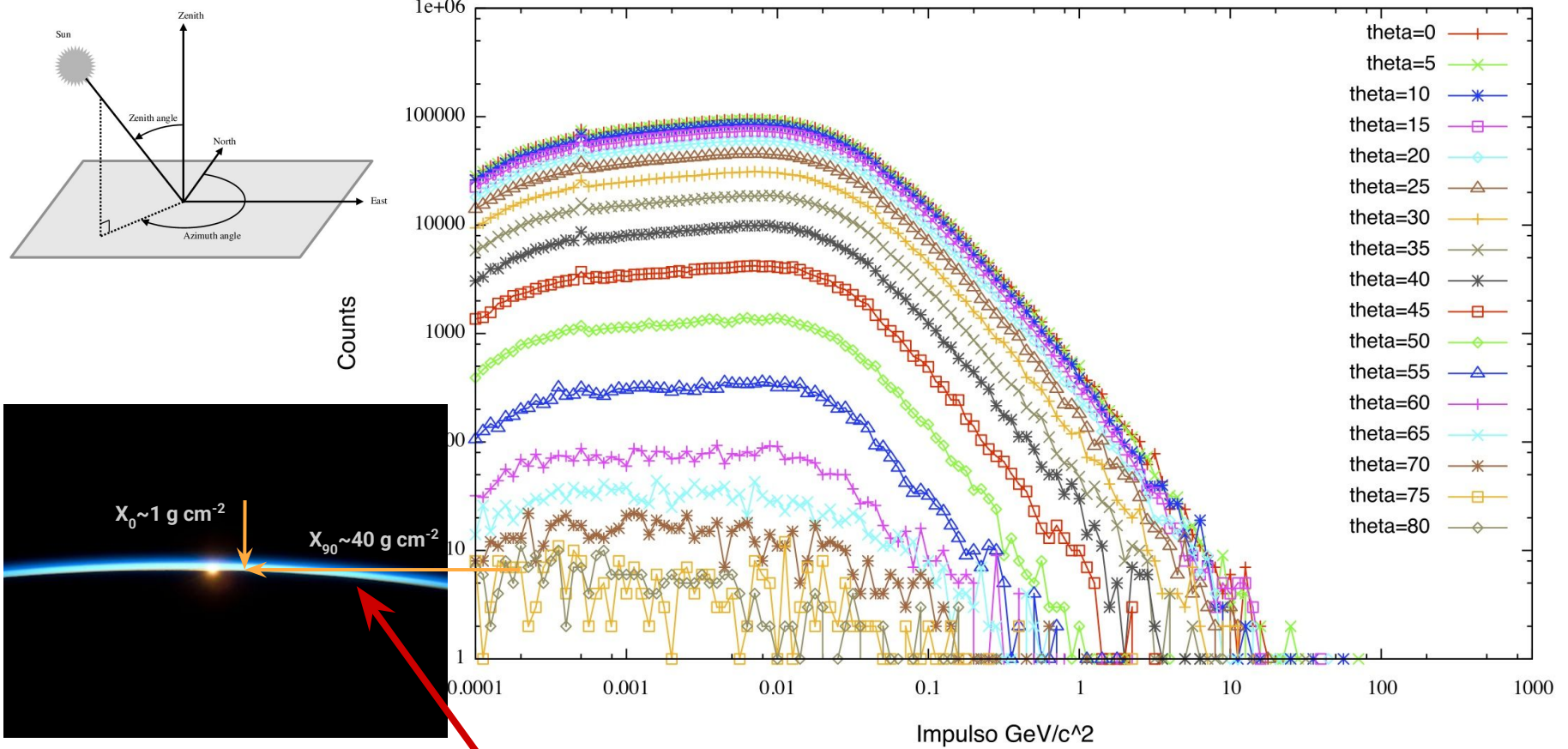
Lluvias: Proton Vs Fe



Desarrollo longitudinal de las lluvias



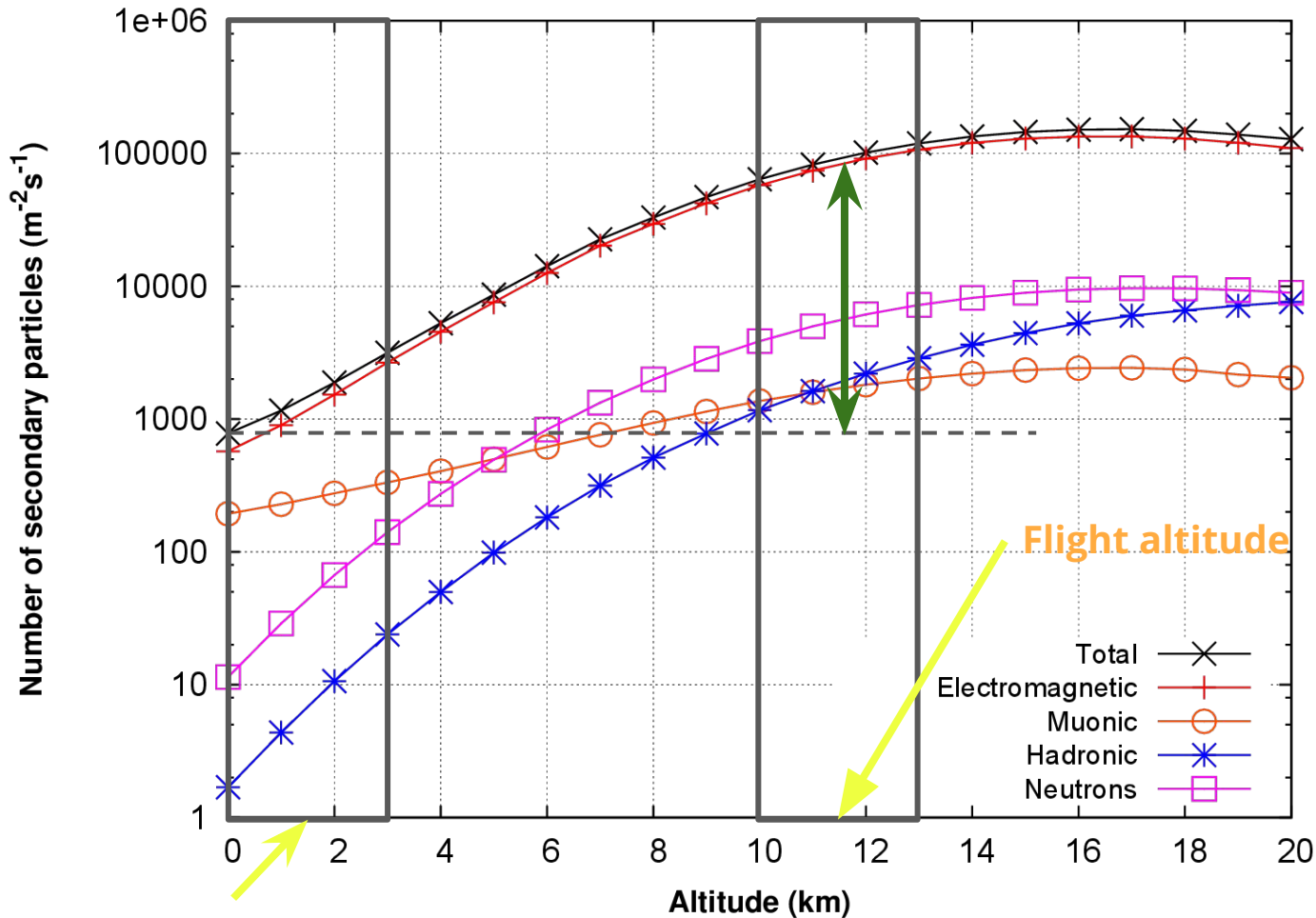
Atmospheric effect: zenith angle



Not obvious take-home message: the atmosphere is curved, and therefore the Earth is curve

from my lectures

Altitude effect



99% of world population

Gracias